

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»

Академия электротехнических наук Российской Федерации

при поддержке

Российского фонда фундаментальных исследований  
(проект №15-08-20353-г)

## **МАТЕРИАЛЫ**

Международной научно-технической конференции

# **«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ»**

(XVIII Бенардосовские чтения)

**27-29 мая**

III том

**Электротехника**

Иваново 2015

В III томе материалов конференции представлены статьи, отражающие результаты научных исследований в области динамики, надежности и диагностики механических систем; методов анализа и синтеза систем управления электроприводами и установками; электромеханики и МЖУ; микроэлектронных и микропроцессорных управляющих устройств и систем; технологии машиностроения; математического моделирования, информационных систем и технологий; мехатронных систем и технологий; релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем.

### **Редакционная коллегия:**

**Тарарыкин С.В.**, ректор, д.т.н., профессор – председатель;  
**Тютиков В.В.**, проректор по НР, д.т.н., профессор;  
**Шуин В.А.**, каф. АУЭС, д.т.н., профессор;  
**Казakov Ю.Б.**, зав каф. ЭМ, д.т.н., профессор;  
**Полетаев В.А.**, зав. каф. ТМС, д.т.н., профессор;  
**Воробьев В.Ф.**, зав. каф. ВЭТФ, к.т.н., доцент;  
**Косяков С.В.**, зав. каф. ПОКС, д.т.н., профессор;  
**Колибаба В.И.**, зав. каф. ЭиОП, д.э.н., профессор;  
**Бушуев Е.Н.**, д.т.н., профессор каф. ХХТЭ;  
**Клюнина С.В.**, начальник УИУНЛ.

ISBN 978-5-00062-079-3  
ISBN 978-5-00062-082-3 (Т. 3)

© ФГБОУВПО «Ивановский государственный  
энергетический университет  
имени В.И. Ленина», 2015.

## СЕКЦИЯ «ДИНАМИКА, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

УДК 539.3/616.71

И.В. КИРПИЧЁВ<sup>1</sup>, к.м.н., доцент  
А.Д. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, Е.П. СЕРЕГИНА<sup>1</sup>, студенты  
Л.Б. МАСЛОВ<sup>2</sup>, д.ф.-м.н., доцент  
С.В. ВИХРЕВ<sup>2</sup>, вед. инженер

<sup>1</sup>Ивановская государственная медицинская академия  
153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 34

<sup>2</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: maslov@tipm.ispu.ru*

### Экспериментальное исследование изменения упругих характеристик губчатой костной ткани при диабете

**Аннотация.** Проведена экспериментальная оценка прочностных характеристик губчатой кости головки бедра пациентов, страдающих сахарным диабетом. Для эксперимента использовался биологический материал, полученный в результате операции тотального эндопротезирования тазобедренного сустава. По полученным результатам рассчитывались модуль Юнга и предел прочности губчатой ткани.

**Ключевые слова:** губчатая костная ткань, диабет, механические свойства.

I.V. KIRPICHEV, candidate of medical science, docent  
A.D. MOROZOV, E.P. CERYEGINA, students  
L.B. MASLOV, doctor of physics and mathematics, docent  
C.V. VIHREV, engineer

Ivanovo State Medical Academy  
153003 Ivanovo, Sheremetevskiy Ave., 34  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: maslov@tipm.ispu.ru*

### Experimental study of the trabecular bone elastic properties change in condition of diabetes

**Abstract.** Experimental evaluation of the strength characteristics of cancellous bone of the femoral head of patients with diabetes is done. The biological material obtained as a result of total hip replacement surgery was used for the experiment. Based on the test results, Young's modulus and tensile strength of the trabecular bone were calculated.

**Key words:** trabecular bone, diabetes, mechanical properties.

Заболевания и травмы тазобедренного сустава являются одними из наиболее распространенных патологий, сопряженных с высоким риском инвалидизации пациентов. Количество оперативных вмешательств на данном сегменте в последние годы увеличилось. Сахарный диабет является одним из наиболее тяжелых состояний, сопровождающих пациентов с заболеваниями и травмами опорно-двигательного аппарата. Для правильной выработки лечебной тактики данной категории больных, необходимо знать каким образом изменяются механические свойства костной ткани при эндокринологическом заболевании. Знание этих механизмов позволяет детальнее углубиться в процессы патогенеза заболеваний опорно-двигательной системы, эндокринной систем человека, что открывает новые перспективы в вопросах профилактики и лечения патологии. В литературе нет однозначного ответа на вопрос, касающийся изменений механических свойств костной ткани. Отмечен более высокий риск переломов у пациентов с сахарным диабетом, в то же время есть данные, основанные на денситометрии, свидетельствующие как о повышенной, так и пониженной минеральной плотности костной ткани. Прямых экспериментальных данных в доступной литературе найдено не было.

Большая часть прямых (разрушающих) исследований, проводимых в области биомеханики костей, используют в качестве материала образцы, взятые у животных. Часть опытов проводится на биопсийном материале, взятом у человека. Однако чаще всего в таком случае образцы тканей берутся из гребня подвздошной кости, которая не является нагружаемой частью скелета, поэтому полученные в результате подобных исследований результаты не в полной мере отражают состояние свойств костей из нагружаемых зон. Так же существенным недостатком значительной части исследований является то, что материал, используемый в эксперименте, являлся высушенным. Однако известно, что характеристики сухого костного материала существенно отличаются от кости, не подвергавшейся высушиванию. Так Dempster W.T. и Liddicoat R.T. в 1952 году экспериментально доказали, что высушивание кости увеличивает её прочность и модуль упругости при сжатии и растяжении на 25-30 %. Проводимые в последние годы исследования так же подтверждают высокую значимость гидратного слоя костной ткани в механизмах, определяющих механические свойства кости в физиологических условиях. Эти данные показывают необходимость исследования образцов костной ткани, не подвергнутых высушиванию.

Целью настоящей работы явилась экспериментальная оценка упругих характеристик (модуль упругости) губчатой кости головки бедра, пораженной коксартрозом и сахарным диабетом.

Для оценки прочностных характеристик губчатой кости использованы головки бедренных костей, полученные в результате операции тотального эндопротезирования тазобедренного сустава у пациентов с диагнозами «Идиопатический коксартроз 3 стадии». Длительность



заболеваний составляла в случае коксартроза 8 лет  $\pm$  3 года. Всего было отобрано 9 головок. У двух пациентов кроме заболевания тазобедренного сустава диагностирован компенсированный сахарный диабет 2 типа. Таким образом, механические свойства данных пациентов (исследуемая группа) сравнивалась с контрольной группой (7 пациентов). Головки сразу после удаления помещались в физиологический раствор, где находились в среднем 3 часа  $\pm$  45 минут, при комнатной температуре, и после чего распиливались фронтально на 2 части. Далее цилиндрической фрезой диаметром 9,5 мм из симметричных участков обеих частей головки выверливались образцы (рис. 1). Всего было получено 28 образцов костной ткани (7 – в исследуемой группе, 21 – в контрольной).

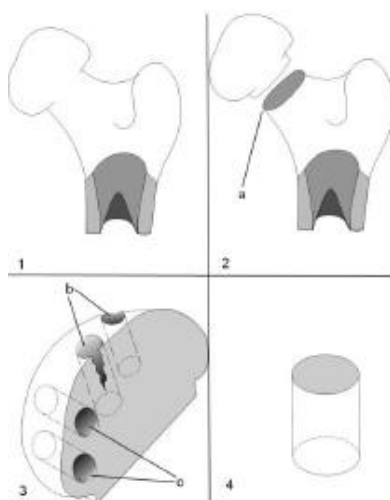


Рис. 1. Схема забора образца костной ткани: 1 – бедренная кость; 2 – удаление головки бедренной кости (а-линия среза); 3 – уровни забора образцов вдоль (b) и поперёк(c) костных трабекул; 4 – готовый образец

Испытание проводилось методом сжатия, для чего образцы помещались в испытательную машину типа ИР 5057-50. Нагружение осуществлялось с помощью пресса путём приложения силы вдоль оси образца. Данные фиксировались при помощи блока измерения силы и блока измерения перемещений, что позволило определить величину, на которую возможно деформировать костный фрагмент до появления грубых изменений его структуры, и силу, которую необходимо для этого приложить. Выстраивался график зависимости измерения длины образца от приложенных к нему усилий. На машине фиксировались максималь-

ные изменения длины  $\Delta L$  (мм) и усилий  $P_{пр}$  (Н). По значению предельной силы определялся предел прочности. Для оценки модуля упругости на графике выбирался линейный участок, по тангенсу наклона которого определялся модуль Юнга  $E$  (МПа).

Средние показатели упругих характеристик костной ткани не выявили статистически значимых различий между исследуемыми группами образцов костной ткани:  $E_{иссл} = 129,6$  МПа,  $E_{контр} = 177,5$  МПа. При этом разрушение образцов костной ткани при сжатии во всех случаях сопровождалось образованием трещин под углом  $45^\circ$ , что близко к характеристикам хрупких материалов. Однако вид зависимостей нагрузки от удлинения свидетельствует о вязком характере разрушения, что соответствует пороупругой природе губчатой ткани.

Полученные результаты показывают наличие некоторых изменений механических характеристик губчатой кости, связанных с сахарным диабетом, но требуют дальнейших исследований. Повышенный риск переломов, фиксируемый у данной категории пациентов, по литературным данным может быть связан с осложнениями данного эндокринологического заболевания (нефропатии, ангиопатии), сопровождающегося нарушением кровообращения костной ткани и патологией зрения, что приводит к повышенному риску падений и ухудшению условий регенерации костной ткани.

#### Литература

1. **Дубровский, В.И.** Биомеханика: Учеб. для сред. и высш. учеб. заведений / В.И. Дубровский, В.Н. Федорова // – М.: Изд-во ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. – 171 с.
2. **Абросимов, В.Г.** Механические свойства костей, некоторые особенности обмена металлов с биологической средой, анализ конструктивных особенностей имплантов // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. – 2008. – №3(26). – С. 32–40.
3. **Аврунин, А.С.** Механизм жесткости и прочности кости в норме и при старении организма. Наноразмерная модель // Гений Ортопедии, № 3, 2008 г. с. 59–66.
4. **Арсеньев, Д.Г.** Эффективные упругие характеристики анизотропной модели пористого биологического материала, насыщенного жидкостью / Д.Г. Арсеньев, А.В. Зинковский, Л.Б. Маслов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2008. – № 3 (59). – С. 230–236.
5. **Акулич, Ю.В.** Биомеханика адаптационных процессов в костной ткани нижней конечности человека: Автореф. дисс. док. физ.-мат. наук. – Саратов, 2011. – 37 с.

*Кирпичев Иван Владимирович,*

ГБОУ ВПО «Ивановская государственная медицинская академия» Минздрава России,  
e-mail: doc.kirpichev@yandex.ru

*Морозов Анатолий Дмитриевич*

ГБОУ ВПО «Ивановская государственная медицинская академия» Минздрава России

*Серегина Екатерина Павловна*

ГБОУ ВПО «Ивановская государственная медицинская академия» Минздрава России

*Маслов Леонид Борисович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: maslov@tipm.ispu.ru

*Вихрев Сергей Владиленинович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: maslov@tipm.ispu.ru

## Определяющие соотношения модели гетерогенного материала с двойной системой пор

**Аннотация.** Представлен единый математический подход описания напряженно-деформированного состояния механических структур из гетерогенных материалов, обладающих двойной связанной системой пор, заполненной флюидом. Получены определяющие соотношения пороупругой сплошной среды при наличии двух связанных систем пор в материале, насыщенном жидкостью.

**Ключевые слова:** пороупругость, определяющие соотношения, двойная пористость.

L.B. MASLOV, Doctor of Physics and Mathematics, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: maslov@tipm.ispu.ru

## Constitutive equations of the heterogeneous material model with double pore system

**Abstract.** A unified mathematical approach describing the stress-strain state of mechanical structures from heterogeneous materials with double porous system filled by fluid is presented. Constitutive equations of poroelastic continuum with two coupled systems of material pores saturated with liquid have been obtained.

**Key words:** poroelasticity, constitutive equations, double porosity.

Основываясь на феноменологическом подходе механики сплошных сред расширим известные соотношения пороупругой модели Био [1] на случай гетерогенных материалов со связанными системами пор. Принимая для жидкой фазы модель идеальной сжимаемой жидкости, запишем определяющие соотношения эффективной среды в тензорном виде [2]:

$$\begin{aligned}\sigma^{(1)}(\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_{fk}) &= \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}_s) + \mathbf{Q}_1 \Theta_1(\mathbf{u}_{f1}) + \mathbf{Q}_2 \Theta_2(\mathbf{u}_{f2}), \\ s_1^{(2)}(\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_{fk}) &= \mathbf{Q}_1 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}_s) + R_1 \Theta_1(\mathbf{u}_{f1}) + R_{12} \Theta_2(\mathbf{u}_{f2}), \\ s_2^{(2)}(\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_{fk}) &= \mathbf{Q}_2 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}_s) + R_{21} \Theta_1(\mathbf{u}_{f1}) + R_2 \Theta_2(\mathbf{u}_{f2}),\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\mathbf{C}$  – тензор упругих модулей твердой фазы;  $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$  – тензоры коэффициентов взаимности, определяющие влияние деформаций твердой фазы на напряжения, возникающие в поровой жидкости, и наоборот;  $R_1, R_2$  – гидростатические константы, соответствующие эффективным модулям объемного

сжатия жидких фаз;  $R_{12}$ ,  $R_{21}$  – гидростатические константы, соответствующие взаимному влиянию систем пор друг на друга;  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  – объемные деформации компонент жидкой фазы.

Воспользовавшись физическим смыслом шаровой части тензора напряжений в жидкой фазе, а также связью между условными и истинными напряжениями, можно записать выражения:

$$\sigma_k^{(2)} = s_k^{(2)} \mathbf{E}, \text{ где } s_k^{(2)} = -\phi_k p_k, \quad k = 1, 2. \quad (2)$$

Выразим объемные деформации жидкой фазы, соответствующие двум системам пор, через парциальные давления и деформации твердой фазы. Для этого перепишем определяющие соотношения (1) в виде системы двух уравнений относительно  $\Theta_k$ :

$$\begin{aligned} R_1 \Theta_1 + R_{12} \Theta_2 &= -\phi_1 p_1 - \mathbf{Q}_1 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s, \\ R_{21} \Theta_1 + R_2 \Theta_2 &= -\phi_2 p_2 - \mathbf{Q}_2 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s. \end{aligned} \quad (3)$$

Воспользуемся правилом Крамера решения систем линейных алгебраических уравнений. Тогда из системы (3) определим выражения объемных деформаций упругих компонент жидкой фазы:

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= \frac{1}{\Delta} \left( R_2 (-\phi_1 p_1 - \mathbf{Q}_1 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s) - R_{12} (-\phi_2 p_2 - \mathbf{Q}_2 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s) \right), \\ \Theta_2 &= \frac{1}{\Delta} \left( R_1 (-\phi_2 p_2 - \mathbf{Q}_2 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s) - R_{21} (-\phi_1 p_1 - \mathbf{Q}_1 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Delta = R_1 R_2 - R_{12} R_{21}$  – определитель системы (3).

Подставим найденные решения (3) в (1) и, сгруппировав подобные слагаемые, выразим тензор напряжений в твердой фазе через перемещения упругого скелета эффективной среды и давление жидкости:

$$\sigma^{(1)} = \mathbf{C}_{dr} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s - \phi_1 \left( \mathbf{Q}_1 \frac{R_2}{\Delta} - \mathbf{Q}_2 \frac{R_{21}}{\Delta} \right) p_1 - \phi_2 \left( \mathbf{Q}_2 \frac{R_1}{\Delta} - \mathbf{Q}_1 \frac{R_{12}}{\Delta} \right) p_2, \quad (5)$$

где  $\mathbf{C}_{dr}$  – тензор четвертого ранга упругих модулей пористой среды в дренированном состоянии, который в результате преобразований примет вид:

$$\mathbf{C}_{dr} = \mathbf{C} - \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_1 \frac{R_2}{\Delta} + \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 \frac{R_{12}}{\Delta} - \mathbf{Q}_2 \mathbf{Q}_2 \frac{R_1}{\Delta} + \mathbf{Q}_2 \mathbf{Q}_1 \frac{R_{21}}{\Delta}. \quad (6)$$

Введем для удобства и системности изложения в полученных соотношениях следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta}{R_2} &= R_1 - \frac{R_{12} R_{21}}{R_2} \equiv R_1^*, & \frac{\Delta}{R_1} &= R_2 - \frac{R_{12} R_{21}}{R_1} \equiv R_2^*, \\ \frac{\Delta}{R_{21}} &= -R_{12} + \frac{R_1 R_2}{R_{21}} \equiv -R_{12}^*, & \frac{\Delta}{R_{12}} &= -R_{21} + \frac{R_1 R_2}{R_{12}} \equiv -R_{21}^*. \end{aligned} \quad (7)$$

Новые коэффициенты имеют смысл приведенных гидростатических констант, в которых учитывается наличие и взаимное влияние движения жидкости в двух системах пор. Тогда выражения тензора напряжений (5) и тензора упругих модулей (6) примут вид, соответствующий аналогичным переменным для случая модели простой пористости:

$$\boldsymbol{\sigma}^{(1)} = \mathbf{C}_{dr} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s - \phi_1 \left( \frac{\mathbf{Q}_1}{R_1^*} + \frac{\mathbf{Q}_2}{R_{12}^*} \right) p_1 - \phi_2 \left( \frac{\mathbf{Q}_2}{R_2^*} + \frac{\mathbf{Q}_1}{R_{12}^*} \right) p_2, \quad (8)$$

$$\mathbf{C}_{dr} = \mathbf{C} - \frac{\mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_1}{R_1^*} - \frac{\mathbf{Q}_2 \mathbf{Q}_2}{R_2^*} - \frac{\mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 + \mathbf{Q}_2 \mathbf{Q}_1}{R_{12}^*}.$$

В (8) принято естественное и термодинамически оправданное допущение, что перекрестные коэффициенты  $R_{12}$  и  $R_{21}$  равны друг другу, что приводит к равенству приведенных констант:  $R_{12}^* = R_{21}^*$ .

Полный тензор напряжений в произвольной точке эффективной сплошной среды есть сумма трех условных напряжений. Складывая тензоры напряжений, возникающие в каждой из фаз (2) и (8), получим следующее выражение полных эффективных напряжений:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^{(1)} - \sum_{k=1}^2 \phi_k p_k \mathbf{E} = \mathbf{C}_{dr} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s - \mathbf{A}_1 p_1 - \mathbf{A}_2 p_2, \quad (9)$$

где  $\mathbf{A}_1$ ,  $\mathbf{A}_2$  – имеют, аналогично случаю простой пористости, смысл тензоров коэффициентов эффективных напряжений Био:

$$\mathbf{A}_1 = \phi_1 \left( \mathbf{E} + \frac{\mathbf{Q}_1}{R_1^*} + \frac{\mathbf{Q}_2}{R_{12}^*} \right), \quad \mathbf{A}_2 = \phi_2 \left( \mathbf{E} + \frac{\mathbf{Q}_2}{R_2^*} + \frac{\mathbf{Q}_1}{R_{12}^*} \right). \quad (10)$$

Также как и в случае простой пористости, полный тензор напряжений в произвольной точке эффективной сплошной среды (9) складывается из упругой части, учитывающей деформацию упругого каркаса без жидкости, и гидростатических давлений в каждой из систем пор, умноженных на соответствующий тензор коэффициентов Био (10).

Преобразуем феноменологические уравнения (1), определяющие шаровую часть тензора напряжений, или давление поровой жидкости (2). Перейдем от переменных  $\Theta_k = \boldsymbol{\varepsilon}_{fk} \cdot \mathbf{E} = \nabla \cdot \mathbf{u}_{fk}$ , выражающих объемные деформации жидкой фазы (4), к кинематическим переменным пороупругой задачи  $\zeta_k = -\nabla \cdot \phi_k (\mathbf{u}_{fk} - \mathbf{u}_s)$ . С учетом известной формулы объемной деформации твердого тела и введенных обозначений (7) соотношения (4) можно переписать в виде:

$$\mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s - \phi_1^{-1} \zeta_1 = \frac{1}{R_1^*} (-\phi_1 p_1 - \mathbf{Q}_1 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s) + \frac{1}{R_{12}^*} (-\phi_2 p_2 - \mathbf{Q}_2 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s),$$

$$\mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s - \phi_2^{-1} \zeta_2 = \frac{1}{R_2^*} (-\phi_2 p_2 - \mathbf{Q}_2 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s) + \frac{1}{R_{12}^*} (-\phi_1 p_1 - \mathbf{Q}_1 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s).$$

Приводя подобные слагаемые в полученных уравнениях и используя введенные определения тензоров коэффициентов эффективных напряжений Био (10), можно выразить относительные изменения объема жидкости в порах  $\zeta_k$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= \mathbf{A}_1 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s + \frac{\phi_1^2}{R_1^*} p_1 + \frac{\phi_1 \phi_2}{R_{12}^*} p_2, \\ \zeta_2 &= \mathbf{A}_2 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s + \frac{\phi_2^2}{R_2^*} p_2 + \frac{\phi_1 \phi_2}{R_{12}^*} p_1. \end{aligned} \quad (11)$$

Полученные формулы (9) и (11) могут рассматриваться как определяющие соотношения поропругой сплошной среды при наличии двух связанных систем пор в материале, насыщенном жидкостью.

#### Литература

1. **Biot M.A.** General theory of three-dimensional consolidation / M.A. Biot // J. Appl. Phys. – 1941. – Vol. 12. – № 2. – P. 155–164.
2. **Berryman J.G.** Extension of poroelastic analysis to double-porosity materials: new technique in microgeomechanics / J.G. Berryman // J. Eng. Mech. – 2002. – Vol. 128. – № 8. – P. 840–847.

*Маслов Леонид Борисович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: [maslov@tipm.ispu.ru](mailto:maslov@tipm.ispu.ru)

УДК 621.833

А.Б. КОЛОБОВ, к.т.н., доцент;  
Ф.Б. ОГУРЦОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: [kolobov\\_ab@mail.ru](mailto:kolobov_ab@mail.ru)

### Оценка контактного износа подшипников качения по высокочастотной вибрации

**Аннотация.** Предложен метод оценки контактного износа подшипников качения на базе статистического анализа высокочастотной вибрации. Приведены результаты эксперимента.

**Ключевые слова:** контактный износ, высокочастотная вибрация, подшипник качения.

A.B. KOLOBOV, candidate of engineering sci., docent  
F.B. OGURTSOV, candidate of engineering sci., docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya str., 34. E-mail: kolobov\_ab@mail.ru

## Rolling bearing contact wear assessment based on high frequency vibration analysis

**Abstract.** A statistical analysis method of high frequency vibration is suggested for rolling bearing contact wear assessment. The experimental results are presented.

**Key words:** contact wear, high frequency vibration, rolling bearing.

Менее 10 % подшипников качения (ПК) дорабатывают до окончания проектного срока службы, причем значительная часть ПК отказывает из-за дефектов, вызванных контактным износом [2].

Одним из направлений диагностирования ПК является анализ высокочастотной (ВЧ) вибрации, выделенной в относительно узкой полосе частот. Вибрация имеет импульсный характер, временной дамп которой не представляет диагностической ценности, но из которого с помощью различных методов (SPM, огибающая) выделяются ударные импульсы [1]. При этом их можно разделить на две группы:

- импульсы малого уровня (ковровый уровень), присутствующие независимо от состояния ПК и имеющие кинематический характер;
- импульсы большего уровня, по сути – ударные, появляющиеся при наличии выраженных дефектов ПК (трещины, сколы, забоины и т.п.).

Диагностика по соотношению уровней этих групп и частотному анализу, например, SPM-спектр® (SPM Instruments) позволяет определять локальные дефекты [3]. Однако контактный износ и, во многом, проблемы смазки ПК, являются стохастическими дефектами и в частотной области не диагностируются.

Целью работы является поиск диагностических признаков (ДП) контактного износа. Для этого разработана технология выделения ударных импульсов, заключающаяся в замене ВЧ сигнала вибрации моделью в виде последовательности  $\delta$ -функций со случайными амплитудой и периодом повторения.

Поскольку ковровые импульсы имеют кинематическое происхождение (волнистость дорожек, некруглость тел качения и т.п.), то именно параметры их появления (частотные или амплитудные) могут являться ДП контактного износа ПК. Распределение амплитуд ковровых импульсов подчиняется закону Релея [1, 2]

$$f(u) = \lambda u \exp(-\lambda u^2 / 2), \quad (1)$$

где  $\lambda = 1/D$  – параметр, определяемый дисперсией  $D$  амплитуд  $u$ .

Установлено, что амплитуда импульсов возрастает с увеличением контактного износа и с ухудшением смазки, но при этом наблюдается:

- параметрическая зависимость амплитуды от типа и геометрии ПК и частоты вращения внутреннего кольца;
- сильное искажение волн упругой деформации, а значит и амплитуды, в зависимости от конструкции посадочного узла ПК.

В этой связи параметр  $\lambda$  в (1), зависящий от дисперсии, не может использоваться как ДП контактного износа, поскольку слишком вариативен ко многим факторам. Его величина может определять базовый уровень dBc, от которого отсчитывается амплитуда ударных импульсов dBm (алгоритм dBc/dBm® SPM), что позволяет диагностировать сосредоточенные дефекты [3].

Исследована возможность использования в качестве ДП частоты появления импульсов. Можно сделать предположение, что по мере увеличения износа ПК число микродефектов возрастает и приводит к росту числа импульсов. Однако исследования показали, что эта зависимость слабая – так при величинах радиальных зазоров от 10,6 до 88,7 мкм для шариковых радиальных ПК типоразмера 0-203 частота импульсов варьируется от 1200 до 1300 имп/с, а усредненная частота появления импульсов мало зависит от скорости и движения тел качения. На рис. 1 показана зависимость числа импульсов  $k_s$  от частоты вращения вала  $n$  при нагрузках (1 – номинальная, 2 – меньше номинальной).

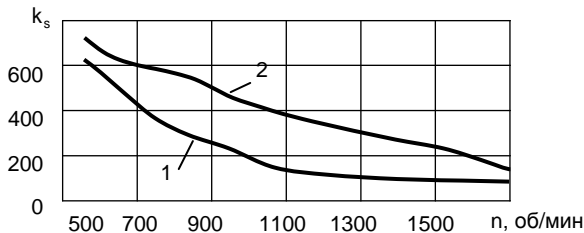


Рис. 1. Зависимость числа импульсов за один оборот внутреннего кольца ПК от частоты вращения

При предполагаемой кинематической природе возникновения импульсов, их число  $k_s$  должно оставаться постоянным, однако эта зависимость имеет гиперболический вид, поэтому природа их происхождения остается неясной и ДП частотного характера не выявляются.

В этой связи ДП износа ПК необходимо искать в параметрах распределения ковровых импульсов, причем распределение должно иметь число параметров не менее двух и допускать, при определенных услови-



ях, трансформацию от равномерного до нормального распределения. В этой связи плотность распределения представлена моделью

$$f(u) = Au^\beta \exp(-\lambda u^\alpha), \quad (2)$$

где  $\alpha, \beta, \lambda, A$  – параметры распределения.

Подбор параметров распределения (2) производился методом взвешенных наименьших квадратов путем минимизации функционала

$$F(A, \alpha, \beta, \lambda) = \sum_{i=1}^N (p_i - p(u_i))^2 \times p_i \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $p_i$  – экспериментальная вероятность попадания амплитуды импульса в интервал  $u_i + \Delta u_i$ ;  $u_i$  – амплитуда середины интервала;  $p(u_i)$  – теоретическое значение по (2) вероятности  $p(u_i) = f(u_i) \times \Delta u_i$ ;  $N$  – число интервалов, принятое  $N = 20$ .

На рис. 2 приведена типичная гистограмма распределения амплитуд ковровых импульсов и ее аппроксимация распределениями Релея (1) и моделью (2).

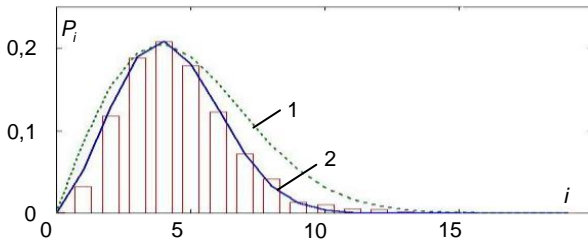


Рис. 2. Гистограмма распределения амплитуд ковровых импульсов и ее аппроксимация распределениями Релея (1) и моделью (2)

Установлено, что параметры распределения (2) могут использоваться для оценки степени износа дорожек и тел качения. На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость параметра  $\alpha$  от величины (мкм) радиального зазора ПК 0-203.

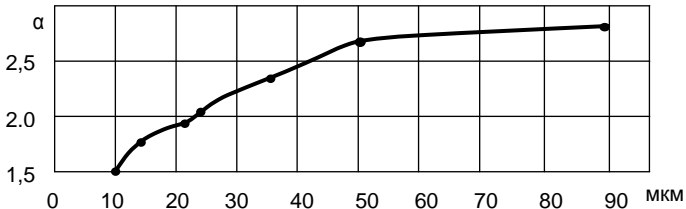


Рис. 3. Зависимость параметра  $\alpha$  от величины (мкм) зазора ПК 0-203

Отмечается монотонный рост параметра  $\alpha$  от величины зазора и достаточно большой диапазон его изменения, что может служить основанием для выбора его в качестве ДП. Необходима проверка для представительной статистической выборки и разных типов ПК.

#### Литература

1. Барков, А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А.В. Барков, Н.А.Баркова, А.Ю.Азовцев. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. – 159 с.
2. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль. В 7 т. Т.7. Вибродиагностика / В.В. Ключев и [др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 732 с.
3. Колобов, А.Б. Основы теории и практики вибродиагностики: учеб. пособие / А.Б.Колобов; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 248 с.

*Колобов Александр Борисович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: kolobov\_ab@mail.ru

*Огурцов Федор Борисович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: tipm@tipm.ispu.ru

УДК 621.833

А.Б. КОЛОБОВ, к.т.н., доцент; Ф.Б. ОГУРЦОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: kolobov\_ab@mail.ru

### **Оценка состояния смазки подшипников качения на основе статистического анализа высокочастотной вибрации**

**Аннотация.** Предложен метод оценки состояния смазки подшипников качения на базе статистического анализа высокочастотной вибрации. Приведены результаты эксперимента.

**Ключевые слова:** состояние смазки, высокочастотная вибрация, подшипник качения.

A.B. KOLOBOV, Candidate of Engineering Sci., docent  
F.B. OGURTSOV, Candidate of Engineering Sci., docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya str., 34. E-mail: kolobov\_ab@mail.ru

### **The lubrication condition assessment in rolling bearings based on a statistical analysis of high frequency vibration**

**Abstract.** A statistical analysis method of high frequency vibration is suggested for lubrication condition assessment in rolling bearings. The experimental results are presented.

**Key words:** lubrication condition, high frequency vibration, rolling bearing.

Проблема оценки состояния смазки подшипников (ГК) является крайне актуальной при организации и планировании технического обслуживания машин и механизмов. В настоящее время для решения этой проблемы широко используется анализ вибрации подшипников в процессе их работы. Однако простейший критерий – увеличение уровня вибрации при ухудшении состояния смазки – на практике не обладает достаточной достоверностью, поскольку уровень виброактивности зависит от мощности, степени загрузки и частоты вращения роторной машины. В связи с этим, для выявления дефектов смазки необходимы более тонкие методы.

Целью данной работы является оценка возможностей статистического анализа высокочастотной вибрации подшипника для формирования диагностических признаков состояния смазки.

Анализ сигнала виброускорения, выделенного с помощью узкополосного фильтра с центральной частотой в диапазоне 8–30 кГц, широко используется при диагностике подшипников [1]. Однако известными методами оказывается невозможно разделить влияние дефекта смазки и контактный износ. В то же время, улучшение условий смазки качественно проявляется в изменении формы ударных импульсов, а именно в увеличении их длительности и уменьшении амплитуды. Соответственно, диагностическая информация потенциально может быть получена из анализа динамики огибающей.

На данном этапе исследования были ограничены статистическим анализом производной огибающей узкополосной вибрации. Объектом исследования были образцы бездефектных подшипников типов 1203, 7203 и 3603. Исследования проводились в состояниях отсутствия смазки (протирка и обезжиривание бензином) и смазывание солидолом УС-1, количество смазки 0,5 г на подшипник.

В процессе эксперимента внутреннее кольцо подшипника с помощью лабораторного стенда вращалось с частотой 1100 об/мин, вибрация измерялась на неподвижном наружном кольце пьезоакселерометром. Радиальная нагрузка на подшипник составляла 0,2 кгс. Узкополосный сигнал выделялся с помощью третьоктавного фильтра с центральной частотой 8 кГц. Далее после аналого-цифрового преобразования временной дамп с частотой дискретизации 100 кГц и временем наблюдения 10 секунд сохранялся в виде файла и дальнейшая его обработка проводилась в цифровом виде.

Выделение сигнала огибающей осуществлялось путем интегрирования с усреднением на полупериоде сигнала несущей. Вычисление производной производилось численным дифференцированием. Для исключения влияния дисперсии была использована нормировка, и все данные представлялись в относительных единицах. Среди возможных показателей нормирования наибольшая стабильность в плане нечувствительности к

выбросам была выявлена для медианного значения. Типичный нормированный сигнал производной огибающей представлен на рис. 1.

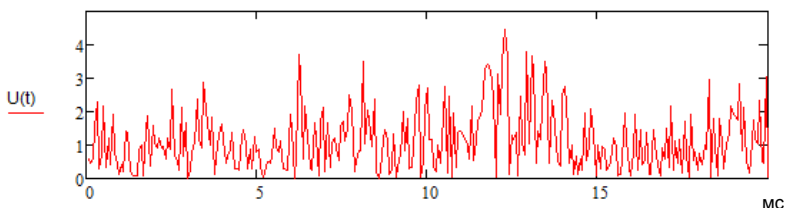


Рис. 1. Сигнал производной огибающей

Далее были вычислены гистограммы плотности распределения вероятности и проанализированы возможности подбора подходящего закона распределения. Было установлено, что обобщенный закон распределения, представленный в [2], является избыточным, то есть статистика производной огибающей описывается законом, который при единичной дисперсии имеет только один свободный параметр. Дополнительными исследованиями было установлено, что при изменении состояния смазки распределение качественно изменяется в пределе от экспоненциального до нормального. В связи с этим была предпринята попытка описать экспериментальные результаты с помощью нецентрального хи-квадрат распределения с двумя степенями свободы, записанного в следующем виде:

$$P(x) = A \cdot e^{-\frac{k \cdot x + m}{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(m \cdot k \cdot x)^n}{n! \cdot \Gamma(n+1)}.$$

Коэффициенты  $A$  и  $k$  в данном случае выполняют роль масштабных факторов, а параметр смещения  $m$  является основной характеристикой распределения. Было экспериментально установлено, что бесконечный ряд в данном выражении быстро сходится, и при полученных в эксперименте данных достаточно ограничиться 5 членами ряда.

Подбор параметров распределения осуществлялся на базе метода наименьших квадратов.

Результаты регрессии представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметра  $m$

Состояние смазки	Хорошее			Недопустимое		
	1	2	3	1	2	3
Повтор						
1203	0,38	0,4	0,39	0,51	0,52	0,52
3603	0,45	0,43	0,43	0,91	0,93	0,89
7203	0,48	0,48	0,49	0,58	0,59	0,6

Гистограммы плотности распределения вероятности и подобранные законы для подшипника 7203 при различных состояниях смазки представлены на рис. 2.

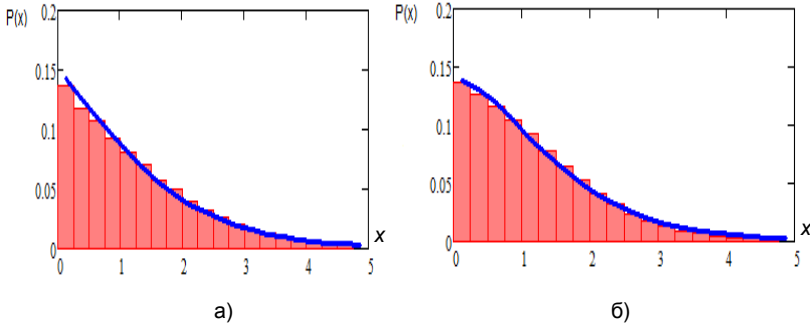


Рис. 2. Гистограммы и законы плотности распределения производной огибающей при хорошем (а) и *неудовлетворительным* (б) состояниях смазки

Как видно из полученных результатов, различие состояния смазки существенно влияет на величину параметра  $m$ , и потенциально он может служить в качестве основного или вспомогательного диагностического признака. В то же время, чувствительность данной методики существенно зависит от типа подшипника, и пороговые уровни требуют конкретной типовой привязки. Кроме того, физическое обоснование использования нецентрального хи-квадрат распределения требует дальнейших исследований.

#### Литература

1. **Клюев, В.В.** Неразрушающий контроль. В 7 т. Т.7. Вибродиагностика / В.В. Клюев и [др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 732 с.
2. **Колобов, А.Б.** Диагностика подшипников качения на базе статистического анализа ударных импульсов. / А.Б. Колобов, Ф.Б. Огурцов //Состояние и перспективы развития электротехнологии. Междунар. н.-т. конф. (XVII Бенардосовские чтения): материалы конференции. – Иваново: ООО "ПресСто". – 2013. – Т.3. С. 24 – 25.

*Колобов Александр Борисович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: [kolobov\\_ab@mail.ru](mailto:kolobov_ab@mail.ru)

*Огурцов Федор Борисович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: [tipm@tipm.ispu.ru](mailto:tipm@tipm.ispu.ru)

УДК 621.321

Д. Ю. ПАШАЛИ, к.т.н., доцент; И. А. КУНСБАЕВ, студент

Уфимский государственный авиационный технический университет  
450000, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12  
*E-mail: dipashali@mail.ru*

## **Повышение надежности и безопасности подъемных платформ наклонного перемещения**

**Аннотация.** Для использования студентами с ограниченными возможностями в учебных заведениях разработана конструкция стационарно устанавливаемых подъемных платформ наклонного перемещения повышенной надежности, обеспечивающая безопасность спуска и подъема при отключении электроэнергии и позволяющая снизить энергозатраты

**Ключевые слова:** подъемная платформа, повышение надежности, безопасность спуска и подъема

D.Yu. PASHALI, candidate of engineering, docent  
I.A. KUNSBAEV, student

Ufa State Aviation Technical University  
450000, Ufa, Karl Marx St. 12. *E-mail: dipashali@mail.ru, iffat900@mail.ru*

## **Improving the reliability and security of the inclined lifting platforms move**

**Abstract.** For uses by students with disabilities in university of design permanently mounted lifting platforms tilt movement high reliability, ensuring safety during descent and ascent by-exception of electricity and reduce energy

**Key words:** permanently mounted lifting platforms tilt movement, high reliability, safety descent and ascent

В рамках программы «Доступная среда» и согласно статье 19 Федерального закона от 24.11.1995 года № 181-ФЗ «О социальной защите инвалидов в РФ» был подготовлен рейтинг российских вузов по архитектурной доступности для студентов с ограниченными возможностями. Исследование показало, что во многих российских вузах нет специальных дверей и лифтов, подъемников, пандусов, которые необходимы для комфортного обучения людей с ограниченными возможностями. Поэтому актуальна разработка технических средств повышенной безопасности и надежности, обеспечивающих передвижение людей с ограниченными возможностями по лестничным маршам учебного заведения.

Цель работы – разработка конструкции стационарно устанавливаемых подъемных платформ наклонного перемещения (ППНП) повышенной надежности, предназначенных для использования студентами с ограниченными возможностями в учебных заведениях.

Известны российские компании производители ППНП: ООО «ЦМРТ «ИНВАПРОМ», ООО «Креатив мастер» г. Москва; «Пунтукас-Пушкин», г. Санкт-Петербург; «Подъемные системы Люкс», г. Новосибирск; «Доступная среда», г. Казань; «POTRUS», г. Челябинск и др. ППНП зарубежного производства: *Vimes* v64, v65 (компания «*Vimes S.p.l.*», Италия), *Domustair* (компания «*IGV GROUP S.p.A.*», Италия), корпорация «*KLEEMANN group*», Греция; компания «*Doppler*», Греция, компания «*MacPuar S.A.*», Испания, компания «*ThyssenKrupp Elevator*», Германия и др.

Достоинствами конструкций данных производителей являются: высокая степень вандалозащищенности; возможность установки внутри и снаружи помещений и перемещения по прямым и изогнутым лестницам; элегантный дизайн в совокупности с функциональностью; оптимальное использование пространства и различная цветовая гамма; повышенная жесткость и удобство использования; возможность использования при экстремально низких температурах и т.д.

Недостатки этих конструкций: высокая цена; повышенные энергозатраты, сложность установки; большое усилие на подшипники; перекрытие лестничного марша при подъеме и спуске; необходимость наличия электропитания; невозможность установки на лестничных маршах шириной менее 900 мм; останов платформы при отключении электроэнергии и невозможность возврата в исходные позиции (верхнюю или нижнюю).

В работе [1] решается задача создания лестничного подъемника (ЛП), который имеет четыре связанных с приводным блоком приводных ролика. Первые два приводных ролика и вторые два приводных ролика находятся в контакте с фрикционным соединением с верхним ходовым рельсом на обращенных друг от друга сторонах этого ходового рельса. На шасси для стабилизации его положения по вертикали установлены опорные ролики с возможностью прокатывания по нижнему ходовому рельсу. Каждый из приводных роликов имеет собственный приводной блок в форме редукторного двигателя, редуктор которого выполнен самотормозящим. Приводной ролик соединен с выходным валом редуктора, шасси имеет раму с жестко укрепленным на ней носителем и подвижным на ней носителем, из которых оба проходят в направлении движения, и на которых в направлении движения последовательно расположены по два приводных ролика с их редукторными двигателями. Подвижный носитель может поворачиваться вокруг оси, перпендикулярной к направлению движения, а также расположен с изменяемым интервалом по отношению к жестко установленному носителю и нагружен в направлении к ходовому рельсу прижимной силой посредством упруго сжатого раскоса.

Известна конструкция [2] ППНП для прямолинейных лестничных маршей, позволяющая повысить безопасность и удобство эксплуатации. ППНП содержит грузовую платформу с вертикальной несущей стенкой, откидной площадкой и поручнем, смонтированную с возможностью перемещения по направляющим, закрепленным на стене лестничного марша

и разнесенным по высоте, с продольной прорезью в верхней из них. ППНП также содержит устройство для перемещения грузовой платформы, включающее привод с ведущей звездочкой на выходном валу, расположенный на верхней лестничной площадке, ведомую звездочку и замкнутый орган, охватывающий ведущую и ведомую звездочки. Управление грузовой платформой осуществляют с помощью пультов, один из которых расположен на стенке грузовой платформы, а другие – в конечных точках подъема. В качестве направляющих используют трубу прямоугольного сечения и металлическую пластину, вертикальная несущая стенка грузовой платформы установлена на несущей трубе с помощью двух катящихся по ее нижней стороне подшипников и двух подшипников, катящихся по боковой стороне, а нижняя часть стенки грузовой платформы катится через прикрепленный к ней подшипник по металлической пластине, замкнутый орган выполнен в виде цепи, вертикальная несущая стенка грузовой платформы соединена с помощью ушка и тягового устройства с этой цепью, расположенной в трубе, тяговое устройство представляет собой пластины, тягу, проушину и эксцентрик с пружины, поручень в поднятом положении блокирует перемещение грузовой платформы микропереключателем, а оба конца трубы оснащены выключателями путевыми, при этом другие пульты управления расположены в конечных точках подъема на стене лестничного пролета.

Общими недостатками для вышеприведенных технических решений является повышенные энергозатраты устройства и опасность останова при отключении электроэнергии.

Известна конструкция ППНП [3], выбранная авторами за прототип, позволяющая повысить надежность, упростить конструкцию, повысить удобство эксплуатации и снизить энергозатраты. ППНП содержит верхнюю и нижнюю трубчатые направляющие, каретку с ведущими и опорными роликами, взаимодействующими с направляющими, электродвигатель (ЭД), червячный редуктор, выполненный в виде отдельных блоков. При этом ведущие ролики расположены ниже осей направляющих на выходных валах червячного редукторного блока, опорные ролики расположены выше осей направляющих на поводках на подшипниковых опорах, поводки выполнены подпружиненными и установлены на выходных валах червячного редукторного блока с возможностью поворота, причем поводки расположены наклонно в противоположные стороны к вертикальной плоскости, проходящей через оси трубчатых направляющих.

Авторами данной статьи разработана конструкция ППНП отличающаяся от прототипа тем, что для повышения надежности конструкции и обеспечения безопасности спуска и подъема при отключении электроэнергии, предусмотрено питание от аккумуляторных батарей (АБ), при этом если ППНП расположена снаружи, то зарядка АБ идет от солнечных элементов, установленных на наружной стене здания. В разработанной конструкции использован мотор-редуктор *NMRV*, состоящий из одноступенчатого червяч-



ного редуктора с ЭД, который обеспечивает необходимый ход рабочего процесса и имеет высокий крутящий момент и сниженную частоту вращения, а также служит в качестве тормоза. В конструкции ППНП для уменьшения потерь мощности и снижения электромагнитных помех использован однофазный асинхронный двигатель, с экранирующими короткозамкнутыми витками на полюсах статора. Для предотвращения застревания ППНП между этажами при выходе из строя ЭД или механического привода, либо при отключении электроэнергии, для возврата ППНП в исходное положение, предусмотрен механический переключатель, который отсоединяет ведущие ролики и, одновременно, подводит демпфирующий элемент, что позволяет вернуть ППНП в нижнее положение.

Разработана конструкция ППНП повышенной надежности, обеспечивающая безопасность спуска и подъема при отключении электроэнергии и позволяющая снизить энергозатраты.

#### Литература

1. **Хайн В.** Лестничный подъемник (варианты) // Патент РФ № 2317936 (13). Оpubл. 28.02.2008.
2. **Коган Ю.Д., Соголовский Б.М., Иващенко Б.А.** Подъемник для прямолинейных лестничных маршей // Патент РФ № 2509711. Оpubл. 20.03.2014.
3. **Карпенков А.И.** Лестничный подъемник // Патент РФ № 2462408 Оpubл. 27.09.2012.

*Пашали Диана Юрьевна*

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,

e-mail: dipashali@mail.ru

*Кунсбаев Ильфат Асхатович*

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,

e-mail: ilfat900@mail.ru

УДК 621.002.3-419

Д.А. ПИРОГОВ, к.т.н., ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

E-mail: pirogov81@mail.ru

### **Композитные материалы на основе тканых материалов сложной геометрической формы**

**Аннотация.** Рассматривается перспективное направление создания композитных материалов, основой которых является особый тканый материал из различного вида технических нитей. Определены преимущества и перспективы использования данной продукции. Поставлен ряд задач, решение которых необходимо для развития данного научно-технического направления.

**Ключевые слова:** композитный материал, ткань.

D.A. PIROGOV, Candidate of Engineering Sci., seniorlecturer

Ivanovo State Power Engineering University

34, Rabfakovskayast., Ivanovo, 153003, Russian Federation. *E-mail: pirogov81@mail.ru*

## **Composite materials based on the woven materials of complex geometric shapes**

**Abstract.** This paper discusses a very promising direction in the field of creating composite materials based on special woven fabrics composed of technical threads of different types. The advantages and perspectives of using this type of products have been identified and a range of problems has been determined that must be solved for the development of this scientific and technical area.

**Keywords:** compositematerial, fabric.

Композитные материалы находят все более широкое применение в различных областях техники. Композиты используются в судостроении, ракетостроении и авиации вместо титановых или алюминиевых сплавов, в машиностроении для энергетики они применимы для изготовления деталей электрических машин, двигателей внутреннего сгорания, лопаток турбин, различных корпусных деталей и др.

В настоящее время перспективным направлением при разработке композитных материалов является то, что их основой может быть многослойный тканый материал или тканая преформа детали из различного вида технических нитей (металлических, кремнеземных, кварцевых, стеклянных, синтетических, углеродных и др.). Востребованность таких материалов, или готовых деталей на их основе, не вызывает никаких сомнений.

Преимуществами композитных материалов на основе тканых материалов, по сравнению с распространенными композитами, на наш взгляд, являются следующие свойства:

- исключение риска расслоения;
- локализация трещин;
- высокая стойкость к торцевому удару;
- повышенная стойкость к деформациям и высокотемпературным воздействиям.

Многие отрасли машиностроения нуждаются в такого рода продукции, соответственно необходима разработка методики проектирования свойств тканых композитных материалов, например, прочности, жесткости, температуро- и влагуостойчивости, шумоизоляции и других.

Развитие данного научного направления заключается в постановке и решении ряда научно-исследовательских задач:

- разработка математической модели тканого элемента сложной геометрической формы, с учетом того, что при его формировании взаимодействуют несколько систем нитей основы и утка;
- разработка методик исследования математической модели;
- изучение характеристик нитей, которые предлагается использовать;

– выбор или разработка оптимальных связующих веществ.

Проводится обзор научных работ в данной области и анализ возможных путей решения поставленных задач.

#### Литература

1. **Кристенсен, Р.** Введение в механику композитов / Р. Кристенсен; пер. с англ. А.И. Бейля, Н.П. Жмудя под ред. Ю.М. Тарнопольского. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
2. **Дубатовская, М. В.** Аналитические методы в теории композиционных материалов: учеб.-метод. пособие / М.В. Дубатовская, С.В. Рогозин, С.Ф. Лебедь. - Минск: БГУ, 2009. – 152 с. ISBN 978-985-518-158-4.

*Пирогов Дмитрий Андреевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: pirogov81@mail.ru

УДК 534.014.4

Л.Н. КРАЙНОВА<sup>1</sup>, к.т.н., доцент;

А.И. МУНИЦЫН<sup>2</sup>, д.т.н., профессор

<sup>1</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

*E-mail: krainova\_larisa@mail.ru*

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет  
"Московский энергетический институт"  
111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

## Исследование динамических характеристик лопатки последней ступени паровой турбины

**Аннотация.** Приведены результаты оценки динамических характеристик рабочих лопаток последней ступени паровой турбины. Исследования выполнены с помощью программного комплекса Mechanical APDL (ANSYS). Описаны и проиллюстрированы основные этапы расчета. Условие резонанса проанализированы с помощью вибрационной диаграммы рабочей лопатки.

**Ключевые слова:** собственные частоты колебаний лопатки, резонансные режимы, вибрационная диаграмма.

L.N. KRAINOVA, Candidate of Engineering, docent  
A.I. MUNITSYN, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University

153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34 *E-mail: krainova\_larisa@mail.ru*

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

111116, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14

## Research of dynamics characteristics of a turbine blade at the last stage of the steam turbine

**Abstract.** The author presents the results of the dynamic characteristics of the operating turbine blades at the last stage of a steam turbine. The research was made with a help of software package Mechanical APDL (ANSYS). Here are described and

illustrated the main calculation steps. The resonance conditions are analyzed by dint of a vibration diagram of an operating blade.

**Key words:** fundamental frequencies vibrations of the turbine blade, resonance mode, vibration diagram.

Исследование динамики перспективных лопаток последних ступеней цилиндра низкого давления – сложная комплексная задача. Увеличение единичной мощности паровой турбины требует увеличение площади выхлопа ЦНД и, как следствие, – увеличение длины лопаток последней ступени с применением высокопрочных материалов.

В рамках данной работы проведены исследования динамического поведения лопатки сверхбольшой длины. Модель лопатки разработана ОАО «НПО ЦКТИ» («Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова») для быстроходной турбины насыщенного пара. Лопатка имеет длину 1460 мм, сложный профиль переменного сечения и большой угол предварительной закрутки (рис. 1). Такая форма определяет большую изгибно-крутильную податливость, что способно привести к высоким уровням вибрации. Преимущество свободных лопаток состоит в том, что на стадии проектирования можно произвести надежную отстройку таких лопаток от резонансных состояний в зоне рабочей частоты вращения с необходимым запасом [1].

Исследования выполнены с помощью программного комплекса Mechanical APDL (ANSYS). Предполагалось, что лопатка выполнена из титанового сплава и испытывает действие центробежных сил вращения, аэродинамические силы потока пара.



Рис. 1. Трехмерная модель рабочей лопатки

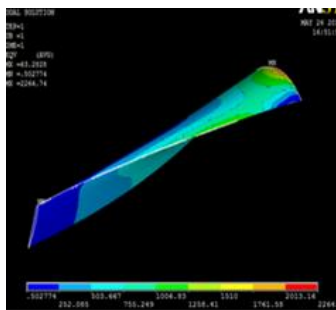


Рис. 2. Распределение напряжений в лопатке

Предварительное статическое напряженно-деформированное состояние оказывает существенное влияние на динамические характеристики лопаток [1, 2]. Поэтому предварительно решена задача статического деформирования лопатки в поле центробежных сил.

Лопатка закрепляется по опорной поверхности хвостовика, то есть запрещает все степени свободы соответствующих узлов КЭ сетки. В работе приведены расчеты статического НДС, распределение интенсивности напряжений по перу лопатки показано на рис. 2. Зоны концентрации напряжений наблюдаются на нижней части выходной кромки и в зоне крепления к хвостовику.

Система уравнений для решения задачи собственных колебаний лопатки имеет вид

$$([K_h] - \omega^2 \cdot [M_h]) \cdot \xi^{(h)} = 0,$$

где  $[M_h], [K_h]$  – матрицы масс и жесткости,  $\omega$  – собственная частота колебаний,  $\xi$  – вектор амплитуд перемещений (собственные формы).

Наличие в конструкции предварительно-напряженного состояния приводит к увеличению потенциальной энергии в системе за счет работы начальных напряжений на действительных деформациях. В рамках КЭ формулировка это приводит к появлению дополнительной составляющей в матрице жесткости конструкции

$$([K_h + \bar{K}_h(\sigma_0)] - \omega^2 \cdot [M_h]) \cdot \xi^{(h)} = 0,$$

где  $[\bar{K}_h]$  – матрица добавочной жесткости (которая определяется предварительным статическим напряженным состоянием),  $\sigma_0$  – вектор предварительных статических напряжений в конструкции.

В результате проведенных исследований были получены собственные частоты и формы колебаний вращающейся лопатки (рис. 3). Главные 1-я – 3-я формы вращающейся лопатки (рис. 1,а) преимущественно изгибные, что свидетельствуют о малом влиянии угла закрутки лопатки на ее динамические характеристики. Формы 4-я и 5-я (рис. 1,б) – преимущественно крутильные, следующие формы – изгибные с большой долей крутильных составляющих.

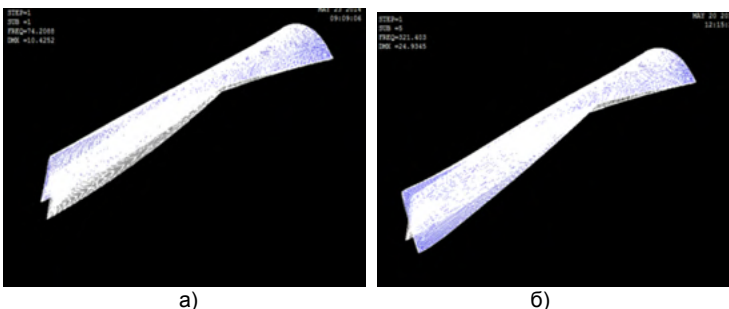


Рис. 3. Формы колебаний лопаток: а – 1-я форма колебаний; б – 5-я форма колебаний

Условие резонанса проанализированы с помощью вибрационной диаграммы рабочей лопатки. Получено, что резонансные режимы работы лопаток последней ступени находятся за пределами рабочего диапазона частот вращения ротора. Запас между рабочей и резонансной частотой вращения достаточен для обеспечения надежной работы лопаток.

### Литература

1. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин. – 3-е изд. М.: Издательство МЭИ, 2007. – 476 с.
2. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. Учебное пособие для вузов / В.Л. Бидерман – М.: Высшая школа, 1972. – 416 с.

*Крайнова Лариса Николаевна*,  
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: [krainova\\_larisa@mail.ru](mailto:krainova_larisa@mail.ru)  
*Муницын Александр Иванович*,  
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт».

УДК 532(075.8)

М.А. НОЗДРИН, к.т.н., доцент; З.В. ЗАРУБИН, доцент;  
К.И. ЕВГРАФОВА, студентка

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: [nozdrin@tipm.ispu.ru](mailto:nozdrin@tipm.ispu.ru)

### Упругопластический изгиб пластины с эффектом памяти формы

**Аннотация.** Приводятся аналитические и численные расчеты изгиба пластины с учетом эффекта памяти формы. Результаты являются основой для проектирования терморегулирующих устройств.

**Ключевые слова:** эффект памяти формы, изгиб пластины.

M.A. NOZDRIN, Candidate of Engineering Sci., docent  
Z.V. ZARUBIN, docent, K.I. EVGRAFOVA, Student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, E-mail: [nozdrin@tipm.ispu.ru](mailto:nozdrin@tipm.ispu.ru)

### Elastic-plastic bending of plate with shape memory effect

**Abstract.** Analytical and numerical calculations of bending of a plate with regard to the shape memory effect is given. The results are the basis for the design of thermostatic devices.

**Key words:** shape memory effect, bending of plate.

Проблема совершенствования физико-механических свойств конструкционных материалов вызывает необходимость разработки алго-

ритмов расчета элементов конструкций из материалов с эффектом памяти формы необходима для применения в конструкциях из новых материалов с заданными физико-механическими свойствами. Эффект памяти формы – явление возврата к первоначальной форме при нагреве детали, которое наблюдается у некоторых материалов после предварительной деформации.

Рассматривается (для конкретизации общего алгоритма) квадратная опертая пластина со стороной  $2a$  под действием равномерной нагрузки  $q$  (рис. 1). Материал пластины – титанол.

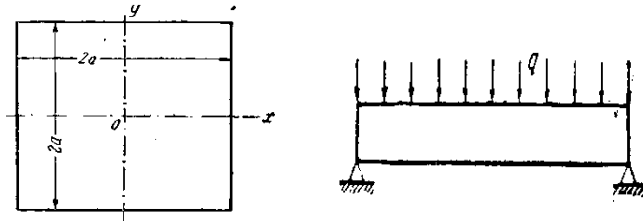


Рис. 1. Расчетная схема пластины

Безразмерные координаты точек пластины соотнесены с размерами пластины:

$$\xi = \frac{x}{a} \text{ и } \eta = \frac{y}{a} . \quad (1)$$

Производится аналитический расчет задачи изгиба пластины с эффектом памяти формы. Определяется масса пластины

$$m = \frac{64}{\pi^4} , \quad (2)$$

удовлетворяющая равенству

$$\frac{\iint \bar{P}_x d\xi d\eta}{\iint \bar{w} d\xi d\eta} = 1 , \quad (3)$$

где  $\bar{P}_x$  – квадратичная форма от кривизны пластины;  $\bar{w}$  – функция координат, удовлетворяющая граничным условиям на контуре (значение прогиба на контуре пластины равно нулю) (4). Поскольку дробь (3) не зависит от постоянной  $c$  (5), она остается равной 1:

$$\bar{w} = m \cdot \cos(\xi) \cdot \cos(\eta) \quad (4)$$

$$c = \frac{\pi^4 \cdot \sigma_s \cdot h^2}{144 \cdot e_0 \cdot a^2} , \quad (5)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести при растяжении.

Получена формула прогиба в центре пластины:

$$w_0 = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{a^2 \cdot e_s}{h} \cdot e_0, \quad (6)$$

где  $a$  – размер пластины, м;  $e_s$  – интенсивность деформаций, соответствующая пределу текучести;  $h$  – толщина пластины, м;  $e_0$  – относительная интенсивность деформаций в центре пластины:

$$e_0 = \frac{144 \cdot c \cdot a^2}{\pi^4 \cdot \sigma_s \cdot h^2}. \quad (7)$$

Производится численное решение задачи в программном комплексе Mathcad. Размер пластины принимаем равным 0,05 м, толщина пластины – 0,003м. Распределенная нагрузка, действующая на пластину, принимается равной 10 Н/м. Модуль Юнга  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ . Получена функция упругопластического прогиба пластины:

$$w = \frac{\pi^4 \cdot \sigma_s \cdot h^2 \cdot a^2}{144 \cdot e_0 \cdot D} \bar{w}, \quad (8)$$

где  $\bar{w}$  – функция координат (4);  $D$  – цилиндрическая жесткость пластины:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}. \quad (9)$$

Задается зависимость между температурой и соотношением мартенсита и аустенита в материале (рис. 2):

$$\lambda(t) = \left( 1 + e^{\frac{t - T_c - B}{t}} \right)^{-1}, \quad (10)$$

где  $T_c$  – критическая температура фазового перехода;  $B$  – характеристика размытости фазового перехода;  $t$  – температура;  $\lambda(t)$  – весовой коэффициент (изменяется в пределах от 0 до 1 (0 – аустенит, 1 – мартенсит).

Задается функция, связывающая температуру и координаты центра пластины:

$$W(x, y) = U(T) \cdot \dots \quad (11)$$

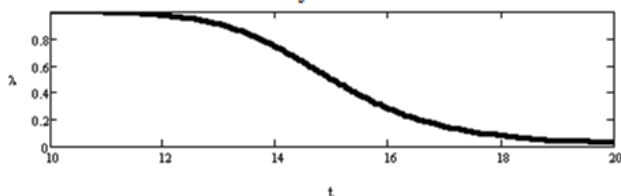


Рис. 2. Соотношение мартенсита и аустенита в материале при нагреве

При изменении температуры от  $10^\circ$  до  $20^\circ$  наблюдается восстановление первоначальной формы пластины, т.е. полный переход мартенсита в аустенит.



Полученные результаты являются основой для проектирования терморегулирующих устройств в теплоэнергетике, возможно применение в медицине, авиастроении, машиностроении.

#### Литература

1. **Ильюшин, А.А.** Пластичность (часть 1) / Под ред. И. К. Снитко. – М., 1948.– 912 с.
2. **Зарубин, З.В.** Деформационные расчеты материалов с эффектом памяти формы / З.В. Зарубин, М.А. Ноздрин // ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина". – Иваново, 2012. – 116 с.

*Ноздрин Михаил Александрович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: nozdrin@tipm.ispu.ru

*Зарубин Захар Викторович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: zzarubin@yandex.ru

*Евграфова Ксения Игоревна,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: madama-ksu1994@yandex.ru

УДК 532(075.8)

М.А. НОЗДРИН, к.т.н., доцент; З.В. ЗАРУБИН, доцент;  
Е.Э. ИЛЬИНА, студентка

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: nozdrin@tipm.ispu.ru

### Исследование расчетной схемы двигателя с элементами памяти формы

**Аннотация.** Приводится численное решение дифференциального уравнения движения модели. Проведенный расчет используется для проектирования двигателя с деталями из материалов с эффектом памяти формы.

**Ключевые слова:** эффект памяти формы, двигатель, расчет.

M.A. NOZDRIN, Candidate of Engineering Sci., docent  
Z.V. ZARUBIN, docent, Y.E. ILINA, Student  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, E-mail: nozdrin@tipm.ispu.ru

### Study of engine design with shape-memory elements

**Abstract.** A numerical solution of the differential equation of motion of the model is provided. A calculation is used to design the engine with parts made from materials with shape memory effect.

**Key words:** shape memory effect, engine, calculation.

Одно из базовых восприятий людьми явлений внешнего мира – это стойкость и надежность металлических изделий и конструкций, стабильно сохраняющих свою функциональную форму продолжительное время. Однако, существует ряд материалов, которые при нагреве после предварительной деформации демонстрируют явление возврата к первоначальной форме. Эти сплавы обладают свойством, позволяющим им проявлять своеобразную память. Этот эффект нашел практическое применение и создал новый класс сплавов, обладающих эффектом памяти формы (ЭПФ).

Эффект памяти формы характеризуется двумя основными параметрами: маркой сплава со строго выдержанным химическим составом и температурами мартенситных превращений.

В 1962 году был разработан сплав из никелида титана с ЭПФ. Принятое за рубежом название – «Нитинол» происходит от аббревиатуры NiTiNOL, где NOL – сокращенное название Лаборатории морской артиллерии США, в которой материал был разработан. Данный элемент может исполнять функции как датчика, так и исполнительного механизма.[1] Объектом исследования в данной работе является двигатель Гинеля с кривошипно-шатунным механизмом (рис. 1). В двигателе используются пружины с ЭПФ из сплава нитинол (эквипотенциальный сплав, то есть состоящий в приблизительно равных долях из никеля (55%) и титана (45%)) с температурным переходом 45°C.

Кинематическая модель двигателя Гинеля в системе Mathcad (рис. 2).

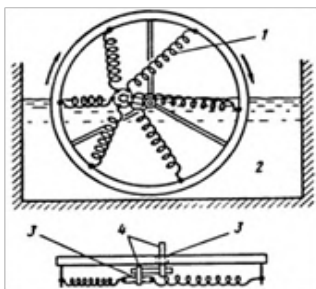


Рис. 1. Двигатель Гинеля: 1 – спираль из сплава Ni-Ti; 2 – горячая вода; 3 – подшипник; 4 – фиксированные оси

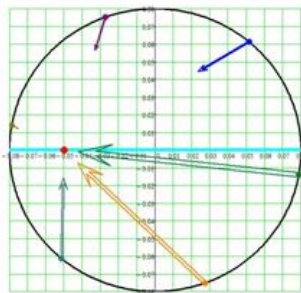


Рис. 2. Кинематическая модель двигателя

Рассмотрено уравнение движения модели. Для расчетов использована программа Mathcad [2].

Уравнение движения имеет вид:

$$J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M(\varphi) - K \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

где:  $K$  – коэффициент сопротивления воды;  $J$  – момент инерции данной модели ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ );  $\varphi$  – угол вращения, зависящий от времени  $t$  (рад);  $M(\varphi)_2$  – крутящий момент, зависящий от угла поворота ( $\text{Н}\cdot\text{м}$ );  $\dot{\varphi}$  – угловая скорость (первая производная угла вращения по времени) (рад/с);  $\ddot{\varphi}$  – угловое ускорение (вторая производная угла вращения по времени) ( $\text{рад}/\text{с}^2$ ).

Данное уравнение решается методом Рунге-Кутты [3]. Метод Рунге-Кутты можно использовать только для работы с дифференциальными уравнениями первого порядка, поэтому порядок уравнения понижается методом замены переменных:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \psi \quad (1)$$

Уравнение принимает вид:

$$J \cdot \frac{d\psi}{dt} = M(\varphi) - k \cdot \psi \quad (2)$$

Для нахождения более точного решения выбран четырехшаговый метод Рунге-Кутты с шагом  $h = \frac{\pi}{24} = 0,131$ ;

$$\psi_{i+1} = \psi_i + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \cdot h,$$

где:  $k_{1i} = h \cdot f(\varphi_i, \psi_i)$  – первая точность, считаемая в данной точке;  
 $k_{2i} = h \cdot f(\varphi_i + h/2, \psi_i + k_{1i}/2)$  – вторая точность, считаемая с отступом в полшага от данной точки;  
 $k_{3i} = h \cdot f(\varphi_i + h/2, \psi_i + k_{2i}/2)$  – третья точность, считаемая с отступом в полшага от данной точки;  
 $k_{4i} = h \cdot f(\varphi_i + h, \psi_i + k_{3i})$  – четвертая точность, считаемая с отступом в шаг от данной точки.

Для решения уравнения задаются начальные условия задачи Коши  $\varphi_0 = 0$ ,  $\psi(\varphi_0) = \psi_0$ .

Результат вычислений выводится на экран в виде графика зависимости угла поворота и угловой скорости от времени (рис. 3)

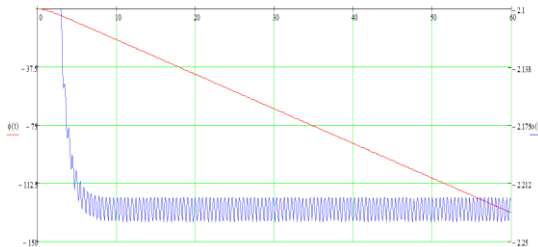


Рис. 3. График зависимости

Проведённые расчёты используются для проектирования работы двигателя с деталями из материалов с ЭПФ.

### Литература

1. **Ильина, Е.Э.** Энергия-2013. Сплавы с эффектом памяти формы / Е.Э. Ильина, Е.С. Шильцев; ИГЭУ.– Иваново, 2013.- с. 180-182
2. **Зарубин, З.В.** Деформационные расчеты материалов с эффектом памяти формы. / З.В. Зарубин, М.А.Ноздрин: ИГЭУ.- Иваново,2012
3. **Самарский, А.А.** Введение в численные методы./ А.А. Самарский.- СПб.: Машиностроение, 2005. – с.176-183

*Ноздрин Михаил Александрович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: nozdrin@tipm.ispu.ru

*Зарубин Захар Викторович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: zzarubin@yandex.ru

*Ильина Евгения Эдуардовна,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: ladyevgenia2104@yandex.ru

УДК 534.1

И.А. БЕЛОВ, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

*E-mail: ivan-belov@mail.ru*

## **Модальное демпфирование в гармоническом анализе конструкций методом суперпозиции мод**

**Аннотация.** Рассматривается применение метода суперпозиции мод для анализа отклика конструкций на гармоническое воздействие. Для механических систем с непропорциональным демпфированием предлагается использовать модальные коэффициенты демпфирования, определяемые экспериментально по свободным затухающим колебаниям.

**Ключевые слова:** гармонический анализ, метод суперпозиции мод, модальное демпфирование

I.A. BELOV, senior teacher

Ivanovo State Power Engineering University

153003, Ivanovo, Rabfakovskaya str., 34. *E-mail: ivan-belov@mail.ru*

## **Modal damping in structural harmonic analysis by mode superposition method**

**Abstract.** A mode superposition method is considered for construction harmonic response analysis. For mechanical systems with non-proportional damping modal damping coefficients are estimated based on free vibration test data.

**Key words:** harmonic analysis, mode superposition method, modal damping

Задача расчета отклика конструкции на гармоническое воздействие в конечноэлементном анализе сводится к решению уравнения

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

где  $[M], [C], [K]$  – матрицы масс, демпфирования и жёсткости соответственно,  $\{u\}$  – вектор перемещений,  $\{F\} = \{F_0\}e^{i\theta t}$  – вектор сил, изменяющихся во времени по гармоническому закону с частотой  $\theta$ .

Прямой метод решения уравнения (1) заключается в поиске вектора перемещений в виде  $\{u\} = \{u_0\}e^{i\theta t}$ , где  $\{u_0\}$  – вектор комплексных амплитуд перемещений. Метод требует явного задания матрицы демпфирования  $[C]$ . Наиболее распространённый подход в этом случае – это использование пропорционального демпфирования

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (2)$$

В формуле (2) первое слагаемое физически эквивалентно внешнему по отношению к системе вязкому трению, второе – внутреннему вязкому трению в материале конструкции. Однако в сложных механических системах не удаётся подобрать коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ , дающие адекватную оценку демпфирования на всех собственных частотах.

В работе [1] предложен метод экспериментальной оценки коэффициентов демпфирования для каждой формы колебаний (моды) в отдельности. Для использования модальных коэффициентов демпфирования в гармоническом анализе необходимо преобразовать уравнение (1) к модальным (нормальным, главным) координатам. Для этого выразим вектор перемещений через модальные координаты  $y_i$

$$\{u\} = \sum_{i=1}^n \{\Phi_i\} y_i, \quad (3)$$

где  $\{\Phi_i\}$  – форма колебаний соответствующая собственной частоте  $\omega_i$ . В соответствии со структурой уравнения (3) данный метод называется методом суперпозиции мод. Подстановка (3) в (1) с учётом свойств ортогональности мод

$$\{\Phi_i\}^T [M] \{\Phi_j\} = 0, \quad \{\Phi_i\}^T [K] \{\Phi_j\} = 0, \quad i \neq j$$

приводит к системе ОДУ относительно модальных координат

$$\ddot{y}_j + 2\omega_j \xi_j \dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = f_j, \quad j = 1 \dots n,$$

где

$$f_j = \{\Phi_j\}^T \{F\}, \quad \omega_j^2 = \{\Phi_j\}^T [K] \{\Phi_j\}, \quad \{\Phi_j\}^T [M] \{\Phi_j\} = I_n,$$

а коэффициенты  $\xi_j$  определяются уравнением

$$\{\Phi_j\}^T [C] \{\Phi_j\} = 2\omega_j \xi_j$$

при рассмотрении модальных координат как перемещений системы с одной степенью свободы [2]. Связь коэффициентов с экспериментально определяемыми коэффициентами затухания свободных колебаний задаётся соотношением

$$\omega_j \xi_j = \varepsilon_j.$$

Таким образом, отклик конструкции на гармоническое воздействие находится по выражению (3) и решениям уравнений (4). Кроме того, что метод суперпозиции мод позволяет получать решения для механических

систем, демпфирование колебаний в которых обусловлено более сложными процессами, нежели внешним и внутренним вязким трением, он обладает ещё одним преимуществом. Этот метод требует существенно меньших вычислительных затрат, чем полный метод решения, особенно при анализе сложных конструкций в ограниченном частотном диапазоне.

#### Литература

1. **Белов, Иван Александрович.** Экспериментальная оценка коэффициентов диссипации для динамических стержневых моделей / И. А. Белов // *Материалы Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XVII Бенардосовские чтения)* – Иваново. – 2013. – Т. 3: Электротехника. – С. 20–21.
2. **Mode Superposition Method** // ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 15.0. – ANSYS, Inc. – 2013. – P. 698-702.

*Белов Иван Александрович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
e-mail: ivan-belov@mail.ru

УДК 378.14

И.Н. СОЛДАТОВ, доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: soldatoff.igornikolaevitch@yandex.ru*

### **Изменение влияния методических изданий на уровень подготовки студентов**

**Аннотация.** Обосновано увеличение влияния общетехнических дисциплин на уровень подготовки студентов-технологов, а также изменение значения учебных пособий в общей номенклатуре подготовки (на примере дисциплины ТММ).

**Ключевые слова:** студент-технолог, учебные пособия по ТММ).

I.N. COLDATOV, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: soldatoff.igornikolaevitch@yandex.ru*

### **The changing of influence of methodological issues on the level of students**

**Abstract.** The article reveals the increasing influence of technical disciplines onto the level of training of students-technologists, as well as the change of its textbooks value in the common nomenclature of training (on the example of discipline TMM).

**Key words:** student-technologist, tutorials TMM

Проблема повышения качества образования возрастает, в связи с переходом на двухуровневую систему бакалавр-магистр.

Профессиональная привлекательность выпускников технологических специальностей на рынке труда в значительной степени зависит от

универсальности их подготовки и умения грамотно взаимодействовать со специалистами других профессий при решении технических задач. Эти качества обеспечиваются, в первую очередь, прочными знаниями по общеинженерным дисциплинам, к которым, среди прочих, относится и теория механизмов и машин

Профессиональная деятельность инженера-технолога на современном предприятии включает три круга вопросов:

- совершенствование технологических процессов,
- безопасную эксплуатацию оборудования,
- участие в разработке нового оборудования.

Перечисленные выше сферы деятельности предполагают широкое использование методов типовых расчётов оборудования как проверочного, так и проектного характера. Знания студентов-технологов в области машиностроения формируются, в основном, при изучении специального курса «Теория механизмов и машин».

В связи с изменением направленности обучения студентов в сторону обеспечения большей самостоятельности и уменьшения количества лекционных и иных аудиторных часов, возрастает значение методического материала, как подспорья при изучении студентами той или иной дисциплины. В изложении методического материала должны быть учтены качественные изменения в инженерном образовании в период вступления страны в ВТО, потребовавшие серьёзной переработки традиционного курса как по содержанию, так и по методике преподавания.

Более расширенные и методически проработанные материалы способствуют освоению дисциплин студентами с малым «багажом» знаний. Самостоятельное решение учащимися ряда задач по разделам курса теории механизмов и машин имеет большое значение, оно не только учит практическому применению методов кинематического и динамического анализа и синтеза механизмов, не только развивает расчётную технику, но и обогащает учащегося представлением о новых, ему ещё неизвестных схемах механизмов и их свойствах, тем самым расширяя его технический кругозор.

При работе с методическим обеспечением по весьма специфической дисциплине теории механизмов и машин автор стремится привести примеры механизмов из различных областей техники и представляющих интерес не только с учебной точки зрения, но и с точки зрения их использования при решении различных инженерных задач непосредственно на предприятиях. В методических указаниях предусмотрен лекционный материал, предшествующий каждому параграфу, дающий краткое изложение теории по темам, подробно рассмотрены решения типовых задач.

*Солдатов Игорь Николаевич*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: soldatoff.igornikolaevitch@yandex.ru

УДК 378.14

Ю.Е. ФИЛАТОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: [tjpm@tjpm.ispu.ru](mailto:tjpm@tjpm.ispu.ru)*

## **Разработка тестового сопровождения учебного процесса по дисциплине «Прикладная механика, ч.2. – Детали машин»**

**Аннотация.** Рассматривается электронный вариант методического обеспечения этапа тестирования по прикладной механике, часть 2 – детали машин, разработанного на основе программного комплекса "Moodle".

**Ключевые слова:** учебное тестирование, детали машин, зубчатые передачи.

Y.E. FILATOV, Candidate of Engineering Sci., docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: [tjpm@tjpm.ispu.ru](mailto:tjpm@tjpm.ispu.ru)*

## **A developing of testing media for the training process in a discipline "Applied mechanics, part 2 – Machine parts"**

**Abstract.** The electronic version of methodic support is developed on the basis of "Moodle" software. It is dedicated for the academic testing in a discipline "Applied mechanics, part 2 – Machine parts".

**Keywords:** academic testing, machine parts, tooth gears.

«Прикладная механика», включающая «Сопротивление материалов» и «Детали машин», является базовой дисциплиной общеинженерного уровня образования для большинства студентов вузов технического профиля. При изучении этого курса студенты испытывают определенные трудности, обусловленные совершенно новой для них областью знаний, большим объемом новой терминологии, которую надо активно и адекватно освоить, малым временем, выделяемым учебными планами, отсутствием достаточных навыков самостоятельной работы.

Проблема повышения качества образования получает новые перспективы решения с развитием современных информационных технологий и информационных сетей, позволяющих модернизировать разные стороны образовательного процесса. Информационные технологии включают создание электронных учебников, пособий, тренажеров, тестов и т.д., которые позволяют создать одинаковую компьютерную среду обучения на разных рабочих местах.

В соответствии со стратегией и тактикой управления качеством образования по системе обучения РИТМ (развитие индивидуального творческого мышления), введенной и ставшей традиционной в ИГЭУ,



большое значение имеет тестирование, определяющие персонифицированные оценки успеваемости студентов. Анализ результатов тестирования обеспечивает обратную связь в процессе изучения курса (диагностическая функция) для управления качеством обучения. Тестирование также выполняет обучающую функцию, активизируя работа студентов по усвоению учебного материала, его углублению и дополнению, и воспитательную функцию, организуя и направляя процесс обучения студентов.

Тестирование эффективно во всех контрольных точках технологической циклограммы обучения и мониторинга качества РИТМ. В первую очередь оно целесообразно по темам, дающим большой объем новой информации, в том числе по терминологии, стандартизации. Тестирование позволяет контролировать правильное понимание новой информации, усвоение основных научных фактов, решение элементарных задач надежности.

Центральное место в курсе «Прикладная механика, ч.2 – Детали машин» занимает тема «Зубчатые передачи: геометрия и прочность», что связано с повсеместным применением этой передачи. При изучении темы в дополнении к указанным трудностям добавляются трудности перехода от конкретной конструкции к абстрактной расчетной схеме и возвращением от расчетной схемы к конструкции.

Тестирование по этой теме целесообразно проводить при отчете по лабораторным работам на потоках, где есть время для их выполнения, и как входной контроль при выполнении курсового проекта.

Тестирование включает следующие вопросы. Соотношения между основными параметрами и характеристиками передач. Основные понятия и расчетные формулы сопротивления материалов. Параметры эвольвентных зубчатых колес. Особенности геометрии косозубых цилиндрических и конических прямозубых колес. Контактная и изгибная прочность зубьев цилиндрических колес

Очевидно, что перевод тестового сопровождения от традиционной «ручной» формы к компьютерной требует его коренной переработки, которая заключается в разработке почти правильных ответов.

Компьютерное тестовое сопровождение разрабатывается на основе программного комплекса «Moodle» (модульная объектно-ориентированная динамическая учебная среда).

*Филатов Юрий Евгеньевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: tipm@tipm.ispu.ru

УДК 378.14.

В.И. ШАПИН, к.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: shapin@tipm.ispu.ru

### Технологическая циклограмма диагностики качества обучения

**Аннотация.** Предложена технологическая схема процесса обучения и контроля качества. Она содержит компоненты входного и выходного тестирования, импульсное тестирование, а также известные контрольные модули TQM. Рассмотрен алгоритм диагностики качества обучения, содержащий три этапа.

**Ключевые слова:** качество, диагностика, обучение, тесты, тренажеры.

V.I. SHAPIN, candidate of engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: shapin@tipm.ispu.ru

### Technological diagram of diagnostics of teaching quality

**Abstract.** The technological scheme of the learning process and quality control is proposed. It contains the components of the input and output tests, impulse testing, and the known control modules TQM. The algorithm of diagnostics of the quality of education that contains three stages is considered.

**Keywords:** quality, diagnostics, training, tests, simulators.

В связи с переходом на двухуровневую систему бакалавр-магистр возникает необходимость коррекции процесса обучения. Ниже предложена технологическая циклограмма процесса обучения и контроля качества (рис. 1). Она имеет следующие обозначения.

*РТ* – реперная точка. Назначение – первичный, собственный ориентир преподавателя на уровень подготовки студента по востребуемым им предшествующим базовым дисциплинам.

*ВТ<sub>1</sub>* – входное тестирование. Имеет разновидности: предметное и комплексное. Назначение – оценка или переоценка остаточного ресурса знаний в соответствии с реперной точкой *РТ*.

*ВТ<sub>2</sub>* – выходное предметное тестирование. Назначение – репетиционный интегральный контроль полученных по изученному предмету знаний.

*ΣВТ<sub>2j</sub>* – комплект оболочек выходных тестов и компьютерных тренажеров.

*ТК<sub>1</sub>, ПК<sub>1</sub>, ТК<sub>2</sub>, ПК<sub>2</sub>* – известные модули РИТМ, определяющие персонализированные оценки успеваемости клиентов по двум текущим и двум промежуточным контролям.

*ЗК* и *Σ* – соответственно оценки заключительного контроля и суммарная предметная оценка.

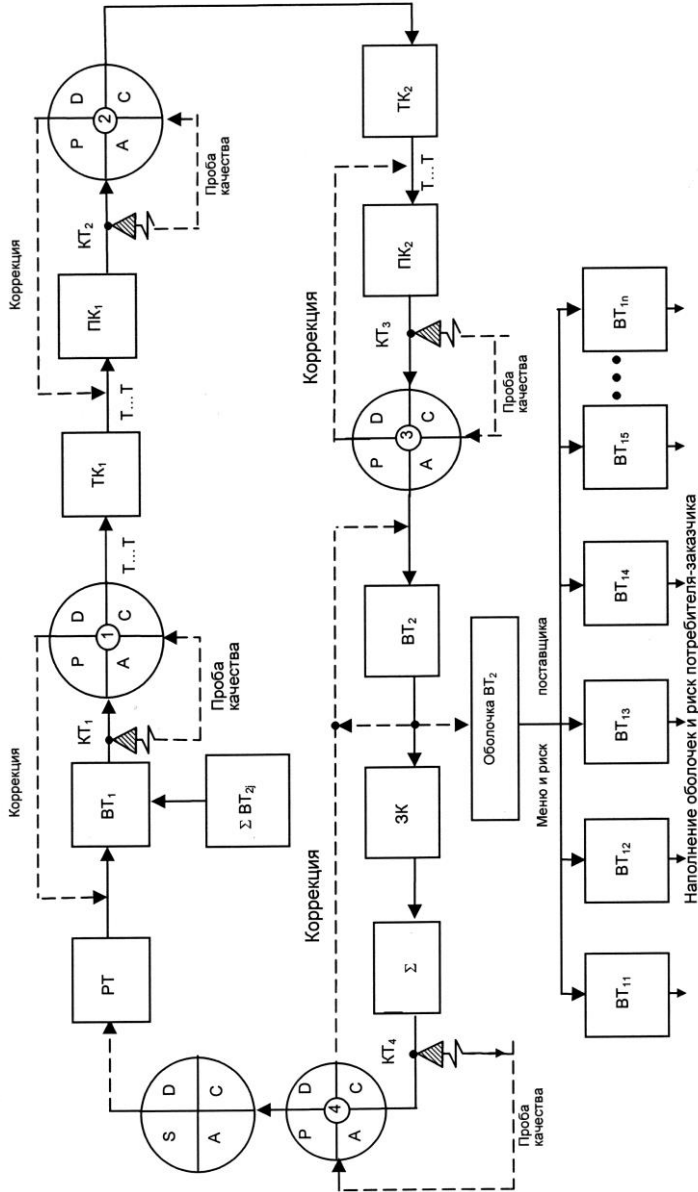


Рис. 1. Технологическая циклограмма процесса обучения и мониторинга контроля и управления качеством

*T...T* – импульсное предметное тестирование во времени от одного контрольного модуля РИТМ до другого. Назначение – повседневная реализация принципа тотальности обучения, контроля и управления в конкретном предмете. Строится преподавателем с акцентом на наиболее уязвимые по количеству текущих ошибок или многократно востребуемые сложные для усвоения раздела темы преподаваемой им дисциплины. Термин импульсивности использован в связи с кратковременностью: максимум 5–10 минут с обязательным воспроизведением правильного решения и ответа. Проводится перед каждым практическим и лабораторным занятием, а также в их заключительной фазе. В заключительной фазе тестируются знания и умения, приобретенные на данном текущем практическом или лабораторном занятии. Полученные данные, измеренные на дихатомическом уровне (0 – нет, 1 – да, 2 – да по тесту второго уровня), заносятся в базу данных по конкретному студенту и входят в качестве бонусов в интегральные оценки как составляющие ТК<sub>1</sub>, ТК<sub>2</sub> и ПК<sub>1</sub>, ПК<sub>2</sub>.

*КТ<sub>1</sub>, КТ<sub>2</sub>, КТ<sub>3</sub>, КТ<sub>4</sub>* – предлагаемые контрольные точки дискретного мониторинга качества обучения [1].

*PDSA* – известные циклы по планированию усовершенствований с принятием в конце технологической цепи обновлённого стандарта *SDCA* в методике преподавания дисциплины.

Рассмотрен алгоритм качества обучения в соответствие с контрольными точками *КТ<sub>1</sub>–КТ<sub>4</sub>*.

*Первый этап* диагностики основан на автопостроении и анализе контрольных диаграмм успеваемости клиентов в соответствие с фиксированными точками циклограммы: Р, ВТ<sub>1</sub>, ТК<sub>1</sub>, ПК<sub>1</sub>, ТК<sub>2</sub>, ПК<sub>2</sub>, ВТ<sub>2</sub>, ЗК и  $\Sigma$  – с определением местоположения дефектных зон по заданному регламенту.

Дефектными назначаются все *зоны* с координатами, расположенными ниже трехбалльного уровня контрольных диаграмм.

*На втором этапе* проводится локализация антикачества с точностью до *адреса*, путем введения контрольной матрицы со следующей интерпретацией компонент:

$\sigma_k$  – административный рейтинг, или добротность преподавателя(лей), (кадров);

$\sigma_c$  – административный рейтинг, или добротность студента(ов);

$\sigma_b$  – административный рейтинг, или добротность базы;

$\tau_{ck}$  – касательный рейтинг, или добротность оценки студентом(ами) преподавателя(лей);

$\tau_{kc}$  – касательный рейтинг, или добротность оценки работы студента(ов) преподавателем(лями);

$\tau_{kb}$  – административно-касательный рейтинг, или добротность оценки преподавателем(лями) имеющегося состава базы;

$\tau_{bk}$  – административно-касательный рейтинг, или добротность ответственности имеющейся базы потребностям преподавателя(лей);

$\tau_{об}$  – касательный рейтинг, или добротность оценки базового обеспечения студентом(ами);

$\tau_{бс}$  – административно-касательный рейтинг, или добротность ответственности имеющейся базы потребностям студента(ов).

*Третий этап* сопряжен с построением дефектной ведомости и построением сранжированной диаграммы Раето для определения причин (*имени*) дефекта(ов) по вычисленным *адресам* в найденных *зонах* их расположения.

Используемый здесь прием освобождает оператора от необходимости интуитивного дифференцирования имени антикачества и тем более принятия оперативных или перспективных, но, тем не менее, хаотичных мер по их устранению

Заполнение дефектной ведомости проводится путем повторного анкетирования респондентов с необходимостью ответа на вопрос-посыл на дихатомическом уровне: да –1, нет – пробел, не уверен – пробел, с усреднением показателей и автопостроением дефектной диаграммы Парето.

Приводятся результаты практической реализации.

#### Литература

1. **Шапин В.И.** Диагностика качества обучения: Учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2007. – 80 с.

*Шапин Вадим Иванович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: tipm@tipm.ispu.ru

## СЕКЦИЯ «МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ И УСТАНОВКАМИ»

УДК 681.513.6

М.М. КОПЫЧЕВ, аспирант, К.В. ИГНАТЬЕВ, аспирант,  
А.В. ПУТОВ, к.т.н., доцент, Ж. АСИЕДУ-БААХ аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
197022 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова 5  
*E-mail: mkopichev@gmail.com*

### Трёхколёсный робот с всенаправленными колёсами и управлением с камерой захвата<sup>1</sup>

**Аннотация.** В результате работы был разработан трёхколёсный голономный робот с системой позиционирования по инфракрасным камерам и управлением по радиоканалу. Для реализации компьютерного зрения использовалась библиотека OpenCV. Разработанная система управления роботом выполняет все поставленные задачи и обеспечивает управление положением робота на плоскости.

**Ключевые слова:** голономный робот, система управления движением.

M.M. KOPICHEV, post graduate student,  
K.V. IGNATIEV, post graduate student,  
A.V. PUTOV, Candidate of Engineering, docent,  
J. ASIYEDU-BAAH, post graduate student

Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI»  
197022 Saint Petersburg, Popov of Professor St., 5. *E-mail: mkopichev@gmail.com*

### Three-wheeled robot with omni-wheels and control system with motion capture camera

**Abstract.** As a result of this work a holonomic three-wheeled robot with positioning system based on infrared camera and radio frequency control was developed. In order to implement a computer vision system open source library OpenCV was used. Robot control system performs all required tasks and provides autonomous movement of the robot on a plane.

**Key words:** holonomic robot, motion control system.

Представлена разработка системы управления движением трёхколёсного робота с всенаправленными колёсами, позволяющими роботу совершать движения во всех направлениях. Также представлена система

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания – задание № 2014/187 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности при финансовой поддержке Минобрнауки России

определения положения робота с помощью камеры захвата и передача сигнала управления с управляющего компьютера по радио каналу. Основными этапами разработки стали: проектирование конструкции робота; разработка системы определения положения робота с помощью камеры захвата; проектирование системы управления положением робота. В докладе рассмотрены вопросы создания системы управления положением робота на всенаправленных колёсах.

### Введение

Всенаправленные колёса становятся всё более и более популярными в робототехнике, т.к. позволяя роботу двигаться по прямой линии из одной точки плоскости в другую без необходимости в развороте. Более того, поступательное движение по прямой траектории может быть объединено с вращательным, обеспечивая перемещение робота в точку назначения под необходимым углом. Действия большинства всенаправленных колёс основаны на том, что колесо может беспрепятственно скользить в направлении оси вращения. Для получения такого эффекта в колесо встраиваются маленькие колёсики. Примеры всенаправленных колёс представлены на рис. 1.



Рис. 1. Всенаправленные колёса:  
а – omni-колесо; б – mecanum-колесо; в – WESN-колесо

Все, представленные на рис. 1, колёса предназначены для одновременно продольно-поперечного движения, что обеспечивает высокую маневренность робота. На представляемом в докладе роботе установлены колёса вида omni [1], приведённые на рис. 1, а.

### Механическая конструкция робота

На роботе установлены 3 всенаправленных колеса, расположенные через  $120^\circ$ . Основание робота выполнено из оргстекла и имеет форму треугольника. В колёсах используются двигатели постоянного тока, расположенные в углах треугольного основания. На основании установлена плата управления, основанная на 8-и битном AVR микроконтроллере, а также платы мостовых драйверов двигателей. К плате управления подключён радио приёмно-передатчик [2]. Над платами установлена треугольная пластина с двумя светоотражающими наклейками, представленная на рис. 2.

### Система определения положения робота

Для определения положения робота используется камера захвата. Она представляет собой камеру с установленным на неё инфракрасным



Рис. 2. Пластина со светоотражающими наклейками

фильтром, расположенную на потолке. Вокруг камеры расположен ряд инфракрасных светодиодов, направленных параллельно оси камеры. Свет от инфракрасных светодиодов отражается от светоотражающих наклеек робота и попадает в камеру. Из-за наличия инфракрасного фильтра камера видит только белые полоски на чёрном фоне. Для получения и обработки изображения с камеры используется библиотека

OpenCV [2–4]. В результате применения морфологических преобразований и пороговой функции можно получить бинарное изображение с двумя белыми полосками на чёрном фоне. По площади полосок и взаимному расположению их центров можно определить координаты робота и угол его поворота.

### Система управления положением робота

Для управления положением робота используется стационарный компьютер, к которому подключена камера захвата и радио приёмопередатчик. Уравнения поступательного ускорения центра масс, который мы принимаем расположенным в геометрическом центре робота, и углового ускорения робота выглядят следующим образом:

$$a = (f_1 + f_2 + f_3) / m; \quad \dot{\omega} = R(f_1 + f_2 + f_3) / J \quad (1)$$

где  $m$ ,  $R$ ,  $J$  – масса робота (кг), радиус (м) и момент инерции (кг·м<sup>2</sup>) робота;  $f_i$  – приложенные силы [1] ( $i = 1, 2, 3$ ).

После разложения на оси  $x$  и  $y$  можно получить следующую систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & -\sin\theta_2 & -\sin\theta_3 \\ \cos\theta_1 & \cos\theta_2 & \cos\theta_3 \\ \frac{mR}{J} & \frac{mR}{J} & \frac{mR}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

где  $\theta_i$  – угол между осью  $i$ -го колеса и осью  $x$ .

Мы можем получить необходимые скорости каждого из колёс, проинтегрировав полученные уравнения:



$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 1 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 1 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ R\omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

где  $g_x, g_y$  – желаемые поступательные скорости центра масс робота по осям  $x$  и  $y$ ;  $g_i$  – необходимая скорость  $i$ -го колеса.

Программа на компьютере обрабатывает изображение с камеры захвата с целью определения положения робота, а также получает от пользователя координаты желаемого положения робота. После чего запускается подпрограмма управления роботом в реальном времени: рассчитывается текущее положение робота и вектор движения до цели, исходя из вектора движения рассчитываются значения скоростей колёс, после чего эти значения отправляются по радиоканалу на робота.

### Заключение

В докладе рассмотрена задача создания роботов на голономном основании и управлением с помощью камеры глубины. Предложена механическая конструкция робота и указан метод определения положения робота в пространстве и управления его положением. В дальнейшем планируется использовать робота для отработки алгоритмов голономного движения по определённой траектории, а также перенести вычислительные мощности непосредственно на робота посредством установки на него миникомпьютера на основе ARM-процессора и операционной системы Linux.

### Литература

1. **Raul R.**, Alexander G.F. Holonomic Control of a robot with an omnidirectional drive. 2006. [http://people.idsia.ch/~foerster/2006/1/omnidrive\\_kiart\\_preprint.pdf](http://people.idsia.ch/~foerster/2006/1/omnidrive_kiart_preprint.pdf).
2. **Putov V.V.**, Putov A.V., Ignatiev K.V., Kopichev M.M., Asiedu-Baah J. Mobile manipulation platform control. // International Review of Automatic Control. – vol. 7. – 2014. – issue 4. – pp. 412-419.
3. **Laganiere R.** OpenCV2 Computer Vision Application Programming Cookbook. – UK: Packt Publishing Ltd. 32 Lincoln Road Olton Birmingham, B27 6PA. – 2011.
4. **Bradski G.**, Kaehler A. Learning OpenCV. – O'Reilly Media, Inc. 2008.

*Копычев М.М.*,

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

*Игнатъев К.В.*,

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

*Путов А.В.*,

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

*Асиеду-Баах Ж.*,

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

УДК 681.513.6

В.В. ПУТОВ, д.т.н., профессор,  
М.М. КОПЫЧЕВ, аспирант,  
К.В. ИГНАТЬЕВ, аспирант,  
А.В. ПУТОВ, к.т.н., доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
197022 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова 5  
*E-mail: mkopichev@gmail.com*

## Робот-манипулятор на подвижном основании<sup>2</sup>

**Аннотация.** В результате работы был разработан робот манипулятор на подвижном голономном основании с системой компьютерного зрения основанной на RGB-камере и инфракрасной камере глубины. Были разработаны алгоритмы поиска метки и движения к ней. Разработанная система управления роботом выполняет все поставленные задачи и обеспечивает автономное движение робота к заданной цели.

**Ключевые слова:** мобильный робот, робот-манипулятор, система управления движением.

V.V. PUTOV Doctor of Engineering, professor,  
M.M. KOPICHEV post graduate student, K.V. IGNATIEV post graduate student,  
A.V. PUTOV Candidate of Engineering, docent

Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI»  
197022 Saint Petersburg, Popov of Professor St., 5. *E-mail: mkopichev@gmail.com*

## Mobile robot manipulator

**Abstract.** As a result of this work a mobile robot-manipulator on holonomic base was developed. Robot computer vision system is based on RGB webcam and infrared depth camera. Pattern recognition and pattern following algorithms were developed. Robot control system performs all required tasks and provides autonomous movement of the robot.

**Key words:** mobile robot, robot-manipulator, motion control system.

В докладе представлена разработка системы управления и взаимодействия с окружающей средой для мобильного манипулятора на подвижной платформе. Основными этапами разработки явились: проектирование системы управления для двигателей постоянного тока, которая обеспечивает движение отдельных модулей манипулятора и мотор-колёс подвижной платформы; синтез и проектирование алгоритмов для одноплатного компьютера для обеспечения обмена данными между отдельными компонентами системы, а также – выработки управляющего воздействия; проектирование и разводка печатных плат управления для

---

<sup>2</sup> Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания – задание № 2014/187 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности при финансовой поддержке Минобрнауки России

комплектации управляющего пульта. В докладе рассмотрены вопросы создания автономной системы мобильного манипулятора для широкого спектра задач пространственной ориентации и распознавания образов.

### **Введение**

В настоящее время роботы широко распространены в промышленности, выполняя большой объём работ связанных с монотонной или опасной для человека деятельностью. В последние годы в связи с глобализацией рынков и торговой нестабильностью в мировом производстве появляется потребность в промышленных роботах способных в короткие сроки полностью изменить алгоритм своей работы. В связи с этим многие ведущие университеты мира начали проекты по разработке автономных роботов-манипуляторов на подвижном основании. К наиболее значимым проектам относятся:

- автономный робот-манипулятор SAMM, разрабатываемый в Стенфордском университете (США), использующий промышленный манипулятор Nokia Puma 560, установленный на основание с рулевыми колёсами;

- автономный робот-манипулятор «Little helper», разрабатываемый в университете города Ольборг (Дания), оснащённый манипулятором с 6-ю степенями свободы и установленный на основание с двумя ведущими и одним опорным колесом. Имеет ряд сенсоров, среди которых лазерный сканер, ультразвуковые дальномеры, энкодеры в колёсах и монохромная камера, на роботе также установлен персональный компьютер под управлением операционной системы Windows XP [1];

- автономный робот-манипулятор ABBY, разработанный в университете Кейс Вестерн города Кливленд (США), оснащённый неголономным подвижным основанием с двумя ведущими и двумя опорными колёсами, в качестве манипулятора используется ABB IRB-120 Robatic Arm, для управления роботом используется ABB IRC5 Compact Robot Controller и компьютер под управлением операционной системы Linux и Robot OS (ROS), а в качестве датчиков используются лазерный сканер и инфракрасная камера глубины (Microsoft Kinect) [2];

- автономный робот манипулятор UMan (UMass Mobile Manipulator), разрабатываемый в Массачусетском университете в городе Амхерст (США), установленный на всенаправленное подвижное основание, представляющее собой роботизированный механизм XR4000 с четырьмя рулевыми колёсами с восемью энкодерами, двумя процессорами, пятью микроконтроллерами и оптическими датчиками. Манипулятор имеет 7 степеней свободы, на роботе также установлен лазерный сканер [3].

### **Механическая конструкция автономного робота-манипулятора, разрабатываемого в СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**

На подвижном основании закрепляется механический манипулятор (Nokia Puma 560), шкаф управления с электронными компонентами и всенаправленные мотор-колёса в колёсных арках. Использование всена-

правленных колёс позволяет роботу совершать движение в любых направлениях. Изображение робота приведено на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид робота

положения фланца в пространстве. В данной системе координат все перемещения определяются относительно рабочего органа.

#### **Принцип работы автономной системы управления**

Ключевыми компонентами системы управления являются:

- одноплатный компьютер для системы «верхнего уровня»;
- плата управления «нижнего уровня»;
- платы управления двигателями;
- периферийные устройства и датчики.

Система управления роботом условно разделяется на два уровня. Система управления нижнего уровня обеспечивает движение мотор-колёс и модулей промышленного манипулятора; верхний уровень обеспечивает сбор и обработку данных, а также генерацию управляющих воздействий для элементов нижнего уровня.

На рис. 2 приведена диаграмма системы управления роботом. На вершине иерархической структуры располагается одноплатный компьютер 1 на базе процессора Intel Celeron. К одноплатному компьютеру подключена камера глубины 2 для ориентации в пространстве и веб-камера 3 для распознавания образов. Плата управления «нижнего уровня» 4 предназначена для управления мотор-колёсами 6 и обеспечивает

В состав каждого звена входят следующие электроприводы постоянного тока и зубчатые передачи. Серводвигатели приводов оснащены электромагнитными тормозами, которые включаются при выключении питания двигателей, обеспечивая, тем самым, фиксацию манипулятора в положении, предшествующим отключению питания с целью недопущения несчастных случаев и повреждения установки. Для устройства возможно введение нескольких систем координат, в отношении отдельных звеньев, каждая из которых будет полярной и будет определять взаимные перемещения звеньев.

Однако результирующая система отсчёта будет прямоугольной.

Базовая система координат находится на основании. Перемещение инструмента связано с изменением

передачу данных от датчиков 5 на одноплатный компьютер 1 по протоколу RS-232 [4].

### Распознавание образов и ориентация в пространстве

Проблема распознавания образов решается с использованием RGB веб-камеры. Образ, в данном случае состоит из двух разноцветных областей, причём одна лежит в пределах другой. Для ориентации в пространстве робот снабжён инфракрасной камерой глубины. Такая камера позволяет получать в реальном времени карту глубины окружающего пространства и определять расстояния до объектов. Обработка данных с камер осуществляется с использованием библиотек с открытыми исходными кодами OpenCV и OpenNI.

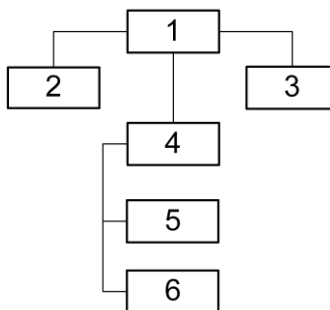


Рис. 2. Иерархическая диаграмма системы управления

### Литература

1. **Mads Hvilshøj**, Simon Bøgh. «Little Helper» – An Autonomus Industrial Mobile Manipulator Concept. // International Journal of Advanced Robotic Systems. – Vol. 8. – 2011. – No. 2. – ISSN 1729-8806. – pp. 80-90.
2. **Venator E.** Hardware and software architecture of ABBY: An industrial mobile manipulator. // Conference: Automation Science and Engineering (CASE). IEEE International Conference. – 2013.
3. **D. Katz**, E. Horrell, Y. Yang, B. Burns, T. Buckley, A. Grishkan, V. Zhylykovskyy, O. Brock, and E. Learned-Miller. «The UMass mobile manipulator uMan: An experimental platform for autonomous mobile manipulation» Proc. RSS Workshop: Manipulation for Human Environments. – Philadelphia, PA. Aug. 2006.
4. **Putov V.V.**, Putov A.V., Ignatiev K.V., Kopichev M.M., Asiedu-Baah J. Mobile manipulation platform control. // International Review of Automatic Control. – vol. 7. – issue 4. – 2014. – pp. 412-419.

*Путков В.В.,*

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

*Копычев М.М.,*

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

*Игнатьев К.В.,*

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

*Путков А.В.,*

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

УДК 681.513.6

М.М. КОПЫЧЕВ, аспирант, К.В. ИГНАТЬЕВ, аспирант,  
А.В. ПУТОВ, к.т.н., доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
197022 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова 5  
*E-mail: mkopichev@gmail.com*

### **Автономный робот с системой компьютерного зрения<sup>3</sup>**

**Аннотация.** Создан трёхколёсный робот с системой управления, позволяющей избегать столкновений с препятствиями и двигаться к заданной цели, даже при динамическом изменении её положения. Разработанная система управления выполняет поставленные задачи.

**Ключевые слова:** трёхколёсный робот, компьютерное зрение, распознавание образов, карты глубины, система управления движением.

M.M. KOPICHEV, post graduate student, K.V. IGNATIEV, post graduate student, A.V. PUTOV, Candidate of Engineering, docent  
Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI»  
197022 Saint Petersburg, Popov of Professor St., 5. *E-mail: mkopichev@gmail.com*

### **Autonomous computer vision equipped robot**

**Abstract.** The three-wheeled robot with the control system that provides spatial orientation, obstacles avoiding and pattern recognition for the mobile robot. The control system implemented fulfill the requirements to the autonomous mobile robot.

**Key words:** three wheeled robot, computer vision system, pattern recognition, disparity map, motion control system.

В докладе рассматриваются вопросы разработки трёхколёсного автономного робота. Описываются детали его конструкции, двухконтурная система управления скоростью мотор-колёс с бесщёточными двигателями постоянного тока. Отдельно рассматривается система компьютерного зрения, основанная либо на инфракрасном датчике глубины и веб-камере, либо на стереокамере. Описываются алгоритмы поиска паттернов, получения карты глубины с помощью стереокамеры и построения 3D реконструкции помещения на основании данных о местоположении робота и изображении, получаемом со стереокамеры.

#### **Введение.**

Разрабатываемый робот имеет классическую трёхколёсную конструкцию, содержащую два ведущих передних колеса и одно опорное колесо, способное свободно вращаться вокруг вертикальной оси и расположенное в задней части робота. Данная конструкция позволяет удобно

---

<sup>3</sup> Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания – задание № 2014/187 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности при финансовой поддержке Минобрнауки России

управлять положением и скоростью передвижения робота. Внешний вид робота приведён на рис. 1.

Подобные роботы, обладающие возможностью передвижения в сложных условиях, могут использоваться в сфере обслуживания, например, на складских участках производства [1].

### **Система управления мотор-колёсами робота**

Для управления скоростью вращения мотор-колёс разработана базовая двухконтурная электромеханическая система управления с подчинённым управлением, дополняемая, в случае необходимости, в более сложной постановки задачи подавления упругих деформаций и параметрической неопределённости, модальным, адаптивным или интеллектуальным управлением [2].

Для реализации системы управления была разработана и изготовлена плата управления на основе 8-ми разрядного микроконтроллера Atmel ATmega128A. Для подачи напряжения на обмотки двигателя используется мостовой инвертор на полевых транзисторах. Скорость вращения колеса определяется с помощью сигналов датчиков Холла, расположенных внутри колеса, путём расчёта временных промежутков между приходящими от них импульсами, а также корректировкой значения скорости при увеличении периода импульсов. Сигнал задания скорости принимается в виде импульса переменной ширины и постоянной частоты, равной 50 Гц. Программа микроконтроллера написана на языке Си [3]. Подаваемое на двигатель напряжение можно изменять посредством ШИМ-сигнала, подаваемого на затворы транзисторов инвертора [4].

Платы управления мотор-колёсами получают задание с платы низковольтного управления, на которой установлено два 8-ми разрядных микроконтроллера, объединённых по протоколу I<sup>2</sup>C, а также датчики. Первый микроконтроллер получает данные от всех датчиков и передаёт их второму с постоянной частотой. Второй микроконтроллер связан с платами управления мотор-колёсами, от которых он получает текущие значения скоростей колёс, и которым он отправляет задание на скорость вращения. По последовательному протоколу RS-232 плата соединяется с одноплатным компьютером на Linux, которому отправляет показания датчиков и скорости колёс.

### **Система автономного управления движением робота с компьютерным зрением**

Для ориентации в пространстве рассматривается применение либо инфракрасной камеры глубины и RGB-камеры, либо стереокамеры. Инфракрасная камера глубины – это устройство излучающее паттерн



Рис. 1. Внешний вид робота

инфракрасных лучей в окружающее пространство и по его искажению определяющая расстояния до окружающих объектов.

Таким образом, можно получить карту глубины окружающего пространства и распознать возможные препятствия [5]. Используя C++ библиотеки с открытыми исходными кодами OpenCV и OpenNI можно получить карту глубины в виде массивов данных, последовательно обрабатывая которые можно рассчитать расстояния до препятствий [6]. Пример карты глубины приведён на рис. 2.



Рис. 2. Карты глубины

Для нахождения целей (паттерна) используется обычная RGB-камера. В качестве целей рассматриваются два варианта рисунка – цветной и геометрический.

Для нахождения цветного паттерна применяются программные фильтры для нахождения отдельно каждого из цветов цели. После фильтрования цветов, применяется правило, определяющее взаимное расположение фигур цели. Результат поиска цветного паттерна приведён на рис. 3.

Геометрический паттерн распознаётся в несколько этапов. Сначала изображение переводится в гамму градаций серого с применением эффекта размытия. После чего, применяется инструмент – детектор границ Кенни, позволяющий определить все границы на изображении по величине производной яркости пикселей. Далее программным алгоритмом фильтруются только замкнутые контуры. Следующим этапом станет определение совокупности геометрических фигур, присутствующих на изображении-образце. Результат поиска геометрического паттерна приведён на рис. 4.



Рис. 3. Поиск цветного паттерна

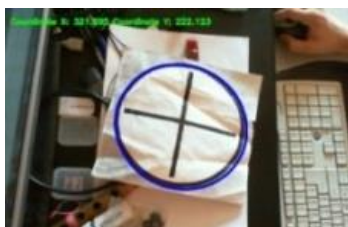


Рис. 4. Поиск паттерна

При использовании стереокамеры возникает необходимость в преобразовании двух обычных изображений в карту глубины. Удовлетворительных результатов по критериям скорости и точности вычислений



позволяют получить алгоритмы BM (Block Matching) и SGBM (Semi-Global Block Matching).

Принцип их работы основан на поиске блоков пикселей с левого изображения на эпиполярной линии на правом изображении, и вычисления расстояния на основе разности координат блоков на двух изображениях [7]. Возможности 3D реконструкции приведены на рис. 5.

Таким образом, по карте глубины возможно определение расстояния до найденного с помощью RGB-камеры паттерна, его координаты относительно положения робота, и возможные препятствия на пути к нему. Далее строится предварительный маршрут следования робота с учётом карты глубины и возможных препятствий. По мере движения робота по маршруту, его координаты определяются с помощью известных скоростей его обоих колёс, а маршрут корректируется с учётом новых построений карты глубины. В случае передвижения цели-метки, при следующем её обнаружении координаты метки обновляются, и маршрут перестраивается с учётом её нового положения.



Рис. 5. 3D-реконструкция

#### Литература

1. **Wurman P.**, D'Andrea R., Mountz M. Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses. // *AI magazine*. – 2008. – 29(1). – pp. 1752-1759.
2. **Пугов В.В.**, Шелудько В.Н. Адаптивные и модальные системы управления много-массовыми нелинейными упругими механическими объектами. – СПбГЭТУ. – 2007.
3. **Бесекецкий В.А.** Микропроцессорные системы автоматического управления. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение. 1988. – 113 с.
4. **Ogata K.** Modern control engineering. – USA: Prentice Hall. 1997. – 81 p.
5. **Kopichev M.M.**, Ignatiev K.V., Putov A.V. Autonomous control and stabilization system for unmanned aerial vehicles. // *IFAC Proceedings Volumes*. – vol. 2. – 2013. – issue PART 1. – pp. 240-243.
6. **Parker J.R.** Algorithms for image processing and computer vision. – USA: Wiley Publishing. 2011. – 366 p.
7. **Droppelmann S.**, Hueting M., Latour S., Van der Veen M. Stereovision using the OpenCV library. 2010. – 14 p.

*Копычев М.М.*,

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

*Игнатъев К.В.*,

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

*Путоев А.В.*,

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

УДК 681.513.6

М.М. КОПЫЧЕВ, аспирант,  
К.В. ИГНАТЬЕВ, аспирант, А.В. ПУТОВ, к.т.н., доцент,  
Н.А. РУСЯЕВ, аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
197022 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова 5  
*E-mail: mkopichev@gmail.com*

## Система управления гибридным электроэнергетическим комплексом<sup>4</sup>

**Аннотация.** Рассматриваются некоторые вопросы построения и полунатурного исследования алгоритмов автономного управления параллельной работой источников гибридной электроэнергетической системы по условию поддержания заданных параметров электроснабжения с минимизацией расхода невозобновляемых энергетических ресурсов гибридного комплекса.

**Ключевые слова:** гибридная электроэнергетика, система управления, возобновляемые источники энергии, энергоэффективность.

M.M. KOPICHEV, post graduate student,  
K.V. IGNATIEV, post graduate student,  
A.V. PUTOV, Candidate of Engineering, docent,  
N.A. RUSYAEV, post graduate student

Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI»  
197022 Saint Petersburg, Popov of Professor St., 5. *E-mail: mkopichev@gmail.com*

## Hybrid renewable energy sources` control system implementation

**Abstract.** In this report several questions of design and semirealistic simulation of the autonomous control algorithms for the parallel action of the components of the hybrid system according to the minimal working time of the exhaustible energy sources and maximum efficiency of the renewable energy sources.

**Key words:** hybrid energy, control system, renewable energy sources, efficiency.

В докладе представлен краткий обзор современных решений в области гибридных электроэнергетических комплексов. Представлены сферы применения и эффективность таких решений. Рассматривается проектирование системы управления и конструкции стенда гибридного электроэнергетического комплекса.

### Введение

Задачи повышения энергетической эффективности и ресурсосбережения являются актуальными во всём мире. Для решения этих задач в

---

<sup>4</sup> Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания – задание № 2014/187 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности при финансовой поддержке Минобрнауки России

последние годы разрабатывается новая энергетическая политика, основанная на использовании гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии (HRES – Hybrid Renewable Energy System), в которых традиционные источники электроэнергии объединены с возобновляемыми (такими как солнечные панели, ветровые генераторы и другими). Подобные решения значительно влияют на социально-экономические факторы региона [1–4].

Данная концепция энергетического менеджмента способствует отчасти сокращению использования ископаемых источников энергии, снижению стоимости электроэнергии и повышению эффективности энергетических систем за счет достижения баланса между потреблением и предложением электроэнергии.

Существующие в настоящее время гибридные энергетические системы и алгоритмы управления ими недостаточно полно удовлетворяют требованиям эффективности по ряду причин. Во-первых, не учитывается стоимость электроэнергии, вырабатываемой различными поставщиками (источниками электроэнергии); во-вторых, если электроэнергия, выработанной источниками возобновляемой энергии, недостаточно для потребителей, то используются внешние энергосети без учета тарифного плана электроэнергии и зачастую по невыгодной цене. Управление же энергетическими системами с возобновляемыми источниками энергии является сложной задачей, так как на функционирование системы влияют внешние воздействия (погодные условия) и внутренние факторы (тарифные планы, мощности нагрузки, состояния помещения). Качество решения данной проблемы зависит от имеющихся данных об энергетической системе (о потреблении и производстве электроэнергии) и от применяемых методов обработки информации и управления.

В связи с вышесказанным, актуальной является оптимизационная задача управления энергопотоками в гибридной энергетической системе по критерию минимума затрат невозобновляемых энергетических ресурсов.

### **Системы гибридного энергоснабжения**

Комбинирование различных типов преобразователей энергии, таких как ветровые генераторы, солнечные панели и дизель генераторы, позволяет снизить начальные инвестиции в разработку, а также повысить эффективность использования такого оборудования. Подобные гибридные преобразователи энергии могут быть особенно полезны для крупных потребителей энергии, таких как торговые центры, отели, образовательные учреждения и больницы. Возможно их внедрение в существующие системы с дизель генераторами для уменьшения количества выбросов. Такие системы могут управляться либо локально, либо удалённо (по сети GSM или с использованием web-приложений). Возможные технические решения приведены на рис. 1, а, б [2].

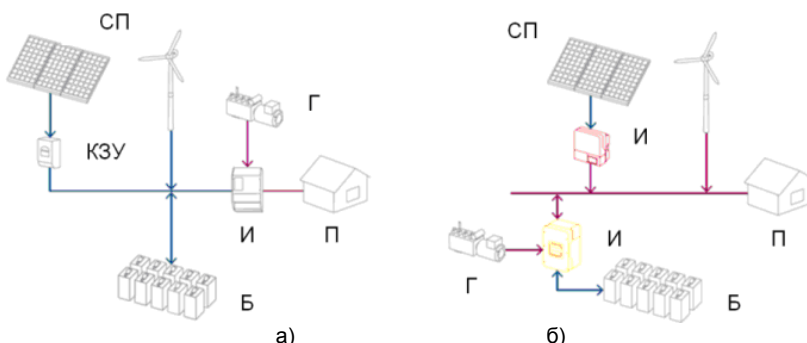


Рис. 1. Схемы сопряжения гибридных электроэнергетических комплексов:  
а – по постоянному току; б – по переменному току

На рис. 1, а приведена схема так называемого сопряжения по постоянному току, на рис. 1, б – по переменному току. На рис. 1, а, б приняты следующие обозначения: СП – солнечная панель, КЗУ – контроллер зарядного устройства, Г – генератор, И – инвертор, Б – блок батарей, П – потребитель. Синими соединительными линиями здесь обозначены линии передачи постоянного тока, красными – переменного.

Электрическая энергия от различных источников поступает на вход системы управления, которая позволяет распределить и перенаправить энергию от различных источников потребителю.

#### Стенд гибридного энергообеспечения

Для исследования задач автономного управления гибридными электроэнергетическими комплексами на кафедре систем автоматического управления СПбГЭТУ собран стенд гибридного электроснабжения. Для проектирования стенда гибридного энергоснабжения была разработана иерархическая диаграмма, позволяющая продемонстрировать возможности предлагаемого оборудования в условиях изменения нагрузки. На рис. 2 приведена схема гибридного энергетического комплекса.

В качестве источника гарантированной мощности должен выступать генератор, обеспечивающий потребителя энергией на пиковых нагрузках [3]. Возобновляемые источники энергии представлены солнечной панелью, ветровым генератором и тепловым двигателем (двигателем Стирлинга) [4].

Для целей исследования и подбора рабочей точки ветрового генератора на стенде предусматривается вентилятор. При постоянном значении скорости вращения генератора, необходимо повышать эффективность системы путём регулирования величины нагрузки. Кроме того, при изменении скорости ветра, рабочая точка генератора смещается. Таким образом, можно построить функцию зависимости величины нагрузки от скорости ветра. Для теплового двигателя и солнечной панели процесс

подбора рабочих точек аналогичен. В качестве источника тепла используется прожектор.

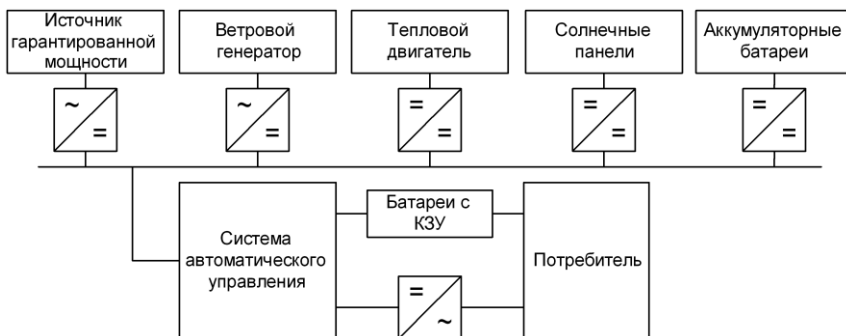


Рис. 2. Схема стенда гибридного энергоснабжения

В докладе рассматриваются некоторые вопросы построения и полунатурного исследования алгоритмов автономного управления параллельной работой источников гибридной электроэнергетической системы по условию поддержания заданных параметров электроснабжения с минимизацией расхода невозобновляемых энергетических ресурсов гибридного комплекса.

### Литература

1. **Juwi Group**. A combination of different energy sources for large consumers. 2013. [http://www.juwi.com/off\\_grid\\_systems/solutions/solar\\_hybrid\\_systems.html](http://www.juwi.com/off_grid_systems/solutions/solar_hybrid_systems.html).
2. **Madhu Prabhuraj P.**, Sasiraja R.M. Controller for standalone hybrid renewable power generation. // International journal of engineering trends and technology (IJETT). – vol. 4. – 2013. – №6. – pp. 2498-2502. – ISSN 2231-5381.
3. **Snyman H.**, Harms T.M., Strauss J.M. Design analysis methods for Stirling engines. // Journal of energy in southern Africa. – vol. 19. – 2008. – №3. – pp. 4-19.
4. **Кундас С.П.**, Шенк Ю., Вайцехович Н.Н. Гибридные технологии в использовании возобновляемых источников энергии. – Минск: Энергоэффективность. 2012. – С. 19–23.

*Копычев М.М.*,

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

*Игнатъев К.В.*,

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

*Путлов А.В.*,

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

*Русяев Н.А.*,

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
e-mail: mkopichev@gmail.com

УДК 629.423.31(043)

ЛЕ СУАН ХОНГ, аспирант

Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
111250 г. Москва, ул. Красноказарменная 14  
E-mail: [tenbigstar1209@yahoo.com](mailto:tenbigstar1209@yahoo.com)

## Модернизация системы тягового электропривода вагонов метрополитена

**Аннотация.** Показано, что при реализации на ЭПМ с тяговыми машинами постоянного тока (ТМ ПТ) простых и проверенных на опытных образцах технических решений по совершенствованию их ТЭП они не будут уступать поездам с АТМ ни по одному показателю. Важнейшим преимуществом является возможность использования полученных результатов при модернизации эксплуатируемых ЭПМ, значительная часть которых ещё не отработала расчётного срока. Поэтому ТЭП с ТМ ПТ перспективно.

**Ключевые слова:** электрический транспорт, потребление электроэнергии, тяговый электропривод, рекуперативное торможение.

LE XUAN HONG, post graduate student

National Research University «MPEI»  
111250 Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14. E-mail: [tenbigstar1209@yahoo.com](mailto:tenbigstar1209@yahoo.com)

## Improvement of electric traction system for metro

**Abstract.** It is shown that the implementation of EPM on a traction machine DC simple and proven on prototypes of technical solutions to improve their electric traction systems they will not yield to trains to the AC on any indicator. The most important advantage is the possibility of using the results in the modernization of the exploited EPM, most of which have not yet fulfilled the calculation period. Therefore electric traction systems with traction machine DC promising.

**Key words:** electric vehicles, energy consumption, electric traction system, regenerative braking.

Степень урбанизации в Российской Федерации высокая. В настоящее время огромная часть населения страны живёт в городах. Причем со временем она только увеличивается. Поэтому транспорт, включая электрический транспорт, играет большую роль в функционировании и развитии в удовлетворении потребности населения в передвижении.

Известные экономические и экологические преимущества электрического транспорта (автобус, троллейбус, метро и т.п.) обуславливают рост доли пассажирских перевозок в крупных городах. В частности, в Москве метрополитен был открыт уже 15 мая 1935 г., а сегодня его доля в перевозке пассажиров среди предприятий городского пассажирского транспорта столицы превышает 56 %. По сведениям официального сайта

Мосметрополитена: «услугами в среднем ежедневно пользуются более 7 млн. пассажиров, а в будние дни этот показатель превышает 9 млн. пассажиров. Это наивысший показатель в мире». На этом же сайте утверждается, что сегодня «по интенсивности движения, надёжности и объёмам перевозок Московский метрополитен стабильно занимает первое место в мире. Он в первой тройке метрополитенов мира практически по всем другим показателям».

Программа развития транспортной системы рассчитана на период с 2011 по 2020 годы, т.е. на 10 лет. В этот период предстоит в 1,5 раза увеличить протяженность Московского метрополитена, что «намечено строительством более 160 км новых линий, т.е. планируется ежегодное увеличение длины линий на 16 км».

Предполагалось, что с 305,6 км в 2010 г. длина линий Мосметро в 2013 г. увеличится до 332,6 км, а в 2020 г. – до 467 км, причём в 2013 г. планировалось построить 14 км путей (табл. 1). Таким образом, темп строительства метрополитена резко возрастёт (с 6,5 км/год в начале 10-х годов 21 века до 19 км/год по реализуемой сегодня (в 2015 г.) программе).

Выполним оценку энергетических показателей Мосметрополитена, в котором уже давно установились стабильные условия движения (скорость сообщения порядка 42 км/ч, средняя длина перегона между станциями – около 1700 м и предельное число пар поездов). Можно, без большой ошибки, считать, что средние условия движения поездов в Мосметро в относительно короткие сроки существенно не изменятся.

Таблица 1. Программа развития Московского метрополитена

Год	2010	2013	2020
Протяженность линий, км	305,6	332,6	467
Доля населения, не обслуживаемого метро	25 %	20 %	7 %
Доля вагонов новых серий	15 %	27 %	64 %

Если предположить, что энергетические показатели электропоездов метрополитена (ЭПМ) и условия их эксплуатации не изменятся (что, видимо, и будет иметь место в ближайшие годы), то потребление Мосметрополитеном электроэнергии на тягу из внешнего электроснабжения увеличится пропорционально росту длины линий.

По известным данным в 2007 г. длина линий  $L$  Мосметрополитена составляла около 305 км, а потребление энергии  $A_n$  из внешнего электроснабжения – около 1,6 млрд кВт·ч/год. При этом «удельное» потребление электроэнергии составляло  $A_{уд} = A_n/L = 5,246$  млн кВт·ч/км и, в случае сохранения существующих условий эксплуатации, включая и энергетические показатели ЭПМ, приращение потребления электроэнергии у внешнего

электроснабжения при увеличении длины линий до 467 км (плановая цифра), т.е. на 162 км, составит  $A_n = 162A_{уд} \approx 850$  млн кВт·ч, а общее потребление энергии в контрольном 2020 г. достигнет 2,5 млрд. кВт·ч. Эта же цифра, естественно, получится умножением удельного потребления энергии на 1 км пути и его плановой длины ( $A_n = 467A_{уд} \approx 2,5$  млрд кВт·ч). При цене электроэнергии около 3 руб./кВт·ч, затраты Мосметрополитена на оплату потребляемой на тягу электроэнергии составят в 2020 г. около 7,5 млрд руб. По известным данным можно прогнозировать, что потребление энергии одним вагоном «Метровагонмаш» (МВМ) в год составит около 2,5 млн кВт·ч стоимостью около 7,5 млн. руб.

Основным резервом сокращения общего потребления энергии метрополитенов является улучшение энергетических показателей подвижного состава (ПС), так как около 75 % энергии расходуется на тягу поездов, примерно 20–22 % – на собственные нужды трассы и 3–5 % – на ремонтную базу. Следующими по значимости являются расходы на собственные нужды трассы: освещение, отопление, санитарно-технические установки и эскалаторы. Однако потребление на собственные нужды существенно зависит от энергетических показателей ПС. В связи с этим чрезвычайно актуальна проблема снижения удельного потребления метрополитенами электроэнергии на единицу транспортной работы.

Таким образом, улучшение энергетических показателей вагонов метрополитена (ВМ) позволяет, как непосредственно сократить удельный расход энергии метрополитенами, так и уменьшить ее потребление, чему способствует снижение интенсивности вентиляции туннелей.

Одним из технических решений указанной проблемы является применение системы тягового электропривода постоянного тока (ТЭП ПТ) с автоматически регулируемым независимым возбуждения тяговых машин (АР НВ ТМ), разработанной кафедрой «Электрический транспорт» МЭИ. При использовании такой системы реализуются [1]:

- улучшение тяговых свойств в зоне ограничения динамической жесткости тяговых характеристик и регулирования силы тяги условиями сцепления и в зоне ослабления поля ТМ соответственно за счет повышения силы тяги согласно с фактически действующим ограничением при уменьшении разброса нагрузок параллельно включенных групп ТМ;

- повышение эффективности тормозного процесса за счет более плавного регулирования тормозной силы в зоне высоких скоростей движения и сохранения максимальной тормозной силы до существенно меньшей скорости движения;

- рекуперативное торможение, являющееся основным резервом повышения энергетической эффективности вагонов метрополитена, с осуществлением в этом режиме перегруппировки ТМ;

- возможность использования более эффективных энергосберегающих алгоритмов управления в пусковых режимах.



Кроме этого, показатели ТЭП ЭПМ могут быть дополнительно повышены при использовании возможных усовершенствований конструкции [2].

**Вывод:** объективные данные показывают, что при реализации на ЭМП с тяговыми машинами постоянного тока (ТМ ПТ) простых и проверенных на опытных образцах технических решений по совершенствованию их ТЭП [3] они не будут уступать поездкам с АТМ ни по одному показателю. При цене, ориентировочно вдвое меньшей, они будут существенно эффективнее. Важнейшим их преимуществом является возможность использования полученных результатов при модернизации эксплуатируемых ЭПМ, значительная часть которых ещё не отработала расчётного срока. Поэтому применение ТЭП с ТМ ПТ является перспективным.

#### Литература

1. **Тулупов В.Д.**, Марченков А.П., Кабанец С.И. и др. Схема силовых цепей вагонов метрополитена с независимым возбуждением тяговых машин и тиристорным реостатным контроллером. // Труды МЭИ. – 1992. – вып. 641. – С. 36-45.
2. **Электропривод** постоянного тока. Состояние и тенденции. // Доклад научно-практического семинара. – М.: МЭИ. 2002.
3. **Тулупов В.Д.** Тяговый электропривод постоянного тока с наилучшими технико-экономическими показателями. // Сборник «Электросила». – СПб. – 2002. – вып. 41. – С. 196-210.

*Хонг Ле Суан,*  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
e-mail: [tenbigstar1209@yahoo.com](mailto:tenbigstar1209@yahoo.com)

УДК 621.313

О.В. КРЮКОВ, к.т.н., доцент

ОАО «Гипрогазцентр», 603950 г. Нижний Новгород, ул. Алексеевская, 26  
E-mail: [o.kryukov@ggc.nnov.ru](mailto:o.kryukov@ggc.nnov.ru)

### **Парадигма применения электроприводных газоперекачивающих агрегатов на объектах ОАО «Газпром»**

**Аннотация.** Предложен способ магистрального транспорта газа, обеспечивающий наивысшую энергоэффективность при любых режимах работы магистральных газопроводов. Разработаны инвариантные системы автоматического управления технологически связанными электроприводами.

**Ключевые слова:** инвариантная система, электропривод газоперекачивающего агрегата, энергоэффективность управления.

O.V. KRYUKOV Candidate of Engineering, docent

JSC «Giprogazcenter»

603950, Nizhny Novgorod, Alekseevskaya St., 26. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

## Application Paradigm of Electric Driven Gas Compressor Units at JSC «Gazprom» Facilities

**Abstract.** There offered the way of gas main transport, providing the highest energy efficiency at different main gas pipelines modes of work. Invariant systems of technologically interconnected electric drives automatic control are developed.

**Key words:** invariant system, gas compressor unit electric drive, control energy efficiency.

Согласно нормам технологического проектирования МГ ОНТП 51-1-85\* (п. 3.116) «в комплексе средств автоматизации КЦ следует предусматривать САР, обеспечивающие поддержание давления и температуры газа на выходе станции, устройства антипомпажного регулирования и защиты ЭГПА». Однако существующие средства автоматики работают в ручном режиме, выполняя в основном защитные функции, и не обеспечивают энергоэффективные режимы. Вместе с тем, сегодня возможности регулируемого ЭГПА позволяют оптимизировать энергопотребление КЦ с автоматическим слежением за возмущениями [1].

В соответствии с патентом на изобретение [2] предложен способ магистрального транспорта газа, обеспечивающий наивысшую энергоэффективность при любых режимах работы магистральных газопроводов (рис. 1).

Это достигается тем, что температура и давление компримированного газа на выходе всех КС в начале каждого линейного участка газопровода измеряются и автоматически регулируются из условия поддержания их на оптимальном уровне в соответствии с заданием и значениями внешних возмущений, действующих на параметры потока газа.

Сопоставительный анализ данного способа с аналогами показывает, что предлагаемая парадигма отличается возможностями плавного регулирования величин давления и температуры газа с помощью регулируемых ЭГПА и АВО в зависимости от текущих значений и величинами, чем повышается эксплуатационная надежность, и минимизируются энергозатраты на привод ЭГПА и вентиляторов АВО газа.

В качестве исходного состояния оптимизации необходимо выбрать интервалы значений непрерывно изменяющихся переменных и наборы значений дискретных переменных. Причем возможные значения переменных анализируются при постепенном построении дерева, ветви которого соединены с узлами, описывающими рассматриваемые комбинации значений, с использованием технологии разделения переменных.

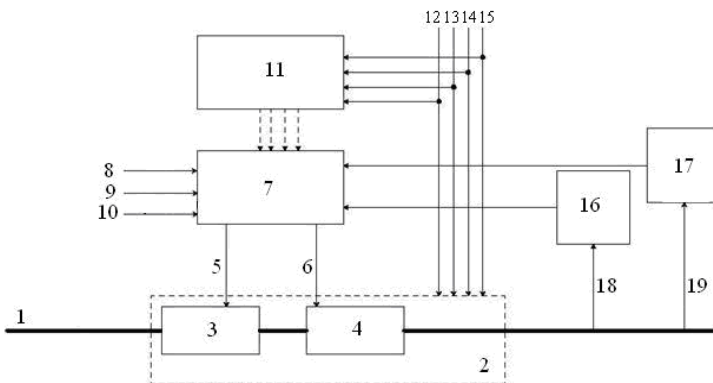


Рис. 1. Структура энергоэффективного транспорта газа через электроприводную компрессорную станцию (КС):

1 – линейная часть МГ; 2 – КС; 3 – ЭГПА; 4 – АВО газа; 5 и 6 – скорости вращения приводов ЭГПА и вентиляторов АВО; 7 – блок расчета параметров регуляторов; 8, 9, 10 – заданные производительность, давление и температура газа; 11 – датчики внешних воздействий; 12 – влажность воздуха ( $\beta$ ); 13 – температура воздуха ( $\theta$ ); 14 – перепад температур ( $\Delta t$ ) или давлений на КС ( $\Delta p$ ); 15 – производительность КС ( $Q$ ); 16 и 17 – датчики давления и температуры газа; 18 и 19 – реальные значения давления и температуры газа на выходе КС

Таким образом, в приоритетном порядке проходят ветви с наибольшей вероятностью успешного решения, причем искомые величины рассматривают как оптимальные. При этом достигается минимум целевой функции, которая имеет следующий трехфакторный вид:

$$\mathbf{G} = \alpha \mathbf{R} + \beta \mathbf{W} + \gamma \mathbf{C}, \quad (1)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – весовые коэффициенты;  $\mathbf{R}$  – фактор «режима», т.е. минимизации (максимизации) давления в определенных точках ГТС, расположенных выше и ниже КС, а также устройства потребления газа;  $\mathbf{W}$  – фактор «энергии» (минимизации потребления электроэнергии) на компримирование газа и его охлаждение в АВО перед подачей в МГ;  $\mathbf{C}$  – фактор «цели», максимизации (минимизации) расхода газа на участке.

Причем указанные ограничения включают в себя ограничения равенства, в число которых входят закон потери напора в трубопроводах и первое правило Кирхгофа, определяющие расчеты сетей, и ограничения неравенства и ограничения мощности ЭГПА КС.

Оптимальная конфигурация активных объектов КС моделируется в виде программы **P** оптимизации следующего вида:

$$P = \begin{cases} \min_{\{x,s,e\}} f(x,s) = G(x) + \alpha \|S\|, \\ C_1(x) + \beta e \leq s_1, \\ C_E(x) = s_E, \end{cases} \quad (2)$$

где  $x \in R^n$ ,  $s_1 \in R^p$ ,  $s_E \in R^q$ ,  $e \in \{0, 1\}$  ( $x$  – совокупность переменных расхода газа  $Q$  и давления  $P$ );  $G(x)$  – целевая функция, представляющая собой экономический критерий оптимизации;  $\alpha$  – параметр допустимых ограничений;  $C_1(x)$  – совокупность  $p$  линейных и нелинейных ограничений неравенства для активных объектов;  $\beta$  – вектор, коэффициенты которого равны нулю или максимальным значениям ограничений;  $e$  – вектор двоичных переменных;  $C_E(x)$  – совокупность  $q$  линейных и нелинейных ограничений равенства;  $s$  – переменная отклонения, ненулевое значение которой обозначает нарушение ограничения.

В результате при заданном расходе газа 8 (рис. 1) давление 19 и температура 18 газа на выходе КС устанавливаются и стабилизируются на заданном оптимальном по энергопотреблению КС уровне. Для реализации данной схемы ЭГПА должен быть частотно-регулируемым и инвариантным ко всем параметрам и возмущениям. Такая система, представляющая патент ОАО «Гипрогазцентр» [3], показана на рис. 2.

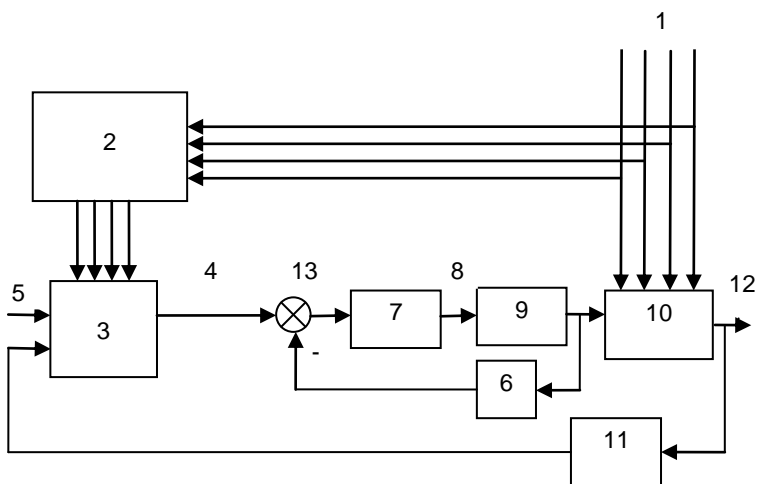


Рис. 2. Структура инвариантной системы частотно-регулируемого ЭГПА

Данная комбинированная система, состоящая из САР по отклонению (давления газа) и САР по возмущению (стохастических возмущений), обеспечивает автоматизацию процесса компримирования газа до оптимального стабильного давления в условиях случайных воздействий ЭГПА [4]. При этом решается искомая задача повышения точности отработки требуемой величины давления газа на выходе КС и стабилизации процесса компримирования газа средствами ЭГПА.

#### Литература

1. **Пужайло А.Ф.**, Савченков С.В., Крюков О.В. и др. Электроприводы объектов ГТС: Монография серии «Научные труды к 45-летию ОАО «Гипрогазцентр» / под ред. О.В. Крюкова. – Т. 4. – Н. Новгород: Исток. 2013.
2. **Пужайло А.Ф.**, Крюков О.В., Релин Д.Г. Способ магистрального транспорта газа. // Патент на изобретение №2502914, МКИ F17D1/02. – ОАО «Гипрогазцентр». – 2013. – Бюл. №36.
3. **Крюков О.В.**, Хлынин А.С., Цирулева Н.Н. Электропривод газоперекачивающего агрегата. // Патент на полезную модель №143197, МПК H02P 27/04, G05B 11/40. – ОАО «Гипрогазцентр». – 2014. – Бюл. №20.
4. **Крюков О.В.** Идентификация параметров приводных электродвигателей газовых турбокомпрессоров. // Труды X Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'15)». – М.: ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова. – 26-29 января 2015. – С. 348-376.

*Крюков Олег Викторович,*

ОАО «Гипрогазцентр», e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

УДК 621.313

А.С. ХЛЫНИН, инженер, О.В. КРЮКОВ, к.т.н., доцент,  
А.В. СЕРЕБРЯКОВ, к.т.н.

ОАО «Гипрогазцентр»

603950 г. Нижний Новгород, ул. Алексеевская 26

*E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru*

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
603950 г. Нижний Новгород, ул. Минина 24

### **Технико-экономические критерии применения частотно-регулируемого привода турбокомпрессоров**

**Аннотация.** Представлены перспективы применения современных частотно-регулируемых электроприводов газоперекачивающих агрегатов на новых и модернизируемых компрессорных станциях. Разработаны методы оценки энергоэффективности электроприводов при проектировании.

**Ключевые слова:** частотно-регулируемый электропривод, энергоэффективность, газоперекачивающий агрегат.

A.S. KHLYNIN, engineer, O.V. KRYUKOV, Candidate of Engineering, docent,  
A.V. SEREBRYAKOV, Candidate of Engineering

JSC «Giprogazcenter»  
603950 Nizhny Novgorod, Alekseevskaya St., 26  
*E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru*  
R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University  
603950 Nizhny Novgorod, Minina St., 24

## Technical and Economic Criteria of Turbine Compressors Variable-Frequency Drive Application

**Abstract.** Application opportunities of the modern variable-frequency electric drives of gas compressor units at the new and modified compressor stations are presented. Evaluation procedure of electric drives energy efficiency at designing are developed.

**Key words:** variable-frequency electric drive, energy efficiency, gas compressor unit.

Основными технологическими агрегатами магистрального транспорта газа являются газоперекачивающие агрегаты (ГПА), для функционирования которых используются три типа приводов: газотурбинный (85 %), газопоршневой (1 %) и электрический (14 %) [1]. Наиболее широкое распространение электроприводные ГПА (ЭГПА) получили в 1960-80-е годы, но в дальнейшем из-за большой разницы стоимости электроэнергии и газа, использование их стало нерентабельным.

Реформа электроэнергетики РФ 2000-х годов и сопутствующая ей либерализация рынка электроэнергии позволила снизить соотношение темпов роста тарифов на электрическую энергию к природному газу. Данная тенденция отражает, во-первых, существенное отставание стоимости газа в России относительно общемировых уровней, а, во-вторых, постоянно растущую себестоимость его. За последние 3 года средний рост себестоимости добычи газа ОАО «Газпром» составил 17 %/год, себестоимости транспортировки газа – 11 %/год.

Повышение себестоимости газа существенно снижает экономическую эффективность его использования на собственные нужды газотранспортного предприятия. Подтверждением этому может служить ситуация на многих европейских объектах транспорта газа и месторождениях. Стоимость природного газа в Европе в несколько раз превышает тарифы для российских потребителей. Это повышает экономическую целесообразность использования электрического, а не газотурбинного привода. В качестве примеров успешного использования ЭГПА можно привести: агрегат мощностью 23 МВт на голландском месторождении Гронинген, ЭГПА мощностью 50 МВт на норвежском морском месторождении Ормен Ланге, электроприводную КС в г. Берген (Норвегия), входя-

щую в состав газопровода «Северный поток», а также множество компрессорных станций и подземных хранилищ газа в Германии.

В России лидерами по использованию ЭГПА на объектах транспорта газа являются ООО «Газпром трансгаз Москва» (144 агрегата) и ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» (128 агрегатов), доля ЭГПА составляет около 50 % от их общей установленной мощности. Общее количество ЭГПА на объектах транспорта газа ОАО «Газпром» составляет 695 единиц установленной мощностью около 5746,3 МВт.

В ОАО «Гипрогазцентр» разработана концепция применения ЭГПА на объектах реконструкции, модернизации и нового строительства электроприводных КС, научные аспекты которой опубликованы в [2–4]. Благодаря развитию цифровых САУ разработчики ЭГПА смогли существенно улучшить свою продукцию. Автоматизация работы агрегата позволила максимально реализовать принцип малолюдных технологий. Контроль, управление и диагностика ЭГПА теперь производятся дистанционно из диспетчерского пункта, находящегося за сотни километров от компрессорной станции. Отсутствие обслуживающего персонала на КС позволяет отказаться от многих вспомогательных сооружений и систем жизнеобеспечения и снижает капитальные затраты.

Внедрение микропроцессорных систем управления обеспечило максимально адаптировать работу ЭГПА к режимам технологического процесса. Сохранение высоких энергетических характеристик агрегата при изменяющихся режимах работы достигается путем использования в составе ЭГПА высоковольтных преобразователей частоты (ПЧ). Применение многоуровневых ПЧ для пуска и плавного автоматического регулирования скорости ЭГПА позволяет обеспечить энергосбережение за счет точного регулирования и повысить показатели надежности агрегатов, увеличить их ресурс и уменьшить затраты на ТОиР.

ЭГПА нового поколения имеют в своем составе систему электромагнитного подвеса ротора двигателя и нагнетателя, что позволяет упразднить масляное хозяйство и АВО масла, повысить КПД агрегата, повысить показатели надежности агрегатов и снизить затраты на ТОиР.

Некоторые варианты ЭГПА совмещают двигатель и нагнетатель в едином корпусе. Данная конструкция также оснащается магнитным подвесом. При этом уменьшаются габариты агрегата, сокращаются площади КС и снижаются капитальные затраты на его строительство.

Применение высокоскоростных асинхронных двигателей позволяет исключить из конструкции ЭГПА такой элемент как редуктор, что упрощает конструкцию агрегата, повышает надежность и совокупный КПД.

Технические преимущества ЭГПА нового поколения можно количественно оценить экономическими категориями, рассчитав эффект от модернизации существующей электроприводной компрессорной станции с соответствию с методикой, приведенной в [2–4].

В качестве примера приведем расчет показателей экономической эффективности модернизации электроприводного КЦ-4 КС «Починки» МГ «Ямбург-Елец». На данный момент в состав электроприводного цеха входят 7 ЭГПА типа STD-12500. Они введены в эксплуатацию в 1986 году и на данный момент их выработанный ресурс составляет 90–110 % от номинального. Проект предполагает замену 7 существующих ЭГПА на 4 агрегата нового поколения типа ЭГПА-12,5. Возврат инвестиций в модернизацию КЦ-4 осуществляется за счет снижения эксплуатационных затрат: на приобретение электрической энергии и ТОиР.

В рамках анализа рисков данного проекта произведен расчет его чувствительности к основным влияющим факторам. Результаты показывают существенную зависимость проекта от стоимости электрической энергии, потребляемой ЭГПА из энергосистемы. При изменении тарифа на 10 % чистый дисконтированный доход снижается на 24 %.

Проведенные экономические расчеты показали высокую экономическую эффективность проектов модернизации ЭГПА старого поколения, особенно для КС, располагающихся в энергодефицитных регионах, с высоким уровнем тарифов на электроэнергию. Однако на экономическую целесообразность использования ЭГПА оказывают влияние расходы на подключение к энергосистеме, как составляющая капитальных затрат, а также тариф на электроэнергию в регионе, как основная часть эксплуатационных расходов.

Оценка обозначенных выше рисков является важной составляющей риск-анализа проектов реконструкции и строительства электроприводных КС и должна осуществляться на прединвестиционной стадии с учетом прогнозных значений по развитию энергосистемы региона и динамике тарифов на электроэнергию. Анализ развитости энергосистемы и уровней тарифов на электроэнергию позволяет выделить районы, в которых использование электроприводных КС является оправданным.

В качестве примера проведено технико-экономическое сравнение выбора типа ГПА для компрессорной станции КС-1 перспективного газопровода «Иркутск-Просоково». Иркутская энергосистема является одной из крупнейших в России с реализацией программы по усилению надежности электроснабжения и вводом более 3600 МВт новых мощностей. Занимая первое место в Сибири по производству электроэнергии с благоприятными тарифами, регион характеризуется наличием крупных генерирующих источников: Иркутская ГЭС (662,4 МВт), Иркутские ТЭЦ (796 МВт) и развитой сетью ЛЭП-110 кВ.

Выполненные расчеты показали экономическую целесообразность применения ЭГПА на объектах транспорта газа в регионах с низкими тарифами на электроэнергию и развитыми электрическими сетями. В тоже время, эффективность использования привода существенно зависит от соотношения стоимости затрачиваемых энергоресурсов.



Таким образом, электроэнергетический анализ регионов России позволил выделить районы, наиболее благоприятного применения ЭГПА. Техничко-экономический анализ ряда объектов модернизации и нового строительства КС показал целесообразность установки ЭГПА с учетом прогнозов динамики изменения цен на энергоресурсы в районе расположения.

#### Литература

1. **Концепция** энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «Газпром» на период 2011-2020 гг. / Утверждена приказом ОАО «Газпром» №364 от 28.12.2010 г. – 30 с.
2. **Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Крюков О.В. и др.** Электроприводы объектов ГТС: Монография серии «Научные труды к 45-летию ОАО «Гипрогазцентр» / под ред. О.В. Крюкова. – Т. 4. – Н. Новгород: Исток. 2013.
3. **Хлынин А.С., Крюков О.В.** Техничко-экономические аспекты применения ЭГПА на компрессорных станциях магистральных газопроводов. // XVI МНТК по компрессоростроению. – Т. 1. – СПб.: РЭПХ. – С. 399-409.
4. **Крюков О.В., Хлынин А.С.** Техничко-экономическое обоснование применения современных ЭГПА на объектах транспорта газа ОАО «Газпром». // Компрессорная техника и пневматика. – 2015. – №1. – С. 2-7.

*Хлынин Александр Сергеевич,*

ОАО «Гипрогазцентр», e-mail: [a.khlynin@ggc.nnov.ru](mailto:a.khlynin@ggc.nnov.ru)

*Крюков Олег Викторович,*

ОАО «Гипрогазцентр», e-mail: [o.kryukov@ggc.nnov.ru](mailto:o.kryukov@ggc.nnov.ru)

*Серебряков Артем Владимирович,*

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет имени П.Е. Алексеева», e-mail: [serebryakov@ardman.ru](mailto:serebryakov@ardman.ru)

УДК 621.313

О.В. КРЮКОВ к.т.н., доцент,

А.В. СЕРЕБРЯКОВ, к.т.н.

ОАО «Гипрогазцентр»

603950 г. Нижний Новгород, ул. Алексеевская 26

E-mail: [o.kryukov@ggc.nnov.ru](mailto:o.kryukov@ggc.nnov.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

603950 г. Нижний Новгород, ул. Минина 24

## Методы синтеза встроенных систем прогнозирования технического состояния высоковольтных двигателей

**Аннотация.** Представлены современные методы синтеза систем оперативного мониторинга состояния электродвигателей на основе нейро-нечеткого прогнозирования. Разработаны алгоритмы диагностирования на примере анализа электроприводных газоперекачивающих агрегатов.

**Ключевые слова:** мониторинг, электропривод, прогнозирование.

O.V. KRYUKOV, Candidate of Engineering, docent,  
A.V. SEREBRYAKOV, Candidate of Engineering

JSC «Giprogazcenter»  
603950 Nizhny Novgorod, Alekseevskaya St., 26. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru  
R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University  
603950 Nizhny Novgorod, Minina St., 24

## Synthesis Methods of Embedded Forecasting Systems of High-Voltage Motors Technical Condition

**Abstract.** Up-to-date synthesis methods of on-line monitoring systems for electric motors condition on the basis of neuro-fuzzy forecasting are presented. Algorithms of diagnosis are developed on the example of electric driven gas compressor units study.

**Key words:** monitoring, electric drive, forecasting.

В существующих системах оперативного мониторинга и диагностики технического состояния (ТС) ответственных агрегатов газотранспортных систем наиболее эффективной процедурой является не традиционное диагностирование электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) [1, 2], а достоверное прогнозирование их ТС с оценкой остаточного ресурса агрегата. Это позволяет предотвратить внезапные нештатные аварии и перейти от планово-предупредительных процедур ТОиР к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования [3].

Принцип управления техническим состоянием на основе прогнозирования представлен в [3, 4], а классификация известных методов прогнозирования ТС ЭГПА – на рис. 1. Данные о состоянии объекта снимаются с датчиков и подаются на подсистему прогнозирования ТС.



Рис. 1. Классификация методов прогнозирования ТС ЭГПА

В случае если формируется решение о наступающем отказе, то подсистема ТОиР выполняет действия, которые направлены на:

- предотвращение отказов, включая комплекс мероприятий по обеспечению функционирования системы без прерывания;
- минимизацию последствий отказа за счёт подготовки к ожидаемому отказу, что позволяет сократить время ремонта, а, следовательно, и продолжительность неработоспособного состояния.

Эти методы основываются на определении объективных закономерностей развития дефектов и повреждений, статистической обработке данных, экстраполяции трендов до предельно допустимых значений и на вероятностной оценке значений показателей.

В подсистеме прогнозирования определяется вероятность  $P_z = 1/x$  наступления отказа на рассматриваемом интервале времени. Здесь  $z$  – переменная, характеризующая состояние технического объекта,  $x$  – данные наблюдения, снимаемые с датчиков. В условиях априорной неопределенности в решающем правиле используется оценка  $\hat{P}$ , которая находится при структурно-параметрическом синтезе предиктора на базе эмпирических данных, составляющих обучающую выборку  $D$ .

Решение о формировании сигнала-предупреждения о наступающем отказе выносится в результате сравнения с пороговым значением найденной вероятности наступления отказа на заданном интервале. Определение этого значения представляет отдельную задачу и связано с используемым критерием эффективности прогнозов.

Применение прогнозирующего контроля направлено на сокращение издержек, вызванных простоем объекта. Поэтому эффект от внедрения его можно оценить с помощью коэффициента технического использования, который определяется выражением  $K = T_F / (T_F + T_R)$ . Для системы управления ТС по прогнозированию можно записать аналогичную формулу  $K' = T_F' / (T_F' + T_R')$  ( $T_F$  и  $T_F'$  – среднее время наработки на отказ, с;  $T_R$  и  $T_R'$  – среднее время ремонта системы без применения и с учетом прогноза соответственно, с). Эффект от применения прогнозирующего контроля охарактеризуем величиной

$$v = (1 - K') / (1 - K) = (T_R + T_F) T_R' / ((T_R' + T_F') T_R), \quad 1)$$

которая показывает, во сколько раз изменяется среднее время неработоспособного состояния объекта. Эффект от применения прогнозирующего управления имеет место при  $v < 1$  и возрастает с ростом  $v$ .

Для анализа эффективности прогнозирования в составе САУ ТС охарактеризуем подсистему ТОиР вероятностью  $P_p$  возникновения (не предотвращения) отказа при условии правильного прогноза и вероятностью  $P_e$  привнесения отказа при условии ошибки предсказания (ложной тревоги). Подсистема прогноза характеризуется вероятностью ложной тревоги (ошибки 1-го рода)  $\alpha$  и вероятностью пропуска наступающего неисправного ТС (ошибки 2-го рода)  $\beta$ .

После преобразований приходим к выражению для оценки эффекта от применения прогнозирования:

$$v = K_p + \alpha K_E(1 - P_F)/P_F + \beta(1 - K_p), \quad (2)$$

где  $P_F$  – априорная вероятность возникновения неисправного состояния за анализируемый интервал времени;  $K_p = k_p P_p$  и  $K_E = k_E P_E$ .

Как следует из формулы (2), эффективность прогнозирования технического состояния возрастает (величина  $v$  уменьшается) при уменьшении  $K_p$  и  $K_E$ . Для идеальной подсистемы ТОиР  $K_p = 0$  и  $K_E = 0$ , что может быть обеспечено, если  $P_p = 0$  и  $P_E = 0$ . При этом все правильно предсказанные отказы предотвращаются, а обработка ложных тревог не приводит к простоям. В этом случае величина выигрыша  $v = \beta$  полностью определяется вероятностью пропуска при прогнозе отказа.

Выигрыш от применения прогнозирования ТС возрастает при уменьшении  $\alpha$  и  $\beta$ . При высокой точности прогнозирования  $\alpha \approx 0$ ,  $\beta \approx 0$ , величина выигрыша составляет  $v \approx K_p$ . Однако уменьшение одной из вероятностей ( $\alpha$  или  $\beta$ ) сопровождается увеличением другой в соответствии с рабочей характеристикой предиктора. При этом возникает необходимость синтеза решающего правила для принятия решений о наступающем отказе из условия минимизации целевой функции (2).

Анализ выражения (2) свидетельствует о том, что целевая функция представляет собой взвешенную сумму вероятностей ошибок первого и второго рода и по своей структуре близка к выражению для среднего риска. В соответствии с правилом критерия минимума среднего риска приходим к правилу принятия решения о наступающем отказе

$$\hat{z} = H(\Lambda(x) - h). \quad (3)$$

Здесь  $H(a)$  – функция Хевисайда такая, что  $H(a) = 1$  при  $a \geq 0$  и  $H(a) = 0$  при  $a < 0$ ;  $\Lambda(x) = f_1(x)/f_0(x)$  – отношение правдоподобия ( $f_0(x)$  и  $f_1(x)$  – плотности вероятности признаков для прогнозируемого исправного и неисправного состояния соответственно);  $h$  – порог.

В качестве примера применения развиваемого подхода для управления ТС рассмотрен ЭГПА, информация о котором регистрируется датчиками [1–3]. Выделим три состояния ТС: исправное, предотказное и неработоспособное. Если выносится решение, что система исправна, то действия по управлению ТС ЭГПА не предпринимаются и функционирование системы продолжается. В предотказном состоянии для предотвращения перехода системы в неработоспособное состояние выполняется автоматическое отключение с последующим восстановлением исправного ТС. При наличии существенной неопределенности относительно ТС ЭГПА может быть вынесено решение о проведении теста, результаты которого позволяют существенно повысить достоверность определения ТС системы.

#### Литература

1. Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Крюков О.В. и др. Диагностика оборудования КС: Монография серии «Научные труды к 45-летию ОАО «Гипрогазцентр» / под ред. О.В. Крюкова. – Т. 2. – Н. Новгород: Исток. 2013.

2. Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Крюков О.В. и др. Электроприводы объектов ГТС: Монография серии «Научные труды к 45-летию ОАО «Гипрогазцентр» / под ред. О.В. Крюкова. – Т. 4. – Н. Новгород: Исток. 2013.
3. Крюков О.В. Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2012. – №9. – С. 52-57.
4. Крюков О.В., Репин Д.Г. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций. // Газовая промышленность. – 2013. – №712. – С. 84-90.

Крюков Олег Викторович, ОАО «Гипрогазцентр», e-mail: [o.kryukov@ggc.nnov.ru](mailto:o.kryukov@ggc.nnov.ru)

Серебряков Артем Владимирович,

ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева», e-mail: [serebryakov@ardman.ru](mailto:serebryakov@ardman.ru)

УДК 621.6

А.М. ЗАХАРОВ, к.т.н., доцент,  
М.А. ЗАХАРОВ, ассистент, П.А. ЗАХАРОВ, к.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
ООО «Газпром ПХГ»  
117420 г. Москва ул. Наметкина д. 12А  
E-mail: [mazoid@gmail.com](mailto:mazoid@gmail.com)

## К вопросу создания комплексной системы диагностирования электроприводного газоперекачивающего агрегата

**Аннотация.** Представлен состав системы мониторинга и диагностики технического и энергетического состояния приводного механизма электроприводного газоперекачивающего агрегата. Приведена методика создания данной системы.

**Ключевые слова:** диагностическая модель, электропривод, газоперекачивающий агрегат.

A.M. ZAKHAROV, Candidate of Engineering, docent,  
M.A. ZAKHAROV, assistant,  
P.A. ZAKHAROV, Candidate of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
LLC «Gazprom UGS»

117420 Moscow, Nametkina St., 12A. E-mail: [mazoid@gmail.com](mailto:mazoid@gmail.com)

## The development of a comprehensive system diagnostics of electrically driven gas pumping unit

**Abstract.** The composition of the monitoring and diagnosis of technical and energy state of the actuator electrically driven gas pumping unit was shown in the article. The technique of creating such system was given in the article.

**Key words:** diagnostic model, electric drive, gas pumping unit.

Одним из наиболее важных факторов любого современного производства является организация безопасного функционирования промышленных объектов и оборудования данного производства. Это возможно только при создании эффективно функционирующей системы управления промышленной безопасности. ОАО «Газпром» в целом является крупнейшим в стране «опасным производственным объектом» (ОПО). Имея широчайшую номенклатуру технологического и вспомогательного оборудования, тысячи километров магистральных и технологических трубопроводов, т.е. те составные части, безопасное функционирование которых ведет к безопасному функционированию всего производства.

Средний возраст энергетического оборудования, эксплуатируемого на компрессорных станциях Газпром, превосходит 20 лет. В связи с этим, во избежание возникновения аварийной ситуации, большое внимание должно уделяться определению технического состояния энергетического оборудования. Для решения этой задачи, а так же во избежание возникновения аварийной ситуации на компрессорных станциях (КС), большое внимание должно уделяться определению технического состояния энергетического оборудования. Ключевым звеном любой КС является газоперекачивающий агрегат (ГПА). В настоящее время работы по диагностике электрических газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) ведутся в двух направлениях: вибродиагностика ЭГПА и непосредственная инструментальная диагностика электрического двигателя. Однако получаемой информации не достаточно, поскольку данные виды диагностики не дают полного представления о техническом и энергетическом состоянии газоперекачивающего агрегата.

Эксплуатация ЭГПА с неудовлетворительными техническими и энергетическими показателями ведет к дополнительным эксплуатационным расходам и может привести к аварийным ситуациям со стороны синхронного двигателя (СД), являющегося приводным механизмом и со стороны нагнетателя (Н), являющегося рабочим механизмом. Это приведет к существенным материальным затратам по восстановлению нормального функционирования данного объекта.

Создание системы мониторинга и диагностики технического и энергетического состояния приводного механизма ЭГПА является задачей технически актуальной и экономически целесообразной. Разработка и создание технических средств контроля, защиты и диагностирования СД повысит надежность эксплуатации, как самого двигателя, так и всего ЭГПА в целом.

Для решения этих задач целесообразно создание стационарной системы комплексного диагностического обследования ЭГПА, а также разработка методики и комплекс мероприятий по проведению данного типа работ.

Комплексная система диагностирования ЭГПА включает с себя:

1. Математическую модель синхронного двигателя.

2. Математическую модель редуктора.
3. Математическую модель нагнетателя.
4. Математическую модель трубопроводной обвязки нагнетателя ЭГПА.

5. Объединение математических моделей элементов в одну математическую модель ЭГПА с учетом упругих связей.

При создании таких моделей учитывается совместное влияние механических и электрических переменных друг на друга и их влияние на техническое состояние агрегата.

Каждый элемент (двигатель, редуктор, нагнетатель, ТПО) уникален и его параметры существенно меняются в процессе работы, эксплуатации и технического обслуживания. Поскольку, описание процессов протекающих в предлагаемых элементах сложно и зачастую не всегда возможно, то для решения поставленных задач целесообразно использовать комбинацию методов эконометрического анализа и методов математического описания рассматриваемых процессов.

В основе системы диагностического обследования ЭГПА лежат математические модели элементов в тензорной форме, поскольку использование таких моделей позволяет оценивать энергетическое состояние элементов наилучшим образом в силу того, что они входят в состав моделей в явной форме. Модель нагнетателя основывается на использовании расчетов его напорных и расходных характеристик, а также на экспериментальных данных диагностических обследований трубопроводных обвязок центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов.

Целью предлагаемой работы является разработка системы мониторинга и диагностирования технического состояния приводного двигателя ЭГПА, механической части ГПА, т.е. нагнетателя и редуктора, а также разработка и внедрение технических средств защиты и диагностики данного оборудования.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка диагностической модели, позволяющей по измеряемым и вычисляемым параметрам и переменным производить оценку и прогнозирование технического состояния электрического двигателя;
- разработка диагностической модели позволяющей по измеряемым параметрам и переменным производить оценку технического состояния механических элементов ГПА;
- разработка диагностической модели позволяющей по измеряемым параметрам, переменным и набору статистических данных осуществлять прогнозирование технического состояния нагнетателя и редуктора;
- разработка диагностической модели позволяющей по измеряемым параметрам и переменным производить оценку технического состояния ТПО;

– разработка диагностической модели позволяющей по измеряемым параметрам, переменным и набору статистических данных осуществлять прогнозирование технического состояния ТПО в целом, а также ее отдельных элементов;

– разработка диагностической модели, позволяющей производить оценку энергетического состояния электрического двигателя и его влияния на энергосистему.

*Захаров Алексей Михайлович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: mazoid@gmail.com

*Захаров Михаил Алексеевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: mazoid@gmail.com

*Захаров Петр Алексеевич,*

ООО «Газпром ПХГ», e-mail: mazoid@gmail.com

УДК 681.586

А.Н. ШИРЯЕВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

*E-mail: shiryayev\_aleksandr@mail.ru*

## **Особенности моделирования процессов испытаний материалов**

**Аннотация.** Показана зависимость момента сопротивления движению в процессе испытаний материалов на разрывной машине от параметров тестируемого образца и нагружающего механизма. Разработана структурная схема кинематики разрывной машины, учитывающая влияние этих факторов на условия работы приводного двигателя.

**Ключевые слова:** разрывная машина, испытания, электропривод.

A.N. SHIRYAEV, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University

153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34.

*E-mail: shiryayev\_aleksandr@mail.ru*

## **Simulation of materials testing**

**Abstract.** Dependence of the resistance moment to the movement in the course of tests of materials by tensile testing machine from parameters of the tested sample and the loading mechanism has been shown. Tensile testing machine kinematic's block diagram considering influence of these factors on operating conditions of the driving engine is developed.



**Key words:** tensile testing machine, tests, electric drive.

Наиболее распространенными установками испытательной техники являются разрывные машины (РМ), обеспечивающие проведение механических испытаний разнообразных материалов, в ходе которых определяются их физико-механические свойства.

Конструктивные элементы РМ в процессе проведения испытаний подвергаются разнообразным нагрузкам, что приводит к их упругим деформациям. На рис. 1 показаны виды деформации отдельных элементов разрывной машины, характерные для большинства нагружающих механизмов испытательной техники, в которых приводной двигатель М нагружает образец 2 посредством ходового винта 3 через редуктор Р.

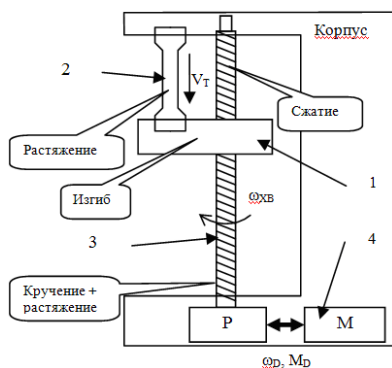


Рис. 1. Характер деформации элементов РМ:  
1 – подвижная траверса; 2 – образец; 3 – ходовой винт; 4 – двигатель

Агрегаты испытательной техники с точки зрения силового взаимодействия узлов представляются достаточно сложными устройствами. На рис. 2 приведена расчетная силовая схема соединения винт-гайка, обеспечивающего получение поступательного движения траверсы РМ.

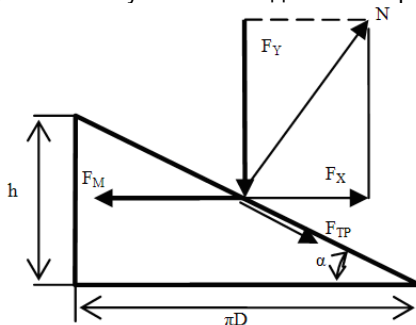


Рис. 2. Схема действия нагрузок в винтовом сочленении РМ

Сам характер изменения нагрузки при испытании образца  $F_Y$  в соответствии с законом Гука имеет вид:

$$F_Y = E \frac{S \Delta l}{l}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости испытуемого материала,  $\text{H}/\text{м}^2$ ;  $S$ ,  $\Delta l$ ,  $l$  – соответственно поперечное сечение ( $\text{м}^2$ ), удлинение ( $\text{м}$ ) и длина ( $\text{м}$ ) испытуемого образца.

При этом жесткость ( $C$ ) тестируемого образца, определяемая как отношение силы упругой деформации к её величине, вычисляется в соответствии с (1) как

$$C = \frac{\Delta F_{XY}}{\Delta l} = \frac{ES}{l}. \quad (2)$$

Действующая в сочленении сила трения с учетом реакции  $N$  опорной поверхности ходового винта находится по следующему выражению:

$$F_{\text{ТР}} = k_{\text{ТР}} N = k_{\text{ТР}} \frac{F_Y}{\cos \alpha} = k_{\text{ТР}} \frac{F_Y \sqrt{h^2 + (\pi D)^2}}{\pi D}, \quad (3)$$

где  $\alpha = \arctg(h/\pi D)$  – угол наклона рабочей поверхности ходового винта, град ( $h$ ,  $D$  – шаг и диаметр ходового винта,  $\text{м}$ ).

Сила сопротивления движению  $F_X = F_Y h / \pi D$ .

С учетом приведенных соотношений условие силового равновесия ходового винта:  $F_M = F_X \pm F_{\text{ТР}} \cos \alpha$  (знак « $\pm$ » определяется направлением движения траверсы, а точнее процессом нагружения (знак « $+$ ») или разгружения (знак « $-$ ») образца).

Дополнительно необходимо учитывать и пассивный характер силы трения, возникающей в механизме разрывной машины. Оценка влияния этого фактора может осуществляться посредством логического блока вычисления скорости траверсы  $V_T$ , реализующего следующий алгоритм:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_T}{dt} = 0, \text{ если } \langle V_T = 0 \rangle \wedge \left\langle F_M < \left| F_Y \left( \frac{h}{\pi D} - k_{\text{ТР}}^* \right) \right| \right\rangle; \\ \frac{dV_T}{dt} = \frac{1}{m} \left( F_M - F_Y \left( \frac{h}{\pi D} \pm k_{\text{ТР}}^* \right) \right), \text{ если } V_T \neq 0, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $k_{\text{ТР}}^* = k_{\text{ТР}} / \cos \alpha$  – приведенный коэффициент трения;  $m$  – суммарная масса траверсы и образца,  $\text{кг}$ .

Очевидно, что РМ представляет собой достаточно сложную многомассовую систему, анализ которой с учетом всех взаимодействующих факторов представляет собой достаточно сложную задачу. Однако для

большинства средств испытательной техники характерен значительный запас по прочности и жесткости отдельных конструктивных элементов РМ, чем достигается минимальное влияние характеристик механизма на результаты испытаний. Поэтому при исследовании влияния процессов на условия работы приводного механизма достаточно учитывать только жесткость испытуемого образца, а в некоторых РМ, и жесткость силоизмерителя.

Исходя из таких, в достаточной степени эвристических предположений, можно представить расчетную схему испытательной машины (рис. 3) (РЭ – релейный элемент, учитывающий характер изменения сил трения в винтовом сочленении;  $J^*$  – приведенный к валу двигателя, суммарный момент инерции механизма,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $i$  – передаточное число редуктора;  $C$  – жесткость образца (или эквивалентная жесткость системы «образец-силоизмеритель»),  $\text{Н}/\text{м}$ ,  $F$  – коэффициент вязкого трения,  $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ ;  $M_{\gamma}^*$  – приведенный момент сопротивления РМ,  $\text{Н}\cdot\text{м}$  ( $M_{\gamma}^* = F_{\gamma}h/(2\pi i) + DF_{\text{ТР}}/(2i)$ ).

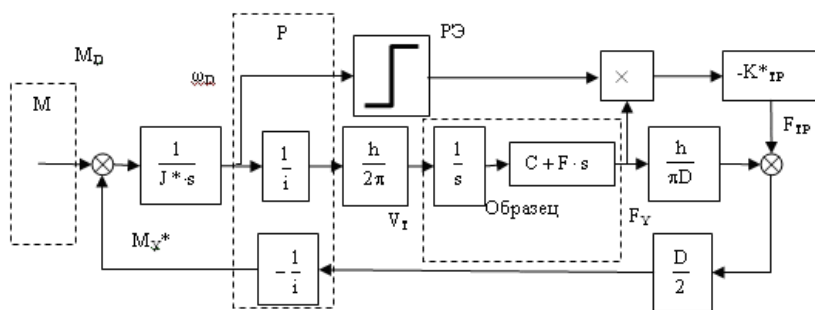


Рис. 3. Упрощенная структурная схема кинематики РМ

Вполне очевидно, что в процессе испытаний происходит изменение приложенного к валу двигателя момента  $M_{\gamma}^*$ , что не может не влиять на работу двигателя и системы управления.

*Ширяев Александр Николаевич,*  
 ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 e-mail: shiryaev\_aleksandr@mail.ru

УДК 681.586

А.Н. ШИРЯЕВ, к.т.н., доцент,  
А.В. БЕЛЫШЕВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: shiryayev\_aleksandr@mail.ru*

### **Модернизация электропривода машины для испытания асфальто-бетонных материалов**

**Аннотация.** Рассмотрена конструкция испытательной установки машины ДТС-06-50/50 для испытания образцов из асфальто-бетонных материалов. Показана целесообразность замены электропривода постоянного тока частотно-регулируемым электроприводом переменного тока.

**Ключевые слова:** испытательная машина, конструкция, электропривод.

A.N. SHIRYAEV, Candidate of Engineering, docent,  
A.V. BELYSHEV, student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: shiryayev\_aleksandr@mail.ru*

### **Modernization of machines' electric drive for testing asphalt materials**

**Abstract.** Structure of the testing machine for asphalt materials' samples testing is considered. Expediency of direct current electric drive's replacement by the Variable Frequency Drive (VFD) of alternating current has been shown.

**Key words:** testing machine, structure, electric drive.

В настоящее время большинство машин для испытания материалов снабжены электроприводом постоянного тока, который является морально устаревшим. Актуальной является его замена частотно-регулируемым электроприводом переменного тока.

Фотографический снимок испытательной установки машины для испытания асфальто-бетонных материалов ДТС-06-50/50 приведен на рис. 1.

Машина ДТС-06-50/50 с наибольшей предельной нагрузкой 50 кН, производства ООО «Тестсистемы» г. Иваново, предназначена для испытания образцов из асфальто-бетонных материалов на сжатие, а также определения предела прочности при расколе и характеристик сдвигоустойчивости в соответствии с методами, изложенными в ГОСТ 12801-98.

Принцип работы машины основан на принудительном деформировании образца при одновременном измерении нагрузки, прикладываемой к образцу, и соответствующей ей величины деформации образца.

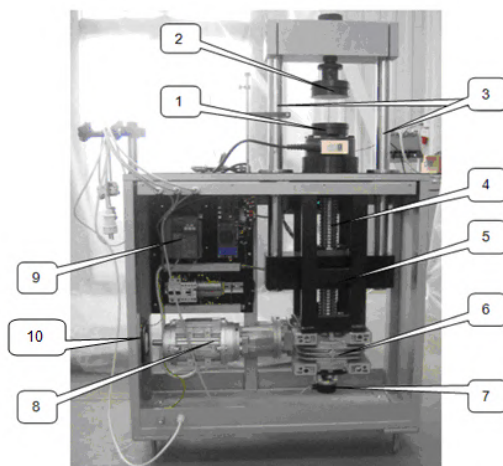


Рис. 1. Установка испытательная машины ДТС-06-50/50:

1 – нижний стол с датчиком силы; 2 – верхний стол; 3 – колонны; 4 – ходовой винт; 5 – траверса подвижная; 6 – мотор-редуктор; 7 – датчик обратной связи; 8 – электродвигатель; 9 – частотный преобразователь; 10 – вентилятор

Испытываемый образец устанавливается на стол 1, подвижная траверса получает вертикальное перемещение вниз от ходового винта 4. При соприкосновении с верхним столом 2 образец нагружается, нагрузка передается на упругий элемент датчика силы. При разрушении образца нагрузка регистрируется на дисплее пульта оператора.

После разрушения образца, подвижная траверса 5 автоматически возвращается в исходное положение.

Механизм нагружения состоит из двух траверс, которые связаны при помощи колонн 3. Колонны 3 свободно перемещаются в стаканах, закрепленных на верхней плите основания. Нижняя траверса 5 приводится в движение при помощи ходового винта 4.

Модернизированный привод ходового винта включает в себя мотор-редуктор 6 с асинхронным короткозамкнутым электродвигателем 8. Мотор-редуктор размещен в нижней части основания и крепится к верхней плите основания с помощью кронштейна.

Частотный преобразователь 9 FR-E720S-050-EC, поставляемый ЗАО «НТЦ Приводная техника», смонтирован на электропанели, установленной внутри основания.

Для управления процессом испытаний на ходовом винте установлен фотоэлектрический датчик обратной связи 7, выполняющий функции датчика положения и датчика скорости. Охлаждение электродвигателя 8 при

его работе в зоне низких скоростей осуществляется вентилятором 10 на боковой поверхности корпуса машины.

Деформирование (сжатие) образца осуществляется за счет перемещения верхней опоры разрушающего устройства, производимого подвижной траверсой 5 установки испытательной. При этом сигналы от датчика силы и датчика перемещения поступают в систему измерения параметров испытания параллельно так, что в каждый момент деформирования образца фиксируется текущее значение нагрузки на образец и соответствующее ему значение деформации, определяемое по величине перемещения верхней опоры.

По результатам испытания образца определяется работа (Дж), затраченная на разрушение.

Для определения предела прочности при расколе образца машина снабжена приспособлением для испытания на изгиб (рис. 2).



Рис. 2. Испытания на изгиб: 1 – испытываемый образец; 2 – приспособление для испытания на изгиб; 3 – датчик силы

Использование в механизме нагружения машины асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором позволило существенно снизить стоимость ее испытательной установки.

Замена электропривода переменного тока с преобразователем FR-E720S-050-EC и фотоэлектрическим датчиком обратной связи позволила существенно расширить функциональные возможности машины и обеспечить современное документирование результатов испытаний.

*Ширяев Александр Николаевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: shiryayev\_aleksandr@mail.ru

*Бельшев Алексей Владимирович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: shiryayev\_aleksandr@mail.ru

УДК 621.34:62-50

С.К. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент,  
А.Р. КОЛГАНОВ, д.т.н., профессор,  
Н.Е. ГНЕЗДОВ, к.т.н., доцент, Д.М. ЗЕНКИН, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: lebedev@drive.ispu.ru, klgn@drive.ispu.ru*

### **Характеристики стандартных распределений корней в синтезе систем управления для электромехатронных модулей**

**Аннотация.** Получены выражения характеристических полиномов, отвечающих распределению корней по Бесселю и приведенных к заданной полосе пропускания для использования при практических расчетах параметров регуляторов и наблюдателей в системах управления.

**Ключевые слова:** системы управления, электропривод.

S.K. LEBEDEV, Candidate of Engineering, docent,  
A.R. KOLGANOV, Doctor of Engineering, professor,  
N.E. GNEZDOV, Candidate of Engineering, docent, D.M. ZENKIN, student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: lebedev@drive.ispu.ru, klgn@drive.ispu.ru*

### **Performances of standard distributions of roots in synthesis of control systems for electromechatronic modules**

**Abstract.** The obtained expressions of characteristic polynoms responsible for Bessel root distribution and adjusted to the present band pass can be used in practical calculations of regulators and observers in control systems.

**Key words:** control systems, electric drive.

Исследование распределения корней характеристического уравнения обусловлено использованием в электромехатронных модулях функциональных элементов с модальными свойствами.

Как следует из анализа систем с электромехатронными модулями [1, 3], следует рассмотреть характеристики распределения со 2-го по 5-й порядок. Стандартные значения распределений по Бесселю, Баттерворту и Баттерворту-Томсону приведены в [4], нормирование корней бинома Ньютона выполнены в [6]. Для этих вариантов получены нормированные временные характеристики, по которым, зная заданное время регулирования, можно определить среднегеометрический корень для расчета параметров характеристического полинома, а по нему и параметры модулей. Но для многих случаев (астатические системы и т.д.) понятие «время регулирования» не определено. Более универсальным,

чем «время регулирования» для динамики является требование обеспечения полосы пропускания [2, 5].

Произведен анализ ЛАЧХ и ЛФЧХ различных распределений при относительной частоте

$$\omega' = \omega / \omega_0, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – среднегеометрический корень распределения.

Среднегеометрический корень может быть определен по заданной полосе пропускания [2]:

$$\omega_0 = \omega_{\text{пр}} / \omega'_{\text{пр}}; \quad \omega'_{\text{пр}} = \min\{\omega'_{-3\text{дБ}}; \omega'_{-90^\circ}\}, \quad (2)$$

где  $\omega'_{-3\text{дБ}}$ ,  $\omega'_{-90^\circ}$  – относительные частоты пересечения границ.

Характеристики показывают, что нормирование по уровню  $-3$  дБ соответствует полосе пропускания только для систем 2-го порядка, для систем более высокого порядка полосу пропускания системы определяют по ЛФЧХ. На рис. 1 показаны графики для  $n=4$  времени группового запаздывания ( $t_z$ ). С точки зрения группового времени запаздывания, максимальные результаты по ширине зоны постоянства в полосе пропускания и минимальное относительное отклонение имеет распределение Бесселя.

Для заданной полосы пропускания – 10 Гц получены (с учетом (2)) переходные характеристики; на рис. 2 показаны характеристики для  $n=4$ .

Анализ результатов показывает, что максимальные результаты по монотонности и быстродействию при порядках систем от второго до пятого показывает распределение Бесселя.

В случае жестких требований к отсутствию перегулирования при синтезе систем позиционирования следует выбирать распределение по биному Ньютона, это распределение незначительно проигрывает Бесселю только в быстродействии.

Для удобства применения распределения по Бесселю при синтезе компонентов электромехатронных модулей перейдем от нормированных характеристических полиномов к абсолютным характеристическим полиномам, приведенным к заданной полосе пропускания (табл. 1).

Исследования подтверждают правомерность выбора в качестве критерия настройки динамики электромехатронных модулей полосы пропускания, а не времени регулирования, которое, как критерий, имеет неопределенность с точки зрения ошибки регулирования.

Таким образом, настройка динамики электромехатронных модулей на распределение корней характеристического уравнения замкнутой системы по Бесселю не только дает преимущества перед другими распределениями по быстродействию и монотонности, но и обладает уникальностью



ми свойствами, обеспечивающими минимальные искажения при реализации сигналов управления перемещением исполнительного органа.

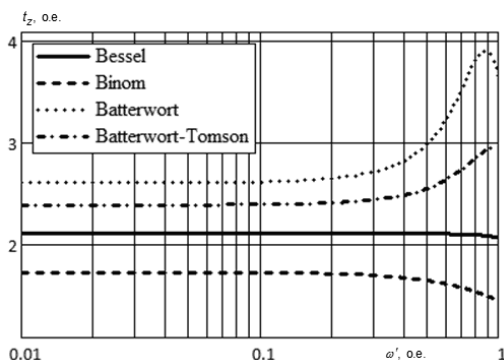


Рис. 1. Нормированное время группового запаздывания

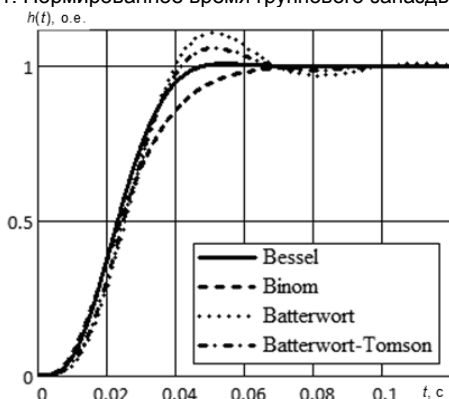


Рис. 2. Переходные характеристики, приведенные к полосе пропускания

Таблица 1. Приведенные к полосе пропускания полиномы Бесселя

n	$\omega_0$	Характеристические полиномы Бесселя
2	$\omega_{пр}$	$s^2 + 2,203\omega_0 s + 1,619\omega_0^2$
3	$\omega_{пр}/0,9$	$s^3 + 3,417\omega_0 s^2 + 4,867\omega_0^2 s + 2,771\omega_0^3$
4	$\omega_{пр}/0,74$	$s^4 + 4,730\omega_0 s^3 + 10,069\omega_0^2 s^2 + 11,114\omega_0^3 s + 5,258\omega_0^4$
5	$\omega_{пр}/0,65$	$s^5 + 6,179\omega_0 s^4 + 17,82\omega_0^2 s^3 + 29,36\omega_0^3 s^2 + 21,21\omega_0^4 s + 11,21\omega_0^5$

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00972).

### Литература

1. **Колганов А.Р.**, Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Современные методы управления в электромеханотронных системах. Разработка, реализация, применение. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». 2012. – 256 с.
2. **Глазунов В.Ф.**, Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Многосвязные электромеханотронные системы с нежесткой механикой. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». 2013. – 224 с.
3. **Лебедев С.К., Коротков А.А.** Алгоритмы синтеза наблюдателей нагрузки электропривода. // Вестник ИГЭУ. – 2009. – №3. – С. 5-8.
4. **Мошиц Г.**, Хорн П. Проектирование активных фильтров. – М.: Мир. 1984. – 320 с.
5. **Лебедев С.К.**, Гнездов Н.Е., Коротков А.А. Выбор параметров стандартных распределений при синтезе электроприводов. // Вестник ИГЭУ. – 2008. – №3. – С. 14-16.
6. **Лебедев С.К.**, Колганов А.Р. Исследование характеристик стандартных распределений корней характеристических уравнений для электромехатронных систем позиционирования. // Вестник ИГЭУ. – 2014. – №6. – С. 57-62.

*Лебедев Сергей Константинович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: lebedev@drive.ispu.ru

*Колганов Алексей Руфимович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: klgn@drive.ispu.ru

*Гнездов Николай Евгеньевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: drive@drive.ispu.ru

*Зенкин Дмитрий Михайлович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: drive@drive.ispu.ru

УДК 621.34:62-50

С.К. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент,  
А.Р. КОЛГАНОВ, д.т.н., профессор,  
Д.М. БАГАНОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: lebedev@drive.ispu.ru, klgn@drive.ispu.ru

## Исследование регуляторов положения электромехатронных систем

**Аннотация.** Исследованы характеристики и выработаны рекомендации по применению в составе систем комбинированного управления электромехатронных модулей регуляторов положения (статического, с астатизмом 1-го и 2-го порядков), настроенных на динамику по Бесселю с учетом заданной полосы пропускания системы.

**Ключевые слова:** системы управления, электропривод.

S.K. LEBEDEV, Candidate of Engineering, docent,  
A.R. KOLGANOV, Doctor of Engineering, professor, I.Yu. BAGANOV, student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: lebedev@drive.ispu.ru, klg@drive.ispu.ru

## Analysis of regulators of position electromechatronic systems

**Abstract.** Performances are examined and recommendations about application as a part of systems of the combined control electromechatronic modules of regulators of a position (static, astatic with a number of 1st and 2nd usages), adjusted on dynamics on the Bessel taking into account the set pass band of system are produced.

**Key words:** control systems, electric drive.

Электромехатронные системы с асинхронными, синхронными двигателями и преобразователями частоты позволяют обеспечить технологическое оборудование конкурентоспособными характеристиками. Области применения электромехатронных модулей с системами позиционирования: от запорных, дозирующих и регулирующих аппаратов трубопроводных систем в энергетике, нефтегазовой отрасли, жилищно-коммунальном хозяйстве до космических и оборонных технологий.

Наиболее широко используют электромехатронные модули позиционирования в станкостроении и робототехнике, то есть в отраслях, которые являются ключевыми, как в Российской Федерации, так и во всех развитых странах мира [1].

На рис. 1 показана структура системы позиционирования с регулятором положения (РП) и входным фильтром с передаточной функцией ( $W_f(s)$ ), электромехатронный модуль представлен моделью «жесткой» механики и инерционностью контура момента привода (КМ).

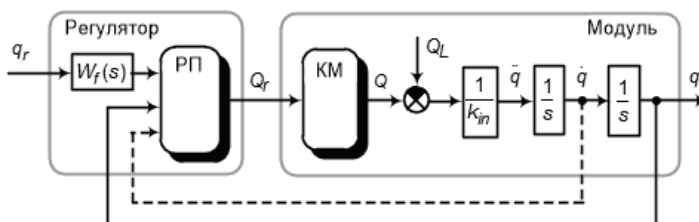


Рис. 1. Система позиционирования электромехатронного модуля

Такие системы применяют в составе систем комбинированного управления с компенсацией возмущений [2], но могут они работать и

самостоятельно в силу высокой эффективности снижения ошибки регулирования при действии возмущения.

На рис. 2 показаны рассматриваемые варианты регуляторов положения: П(Д) регулятор формирующий статическую систему позиционирования; ПИ(Д) регулятор дает систему с астатизмом 1-го порядка; ПИИ(Д) регулятор обеспечивает модулю 2-й порядок астатизма. Предлагается использовать модифицированные регуляторы, особенностью которых является замены канала дифференцирования дополнительной обратной связью по скорости, которая может быть получена как с датчика, так и с наблюдателя состояния (на рис. 1, 2 связь показана пунктиром).

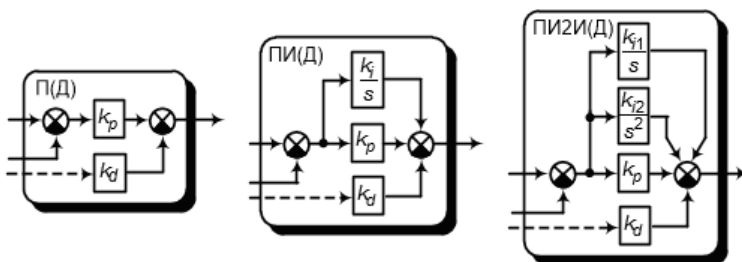


Рис. 2. Варианты регулятора положения

Синтез регуляторов (расчет параметров регуляторов и входных фильтров) произведен с пренебрежением инерционность КМ в силу малости постоянной времени контура современных модулей. Настройка динамики осуществлена с использованием распределения корней по Бесселю, которое обеспечивает монотонность процессов с минимальным переуправлением [3]. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры регуляторов положения с динамикой Бесселя

РП	$\omega_0$	Параметры	$W_f(s)$
П(Д)	$\omega_{пр}$	$k_p=1,619\omega_0^2k_{in}; k_d=2,203\omega_0k_{in}$	1
ПИ(Д)	$\frac{\omega_{пр}}{0,9}$	$k_p=4,867\omega_0^2k_{in}; k_d=3,417\omega_0k_{in};$ $k_i=2,711\omega_0^3k_{in}$	$\frac{1}{1,795\omega_0 s+1}$
ПИИ(Д)	$\frac{\omega_{пр}}{0,74}$	$k_p=10,07\omega_0^2k_{in}; k_d=4,730\omega_0k_{in};$ $k_{i1}=11,11\omega_0^3k_{in}; k_{i2}=5,258\omega_0^4k_{in}$	$\frac{1}{1,915\omega_0^2 s^2 + \frac{2,113}{\omega_0} s + 1}$

Теоретические положения, принятые за основу при построении систем, прошли проверку средствами имитационного моделирования в

среде *Simulink* программного комплекса *Matlab*. Эксперименты проводились на примере модуля манипулятора для металлорежущего станка ( $k_{in}=7,94 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $\omega_{пр}=62,8 \text{ рад/с}$ ,  $T_{км}=0,001 \text{ с}$ ).

Графики на рис. 3 показывают реакцию систем позиционирования с регуляторами положения при ступенчатом изменении нагрузки 1 Н·м. Логарифмические характеристики, представленные на рис. 4, показывают степень ослабления влияния механической нагрузки модулей на характеристики систем.

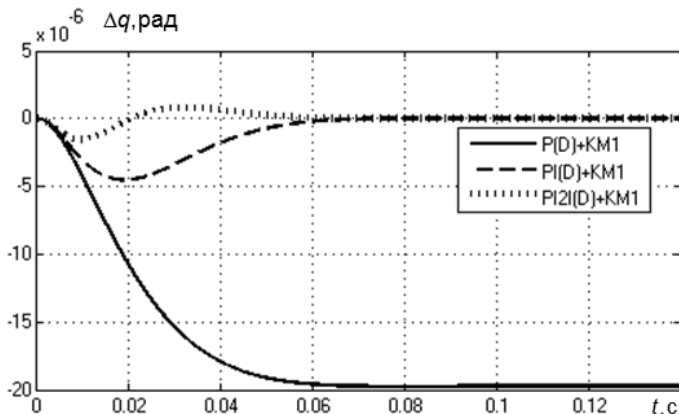


Рис. 3. Динамическая ошибка регулирования

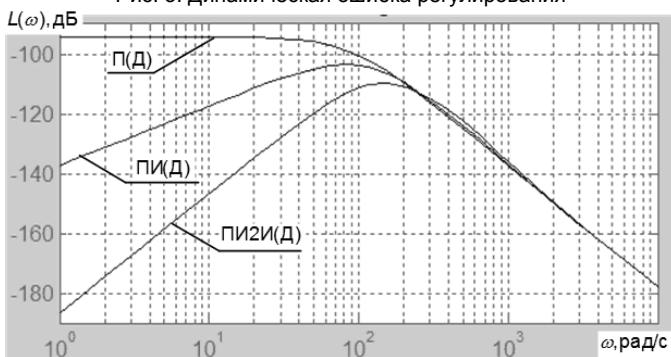


Рис. 4. ЛАЧХ систем позиционирования по возмущению

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00972).

### Литература

1. **Колганов А.Р.**, Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Современные методы управления в электромеханотронных системах. Разработка, реализация, применение. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». 2012. – 256 с.
2. **Лебедев С.К.**, Колганов А.Р., Гнездов Н.Е. Комбинированное управление в системах позиционирования с наблюдателями нагрузки. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – №3. – С. 41-47.
3. **Лебедев, С.К.**, Колганов А.Р. Исследование характеристик стандартных распределений корней характеристических уравнений для электромехатронных систем позиционирования. // Вестник ИГЭУ. – 2014. – №6. – С. 57-62.

*Лебедев Сергей Константинович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: lebedev@drive.ispu.ru

*Колганов Алексей Руфимович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: klgm@drive.ispu.ru

*Баганов Игорь Юрьевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: drive@drive.ispu.ru

УДК 621.34: 62-50

А.Б. ВИНОГРАДОВ, д.т.н., профессор, Н.Е. ГНЕЗДОВ к.т.н., доцент,  
С.В. ЖУРАВЛЕВ, инженер-проектировщик,  
А.Н. СИБИРЦЕВ, инженер-проектировщик,  
Д.А. МОНОВ, инженер-проектировщик

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: gnezdov@list.ru

## **Стендовые испытания комплекта тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн**

**Аннотация.** Описаны оборудование и программа наладка и испытаний комплекта тягового электрооборудования карьерного самосвала на малом и полномасштабном стендах. Приведены результаты испытаний, по результатам которых принято решение о проведении полигонных испытаний и изготовлении второго комплекта электрооборудования.

**Ключевые слова:** тяговый электропривод, карьерный самосвал, испытания.

A.B. VINOGRADOV, doctor of engineering, professor,  
N.E. GNEZDOV, candidate of engineering, docent,  
S.V. SHURAVLEV, design engineer, A.N. SIBIRTSEV, design engineer,  
D.A. MONOV, design engineer

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: gnezdov@list.ru

## **Bench test of traction electrical equipment set for dump truck with load capacity 240 tons**

**Abstract.** Equipment and program of adjustment and bench test of electrical equipment set for dump truck are described. Test results are presented. As a result the decision of ground test and making of second electrical equipment set is accepted.

**Key words:** traction electric drive, dump truck, bench test.

Новые возможности в повышении ресурса и снижения стоимости эксплуатации, а также увеличение грузоподъемности карьерных самосвалов обеспечил переход на электромеханические трансмиссии (ЭМТ) переменного тока, который начался в ОАО «БЕЛАЗ» почти 20 лет назад [1]. Опыт создания ЭМТ для городского автобуса, пропашного и гусеничного тракторов позволил авторам разработать силовую и управляющую части комплекта тягового электрооборудования (КТЭО) карьерного самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 240 тонн.

КТЭО БЕЛАЗ-240, наряду с общими для тяговых систем электропривода свойствами [2], обладает следующими особенностями:

- регулирование напряжения в звене постоянного тока (ЗПТ) осуществляется по каналу управления током возбуждения генератора. Ограниченное быстродействие синхронного тягового генератора (СТГ) необходимо учитывать при согласовании динамических характеристик элементов силового канала КТЭО;

- принятая структура привода генератора, наличие двух блоков тормозных резисторов (УВТР 1 и 2) для обеспечения тормозных режимов самосвала и относительно небольшая емкость ЗПТ определяют повышенный уровень пульсаций напряжения ЗПТ и различие этих уровней для тяговых и тормозных режимов приводов асинхронных тяговых двигателей (ТАД левого и правого колёс);

- предельные тяговые характеристики ТАДов имеют очень широкие диапазоны регулирования переменных в области ослабления поля (ограничения напряжения) – более 15:1;

- требуемая мощность тормозного режима ТАД (1300 кВт), необходимая для обеспечения движения полностью нагруженного самосвала массой 400 тонн под уклон 10 % со скоростью 30 км/час почти в 2 раза превышает требуемую мощность двигательного режима (700 кВт) на уклоне 10 % со скоростью 10 км/час.

Функциональная схема, состав и конструктивные особенности КТЭО описаны в [3, 4]. Там же описаны синтез алгоритмов управления и результаты их моделирования.

Наладка и испытания КТЭО выполнены в два этапа. На «малом» стенде в ОАО «НИПТИЭМ» осуществлена пуско-наладка, проверка работоспособности и основных характеристик силового канала и информационных цепей ШПСУ, отладка ПО контроллеров СВТГ (КСВТГ) и силовых преобразователей ТАДов (КСП), проверка функционирования ШПСУ в целом. На втором этапе, проводимом на стенде «БЕЛАЗ на полу» в ООО «Русэлпром-СЭЗ», выполнена пуско-наладка и автономные испытания элементов КТЭО с выходом на их предельные и номинальные режимы работы, отладка и комплексные испытания КТЭО в целом, проверка соответствия его характеристик требованиям технического задания.

Программа комплексных испытаний КТЭО включала в себя:

– снятие предельной статической тяговой и тормозной характеристик в диапазоне рабочих скоростей ТАДов (табл. 1);

Таблица 1. Параметры предельных режимов, полученные на стенде

Тяговый режим				Тормозной режим			
V, км/ч	W <sub>г</sub> , рад/с	M <sub>c</sub> , Нм	P, кВт	V, км/ч	W <sub>г</sub> , рад/с	M <sub>c</sub> , Нм	P, кВт
0	0	29700	0	0	0	22370	0
0,2	1	29700	29,7	0,2	1	22370	22,4
2,9	14	29700	415,8	2,5	12,1	22370	270,7
5,3	25,4	24700	628,5	5,3	25,4	22370	569,2
10	47,8	14700	702	10	47,8	20800	994,2
20	95,5	7400	706,7	21,4	102,1	13080	1335,5
30	143,3	5400	773,6	30,9	147,9	8955	1324,4
40	191	3920	748,8	43,1	206,1	6380	1314,9
50	238,8	2480	592,1	54,8	261,8	3787	991,4
60	286,5	1670	478,5	62,2	297,4	2639	784,8
63,9	305	1360	414,8	65,3	312	2244	700,1
65,3	312	0	0	–	–	–	–

– снятие временных диаграмм работы КТЭО в предельных динамических режимах разгона/торможения/реверса скорости в режиме ХХ (рис. 1) и с нагрузками 0,5 и 0,8 от предельной, а также наброса/сброса максимальной двигательной и генераторной нагрузок из режима ХХ на скоростях 200, 500, 1000, 2000, 2900 об/мин; быстроедействие приводов характеризуется переходом от предельного тягового к 90 % тормозного момента менее, чем за 2 секунды на любой рабочей скорости;

– нагрузочные испытания КТЭО; успешно пройдены тяговый (оба ТАДа по 700 кВт – длительно) и тормозной (оба ТАДа по 1 МВт – длительно и 1,3 МВт – кратковременно) режимы;

– испытания приводов под управлением контроллера верхнего уровня (КВУ) с имитатором кабины самосвала и сервисной вычислитель-



ной системой (СВС); отработаны режимы заряда, штатного и аварийного разряда, согласованного управления ТАДами во всех режимах движения, а также реакции на аварийные ситуации и ведение рабочих и аварийных журналов.

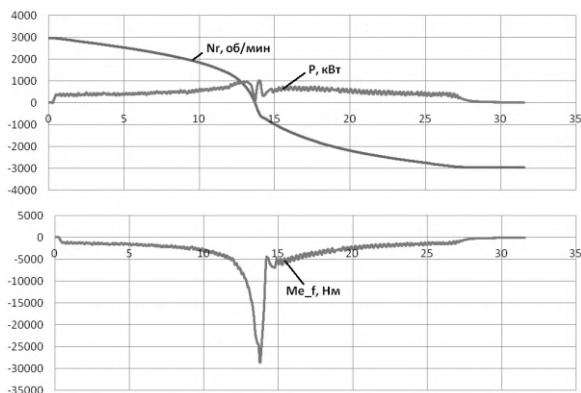


Рис. 1. Временные диаграммы реверса привода ТАД с предельным моментом

Разработанный комплект тягового электрооборудования успешно выдержал испытания, проведенные согласно утвержденной программе и методике испытаний. В объеме выполненных проверок КТЭО БЕЛАЗ-240 соответствует требованиям технического задания. По результатам испытаний принято решение провести полигонные испытания КТЭО в составе самосвала летом 2015 г. и начать изготовление КТЭО-2 с доработкой конструкции и структуры ШПСУ.

#### Литература

1. **Сахарчук Т.Б.** и др. Белорусский автомобильный завод. 1948-2008.; под общ. ред. П.Л. Мариева. – Минск: Тэхналогія. 2008. – 448 с.
2. **Виноградов А.Б.**, Гнездов Н.Е., Глебов Н.А. Особенности управления электроприводами транспортных средств с электромеханической трансмиссией // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика (специальный выпуск). – 2013. – №36 (1009). – С. 278-279.
3. **Виноградов А.Б.**, Гнездов Н.Е., Журавлев С.В., Сибирцев А.Н. Разработка и исследования комплекта тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 7-9 октября 2014 г. – В 2-х т. – 2014. – С. 261–264.
4. **Виноградов А.Б.**, Гнездов Н.Е., Журавлев С.В., Сибирцев А.Н. Результаты разработки и испытаний комплекта тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн // Электротехника. – 2015. – №3. – С. 39–45.

*Виноградов Анатолий Брониславович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vinogr\_ab@mail.ru

*Гнездов Николай Евгеньевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: gnezdov@list.ru

*Журавлев Сергей Вячеславович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: zsergio@mail.ru

*Сибирцев Андрей Николаевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vector@drive.ispu.ru

*Монов Дмитрий Александрович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vector@drive.ispu.ru

УДК 621.34: 62-50

Н.Е. ГНЕЗДОВ, к.т.н., доцент,  
А.Б. ВИНОГРАДОВ, д.т.н., профессор,  
Н.А. ГЛЕБОВ, инженер-проектировщик,  
С.В. ЖУРАВЛЕВ, инженер-проектировщик

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: gnezdov@list.ru

### **Настройка каналов измерения и реализации электрических сигналов в тяговом электроприводе**

**Аннотация.** Описана методика настройки каналов измерения скорости, фазных токов, напряжения в звене постоянного тока, а также канала реализации напряжения статора, применяемая при создании тяговых электроприводов. В результате погрешность каналов составляет менее 1 % во всем рабочем диапазоне настраиваемых сигналов.

**Ключевые слова:** измерение электрических сигналов, мёртвое время, тяговый электропривод.

N.E. GNEZDOV, candidate of engineering, docent,  
A.B. VINOGRADOV, doctor of engineering, professor,  
N.A. GLEBOV, design engineer, S.V. SHURAVLEV, design engineer

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: gnezdov@list.ru

### **Adjustment of measuring and realization channels of electric signals in traction electric drive**

**Abstract.** Adjustment technique of speed, phase current, dc link voltage measuring channels and channel of stator voltage realization is described. The

technique is implemented in traction electric drive production. As a result inaccuracy of the channels is less than 1% at all work range of adjustable signals.

**Key words:** electric signals measuring, dead band time, traction electric drive.

Применение тягового электрического привода в общественном и коммерческом (грузовом, промышленном, сельскохозяйственном) транспорте даёт ряд очевидных преимуществ: экономия топлива и снижение вредных выбросов, облегчение управления за счет исключения коробки передач, повышение точностных и динамических характеристик, реализация новых режимов (рекуперация энергии торможения, движение при выключенном ДВС, удержание и плавный старт на уклоне), меньшая зависимость от факторов окружающей среды (высоты над уровнем моря, состава воздуха и т.п.). С участием авторов реализованы проекты по созданию городского автобуса, промышленного и пропашного тракторов, карьерного самосвала [1].

В качестве базовой в указанных проектах используется оптимальная по потерям векторная система управления с идентификатором параметров [2, 3]. Особенностями данной системы является оценка в реальном времени всех параметров двигателя и коэффициентов алгоритма управления, претерпевающих существенные изменения в связи с изменениями внешних условий и режимов работы привода. Важным условием работоспособности этих алгоритмов является низкая, не более 1 % погрешность каналов измерения токов, напряжений, скорости, а также канала реализации рассчитанного напряжения статора.

Канал измерения напряжения в звене постоянного тока силовых преобразователей (СП) привода в целом имеет приемлемую точность. Калибровка требуется лишь для сближения показаний датчиков в разных СП, например, приводов мотор-генератора, левого и правого бортов гусеничного трактора [4]. Для этого вводится поправочный коэффициент, на который умножается оцифрованный сигнал напряжения. Коэффициент определяется экспериментально по показаниям внешнего поверенного вольтметра на рабочем уровне напряжения и составлял  $\pm 2$  % от этого уровня.

Для оценки правильности установки датчика скорости двигателя проверяется крутизна фронтов и чередование импульсов в его сигнале во всем диапазоне скоростей. Сигнал с датчика скорости определяет ориентацию векторной системы управления, ошибка в которой особенно критична в верхней части диапазона.

В отношении каналов измерения фазных токов статора установлено, что в используемых СП SKAI-1, SKAI-2 и SKiiP 4-го поколения (Semikron) их погрешность гиперболически нарастает и внизу рабочего диапазона привода достигает 12, а в некоторых фазах и 18 % (рис. 1). В качестве эталона применялись датчики тока LEM, поверенные калибровочным шунтом, имеющим сертификат государственной службы метрологии. Для повышения точности разработан и реализован нелинейный, но

достаточно простой алгоритм коррекции измерений, обеспечивший требуемую точность (рис. 1). Суть его заключается не только в умножении оцифрованного сигнала на коэффициент коррекции, но и в смещении вычисленного результата. Получено, что для датчиков SKAI-1 необходим коэффициент коррекции 0,98..1,02 и смещение 0,4..5,0 А, SKAI-2 – 0,89..0,91 и 0,1..3,0 А, SKiiP – 0,98..0,99 и 0,5..2,5 А соответственно. Для повышения точности применяется также компенсация смещения датчиков тока при инициализации контроллера и online-контроль напряжения смещения канала, соответствующего нулевому значению тока.

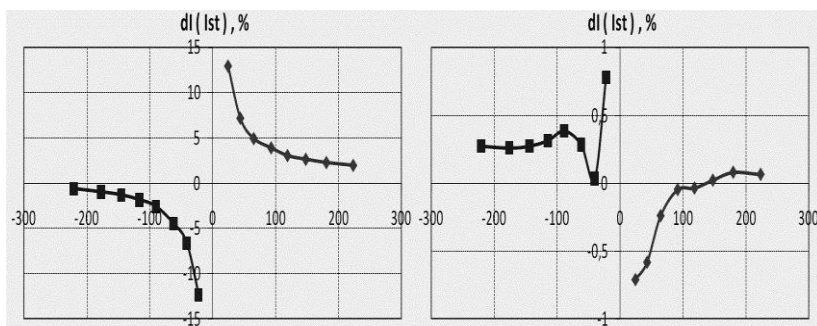


Рис. 1. Погрешность датчиков тока SKAI-2 до (сверху) и после (снизу) коррекции измерений

Несмотря на небольшое значение длительности «мёртвого» времени в SKAI-1, SKAI-2 и SKiiP, равное 2–4 микросекунды (рис. 2), отсутствие его компенсации вносит неприемлемую погрешность в формируемый вектор напряжения статора и ограничивает его предельные значения. Для преодоления этих недостатков разработан алгоритм и методика настройки пофазной компенсации «мёртвого» времени [5]. Их использование позволило обеспечить формирование напряжения статора с требуемой погрешностью менее 1 %, в том числе на уровнях напряжения в единицы вольт. На рис. 3 представлены осциллограммы фазных токов статора тягового асинхронного двигателя (ТАД), полученные в режиме управления  $U/f = \text{const}$  с заданием  $U_z = 2,0$  В и  $f_z = 0,5$  Гц до и после применения алгоритма компенсации «мёртвого» времени.

Применение описанных методик обеспечило требуемую точность измеряемых и управляющих сигналов и, как следствие, работоспособность алгоритмов систем управления тяговых электроприводов.

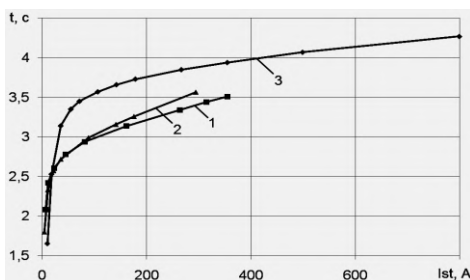


Рис. 2. Зависимость величины «мёртвого» времени от тока статора при частоте ШИМ 4 кГц: 1 – для SKAI-1; 2 – для SKAI-2; 3 – для SKIiP

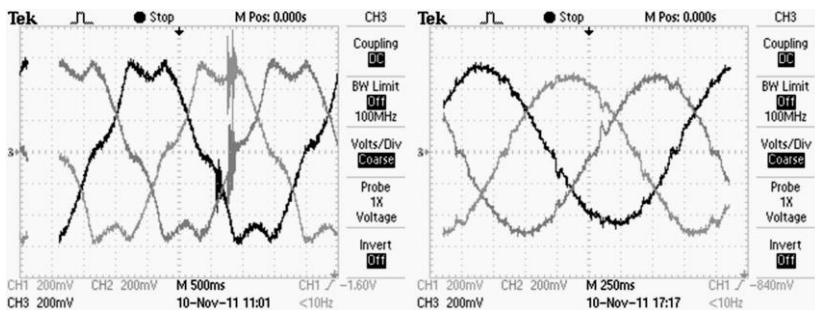


Рис. 3. Осциллограммы токов статора двигателя до (слева) и после (справа) применения алгоритма компенсации «мёртвого» времени

### Литература

1. **Виноградов А.Б.**, Гнездов Н.Е., Глебов Н.А. Особенности управления электроприводами транспортных средств с электромеханической трансмиссией. // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика (специальный выпуск). – 2013. – №36 (1009). – С. 278-279.
2. **Виноградов А.Б.**, Изосимов Д.Б., Флоренцев С.Н., Глебов Н.А. Оптимизация КПД системы векторного управления асинхронным тяговым электроприводом с идентификатором параметров. // Электротехника. – 2010. – №12. – С. 12–19.
3. **Виноградов А.Б.**, Гнездов Н.Е., Глебов Н.А., Журавлев С.В. Учет потерь и насыщения стали при оптимальном векторном управлении тяговым асинхронным электроприводом // Вестник ИГЭУ. – 2012. – №1. – С. 35-41.
4. **Виноградов А.Б.**, Гнездов Н.Е., Чистосердов В.Л. Особенности реализации тягового электрооборудования гусеничного промышленного трактора мощностью 160 л.с. // Электротехника. – 2015. – №4.
5. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». 2008. – 320 с.

*Гнездов Николай Евгеньевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: gnezdov@list.ru

*Виноградов Анатолий Брониславович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vinogr\_ab@mail.ru

*Глебов Николай Алексеевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: n\_glv@mail.ru

*Журавлев Сергей Вячеславович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: zsergio@mail.ru

УДК 62-833.6

А.Б. ВИНОГРАДОВ, д.т.н., профессор,  
Н.Е. ГНЕЗДОВ, к.т.н., доцент,  
А.Н. СИБИРЦЕВ, инженер-проектировщик

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: gnezdov@list.ru*

### **Исследования системы возбуждения тягового генератора мощностью 1550 кВт**

**Аннотация.** Представлены результаты разработки, наладки и испытаний системы возбуждения синхронного тягового генератора для электромеханической трансмиссии карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн. Система обеспечивает энергоэффективное регулирование напряжения в звене постоянного тока с уровнем пульсаций в статике менее 0,5 %, динамической ошибкой 5 % и временем регулирования 0,2 с.

**Ключевые слова:** тяговый синхронный генератор, система возбуждения, карьерный самосвал.

A.B. VINOGRADOV, Doctor of Engineering, professor,  
N.E. GNEZDOV, Candidate of Engineering, docent,  
A.N. SIBIRTSEV, design engineer

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: gnezdov@list.ru*

### **Research of field system of traction generator with 1550 kilowatts power**

**Abstract.** The results of design, adjustment and test of field control system of synchronous traction generator for electromechanical transmission of dump truck with load capacity 240 tons are presented. The system provides energy saving dc link voltage

control with ripple level in static less than 0,5 %, dynamic fall 5 % and transient-process time 0,2 second.

**Key words:** traction synchronous generator, field system, dump truck.

Основным типом трансмиссии в карьерных самосвалах большой грузоподъёмности является электромеханическая трансмиссия переменного тока. Источником электрической энергии, как правило, является синхронный генератор (СТГ) с обмоткой возбуждения. Основной задачей системы возбуждения является автоматическое регулирование напряжения выпрямителя на выходе СТГ (напряжения шины ЗПТ) при его внешнем задании. Специфичными требованиями к системе регулирования возбуждения являются: высокое быстродействие, энергоэффективность и согласованная с нагрузкой работа. Производители таких систем не раскрывают решений указанных задач.

При создании комплекта тягового электрооборудования (КТЭО) карьерного самосвала БЕЛАЗ грузоподъёмностью 240 тонн разработана, реализована и исследована система возбуждения тягового генератора (СВТГ) [1]. Генератор представляет собой синхронную машину с электромагнитным возбуждением, оснащённую двумя группами трехфазных обмоток на статоре, сдвинутых на 30 градусов, питающих два неуправляемых выпрямителя.

Силовой преобразователь СВТГ выполнен по схеме: неуправляемый выпрямитель – понижающий DC/DC преобразователь на IGBT-инверторе с ШИМ. Для начального заряда ЗПТ при отсутствии возбуждения предусмотрен блок подпитки. Для управления обмоткой возбуждения первоначально использовалась мостовая схема, однако для исключения перенапряжений в ЗПТ СВТГ, обусловленных возвратом накопленной в обмотке возбуждения энергии, выбрана чопперная схема с ШИМ. При этом динамика затухания возбуждения ограничена постоянной времени обмотки возбуждения  $T_b = 50$  мс (определена экспериментально), что повышает важность согласования динамики тяговых приводов колёс с динамикой СВТГ.

Питание выпрямителя блока СВТГ первоначально было выполнено от одной из трехфазных обмоток генератора. После испытаний, для снижения нагрузки на силовые ключи СВТГ решено перейти на нулевую схему. В результате напряжение в ЗПТ СВТГ снизилось с 1100 В до 500÷900 В в зависимости от нагрузки. Однако при этом встала задача получения информации о напряжении в ЗПТ силовых преобразователей (СП) асинхронных тяговых двигателей (ТАД), поскольку оно питалось по прежней схеме, а датчик напряжения располагается в ЗПТ СВТГ. Чтобы избежать конструктивных изменений, обратная связь контура напряжения была организована по каналу CAN. Кроме того, это позволило реализовать дополнительные защиты в СВТГ по состоянию привода ТАД и УВТР. Программная проверка достоверности принятой информации обеспечила

устойчивую работу контура регулирования напряжения ЗПТ в реальном времени (период расчета контура 1 кГц).

Контроллер СВТГ (КСВТГ) выполнен на базе DSP TMS320F2808. Система управления возбуждением СТГ включает в себя последовательно-подчинённые контуры с ПИ-регуляторами тока возбуждения и напряжения ЗПТ. Для снижения потерь в силовых элементах КТЭО задание напряжения в ЗПТ изменяется в зависимости от потребляемой ТАДами мощности. С целью минимизировать динамические провалы напряжения ЗПТ при резком переходе КТЭО из генераторного в двигательный режим внешний контур системы управления СТГ работает либо в режиме регулирования напряжения ЗПТ, либо в режиме регулирования ЭДС.

При настройке системы управления СВТГ приходилось искать компромисс между минимизацией пульсаций регулируемого напряжения ЗПТ в статике и видом и быстродействием его переходного процесса, как по управлению, так и по возмущению. Установлено, что существенное влияние оказывают как абсолютные значения постоянных времени настраиваемых контуров, так и их соотношение. Искомый компромисс обеспечили значения постоянных времени 100 мс в контуре тока и 80 мс в контуре напряжения.

Снятие статических характеристик СТГ, выполненное на уровнях напряжения 800÷1100 В, не только подтвердило работоспособность системы, но и позволило установить зависимости пульсаций регулируемого напряжения от уровня нагрузки (рис. 1). Уровень пульсаций определялся как отношение среднего по модулю отклонения напряжения  $U_d$  к его среднему значению на отрезке в 1 с. С учетом этих данных была скорректирована зависимость задания напряжения в ЗПТ от потребляемой ТАДами мощности.

Динамические характеристики системы определены путем наброса/сброса нагрузки, формируемой с помощью УВТР в диапазоне от нуля до номинальной (1550 кВт), с разными темпами изменения мощности нагрузки ( $dP/dt$ ). При обработке данных определены зависимости провала напряжения в звене ( $dU$ ) от темпа изменения мощности ( $dP/dt$ ) при набросе нагрузки, а также заброса  $U_d$  от  $dP/dt$  при сбросе нагрузки (рис. 2). Заброс ограничен значением 50 В, благодаря работе УВТР. На основе полученных зависимостей динамика изменения мощности приводов ТАД ограничена на уровне 7000 кВт/с. При этом время отработки ступенчатого наброса/сброса номинальной нагрузки СТГ не превышает 0,2 с с провалом напряжения около 50 В.

При проверке работоспособности силовой части КТЭО в целом, успешно выполнен выход на предельные режимы по скоростям и моментам при одновременной работе СВТГ, силовых преобразователей обоих ТАДов и УВТР. В ходе проверки взаимодействия контроллеров ШПСУ с контроллером верхнего уровня отработаны режимы заряда, штатного и аварийного разряда, согласованного управления ТАДами во всех режи-



мах движения, а также реакции на аварийные ситуации и ведение рабочих и аварийных журналов.

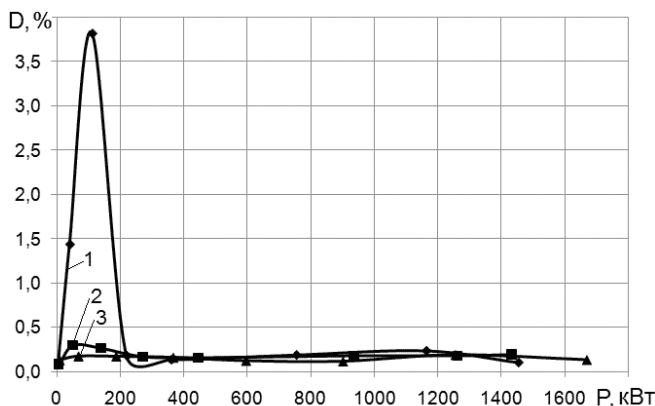


Рис. 1. Зависимость пульсаций напряжения в ЗПТ ТАД от нагрузки СТГ:  
1 – при  $U_d = 800$  В; 2 – при  $U_d = 900$  В; 3 – при  $U_d = 1050$  В

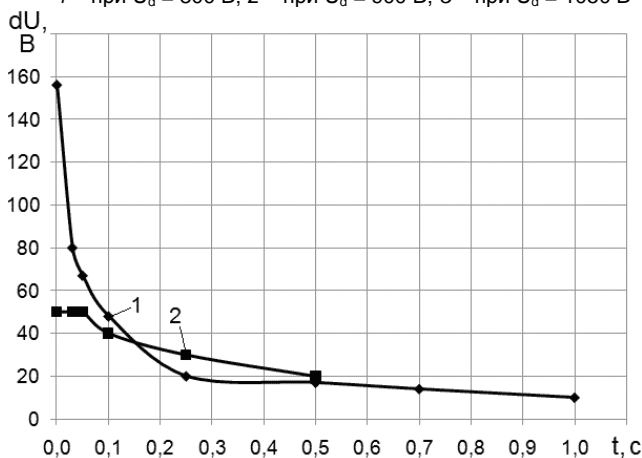


Рис. 2. Зависимости провала (1) и заброса (2) напряжения в ЗПТ ТАД от времени изменения мощности ТАД от 0 до номинальной

#### Литература

1. **Виноградов А.Б.**, Гнездов Н.Е. Система возбуждения тягового генератора электромеханической трансмиссии карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн. // Вестник ИГЭУ. – 2015. – №1. – С. 36-41.

*Виноградов Анатолий Брониславович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vinogr\_ab@mail.ru

*Гнездов Николай Евгеньевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: gnezdov@list.ru

*Сибирцев Андрей Николаевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vector@drive.ispu.ru

УДК 681.518.3

А.С. УШКОВ, ассистент,  
А.Р. КОЛГАНОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: taugrin@gmail.com

### **Преимущества применения многофазных корректоров коэффициента мощности в составе асинхронного электропривода<sup>5</sup>**

**Аннотация.** Повышение энергоэффективности асинхронного электропривода возможно при введении в его состав корректора коэффициента мощности (ККМ). Существуют различные схмотехнические решения по реализации ККМ. В статье показано, что наибольший эффект повышения коэффициента мощности и улучшения электромагнитной совместимости электропривода достигается при использовании многофазных ККМ.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, корректор коэффициента мощности, система управления.

A.S. USHKOV, assistant,  
A.R. KOLGANOV, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: taugrin@gmail.com

### **The advantages of using multi-phase power factor correctors as part of an induction motor electric drive**

**Abstract.** Improving the energy efficiency of the asynchronous electric possible with the introduction of its constituent power factor corrector (PFC). There are various schematic solutions for the implementation of PFC. The article shows that the greatest effect of increasing the power factor and improve EMC of electric drive is achieved using multi-phase PFC.

**Key words:** induction motor drive, power factor corrector, control system.

Входной каскад цепи электропривода без корректора коэффициента мощности (ККМ) очень похож на источник питания (ИП) с конденсато-

---

<sup>5</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00972).

ром большой емкости, сглаживающим выпрямленный постоянный ток из электросети.

Источники питания без ККМ создают мощные импульсные помехи по электросети для параллельно включенных электроприборов. Международная электротехническая комиссия (МЭК)<sup>6</sup> или IEC (International Electrotechnical Commission) и международная организация по стандартизации или ISO (International Organization for Standardization) устанавливают ограничения на содержание и уровни гармоник во входном токе вторичных источников электропитания<sup>7</sup>.

Типовой ИП имеет на входе сетевой выпрямитель и сглаживающий конденсатор, являющийся реактивной нагрузкой для диодного моста и питающей сети. Такой ИП потребляет мощность от сети только в то время, когда напряжение, подаваемое с выпрямителя на сглаживающий конденсатор, превышает напряжение на этой емкости. На практике это время составляет примерно 25 % от периода сетевого напряжения. В оставшиеся три четверти периода мощность от сети не потребляется, так как нагрузка питается от сглаживающего конденсатора. Это приводит к тому, что мощность подается в нагрузку только на пиках напряжения, а потребляемый ток имеет форму короткого импульса и содержит много мощных гармоник.

Корректор коэффициента мощности уменьшает среднеквадратичное значение потребляемого от сети тока и обеспечивает равномерное потребление мощности практически в течение всего периода сетевого напряжения при резком уменьшении гармонических составляющих тока во входной цепи. Таким образом, применение ККМ в структуре асинхронного электропривода (АЭП) является одним из наиболее простых и дешёвых способов улучшения гармонического состава потребляемого из сети тока, а также повышения энергосбережения. Силовая часть АЭП с двухфазным ККМ представлена на рис. 1

Все ИП передают некоторую часть энергии коммутации на линию электропитания через пульсирующую компоненту тока. Она может различаться в зависимости от того, в каком режиме работает ККМ. Например, в случае ККМ с переходным режимом величина пульсирующей компоненты составляет 200 %, а в случае ККМ с режимом непрерывного тока величина пульсирующей компоненты 60 %. Хотя при этом происходит улучшение на 10 дБ, такой результат достигается за счет вольтодобавочного индуктора большей величины. Независимо от выбранного подхода необходим фильтр электромагнитных помех в той или иной форме.

---

<sup>6</sup> ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007.

<sup>7</sup> ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2006.

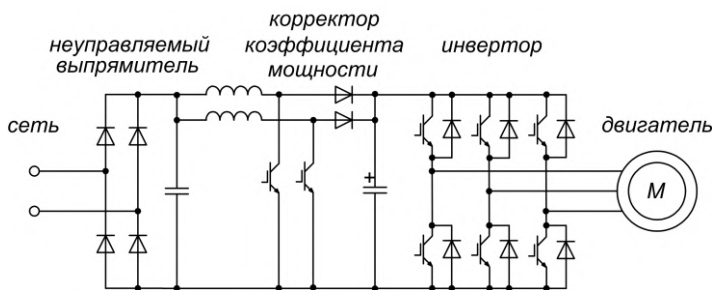


Рис. 1. Силловая схема асинхронного электропривода с корректором коэффициента мощности

Если мы соберем две идентичные схемы ККМ, каждая из которых будет работать со сдвигом по фазе  $180^\circ$ , то комбинированная пульсирующая двухступенчатая компонента тока окажется значительно меньше, чем пульсирующая компонента для единственного каскада при той же полной мощности. Таким образом, можно будет использовать существенно меньший входной фильтр электромагнитных помех. При работе двух каскадов с продолжительностью рабочего цикла в точности 50 % пульсирующая компонента уменьшается до нуля! При различной продолжительности рабочих циклов ослабление пульсирующей компоненты будет меньше, но все же останется весьма существенным.

Работа двух идентичных каскадов со сдвигом по фазе  $180^\circ$  называется чередованием фаз, что на практике обеспечивается либо благодаря современным специализированным микросхемам, либо с помощью микроконтроллеров, на которых реализованы алгоритмы системы управления ККМ.

Преимущество многофазности состоит в уменьшении пульсирующей компоненты выходного тока. Это позволяет использовать меньший выходной конденсатор или иметь меньшую токовую нагрузку при прежнем выборе конденсатора, что приводит к увеличению срока эксплуатации и более высокой надежности. Другое преимущество состоит в том, что можно использовать два меньших компонента вместо одного большого. К таким компонентам относятся вольтодобавочный индуктор, мощный полевой МОП-транзистор и силовой диод. Меньшие размеры этих компонентов позволяют получить более распределенную топологию печатной платы, что обеспечивает лучшее рассеяние тепла различными мощными компонентами и более низкий профиль систем питания.

Многофазность также позволяет получить более высокую мощность, чем это практически достижимо при однофазной архитектуре. Для двух уже существующих однофазных схем ККМ мощностью 250 Вт можно

легко реализовать чередование фаз, быстро разработав на основе тех же компонентов схему ККМ мощностью 500 Вт.

#### Литература

1. **Нейдорф Б.** Многофазность позволяет покорить новые высоты. // Электроника Инфо. – 2009. – №4.
2. **Семенов Б.Ю.** Словарь электроники: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс. 2005. – 416 с.

*Ушков Александр Сергеевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: taugrin@gmail.com

*Колганов Алексей Руфимович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: klgn@drive.ispu.ru

УДК 530.1(075.8)

Б.С. КУРНЫШЕВ, д.т.н., профессор,  
А.В. ЯКУБЕНКО, магистрант, А.Х. ХАНГУЛИЕВ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: bor403@yandex.ru*

## Дифференциальные преобразования в D-пространстве нанотехнологий

**Аннотация.** Показано, что ускорения наночастиц даже в слабых электромагнитных полях имеют чрезвычайно большую величину. Получены тензорные уравнения электромеханических процессов при произвольной величине ускорений.

**Ключевые слова:** нанотехнология, идентификация, тензоры.

B.S. KURNYSHEV, Doctor of Engineering, professor,  
A.V. YAKUBENKO, a university undergraduate,  
A.H. HANGULIEV, a university undergraduate

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: bor403@yandex.ru*

## Differential Transformations in D-space in nanotechnology

**Abstract.** It is shown that the acceleration of the nanoparticles, even in weak electromagnetic fields are extremely large value. Obtained tensor equations of electromechanical processes for an arbitrary value of accelerations.

**Key words:** nanotechnology, identification, tensors.

Движение свободных заряженных частиц (ионов) происходит с очень большими ускорениями даже в слабых электрических полях. Оценку величины таких ускорений можно получить следующим образом. Если к концам

электрического проводника длиной  $l_{np}$  приложить постоянное напряжение  $U$ , то в проводнике создаётся постоянное электрическое поле

$$E = U / l_{np} \quad (1)$$

В таком поле электроны под воздействием постоянной силы

$$F = eE \quad (2)$$

движутся (в промежутках времени между столкновениями с молекулами) равноускоренно, с ускорением, равным

$$a = F / m_e = eU / m_e l_{np} \quad (3)$$

При  $U = 1$  В,  $l_{np} = 1$  м,  $m_e \approx 10^{-30}$  кг,  $e \approx 10^{-19}$  Кл,  $a \approx 10^{11}$  м·с<sup>-2</sup> – по порядку величины. В обычном электровакуумном диоде ускорение электронов ещё больше. В этом случае:  $U \approx 100$  В;  $l_{np} = 1$  см;  $a \approx 10^{15}$  м·с<sup>-2</sup>. Ускорение свободных электронов в обычной лампе накаливания порядка  $10^{14}$  м·с<sup>-2</sup>. Масса наночастиц, по порядку величины, составляет примерно  $10^{-27}$  кг, поэтому их ускорение примерно на 3 порядка меньше рассчитанных значений. Но, для сравнения, заметим, что ускорение свободного падения в поле тяготения Земли составляет всего 9,81 м·с<sup>-2</sup>. В силу принципа эквивалентности общей теории относительности в неинерциальных системах отсчёта (СО), связанных с наночастицами, при таких ускорениях происходит многократное замедление хода времени:  $\Delta t \geq \Delta t_n$  (где  $\Delta t$  – интервал «собственного» времени в инерциальных СО, с;  $\Delta t_n$  – интервал «собственного» времени в неинерциальных СО, с). Вместе с тем, движение наночастиц является процессом физическим и, следовательно, не зависит от СО. Поэтому уравнения динамики наночастиц, которые можно было бы использовать в задачах идентификации и управления, должны иметь соответствующую инвариантную структуру [1]. Возникает задача определения дифференциальных преобразований в D-пространстве [2], которая может быть решена методами тензорного анализа [3].

Уравнения, инвариантные по отношению к величине ускорений, имеют вид:

$$\frac{Du_i}{dt_n} = \frac{du_i}{dt_n} - \Gamma_{ik}^j u_j u^k - \frac{1}{2} S_{ik,j} u^j u^k = S_{ik,j} u^j u^k + I_{ik} u^k, \quad (4)$$

где  $Du_i/dt_n$  – ковариантная производная в D-пространстве;  $\Gamma_{ik}^j$  – символы Кристоффеля;  $u_k = \frac{\partial t}{\partial t_n^k}$  – компоненты ковариантного вектора  $u_k e^k$  ( $e^k$  – локаль-

ная система базисных векторов в D-пространстве);  $u^k = \frac{dt_n^k}{dt_n}$  – компоненты контравариантного вектора  $u^k e^k$ ;  $S_{ik,j}$  – тензор кручения;  $I_{ik}$  – тензор инерции.

Если в D-пространстве ввести ковариантные координаты  $t_k$  и контравариантные координаты  $t^k$  с размерностью времени, причём  $dt_i = G_{ik} dt^k$  ( $G_{ik}$  – асимметричный метрический тензор), то бесконечно малый интервал времени  $dt$  в D-пространстве определится как

$$(dt)^2 = G_{ik} dt^i dt^k. \quad (5)$$

В этом случае законы преобразования компонент

$$u_k = \frac{\partial t}{\partial t^k}, \quad (6)$$

$$u^k = \frac{dt^k}{dt} \quad (7)$$

векторов  $u_k e^k$  и  $u^k e_k$  при переходе от координат  $t_k$  к преобразованным координатам  $\tilde{t}^i$  выражаются формулами [3]:

$$u_i = \frac{\partial t^k}{\partial \tilde{t}^i} u_k; \quad (8)$$

$$u^i = \frac{d\tilde{t}^i}{dt^k} u^k. \quad (9)$$

Если в D-пространстве ввести координату  $x = ct$ , ковариантные координаты  $x_k = ct_k$  и контравариантные координаты  $x^k = ct^k$  ( $c$  – скорость света в вакууме, м/с) с размерностью длины, причём

$$dx_i = G_{ik} dx^k \quad (10)$$

( $G_{ik}$  – тот же асимметричный метрический тензор), то бесконечно малый интервал времени  $dt$  в D-пространстве определится как

$$(dt)^2 = \frac{1}{c^2} G_{ik} dx^i dx^k. \quad (11)$$

В этом случае законы преобразования компонент

$$u_k = \frac{\partial x}{\partial x^k}, \quad (12)$$

$$u^k = \frac{dx^k}{dx} \quad (13)$$

векторов  $u_k e^k$  и  $u^k e_k$  при переходе от координат  $x^k$  к преобразованным координатам  $\tilde{x}^i$  определяются формулами [3]:

$$u_i = \frac{\partial x^k}{\partial x^i} u_k; \quad (14)$$

$$u^i = \frac{dx^i}{dx^k} u^k. \quad (15)$$

**Основной вывод** заключается в том, что в D-пространстве скорость света не обязательно должна входить в уравнения движения.

#### Литература

1. Курнышев Б.С. Плотность электрического заряда. // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2013. – №3.
2. Курнышев Б.С. Идентификация и управление в нанотехнологиях. // Сборник трудов МНТК «Состояние и перспективы развития электро и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). – 2015.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров; пер. с англ. / под ред. И.Г. Арамановича, А.М. Березмана. – М.: Наука. 1973.

*Курнышев Борис Сергеевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: bor403@yandex.ru

*Якубенко Александр Валерьевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
тел. 8-915-810-8372

*Хангулиев Агабаба Хангулу оглы,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
тел. 8-915-844-8966

УДК 530.1(075.8)

Б.С. КУРНЫШЕВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: bor403@yandex.ru

## Идентификация и управление в нанотехнологиях

**Аннотация.** Показано, что в нанотехнологиях время является физическим объектом. Время математически может быть представлено тензорным полем, ни при каких условиях не может обратиться в нуль, то есть исчезнуть бесследно. Этот факт представляет собой основной закон сохранения.

**Ключевые слова:** нанотехнология, идентификация, тензоры.



Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: bor403@yandex.ru

### Identification and regulation in nanotechnology

**Abstract.** It is shown that in nanotechnology the time is a physical object. Time mathematically may be represented by a tensor field, under any circumstances can not be zero, that is, to disappear without a trace. This fact is a basic law of conservation.

**Key words:** nanotechnology, identification, tensors.

При небольшой средней скорости свободных наночастиц их ускорение огромно даже в слабых электрических полях. Действительно, масса  $m$  и заряд  $q$  наночастиц порядка как у протонов. В поле с напряжённостью  $E=U/d$  ( $U$  – разность потенциалов (В) на расстоянии  $d$ , мм) ускорение  $a=qE/m$ . При  $q \approx 10^{-19}$  Кл,  $U = 1$  В,  $d = 1$  мм и  $m \approx 10^{-27}$  кг имеем  $a \approx 10^{11}$  м·с<sup>-2</sup> – по порядку величины.

В силу принципа эквивалентности общей теории относительности в неинерциальных системах отсчёта (СО), связанных с наночастицами, при таких ускорениях происходит многократное замедление хода времени, т.е.  $\Delta t \geq \Delta t_n$  ( $\Delta t$  – интервал «собственного» времени в инерциальных СО, с;  $\Delta t_n$  – интервал «собственного» времени в неинерциальных СО, с). Вместе с тем, движение наночастиц является процессом физическим и, следовательно, не зависит от СО. Поэтому уравнения динамики наночастиц, которые можно было бы использовать в задачах идентификации и управления, должны иметь соответствующую инвариантную структуру. По сути, нужно выявить физическую причину замедления хода времени в неинерциальных СО.

В основу положены обычные формулы для определения производной и дифференциала, но применительно к функции вида  $t=f(t_n)$ .

Согласно определению производной, первая производная функции  $f(t_n)$  по  $t_n$  в момент времени  $t_n$  есть предел:

$$\lim_{\Delta t_n \rightarrow 0} \frac{f(t_n + \Delta t_n) - f(t_n)}{\Delta t_n} \equiv \lim_{\Delta t_n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta t_n} \equiv \frac{dt}{dt_n} \equiv f'(t_n). \quad (1)$$

Производная  $\frac{dt}{dt_n} \equiv f'(t_n)$  есть мера скорости изменения  $t$  относительно  $t_n$ , причём, заметим, всегда выполняется неравенство  $f'(t_n) \geq 1$ .

В соответствии с определением дифференциала, функция  $t=f(t_n)$  имеет в момент времени  $t_n$  (первый) дифференциал, если её приращение в этот момент может быть представлено в виде:

$$\Delta t \equiv f(t_n + dt_n) - f(t_n) = A dt_n + o(dt_n), \quad (2)$$

где  $A$  не зависит от  $dt_n$ . В этом случае (первым) дифференциалом функции  $t = f(t_n)$ , по определению, называется **главная линейная часть** приращения функции  $dt = A dt_n$ . Функция  $t = f(t_n)$  имеет в момент времени  $t_n$  дифференциал в том и только в том случае, если она имеет в этой точке (первую) производную; её дифференциал равен  $dt \equiv df = \frac{dt}{dt_n} dt_n \equiv f'(t_n) dt_n$ . Так что

$$\Delta t \equiv f(t_n + dt_n) - f(t_n) = f'(t_n) dt_n + o(dt_n) = dt + o(dt_n). \quad (3)$$

Реальное пространство анизотропно, и его можно рассматривать как непрерывное четырёхмерное динамическое многообразие систем отсчёта с неограниченной величиной ускорений в любых направлениях. Такое многообразие будем называть, для краткости,  $D$ -пространством. Преобразования в  $D$ -пространстве устанавливают связь только бесконечно близких областей: одна область преобразуется в другую, бесконечно близкую, подобно пространству картановского типа.

В  $D$ -пространстве время  $t$  есть функция  $t = f(t_n^0, t_n^1, t_n^2, t_n^3)$  переменных  $t_n^0, t_n^1, t_n^2, t_n^3$ ; частные производные

$$u_0 = \frac{\partial t}{\partial t_n^0}, u_1 = \frac{\partial t}{\partial t_n^1}, u_2 = \frac{\partial t}{\partial t_n^2}, u_3 = \frac{\partial t}{\partial t_n^3} \quad (4)$$

являются компонентами ( $u_k$ ) ковариантного вектора  $u_k e^k$  ( $e^k$  – локальная система базисных векторов в  $D$ -пространстве).

Согласно определению дифференциала функции нескольких переменных, функция  $t = f(t_n^0, t_n^1, t_n^2, t_n^3)$  имеет в момент времени  $(t_n^0, t_n^1, t_n^2, t_n^3)$  (**первый**) **дифференциал (полный дифференциал)**, если её приращение в этот момент может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} \Delta t &\equiv f(t_n^0 + dt_n^0, t_n^1 + dt_n^1, t_n^2 + dt_n^2, t_n^3 + dt_n^3) - f(t_n^0, t_n^1, t_n^2, t_n^3) = \\ &= A_0 dt_n^0 + A_1 dt_n^1 + A_2 dt_n^2 + A_3 dt_n^3 + o(\rho), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $A_0, A_1, A_2, A_3$  и  $\rho = \sqrt{(dt_n^0)^2 + (dt_n^1)^2 + (dt_n^2)^2 + (dt_n^3)^2}$  не зависят от  $dt_n^0, dt_n^1, dt_n^2, dt_n^3$ .

Дифференциалом (первым, полным дифференциалом) функции  $t = f(t_n^0, t_n^1, t_n^2, t_n^3)$  является **главная линейная часть** приращения (5), то есть с учётом (4):

$$Dt \equiv Df = \sum_{k=0}^{k=3} \frac{\partial t}{\partial t_n^k} dt_n^k = \sum_{k=0}^{k=3} u_k dt_n^k \equiv u_k dt_n^k. \quad (6)$$

Компоненты  $u_k$  контравариантного вектора  $u^k \mathbf{e}_k$  определяются как  $u^k = \frac{dt_n^k}{dt_n}$ . Тогда  $Dt = \sqrt{u_{ik} u^{ik}} dt_n$  ( $u_{ik} = u_i u_k = g_{ik} + \omega_{ik} = G_{ik}$  – метрический тензор ( $g_{ik}$  – симметричная, а  $\omega_{ik}$  – антисимметричная составляющие тензора  $G_{ik}$ );  $u^{ik} = u^i u^k = w^{ik} + v^{ik}$  ( $w^{ik}$  – симметричная, а  $v^{ik}$  – антисимметричная составляющие тензора  $u^{ik}$ )). Асимметричность тензоров  $G_{ik}$  и  $u^{ik}$  обусловлена анизотропией D-пространства.

Функция  $\Phi = u_{ik} u^{ik} \equiv g_{ik} w^{ik} + \omega_{ik} v^{ik}$  есть абсолютный скаляр в D-пространстве. Варьирование

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (-Dt) = \delta \int_{t_1}^{t_2} (-\sqrt{\Phi} dt_n) = 0 \quad (7)$$

между моментами времени  $t_1$  и  $t_2$  прямой мировой линии, которое физически означает различные перемещения по траекториям в неинерциальных СО, даёт уравнения движения

$$\frac{Du_i}{dt_n} = \frac{du_i}{dt_n} - \Gamma_{ik}^j u_j u^k - \frac{1}{2} S_{ik,j} u^i u^k = S_{ik,j} u^i u^k + I_{ik} u^k \quad (8)$$

и объясняет физическую причину замедления хода времени в неинерциальных СО возникновением в них наблюдаемых тензорных полей

$$S_{ik,j} = \frac{\partial \omega_{jk}}{\partial t_n^i} - \frac{\partial \omega_{ki}}{\partial t_n^j} + \frac{\partial \omega_{ij}}{\partial t_n^k}, \quad I_{ik} = \frac{\partial u_k}{\partial t_n^i} - \frac{\partial u_i}{\partial t_n^k}. \quad (9)$$

Здесь  $Du_i/dt_n$  – ковариантная производная в D-пространстве,  $S_{ik,j}$  – тензор кручения,  $I_{ik}$  – тензор инерции,  $\Gamma_{ik}^j$  – символы Кристоффеля (имеют размерность угловой скорости, т.к. определены через переменные  $dt_n^0, dt_n^1, dt_n^2, dt_n^3$ , имеющие размерность времени).

**Основной вывод** состоит в том, что полный дифференциал  $Dt$  является физическим объектом, который ни при каких условиях и нигде не может обратиться в нуль, то есть исчезнуть бесследно. Этот факт представляет собой основной закон сохранения (времени) и математически может быть кратко выражен безразмерным неравенством

$$\Phi \geq 1, \quad (10)$$

которое означает принципиальную неуничтожимость абсолютного скаляра  $\Phi = \Phi(t_n^0, t_n^1, t_n^2, t_n^3)$  и, следовательно, времени.

*Курнышев Борис Сергеевич,*  
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: bor403@yandex.ru

УДК 677: 681.062.83

В.Ф. ГЛАЗУНОВ, д.т.н., профессор,  
А.В. ПРУДНОВ, к.т.н., доцент,  
М.А. СОЛОМАНИЧЕВ, старший преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: solm@drive.ispu.ru, sma24sma@yandex.ru

### **Управление вытяжкой полотна в системе электропривода непрерывного агрегата**

**Аннотация.** Показана зависимость вытяжки ткани в системе поточной линии при стабилизации его на входах зон обработки. Разработаны структурные схемы систем электроприводов, обеспечивающих управление вытяжкой ткани в зависимости от ее плотности.

**Ключевые слова:** ткань, вытяжка, электропривод.

V.F. GLAZUNOV, Doctor of Engineering, professor,  
A.V. PRUDNOV, Candidate of Engineering, docent,  
M.A. SOLOMANICHEV, senior Teacher

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: solm@drive.ispu.ru, sma24sma@yandex.ru

### **A fabric stretching control on continuous plant electric drive system**

**Abstract.** A fabric stretching on the production line system with stabilization of operating regions' inputs has been shown. Electric drive systems' structures which provide control of fabric stretching depending on its density are developed.

**Key words:** fabric, stretching, electric drive.

Одним из важных экономических показателей производства и технологических показателей готовой ткани является ее бытовая усадка, величина которой зависит от вытяжки, получаемой полотном в процессе его непрерывной обработки на поточных линиях. Величина вытяжки существенно зависит от импульса действующего натяжения, создаваемого разностью скоростей транспортирующих полотно валковых пар и действующих на него сил сосредоточенного и распределенного трения [1].

В многовалковых технологических зонах обработки ткани стабилизация ее натяжения не обеспечивает стабилизацию вытяжки, так как за время прохождения через участок регулируемого натяжения ткань не успевает освободиться от вязкой составляющей деформации, которая непрерывно накапливается при последовательном прохождении полотном зон деформации, в которых действуют технологические возмущения (рис. 1).

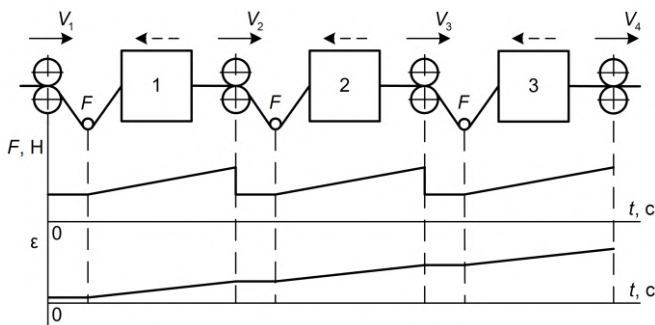


Рис. 1. Эпюры натяжений  $F$  и вытяжки  $\epsilon$  в зонах обработки поточного объекта:  
1–3 – зоны обработки ткани

Таким образом стабилизировать вытяжку ткани возможно установкой устройств, компенсирующих указанные возмущения. Это могут быть локальные системы электроприводов направляющих роликов, построенные на базе моментных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, регулируемых в функции натяжения полотна на выходе зоны обработки [1].

В качестве недостатка традиционного способа существующих систем стабилизации натяжения ткани в поточных линиях необходимо отметить их невозможность обеспечить заданную вытяжку в условиях действующих вариаций вязкоупругих свойств ткани, обусловленных сменой кусков, из которых сшивается партионными или кусковыми швами непрерывное полотно. При этом реакция системы стабилизации натяжения направлена на изменение соотношения скоростей смежных с зоной деформации электроприводов, а, следовательно, и вытяжки полотна. Таким образом, полотно, имеющее большую плотность и модуль упругости, будет иметь большее натяжение и система ведомого электропривода, обеспечивая его стабилизацию, уменьшит вытяжку полотна, а менее плотное еще больше растянется.

Система стабилизации вытяжки обычно строится на основе информации о длине материала на входе и выходе зоны деформации, снимаемой с импульсных датчиков [2]. В этом случае (рис. 2) натяжение полотна задается сигналом, снимаемым с выхода измерителя вытяжки. При этом система стабилизирует вытяжку полотна независимо от его

плотности и упругих свойств, которые изменяются в связи с формированием непрерывного полотна из кусков разной плотности.

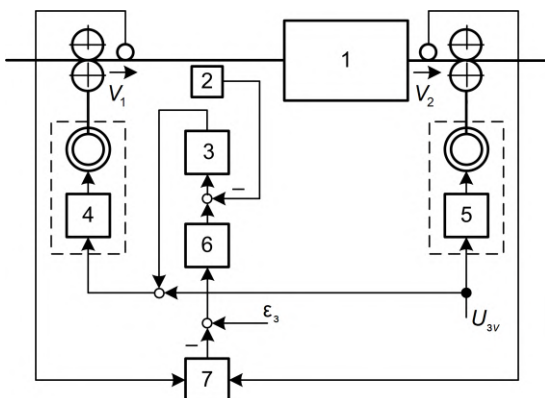


Рис. 2. Функциональная схема системы электропривода, регулирующей вытяжку полотна:

1 – технологическая зона обработки полотна; 2, 3 – соответственно датчик и регулятор натяжения полотна; 4, 5 – соответственно силовые преобразователи ведомого и ведущего электроприводов; 6, 7 – соответственно регулятор и измеритель вытяжки полотна

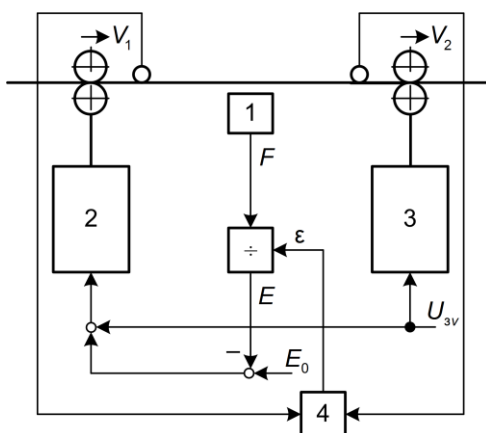


Рис. 3. Функциональная схема системы электропривода для регулирования вытяжки полотна в функции плотности его кусков:

1 – датчик натяжения  $F$  полотна; 2, 3 – соответственно ведомый и ведущий электроприводы; 4 – измеритель вытяжки  $\epsilon$  полотна

Как правило, система электропривода в этом случае строится на принципах подчиненного регулирования с контурами стабилизации тока и скорости электродвигателя, натяжения и вытяжки. Однако такой принцип построения не учитывает разное значение плотности кусков ткани. При этом куски полотна, имеющие большую плотность, будут создавать в зоне деформации большее натяжение, что вызовет при заданном значении вытяжки уменьшение натяжения и увеличение плотности.

На рис. 3 представлена функциональная схема системы электропривода, обеспечивающая регулирование вытяжки в зависимости от плотности кусков полотна.

Здесь сигнал  $\epsilon$ , снимаемый с измерителя вытяжки 4, используется для вычисления модуля упругости полотна  $E$ , сравниваемого с заданным значением  $E_0$ . Сигнал ошибки  $(E_0 - E)$ , учитывающий отклонение жесткости полотна, изменяет скорость  $V_1$ , регулируя вытяжку в зависимости от его плотности.

#### Литература

1. Глазунов В.Ф., Прокушев С.В. Автоматизация оборудования для непрерывной обработки текстильных материалов. – Иваново: ИГЭУ. 2002. – 348 с.
2. Тарарыкин С.В., Глазунов В.Ф., Бурков А.П. Построение систем автоматического управления вытяжкой ткани при ее обработке в машинах отделочного производства. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1983. – №5. – С. 75-79.

*Глазунов Виктор Федорович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: glazunov@drive.ispu.ru

*Пруднов Алексей Васильевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: prnatalie@yandex.ru

*Соломаничев Михаил Александрович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: solm@drive.ispu.ru, sma24sma@yandex.ru

УДК 62-83:004

В.Ф. ГЛАЗУНОВ, д.т.н., профессор,

В.Т. ФИЛИЧЕВ, к.т.н., профессор,

П.В. ВИЛКОВ к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: wpw@drive.ispu.ru

### **Моделирование влияния уплотняющего вала на электропривод механизма сновального вала**

**Аннотация.** Показаны построение и результаты моделирования действия уплотняющего вала в системе электропривода механизма сновального вала.

**Ключевые слова:** электропривод, сновальный вал, уплотняющий вал.

V.F. GLAZUNOV, Doctor of Engineering, professor,  
V.T. FILICHEV, Candidate of Engineering, professor,  
P.V. VILKOV, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: [wpw@drive.ispu.ru](mailto:wpw@drive.ispu.ru)

## Modelling of a condensing shaft influence on the electric drive of a warping shaft the mechanism

**Abstract.** This article deals with construction and results of a condensing shaft action modelling in system of a warping shaft the mechanism electric drive.

**Key words:** electric drive, warping shaft, condensing shaft.

Процесс снования представляет собой начальную стадию приготовления ткацкого навоя. Целью процесса снования является формирование сновальных валов с заданными длиной наматываемой основы и конечным радиусом намотки, а также ее плотностью, что позволяет исключить угары пряжи в процессе шлихтования.

Формирование сновальных валов предусматривает перематку нитей основы с бобин шпулярика с помощью регулируемого электропривода, обеспечивающего стабилизацию линейной скорости снования, существенно влияющей на натяжение нитей.

С целью обеспечения необходимой плотности намотки в качестве регулирующей координаты используется давление на нее уплотняющего вала, перемещаемого в функции разности теоретического, вычисляемого в соответствии с архимедовой спиралью, и реального радиусов [1, 2].

Регулирующее воздействие уплотняющего вала на намотку влияет на натяжение нитей основы в зоне контакта уплотняющего вала и тела намотки, а также на статический момент электродвигателя сновального вала, который зависит от давления уплотняющего вала, радиуса сновального вала, ширины зоны контакта валов и их длины.

Представленная на рис. 1 структурная схема электропривода постоянного тока механизма сновального вала построена на принципе подчиненного регулирования координат с ПИ-регулятором линейной скорости (PV), П-регулятором частоты вращения вала двигателя (PC) и ПИ-регулятором тока, настроенным на модульный оптимум.

На рис. 1:  $R_0$ ,  $R_p$  – начальный и текущий радиусы намотки, м;  $J$  – приведенный к валу двигателя момент инерции сновального вала, кг·м<sup>2</sup>;  $i$  – передаточное отношение редуктора;  $v_p$  – линейная скорость основы, м/с;  $k_v=1/v_p$ ;  $E_0$  – модуль упругости основы, приведенный к ее ширине, Н/м;  $F_0$  – суммарное натяжение нитей, создаваемое натяжными прибо-



рами, Н;  $T_c = L/v_p$  ( $L = \sum_{i=1}^i L_i$  – длина основы от шпулярика до сновального вала, м ( $N$  – число нитей основы));  $M_{yb}$  – момент на валу электродвигателя сновального вала от действия уплотняющего вала, Н·м;  $\alpha$  – параметр спирали Архимеда.

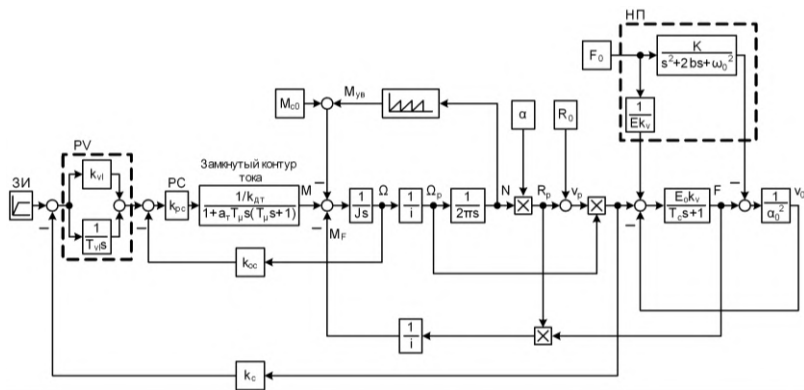


Рис. 1. Структурная схема системы электропривода механизма уплотняющего вала

Передаточная функция контура тока имеет вид:

$$H_T(s) = \frac{1/k_{дт}}{1+a_t T_{\mu} s(T_{\mu} s+1)}, \quad (1)$$

где  $k_{дт}$  – коэффициент усиления датчика тока, В/А;  $T_{\mu}$  – некомпенсируемая постоянная контура тока, с.

Линейная скорость движения основы на выходе нитенатяжных приборов (НП) [3]

$$v_0 = \frac{1}{\alpha_0^2} \left( F - \frac{F_0 K}{s^2 + 2bs + \omega_0^2} \right), \quad (2)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент, определяемый настройкой НП;  $K$ ,  $b$ ,  $\omega_0$  – коэффициенты передачи, демпфирования и собственная частота колебаний НП.

Момент на валу электродвигателя включает приведенные к его валу момент холостого хода машины  $M_{co}$ , момент сопротивления от натя-

жения основы при намотке  $M_F$  и циклическую составляющую момента  $M_{ув}$ , вызванного отводом уплотняющего вала в процессе намотки рулона. Момент сопротивления от натяжения основы зависит от радиуса намотки рулона  $R_p$  и натяжения  $F_0$  на входе НП, а также сил трения нитей основы о направляющие машины.

Зона деформации основы представлена аperiodическим звеном с передаточной функцией  $E_0 k_v / (T_c s + 1)$ , связывающей операторные изображения рассогласования скорости основы на периферии сновального вала  $v_p$  и средней скорости  $v_0$  на выходе натяжных приборов.

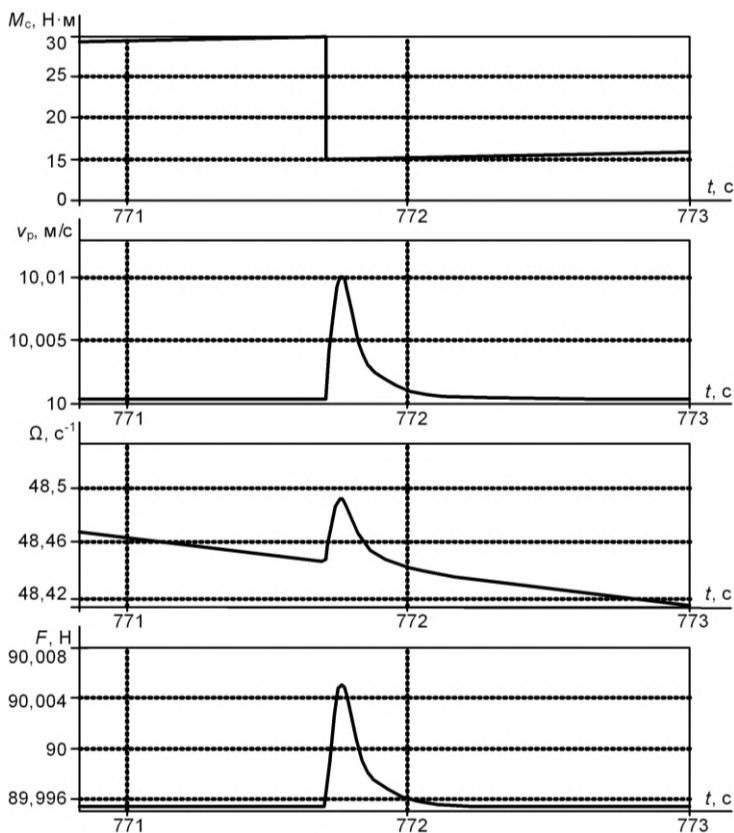


Рис. 2. Зависимости момента сопротивления, скорости намотки, скорости вращения двигателя и натяжения при действии уплотняющего вала

Для параметров системы регулирования ( $t_{зи} = 15$  с;  $k_{vi} = 0,15$ ;  $T_{vi} = 0,23$  с;  $k_{pc} = 320$ ;  $J = 2,7 \div 18,5$  кг·м<sup>2</sup>;  $R_0 = 0,12$  м;  $R_p = 0,355$  м;  $i = 1,2$ ;  $\alpha = 19,5 \cdot 10^{-6}$  м/об;  $\alpha_0 = 0,1$ ;  $E_0 = 2 \cdot 10^{-4}$  Н/м;  $b = 0,5$ ;  $K = 1$ ;  $\omega_0 = 1$ ;  $F_0 = 80$  Н;  $L = 4$  м;  $v_p = 10$  м/с;  $T_c = 0,4$  с;  $k_v = 0,1$  с/м;  $k_{дт} = 0,11$  В/А;  $a_T = 2$ ;  $T_p = 0,01$  с) на рис. 2 представлены полученные методом математического моделирования переходные процессы  $M_c(t)$ ,  $v_p(t)$ ,  $\Omega(t)$  и  $F(t)$ , показывающие кратковременные отклонения в динамике скорости движения основы и ее натяжения при отводе уплотняющего вала, отрицательно влияющие на обрывность нитей.

### Литература

1. **Кутын А.Ю.** Проектирование текстильных паковок рулонного типа и методы их воспроизводства. – Иваново: НПЦ «Стимул». 2006. – 210 с.
2. **Глазунов В.Ф.**, Виноградов А.Б., Шишков К.С. Асинхронный электропривод механизма формирования сновальных валов. // Вестник ИГЭУ. – Иваново. – 2011. – №1.– С. 83-87.
3. **Новоселов К.М.** Математические модели системы упругой заправки нити на сновальной машине. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. – №2. – С. 34-37.

*Глазунов Виктор Федорович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: glazunov@drive.ispu.ru

*Филичев Владимир Трофимович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vtfilichev@mail.ru

*Вилков Павел Вячеславович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: wpw@drive.ispu.ru

## СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.313

А.С. КОБЕЛЕВ, к.т.н., начальник расчетно-теоретического сектора

ПАО «НИПТИЭМ»  
600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1  
*E-mail: kobelevas@ec.vemp.ru*

### **Выбор рационального числа полюсов тяговых асинхронных двигателей при условии постоянства температуры обмотки статора в квазиноминальной точке тяговой характеристики**

**Аннотация.** Приведены результаты анализа эффективности конструкции тяговых асинхронных электродвигателей с разным числом полюсов. В электромагнитных и тепловых расчетах применялось авторское программное обеспечение. При оптимизации учитывался способ управления машиной в составе электропривода.

**Ключевые слова:** тяговый асинхронный двигатель, автоматизированный электропривод, оптимизация, электромагнитные и тепловые расчеты.

A.S. KOBELLEV, Ph.D., head of the settlement and the theoretical sector

Research Design and Technology Institute of Electrical Engineering of "NIPTIEM"  
600009, Vladimir, ul. Electrozavodskaya, d. 1. *E-mail: kobelevas@ec.vemp.ru*

### **The choice of a rational number of poles traction induction motors provided constant temperature in the stator winding kvazinominalnoy point traction characteristics**

**Abstract.** The results of the analysis of the effectiveness of the design of traction induction motors with different number of poles. In the electromagnetic and thermal calculations applied authoring software. Taken into account in the optimization method of controlling the machine as part of the drive.

**Keywords:** traction induction motor, automated electric, optimization, electromagnetic and thermal calculations.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных конструкции тяговых асинхронных электродвигателей (ТАЭД) и их поведению в составе электропривода, вопросам оптимизации активных частей ТАЭД уделено неоправданно мало внимания. В отличие от общепромышленного АЭД, при оптимизации активных частей которого заданы мощность, число полюсов  $2p$  и увязка, для тягового двигателя входными данными являются тяговая характеристика, приблизительные габаритные размеры, ограничения по значениям номинального и

кратковременного тока ПЧ, и максимального напряжения  $U_{\text{ДС}}$ . Очевидно, последние два фактора влияют не на конфигурацию зубцовой зоны, а лишь на обмоточные данные. Таким образом, параметр  $2p$  входит в состав варьируемых переменных.

Отдельные рекомендации по выбору числа полюсов для ТАЭД можно найти еще в [1]. Из современных публикаций следует назвать [2]. Авторы [1] рассматривают классическую компоновку АЭД, в то время как Д.Б. Изосимов [2] и его последователи являются апологетами многополюсной бубликообразной конструкции.

Анализ показывает, что задача выбора рационального числа полюсов ТАЭД многофакторна. Эффективное значение  $2p$  зависит от:

- вида тяговой характеристики  $M=f(N)$ , а именно от длины зоны  $P=\text{const}$ ; частоты вращения двигателя  $N_{ch}$  в точке перехода от зоны  $M=\text{const}$  к  $P=\text{const}$  (данную точку назовем квазиноминальной);
- вида тяговой характеристики  $M_{\text{max}}=f(N)$ , где  $M_{\text{max}}$  – кратковременный максимальный момент;
- требований к энергоэффективности ТАЭД;
- мощности  $P_{ch}$ ;
- системы охлаждения ТАЭД;
- свойств примененных активных и изоляционных материалов;
- значимости для ЛПР таких параметров как объем  $V_{act}=D_{as}^2 \cdot L_s$ , стоимость  $C_{act}$  и масса  $G_{act}$  активных частей.

Дискуссионным является вопрос о влиянии на рациональное число полюсов ТАЭД алгоритмов частотного управления.

Нетривиальной задачей является методология сравнения различных вариантов ТАЭД. Автор полагает, что наиболее удобно проводить сравнение двигателей с различным  $2p$  при условии постоянства превышения температуры обмотки статора  $\theta_{cu}$  в квазиноминальной точке тяговой характеристики. Тем самым  $\theta_{cu}$  изымается как из лимитеров, так и из критериев оптимизации.

Критерии, формирующие фронт Парето–оптимальных решений:

- норму по КПД  $\eta_{av}$ , близкую к предложенной в проекте ИЕС 60034-30-2, а так же норму по  $\theta_{cu_{av}}$  в этих же точках, см. формулу ниже;

- упомянутые  $V_{act}$ ,  $G_{act}$  и  $C_{act}$ . В таблице критерии затенены.

$$\eta_{av}=0,125 \cdot \eta_{N_{ch}0,25}+0,15 \cdot \eta_{N_{ch}0,5}+0,15 \cdot \eta_{N_{ch}0,75}+0,15 \cdot \eta_{N_{ch}1}+0,15 \cdot \eta_{N_{ch}1,5}+0,15 \cdot \eta_{N_{ch}2}+0,125 \cdot \eta_{N_{ch}3,5},$$

где  $\eta_{N_{ch}0,25}$  означает КПД в точке тяговой характеристики  $N=0,25N_{ch}$ .

В рассмотрение примем двигатели мощностью 55 и 110 кВт; в обоих случаях  $N_{ch}=1500$  об/мин. Протяженность второй зоны регулирования для данной работы составляет  $3,5 \cdot N_{ch}$ , что в нашей классификации является зоной «средней протяженности». Таким образом, топологически тяговые характеристики исследуемых ТАЭД будут иметь вид,

представленный на рисунке. Для обеспечения статической устойчивости в конце второй зоны  $N_{Je}$  величина  $M_{max} \approx 1,3M_{Je}$ .

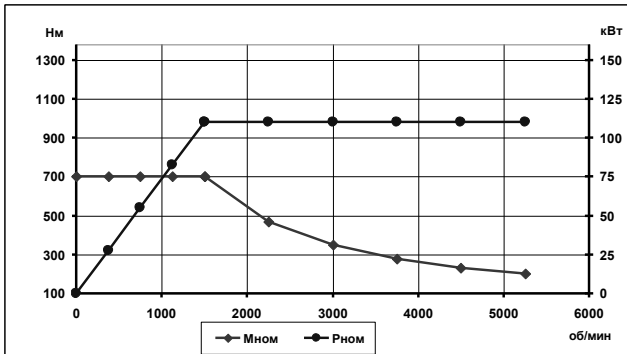


Рис. 1. Тяговые характеристики ТАЭД,  $P_{ch}=110$  кВт; длительный режим

Интенсивность охлаждения примем равной интенсивности охлаждения закрытого АЭД с независимой вентиляцией и расходом воздуха, равным расходу при IC411 для частоты вращения 1500 об/мин.

В качестве способа частотного управления, обеспечивающего тяговые характеристики, принят вариант, реализующий минимум тока статора  $I_s$ . Заметим, что этот способ близок, но не идентичен варианту обеспечения максимального КПД; алгоритм  $I_s \rightarrow I_{smin}$  так же близок к обеспечению минимума  $\theta_{Cu}$ . Максимальная величина фазного напряжения  $U_{\phi}=320$  В.

Обмотка насыпная, двухслойная. Для повышения надежности двухсторонняя изоляция провода принималась 0,15 мм. Витки обмотки подбирались реальными,  $K_{\text{наз}} < 0,79$ ; т.е. расчеты в этом контексте имеют дискретность, и решения приемлемы для непосредственного практического использования. Геометрия листов статора была оптимизирована в рамках создания серии 7AVE [3]. Листы ротора спроектированы на принципах [4]. Клетка ротора выполняется из алюминиевого сплава.

В этой работе принято значение  $\theta_{Cu}=90$  °С, по нашей классификации «малое», что характерно для ТАЭД с нежесткими требованиями к  $V_{act}$ , но с высокими требованиями к энергоэффективности.

В рассмотрение принимались  $2p=4, 6, 8, 12, 18$ .

В электромагнитных и тепловых расчетах применялось авторское программное обеспечение, основанное на известных нормалях ОСТ.16–0.801.302–85 и РД 310–86.

Основные результаты расчетов сведены в таблицу.

Таблица.

$P_{ch}$	$2p$	Сталь	$\eta_{av}$	$\Theta_{cu,av}$	$L_s$	$L_{\Sigma}$	$V_{act}$	$G_{act}$	$C_{act}$	$B_{\delta, ch}$	$U_{\phi, ch}$	$I_{Ib}$	$I_{ch}$	$I_{Ile}$
кВт	–	–	%	°С	мм	мм	дм <sup>3</sup>	кг	о.е.	Тл	В	А	А	А
110	4	2212	94,3	80,3	260	475	62,4	320	114	0,8	320	128	131	137
		2212	94,8	66,3	290	505	69,3	352	123	0,773	320	126	130	134
	6	2212	94,8	72,2	310	520	74,4	337	120	0,773	320	143	143	135
	8	2212	94,3	69	310	503	74,4	323	114	0,767	320	157	156	146
		2412	94,8	69,3	260	453	62,4	273	110	0,814	310	167	162	145
	12	2412	94,1	70,5	310	494	74,4	280	121	0,7	278	215	211	164
18	2412	93,3	82,1	325	505	78	256	129	0,586	227	308	301	188	
55	6	2212	92,2	72,7	240	403	32,5	153	51,4	0,815	309	83,7	79,3	71,3
		2412	92,3	78,5	230	393	31,2	146	54,5	0,79	307	83,7	78,7	73

Дополнительными контролируемыми величинами, указанными в таблице, являются:

- магнитная индукция в воздушном зазоре  $B_{\delta, ch}$  в точке  $N_{ch}$ ;
- активная длина сердечника статора  $L_s$  и суммарная активная длина, включающая  $L_s$  и двусторонний вылет обмоток;
- фазное напряжение  $U_{\phi, ch}$  в точке  $N_{ch}$ ;
- величины  $I_{Ib}$ ,  $I_{ch}$ ,  $I_{Ile}$  токов в начале первой зоны, в точке  $N_{ch}$  и конце второй зоны регулирования.

Стоимость активных материалов выражается в о.е.; 1 о.е. равна стоимости обмоточной меди на текущий период.  $C_{2412}/C_{2212}=1,24$ .

Для ТАЭД с  $P_{ch}=55$  кВт  $D_{as}=368$  мм; ТАЭД с  $P_{ch}=110$  кВт  $D_{as}=490$  мм.

Расчет проводился для вариантов с магнитопроводами как из стали 2212, так и из стали 2412. При  $2p>8$  для стали 2212, в виду высоких удельных потерь и большой частоты питающего напряжения, варианты являются неэффективными и не помещены в таблицу.

Для ТАЭД с  $P_{ch}=55$  кВт, в рамках принятых к рассмотрению факторов, близкими к оптимальному являются варианты, представленные в таблице. Для ТАЭД с  $P_{ch}=110$  кВт представлен более развернутый анализ. Все варианты – недоминируемые, т.е. Парето-оптимальные. Автор сознательно на этом этапе не вводит коэффициенты значимости, но, как ЛПР, выбирает вариант  $2p=8$ ,  $L_s=260$  мм; сталь 2412.

Обратим внимание на неэффективность варианта  $P_{ch}=110$  кВт,  $2p=18$ . При этом, согласно рекомендациям [2], активная геометрия выполнялась с увеличенным количеством зубцов:  $Z_S=108$ ,  $Z_R=98$ . Отметим также, что, несмотря на удовлетворительное значение  $\Theta_{cu,av}=82,1$  °С, значение  $\Theta_{cu, ch}=109,7$  °С (приведение к  $\Theta_{cu, ch}\approx 90$  °С в данном варианте существенно увеличивает  $G_{act}$ ).

### Выводы.

1. Кластеризация технических требований в соответствии с факторами, изложенными в докладе, позволит создать универсальное множество решений, определяющих активную геометрию ТАЭД. На

базе этих решений целесообразно спроектировать первую отечественную серию ТАЭД средней мощности.

2. Выводы [2] о безусловной эффективности бубликообразной конструкции ТАЭД с высоким значением  $Z_S$  и  $Z_R$  не подтверждаются. Эти машины имеют худшие энергетические показатели. Ожидаемое преимущество – снижение массы ТАЭД на счет бубликообразной конструкции незначительно.

3. ТАЭД с большим числом полюсов имеют небольшие преимущества во второй зоне регулирования, что следует учитывать при выборе электродвигателя для соответствующих применений.

#### Литература

1. **Степанов А. Д.** Электрические передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов. / А. Д. Степанов, В. И. Андерс, В. А. Пречисский, Ю. И. Гусевский - М.: Транспорт, 1982. - 254 с.
2. **Изосимов Д. Б.** Некоторые особенности проектирования тяговых асинхронных двигателей Ч. 1 / Д. Б. Изосимов // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 36а–43.
3. **Беспалов В. Я.** Разработка и освоение производства энергоэффективных асинхронных двигателей массовых серий / В. Я. Беспалов, А. С. Кобелев, О. В. Кругликов, Л. Н. Макаров // Электротехника. – 2015. – № 4.
4. **Кобелев А. С.** Применение кластерного анализа в многопоточном проектировании активных частей асинхронных электродвигателей / А. С. Кобелев // Электротехника. – 2015. – № 3. – С. 8–15.

*Кобелев Андрей Степанович*

ОАО «НИПТИЭМ», кандидат технических наук, начальник расчетно-теоретического сектора  
e-mail: kobelevas@ec.vemp.ru

УДК 621.313

А. В. ЗАХАРОВ, к. т. н., вед. специалист.

Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический  
институт электромашиностроения ОАО «НИПТИЭМ»  
600009, г. Владимир, ул. Электрозаводская, д. 1  
E-mail: zaharovav@ec.vemp.ru

## Перспективы технического применения синхронных электродвигателей с анизотропной магнитной проводимостью ротора

**Аннотация.** Дан анализ перспектив производства синхронных двигателей с анизотропной магнитной проводимостью ротора, проведено сравнение их характеристик с аналогичными показателями асинхронных электродвигателей.

**Ключевые слова:** синхронный электродвигатель с анизотропной магнитной проводимостью, асинхронный электродвигатель.



A.V. ZAKHAROV, Ph.D., a leading expert

Research Design and Technology Institute of Electrical Engineering of "NIPTIEM"  
600009, Vladimir, ul. Electrozavodskaya, d. 1. E-mail: zaharovav@ec.vemp.ru

## Prospects for the technical application of synchronous motors with anisotropic conductive magnetic rotor

**Abstract.** The analysis of the prospects for the production of synchronous motors with anisotropic conductive magnetic rotor, a comparison of their characteristics with those of induction motors.

**Keywords:** synchronous motor with magnetic anisotropic conductive induction motor.

В последнее время наблюдается повышенный интерес различных производителей к синхронным электродвигателям с анизотропной магнитной проводимостью (СД с АМПР), другое название синхронно-реактивные двигатели. Зарубежное название - Synchronous Reluctance Motor. Ряд производителей выпустило каталоги данных машин широкой номенклатуры ВОВ 160-315мм. Основным конкурентным преимуществом таких двигателей является высокий к.п.д., который соответствует уровню энергоэффективности IE4 [1].

С точки зрения производителя электрических машин, синхронно-реактивные двигатели интересны унифицированным с асинхронным двигателем сердечником статора и классической обмоткой переменного тока с  $q > 1$ . Ротор синхронно-реактивного двигателя может выполняться на основе двух технологий: продольной шихтовки пакета ротора (ALA - Axially Laminated Anisotropic) и поперечной шихтовки пакета ротора с немагнитными барьерами (TLA - Transversally Laminated Anisotropic). Производство роторов ALA типа трудоемко, требует сборки с чередованием пластин из электротехнической стали с пластинами из немагнитных материалов. Изготовление роторов TLA типа технологично, но требует применения точного штампового оборудования.

ОАО «НИПТИЭМ», в рамках ряда договоров, начало проводить НИР и ОКР по разработке синхронных двигателей с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Для нас представляют интерес следующие вопросы, ответы на которые планируется получить в работе:

1. Сравнительный анализ основных энергетических показателей СД с АМПР и асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (АЭД). Диапазон габаритов и полюстностей, на котором СД с АМПР превосходят (уступают) АЭД.

2. Качественный вид скоростных характеристик (нагрузочных, перегрузочных, токовых) СД с АМПР и их соотношение с аналогичными характеристиками АЭД. Способы увеличения диапазона регулирования вверх от номинальной частоты вращения для СД с АМПР.

3. Сравнительный анализ основных энергетических характеристик СД с АМПР с различными типами роторов (ALA, TLA). Качественные оценки влияния технологических ограничений на энергетические характеристики.

4. Сравнительные характеристики прочности роторов СД с АМПР в различных вариантах и АЭД. Перспективы использования СД с АМПР в высокоскоростных приложениях.

В начале был спроектирован СД с АМПР и TLA ротором и проведено сравнение его характеристик с аналогичными показателями АЭД.

В качестве примера в табл. 1 приведены данные полученные при проектировании электродвигателя 110кВт, 1000об/мин для двух вариантов конструкции (TLA ротор, вариант 1 3 барьера + вырез, вариант 2 4 барьера без выреза). Для анализа технического уровня предложенных вариантов СД с АМПР таблица дополнена аналогичными показателями, рассчитанными для эквивалентного асинхронного двигателя, спроектированного на основе пазово-зубцовой геометрии от общепромышленного электродвигателя вариант 1 и двигателя с теми же габаритами, но однофазным ротором с медной клеткой. Габариты, сердечник статора, обмоточные данные для всех машин одинаковы.

Таблица 1. Основные показатели АЭД и СД с АМПР

№ п/п	Параметр	АЭД вариант 1	АЭД вариант 2	СД с АМПР вариант 1	СД с АМПР вариант 2
1	$P_2$ , кВт	110	110	110	110
2	$M$ , Нм	1058	1055	1050	1050
3	$n$ , об/мин	993	995	1000	1000
4	$U$ , В	335	335	328	327
5	$I$ , А	218	213	262	263
6	к.п.д., %	95,3	95,7	96,0	96,0
7	$\cos\phi$	0,90	0,93	0,77	0,77
8	$K_M$	3,0	3,6	2	2
9	$p_{CU1}$ , Вт	1506	1500	1615	1620
10	$p_{CU2}$ , Вт	812	570	0	0
11	$p_{FE}$ , Вт	1810	1810	2290	2280
12	$B_{Z1}$ , Тл	1,44	1,44	1,6	1,6
13	$Da_1$ , мм	530	530	530	530
14	$L_1$ , мм	390	390	390	390
15	$m_{CU1}$ , кг	79	79 / 96	79	79
16	$m_{AL}$ , кг	34	0	0	0
17	$m_{FE}$ , кг	414	414	407	407

**Примечание:**  $P_2$  – выходная мощность,  $M$  – номинальный момент,  $n$  – частота вращения,  $U$  – номинальное значение линейного напряжения,  $I$  – номинальное значение линейного тока,  $K_M$  – кратность максимального момента относительно номинального,  $p_{CU1}$  – потери в обмотке статора в номинальном режиме,  $p_{CU2}$  – потери в обмотке ротора в номинальном режиме,  $p_{FE}$  – потери в сердечнике статора в номинальном режиме,  $B_{Z1}$  – амплитуда магнитной индукции в зубцах статора,  $Da_1$  – внешний диаметр статора,  $L_1$  – длина пакетов статора и ротора,  $m_{CU1}$  – масса обмотки статора (медь),  $m_{AL}$  – масса обмотки ротора (алюминий),  $m_{FE}$  – масса сердечников ротора и статора.

Анализ результатов расчета показал:

1. К.п.д. синхронных электродвигателей с анизотропной проводимостью ротора выше, чем у асинхронного электродвигателя, за счет отсутствия потерь в обмотке ротора. Снижение потерь в АЭД за счет применения медной клетки ротора не позволяет превзойти СД с АМПР по к.п.д.

2. Потери в обмотке статора синхронно-реактивного двигателя незначительно выше потерь в обмотке асинхронной машины за счет более высокого значения тока статора. Магнитные потери СД и АМПР существенно выше потерь АЭД, следовательно, наибольшие перспективы у машин невысоких габаритов до ВОВ 250мм.

3. Синхронно-реактивные двигатели имеют существенно меньшую, кратность максимального момента, чем АЭД. Максимальный момент обеспечивается в основном за счет запаса по напряжению.

В процессе разработки вариантов было замечено существенное влияние вспомогательных элементов магнитной системы ротора (ребер, перемычек) определяющихся уровнем технологии производства на энергетические характеристики СД с АМПР. Существенной особенностью характеристик синхронно-реактивного двигателя, в сравнении с показателями асинхронных машин, является повышенный уровень пульсаций момента. Величина пульсаций момента зависит от соотношения протяженности выреза ротора и зубцового деления статора и толщины перемычек ротора. Уменьшение перемычек ротора отделяющих воздушный зазор от воздушного барьера повышает не только энергетические характеристики машины, но и пульсации момента.

#### **Основные выводы:**

1. Синхронные двигатели с анизотропной магнитной проводимостью ротора являются перспективным типом электромеханического преобразования энергии. Однако, в настоящее время количество информации в данной области существенно уступает объему известного в области машин других типов: асинхронных, синхронных, вентильно-индукторных.

2. Корректное сравнение характеристик СД с АМПР и АЭД возможно только при их сопоставлении, полученном в составе частотно-регулируемого электропривода. Учитывая высокое значение тока статора характерное для синхронно-реактивного двигателя это сравнение, не имеет однозначных результатов.

В настоящее время ОАО «НИПТИЭМ» изготавливает образцов СД с АМПР на мощности 20, 110, 500 кВт на которых планируется оценить перспективы их использования в проектах, отладить технологию производства.

#### **Литература**

1. **Технический** каталог АBB 9АКК105828 EN 06-2013. Low voltage IE4 synchronous reluctance motor and drive package for pump and fan applications.

*Захаров Алексей Вадимович*

ОАО «НИПТИЭМ», кандидат технических наук, ведущий специалист,  
e-mail: zaharovav@ec.vemp.ru

621.313.3

Ю.В. ЗУБКОВ, к.т.н., доцент;  
Ю.Н. КУЗНЕЦОВА, студентка

Самарский государственный техниче́й университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244 ,  
*E-mail: zub577@mail.ru*

### **Определение параметров и коэффициента рассеяния магнитной системы синхронного генератора с магнитоэлектрическим возбуждением**

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы расчета синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов. Расчет опирается на результаты моделирования магнитного поля методом конечных элементов. По итогам моделирования магнитного поля с использованием гармонического анализа определены параметры электрической машины.

**Ключевые слова:** синхронный генератор с магнитоэлектрическим возбуждением, параметры электрических машин, метод конечных элементов.

YU.V.ZUBKOV, Ph.D., associate professor; YU.N.KUZNETSOVA, student

Samara State Technical University  
Russia, 443100, Samara, ul.Molodogvardeyskaya, d. 244, *E-mail: zub577@mail.ru*

### **Determination of the parameters and the scattering coefficient of the magnetic system of the synchronous generator with magnesium-toelektricheskim excitation**

**Abstract.** The problems of calculation of the synchronous generator with permanent magnet excitation. The calculation is based on results of magnetic field simulation by the finite element. According to the results of modeling the magnetic field using harmonic analysis identified parameters of the electrical machine.

**Keywords:** synchronous generator with magneto-excitation parameters of electrical machines, finite element method.

Одним из радикальных путей повышения надежности, расширения функциональных возможностей и улучшения общих характеристик электрических машин является отказ от использования щеточных электрических контактов и переход к бесконтактным электрическим машинам. Бесконтактные синхронные генераторы и двигатели применяются в случаях, когда обслуживание щеточного устройства затруднено и требуется высокая надежность машины в течение длительной эксплуатации в тяжелых условиях. Такие генераторы используются, например, в железнодорожном, авиационном и автомобильном транспорте.

При разработке синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов возникает необходимость расчета реактивностей машины с учетом реальной геометрии и насыщения магнитной системы при различных температурных условиях эксплуатации.

Основой расчета является кривая размагничивания постоянного магнита (ПМ) и его линия возврата. Поскольку в данной конструкции используются высококоэрцитивные магниты NdFeB N38H, имеющие линейную кривую размагничивания, полагаем ее совпадающей с линией возврата. Вид кривых размагничивания и параметры ПМ существенно зависят от рабочей температуры. На начальном этапе расчета полагаем рабочую температуру равной  $80^{\circ}\text{C}$ , что согласуется с классом изоляции. Посредством справочной информации установлены параметры магнита при этих условиях:

Коэрцитивная сила,  $H_c = 750 \text{ кА/м}$ , остаточная индукция,  $B_r = 1,16 \text{ Тл}$ .

На рис.1 показан фрагмент магнитной системы генератора.

Обмотка якоря имеет следующие параметры: число пазов  $z = 54$ , число пар полюсов  $p = 6$ , число фаз  $m = 3$ , число пазов на полюси фазу

$q = 1\frac{1}{2}$ , шаг по пазам  $y = 4$  – укороченный.

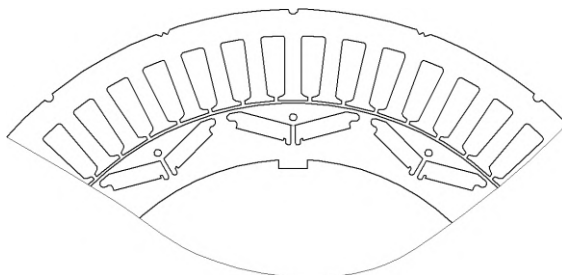


Рис.1. Магнитная система генератора

С целью определения рабочей точки магнита на кривой размагничивания при известной геометрии активной зоны СГ, методом конечных элементов осуществлен расчет магнитного поля СГ. Решение данной задачи позволило определить индукцию  $B_{\delta}$  и магнитный поток  $\Phi_{\delta}$  в воздушном зазоре. Кроме этого по картине магнитного поля при холостом ходе найден коэффициент рассеяния ПМ  $k_{\sigma} = \frac{\Phi_M}{\Phi_{\delta}}$ , где  $\Phi_M$

- магнитный поток в нейтральном сечении магнита.

На рис. 2 показана картина магнитного поля генератора в режиме холостого хода и кривая распределения нормальной составляющей магнитной индукции на середине воздушного зазора.

По итогам моделирования магнитного поля с использованием гармонического анализа определены следующие параметры:

- магнитный поток в воздушном зазоре  $\Phi_{\delta 0}=0,00623$  Вб;
- магнитный поток в нейтральном сечении магнита  $\Phi_M=0,00834$  Вб;
- коэффициент рассеяния магнитов  $K_{\sigma}=\Phi_M/\Phi_{\delta 0}=1,338$ ;
- максимальное значение магнитной индукции в зазоре  $B_{\delta m 0}=0,679$  Тл;
- основная гармоническая индукции в зазоре  $B_{\delta m 0 1}=0,77$  Тл;
- первая гармоническая магнитного потока в зазоре  $\Phi_{\delta 0 1}=0,00621$  Вб;
- коэффициент насыщения магнитной цепи  $K_{\mu}=(F_{\delta}+F_{ст})/F_{\delta}=847/808=1,048$

Эти данные являются отправной точкой электромагнитного расчета.

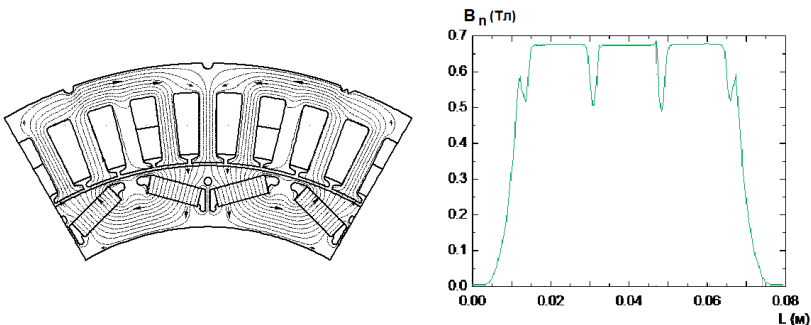


Рис. 2. Результаты моделирования при холостом ходе

Для определения влияния реакции якоря на поле постоянных магнитов (возбуждения) было осуществлено моделирование магнитного поля якоря при продольном (когда магнитная ось фазы обмотки якоря совпадает с осью поля ПМ) и поперечном (ось фазы совпадает с поперечной осью поля возбуждения) положении индуктора.

Из картины поля при совпадении магнитных осей ротора и обмотки статора (продольная ось «d» совпадает с осью фазы А-Х) определено значение ненасыщенного синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси  $X_{ad}=E_{ad}/I_d=111,6/12,76=8,75$  Ом. При совпадении поперечной оси ротора и оси обмотки статора (поперечная ось q совпадает с осью фазы А-Х) определено ненасыщенное синхрон-

ное индуктивное сопротивление по поперечной оси  $X_{aq} = E_{aq} / I_q = 208,3 / 12,76 = 16,33$  Ом. При моделировании ток в фазе А равен максимальному относительному значению  $I_A = I_m = 1$ , токи в фазах В и С  $I_B = I_C = -\sqrt{3}/2$ .

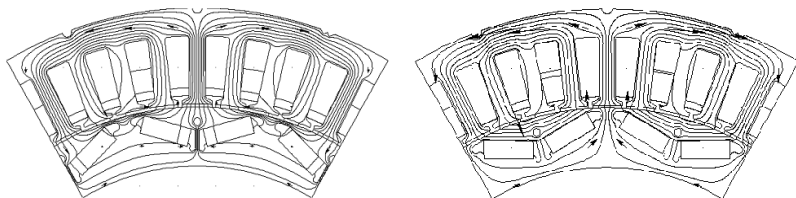


Рис. 3. Картина магнитного поля продольной и поперечной реакции якоря

Из анализа результатов расчета, очевидно, что в отличие от синхронных явнополюсных машин с электромагнитным возбуждением соотношение между индуктивными сопротивлениями реакции якоря по продольной и поперечной осям в магнитоэлектрическом генераторе противоположное. Это объясняется замыканием продольного потока по пути с большим магнитным сопротивлением.

### Литература

1. **Высоцкий В.Е., Зубков Ю.В., Тулупов П.В.** Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентильных электрических машин.- М: Энергоатомиздат, 2007. – 340 с.
2. **Бут Д.А.** Бесконтактные электрические машины.- М.:Высшая школа, 1985.- 208с.

*Зубков Ю.В.*

Самарский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент  
E-mail: zub577@mail.ru

*Кузнецова Ю.Н.*

Самарский государственный технический университет, студентка  
E-mail: zub577@mail.ru

УДК 621.313.33

А.Ю. КАРСАКОВ зав. лабораторией  
П.Ю. ГРАЧЕВ д.т.н., профессор  
Е.Е. ГОРБАЧЕВ аспирант

Самарский государственный технический университет, филиал в г. Сызрани  
446001, г. Сызрань, ул. Советская, 45  
*Email: andrey-karsakov@mail.ru*

## **Перспективные электротехнологии в электромеханической части микро-ГЭС**

**Аннотация.** Приведен анализ перспективных путей развития технологий производства таких агрегатов с генераторами переменного тока, позволяющие снизить их металлоемкость и увеличить коэффициент полезного действия.

**Ключевые слова:** автономные автоматизированные микро-ГЭС, электротехнологии, электрические генераторы.

A.Y. KARSAKOV, head. laboratory; P.Y. GRACHEV, Prof.;  
E.E. GORBACHEV, graduate student

Samara State Technical University, branch in Syzran  
446001, Syzran, st. Soviet, 45. *Email: andrey-karsakov@mail.ru*

## **Prospective electrotechnology electromechanical part in micro-hydro power plant**

**Abstract:** The analysis of the promising ways to develop technologies for production of such units with alternators that reduce their metal content and increase efficiency.

**Keywords:** self-contained automated micro-hydro, electrotechnology, electrical generators.

Развитие альтернативной энергетики достаточно объемная и особенно актуальная для нашей страны задача. Одним из перспективных направлений её решения является использование энергии небольших водотоков с помощью недорогих автономных микро-ГЭС малой и средней мощности. Широкие возможности регулирования напора воды в гидроагрегатах позволяют использовать простые системы генерирования электроэнергии требуемого качества. Современные достижения в области электромашиностроения, силовой и микроэлектроники - основа создания недорогих и надёжных автономных автоматизированных микро-ГЭС с высокой степенью автоматизации рабочих и аварийных режимов. Такие ГЭС позволяют получить электроэнергию хорошего качества при не высоких требованиях к гидродвигателю [1].

Конкуренция в области поставок отдельных узлов и комплектов для объектов альтернативной энергетики требует создания конкурентоспособных энергоэффективных электромеханических агрегатов



отечественного производства для микро-ГЭС малой и средней мощности. В статье представлены перспективные пути развития технологий производства таких агрегатов с генераторами переменного тока, позволяющие снизить их металлоемкость и увеличить коэффициент полезного действия.

Известные методики выбора генераторов для гидроагрегатов предусматривают возможность их выполнения на базе синхронных или асинхронных машин. Достоинства синхронных машин в том, что они не требуют дополнительных источников реактивной мощности, которые, в случае асинхронных машин, представляют собой батареи конденсаторов или вентильные источники реактивной мощности. Альтернативой могут быть гидроагрегаты с разнотипными электрическими машинами: синхронным генератором и асинхронным – с короткозамкнутым ротором. В этом случае синхронный генератор является источником реактивной мощности для асинхронного генератора и нагрузок индуктивного характера.

Перспективность использования асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором в автономных микро-ГЭС связана с тем, что короткозамкнутый ротор хорошо вписывается в интегрированные конструкции прямоточных гидроагрегатов, в которых он располагается непосредственно над лопастями гидротурбин. Это снижает металлоемкость гидроагрегатов. Выполнение источников реактивной мощности для асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором в виде вентильных преобразователей со звеном постоянного тока (по схеме автономного инвертора напряжения) позволяет подключить к микро-ГЭС накопители электроэнергии постоянного тока, дополнительные источники постоянного тока на солнечных элементах, водородных топливных элементах и т.п. [2]. Это повышает мощность и надежность систем электроснабжения с микро-ГЭС.

К снижению металлоемкости приводит и применение в электро-механической части микро-ГЭС, асинхронных и синхронных генераторов с переменным сечением проводников обмоток статора и неравномерным распределением плотности тока в этих проводниках [3].

При изготовлении таких обмоток необходимо применять двухслойные волновые стержневые обмотки. Обычно они включают стержни, расположенные в верхней части пазов сердечника, образующие верхний слой обмотки, стержни, расположенные в нижней части пазов сердечника, образующие нижний слой обмотки и проводники лобовых частей, расположенные по торцам сердечника. При этом стержни и проводники лобовых частей представляют собой витки с постоянным прямоугольным сечением провода. Проводники лобовых частей включают: проводники между стержнями каждого из витков, объединенных в витковые группы, проводники для соединения витковых групп, а также проводники выводов фаз обмотки. Лобовые части обмоток являются

жесткими. Вылет таких лобовых частей достаточно велик, что приводит к повышенным электрическим потерям и увеличенному расходу меди.

Обмотка электрической машины с переменным сечением проводников, защищенная патентом [4], также включает стержни, расположенные в верхних и нижних частях пазов сердечника. Однако проводники лобовых частей этой обмотки, расположены непосредственно над торцевыми поверхностями сердечника и выполнены в виде лобовых перемычек. Они включают и витковые перемычки и перемычки для соединения витковых групп. Площади сечения лобовых перемычек, по крайней мере большинства из них, в местах соединения со стержнями вдвое меньше усредненных по длине паза площадей поперечных сечений соединяемых стержней, причем, места соединений, лобовых перемычек со стержнями верхнего слоя обмотки расположены со стороны зубцовой поверхности сердечника, а места соединений, лобовых перемычек со стержнями нижнего слоя обмотки расположены со стороны спинки (ярма) сердечника. Такое соединение лобовых перемычек позволяет освободить место для размещения основных частей витковых перемычек над центральными частями торцевых поверхностей пазовой зоны и, таким образом, соединить стержни витков обмотки короткими проводниками. Вылет лобовых частей обмотки уменьшается в несколько раз. Экономится медь и конструктивные материалы. Однако технология изготовления обмоток существенно меняется.

В патенте [4] предложено выполнять лобовые части обмотки в виде колец.

Для соединения этих колец, или отдельных лобовых перемычек [5], со стержнями обмотки можно применять различные электротехнологии.

Представляется перспективной технология соединения проводящих поверхностей колец лобовых перемычек с торцевыми поверхностями стержней с помощью токопроводящей пасты. При этом необходима жесткая фиксация колец лобовых перемычек относительно сердечника статора, встроенного в прямоточный водовод гидроагрегата микро-ГЭС.

Другой перспективной технологией является метод сварки медных торцевых поверхностей проводников обмотки статора гидрогенератора в защитной среде азота. Этот метод в настоящее время является наиболее доступным и надежным.

Менее отработанной, имеющей инновационный характер, является новая технология соединения поверхностей проводников гидрогенератора – так называемая «наносварка». Она заключается в нагреве металлической (например, серебряной) нити минимальной толщины (нано припой), которая находится в контакте с соединяемыми поверхностями. Припой плавится и обволакивает торцы проводников обмотки, образуя прочное соединение с низким сопротивлением.

Тип электротехнологии нужно учитывать в электромагнитном и тепловом расчетах рассматриваемых гидрогенераторов.

Таким образом, разработка и исследование гидрогенераторов с обмотками с переменным сечением проводников для микро-ГЭС, при изготовлении которых используются перспективные электротехнологии, позволит существенно уменьшить металлоемкость и объем электромеханической части микро-ГЭС. Также уменьшаются активные сопротивления обмоток, снижаются потери в меди и растет коэффициент полезного действия генераторов.

Максимальная эффективность достигается при интегрировании гидрогенераторов с вентилями источников реактивной мощности, подобно [6].

#### Литература

1. **Свит П.П.** Разработка микро-ГЭС с асинхронными генераторами для сельскохозяйственных потребителей: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.20.02) / Свит Павел Петрович; Алтайский гос. тех. ун-т им И.И. Ползунова. – Барнаул, 2007. – С. 3-4.
2. **Горбачев Е.Е., Грачев П.Ю.** Автономные источники возобновляемой энергии в электроснабжении фермерских хозяйств России. Труды Кольского НЦ РАН «Энергетика», вып. 3, 2011. – С. 219-224.
3. **Грачев П.Ю., Карсаков А.Ю.** Энергосберегающие электрические машины с переменным сечением проводников обмоток // Федоровские чтения – 2013. Материалы XLIII МНПК, ноябрь 2013.: М., МЭИ. – С. 54-57.
4. Патент 2275729 РФ. Обмотка электрической машины / П.Ю. Грачев, Ф.Н. Сарapultов, Е.В. Ежова. – Бюл. №12, 27.04.2006.
5. Патент 2526835 РФ, МПК H02P 9/48. Энергоэффективная электрическая машина / П.Ю. Грачев, Е.Е. Горбачев. – Бюл. №23, 27.08.2014.
6. **Грачев П.Ю., Горбачев Е.Е.** Энергоэффективная электрическая машина переменного тока со встроенной системой управления и защиты // Перспективные системы и задачи управления: Материалы Седьмой Всероссийской науч.-практ. конф. – Таганрог, 2012. – С.191-196.

*Карсаков А.Ю.*

Самарский государственный технический университет, филиал в г. Сызрани, заведующий лабораторией, e-mail: andrey-karsakov@mail.ru

*Грачев П.Ю.*

Самарский государственный технический университет, филиал в г. Сызрани, доктор технических наук, профессор, e-mail: andrey-karsakov@mail.ru

*Горбачев Е.Е.*

Самарский государственный технический университет, филиал в г. Сызрани, аспирант e-mail: andrey-karsakov@mail.ru

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
1533003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: shishkin@emf.ispu.ru

## К расчету асинхронных двигателей с экранированными полюсами

**Аннотация.** Используя теорию двух круговых вращающихся в разные стороны магнитных полей: «прямого» и «обратного», получены формулы ЭДС и токов обмоток двигателя с экранированными полюсами.

**Ключевые слова:** экранированные полюса, вращающиеся магнитные поля, уравнения токов

### To calculation of asynchronous engines with screened poles

**Summary.** Using the theory of two circular magnetic fields rotating in different directions: "direct" and "return", formulas of EMF and currents of windings of the engine with screened poles are received.

**Keywords:** screened poles, the rotating magnetic fields, the equations of currents

Асинхронные двигатели с экранированными полюсами широко применяются в приводах, не требующих больших пусковых моментов, например, вентиляторах, кондиционерах, проигрывателях и других установках. Мощности двигателей составляют от долей ватта до нескольких сотен ватт.

Характерной особенностью двигателя являются явно выраженные полюсы и сосредоточенная обмотка возбуждения. Примерно треть полюса охватывается короткозамкнутым витком из толстой медной или алюминиевой шины.

При питании обмотки возбуждения переменным током возникает пульсирующий магнитный поток, часть которого проходит мимо витка, а другая часть заходит в виток. В результате в двигателе возникают два потока сдвинутых в пространстве (угол  $\theta$ ) и во времени (угол  $\beta$ ) (рис. 1), чего достаточно для образования вращающегося магнитного поля. Поскольку углы не равны 90 градусам, поле в двигателе будет вращающимся эллиптическим.

Применим для анализа рабочего процесса в данном двигателе теорию двух круговых вращающихся в противоположные стороны магнитодвижущих сил: «прямой» и «обратной».

Так для обмотки возбуждения эти МДС будут:

$$\bar{F}_{11} = \frac{0,9k_{w1}w_1}{2p} \dot{I}_1; \quad \bar{F}_{12} = \frac{0,9k_{w1}w_1}{2p} \dot{I}_1.$$

Поскольку МДС обмоток статора сдвинуты в пространстве и во времени, амплитуды вращающихся МДС витка, ориентированные относительно оси обмотки возбуждения, будут:

$$\bar{F}_{31} = \frac{0,9k_{w3}w_3}{2p} \dot{I}_3 e^{j(\theta+\beta)}; \quad \bar{F}_{32} = \frac{0,9k_{w3}w_3}{2p} \dot{I}_3 e^{j(\theta-\beta)}.$$

Амплитуды вращающихся МДС ротора от «прямого» и «обратного» токов в его обмотке, ориентированные относительно оси обмотки возбуждения, соответственно будут:

$$\bar{F}_{21} = \frac{0,9m_2k_{w2}w_2}{2p} \dot{I}_{21}; \quad \bar{F}_{22} = \frac{0,9m_2k_{w2}w_2}{2p} \dot{I}_{22},$$

Амплитуды результирующих вращающихся МДС, создаваемые всеми токами, приведенными к обмотке возбуждения, будут:

$$\bar{F}_{01} = \bar{F}_{11} + \bar{F}'_{31} + \bar{F}'_{21} = \frac{0,9k_{w1}w_1}{2p} (\dot{I}_1 + \dot{I}'_3 e^{-j(\theta+\beta)} + \dot{I}'_{21});$$

$$\bar{F}_{02} = \bar{F}_{12} + \bar{F}'_{32} + \bar{F}'_{22} = \frac{0,9k_{w1}w_1}{2p} (\dot{I}_1 + \dot{I}'_3 e^{-j(\theta-\beta)} + \dot{I}'_{22}).$$

Амплитуды результирующих прямо и обратно вращающихся потоков (полей) будут:

$$\bar{\Phi}_{01} = \frac{\mu_0 \tau l}{k_\mu k_\delta \delta} \bar{F}_{01}; \quad \bar{\Phi}_{02} = \frac{\mu_0 \tau l}{k_\mu k_\delta \delta} \bar{F}_{02}.$$

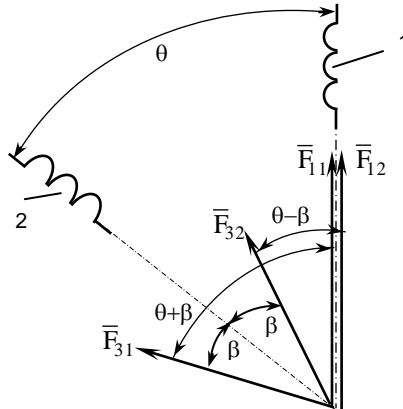


Рис. 1. Векторная диаграмма магнитодвижущих сил статора:  
1 – обмотка возбуждения; 2 – короткозамкнутый виток

Уравнение равновесия ЭДС в обмотке возбуждения

$$\dot{U}_1 = (+j2X_0 + Z_1)\dot{I}_1 + jX_0(e^{j(\theta+\beta)} + e^{j(\theta-\beta)})\dot{I}'_3 + jX_0\dot{I}'_{21} + jX_0\dot{I}'_{22}$$

Уравнение равновесия ЭДС в короткозамкнутом витке

$$0 = -j2X_0\dot{I}_1 - \dot{I}'_3 \left[ jX_0(e^{j(\theta+\beta)} + e^{j(\theta-\beta)}) + Z'_3 \right] - jX_0\dot{I}'_{21} - jX_0\dot{I}'_{22}$$

Уравнение равновесия ЭДС в роторе для прямого и обратного вращающихся полей

$$\begin{aligned} 0 &= \dot{E}'_{21} - \dot{I}'_{21}Z'_{21} = -jX_0\dot{I}_1 - jX_0\dot{I}'_3e^{j(\theta+\beta)} - \dot{I}'_{21}(jX_0 + Z'_{21}) \\ 0 &= \dot{E}'_{22} - \dot{I}'_{22}Z'_{22} = -jX_0\dot{I}_1 - jX_0\dot{I}'_3e^{j(\theta-\beta)} - \dot{I}'_{22}(jX_0 + Z'_{22}) \end{aligned}$$

Матричное уравнение токов

$I_1$	$I'_3$	$I'_{21}$	$I'_{22}$	$U$
$+j2X_0 + Z_1$	$jX_0(e^{j(\theta+\beta)} + e^{j(\theta-\beta)})$	$jX_0$	$jX_0$	$U_1$
$-j2X_0$	$-jX_0(e^{j(\theta+\beta)} + e^{j(\theta-\beta)}) - Z'_3$	$-jX_0$	$-jX_0$	$0$
$-jX_0$	$-jX_0e^{j(\theta+\beta)}$	$-jX_0 - Z'_{21}$	$0$	$0$
$-jX_0$	$-jX_0e^{j(\theta-\beta)}$	$0$	$-jX_0 - Z'_{22}$	$0$

Полученные уравнения позволяют рассчитать токи в обмотках, моменты и рабочие характеристики двигателя.

#### Литература

1. **Ермолин Н.П.** Электрические машины малой мощности. – М.: Высш. школа. 1967.

*Шишкин Валерий Павлович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
e-mail: shishkin@emf.ispu.ru

УДК 621.333

Ю.Б. КАЗАКОВ, д.т.н., профессор;  
И.А. ПАЛИЛОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: elmash@em.ispu.ru*

### **Исследование взаимосвязанных электромеханических процессов в системе асинхронный двигатель – генератор с общим валом**

**Аннотация.** Разработана модель, позволяющая корректно моделировать две взаимосвязанные общим валом асинхронные машины, исследовать статические и динамические режимы работы машин, взаимосвязанные электромагнитные поля и электромеханические процессы в них.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, асинхронный генератор, полевая модель

YU. B. KAZAKOV, doctor of science  
I. A. PALILOV, postgraduate student

Ivanovo State Power University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya, 34. *E-mail: elmash@em.ispu.ru*

### **The study of related electromechanical processes in the asynchronous motor - generator with a common shaft**

**Abstract.** Developed a model which allows to accurately simulate two interconnected by a common shaft asynchronous machines, to investigate the static and dynamic modes of operation of machinery, interrelated electromagnetic fields and electromechanical processes in them.

**Keywords:** induction motor, induction generator, field model

Для современного транспорта перспективно применение гибридных энергетических установок, включающих двигатель внутреннего сгорания, электрические тяговые генератор и двигатель, преобразователи частоты, позволяющее снизить расход топлива и сократить вредные выбросы.

Испытания тяговых асинхронных машин таких установок желательно проводить в системе двигатель-генератор с рекуперацией энергии, где машины объединены общим валом, а одна из машин работает с преобразователем частоты. В настоящее время моделирование системы трехфазные двигатель-генератор проводится на упрощенных моделях в двухфазной системе координат без учета насыщения, поверхностного эффекта, зубчатости сердечников, несинусоидальности напряжения питания от преобразователей частоты [1].

Корректное моделирование установившихся и динамических процессов в таких системах, особенно с двигателями большой мощности, требует использования взаимосвязанных моделей электрических

машин, работающих на общий вал с взаимоувязкой по электромагнитному моменту. Разработка уточненных взаимосвязанных моделей машин в тяговой системе целесообразна на основе теории электромагнитного поля. Такая модель основывается на решении уравнений электромагнитного поля вида (1) для двух асинхронных машин [2]. Рассмотрение плоскопараллельного поля позволяет перейти к уравнению (1)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right] = \bar{j}_{cm} + \gamma \frac{\partial A}{\partial t} + \gamma (\bar{v} \times \text{rot} A) \quad (1)$$

При применении метода конечных элементов [2] значение индукции и плотности тока в пределах каждого отдельного конечного элемента расчетной области представляются неизменным. Для расчета поля в электрических машинах, необходимо решить систему уравнений, размерность которой равна числу конечных элементов. Задача усложняется тем, что каждый раз при изменении угла поворота ротора меняется геометрия расчетной области и это приводит к необходимости перестраивать сетку конечных элементов. Для упрощения решения уравнения (1), частная производная по времени от векторного магнитного потенциала представляется в конечно-разностной аппроксимацией. Вращение ротора в составе модели учитывается на каждой итерации соответствующим углом поворота ротора, что позволяет одновременно учесть изменение геометрии расчетной области. С этой целью уравнения дополняются уравнением движения ротора  $M_r + M_d = M_c - (J_1 + J_2) \frac{d\omega}{dt}$ , в котором производная от угловой скорости по

времени тоже выражена в конечно-разностном виде.

Значение электромагнитного момента  $M$  можно получить через интегрирование выражения поверхностной плотности электромагнитной силы [2]. Опуская математические выкладки, приведем конечный вид формулы для двух машин можно получить

$$M_{\Sigma} = I_{\text{сГ}} \cdot \iint \left[ \bar{r}_1 \times \left[ \bar{j}_{\text{Г}} \times \bar{B}_{\text{Г}} - \frac{H_{\text{Г}}^2}{2} \text{grad} \mu_{\text{Г}} \right] \right] dS_1 + \dots \\ \dots + I_{\text{сД}} \cdot \iint \left[ \bar{r}_2 \times \left[ \bar{j}_{\text{Д}} \times \bar{B}_{\text{Д}} - \frac{H_{\text{Д}}^2}{2} \text{grad} \mu_{\text{Д}} \right] \right] dS_2$$

где  $\bar{r}_1$  и  $\bar{r}_2$  – радиус-векторы до текущей точки ротора двигателя или генератора. Интегрирование ведется по поверхностям, окружающей ротор соответствующей машины и проходящей через центр зазора.

Решение уравнения поля в частных производных методом конечных элементов на непостоянной сетке сводится к циклическому алгоритму, на каждой итерации которого осуществляется решение уравнений на постоянной в пределах каждой итерации сетке. При



определении токов переходного процесса и учета лобовых сопротивлений обмоток статора и ротора необходимо совместное с полевым

$$\text{решение уравнений баланса напряжений фаз } U(t) = -E(t) + i(t) \cdot r_{\text{л}} + L_{\text{л}} \cdot \frac{di}{dt}.$$

На основе описанного подхода с помощью современных программ моделирования электрических машин разработана взаимоувязанная полевая модель системы асинхронный двигатель - асинхронный генератор с общим валом с учетом локальных насыщений, проявлений поверхностного эффекта, зубчатости сердечников, несинусоидальности напряжения питания от преобразователей частоты (рис. 1).

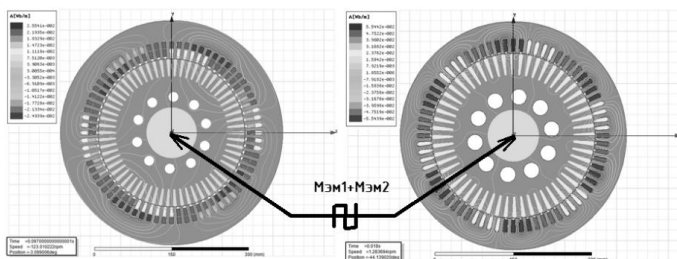


Рис. 1. Взаимоувязанная модель электромагнитных полей в системе асинхронный двигатель - асинхронный генератор с общим валом

Разработанная модель позволяет корректно моделировать две взаимосвязанные общим валом асинхронные машины, исследовать статические и динамические режимы работы машин, взаимоувязанные электромагнитные поля и электромеханические процессы в них. Исследования показывают, что неучет локальных насыщений, проявлений поверхностного эффекта, зубчатости сердечников, несинусоидальности напряжения питания от преобразователей частоты, изменяющихся параметров обмоток может приводить к погрешности расчета электромагнитных величин до 10 %.

*Работа выполнена по контракту №02. G25.31.0049 Минобнауки РФ.*

#### Литература

1. Бейерлейн Е.В. Обоснование применения энергосберегающей схемы испытаний крупных асинхронных электродвигателей // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. - №4. – С. 69-73.
2. Демирчян К.С., Чечурин В. Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. - М.: Высш. шк., 1986. - 240 с

*Казаков Юрий Борисович, ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина», e-mail: elmash@em.ispu.ru*  
*Папилов Илья Аркадьевич, ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина», e-mail: i.pailov@yandex.ru*

УДК 621.313.84

Д.С. КОРНИЛОВ, ассистент;  
Ю.Б. КАЗАКОВ, д.т.н., профессор,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: elmash@em.ispu.ru*

## **Разработка системы проектирования торцевого генератора с постоянными магнитами**

**Аннотация.** Предложен оригинальный алгоритм определения основных размеров торцевого генератора с постоянными магнитами (ТГПМ). Разработана трехмерная конечно-элементная параметрическая модель генератора. Реализован синтез алгоритма проектирования и параметрической модели в единую систему проектирования.

**Ключевые слова:** торцевой генератор, алгоритм проектирования, повелочный электромагнитный расчет.

D.S. KORNILOV assistant,  
Yu.B. KAZAKOV Doctor of Engineering, professor  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: elmash@em.ispu.ru*

## **Design system of the axial-flux permanent magnet generator**

**Abstract.** Calculation of basic dimensions of the axial-flux permanent magnet generator (AFPM generator) by original algorithm is proposed. Three-dimensional finite-element parametric model of the generator is developed. Synthesis of the design algorithm and parametric model in the unified design system is implemented.

**Key words:** axial-flux generator, design algorithm, verifying electromagnetic analysis.

Электрические генераторы торцевой конструкции имеют ряд преимуществ по сравнению с их цилиндрической аналогами: меньшая активная длина якоря, меньшие массы и габаритные размеры, высокая жесткость конструкции и надежность работы подшипниковых узлов благодаря малым аксиальным размерам, благоприятные условия теплоотдачи и охлаждения [1, 2].

Однако в настоящее время в свободном доступе отсутствуют проверенные методики проектирования торцевых генераторов с постоянными магнитами (ТГПМ). Методики проектирования цилиндрических машин малоприменимы для торцевых, поскольку в них связь радиальных и аксиальных размеров принципиально другая. Так, высота ярма и полюса индуктора, высота ярма сердечника якоря, глубина паза (в пазовых машинах) и рабочий зазор в торцевой машине представляют собой аксиальные размеры, тогда как активная длина машины есть радиальный размер. В цилиндрической машине все наоборот. Таким

образом, в торцевой машине осевые размеры сердечников статора и ротора могут выбираться независимо от наружного и внутреннего диаметров торцевого статора [1]. Следовательно, порядок определения основных размеров торцевого генератора должен быть иным.

Исследуемый торцевой генератор с постоянными магнитами предназначен для работы в составе ветроэнергетической установки малой мощности. Якорь (статор) генератора представляет собой витой сердечник с намотанной на поверхности либо уложенной в пазы кольцевой трехфазной обмоткой. На полюс и фазу приходится одна катушка (один паз). Индуктор (ротор) состоит из двух стальных кольцевых магнитопроводов с магнитами, расположенными на поверхности, обращенной к якорю. Намагниченность магнитов аксиальная, чередующаяся.

Предложен новый порядок определения основных размеров ТГПМ, позволяющий проще и быстрее (с минимальным числом итераций) определять геометрию активной части генератора – размеры сердечников статора и ротора, магнитов, обмоток. Его главная особенность заключается в том, что расчет основных размеров генератора начинается с определения внутреннего диаметра якоря исходя из условия размещения внутренних лобовых частей обмотки якоря. На первом этапе проектирования задаются плотностью тока  $J$  в обмотке якоря, индукциями в нейтральном сечении магнита  $B_{M0}$ , в сердечнике якоря  $B_a$  и в сердечнике индуктора  $B_i$ , коэффициентами  $k_e$ ,  $k_f$  и  $k_G$  (коэффициенты эдс, формы поля возбуждения и рассеяния соответственно). Далее определяются размеры внутренней лобовой части катушки фазы якоря, внутренние диаметры сердечников статора и ротора. Далее по рассчитанному значению эдс  $E_\delta$  определяется необходимый поток в зазоре  $\Phi_\delta$  и полный поток магнита  $\Phi_{m0}$ . Зная поток и индукцию в нейтральном сечении магнита, определяют площадь магнита как их отношение, затем находят его радиальный и тангенциальные размеры, а также радиальные размеры сердечников якоря и индуктора. Далее по заданным значениям индукций определяют высоты ярм якоря и индуктора. Далее из расчета магнитной цепи определяют необходимую намагничивающую силу магнита и по ней рассчитывают требуемую высоту магнита. На этом расчет основных размеров генератора закончен, далее необходим поверочный электромагнитный расчет для определения выходных параметров и проверки номинального режима спроектированного генератора.

Один из недостатков торцевых машин – трехмерный характер распределения электромагнитного поля, аналитическое описание которого при значительной сложности всё же не дает требуемой точности. По этой причине торцевые машины длительное время не находили широкого применения. В настоящее время задачи расчета стационарных и нестационарных электромагнитных полей в двух- и трехмерной постановке успешно решаются в специализированном пакете конечно-элементного моделирования "ANSYS Maxwell".

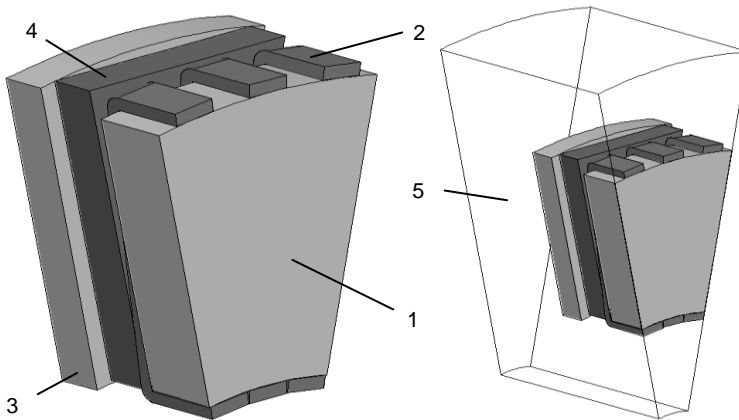


Рис.1. Модель генератора: 1 – магнитопровод статора, 2 – обмотки, 3 – магнитопровод ротора, 4 – постоянный магнит, 5 – воздух

В данном пакете разработана трехмерная параметрическая модель генератора на одном полюсном делении, построенная по 12 исходным линейным размерам и одному безразмерному параметру  $p$  – числу пар полюсов. Также в качестве исходных данных задаются свойства материалов – стали, обмоток и магнита. Модель включает в себя сердечник индуктора с магнитом, половину сердечника якоря с тремя полукатушками фаз обмотки якоря и окружающую область – воздух (рис. 1). Выбор беспазовой конструкции якоря обусловлен рядом причин. Во-первых, в беспазовых машинах с высококоэрцитивными магнитами наиболее эффективно используются свойства этих магнитов – высокое значение коэрцитивной силы, относительно малое значение остаточной индукции и малое значение магнитной проницаемости [3]. Во-вторых, при использовании генератора в ветроэлектрических установках малой мощности необходимо получить минимальный начальный момент страгивания, то есть устранить зубцовые реактивные моменты. В-третьих, при работе на выпрямительную нагрузку беспазовые магнитоэлектрические генераторы имеют наиболее благоприятные параметры, а именно малое индуктивное сопротивление коммутирующего контура  $X_k$  и, как следствие, низкий уровень пульсаций выпрямленного напряжения, меньше длительность коммутации и выше коэффициент использования генератора [4, 5].

Реализован синтез описанного выше оригинального алгоритма проектирования и параметрической модели генератора в единую систему проектирования. Она объединяет предложенный проектный расчет генератора и поверочный электромагнитный расчет на трехмерной модели, позволяющей исследовать как установившиеся, так и переходные режимы генератора в полевой постановке. Модификация

модели, дополненная внешней электрической цепью, позволяет исследовать работу генератора при включении в цепь якоря трехфазной или выпрямительной нагрузки. Задание в качестве вращающего момента генератора аэродинамической характеристики ветроколеса дает возможность исследовать динамические режимы работы ветроустановки в целом.

#### Литература

1. Паластин Л.М. Синхронные машины автономных источников питания. – М.: Энергия, 1980.
2. Gieras J.F. Wang R.J. Kamper M.J. Axial flux permanent magnet brushless machines. – Springer, 2008.
3. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высш.шк., 1990.

*Корнилов Дмитрий Сергеевич,*

ФГБОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина",  
elmash@em.ispu.ru

*Казаков Юрий Борисович,*

ФГБОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина",  
elmash@em.ispu.ru

УДК 621.313

Ю.Б. КАЗАКОВ, д.т.н., профессор;  
Н.К. ШВЕЦОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: elmash@em.ispu.ru

### **Расчет потерь в стали асинхронных двигателей при питании от полигармонических источников напряжения с учетом разделения на вихретоковую и гистерезисную составляющие**

**Аннотация.** Предложена методика расчета потерь в стали асинхронных двигателей, питаемых широтно-импульсно модулированным напряжением, с учетом их разделения на потери на вихревые токи и гистерезис. Методика учитывает размагничивающее действие вихревых токов для высокочастотных гармоник.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, широтно-импульсная модуляция напряжения, дополнительные потери

Yu.B. KAZAKOV Doctor of Engineering, professor  
N.K.SHVETSOV, postgraduate student  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: [elmash@em.ispu.ru](mailto:elmash@em.ispu.ru)

## Core losses estimation in induction motors being supplied by polyharmonic voltage sources with considering of its decomposing into eddy-current and hysteresis components

**Abstract.** The procedure of core losses estimation in induction motors fed by pulse-width modulated voltage, with taking into account of their decomposing into eddy current losses and hysteresis losses components. Calculating procedure takes into account the demagnetization effect of eddy currents for high-frequency harmonics.

**Key words:** induction motor, pulse-width voltage modulation, additional losses.

Существующие методики расчета потерь в стали от высших гармоник, имеющих место при питании асинхронных двигателей (АД) от преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения (ШИМ), основываются либо на усреднении мгновенных значений напряжения на периоде несущей частоты ШИМ [1], либо на упрощенном инженерном подходе определения потерь в стали, который не предполагает разделения потерь в стали на потери на вихревые токи и гистерезис [2]. Предлагаемый подход к расчету потерь в стали предполагает их разделение на составляющие и их расчет для каждой гармоники питающего напряжения. Так как потери на гистерезис пропорциональны первой степени частоты, а потери на вихревые токи увеличиваются пропорционально ее квадрату, то с ростом частоты будет изменяться соотношение между указанными потерями.

Для основных потерь в стали можно записать:

$$P_{\text{ст.осн}} = P_{\Gamma} + P_{\text{вх}} = B_{\text{экв}}^2 \cdot (K_{\Gamma} \cdot f + K_{\text{вх}} \cdot f^2) \cdot (m_{a1} + m_{z1}), \quad (1)$$

где  $B_{\text{экв}}$  – эквивалентная величина магнитной индукции, усредненная по массе зубцов и яра статора;  $K_{\Gamma}$  – коэффициент потерь на гистерезис;  $K_{\text{вх}}$  – коэффициент потерь на вихревые токи;  $m_{a1}$  и  $m_{z1}$  – масса стали яра и зубцов статора, соответственно.

Примем допущение, что коэффициенты  $K_{\Gamma}$  и  $K_{\text{вх}}$  являются постоянными величинами. Эквивалентную усредненную величину магнитной индукции в зубцах и яре статора можно определить как:

$$B_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{B_{a1}^2 \cdot m_{a1} + B_{z1}^2 \cdot m_{z1}}{m_{a1} + m_{z1}}}. \quad (2)$$

где  $B_{a1}$  и  $B_{z1}$  – величины индукции в яре и зубцах статора, соответственно. Коэффициент потерь на вихревые токи можно определить следующим образом [3]:

$$K_{ВХ} = \frac{\pi^2 \cdot d^2}{6\rho_{СТ} \cdot \gamma_{СТ}}, \left[ \frac{Вт}{кг \cdot Тл^2 \cdot Гц^2} \right], \quad (3)$$

где  $d$  – толщина листа стали, м;  $\rho_{СТ}$  – удельное электрическое сопротивление стали, Ом\*м;  $\gamma_{СТ}$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент потерь на гистерезис можно выразить из (1) и (3):

$$K_{Г} = \frac{P_{СТ.ОСН}}{B_{ЭКВ}^2 \cdot f \cdot m_{СТ}} = \frac{\pi^2 \cdot d^2 \cdot f}{6\rho_{СТ} \cdot \gamma_{СТ}} \cdot \left[ \frac{Вт}{кг \cdot Тл^2 \cdot Гц} \right], \quad (4)$$

где  $m_{СТ}$  – суммарная масса стали ярма и зубцов статора.

В предположении, что величина  $B_{ЭКВ}$  прямо пропорциональна  $v$ -ой гармонике индукции в рабочем зазоре АД, можно записать, что

$$B_{ЭКВ} = k_1 \cdot B_{\delta v} = k \cdot \frac{U_v}{4,44 \cdot f_1 \cdot v \cdot w_1 \cdot S_{МАГ} \cdot k_{ОБ1}} = k \cdot \frac{U_v}{f_1 \cdot v}, \quad (5)$$

где  $k_1$  – коэффициент пропорциональности,  $w_1$  – число витков обмотки статора,  $S_{МАГ}$  – площадь сечения магнитопровода на пути основного потока,  $k_{ОБ1}$  – обмоточный коэффициент,  $k = k_1/4,44 \cdot w_1 \cdot S_{МАГ} \cdot k_{ОБ1}$ .

Основные потери в стали от первой гармоники:

$$P_{СТ.ОСН1} = \left( k \frac{U_1}{f_1} \right)^2 \cdot f_1 \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot d^2}{6\rho_{СТ} \cdot \gamma_{СТ}} \cdot f_1 + K_{Г} \right), \quad (6)$$

где  $f_1$  – частота первой гармоники.

Для высших временных гармоник, имеющих высокие частоты, имеет место эффект размагничивающего действия вихревых токов, заключающийся в вытеснении магнитного потока из середины листа стали к его границам [4]. Это приводит к уменьшению потерь от вихревых токов на величину

$$\xi_v = \frac{3\delta_v}{d} \cdot \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{d}{\delta_v}\right) - \sin\left(\frac{d}{\delta_v}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{d}{\delta_v}\right) - \cos\left(\frac{d}{\delta_v}\right)}, \quad (7)$$

где  $\delta_v$  – глубина проникновения электромагнитной волны в лист стали. Для  $v$ -ой гармоники ее можно определить как:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f_1 \cdot v \cdot \mu}}, \quad (8)$$

где  $\mu$  – статическая магнитная проницаемость стали, определенная для первой гармоники индукции. Потери в стали от  $v$ -ой гармоники с учетом размагничивающего действия вихревых токов:

$$P_{\text{ст.осн.v}} = \left( k \frac{U_v}{f_1 \cdot v} \right)^2 \cdot f_1 \cdot v \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot d^2 \cdot \xi_v}{6\rho_{\text{ст}} \cdot \gamma_{\text{ст}}} \cdot f_1 \cdot v + K_{\Gamma} \right). \quad (9)$$

Коэффициент увеличения основных потерь в стали:

$$K_{\text{ст.осн}} = 1 + \sum_{v=5}^{\infty} \frac{P_{\text{ст.осн.v}}}{P_{\text{ст.осн.1}}} = 1 + \sum_{v=5}^{\infty} \left( \frac{U_v}{U_1} \right)^2 \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{\left( \frac{\pi^2 \cdot d^2 \cdot \xi_v}{6\rho_{\text{ст}} \cdot \gamma_{\text{ст}}} \cdot f_1 \cdot v + K_{\Gamma} \right)}{\left( \frac{\pi^2 \cdot d^2}{6\rho_{\text{ст}} \cdot \gamma_{\text{ст}}} \cdot f_1 + K_{\Gamma} \right)} \quad (10)$$

С учетом наличия добавочных потерь, коэффициент суммарного увеличения потерь в стали можно определить как:

$$K_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{ст.осн}} \cdot K_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}}}{P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}}}, \quad (11)$$

где  $P_{\text{ст.доб}}$  – добавочные потери в стали.

Результаты расчетов коэффициентов увеличения потерь в стали тягового АД (170 кВт), питаемого импульсным напряжением различной формы, с числом импульсов на полупериоде основной частоты  $N=10$  и скважностью импульсов  $\gamma=0,542$ , сведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты увеличения потерь в стали при различных формах импульсного питающего напряжения

Форма импульсного напряжения	$K_{\text{ст}}$	
	С учетом разделения потерь	Без учета разделения потерь
С постоянной шириной импульсов	1,124	1,237
С синусоидально изменяющейся шириной импульсов	1,056	1,087
С синусоидально изменяющейся высотой импульсов	1,134	1,219
Двухуровневое импульсное напряжение с постоянной шириной импульсов	1,061	1,121

Предлагаемая методика позволяет учесть изменение соотношения потерь на вихревые токи и гистерезис для каждой гармоники, а так же размагничивающее действие вихревых токов. Учет данных факторов приводит к уменьшению расчетных коэффициентов увеличения потерь в стали до 9,1%.

#### Литература

1. **Браславский И.Я.** Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.



2. **Казаков Ю.Б.** Энергоэффективность работы электродвигателей и трансформаторов при режимных и конструктивных вариациях. – М: Издательский дом МЭИ, 2013. – 152 с.
3. **On the physical basis of power losses in laminated steel and minimum-effort modeling in an industrial design environment / M. Popescu, D. Ionel, A. Boglietti and other // Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. – Conference Record of the 2007 IEEE//.** – New Orleans, LA, 2007. – p. 60 – 66.
4. **Васютинский С.Б.** Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.

*Казаков Юрий Борисович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

*Швецов Николай Константинович*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
e-mail: shvetsov37@gmail.com

УДК.621.313

А.К. ГРОМОВ, к. т. н., профессор;  
А.В. ЛИХАЧЕВА, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: elmash@ispu.ru*

## **Расчетные исследования переходных процессов при пуске асинхронного двигателя**

**Аннотация.** Моделируются переходные процессы при пуске трехфазного асинхронного двигателя. Модель представлена восемью дифференциальными уравнениями; она позволяет анализировать аномальные условия на зажимах машины при пуске.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, пуск, дифференциальные уравнения, аномальные условия.

A.K. GROMOV, Candidate of Engeneereeng, Professor,  
A.V. LIKHACHEV, senior Teacher

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya str., 34. *E-mail: elmash@ispu.ru*

## **Computational studies of induction motor startup transition**

**Abstract.** A three-phase induction motor startup transition has been modeled. The model consisting of eight differential equations allows to analyze abnormal conditions on the motor terminals during startup.

**Keywords:** induction motor, start, differential equations, abnormal conditions.

Изменение режимов работы электромеханической системы сопровождается переходом токов и ЭДС или скоростей и положений к новым значениям, удовлетворяющим новым условиям работы. Этот

переход не может происходить скачкообразно. Возникает переходный процесс, в течение которого указанные величины имеют переходные значения. В переходном периоде токи, ЭДС, скорости в системе могут достигать ненормальных значений, в других случаях система может стать неустойчивой.

Очевидно, что анализ переходных процессов является важной инженерной задачей.

Основная причина переходных процессов в электромеханической системе – существенное изменение кинетической энергии в динамике процесса. Здесь необходимо рассматривать изменения как в электромагнитной, так и в механической частях системы.

Если существует магнитное поле в магнитных материалах, то значения индуктивностей зависят от токов, создающих поле, и являются переменными; система становится нелинейной в физическом смысле.

Естественно стремление получить картину развития переходного процесса во времени, что возможно при моделировании его системой дифференциальных уравнений напряжений всех обмоток и движения вращающихся частей электромеханической системы.

Переходные процессы могут являться аварийными или частью эксплуатационного цикла. Здесь рассматривается в качестве примера эксплуатационный режим – включение в сеть переменного тока и последующий разгон асинхронных двигателей (АД).

Обмотки АД представлены электрическими цепями с сосредоточенными постоянными параметрами. Трехфазная обмотка статора включается в сеть переменного тока, которая может быть несимметричной; условия на зажимах трехфазной обмотки ротора могут быть различными – обмотка короткозамкнутая, к обмотке подключены пассивные элементы  $R, L$ , в том числе различные по фазам; для ротора известен момент инерции  $J$ .

Математическая модель АД в переходных процессах в фазовых координатах ABC в самом общем виде представлена в [1]. Это система, состоящая из восьми нелинейных дифференциальных уравнений, представляет электрические и механические цепи. Результаты решения этой системы приведены на рис. 1 и представляют изменения скорости  $\omega=f(t)$  и  $M_{эм}=f(t)$  электромагнитного момента двигателя 4A250M4 при пуске вхолостую. Параметры двигателя взяты из [2]. На рис.2 приведены результаты расчетного исследования пускового режима указанного АД в ортогональных осях  $\alpha\beta$ , преобразование к которой подробно приведено в [3], при тех же условиях на зажимах, что и в осях ABC статора и abc ротора. Некоторая количественная разница в представленных результатах может быть отнесена к особенностям используемого солвера MATLAB.

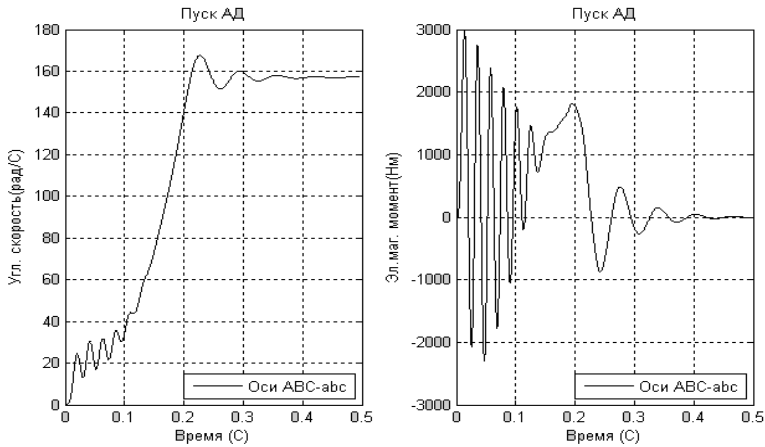


Рис. 1. Результаты решения в системе ABC

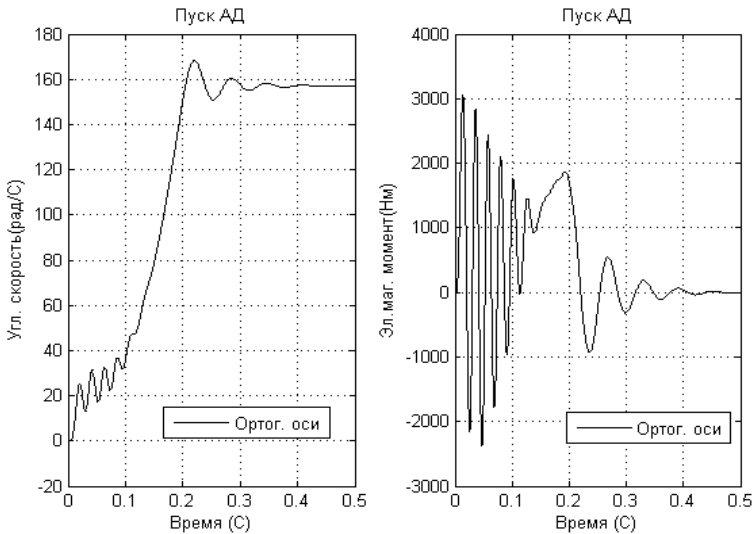


Рис. 2. Результаты решения в системе  $\alpha\beta$

На рис. 3 представлена характеристика  $M=f(t)$  квазиустановившегося режима пуска АД полученная при использовании разработанного расчетного комплекса – решения системы дифференциальных уравнений.

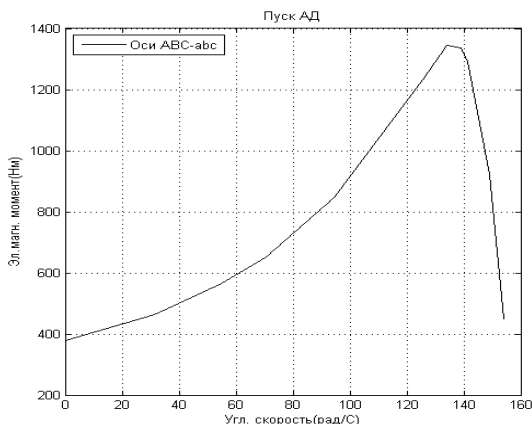


Рис. 3. Расчетная механическая характеристика АД

### Заключение.

1. Реализованы математические модели анализа пуска АД в системах фазных и преобразованных координат; результаты практически совпали.

2. В ряде случаев (симметричные условия на зажимах) предпочтение может быть отдано переменным  $\alpha\beta$ , поскольку решение получается практически мгновенно.

3. Результаты выполненных расчетных исследований могут использоваться в приближенном анализе рассмотренного вида переходных процессов и учебном процессе.

### Литература

1. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины: учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
2. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов по спец. "электрические машины". – М.: Высш.шк., 1987. – 248. с.
3. **Громов А.К.** Электромеханическое преобразование энергии: учеб. пособие / ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина". – Иваново, 2007. – 200 с.

*Громов Аркадий Константинович,*

ФГБОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина"

E-mail: gromovar@mail.ru

*Лихачева Анна Валентиновна,*

ФГБОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина"

E-mail: anna@em.ispu.ru

УДК 621.313

Ю.И. СТРАДОМСКИЙ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская, 34  
E-mail: [elmash@ispu.ru](mailto:elmash@ispu.ru)

### **Анализ профиля полюсных наконечников, формирующих рабочий зазор в магнитожидкостном сепараторе**

**Аннотация.** Выполнен анализ геометрии профиля полюсных наконечников в магнитожидкостном сепараторе, способствующей постоянству силы выталкивания немагнитных тел из магнитной жидкости. Определены границы рационального выбора геометрических и магнитных параметров сепаратора.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, сепаратор, немагнитное тело

Yu.I. STRADOMSKIY, Candidate of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: [elmash@em.ispu.ru](mailto:elmash@em.ispu.ru)

### **Analysis of the profile pole pieces, forming the working gap in the magnetic fluid separator**

**Abstract.** Analysis of the pole pieces geometry in the magnetic fluid separator, performed. Boundaries of geometric and magnetic parameters of the separator, identified.

**Key words:** magnetorheological fluid, separator, nonmagnetic body.

Одной из главных проблем при реализации магнитожидкостной сепарации немагнитных материалов является выбор такого профиля наконечников полюсов, который обеспечивает необходимую выталкивающую магнитную силу  $\vec{F}_M = -\mu_0 \cdot M \cdot \nabla H \cdot V_{\text{ч}}$  во всем объеме рабочего зазора с достаточной точностью. Наиболее простой является методика [1], где принимается, что линии магнитного поля во всем зазоре – отрезки прямых (рис. 1), а намагниченность  $M$  либо аппроксимируется формулой Висловича (1) при слабых полях, либо принимается равной намагниченности насыщения  $M_S$  при сильных полях.

$$M(H) = M_S \frac{H}{H + H_T}, \quad (1)$$

где  $H_T$  – значение напряженности, при котором  $M=0,5 M_S$ .

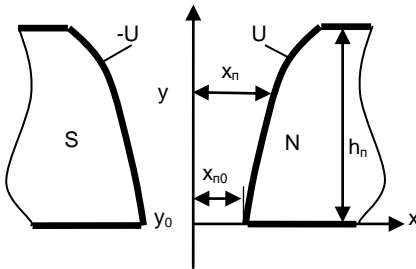


Рис. 1. Область рабочего зазора магнитожидкостного сепаратора

Напряженность рассчитывается по формуле

$$H = \Delta U / 2x_n, \quad (2)$$

где  $\Delta U$  – разность магнитных потенциалов между поверхностями полюсных наконечников, а  $2x_n$  – расстояние между ними на данной высоте зазора  $y$ . Разделение немагнитных частиц по плотности будет производиться с высокой точностью, если в объеме рабочего зазора, занимаемого МЖ, выполняется соотношение

$$\mu_0 \cdot M \cdot |\nabla H| = g \cdot (\rho^* - \rho_{ж}) = \text{const}, \quad (3)$$

где:  $\rho^*$  – значение плотности, разделяющее легкие и тяжелые частицы;  $\rho_{ж}$  – плотность МЖ. Частицы с плотностью  $\rho < \rho^*$  будут всплывать в МЖ, а частицы с  $\rho > \rho^*$  – будут в ней тонуть. В качестве  $\rho^*$  удобно брать среднее значение плотности между легкими и средними частицами  $\rho^* = \rho_{CP} = 0,5(\rho_{л} + \rho_{т})$ . На линии симметрии зазора

$$|\nabla H| = -\partial H / \partial y. \quad (4)$$

Найдем уравнение профиля наконечника полюса, когда магнитное поле в зазоре сильное и МЖ имеет постоянное значение намагниченности  $M = M_s$ . Согласно (3) и (4) имеем

$$\partial y = -\frac{\mu_0 \cdot M_s \cdot \partial H}{g \cdot (\rho^* - \rho_{ж})}.$$

После интегрирования с использованием (2) получим:

$$y - y_0 = \frac{\mu_0 \cdot M_s}{g \cdot (\rho^* - \rho_{ж})} (H_0 - H) = \frac{\mu_0 \cdot M_s \cdot \Delta U}{2 \cdot g \cdot (\rho^* - \rho_{ж})} \left( \frac{1}{x_{п0}} - \frac{1}{x_n} \right).$$

В результате имеем формулу для расчета формы полюсного наконечника, предложенную в [1]:

$$\frac{1}{x_{\Pi}} = \frac{1}{x_{\Pi 0}} - \frac{2 \cdot g \cdot (\rho^* - \rho_{\text{ж}})}{\mu_0 \cdot M_S \cdot \Delta U} (y - y_0). \quad (5)$$

где  $x_{\Pi 0}$  – значение  $x_{\Pi}$  в минимальном зазоре.

Введем базисное значение индукции  $B_B$  в рабочем зазоре

$$B_B = \mu_0 \frac{\Delta U}{2x_{\Pi 0}} \approx B_{\text{max}},$$

которое близко к максимальному значению индукции  $B_{\text{max}}$ , и с использованием его формулу (5) преобразуем к виду

$$\frac{x_{\Pi}}{x_{\Pi 0}} = \frac{1}{1 - \frac{g \cdot (\rho^* - \rho_{\text{ж}})}{M_S \cdot B_B} (y - y_0)}$$

или

$$\frac{x_{\Pi}}{x_{\Pi 0}} = \frac{1}{1 - A(y - y_0)}, \quad A = \frac{g \cdot (\rho^* - \rho_{\text{ж}})}{M_S \cdot B_B}. \quad (6)$$

Величина в знаменателе  $[A(y - y_0)]$  является безразмерной и представляет собой отношение удельных значений гравитационной энергии немагнитных частиц к магнитной энергии МЖ. Величины, входящие в  $A$ , изменяются в достаточно узких диапазонах:  $(\rho^* - \rho_{\text{ж}}) = 4000 \div 12000 \text{ кг/м}^3$  – при разделении металлов от алюминия до свинца;  $M_S = 10000 \div 40000 \text{ А/м}$ ;  $B_B = 0,4 \div 1 \text{ Тл}$ . С учетом этого величина  $A$  принимает значения в диапазоне  $A = 2,5 \div 25 \text{ м}^{-1}$ . Высота полюсного наконечника МЖС  $h_{\Pi}$  (рис.1) обычно не превышает 0,1м. Выражение (6) позволяет построить зависимости  $\Delta y = y - y_0 = f(x_{\Pi} / x_{\Pi 0})$  для различных значений  $A$ , представляющих собой профиль полюсных наконечников МЖС (рис. 2).

Индукция в полюсных наконечниках не велика ( $B < 1,5 \text{ Тл}$ ), насыщение стали отсутствует. На поверхности полюсного наконечника скалярный магнитный потенциал имеет постоянное значение ( $U = \text{const}$ ). Магнитные силовые линии должны быть ортогональны к поверхности полюсного наконечника. Принятое в [1] предположение, что магнитные силовые линии являются отрезками прямых, параллельными оси  $Ox$ , явно неправомерно при больших значениях  $A$  и  $\Delta y$ . В результате на оси симметрии рабочего зазора только на ограниченном участке высотой  $h_c$  напряженность  $H$  изменяется по линейному закону и ее градиент  $\partial H / \partial y$  имеет постоянное значение. Полученные зависимости для  $h_c$  позволяют рационально выбрать геометрию полюсных наконечников.

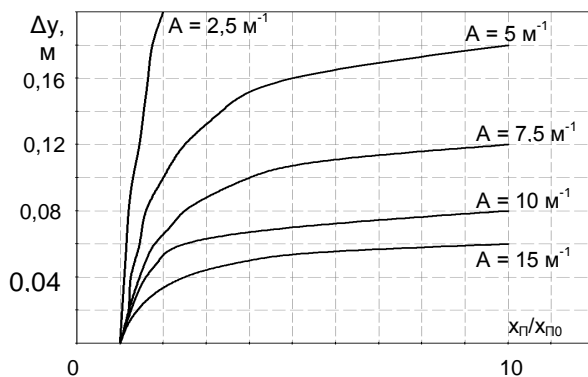


Рис. 2. Профили полюсных наконечников при различных значениях  $A$

### Литература

1. **Берковский, Б.М.** Магнитные жидкости / Б.М.Берковский, В.Ф.Медведев, М.С.Краков – М.: Химия, 1989. – 240с.
2. **Кравченко Н.Д.** Магнитная сепарация отходов цветных металлов / Н.Д. Кравченко, В.И. Карамзин. М.: Metallургия, 1986. 120 с.

*Страдомский Юрий Иосифович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: elmash@em.ispu.ru

УДК 621.313

Н.А. МОРОЗОВ, к.т.н., доцент, А.Н. МОРОЗОВ, инженер

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34,  
E-mail: elmash@em.ispu.ru

### Анализ точности индукционных датчиков перемещения

**Аннотация.** Рассмотрено распределение магнитного потока в системе двухстержневого датчика линейных перемещений. Показана зависимость потока в зазоре от торцевого потока и допустимой намагничивающей силы. Намечены пути увеличения точности фиксации измерительного элемента.

**Ключевые слова:** датчик линейных перемещений, магнитный поток, точность фиксации.



N.A. MOROZOV Candidate of Engineering, docent,  
A.N. MOROZOV engineer

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: [elmash@em.ispu.ru](mailto:elmash@em.ispu.ru)

## Analysis of the accuracy of inductive displacement sensors

**Abstract.** Magnetic flux distribution in the double rod linear encoder, discussed. Dependence of the flux in the gap from the axial flux and allowed the magnetizing force, is shown. Ways to increase the accuracy of of fixing the measuring element, described.

**Key words:** linear encoder, magnetic flux, fixing precision.

В системах автоматики широко применяются индукционные датчики положения, в которых значение ЭДС, наводимой в измерительной катушке, определяет положение этой катушки относительно источника магнитного потока. Магнитная система представляет собой два линейных магнитопроводящих элемента, расположенных параллельно на заданном постоянном расстоянии между их боковыми поверхностями. Это могут быть два цилиндрических стержня. На одном или на обоих стержнях установлены измерительные катушки, которые свободно перемещают вдоль стержней. Значение ЭДС измерительной катушки соответствует её положению на стержне.

Точность фиксации положения измерительной катушки относительно начала стержневой магнитной системы зависит от значения в стержне магнитного потока, который охватывается измерительной катушкой. Особенностью такой линейной магнитной системы является постепенное уменьшение магнитного потока в стержне по мере его перехода из одного стержня в другой. Значение магнитного потока  $\Phi_{\delta h}$ , переходящего из одного стержня в другой через зазор между ними  $\delta$  на участке длиной  $h$  можно определить по формуле

$$\Phi_{\delta h} = U_{\mu} g h, \quad (1)$$

где  $U_{\mu}$  – магнитное напряжение между стержнями на произвольном участке  $h$ ;  $g$  – магнитная проводимость зазора между стержнями на единице длины;  $h$  – длина участка.

У начала стержней магнитное напряжение  $U_{\mu}$  равно намагничивающей силе  $Iw$ , создающей магнитный поток в стержнях. Если представить стержни разбитыми на множество участков равной длины  $h$ , то в начале стержней магнитный поток участка  $\Phi_{\delta h}$  будет иметь наибольшее значение. По мере перехода магнитного потока из одного стержня в другой значение магнитного потока в стержне уменьшается, что ведёт к нелинейному изменению магнитного напряжения между стержнями. При уменьшении напряжённости магнитного поля в стержне  $H$  падение магнитного потенциала  $H \cdot h$  постепенно уменьшается, что вызывает уменьшение магнитного напряжения  $U_{\mu}$  и потока  $\Phi_{\delta}$  между стержнями.

На концах стержня будут самые малые перетоки магнитного потока и наименьшие значения магнитного напряжения между стержнями.

Определим распределение магнитного потока в стержнях по их длине. Для этого на расстоянии  $x$  от начала стержней выделим участок  $dx$ . Тогда магнитный поток  $\Phi_x$  в сечении  $x$  определится разностью магнитных потоков в начале стержня  $\Phi_0$  и всем потоком  $\Phi_{\delta x}$ , перешедшим из одного стержня в другой на расстоянии  $x$ . Магнитная напряжённость  $H_x$  поля в стержне определим как

$$H_x = \frac{\Phi_x}{\mu_c S} = \frac{\Phi_0 - \Phi_{\delta x}}{\mu_c S} = H_0 - \frac{\Phi_{\delta x}}{\mu_c S}, \quad (2)$$

где  $\mu_c$  – магнитная проницаемость материала стержней;  $S$  – сечение стержня;  $H_0$  – напряжённость поля в начальном сечении стержня.

Магнитное напряжение между стержнями на расстоянии  $x$  от их начала можно определить как

$$U_{\mu x} = l w - 2H_{cp} x = l w - (2H_0 - \frac{\Phi_{\delta x}}{\mu_c S}) x. \quad (3)$$

Здесь принято, что средняя магнитная напряжённость  $H_{cp}$  на участке от начала стержней до  $x$  равна полусумме начальной и текущей напряжённостей. Тогда для элементарного значения потока между стержнями  $d\Phi_{\delta}$  получим

$$d\Phi_{\delta} = l w g dx - 2H_0 g dx + \frac{\Phi_{\delta}}{\mu_c S} g x dx \quad (4)$$

и окончательно имеем дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d\Phi_{\delta}}{dx} - \frac{g x}{\mu_c S} \Phi_{\delta} + 2H_0 g x - l w g = 0. \quad (5)$$

Решение такого уравнения с переменными коэффициентами вызывает большие трудности. Моделирование стержневой магнитной системы из феррита 2000НМ диаметром 10 мм, межосевое расстояние 15 мм ( $\delta = 5$  мм) и длиной 200 мм показало, что магнитная индукция распределяется в сечении стержня по длине практически линейно (рис. 1).

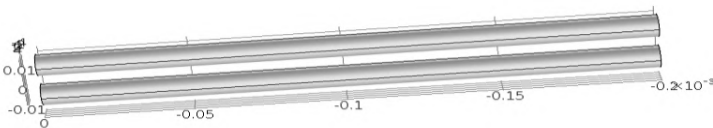


Рис. 1. Стержневая магнитная система датчика перемещения

Если принять распределение напряжённости магнитного поля в стержне в виде  $H_x = H_0 - (H_0 - H_T) \cdot x/L$ , то выражение для элементарного

магнитного потока в зазоре между стержнями можно привести к виду, удобному для интегрирования.

$$d\Phi_{\delta} = l w g dx - H_0 g \left( 2x - \frac{x^2}{L} - \frac{H_T x^2}{H_0 L} \right) dx. \quad (6)$$

Здесь  $H_T$  – магнитная напряжённость в торце стержней за счёт краевых магнитных потоков;  $L$  – длина стержней. После интегрирования получим формулу расчёта магнитного потока  $\Phi_{\delta x}$ , вышедшего из стержня на расстоянии  $x$  от приложения намагничивающей силы  $l w$

$$\Phi_{\delta x} = l w g x - H_0 g x^2 + H_0 g \frac{x^3}{3L} K, \quad \text{где} \quad K = 1 + \frac{H_T}{H_0}. \quad (7)$$

При принятых допущениях намагничивающую силу  $l w$  можно выразить через допустимую магнитную напряжённость  $H_0$  для материала стержней, ограничиваемую линейностью кривой намагничивания. Тогда магнитный поток  $\Phi_{\delta x}$  между стержнями на расстоянии  $x$

$$\Phi_{\delta x} = H_0 g L \left( K x - \frac{x^2}{L} + K \frac{x^3}{3L^2} \right) = H_0 g L^2 \left( K \beta - \beta^2 + \frac{K}{3} \beta^3 \right). \quad (8)$$

Здесь  $\beta$  – положение измерительной катушки в относительных единицах,  $\beta = x/L$ . Можно также определить и магнитный поток в поперечном сечении стержня  $\Phi_S$  с учётом потока выходящего через торцы стержней  $\Phi_T$  и полного потока в зазоре между стержнями  $\Phi_{\delta L}$ .

$$\Phi_S = \Phi_T + \Phi_{\delta L} - \Phi_{\delta x} = H_0 g L^2 (1 - \beta) \left[ K - (1 + \beta) + \frac{K}{3} (1 + \beta + \beta^2) \right]. \quad (9)$$

Анализ полученных выражений показывает, что в отсутствие торцевого потока  $\Phi_T$  ( $K = 1, 0$ ), что может быть реализовано в кольцевых системах, магнитный поток в сечениях стержня  $\Phi_S$  изменяется пропорционально третьей степени координаты перемещения.

$$\Phi_S = H_0 g L^2 \frac{(1 - \beta)^3}{3}. \quad (10)$$

Перемещение измерительной катушки ведёт к заметным изменениям потокосцепления и ЭДС, которые постепенно снижаются до нуля. Наличие торцевого потока сглаживает нелинейность изменения потока в сечениях стержней, что благоприятно сказывается на точности фиксирования положения измерительной катушки. По известному магнитному потоку всегда может быть рассчитана ЭДС в измерительной катушке. Точность фиксирования измерительной катушки определяется производной этой ЭДС по перемещению, которая с учётом (10) может быть рассчитана по формуле

$$\frac{dE}{dx} = 4,44 f w H_0 g L^2 (2\beta - K - K\beta^2). \quad (11)$$

Из полученных выражений видно, что наиболее рациональным путём увеличения точности фиксирования положения измерительной катушки является рост частоты тока катушки намагничивания при использовании ферритов для выполнения магнитной системы. Увеличение начальной напряжённости магнитного поля  $H_0$  ограничивает линейность начального участка кривой намагничивания. Для феррита 2000НМ эта величина не должна быть больше 50 А/м, что соответствует магнитной индукции 0,2 Тл.

*Морозов Николай Александрович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: elmash@em.ispu.ru  
*Морозов Александр Николаевич,*  
ОАО «Ивэлектроналадка»

УДК 621.321

С.А. НЕСТЕРОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: elmash@em.ispu.ru

### **Расчёт силовой характеристики магнитоэластического демпфера**

**Аннотация.** Предложен оригинальный алгоритм расчёта силовой характеристики магнитоэластического демпфера с учётом сложных реологических свойств магнитной жидкости.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, магнитоэластический демпфер, силовая характеристика.

S.A. NESTEROV, postgraduate student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: elmash@em.ispu.ru

### **Calculation of force-velocity relationship of the magnetorheological fluid damper**

**Abstract.** Calculation of force-velocity relationship of the magnetorheological fluid damper by original algorithm is proposed. Complex rheological properties of magnetic fluid considered

**Key words:** magnetorheological fluid, magnetorheological fluid damper, force-velocity relationship.

При проектировании новых демпфирующих устройств возникает необходимость в простой и эффективной оценке получаемой силовой характеристики – зависимости силы сопротивления демпфера от скорости перемещения штока.

В магнитожидкостном демпфере (МЖД) использование узких дроссельных отверстий, получившее наибольшее распространение в демпферах с классическими рабочими жидкостями, малоприменимо, так как получаемый при этом градиент скорости слишком велик, что сводит на нет все усилия по регулировке. В МЖД максимальный эффект будет достигнут при использовании зазора между поршнем и корпусом и воздействии магнитным полем на большой объём медленно текущей жидкости. В настоящее время вопрос о поиске упрощенной методики, позволяющей предварительно оценить свойства МЖД, до конца не решён.

В изученных источниках отмечается ламинарный характер течения МЖ в зазоре МЖД. Это связано с достаточно большой вязкостью МЖ и стабилизирующим влиянием внешнего магнитного поля.

При наличии внешнего магнитного поля и проявлении структурирования в МЖ, её реологическая кривая, зависимость касательного напряжения  $\tau$  от градиента сдвига  $\dot{\gamma}$  слоёв жидкости, имеет вид кривой на рис. 1. Профиль скорости потока, соответствующий данной реологической кривой, представлен на рис. 2. Более подробно о профиле скорости и вычислении расхода МЖ можно познакомиться в работах [1, 2].

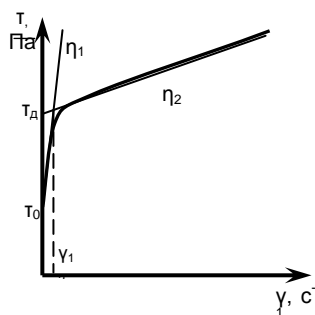


Рис. 1. Реологическая кривая МЖ при воздействии магнитного поля

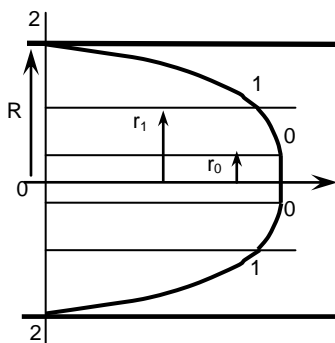


Рис. 2. Схема течения жидкости с изменяющейся динамической вязкостью

Следует отметить решения, приведённые в [3] и основанные на представлении МЖ как тела, описываемого моделью Шведова-Бингама. Недостаток данного способа заключается в отсутствии учёта начального участка реологической кривой МЖ, что даст неверные результаты при малых градиентах сдвига МЖ в зазоре. Представленный здесь подход лучше учитывает сложность реологической кривой МЖ, что позволяет говорить о результатах, более приближенных к реальным, и не зависящим от величины градиента сдвига в зазоре МЖД.

Практически во всех случаях область диссипации энергии в МЖД представляет собой чередующиеся участки с присутствием и отсутствием магнитного поля (полюса и межполюсные пространства). Сложность расчёта силовой характеристики состоит в том, что профиль скорости потока и вязкость жидкости на каждом из участков могут быть различны и определяться свойствами МЖ. Предложенный порядок расчёта силовой характеристики МЖД представлен на рис. 3.

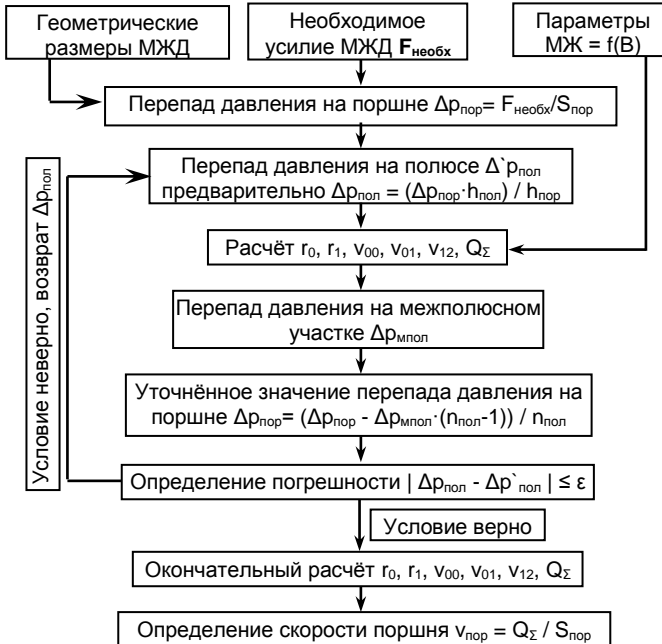


Рис. 3. Порядок расчёта силовой характеристики магнитожидкостного демфера

На рис. 3 приняты обозначения  $S_{пор}$  – площадь поршня,  $h_{пол}$  – длина полюса,  $h_{пор}$  – длина поршня,  $Q_{\Sigma}$  – расход МЖ через зазор,  $n_{пол}$  – число полюсов МЖД,  $\gamma_0, \gamma_1, v_{00}, v_{01}, v_{12}$  – параметры, определяющие поле скоростей в зазоре, ранее описаны в [1].

Падение давления на межполюсном пространстве с учётом параболического профиля течения определяется

$$\Delta p_{мпол} = \frac{3 \cdot h_{мпол} \cdot \eta_0 \cdot Q_{\Sigma}}{2 \cdot \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{ср}} \quad (1)$$

где  $R_{cp}$  – средний радиус зазора между поршнем и корпусом,  $\delta$  – величина зазора между поршнем и корпусом,  $\eta_0$  – вязкость МЖ в отсутствие магнитного поля,  $h_{пол}$  – длина межполюсного пространства.

Выбранные для проведения анализа реологические кривые МРС получены К.Н. Gudmundsson в работе [4]. Данная МРС представляет из себя взвесь порошкового карбонильного железа с средним диаметром частиц 2,1 мкм, покрытого тонкой силикатной оболочкой, в вязкой жидкости-носителе (перфторированный полиэфир) с динамической вязкостью 0,3 Па·с. Динамическая вязкость МРС в отсутствие магнитного поля составляет 1,02 Па·с.

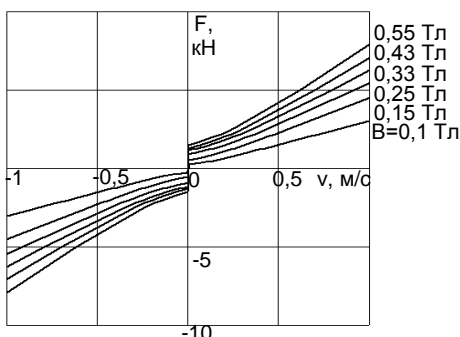


Рис. 4. Силовая характеристика МЖД

На рис. 4 представлены рассчитанные силовые характеристики МЖД при разных значениях магнитной индукции. Из рисунка видно явное влияние приложенного магнитного поля на силу сопротивления демпфера. Первоначальное усилие сдвига демпфера связано с возникающим в МЖ пределом текучести.

### Литература

1. **Течение** магнитной жидкости в щелевом канале с поперечным магнитным полем / Морозов Н.А., Нестеров С. А. // 16-я международная плеская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. Сборник научных трудов. (Плётс, 9 – 12 сентября 2014 года) / ИГЭУ им. В.И. Ленина. – Иваново, 2014. С.173-179.
2. **Исследование** напорного течения магнитной жидкости / Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Нестеров С. А. // IV Всероссийская науч. конф. «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» 15–19 сентября 2013 г. сб. науч. тр. ГОУ ВПО «Ставропольский гос. ун-т», Ставрополь, 2013. – С. 129 – 135.
3. **Modelling** of dynamic behaviour of magnetorheological fluid damper by genetic algorithms based inverse method / G. Ghiță, M. Giuclea, T. Sireteanu // The 6<sup>th</sup> International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisoara, Romania, October 21 - 22, 2004 – pp. 619-628.
4. **Gudmundsson I.** A Feasibility Study of Magnetorheological Elastomers for a Potential Application in Prosthetic Devices / School of Engineering and Natural Sciences University of Iceland. – Prentun: Háskólaprent Reykjavík, September 2011. – 108 p.

*Нестеров Сергей Александрович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: [sergeinesterov37@gmail.com](mailto:sergeinesterov37@gmail.com)

УДК 621.313

А.М. ШУРЫГИН, к.т.н., доцент,  
М.Н. ШУРЫГИН, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: admin@tam.ispu.ru*

### **Влияние шихтованных элементов конструкции силового трансформатора на его поле рассеяния**

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы влияния шихтованных элементов конструкции силового трансформатора на его поле рассеяния. Представлены варианты конструктивного исполнения магнитных шунтов и прессирующих колец, предложен оптимальный вариант их установки.

**Ключевые слова:** конструкция, трансформатор, поле рассеяния.

A.M. SHURYGIN, Candidate of Engineering, docent,  
M.N. SHURYGIN, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: admin@tam.ispu.ru*

### **Influence of laminated constructional elements of power transformer to its dissipation field**

**Abstract.** Deals with the influence of laminated constructional elements of power transformer to its dissipation field. Presents variants of embodiment of magnetic shunts and pressing rings, offers the optimal variant to install them.

**Key words:** construction, transformer, dissipation field.

С увеличением единичной мощности силовых трансформаторов, усложнением их конструкции возрастает напряженность поля рассеяния, как в области обмоток, так и на поверхности ферромагнитных элементов конструкции, что приводит к увеличению доли добавочных потерь в потерях короткого замыкания. Причем относительные значения потерь в элементах существенно различны и зависят от той части потока рассеяния, которая замыкается через них. В связи с этим широкое распространение получили методы снижения добавочных потерь, основанные на управлении магнитным полем для уменьшения или канализации части потока магнитными шунтами в обход тех элементов конструкции, в которых имеются заметные добавочные потери, без изменения основных размеров трансформатора. Поскольку магнитные шунты набираются из листовой электротехнической стали, потери в них незначительны [1, 2] по сравнению с потерями в элементах конструкции при отсутствии шунтов.



Для всех трансформаторов с концентрическими обмотками характерным является резкое увеличение радиальной составляющей индукции поля рассеяния и резкое уменьшение ее осевой составляющей у торцов обмоток. Попытка "выровнять" поле рассеяния в этой области изменением направления шихтовки прессующих колец (ПК) обмоток с радиального (рис. 1, а) на осевое (рис. 1, б) к существенным результатам не приводит. Направление шихтовки ферромагнитного ПК сказывается только на местном изменении составляющих индукции в зоне кольца, не приводя к заметному изменению картины поля у торцов обмоток. При выборе направления шихтовки надо стремиться к уменьшению потерь в ПК, то есть стремиться к тому, чтобы составляющая индукции, перпендикулярная к плоскости шихтовки, была минимальной [1]. С этой точки зрения лучшей является конструкция с осевой шихтовкой ПК, поскольку в этом случае радиальная составляющая индукции в ПК приблизительно на 40% больше, а осевая составляющая на  $(8 \div 10)\%$  меньше, чем при радиальной шихтовке.

Установка магнитных шунтов по рис. 2, а, при осевой шихтовке ПК обеспечивает уменьшение радиальной составляющей индукции у торца обмотки высокого напряжения (ВН) приблизительно в 4 раза (рис. 3, кривая 3). Однако при этом у края обмотки примерно в 3 раза возрастает осевая составляющая индукции в канале между обмотками высокого и низкого (ВН-НН) напряжения (рис. 4, кривая 3).

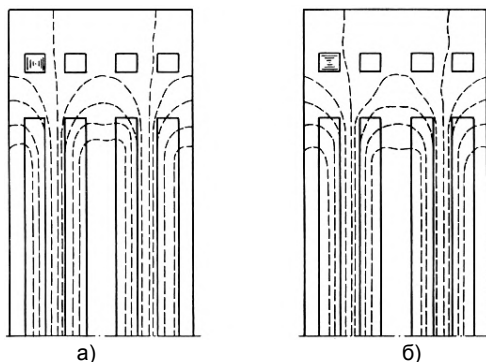


Рис. 1. Магнитное поле в окне трансформатора ТРДН-25000/110 при опытном коротком замыкании для радиального (а) и осевого (б) направлений шихтовки ПК

Оптимальной представляется конструкция с установкой магнитных шунтов по рис. 2, б, при которой получается наиболее благоприятное соотношение радиальной и осевой составляющих индукции у торцов обмоток.

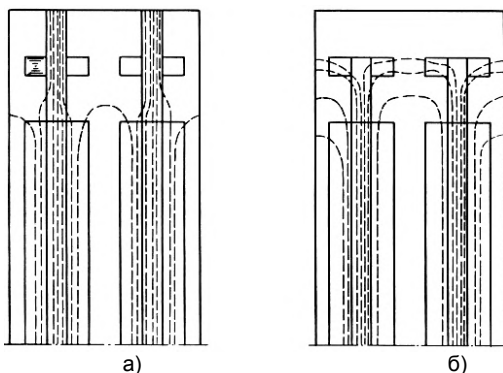


Рис. 2. Магнитное поле в окне трансформатора ТРДН-25000/110 при опытном коротком замыкании для осевого направления шихтовки ПК с магнитными шунтами

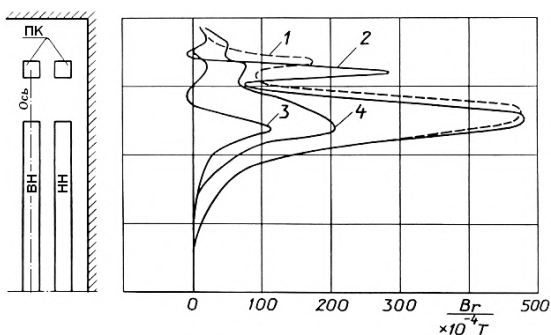


Рис. 3. Распределение радиальной составляющей индукции поля рассеяния вдоль оси обмотки ВН:  
 1, 2 – соответственно для а, б рис. 1;  
 3, 4 – соответственно для а, б рис. 2

В этом случае по сравнению с конструкцией, изображенной на рис. 2, а, радиальная составляющая индукции увеличивается примерно в 2 раза, а осевая составляющая уменьшается в 1,3 раза.

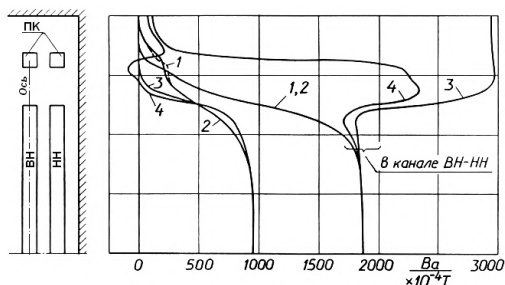


Рис. 4. Распределение осевой составляющей индукции поля рассеяния вдоль оси обмотки ВН и в канале ВН-НН:  
 1, 2 – соответственно для а, б рис. 1;  
 3, 4 – соответственно для а, б рис. 2

### Литература

1. **Снижение** добавочных потерь в мощных трансформаторах / В.Ш. Аншин [и др.] // Электротехника. – 1967. – № 4. – С. 10-13.
2. **Щелькалов, Ю.Я.** Определение полей и потерь в элементах конструкций силовых трансформаторов численным методом / Ю.Я. Щелькалов, М.Н. Шурыгин // Автоматизация исследований и проектирования электрических машин и трансформаторов: межвузовский сборник научных трудов. – Иваново: ИГЭУ, 1987. – С. 48-53.

*Шурыгин Андрей Михайлович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 e-mail: admin@tam.ispu.ru

*Шурыгин Михаил Николаевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 e-mail: admin@tam.ispu.ru

УДК 621.321

Р.М. РОГОЗИН, магистрант;  
 А.Н. ЛАПИН, к.т.н, доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
 E-mail: rogozin.roman93@gmail.com

## Основные методы и проблемы электромагнитных расчетов трансформаторов. Перспективы метода конечных разностей

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы автоматизированного проектирования трансформаторов, в частности проблема электромагнитных расчетов. Основное внимание уделено анализу современных возможностей метода конечных разностей.

**Ключевые слова:** трансформатор, САПР, метод конечных разностей.

R.M. ROGOZIN, graduate student;  
A.N. LAPIN, PhD, Associate Professor

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34. E-mail: rogozin.roman93@gmail.com

## The basic methods and problems of electromagnetic calculations of transformers.

### Prospects for the finite difference method

**Abstract.** The problems of computer-aided design of transformers, in particular the problem of electromagnetic calculations. Emphasis is placed on the analysis of current capabilities me-Toda finite differences.

**Keywords:** transformer, CAD, finite-different step.

С развитием энергетики и других отраслей народного хозяйства, в современном обществе возрастает потребность в силовых трансформаторах самого различного назначения и конструктивного исполнения. Растут единичные мощности и токи трансформаторов, предъявляются новые требования к их характеристикам, усложняются схемы и конструкции отдельных узлов. Всё это выдвигает новые сложные задачи проектирования, в том числе задачи электромагнитных расчётов, т.е. расчётов местных и интегральных параметров магнитного поля.

Результатами электромагнитных расчётов являются токи и напряжения обмоток и их частей при различных режимах, индуктивности, потери и электродинамические усилия. В качестве промежуточных результатов для расчёта усилий, потерь, магнитоstriction и для сопоставления результатов с результатами экспериментальных исследований необходимо определить напряжённость магнитного поля или его вектор магнитной индукции. Исходными данными для электромагнитного расчёта обычно бывают устройство и геометрические размеры трансформатора, свойства материалов и сведения о режимах и условиях работы.

Задача поиска наилучшего варианта трансформатора, в частности распределения витков по сечению обмоток, т.е. задача синтеза оптимального электромагнитного поля, решается аналитически лишь в очень упрощённых случаях. Практически невозможно искать аналитическую функцию четырёх независимых аргументов (три координаты и время) или трёх (если рассматривать статическую или квазистационарную задачу). Поэтому всегда приходится принимать такие допущения, при которых магнитное поле в каждой из рассматриваемых областей зависит от одной или двух координат, а иногда вовсе не зависит от них.

Методы электромагнитных расчётов:

Физическое моделирование представляет собой изучение таких же по своей физической природе процессов, что и исследуемые, но не в оригинале, а в похожих на него специально изготовленных моделях.

Результаты измерений пересчитываются для оригинала. Физическое моделирование дает возможность учесть очень сложные формы границ, сред и законы изменения возбуждающей силы, реальные свойства материалов и другие факторы. Однако оно требует много времени и средств на проектирование, изготовление и испытание модели, за счёт чего данный метод не нашёл широкого распространения.

Математическое моделирование полем токов проводимости применяют для исследования магнитного поля рассеяния трансформаторов. С помощью электрической ванны или моделирования на электропроводящей бумаге можно учесть сложные двухмерные формы границ сред и распределение возбуждающих сил. Однако широко распространено моделирование только плоскопараллельного поля, моделирование других типов полей связано с существенными техническими ограничениями. Является в основном приближённым методом.

На сегодняшний день вышеперечисленные методы практически не используются, а все расчётные методы определения поля подразделяются на две категории:

Аналитическое решение – поиск функции, удовлетворяющей уравнениям Максвелла при заданных граничных условиях и возбуждающих силах, удаётся лишь в простейших случаях плоскопараллельных и осесимметричных полей при плоских круговых цилиндрических границах сред. С учётом вышесказанного данный метод для расчёта реальных электромеханических объектов не применяется. Метод даёт решение в виде алгебраического уравнения, в которое входят все параметры характеризующие поле.

Численное решение дифференциальных уравнений Максвелла наиболее популярный метод электромагнитных расчётов на сегодняшний день. Численные методы могут быть основаны на конечно-разностной модели или же на конечно-элементной, так же существует метод интегральных уравнений, Монте-Карло, граничной коллокации и т.д. Метод конечных элементов получил наибольшее распространение за счёт ряда преимуществ:

Метод является проекционным, то есть устойчив

Позволяет работать с геометрически более сложными объектами

Решение сразу представляет собой функцию и значения в любой точке могут быть вычислены сразу

На основе этого метода работают наиболее популярные системы автоматизированных инженерных расчётов (ANSYS, Multiphysics и т.д.), но они являются довольно дорогими, что делает их приобретение для некоторых предприятий затруднительным. Так же стоит отметить, что метод конечных разностей обладает более простым матаппаратом, благодаря чему наиболее прост в реализации, и соответственно САПР на его основе будет является более доступным. Так как он имеет прямоугольную сетку, её можно легко адаптировать к трансформаторам,

без потери точности вычислений. Минимальное число линий сетки по оси X и Y определяется числом границ изменения магнитной проводимости (воздух, сталь и т.п.) в расчётной области, справедливо для 2-х мерной модели. При такой сетке возможно получить результат, но погрешность в расчёте будет велика. Для более точных результатов необходимо полученные области разбить ещё несколькими линиями сетки, с определенным шагом  $\Delta x$  и  $\Delta y$  по осям X и Y. Для реализации 3-х мерной модели необходимо вместе с прямоугольной сеткой использовать полярную (основанную на полярной системе координат), данная потребность возникает из-за концентрических обмоток трансформатора. В результате этот метод отошёл на второй план к популяризации метода конечных элементов. Но с появлением современных компьютерных технологий, имеет практический смысл использовать данный метод, для разработки подсистемы уточненного расчета холостого хода трансформаторов.

#### Литература

1. **Лейтес Л. В.** Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981.
2. **Васютинский С. Б.** Вопросы теории и расчета трансформаторов Л., «Энергия», 1970.

*Лапин Александр Николаевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

*Рогозин Роман Михайлович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

УДК 621.313

А.В. ПОДОБНЫЙ, студент,  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор;  
М.А. СОЛУНИН, к.ф-м.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: [aleksandr.rash@mail.ru](mailto:aleksandr.rash@mail.ru), [ait@dsn.ru](mailto:ait@dsn.ru)

### Разработка системы автоматизации эксперимента на базе платформы ARDUINO

**Аннотация.** Приведены результаты анализа возможностей автоматизации экспериментальных исследований электротехнических устройств на перспективной платформе Arduino. Для демонстрации возможностей данной платы было собрано устройство, позволяющее передвигать физический объект в трехмерном пространстве с заданной траекторией.

**Ключевые слова:** автоматизация экспериментальных исследований, платформа Arduino, координатное управление.

A.V.PODOBNY, student;  
A.I. TIKHONOV, professor;  
M.A.SOLUNIN, candidate of physical and mathematical sciences.,  
Associate Professor

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34.  
*E-mail: aleksandr.rash@mail.ru, ait@dsn.ru*

## Development of automation systems based on the platform of the experiment ARDUINO

**Abstract.** Results of the analysis capabilities of automation of experimental studies of electrical devices on a prospective platform Arduino. To demonstrate the capabilities of this board was assembled device allowing to move a physical object in three-dimensional space with a given trajectory.

**Keywords:** automation of experimental research platform Arduino, coordinate control.

Одной из перспективных задач в настоящее время является автоматизация экспериментальных исследований. Используя ПК, можно в кратчайшие сроки снимать, обрабатывать и передавать большой объем информации, получаемой с датчиков.

Для связи ПК с периферийными устройствами, которые могут использоваться в экспериментальных исследованиях, нами была выбрана платформа Arduino - электронный конструктор и удобная платформа быстрой разработки электронных устройств на базе микроконтроллеров Atmega семейства AVR. У нее простой язык программирования, открытая архитектура и программный код. Устройство программируется через USB без использования программаторов.

Микроконтроллер на плате (рис. 1) программируется при помощи собственного языка Arduino, основанного на языках программирования C/C++ и среды разработки Arduino (AVR GCC компилятор). Проекты устройств, основанные на Arduino, способны работать самостоятельно и, взаимодействуя с программным обеспечением на компьютере (Flash, Processing, MaxMSP). Все ПО для данной платформы и исходные чертежи схем находятся в свободном доступе. При желании платы можно собрать и доработать самостоятельно.

С помощью Arduino можно разработывать различные интерактивные устройства и измерительные приборы, обрабатывать данные датчиков и переключателей, управлять двигателями и т.д.

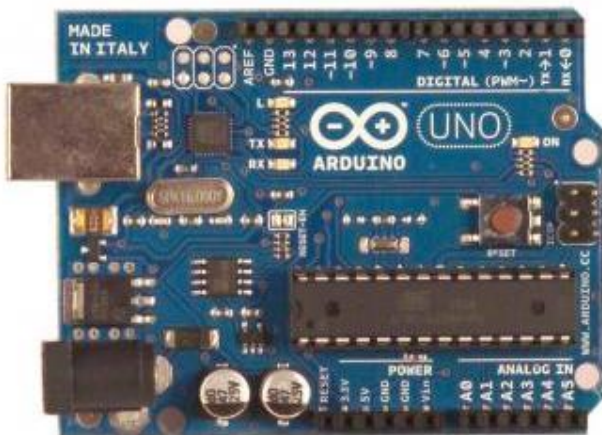


Рис. 1. Плата Arduino UNO

Для демонстрации возможностей данной платы было собрано устройство, позволяющее передвигать физический объект в трехмерном пространстве с заданной траекторией. Траекторию перемещения описывает программа, написанная на языке программирования - G-код. Это условное название языка программирования устройств с числовым программным управлением (ЧПУ) был создан в 1960-х гг. Финальная доработка одобрена в 1980 г., как стандарт RS274D. В советской технической литературе G-код обозначается как код ИСО 7-бит (ISO 7-bit). Этот язык до сих пор используется производителями устройств с ЧПУ, поскольку данный способ задачи и контроля траектории движения обладает широким функционалом и при необходимости может дорабатываться.

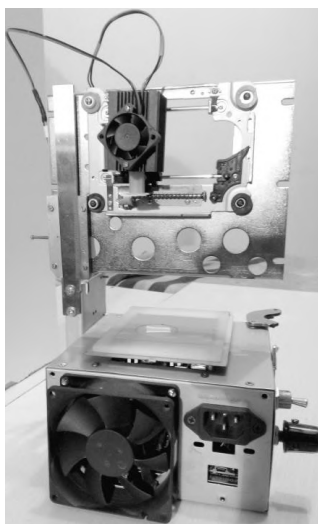


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки

Для передачи G-кода с ПК на платформу Arduino было использовано одно открытое программное обеспечение, работающее с данной платформой и совместимое с ОС Windows, Linux - GrblController 3.0.



Прошивка для микроконтроллера Grbl v0.9 также находится в свободном доступе и имеет открытый код, позволяющий изменять ее в зависимости от потребностей пользователя.

Пакет данных ПК передаёт по последовательному usb-порту на плату Arduino, которая обрабатывает их и передаёт на управление двигателями координатного стола параллельно. Поэтому перемещение объекта к заданной программой траектории максимально точно в каждый момент времени. Используемая прошивка для микроконтроллера Grbl v0.9 позволяет не только менять траекторию, но и подключать периферийные устройства с цифровым и аналоговыми входами для передачи и получения как цифровых, так и аналоговых сигналов.

Устройство, позволяющее перемещать объект в трехмерном пространстве, было собрано из комплектующих устаревшего компьютера: CD-ROM, FDD, блока питания, платы Arduino Uno и драйверов для шаговых биполярных двигателей. Рабочее пространство хода устройства сравнительно небольшое - 40x40x30 мм, но обладает довольно малым шагом перемещения 0,025 мм.

Для демонстрации возможностей устройства на него был установлен полупроводниковый лазер мощностью в 1,6 Вт, позволяющий наносить информацию путём точечного термического воздействия на обрабатываемый материал сфокусированным лазерным лучом.

Преимущества платформы Arduino делают её удобной для использования автоматизации экспериментальных исследований. Выше мы рассмотрели применение ее для перемещения заданного объекта в трехмерном пространстве. Совместив ее с различными, мы можем использовать ее для систематизации исследования объекта, создания трехмерных моделей исследуемых объектов. Совместив с различными устройствами вывода, можно воздействовать с заданными характеристиками на испытуемый образец термическими, механическими и химическими способами, а также задавать параметры точного положения объекта в пространстве с ПК.

Являясь одним из условий качественного проведения эксперимента, автоматизация экспериментальных исследований в итоге способствует развитию науки.

*Подобный Александр Владимирович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

*Тихонов Андрей Ильич,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: ait@dsn.ru

*Солунин Михаил Альбертович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: admin@fizika.ispu.ru

УДК 621.313

А.В. СТУЛОВ, аспирант;  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: [alxstl@mail.ru](mailto:alxstl@mail.ru), [ait@dsn.ru](mailto:ait@dsn.ru)

## Применение подсистем поверочного и теплового расчетов САПР к проектированию оптимальных моделей силовых масляных трансформаторов

**Аннотация.** Описана подсистема поверочного расчета трансформаторов, построенная на основе тепловых моделей трех уровней сложности. Особо выделяются модели, построенные на основе разветвленных схем замещения, позволяют получить повышенную точность расчетов при малом времени расчета, что позволяет использовать их при оптимизации трансформатора.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, САПР, цепные модели, тепловой расчет, оптимизация.

A.V. STULOV, graduate student;  
A.I. TIKHONOV, Prof.

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34. E-mail: [alxstl@mail.ru](mailto:alxstl@mail.ru), [ait@dsn.ru](mailto:ait@dsn.ru)

## Application subsystem verification and thermal calculations CAD to design the optimal models of power oil transformers

**Abstract.** The subsystem testing calculation transformers, built on the basis of thermal models of three levels of difficulty. Highlights the models constructed on the basis of equivalent circuits branched to obtain high accuracy of calculations with a small calculation time, they can be used in the optimization of the transformer.

**Keywords:** power transformer, CAD, chain models, thermal design, optimization.

Повышение требований к снижению издержек на проектирование и производство трансформаторного оборудования привело к созданию программного обеспечения (ПО), используемого при расчете оптимальных моделей силовых трансформаторов. Описываемое ПО было разработано по заказу ЗАО "Трансформер" (г. Подольск) и представляет собой совокупность подсистем поверочного, теплового и оптимизационного расчетов САПР распределительных и силовых трансформаторов.

Особенностью обмоток низшего напряжения (НН) распределительных трансформаторов, производимых на ЗАО «Трансформер» является ленточная технология намотки. Известно, что в обмотках, выполненных из широкой полосы ленты или фольги, поперечный маг-

нитный поток почти полностью оттесняется вихревыми токами даже при частоте 50 Гц. Вихревые токи, вызванные поперечным полем рассеяния, концентрируются в торцевых частях обмоток, создавая эффект перераспределения части тока нагрузки к торцам обмоток. Существующие инженерные методики на основе РД эти эффекты не учитывают. Ведущие мировые производители трансформаторного оборудования для исследования эффекта вытеснения тока в обмотках используют ПО на основе расчета электромагнитного поля методом конечных элементов (МКЭ). Существенным недостатком МКЭ является невозможность использования моделей на основе МКЭ в подсистемах оптимального проектирования.

Для устранения указанных недостатков и учета эффекта вытеснения были разработаны уточненные математические модели [2] и разработаны соответствующие программные средства [1, 3, 4].

Данные программные средства выполнены в среде MATLAB в связке с табличным процессором Excel, посредством среды программирования Visual Basic.

Апробация подсистем производилась в рамках работы конструкторского отдела ЗАО «Трансформер», результаты апробации сравнивались с результатами приемосдаточных и типовых испытаний физических образцов в лаборатории ЗАО «Трансформер».

Основным критерием при сравнении расчетных данных и результатов испытаний были потери холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ), а также превышения средних температур обмоток НН и высшего напряжения (ВН) над температурой окружающей среды. Результаты расчета потерь трансформатора приведены в табл. 1 и табл. 2.

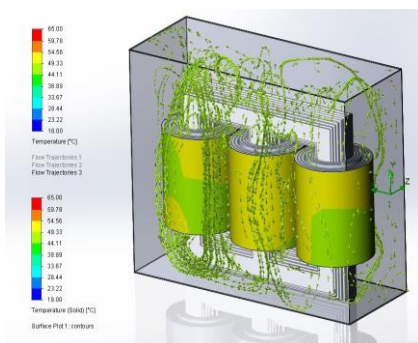


Рис. 1. Тепловой расчет активной части масляного трансформатора в полевой постановке Flow Simulation

Особенностью подсистемы теплового расчета САПР является многоуровневая структура тепловых моделей с разной степенью точности, быстроедействие и уровня визуализации результатов [1].

Таблица 1. Результаты расчета и испытаний масляных трансформаторов ТМГ. Потери ХХ, потери КЗ, добавочные потери

Тип	Потери ХХ, Вт		Потери КЗ, Вт		Добавочные потери, Вт	
	Расчет	Тест	Расчет	Тест	Расчет	Тест
ТМГ-250/10	685	553	3667	3832	349	122
ТМГ-400/10	863	881	5551	5649	177	304
ТМГ-630/10	950	1156	7253	7364	1066	621
ТМГ-1000/10	1280	1648	10848	9720	574	668

1) модели 1 уровня основываются на инженерных методиках, изложенных в РД 16452-88 «Трансформаторы силовые масляные с системами охлаждения М и Д. Тепловой расчет обмоток» и предназначены для отыскания первоначальной точки поиска оптимального решения;

2) модели 2 уровня основаны на разветвленных электрических схемах замещения и предназначены для уточненного теплового расчета в процессе поиска оптимального решения;

3) модели 3 уровня основываются на решении задачи теплового расчета в полевой постановке и предназначены для имитации проведения тепловых испытаний в виртуальной среде.

Результаты многоуровневого теплового расчета и результаты тепловых испытаний масляных трансформаторов приведены в табл. 3-6.

Таблица 3. Результаты многоуровневого теплового расчета и результаты тепловых испытаний масляных трансформаторов (обмотки НН)

Тип	Среднее превышение температуры обмоток НН над температурой окружающей среды, °С			
	1 уровень	2 уровень	3 уровень	ТЕСТ
ТМГ-250/10	71,54	58,14	55,78	53,92
ТМГ-400/10	70,48	57,83	53,97	52,04
ТМГ-630/10	68,16	52,71	51,52	50,84
ТМГ-1000/10	76,57	62,02	59,02	57,28

Таблица 4. Результаты многоуровневого теплового расчета и результаты тепловых испытаний масляных трансформаторов (обмотки ВН)

Тип	Среднее превышение температуры обмоток ВН над температурой окружающей среды, °С			
	1 уровень	2 уровень	3 уровень	ТЕСТ
ТМГ-250/10	69,48	65,51	62,13	61,71
ТМГ-400/10	70,12	65,04	63,01	61,01
ТМГ-630/10	67,64	62,71	59,53	58,67
ТМГ-1000/10	73,37	68,38	66,74	64,99

Проведенная серия расчетов оптимальных моделей масляных трансформаторов с помощью разработанного ПО привела к снижению материальных затрат на 8,7 %.

Кроме проведения оптимизационных расчетов разработанное ПО позволяет решать исследовательские задачи по разработке принципиально новых конструкций трансформаторов, а тепловые модели 3 уровня позволяют исследовать течение охлаждающей жидкости в трансформаторе для повышения эффективности системы охлаждения.

#### Литература

1. **Стулов, А.В.** Разработка многоуровневой подсистемы тепловых расчетов САПР активной части распределительных трансформаторов // А.В.Стулов, А.И.Тихонов, И.А. Корнев / ФГБОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. Ленина". – Иваново, 2014 – 96 с.
2. **Стулов, А.В.** Разработка уточненных математических моделей для создания подсистем САПР распределительных трансформаторов с обмотками из ленты / А.В. Стулов, А.С. Зайцев, И.А. Трофимович, В.И. Печенкин // Вестник ИГЭУ. – 2014. Вып. 6. – С. 87-91.
3. **Тихонов, А.И.** Разработка подсистемы оптимизации САПР распределительных трансформаторов / А.И. Тихонов, А.С.Зайцев, А.В.Стулов, И.А. Трофимович // Вестник ИГЭУ. – 2014. Вып. 6. – С. 87-91.
4. **Тихонов А. И., Стулов А.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Подсистема тепловых расчетов распределительных трансформаторов на основе электрических схем замещения» – № 2014619822; 23.09.2014. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

*Стулов Алексей Вадимович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: alxst@mail.ru

*Тихонов Андрей Ильич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: ait@dsn.ru

УДК 621.313

И.А. КОРНЕВ, аспирант; А.В. СТУЛОВ, аспирант;  
А.И. ТИХОНОВ д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: kornevispu@gmail.com, alxst@mail.ru, ait@dsn.ru

### **Параметрическая модель для расчета распределения тока в фольговых обмотках распределительного трансформатора с использованием библиотеки численного моделирования электрических цепей**

**Аннотация.** Приведена математическая модель, построенная на основе конечно-элементной модели магнитного поля и модели электрической цепи, позволяющая осуществлять расчет распределения токов и потерь в фольговых обмотках силового трансформатора с учетом эффекта вытеснения тока.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, фольговые обмотки, метод конечных элементов, метод переменных состояния, электрические схемы замещения.

I.A. KORNEV, graduate student; A.V. STULOV, graduate student;  
A.I. TIKHONOV, Prof.  
Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34  
E-mail: kornevispu@gmail.com, alxstl@mail.ru, ait@dsn.ru

### **Parametric model for the calculation of the current distribution in the foil winding distribution transformer using a library of numerical simulation of electrical circuits**

**Abstract.** A mathematical model is constructed based on the finite element model of the magnetic field and the electric circuit model that allows for the calculation of the current distribution and losses in foil windings power transformer for the effect of current displacement.

**Keywords:** power transformer, foil coil method, finite element method, the state variables, the electrical equivalent circuit.

В работах [1, 2] рассматривается модель фольгового реактора, представленного в виде электрической схемы замещения. Одной из главных недостатков данной модели является трудоемкость формирования модели электрической цепи, которая в зависимости от конструкции реактора может изменяться, требуя каждый раз перестройки системы уравнений, описывающих данную цепь. Для того чтобы автоматизировать процесс формирования и расчета подобных цепных моделей была разработана библиотека ECLib [1], открывающая новые возможности в плане численного моделирования электрических цепей. Одновременно решалась задача распространения математического аппарата расчета фольговых реакторов на задачи расчета процессов в фольговых обмотках распределительных трансформаторов.

Одной из главных возможностей, предоставляемых библиотекой ECLib, является возможность параметрической генерации однотипных моделей электрических цепей. В частности, на рис. 1 приведена электрическая схема замещения обмоток распределительного трансформатора в опыте холостого хода. Обмотка высшего напряжения (ВН) представлена приведенным сопротивлением 34 и элементом 66, который представляет собой совокупность приведенной индуктивности обмотки ВН и приведенных взаимных индуктивностей с контурами обмотки низшего напряжения (НН).

В свою очередь фольговая обмотка НН представлена электрической схемой замещения, аналогичной [2, 3]. Здесь каждая ветвь соответствует расчетной секции обмотки НН и содержит сопротивление секции и элемент, который представляет собой совокупность собствен-

ной индуктивности расчетной секции и взаимных индуктивностей с остальными контрами.

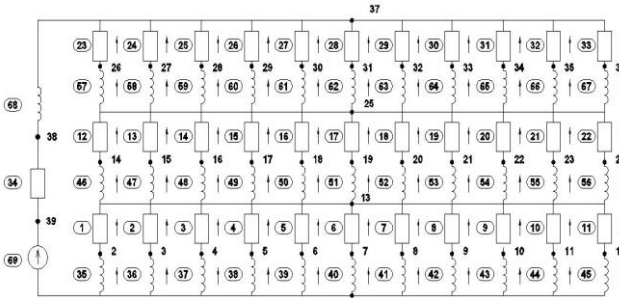


Рис. 1. Электрическая схема замещения трансформатора в опыте короткого замыкания

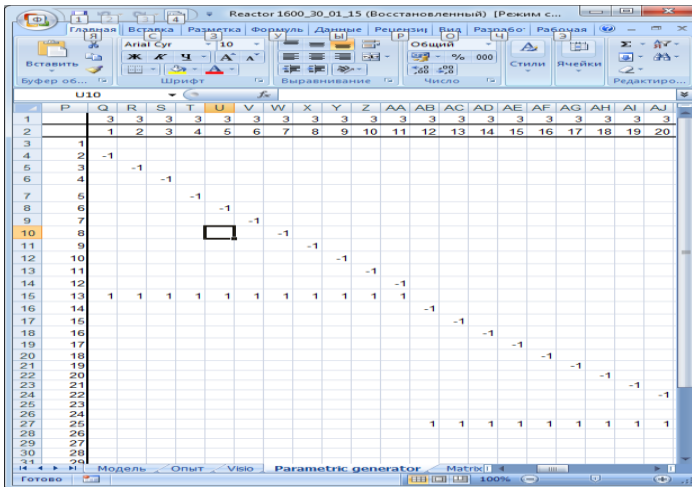


Рис. 2. Матрицы цепной модели обмоток трансформатора, сгенерированные параметрическим генератором электрической цепи

Матрица индуктивностей строится с использованием библиотеки конечных элементов. Параметрическая генерация электрической схемы замещения обмоток трансформатора, а также расчет матрицы омических сопротивлений секций [R] осуществляется с помощью программного кода в среде Excel, который задействует соответствующие функции библиотеки ECLib. Сгенерированные матрицы соединений, номиналов и типов элементов цепи визуализируются на листе Excel (рис. 2). Данные матрицы передаются в библиотеку ECLib, где осуществляется анализ исходных

данных, а также формирование и решение системы уравнений по методу переменных состояния, содержащей две подсистемы:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_L = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{U}_L, \quad (1)$$

$$\mathbf{i}_R = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{U}_R, \quad (2)$$

где  $\mathbf{i}_L$ ,  $\mathbf{i}_R$  – векторы токов, соответственно в индуктивностях и сопротивлениях;  $\mathbf{U}_L$ ,  $\mathbf{U}_R$  – векторы напряжений, соответственно в индуктивностях и сопротивлениях;  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{R}$  – соответственно матрицы индуктивностей и сопротивлений.

С помощью библиотеки ECLib рассчитывается матрица токов, протекающих в ветвях схемы замещения. Результат расчета токов в ходе переходного процесса показан на рис. 3. Распределение токов по секциям по высоте фольговой обмотки показано на рис. 4.

Затем рассчитываются потери в расчетных секциях, которые являются основой для теплового расчета фольговых обмоток.

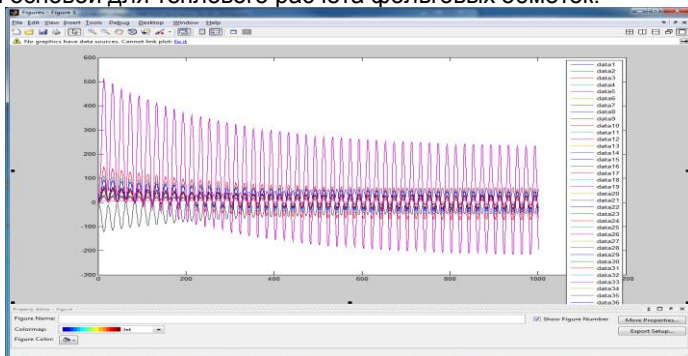


Рис. 3. Переходный процесс изменения тока в первой секции исследуемой обмотки

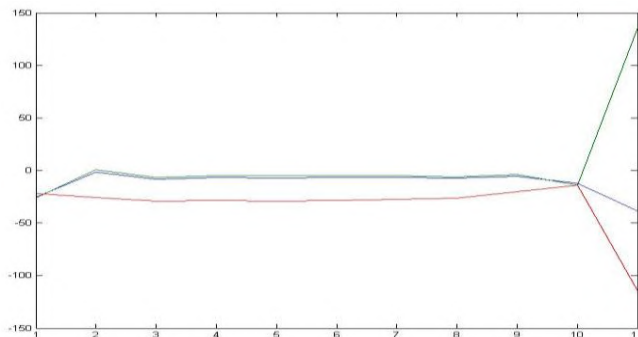


Рис. 4. Распределение токов секциям фольговой обмотки по высоте в трех концентрсах



В настоящее время ведется работа по параметрической генерации электрических цепей, структура которых меняется во времени по заданному алгоритму.

#### Литература

1. **Тихонов А.И., Корнев И.А.** Библиотека для формирования и исследования моделей электрических цепей в динамических режимах / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. № 2013610691. Заявка № 2012660143, приоритет от 22.11.2012, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9.01.2013.
2. **Тихонов А.И., Иванов А.В.** Использование библиотеки моделирования магнитного поля при расчете реактора из алюминиевой ленты. - "Вестник ИГЭУ", 2009, Вып. 3, с. 25-28.
3. **Тихонов А.И., Иванов А.В.** Расчет и производство токоограничивающих реакторов из алюминиевой ленты / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 116 с.

*Корнев Илья Александрович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: kornevispu@gmail.com

*Стулов Алексей Вадимович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: alxstl@mail.ru

*Тихонов Андрей Ильич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: ait@dsn.ru

УДК 621.313

К. А. КОРОСТЕЛЕВ, магистрант;  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор  
А.В. СТУЛОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: korostelev.k@gmail.com, ait@dsn.ru, alxstl@mail.ru

### **Разработка способов упрощения электрической схемы замещения тепловой модели обмоток трансформаторов и токоограничивающих реакторов**

**Аннотация.** Приведены результаты исследования способа упрощения электрической схемы замещения теплового состояния фольговой обмотки силового трансформатора или токоограничивающего реактора. Данный способ позволяет существенно сократить сложность электрической цепи путем введения корректирующей функции, полученной в численном эксперименте.

**Ключевые слова:** тепловая модель обмотки трансформатора, фольговые обмотки трансформатора, численное исследование, электрическая схема замещения тепловых процессов.

K.A. KOROSTELEV, undergraduate; A.I. Tikhonov, Prof.  
A.V. STULOV, graduate student

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34

E-mail: [korostelev.k@gmail.com](mailto:korostelev.k@gmail.com), [ait@dsn.ru](mailto:ait@dsn.ru), [alxstl@mail.ru](mailto:alxstl@mail.ru)

## Develop ways to simplify the electrical equivalent circuit of the thermal model of transformer windings and current limiting reactors

**Abstract.** The results of the study ways to simplify the electrical equivalent circuit of the thermal state of the foil-winding power transformer or current-limiting reactor. This method allows to reduce the complexity of the circuit by introducing a correction function obtained in the numerical experiment.

**Keywords:** thermal model of the transformer, foil windings of the transformer, the numerical study, the electrical equivalent circuit of thermal processes.

Одним из главных требований к системам проектирования трансформаторов и токоограничивающих реакторов является требования точности тепловых расчетов обмоток при обеспечении их быстродействия. Обычно повышенная точность тепловых расчетов достигается путем использования современных САЕ-систем, в основе которых лежит трехмерное моделирование физических полей, например, ANSYS, Cosmos, Comsol и т.п. Время расчета трехмерного теплового поля силового трансформатора с учетом движения охлаждающей среды на современных персональных компьютерах составляет порядка одного или нескольких часов, что недопустимо в современном проектировании, особенно при оптимизации проекта. В то же время инженерные модели, рекомендуемые для тепловых расчетов трансформаторов [1, 2] не учитывают некоторых особенностей современных типоисполнений, например, эффект вытеснения тока в фольговых обмотках.

Поэтому в [3, 4] предложено использовать в алгоритмах оптимизации уточненные тепловые модели обмоток трансформаторов и токоограничивающих реакторов, построенные на основе электрических схем замещения, которые могут быть построены и исследованы либо с помощью имитационного пакета Simulink, либо с помощью математической библиотеки ECLib [5], ориентированной на решение задач автоматизированного построения и имитации работы электрических схем. При этом доказывалось, что использование библиотеки ECLib является более предпочтительным, так как позволяет автоматизировать численное исследование путем параметрической генерации электрической схемы замещения и программирования серии расчетов модели.

Одной из проблем таких моделей является рост сложность модели при попытке учесть неоднородность среды концентроров обмоток.

В частности, для повышения точности расчетов рекомендовалось каждый виток ленточного проводника фольговой обмотки разбить на расчетные секции (кольца), изолированные друг от друга слоем изоляции. При этом каждое кольцо в схеме замещения было представлено источником тока, имитирующего теплотерии и тепловыми сопротивлениями. Сложность электрической схемы замещения при этом возрастала настолько, что ее расчет становился сопоставимым с расчетом двухмерного теплового поля, что недопустимо в алгоритмах оптимизации. Попытка упростить схему замещения путем объединения нескольких проводников в рамках одного концентратора, построенного из композитного материала (чередование витков проводника со слоями изоляции с учетом распределенных по виткам теплотерий), привела к необходимости введения поправочных коэффициентов. Электрическая схема замещения тепловой цепи одной расчетной секции при этом имеет вид рис. 1.

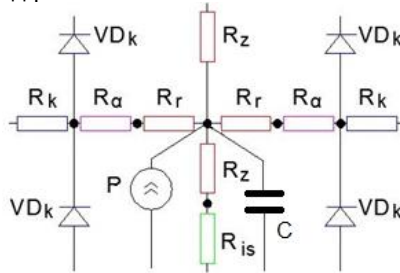


Рис. 1. Схема замещения тепловой цепи расчетной секции фольговой обмотки: P – источник тока с номиналом, равным мощности тепловыделений в секции; R<sub>z</sub>, R<sub>r</sub> – сопротивления теплопроводности концентраторов обмоток в осевом и радиальном направлениях; R<sub>k</sub> – сопротивление теплопроводности воздуха; VD<sub>k</sub> – тепловые сопротивления воздуха вдоль канала с учетом конвекции; R<sub>a</sub> – сопротивление теплоотдачи с поверхностей концентраторов с учетом конвекции и излучения; C – электроемкость с номиналом, равным теплоемкости расчетной секции

Главная проблема возникает при расчете величины R<sub>r</sub> с учетом распределения теплотерий. В случае однородной среды перепад температуры от точки с максимальной температурой до точки с координатой x можно определить как

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_m - T_x = \sum_{i=1}^N \Delta T_i = \sum_{i=1}^N \frac{p_i \Delta x}{\lambda S} = \frac{1}{\lambda S} \sum_{i=1}^N p_i \Delta x = \frac{1}{\lambda S} \int_0^{a/2} p x dx = \\ &= \frac{p}{\lambda S} \frac{x^2}{2} \Big|_0^{a/2} = \frac{p}{\lambda S} \frac{a^2}{8} = pa \frac{1}{8} \frac{a}{\lambda S} = \frac{pa}{2} \frac{1}{4} \frac{a}{\lambda S} = \frac{P}{2} \frac{1}{4} R_t = k \frac{P}{2} R_t \end{aligned} \quad (1)$$

где T<sub>m</sub> – максимальная температура в расчетной секции; T<sub>x</sub> – расчетная температура на расстоянии x от точки с максимальной температурой

максимальной температурой;  $N$  – количество витков в расчетной секции;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $S$  – площадь проводника в радиальном направлении;  $a$  – радиальная толщина расчетной секции;  $p$  – линейная плотность теплотерь;  $P$  – полные теплотери секции;  $k = 1/4$  – поправочный коэффициент;  $R_t$  – тепловое сопротивление секции, вычисленное при допущении об отсутствии в ней теплотерь и распространении теплового потока в одном направлении, вычисляемое по формуле

$$R_t = \frac{a}{\lambda S}. \quad (2)$$

Тепловой поток при одинаковой температуре на разных концах проводника, распределяется в равной мере на обе стороны.

Формула (1) получена при допущении о непрерывности и однородности среды расчетной секции. Так как расчетная секция состоит из  $N$  витков, то поправочный коэффициент  $k$  будет отличаться от предельного значения  $1/4$ . Проведенное исследование позволило построить зависимость  $k = f(N, d_{из}/d_{пр})$ , которая может быть использована при расчете  $R_t$ .

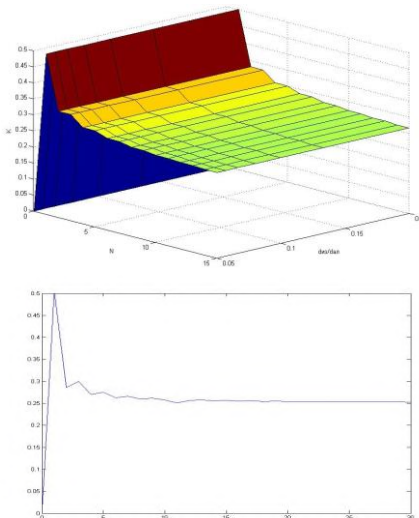


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $k$  от количества витков  $N$  в расчетной секции фольговой обмотки и отношения толщины изоляции  $k$  к толщине проводника  $d_{из}/d_{пр}$

### Литература

1. **РД 16 472-88.** Трансформаторы силовые сухие общего назначения. Тепловой расчет.
2. **РД 16 476-88.** Трансформаторы силовые масляные. Тепловой расчет систем охлаждения М и Д.
3. **Стулов А.В., Тихонов А.И.** Тепловой расчет обмоток сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов с использованием электрических схем замещения. - "Вестник ИГЭУ", 2012, Вып. 6, с. 40-43.
4. **Стулов А.В., Тихонов А.И.** Исследование тепловой модели обмоток силовых трансформаторов на основе электрической схемы замещения (XVII Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2013. - с.172-175.
5. **Тихонов А.И., Корнев И.А.** Библиотека для формирования и исследования моделей электрических цепей в динамических режимах / Свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. № 2013610691. Заявка № 2012660143, приоритет от 22.11.2012, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9.01.2013.

*Коростелев Константин Андреевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: korostelev.k@gmail.com

*Тихонов Андрей Ильич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: ait@dsn.ru

*Стулов Алексей Вадимович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: alxstl@mail.ru

УДК 621.313

И.А. ПАЙКОВ, аспирант,  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: komned37@yandex.ru, ait@dsn.ru

### **Анализ точности расчетов магнитного поля распределительных трансформаторов с использованием двухмерных моделей**

**Аннотация.** Исследована возможность использования при проектировании силовых трансформаторов двухмерной конечно-элементной модели магнитного поля. Исследование осуществлялось путем сравнения результатов расчета с результатами, полученными на 3D-модели.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, 3D-моделирование, плоскопараллельная модель магнитного поля.

I.A. PAIKOV, graduate student; A.I. TIKHONOV, Prof.

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34  
E-mail: komned37@yandex.ru, ait@dsn.ru

### **Analysis of the accuracy of calculations of the magnetic field distribution transformers using two-dimensional models**

**Abstract.** The possibility of use in the design of power transformers two-dimensional finite element model of the magnetic field. The study was carried out by comparing the calculation results with the results obtained in the 3D-model.

**Keywords:** finite element method, 3D-modeling, model plane-parallel magnetic field.

Одним из основных требований, предъявляемых к современному проектированию распределительных трансформаторов, является требование сокращения сроков проектирования при уменьшении партии изделий, выпускаемых по данному проекту. Так как стадия изготовления и исследования опытного образца при этом исключается, то это приводит к необходимости повышения адекватности и точности моделей, заложенных в подсистему поверочного расчета трансформатора. Кроме того, для оптимизации проекта или для расчета устройства в динамических режимах работы необходимо использовать модели с высоким быстродействием. Поэтому возникает актуальная проблема разработки моделей, позволяющих совместить в себе требования достижения точности расчета, характерной для полевых задач, при высоком быстродействии.

В настоящее время развитие компьютерных технологий позволяет достичь высокого быстродействия при расчете двумерных моделей физических полей. В частности, расчет двумерного магнитного стационарного поля в распределительном трансформаторе осуществляется за 0,1–1 с в зависимости от требуемой точности расчета. В то же время возникает сомнение в корректности расчета трансформатора в двумерной постановке, так как в случае трансформатора отсутствует плоскопараллельная или плоскомеридианная симметрия, наличие которых необходимо для сведения объемной полевой задачи к двумерной постановке. Однако расчет трансформатора в трехмерной постановке требует в тысячи раз большего расчетного времени, что существенно усложняет решение проектных задач.

Таким образом, была поставлена задача провести анализ возможности использования двумерных моделей для расчета магнитного поля распределительных трансформаторов. Для решения задачи использовалась система конечно-элементного моделирования Maxwell. Результаты расчета 3D-модели распределительного трансформатора ТМГ–1000–10/0,4 представлены на рис. 1. Расчет магнитного поля осуществлялся в режиме холостого хода при подаче напряжения на обмотку ВН. По результатам расчета определялся основной магнитный поток равный сумме потоков в нижнем и верхнем ядре трансформатора

$$\Phi = \Phi_{\text{верх.я}} + \Phi_{\text{ниж.я}} \quad (1)$$

Результаты расчета магнитного поля в 2D-модели распределительного трансформатора ТМГ-1000-10/0,4 представлены на рис. 2.

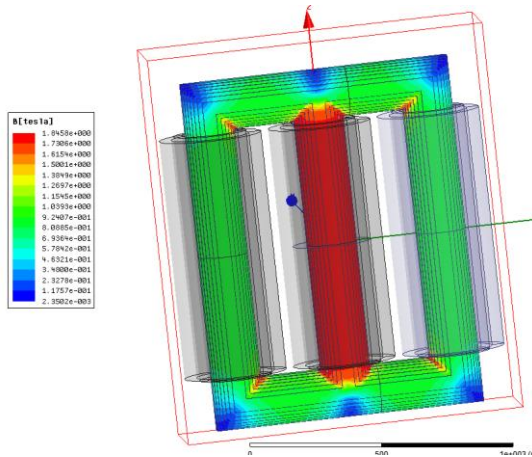


Рис. 1. 3D-модель распределительного трансформатора ТМГ-1000-10/0,4

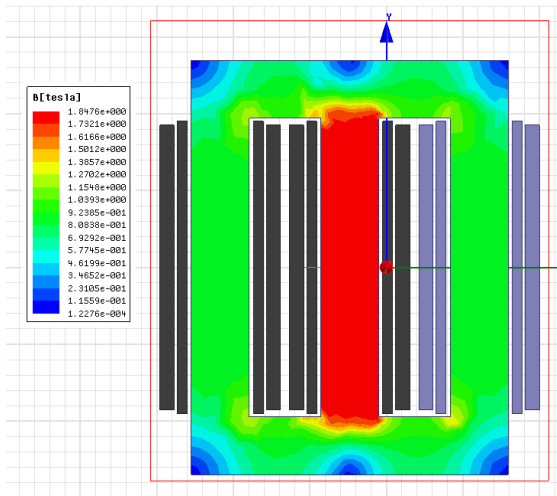


Рис. 2. 2D-модель распределительного трансформатора ТМГ-1000-10/0,4

Результаты расчета потока для 3D-модели и 2D-модели представлены в табл. 1. Известно, что при двухмерной постановке задачи расчет ведется на единицу длины в третьем измерении. 3D-модель повторяет размеры и габариты реального трансформатора, во всех трех измерениях, в связи с этим полученные значения потоков сильно отличаются. Для того чтобы 2D-модель соответствовала 3D необходи-

мо полученные значения привести друг к другу через коэффициент приведения.

**Таблица 1. Результаты расчет потоков распределительного трансформатора ТМГ-1000-10/0,4**

Поток	3D-модель	2D-модель	2D приведенная к 3D	Погрешность, %
Общий, Вб	0,0473645	0,3203133	0,04843813	2,26
Верхнее ярмо, Вб	0,023343	0,1601185	0,024213292	3,33
Нижнее ярмо, Вб	0,0234935	0,1601181	0,024213235	3,06
Рассеяние, Вб	0,0004402	0,0000767	0,0000116	97

Величина и распределение магнитного потока зависит от количества используемой стали, соответственно для того чтобы свести две модели нужно чтоб объем сердечников были равны

$$k_{пр} V_{сер.2D} = V_{сер.3D} \quad (2)$$

Определив объемы для моделей и выразив коэффициент приведения, получим

$$k_{пр} = \frac{S_{эф}}{b_{1п} l_m} \quad (3)$$

где  $S_{эф}$  – эффективное сечение стержня;  $b_{1п}$  - ширина 1 пакета стали сердечника;  $l_m$  - длина 2D-модели в третьем измерении.

В табл.1 приведены также результаты расчета погрешности вычислений. Для основного потока и потоков в ярах магнитопровода она не превышает 5% что говорит о высокой точности произведенного расчета и возможности использования двухмерной постановки задачи для определения распределения основного и рабочего потока в распределительных трансформаторах.

Что касается определения потока рассеяния как разность между основным потоком и рабочим, то погрешность его вычислений приближается к 100%. Такая точность расчета недопустима, но в данной ситуации трудно сказать, правильно ли рассчитывается поток рассеяния, так как его значения в 1000 раз меньше значений основного потока. В связи с этим определение такой малой величины не совсем корректно при данной постановке конечно-элементной задачи, как для трехмерной модели, так и для двухмерной. В настоящее время ведутся работы по разработке алгоритмов расчета потока рассеяния как для 3D-моделей, так и для 2D.

*Пайков Игорь Александрович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: komned37@yandex.ru

*Тихонов Андрей Ильич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: ait@dsn.ru



УДК 621.313

И.А. ПАЙКОВ, аспирант,  
И.А. РОЗИН, к.ф.-м.н., доцент,  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор  
А.С. ШМЕЛЕВ, соискатель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

*E-mail: komned37@yandex.ru, ait@dsn.ru, schmeloff@yandex.ru*

### **Модель для расчета индуктивности рассеяния обмоток распределительных трансформаторов и токоограничивающих реакторов с использованием эллиптических интегралов Лежандра**

**Аннотация.** Рассмотрена математическая модель, построенная с использованием полных эллиптических интегралов Лежандра первого и второго рода, позволяющая рассчитывать потоки и индуктивности рассеяния обмоток трансформаторов и токоограничивающих реакторов при заданной картине распределения плотности тока.

**Ключевые слова:** эллиптические интеграла Лежандра, индуктивность рассеяния обмоток трансформатора, численное моделирование.

I.A. PAIKOV, graduate student; I.A. ROZIN, Ph.D., associate professor;  
A.I. TIKHONOV, Prof.; A.S. SHMELEV, applicant

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34

*E-mail: komned37@yandex.ru, ait@dsn.ru, schmeloff@yandex.ru*

### **Model for calculating the leakage inductance of the windings of distribution transformers and current-limiting reactors using elliptic integrals Legendre**

**Abstract.** A mathematical model is constructed using the complete elliptic integrals of Legendre first and second kind, which allows to calculate flow and leakage inductance of transformer windings and current limiting reactors at a given current density distribution pattern.

**Keywords:** elliptic integrals Legendre, the leakage inductance of the transformer obmotok, numerical modeling.

Одной из актуальных проблем при моделировании работы трансформатора или токоограничивающего реактора особенно в динамическом режиме является проблема расчета индуктивности рассеяния обмоток. Обычно для этого используют формулу, приведенную в [1],

$$L_s = \frac{1,256k_p \omega l_{cp}}{10^8 h_u} \left( \frac{\delta_u}{2} + \frac{A}{3} \right), \quad (1)$$

где  $\omega$  - число витков обмотки;  $h_n$  – высота обмотки вдоль направления потока рассеяния;  $\delta_n$  – расстояние между обмотками;  $A$  – толщина обмотки;  $l_{cp}$  - средняя длина витка обмотки;  $k_p$  - опытный коэффициент, зависящий от типа намотки обмотки и данных сердечника.

Однако данная формула оказывается непрозрачной и весьма приближенной. В частности, данная формула совершенно неприменима при расчете фольговой обмотки с учетом вытеснения тока. Поэтому в [2, 3] предлагается новый подход к расчету индуктивности рассеяния обмоток, построенный на основе условного разбиения каждого концентратора обмотки на расчетные секции с последующим расчетом магнитного поля, создаваемого токами этих расчетных секций, вычислением матрицы индуктивностей и, наконец, расчетом электрической схемы замещения на переменном токе, из которого определяется индуктивность обмотки. Главная проблема, возникающая при этом состоит в необходимости расчета матрицы индуктивностей, для чего использовалась библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля. Это неоправданно усложняет задачу, тем более что она может быть решена путем комбинирования аналитических и численных методов.

Аналитический метод расчета магнитного поля, создаваемого обмоткой, может быть основан на идее суперпозиции полей, созданных соосными кольцевыми контурами с током. При этом поле кольцевого контура с током во всех точках пространства может быть рассчитано с использованием полных эллиптических интегралов Лежандра. Так, составляющие индукции магнитного поля от контура с током в локальной цилиндрической системе координат  $(r, z)$ , связанной с центром контура и осью  $z$ , совпадающей с осью контура, находятся по формулам [4, 5]

$$B_z(r, z) = \frac{\mu_0 i_0}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left( K(k) + \frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(k) \right), \quad (1)$$

$$B_r(r, z) = \frac{\mu_0 i_0}{2\pi} \frac{z}{r \sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left( -K(k) + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(k) \right), \quad (2)$$

$$B(r, z) = \sqrt{B_z^2(r, z) + B_r^2(r, z)}, \quad (3)$$

где  $a$  – радиус рамки с током;

$$k = \sqrt{\frac{4ar}{(a+r)^2 + z^2}} \quad (4)$$

– модуль эллиптического интеграла;

$$K(k) \approx \frac{\pi}{2} \cdot \left[ 1 + \sum_{n=1}^N \left( \frac{\prod_{i=1}^n (2i-1)}{2^n \cdot n!} \right)^2 \cdot k^{2n} \right] \quad (5)$$

– полный нормальный эллиптический интеграл Лежандра 1-го рода [5];

$$E(k) \approx \frac{\pi}{2} \cdot \left[ 1 - \sum_{n=1}^N \left( \frac{\prod_{i=1}^n (2i-1)}{2^n \cdot n!} \right)^2 \cdot \frac{k^{2n}}{2n-1} \right] \quad (6)$$

– полный нормальный эллиптический интеграл Лежандра 2-го рода [5];  
 $N$  – количество элементов ряда, которое для достижения точности, достаточной в инженерных задачах, можно принять равным 5.

На рис. 1 представлена картина магнитного поля, созданного круговым током в сечении, проходящем через ось рамки  $z$  и произвольно выбранный радиус  $r$ .

Магнитный поток, созданный  $i$ -м контуром, пронизывающий  $j$ -й контур радиусом  $r_j$ , удаленный от  $i$ -го контура по оси на расстояние  $z$ , определяется численным интегрированием

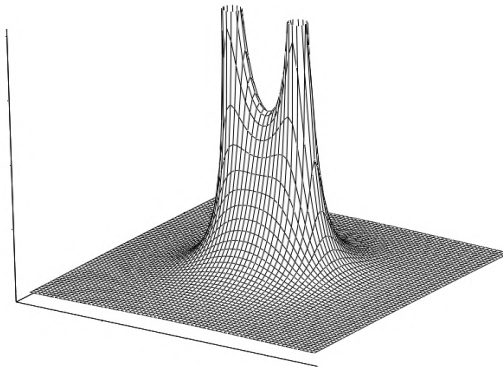


Рис. 1. Распределение магнитной индукции от рамки с током

$$\Phi_{ji} = \int_0^{r_i} 2\pi r B_z(r, z) dr \approx \sum_{k=0}^{r_i/\Delta r - 1} 2\pi B_z(r, z) (\Delta r)^2 \left( \frac{1}{2} + k \right). \quad (7)$$

Взаимная индуктивность между  $j$ -м и  $i$ -м контурами определяется как

$$L_{ji} = w_j \frac{\partial \Phi_{ji}}{\partial i_i}. \quad (8)$$

После расчета матрицы индуктивностей [L] по методу контурных токов рассчитываются токи в контурах

$$[\dot{i}] = [L]^{-1} \cdot [\dot{U}], \quad (9)$$

где  $[\dot{U}]$  – матрица напряжений на контурах, а затем индуктивность всей обмотки

$$L = \frac{U/I}{2\pi f}, \quad (10)$$

где I – ток всей обмотки.

В отличие от [2, 4] предложенный алгоритм расчета может быть реализован обычными средствами программирования без привлечения библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля, что существенно упрощает и ускоряет алгоритм расчета и позволяет реализовать его обычными средствами программирования, что полезно, например, при создании расчетных подсистем САПР.

#### Литература

1. **Цыкин Г.С.** Трансформаторы низкой частоты. Теория, расчет и конструирование. – М.: Связьиздат. 1955. – 424 с.
2. **Тихонов А.И., Иванов А.В.** Использование библиотеки моделирования магнитного поля при расчете реактора из алюминиевой ленты. - "Вестник ИГЭУ", 2009, Вып. 3, с. 25-28.
3. **Тихонов А.И., Иванов А.В.** Расчет и производство токоограничивающих реакторов из алюминиевой ленты / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 116 с.
4. **Тихонов А.И., Шмелев А.И., Розин Е.Г.** Разработка метода численного моделирования магнитного поля на основе классических положений электромагнетизма. - Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2014, Вып. 4, с. 45-48.
5. **Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф.** Специальные функции. Формулы, графики, таблицы / пер. с 6-го нем. перераб. изд.; под ред. Л.И. Седова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977. – 342 с.

*Пайков Игорь Александрович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: komned37@yandex.ru

*Розин Евгений Геннадьевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: admin@fizika.ispu.ru

*Тихонов Андрей Ильич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: ait@dsn.ru

*Шмелев Александр Сергеевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: schmeloff@yandex.ru

УДК 621.313

А.С. ШМЕЛЕВ, соискатель,  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: schmeloff@yandex.ru, ait@dsn.ru

## Имитационная модель электрического и магнитного полей на основе уравнения диффузии

**Аннотация.** Приведены уравнения электрического и магнитного полей, а также уравнения диффузии. Отмечен факт изоморфизма данных уравнений. Приведены формулы для расчета масштабных коэффициентов, позволяющих пересчитать результаты имитации диффузии частиц в величины, характеризующие электрическое и магнитное поля.

**Ключевые слова:** первая теорема подобия, имитационное моделирование, метод Монте-Карло, численное моделирование электрического и магнитного полей.

A.S. SHMELEV, applicant; A.I. TIKHONOV, Prof.

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34. E-mail: schmeloff@yandex.ru, ait@dsn.ru

## Simulation model of the electric and magnetic fields on the basis of the diffusion equation

**Abstract.** The equations of electric and magnetic fields, as well as the diffusion equation. While noting the isomorphism of these equations. The formulas for calculating the scale factors that allow simulation results to recalculate the diffusion of particles in quantities that characterize the electric and magnetic fields.

**Keywords:** first theorem of similarity, simulation, Monte Carlo numerical simulation of electric and magnetic fields.

Метод имитации физических полей рассмотрим на примере двумерной плоскопараллельной задачи. Докажем, что уравнение диффузии частиц, совершающих броуновское движение, изоморфно с уравнениями электрического и магнитного полей.

Пусть частицы рождаются в элементах (ячейках) площадью  $S'$ . Интенсивность зарождения частиц определяется величиной

$$\dot{M} = \int_{S'} \dot{C} dS', \quad (1)$$

где  $\dot{C}$  – скорость изменения концентрации, равная суммарной массе частиц, нарождающихся в единицу времени на единичной площади.

Так как модель не должна быть точной копией оригинала (например, идеального газа), то броуновское движение частиц можно

несколько идеализировать. В частности, скорости частиц и их длины свободного пробега можно принять одинаковыми. Кроме того, примем, что частицы могут иметь как положительные, так и отрицательные массы  $M_i$ .

Уравнение диффузии в дифференциальной форме в двухмерной постановке задачи имеет вид

$$\vec{J} = -D\vec{\nabla}C = -D\left(\frac{\partial C}{\partial x'}\vec{i} + \frac{\partial C}{\partial y'}\vec{j}\right) = J_x\vec{i} + J_y\vec{j}, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;  $C$  – концентрация вещества;  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  – линейные размеры в модельной системе координат;  $J_x$ ,  $J_y$  – проекции вектора плотности потока частиц на оси координат.

Кроме того, если в модели присутствуют источники, через которые частицы поступает в систему, то справедлив закон Гаусса

$$\oint_{L'} \vec{J} d\vec{L}' = \int_{S'} \dot{C} dS' = \dot{M}, \quad (3)$$

или в дифференциальной форме в двухмерной задаче

$$\dot{C} = \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \frac{\partial J_x}{\partial x'} + \frac{\partial J_y}{\partial y'}. \quad (4)$$

Плотность потока частиц через произвольный отрезок  $dL'$  можно вычислить как

$$\vec{J} = \frac{1}{dL' \cdot dt} \left( \sum_{i=1}^{dN_+} M_i - \sum_{j=1}^{dN_-} M_j \right) \vec{n}, \quad (5)$$

где  $dN_+$  – количество частиц, прошедших через элементарную поверхность  $dS'$  за время  $dt$  в направлении нормали  $\vec{n}$  к поверхности  $dS'$ ;  $dN_-$  – количество частиц, прошедших через элементарную поверхность  $dS'$  за время  $dt$  в направлении, обратном к направлению нормали  $\vec{n}$ .

Из модели можно определить количество частиц  $dN_{ij}$ , выходящих из  $i$ -й элементарной области (ячейки) модели в  $j$ -ю через сторону ячейки  $dL'_{ij}$  за время  $dt$ , и количество частиц  $dN_{ji}$ , входящих в  $i$ -ю ячейку из  $j$ -й через данный участок за время  $dt$  (рис. 1). Проекции вектора плотности потока частиц на оси  $x$  и  $y$  для  $i$ -й ячейки

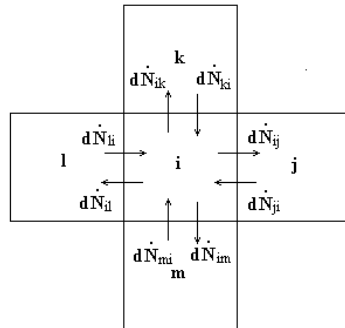


Рис. 1. Иллюстрация диффузного метода

$$J_{xi} = \frac{1}{2}(J_{ji} + J_{ij}) = \frac{1}{2dL'_{ij}} \cdot dt \left( \sum_{p=1}^{dN_{ji}} M_p - \sum_{q=1}^{dN_{ij}} M_q \right) + \frac{1}{2dL'_{ii}} \cdot dt \left( \sum_{p=1}^{dN_{ji}} M_p - \sum_{q=1}^{dN_{ij}} M_q \right). \quad (6)$$

$$J_{yi} = \frac{1}{2}(J_{mi} + J_{ik}) = \frac{1}{2dL'_{im}} \cdot dt \left( \sum_{p=1}^{dN_{mi}} M_p - \sum_{q=1}^{dN_{ik}} M_q \right) + \frac{1}{2dL'_{ik}} \cdot dt \left( \sum_{p=1}^{dN_{mi}} M_p - \sum_{q=1}^{dN_{ik}} M_q \right). \quad (7)$$

Переход частицы с массой  $M_i$  из  $k$ -й области в  $i$ -ю при  $D'_i > D'_k$ , где  $D'$  – коэффициент диффузии среды, сопровождается рождением новой частицы. При этом новая народившаяся частица наделяется массой

$$M'' = \frac{D'_k}{D'_i} M. \quad (8)$$

Исходная частица отражается от границы раздела сред и остается в  $k$ -й области. Ее масса при этом уменьшается до величины

$$M'_i = M_i - M''. \quad (9)$$

Таким образом, среды с высоким  $D$  оказываются барьером на пути частиц. Если же частица переходит в среду с более низким значением  $D$ , то это аналогично «водопаду».

Если известны значения  $D$  в ячейках расчетной области, можно по (3.84) определить величину концентрации частиц в узлах сетки:

$$J_x = -D \frac{\partial C}{\partial x'}, \quad J_y = -D \frac{\partial C}{\partial y'}, \quad (10)$$

из чего следует

$$C = -\frac{1}{D} \int_0^{x'} J_x dx' = -\frac{1}{D} \int_0^{y'} J_y dy'. \quad (11)$$

Приведенный алгоритм идеализированного процесса диффузии частиц описывается уравнениями, которые изоморфны с уравнениями электрического и магнитного полей в плоскопараллельной постановке:

1) поле концентрации частиц

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \frac{\partial J_x}{\partial x'} + \frac{\partial J_y}{\partial y'} = \dot{C}, \quad \vec{J} = -D \vec{\nabla} C = -D \frac{\partial C}{\partial x'} \vec{i} - D \frac{\partial C}{\partial y'} \vec{j}; \quad (12)$$

2) электрическое поле

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} = \sigma, \quad \vec{D} = -\varepsilon \vec{\nabla} \varphi = -\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} - \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j}; \quad (13)$$

3) магнитное поле (в двухмерной задаче)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}' = \frac{\partial H'_x}{\partial x} + \frac{\partial H'_y}{\partial y} = j, \quad \vec{H}' = -v \vec{\nabla} A = -v \frac{\partial A}{\partial x} \vec{i} - v \frac{\partial A}{\partial y} \vec{j}, \quad (14)$$

где  $H'_x = -H_y$ ,  $H'_y = H_x$ .

В соответствии с теорией подобия независимые масштабы подобия по источникам поля можно вычислить следующим образом:

1) для электрического поля

$$m_{\sigma} = \frac{\dot{C}}{\sigma}, \quad m_{\tau} = \frac{\dot{M}}{\tau}, \quad m_{\varphi} = \frac{C}{\varphi}, \quad m_D = \frac{J}{D}, \quad m_{\varepsilon} = \frac{D}{\varepsilon}; \quad (15)$$

2) для магнитного поля

$$m_j = \frac{\dot{C}}{j}, \quad m_l = \frac{\dot{M}}{l}, \quad m_A = \frac{C}{A}, \quad m_H = \frac{J}{H}, \quad m_v = \frac{D}{v}. \quad (16)$$

Кроме того, к независимым масштабам подобия относим пространственный масштаб:

$$m_L = \frac{L}{L_0} = \sqrt{\frac{S}{S_0}} = \sqrt[3]{\frac{V}{V_0}}. \quad (17)$$

По первой теореме подобия можно вывести и записать выражения для зависимых масштабов и величин:

1) для электрического поля

$$m_D = \frac{m_{\varepsilon}}{m_L} = m_L m_{\sigma}, \quad m_E = \frac{m_D}{m_{\varepsilon}}, \quad m_{\varphi} = \frac{m_L m_D}{m_{\varepsilon}}, \quad \bar{D} = \frac{\bar{J}}{m_D}, \quad \bar{E} = \frac{1}{m_E \varepsilon} \bar{D}, \quad \varphi = \frac{C}{m_{\varphi}}; \quad (18)$$

2) для магнитного поля (в двухмерной постановке)

$$m_H = \frac{m_l}{m_L} = m_L m_j, \quad m_B = \frac{m_H}{m_v}, \quad m_A = \frac{m_L m_H}{m_{\mu}}, \quad \bar{H} = \frac{\bar{J}}{m_H}, \quad \bar{B} = \frac{1}{m_H v} \bar{H}, \quad A = \frac{C}{m_A}. \quad (19)$$

*Шмелев Александр Сергеевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: schmeloff@yandex.ru

*Тихонов Андрей Ильич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: ait@dsn.ru



УДК 621.313

Д.М. СЕВРЮГОВ, соискатель,  
П.В. КУЛЕШОВ, магистрант,  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: zeron88@yandex.ru, pashok\_kul@mail.ru, ait@dsn.ru*

### **Адаптация библиотеки конечно-элементного моделирования физических полей к решению задачи расчета теплового поля**

**Аннотация.** Приведены результаты модернизации библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля к решению задачи расчета стационарного теплового поля в твердых телах.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, численный расчет магнитного поля, численный расчет теплового поля.

D.M. SEVRYUGOV, applicant; P.V. KULESHOV, undergraduate,  
A.I. TIKHONOV, Prof.

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34

*E-mail: zeron88@yandex.ru, pashok\_kul@mail.ru, ait@dsn.ru*

### **Adapting the library of finite element modeling of physical fields to the problem of calculating the thermal field**

**Abstract.** The results of the modernization of the library of finite element modeling of the magnetic field to the solution of the problem of calculating the stationary thermal field in solids.

**Keywords:** finite element method, numerical calculation of the magnetic field, the numerical calculation of the thermal field.

Уравнения физических полей обладают свойством изоморфизма, что позволяет использовать для их решения единый математический аппарат. В частности в ИГЭУ была разработана библиотека конечно-элементного моделирования физических полей в двумерной постановке, которая в настоящее время используется, главным образом, при моделировании магнитных квазистационарных полей [1, 2]. А тоже время при незначительной доработке она может быть использована при решении задач расчета стационарного теплового поля [3].

Тепловое поле в твердых телах в двумерном варианте задачи описывается уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + p = 0, \quad (1)$$

где  $\lambda_x, \lambda_y$  – удельные теплопроводности материала по осям координат;  $T$  – температура;  $p$  – удельные теплототери.

В методе конечных элементов решение уравнения (2) заменяется поиском минимума функционала, который имеет вид

$$Q = \frac{1}{2} \iint_{xy} \left( \lambda_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 - 2pT \right) dx dy + \frac{1}{2} \int_G \alpha T^2 dG \approx$$

$$\approx \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{N_\Delta} \left( \frac{\lambda_p}{4S_p} \left[ \sum_{s=k,l,m} \sum_{q=k,l,m} [(\lambda_{px} b_{ps} b_{pq} + \lambda_{py} c_{ps} c_{pq}) T_s T_q] \right] - 2p_p S_p T_p + \sum_{\substack{q=k,l,m \\ s=l,m,k}} [(\alpha_{pqs} T_{pqs}^2) G_{pqs}] \right), \quad (2)$$

где  $N_\Delta$  – общее количество треугольных элементов в конечно-элементной сетке;  $b, c$  – коэффициенты геометрии элементов;  $\alpha_{pqs}$  – коэффициент теплоотдачи со стороны  $p$ -го элемента между  $q$ -м и  $s$ -м узлами;  $G_{pqs}$  – длина стороны  $p$ -го элемента между  $q$ -м и  $s$ -м узлами; средний квадрат превышения температуры на элементе границы расчитывается как

$$T_{pqs}^2 = \frac{1}{3} (T_q^2 + T_s^2 + T_q T_s). \quad (3)$$

Поскольку переменными здесь являются значения  $T$  в вершинах треугольников, минимум функционала можно найти, решая систему уравнений

$$\sum_{p=1}^{N_\Delta} \frac{\partial Q_p}{\partial T_i} = 0 \Big|_{i=1..N}, \quad (4)$$

где  $N$  – число узлов конечно-элементной сетки, совпадающее в данном случае с числом уравнений.

Система уравнений (4) имеет вид

$$\mathbf{G} \mathbf{T} = \mathbf{P}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{T}$  – вектор неизвестных температур в узлах конечно-элементной сетки;  $\mathbf{P}$  – вектор значений теплототерь в узлах;  $\mathbf{G}$  – квадратная матрица нелинейных коэффициентов.

В соответствии с методом Ньютона решение нелинейной системы уравнений (5) осуществляется в ходе итерационного процесса

$$\mathbf{T}_{t+1} = \mathbf{T}_t + \alpha_t \mathbf{D}_t, \quad (6)$$

где  $0 < \alpha_t \leq 1$  – коэффициент релаксации.

То есть задача сводится к расчету вектора приращений  $\mathbf{D}_t$ . Для этого на каждом шаге итераций решается линейная система уравнений

$$\mathbf{J}_t \mathbf{D}_t = -\mathbf{F}_t, \quad (7)$$

где  $\mathbf{J}$  – матрица Якоби;  $\mathbf{F}$  – вектор невязок.

Вектор невязок строится на основе (5)

$$\mathbf{F}_t = \mathbf{G}_t \mathbf{T}_t - \mathbf{P}_t. \quad (8)$$

Элементы матрицы  $\mathbf{F}$  определяются как

$$F_i = \sum_{p=1}^{N_A} \frac{\partial Q_p}{\partial T_i} = \sum_{p=1}^{N_A} \left( \frac{1}{4S_p} \sum_{q=k,l,m} [(\lambda_{px} b_{pi} b_{pq} + \lambda_{py} c_{pi} c_{pq}) T_q] - \frac{1}{3} p_p S_p + \right. \\ \left. + \sum_g \left[ \alpha_{pig} (2T_i + T_g) \frac{G_{pig}}{6} \right] \right)_{i=1..N}. \quad (9)$$

где  $\lambda_{px} = \lambda_{px}(T_p)$  и  $\lambda_{py} = \lambda_{py}(T_p)$  задаются в виде аппроксимированной кубическими сплайнами табличной зависимости удельной теплопроводности материала от температуры внутри  $p$ -го элемента.

Член матрицы Якоби при постоянных теплопотерях

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial T_j} = \sum_{p=1}^{p=N_A} \frac{1}{4S_p} \left[ \sum_{q=k,l,m} \left[ \left( \frac{\partial \lambda_{px}}{\partial T_p} b_{pi} b_{pq} + \frac{\partial \lambda_{py}}{\partial T_p} c_{pi} c_{pq} \right) \frac{T_q}{3} \right] + \right. \\ \left. + (\lambda_{px} b_{pi} b_{pj} + \lambda_{py} c_{pi} c_{pj}) \right]_{i=1..N, j=1..N}, \quad (10)$$

где  $g$  – номера узлов  $p$ -го элемента, которые наряду с  $i$ -м узлом принадлежат границе с заданным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_{pig}$ .

В осесимметричной постановке задачи

$$F_i = \sum_{p=1}^{N_A} \frac{\partial Q_p}{\partial \vartheta_i} = \sum_{p=1}^{N_A} \left( \frac{1}{4S_p r_p} \sum_{q=k,l,m} [(\lambda_{px} b_{pi} b_{pq} + \lambda_{py} c_{pi} c_{pq}) \vartheta_q] - \frac{1}{3} p_p S_p + \right. \\ \left. + \sum_g \frac{2}{r_i + r_g} \left[ \alpha_{pig} (2\vartheta_i + \vartheta_g) \frac{G_{pig}}{6} \right] \right)_{i=1..N}, \quad (11)$$

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial \vartheta_j} = \sum_{p=1}^{p=N_A} \left[ \frac{1}{4S_p r_p} \sum_{q=k,l,m} \left[ \left( \frac{\partial \lambda_{px}}{\partial T_p} b_{pi} b_{pq} + \frac{\partial \lambda_{py}}{\partial T_p} c_{pi} c_{pq} \right) \frac{T_q}{3} \right] + \right. \\ \left. + (\lambda_{px} b_{pi} b_{pj} + \lambda_{py} c_{pi} c_{pj}) + \left( \frac{1}{r_i + r_j} \frac{\partial \alpha_{pij}}{\partial T_p} (2\vartheta_i + \vartheta_j) + \partial \alpha_{pij} \right) \frac{G_{pij}}{6} \right]_{i=1..N, j=1..N}. \quad (12)$$

Задача расчета теплового поля может быть решена, если хотя бы в одном узле на границе расчетной области задано граничное условие первого рода или хотя бы между одной парой узлов задано условие третьего рода.

Построение конечно-элементной модели, формирование и решение системы уравнений, описывающих тепловое поле, осуществляется с использованием математического аппарата, который был разработан ранее

для моделирования магнитного поля. Благодаря изоморфизму уравнения (1) и уравнения Пуассона для двумерного стационарного магнитного поля, изменения в программном коде библиотеки моделирования физических полей коснулись лишь вычисления элемента вектора невязок и матрицы Якоби. Данные изменения вызваны как необходимостью учета анизотропии свойств материалов, учет которой ранее отсутствовал в аппарате библиотеки, так и учета граничных условий третьего рода.

### Литература

1. **Тихонов А.И., Булатов Л.Н.** Платформенезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. –№ 2011614852. Заявка № 2011613040, приоритет от 28.04.2011, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2011.
2. **Тихонов А.И., Казаков Ю.Б.** Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объектах электромеханики / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 80 с.
3. **Тихонов А.И., Севрюгов Д.М., Ли-Орлов В.К.** Численное моделирование термодинамических систем / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 100 с.

*Севрюгов Денис Михайлович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: zeron88@yandex.ru

*Кулешов Павел Владимирович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: pashok\_kul@mail.ru

*Тихонов Андрей Ильич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: ait@dsn.ru

УДК 621.313

А.С. ЗАЙЦЕВ, аспирант;  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

## Быстродействующая подсистема оптимизации САПР распределительных трансформаторов

**Аннотация.** Описано применение комбинированного алгоритма для подсистемы оптимизации трансформатора. Наибольшая эффективности применения комбинированного метода достигается при решении сложных оптимизационных задач с дискретной многоэкстремальной целевой функцией.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, САПР, подсистема оптимизации, генетические алгоритмы, метод деформируемого многогранника.

A.S. ZAITSEV, graduate student; A.I. TIKHONOV, Prof.

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34. E-mail: *as\_zaitsev@mail.ru, ait@dsn.ru*  
**Rapid CAD subsystem optimization of distribution transformers**

**Abstract.** The application of a combined algorithm for optimizing transformer subsystem. The highest efficiency of the combined method is achieved in solving complex optimization problems with discrete Multiple-function.

**Keywords:** power transformer, CAD subsystem optimization, genetic algorithms, flexible polyhedron method.

Развитие технологии производства распределительных трансформаторов привело к внедрению трансформаторов с обмотками из ленты, гофрированных баков герметичного исполнения, сухих трансформаторов с литыми обмотками и т.п. Это потребовало совершенствования существующих и разработки новых математических моделей [1].

В сложившихся условиях важнейшей задачей является разработка САПР с подсистемой оптимизационных расчетов способной взаимодействовать с современными математическими моделями. Результатом работы подсистемы оптимизации является проект трансформатора с минимальной себестоимостью.

Формулировка оптимизационной задачи сводится к математическому описанию объекта и осложняется рядом факторов, а именно: целевая функция является многоэкстремальной, овражной и дискретной.

Решение многоэкстремальных задач сводится к поиску глобального экстремума функции. Подобные задачи хорошо изучены и освещены в литературе [2, 4-6]. Универсального метода (алгоритма), способного точно определять глобальный экстремум таких функций не существует. Достаточной точности можно достичь лишь разработкой специализированного под конкретную задачу алгоритма.

Решение задач с дискретностью входных данных (аргументов) функции описано в [2, 3]. В большинстве случаев предлагается приведение дискретных функций к непрерывному виду, однако, это не всегда возможно и ведет к искажению результатов и необходимости последующей обработки результатов оптимизационных расчетов.

Наиболее сложной является проблема овражности функции [3]. Оптимизация такого объекта, как трансформатор сводится к работе именно в условиях овражности исследуемой функции.

Специализированные методы позволяют работать с функциями, решая лишь одну из описанных задач. Для решения всех поставленных задач предлагается использовать эволюционные алгоритмы [4], коэволюционные алгоритмы [5] и генетические алгоритмы (ГА) [6]. Исследования показали [7], что даже при работе с функциями двух переменных, при имитации многоэкстремальности, дискретности и овражности требуется создание определенной, подходящей под конкретную задачу,

модели ГА (настройка ГА), либо создание самонастраивающихся ГА. Другим вариантом является объединение достоинств ГА с традиционными методами оптимизации, например, с симплекс-методом.

Так, был разработан комбинированного алгоритма оптимизации, в котором сочетаются достоинства ГА и симплекс-метода. Разработана модель параллельного ГА в одной из подпопуляций которого лучшая особь обучается алгоритмом Нелдера-Мида.

Для тестирования полученной модели был выбран распределительный трансформатор, целевая функция которого имеет на входе двенадцать аргументов. Выбор аргументов осуществляется из произвольного множества описывающих объект величин. Количество аргументов является достаточным для определения объекта и для учета параметрических и критериальных ограничений.

Важной частью работы оптимизационных алгоритмов является определение области допустимых значений, которая формируется исходя из параметрических и критериальных ограничений. Функция ограничений, описывающая область допустимых значений является нелинейной.

Нелинейность целевой функции и функции ограничений приводят к необходимости организации этапа отбора особей в начальную популяцию. Принцип отбора особей на подготовительном этапе описан в [7].

На рис. 1 представлена структура комбинированного алгоритма оптимизации.

На рис. 2 и рис. 3 показано, что применение комбинированного алгоритма позволяет выйти на оптимальное значение целевой функции на 65 % быстрее. Следует иметь ввиду, что выигрыш в 65 % не является постоянным вследствие особенностей работы ГА, однако это позволяет сделать выводы об эффективности применения комбинированного метода при решении сложных оптимизационных задач (обратных задач).

Разработанная подсистема оптимизации интегрирована в единую САПР распределительных трансформаторов. Результаты работы подсистемы сравнивались с результатами натурных исследований физических образцов и приемо-сдаточных испытаний трансформаторов в испытательной лаборатории ЗАО «Трансформер».

По результатам работы сделаны выводы о возможности удешевления активной части трансформаторов. В настоящее время в производство запущена опытная партия распределительных трансформаторов ТМГ 25 кВА 10 кВ со сниженной на 10% себестоимостью. Получены протоколы приемо-сдаточных испытаний подтверждающих соответствие расчетных и экспериментальных данных в пределах допустимой погрешности отклонения контролируемых параметров. Проект трансформатора оптимизирован при помощи рассмотренной выше подсистемы оптимизации.

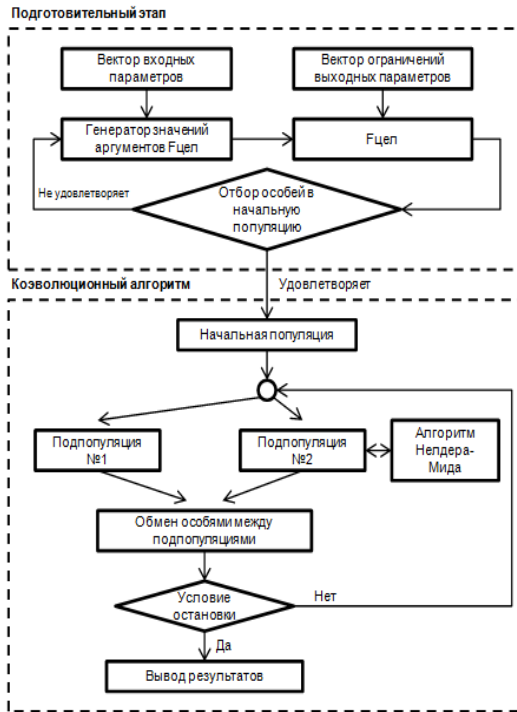


Рис. 1. Структура комбинированного алгоритма оптимизации

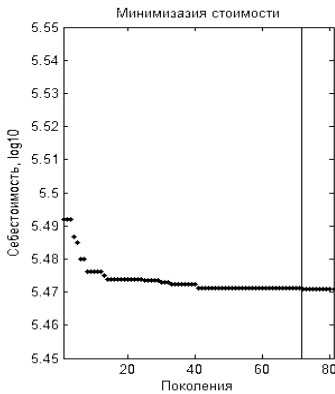


Рис. 2. Процесс минимизации целевой функции трансформатора ГА

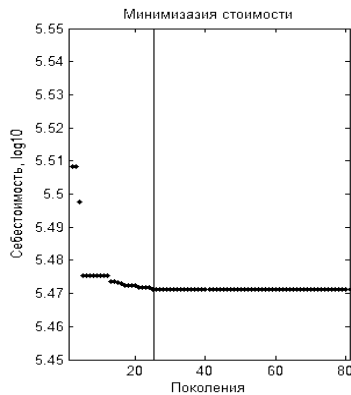


Рис. 3. Процесс минимизации целевой функции трансформатора комбинированным алгоритмом

### Литература

1. **Стулов А.В., Корнев И.А., Тихонов А.И.** Параметрическая генерация и расчет электрической схемы замещения тепловых процессов в обмотках из ленты сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов в стационарных режимах // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 47–51.
2. **Пантелеев А.В.** Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высш. шк., 2002.
3. **Ларичев О.И.** Методы поиска локального экстремума овражных функций. – М.: Наука, 1989.
4. **Каширина И.Л.** Введение в эволюционное моделирование. – Воронеж, 2007.
5. **Жукова М.Н.** Козволюционный алгоритм решения сложных задач оптимизации. – Красноярск: СибГАУ, 2004.
6. **Панченко Т.В.** Генетические алгоритмы. – Астрахань: Астраханский Университет, 2007.
7. **Зайцев А.С., Тихонов А.И.** Генетический алгоритм, как метод поиска экстремума функций различной сложности (Энергия-2013): Материалы междунаро. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2013.

*Зайцев Алексей Сергеевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: as\_zaitsev@mail.ru

*Тихонов Андрей Ильич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: ait@dsn.ru

УДК 621.313

И.В. ТРОФИМОВИЧ, аспирант,  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: i.trofimovich@mail.ru, ait@dsn.ru

### **Разработка САПР трансформаторов с параметрической генерацией конструкторской и технологической документацией**

**Аннотация.** Описана САПР трансформаторов, реализованная с использованием современных доступных математических пакетов. По результатам расчета параметрически генерируется 3D-модель трансформатора, по которому автоматически строится комплект чертежей. В отличие от аналогичных САПР, разработанная система является легковесной.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, САПР, математические пакеты, параметризация построения чертежей.



I.V. TROFIMOVICH, graduate student; A.I. TIKHONOV, Prof.

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34. E-mail: i.trofimovich@mail.ru, ait@dsn.ru

## CAD design of transformers with parametric generation of design and technological documentation

**Abstract.** The CAD transformers, implemented using modern mathematical packages available. According to the results of calculation of a parametrically generated 3D-model of the transformer, by which automatically builds a set of drawings. Unlike similar CAD-designed system is lightweight.

**Keywords:** power transformer, CAD, mathematical packages, parameterization of construction drawings.

Одним из требований к современным САПР является требование максимальной автоматизации конструкторско-технологических работ. Поэтому в состав САПР обычно помимо САЕ-систем, предназначенных для автоматизации инженерных расчетов, входят САД-системы, позволяющие автоматизировать чертежные работы. К числу наиболее популярных в России можно отнести такие САД-системы, как SolidWorks, AutoCad и т.п. Как правило данные системы позволяют осуществлять параметризацию 3D-моделей и автоматизацию построения чертежей по заданным шаблонам. Это позволяет существенно разгрузить конструктора.

Для унификации способа передачи данных из расчетной подсистемы САПР в САЕ-систему обычно используется Excel. Кроме того, Excel может использоваться и для реализации собственно инженерных расчетов. Однако ввиду слабого математического обеспечения Excel, рационально комбинировать его возможности с математическим пакетом MatLab посредством интерфейса ExelLink, что позволяет комбинировать возможности Excel и MatLab.

Внешний вид САПР распределительных трансформаторов показан на рис. 1. Система позволяет рассчитывать и оптимизировать сухие и масляные 3-х фазные 2-х обмоточные трансформаторы мощностью до 10000 кВА, класса напряжения до 35 кВ. Масляные трансформаторы выполняются в гофробаке. Сухие трансформаторы выполняются с литой обмоткой высшего напряжения (ВН). Обмотки низшего напряжения (НН) могут быть выполнены из алюминиевого или медного прямоугольного провода (слоевые или винтовые) или фольги. Обмотки ВН могут быть выполнены из круглого или алюминиевого или медного прямоугольного провода (слоевые) или фольги с осевыми или радиальными каналами. Магнитная система выполняется из электротехнической стали (ЭТС) толщиной 0,23; 0,27; 0,3; 0,35 мм. Схемы шихтовки – прямой стык; комбинированный стык; косой стык в “Г” углах; комбинированный стык в “Т” углах; полный косой стык в 2-х исполнениях,

Star-Lap. Система предусматривает возможность выполнения сечения стержня и яра овальными. Система позволяет оптимизировать проект с использование библиотеки генетических алгоритмов. Список варьируемых переменных зависит от выбранной конструкции обмоток. Выбор проводников осуществляется из списка проводников на складе. Поверочный расчет осуществляется по методикам, изложенным в соответствующих руководящих документах (РД).

САПР ТРАНС-А																																																																																																											
5	2	m	3	-	ОНН	Фольговая	Вс	1,65	1,61	Тл																																																																																																	
6	3	f	50	Гц		Алюминий	d	315,0	313,6	мм																																																																																																	
7	4	U2	10	кВ	ОВН	Фольга	d	1250,0	1280,4	мм																																																																																																	
8	5	U1	0,4	кВ		Алюминий	J1	1,23	1,23	А/мм <sup>2</sup>																																																																																																	
9	6	NU	5	-	Каналы	Радиальные	J2	1,07	1,07	А/мм <sup>2</sup>																																																																																																	
10	7	dU	2,5	%	ВН/НН	D	Y	a12	42,0	42	мм																																																																																																
11	8	i0	0,6	%		Сталь	3408	Ns1	2	-	-																																																																																																
12	9	P0	4600	Вт		Неотожженная		Ns2	10	51,13	-																																																																																																
13	10	uk	6	%		Толщ.	0,3	Nk1	2	2	-																																																																																																
14	11	Pk	24000	Вт		Шихт.	СТЕР-LAP	Nk2	7	7	-																																																																																																
15	12	Psum	28600,00	Вт		Провод.	Стандартный	bg1	270,0	-	мм																																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Изоляционные расст.</th> <th colspan="3">Коэффициенты</th> <th colspan="3">Расчет</th> <th colspan="3">Основные величины</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>18</td><td>1</td><td>a01</td><td>14</td><td>мм</td><td>beta</td><td>1,19</td><td>1,30</td><td>Sf</td><td>1066,7</td><td>кВт</td><td></td> </tr> <tr> <td>19</td><td>2</td><td>a22</td><td>37,4</td><td>мм</td><td>k0</td><td>0,5</td><td>-</td><td>Uf1</td><td>0,231</td><td>кВ</td><td></td> </tr> <tr> <td>20</td><td>3</td><td>i010</td><td>40</td><td>мм</td><td>kp</td><td>0,95</td><td>0,962</td><td>Uf2</td><td>10,0</td><td>кВ</td><td></td> </tr> <tr> <td>21</td><td>4</td><td>i011</td><td>40</td><td>мм</td><td>k2</td><td>0,97</td><td>-</td><td>Uw</td><td>25,7</td><td>В</td><td></td> </tr> <tr> <td>22</td><td>5</td><td>i020</td><td>70</td><td>мм</td><td>kk1</td><td>0,919</td><td>0,949</td><td>Ktr</td><td>43,3</td><td>-</td><td></td> </tr> <tr> <td>23</td><td>6</td><td>i021</td><td>70</td><td>мм</td><td>k1</td><td>1,4</td><td>-</td><td>I1</td><td>4619</td><td>А</td><td></td> </tr> <tr> <td>24</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td>km</td><td>0,1</td><td>-</td><td>I2</td><td>184,8</td><td>А</td><td></td> </tr> </tbody> </table>												Изоляционные расст.			Коэффициенты			Расчет			Основные величины			18	1	a01	14	мм	beta	1,19	1,30	Sf	1066,7	кВт		19	2	a22	37,4	мм	k0	0,5	-	Uf1	0,231	кВ		20	3	i010	40	мм	kp	0,95	0,962	Uf2	10,0	кВ		21	4	i011	40	мм	k2	0,97	-	Uw	25,7	В		22	5	i020	70	мм	kk1	0,919	0,949	Ktr	43,3	-		23	6	i021	70	мм	k1	1,4	-	I1	4619	А		24	7				km	0,1	-	I2	184,8	А	
Изоляционные расст.			Коэффициенты			Расчет			Основные величины																																																																																																		
18	1	a01	14	мм	beta	1,19	1,30	Sf	1066,7	кВт																																																																																																	
19	2	a22	37,4	мм	k0	0,5	-	Uf1	0,231	кВ																																																																																																	
20	3	i010	40	мм	kp	0,95	0,962	Uf2	10,0	кВ																																																																																																	
21	4	i011	40	мм	k2	0,97	-	Uw	25,7	В																																																																																																	
22	5	i020	70	мм	kk1	0,919	0,949	Ktr	43,3	-																																																																																																	
23	6	i021	70	мм	k1	1,4	-	I1	4619	А																																																																																																	
24	7				km	0,1	-	I2	184,8	А																																																																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="12">МАГНИТОПРОВОД</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>27</td><td>1</td><td>Np</td><td>11</td><td>-</td><td>Npsh</td><td>4</td><td>-</td><td>dshk</td><td>0,5</td><td>мм</td><td></td> </tr> <tr> <td>28</td><td>2</td><td>Na</td><td>11</td><td>-</td><td>Nsh</td><td>3</td><td>-</td><td>dshp</td><td>1</td><td>мм</td><td></td> </tr> <tr> <td>29</td><td>3</td><td>kellips</td><td>1,00</td><td>-</td><td>Ssh</td><td>7</td><td>мм</td><td>do</td><td>10,0</td><td>мм</td><td></td> </tr> <tr> <td>30</td><td>4</td><td>kmmax</td><td>0,98</td><td>-</td><td>kmmmin</td><td>0,34</td><td>-</td><td>Los</td><td>800,0</td><td>мм</td><td></td> </tr> <tr> <td>31</td><td>5</td><td>spress</td><td>3,00E+05</td><td>Па</td><td></td><td></td><td></td><td>Loa</td><td>200,0</td><td>мм</td><td></td> </tr> </tbody> </table>												МАГНИТОПРОВОД												27	1	Np	11	-	Npsh	4	-	dshk	0,5	мм		28	2	Na	11	-	Nsh	3	-	dshp	1	мм		29	3	kellips	1,00	-	Ssh	7	мм	do	10,0	мм		30	4	kmmax	0,98	-	kmmmin	0,34	-	Los	800,0	мм		31	5	spress	3,00E+05	Па				Loa	200,0	мм																									
МАГНИТОПРОВОД																																																																																																											
27	1	Np	11	-	Npsh	4	-	dshk	0,5	мм																																																																																																	
28	2	Na	11	-	Nsh	3	-	dshp	1	мм																																																																																																	
29	3	kellips	1,00	-	Ssh	7	мм	do	10,0	мм																																																																																																	
30	4	kmmax	0,98	-	kmmmin	0,34	-	Los	800,0	мм																																																																																																	
31	5	spress	3,00E+05	Па				Loa	200,0	мм																																																																																																	

Рис. 1. Внешний вид САПР трансформаторов в среде Excel

Комплект чертежей и спецификации строится автоматически по шаблону из типовых 3D-моделей (рис. 2, 3). 3D-модель автоматически перестраивается по размерам готового проекта, экспортируемым из рабочей книги Excel.

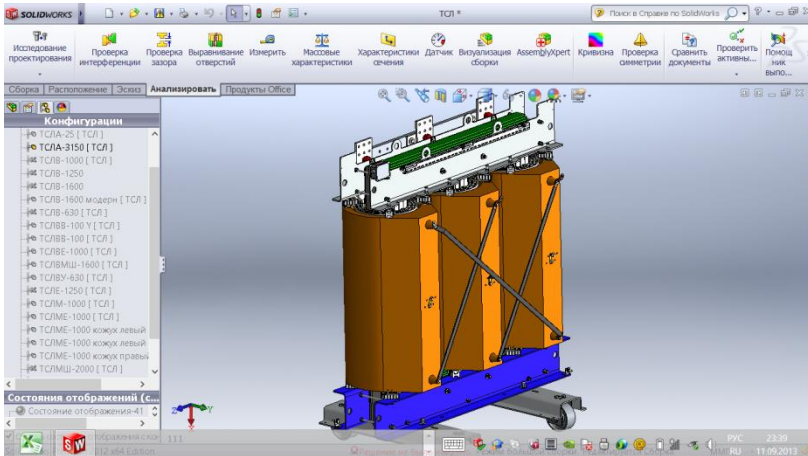


Рис. 2. Параметрическая 3D-модель трансформатора ТСЛ

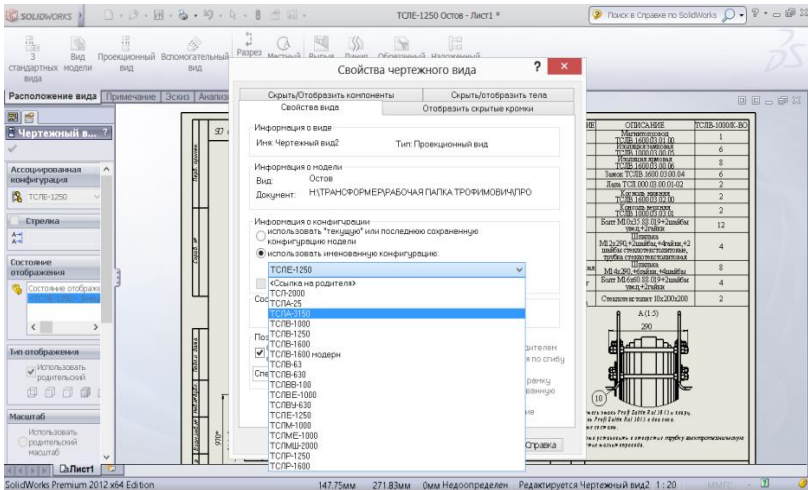


Рис. 3. Организация создания чертежей из параметрической модели

Технологические карты также генерируются автоматически (рис. 4). Информация по проектам, материалам, отдельным узлам, а также о собранных трансформаторах, включая результаты испытаний и рекламации, сохраняется в базе данных, созданной в среде СУБД Access.

Расчет ТМГ - Microsoft Excel

МКИ № 1(9) № Остова МН ТМГТ - 1600

1.1. Участок № 31 ТП Т.02200.13121 «Раскрой пластин магнитопровода на линии «Георг»

Д ст	252	МО	470	Высота окна	490	Ширина окна	230	КД	Магнитопровода
№	Ширина рулона	Толщина пакета факт.	Толщина по КД	№ партии	Завод ингот.	Удельн.потери, Вт/кг	Примечания		
15	20		0,0						
14	30		0,0						
13	40		0,0						
12	50		0,0						
11	60		0,0						
10	70		0,0						
9	80		0,0						Допуск на толщину +/- 0,3 мм
8	100		0,0						
7	120		7,2	7,2					Удельные потери в электротехнической стали при индукции 1,7 Тл
6	140		7,2	7,2					
5	160		10,8	10,8					
4	180		10,8	10,8					
3	200		14,4	14,4					
2	220		21,6	21,6					не более 1,20 Вт/кг
1	240			79,2					

Раскрой произвел оператор (Ф.И.О.) \_\_\_\_\_ (Получено) \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_ г.

Стержни и ярма магнитопровода сложены, отклонения от КД и ТД \_\_\_\_\_ (Длина ярм и стержней в мм)

Мастер (Ф.И.О.) \_\_\_\_\_ (Получено) \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_ г.

1.2 Участок № 31 ТП Т.02200.13131 «Сборка остова магнитопровода Т.С.Л.»

Шпилька верх.ярма, мм	M12	4 шт	311	Шпилька ярма, мм	M14	8шт	311
Контролируемые параметры	Размеры		Факт	КД	Допуск		
	Толщина с центральным пакетом, мм			154,8	+/- 1,0 мм		
	Толщина магнитопровода, мм			226,8	+/- 2,0 мм		
Расстояние между консолями, мм			234,8	+/- 2,0 мм			

Шпильку произвели \_\_\_\_\_ (Ф.И.О., Получено) \_\_\_\_\_

Сборку остова произвел \_\_\_\_\_ (Ф.И.О., Получено) \_\_\_\_\_

Титульный лист ПРОЕКТ ТЕПЛО РАСКРОЙ МКИ магнит МКИ ОНН МКИ ОВН

Рис. 4. Автоматически генерируема технологическая карта раскрой пластин электротехнической стали

В отличие от аналогичных САПР, разработанная система является довольно легковесной, но в то же время по возможностям она не уступает аналогам.

В настоящее время данная САПР дорабатывается в направлении повышения точности расчетов, в частности, путем использования полевых и цепных моделей, реализуемых библиотеками EMLib и ECLib.

*Трофимович Иван Владимирович,*  
 ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 e-mail: i.trofimovich@mail.ru  
*Тихонов Андрей Ильич,*  
 ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 e-mail: ait@dsn.ru

УДК 621.313

И.В. ЕРЕМИН, соискатель;  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор;  
Г.В. ПОПОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: ait@dsn.ru, popov@bjd.ispu.ru*

### **Анализ эффективности использования распределительных трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали**

**Аннотация.** Проанализированы достоинства и недостатки трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали. Рассчитан период окупаемости трансформатора. Сделан вывод об экономической эффективности использования аморфной стали для трансформаторов малой мощности.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, аморфная сталь, экономическая эффективность, срок окупаемости.

I.V. EREMIN, competitor; A.I. TIKHONOV, Ph.D., professor;  
G.V. POPOV, professor

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34. *E-mail: ait@dsn.ru, popov@bjd.ispu.ru*

### **Analysis of efficiency of distribution transformers with the yoke of amorphous steel**

**Abstract.** The advantages and disadvantages of transformers with the yoke of amorphous steel. Calculated the payback period of the transformer. It is concluded that the economic efficiency of the use of amorphous steel for low power transformers.

**Keywords:** power transformer, amorphous steel, cost-effectiveness, the payback period.

Одним из перспективных направлений развития трансформаторостороения является использование аморфной стали. Экономия электроэнергии достигается за счет значительного уменьшения потерь холостого хода. В связи с малой толщиной аморфной ленты материал наиболее пригоден для витой конструкции сердечника, т.е. для трансформаторов малой мощности, поэтому наибольший экономический эффект присутствует при их установке в распределительных и осветительных сетях.

Практически все электромагнитные, механические и потребительские свойства аморфной стали превосходят аналогичные свойства анизотропной электротехнической стали, применяемой в современных трансформаторах, за исключением индукции, составляющей 1,4 Тл и

коэффициента заполнения. К техническим преимуществам трансформаторов с сердечником из аморфной стали можно отнести:

- низкие потери холостого хода,
- высокая магнитная проницаемость,
- прямоугольная форма кривой намагничивания,
- высокая коррозионная стойкость,
- отсутствие межлистовой изоляции,
- стоимость аморфной стали с годами понижается.

К недостаткам аморфной стали можно, в частности, отнести:

- допустимая рабочая индукция < 1,5 Тл (для холоднокатаной стали это значение составляет 1,7 Тл);
- коэффициент заполнения сечения сталью 0,8-0,85, по сравнению с 0,95 для холоднокатаной стали;
- аморфная сталь имеет толщину 25-30 мкм и большую твердость, что усложняет сборку сердечника;
- высокая стоимость аморфной стали;
- себестоимость изготовления распределительных трансформаторов с применением аморфной стали выше примерно на 20-25 % стоимости трансформаторов с традиционной электротехнической сталью;
- сложность выпуска аморфной стали в виде широкой ленты и большая стоимость определяют ее использование только для распределительных трансформаторов малой мощности.
- на сегодняшний день не существует достаточно обоснованного расчета, какова же будет экономическая эффективность применения таких устройств.

Годовые затраты на производство трансформаторов с сердечником из аморфной стали можно вычислить как

$$Z_e = Z_{тр} + Z_x P_x + Z_k P_k + Z_p Q_p,$$

где  $Z_{тр} = 0,185 X$  – стоимость трансформатора в год;  $X$  – оптовая цена;  $P_x$  – потери холостого хода, *квт*;  $P_k$  – потери короткого замыкания, *квт*;  $Q_p$  – реактивная мощность, *квар*;  $Z_x = 5 \text{ руб./квт}$  – стоимость 1 *квт* потерь холостого хода в год;  $Z_k = 4 \text{ руб./квт}$  – стоимость 1 *квт* потерь короткого замыкания в год;  $Z_p = 1,5 \text{ руб./квар}$  – стоимость 1 *квар* реактивных потерь в год (затраты на компенсацию реактивной мощности).

Реактивная мощность:

$$Q_p = \frac{S}{100} \left( I_0 \frac{8700}{8760} + U_p \frac{4000}{8760} \right),$$

где  $S$  – номинальная мощность, *кВа*;  $I_0$  – ток холостого хода, %;  $U_p$  – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %; 8760 – число часов в году; 8700 – число часов, в течение которых имеют место потери холостого хода в году; 4000 – число часов, в течение которых имеют место потери короткого замыкания.

Таким образом, расчетная формула годовых затрат имеет вид

$$Z_r = 0,185 \times \text{оптовую цену} + 5P_x + 4P_k + 1,5 \frac{S}{100} \left( I_0 \frac{8700}{8760} + U_p \frac{4000}{8760} \right) \text{руб/год.}$$

При выборе наилучшего варианта проектируемого трансформатора наиболее экономичным будет тот, у которого значение  $Z_r$  будет наименьшим. Средняя цена трансформатора с сердечником из аморфной стали с заданными параметрами составляет 320 000 рублей, а трансформатора классического исполнения 280 000 рублей.

Для трансформатора АТМГ:

$$Z_r = 0,185 \times 320000 + 5 \cdot 62 + 4 \cdot 1210 + 1,5 \frac{63}{100} \left( 0,32 \cdot \frac{8700}{8760} + 3,5 \cdot \frac{4000}{8760} \right) =$$

$$= 64360 \text{ руб/год}$$

Для трансформатора ТМГ:

$$Z_r = 0,185 \times 280000 + 5 \cdot 200 + 4 \cdot 1280 + 1,5 \frac{63}{100} \left( 1,0 \cdot \frac{8700}{8760} + 3,5 \cdot \frac{4000}{8760} \right) =$$

$$= 57925 \text{ руб/год}$$

Удорожание годовых затрат исходя из данного расчета определяется более высокой оптовой ценой начального нового изделия но годовая экономия очевидна за счет суммарных потерь энергии за год в трансформаторе расчет параметров которых приведен в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета трансформаторов

ПАРАМЕТРЫ	АТМГ	ТМГ
Номинальная мощность, Sn(КВа)	63	63
Потери короткого замыкания,(Вт)	1210	1280
Потери холостого хода,(Вт)	62	200
Номинальный ток холостого хода , %	0,32	1,0
Коэффициент заполнения, Kз(%)	0,85	0,95
Высота обм. высшего напряжения,(м)	0,021	0,020
Масса обмотки ВН,(кг)	11,55	11,37
Масса обмотки НН,(кг)	17,60	20,04
Масса отводов,(кг)	0,19/0,09	0,19/0,03
Масса магнитопровода,(кг)	225,6	207,6
Индукция в магнитопроводе,(Тл)	1,32	1,58
Ширина бака,(м)	0,332	0,349
Длина бака,(м)	1,092	0,910
Глубина бака,(м)	0,611	0,246
Объем масла в баке,(м³)	0,219	0,081

Период окупаемости трансформатора по предварительным расчетным данным 3,5 года, принимая общую суммарную массу  $m=260$  кг для АТМГ, и  $m= 240$  кг для ТМГ. Как видно из расчета массы распределительных трансформаторов одинаковой мощности с сердечниками из аморфной стали на 15-20 % больше массы трансформаторов с тради-

ционной электротехнической сталью из-за более плотной навивки сердечника и как следствие более высокой ценой на затраты по железу. При стоимости потерь электрической энергии 5 руб/кВт·ч увеличение затрат на 20 % для трансформатора мощностью 63 кВА окупается за 3,5 года. Следует отметить перспективность использования сердечников из аморфной стали в столбовых трансформаторах, используемых в сельской местности. В настоящее время по всему миру широко внедряется новая схема энергосбережения удаленных потребителей в сельской местности, в частности коттеджных поселков. Особенность данной схемы состоит в использовании столбовых трансформаторов для питания нескольких (3-4-х) сельских домов. При этом трансформатор устанавливается вблизи этих домов, так что длина линии электропередач 0,4 кВ не превышает 100 м. К трансформатору при этом подводится напряжение 10,5 кВ. Это позволяет существенно снизить потери электроэнергии в сети 0,4 кВ. По предварительным расчетам использование таких трансформаторов с сердечником из аморфной стали позволяет экономить за счет снижения потерь холостого хода от 250 до 500 руб в месяц.

*Еремин Илья Витальевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: admin@fizika.ispu.ru

*Тихонов Андрей Ильич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: ait@dsn.ru

*Попов Геннадий Васильевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: popov@bjd.ispu.ru

УДК 621.538

А.С. ПЕРМИНОВА, инженер,  
С.М. ПЕРМИНОВ, с.н.с. ПНИЛ ПФГД ИГЭУ  
Ю.И. СТРАДОМСКИЙ, профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,  
Российская федерация, Иваново, Рабфаковская, 34  
E-mail: psm@upm.ispu.ru

### **Создание высоко градиентных магнитных полей в рабочих зазорах МЖГ встречно намагничеными магнитами**

**Аннотация.** Рассмотрен способ создания резко неоднородных магнитных полей с помощью встречно намагниченных магнитов. Исследовано влияние расстояния между магнитами и размеров магнита на удерживаемый перепад давлений магнитожидкостного герметизатора. Предложен магнитожидкостный герметизатор, отличающийся простотой конструкции и технологичностью.



**Ключевые слова:** магнитное поле, напряженность магнитного поля, уплотнение

A.S. PERMINOVA graduate engineer,  
S.M. PERMINOV Candidate of Engineering, senior scientific officer,  
J.I. STRADOMSKIJ Candidate of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: [psm@upm.ispu.ru](mailto:psm@upm.ispu.ru), [perminovaas@mail.ru](mailto:perminovaas@mail.ru), [stradomskiy.urij@mail.ru](mailto:stradomskiy.urij@mail.ru)

## Creating a high gradient magnetic fields in the working gap of the magnetic liquid sealant counter magnetized magnets

**Abstract.** A method of creating sharply inhomogeneous magnetic fields using counter magnetized magnets was considered. The influence of the distance between the magnets and the size of the magnet is on hold pressure differential magnetic-dock was investigated. A magnetic liquid sealer, characterized by simplicity of design and manufacturability was proposed.

**Keywords:** magnetic field, magnetic field intensity, shaft seal

Повышение удерживающей способности МЖГ немагнитных валов является актуальной задачей. Это можно достичь, используя новые способы формирования высоко градиентных магнитных полей в рабочих зазорах МЖГ.

Магнитная система предлагаемого герметизатора состоит как минимум из двух одинаковых кольцевых постоянных магнитов, расположенных на одной оси и обращенных друг к другу одноименными полюсами. Картина прохождения магнитных потоков рядом расположенных магнитов показана на рис. 1. Магнитные потоки, выходящие из одноименных полюсов соседних магнитов, проходят через ограниченные по размерам концентрические поверхности, совпадающие с наружными и внутренними поверхностями магнитов. На этих поверхностях наблюдается максимальная концентрация линий потока и, соответственно, максимальная напряженность магнитного поля в магнитной системе. При сближении магнитов площадь концентрических поверхностей уменьшается, что позволяет регулировать градиент и максимальную напряженность поля. Выходя из межполюсного пространства, магнитные потоки магнитов рассредоточиваются

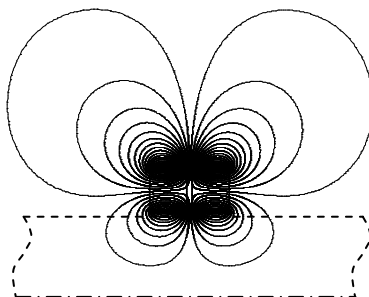


Рис. 1. Распределение векторного магнитного потенциала двух встречно намагниченных магнитов

в окружающем пространстве, а напряженность поля быстро снижается. Если поверхность вала герметизатора расположена близко от внутренней поверхности магнитов, то на поверхности вала наблюдается поле высокой напряженности, так как линии потока на малом расстоянии еще не успевают рассредоточиться. Максимальная напряженность поля в рабочем зазоре будет определяться величиной рабочего зазора герметизатора, расстоянием между магнитами, размерами магнитов и свойствами магнитотвердого материала, используемого в магните.

Для определения эффективности предлагаемого МЖГ был проведен эксперимент на основе математического моделирования магнитного поля магнитной системы. Использовался метод конечных элементов. На начальном этапе исследований важно подтвердить работоспособность способа повышения градиента напряженности и максимальной напряженности поля, поэтому было рассмотрено, каким образом величина расстояния между постоянными магнитами влияет на величину индукции на поверхностях немагнитного вала. В эксперименте величина рабочего зазора  $\delta$  между поверхностью вала и внутренней поверхностью магнитов была задана 0.05 мм, использовались постоянные магниты из закритического самарий-кобальтового магнитотвердого материала КС-37. Применение закритического магнитотвердого материала в магнитах данной системы обязательно, что исключает их взаимное размагничивание при сближении. Размеры магнитов выбраны следующими: наружный диаметр  $\Phi_n=30$  мм, внутренний  $\Phi_{вн}=20$  мм, длина магнитов  $L=4$  мм.

На рис. 1 показана полученная в результате расчета картина распределения линий векторного магнитного потенциала магнитной системы, которая соответствует принципом распределения магнитного поля в пространстве и заданным граничным условиям. На рис. 2 показана трансформация распределения напряженности поля на поверхности вала при расстоянии между магнитами 5, 1, и 0 мм. Сближение магнитов приводит к росту напряженности магнитного поля в зоне выхода магнитного потока из зазора между магнитами, Максимальная напряженность достигается, когда данный зазор равен нулю, при этом абсолютное значение напряженности, практически, вдвое превышает значение напряженности, достигаемое под кромками разнесенных магнитов. Моделирование подтверждает эффективность рассматриваемого метода для формирования высоко градиентных магнитных полей в рабочих зазорах магнитоожидкостных герметизаторов немагнитного вала.

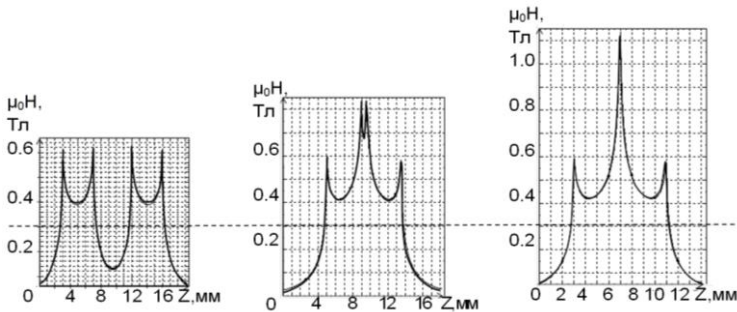


Рис. 2. Распределение напряженности на поверхности вала при расстоянии между магнитами 5 мм, 1 мм, 0 мм

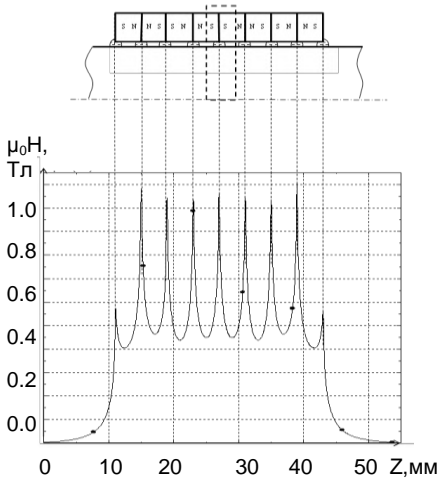


Рис. 3. Конструкция МЖУ немагнитного вала на основе кольцевых магнитов со встречной намагниченностью

Конструкция МЖГ на заданный перепад давлений выполняется из последовательного ряда кольцевых постоянных магнитов, охватывающих немагнитный вал с зазором  $\delta$  (рис. 3). Соседние магниты соприкасаются друг с другом одноименными полюсами. В зазоре между постоянными магнитами и немагнитным валом существует резко неоднородное магнитное поле чередующейся полярности. В рабочем зазоре в областях стыков постоянных магнитов существуют зоны максимальной напряженности поля, в областях нейтральных

сечений магнитов расположены зоны минимальной напряженности поля. Магнитная жидкость, введенная в рабочий зазор, занимает зоны с максимальной напряженностью магнитного поля, при этом разбиваясь на отдельные кольцевые, охватывающие вал, магнитожидкостные пробки

Проведенные исследования данной конструкции МЖГ показали:

1. Рассмотренный способ создания резко неоднородных магнитных полей с помощью встречно намагниченных магнитов эффективен при создании МЖГ немагнитных валов.

2. При создании МЖГ необходимо стремиться минимизировать величину рабочего зазора между валом и магнитами.

3. На максимально удерживаемый перепад давлений МЖГ влияют размеры магнита и в первую очередь его длина.

4. Предложенное МЖГ отличается простотой конструкции, технологичностью изготовления, надежностью.

*Перминова Анастасия Сергеевна*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: perminovaas@mail.ru

*Перминова Анастасия Сергеевна*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: psm@upm.ispu.ru

*Страдомский Юрий Иосифович*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: stradomskiy.urij@mail.ru

УДК 621.538

А.С. ПЕРМИНОВА, инженер,  
С.М. ПЕРМИНОВ, с.н.с. ПНИЛ ПФГД ИГЭУ  
Ю.И. СТРАДОМСКИЙ, профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,  
Российская Федерация, Иваново, Рабфakovская, 34  
E-mail: psm@upm.ispu.ru

## **Повышение эффективности универсального МЖУ при герметизации немагнитного вала**

**Аннотация.** Исследовано магнито-жидкостное уплотнение состоящее из последовательного ряда плотно прилегающих друг к другу встречно намагниченных постоянных магнитов. Рассмотрено распределение напряженности в рабочем зазоре уплотнения. Определено влияние параметров полюсных приставок на распределение напряженности поля в зазоре.

**Ключевые слова:** магнито-жидкостное уплотнение, напряженность поля, удерживающая способность

A.S. PERMINOVA graduate engineer,  
S.M. PERMINOV Candidate of Engineering, senior scientific officer,  
J.I. STRADOMSKIJ Candidate of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: psm@upm.ispu.ru, perminovaas@mail.ru, stradomskiy.urij@mail.ru

## **Improving the efficiency of the universal magnetic fluid seal with sealing magnetic roller**

**Abstract.** Ferrofluidic seal consisting of a succession of tightly adjacent to each other oppositely magnetized permanent magnets was investigated. The distribution of tension in the air gap seal was considered. The influence of the

parameters of the pole-top boxes for distribution of the field in the gap was determined.

**Key words:** magnetic fluid seal, field intensity, holding capacity

**Введение.** Совершенствование МЖУ на основе встречно намагниченных постоянных магнитов для герметизации немагнитных валов представляет как практический, так и научный интерес.

**Совершенствование конструкции МЖУ.** Исследование МЖУ, состоящего из последовательного ряда плотно прилегающих друг к другу встречно намагниченных постоянных магнитов [1], показало, что максимальная напряженность магнитного поля в рабочем зазоре такого уплотнения ограничена. Увеличение поперечных сечений магнитов не приводит к росту напряженности поля в зазоре. Это объясняется тем, что линиям векторного магнитного потенциала, проходящим через

среднюю часть магнита, приходится преодолевать значительный участок от середины магнита до рабочего зазора по среде с низкой магнитной проницаемостью близкой к единице, что приводит к значительному падению магнитодвижущей силы на их пути. По этой причине линии векторного магнитного потенциала в магните распределяются неравномерно, они сконцентрированы у внешней и внутренней поверхности магнита, а в средней части их плотность низкая. Энергия средней часть магнита слабо используется в работе. Устранить недостаток позволяют полюсные приставки из магнитомягкого материала, расположенные между встречными магнитами. Свободные поверхности полюсных приставок в данном уплотнении выполнены на одном уровне с внутренними и внешними поверхностями магнитов (рис.1). При наличии полюсных приставок индукция внутри постоянных магнитов выравнивается, энергия, отдаваемая магнитом, увеличивается, а напряженность магнитного поля в рабочем зазоре возрастает.

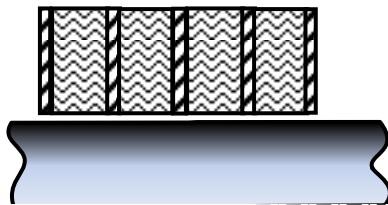


Рис. 1. Конструкция магнитной системы МЖУ

**Распределение напряженности поля в рабочем зазоре уплотнения.** Характер распределения напряженности поля в зазоре может варьировать, в зависимости от толщины полюсной приставки и величины рабочего зазора. На рис. 2 показано распределение напряженности поля на поверхности немагнитного вала в пределах половины ступени уплотнения для различных величин рабочих зазоров. Из рисунка видно, что при больших зазорах максимум индукции на поверхности вала наблюдается по центру полюсной приставки и по абсолютной величине он значительно ниже, чем при малых зазорах.

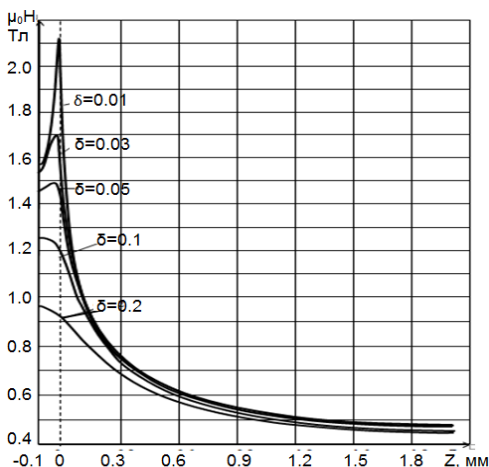


Рис. 2. Распределение напряженности поля на поверхности немагнитного вала при толщине полюсной приставки  $t=0.2$  мм

При малых величинах рабочих зазоров пик напряженности поля в зазоре смещается в зону соприкосновения магнитов и полюсных приставок. Под полюсной приставкой образуется два пика напряженности, разделенные впадиной. Наличие двух пиков под полюсной приставкой приводит к образованию в зазоре дополнительной магнитоэлектрической пробки. При максимальном приложенном внешнем перепаде давлений дополнительная пробка занимает положение от стыка

магнита и полюсной приставки до середины полюсной приставки.

**Влияние толщины полюсных приставок на распределение напряженности поля в зазоре.** Исследование влияния толщины полюсных приставок на распределение напряженности поля в рабочем зазоре показало следующее:

1. Введение полюсной приставки и увеличение ее толщины (до

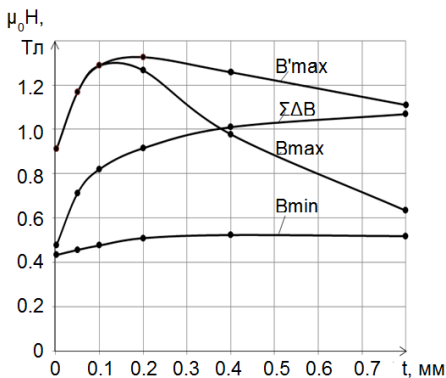


Рис. 3. Изменение напряженности поля в рабочем зазоре от толщины полюсной приставки при зазоре 0,05 мм

определенного значения) приводит к росту максимальной напряженности поля под полюсной приставкой, следовательно, к увеличению удерживаемого уплотнением перепада давлений.

2. Увеличение толщины полюсных приставок меняет характер кривой распределения напряженности поля в зазоре, кривая трансформируется из одной экстремальной в двух экстремальную.

3. При появлении

пиков на кривой распределения напряженности поля в зазоре формируется и начинает работать дополнительная магнитожидкостная пробка под полюсом. Перепад давлений, удерживаемый единичным блоком уплотнения, определяться суммой перепадов, удерживаемых основной и дополнительной магнитожидкостными пробками (рис. 3).

4. Дальнейшее увеличение толщины полюсных приставок приводит к снижению напряженности поля как в области стыков магнитов с полюсными приставками, так и под центром полюсной приставки, что приводит к снижению удерживающей способности основной магнитожидкостной пробки и повышению удерживающей способности дополнительной магнитожидкостной пробки. Под центром полюсной приставки напряженность поля падает быстрее, чем под стыками магнитов с полюсными приставками, поэтому удерживающая способность дополнительной магнитожидкостной пробки интенсивно растет и компенсирует спад удерживающей способности основной пробки. В результате удерживающая способность единичного блока уплотнения с увеличением толщины полюсной приставки постоянно растет.

5. При увеличении толщины полюсных приставок выше 0.5-0.6 мм рост удерживающей способности единичного блока уплотнения постоянный, но незначительный.

Таким образом, толщину полюсных приставок выполнять меньше 0.5 мм не следует из-за низкой удерживающей способности единичного блока уплотнения, а в диапазоне выше этого значения толщину можно выбирать, исходя из технологических соображений производства уплотнений.

#### Литература

1. **Перминов С.М., Перминова А.С.** Разработка нового способа формирования высоко градиентных магнитных полей в рабочих зазорах магнитожидкостных герметизаторов. Вестник ИГЭУ. 2013. № 6, с.56-59.

*Перминова Анастасия Сергеевна*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: perminovaas@mail.ru

*Перминова Анастасия Сергеевна*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: psm@ipm.ispu.ru

*Страдомский Юрий Иосифович*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: stradomskiy.urij@mail.ru

## СЕКЦИЯ «МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ»

УДК 621.34: 625.083

Л.Г. КОПЫЛОВА, к.т.н., доцент, И.А. ТИХОМИРОВА, ассистент,  
С.В. ТАРАРЫКИН, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

*E-mail: tsv@ispu.ru*

### **Разделение модели гармонического возмущения при структурно-параметрическом синтезе астатических систем управления электроприводами<sup>8</sup>**

**Аннотация.** Решается задача улучшения отработки гармонического возмущения момента нагрузки электродвигателя. Использован принцип разделения модели возмущения на интегральную и колебательную составляющие с переносом одной из них в состав «быстрой» подсистемы двухконтурных структур электромеханических систем. Разрабатываются методики расчета параметров регуляторов и выполняются сравнительные исследования синтезируемых электромеханических систем по комплексу основных и дополнительных критериев качества.

**Ключевые слова:** двухконтурная электромеханическая система, компенсация гармонических возмущений, разделение модели возмущения, синтез и структурная оптимизация регуляторов, селективная инвариантность.

L. G. KOPYLOVA, Candidate of Engineering, I. A. TIKHOMIROVA, assistant,  
S. V. TARARYKIN, Doctor of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: tsv@ispu.ru*

### **Separation of harmonic disturbance model for structural-parametric synthesis of astatic control systems for electric drive**

**Abstract.** The problem of response improvement of harmonic disturbance of electric drive load torque is solved. Separation principle of disturbance model into integral and oscillatory components and transfer of one of the disturbance model components into "rapid" subsystem of dual circuit structures of electromechanical systems are used. Methods of calculation of control devices parameters are

---

<sup>8</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части госзадания в сфере научной деятельности на 2014-2016 г.г.



developed. Comparative researches of synthesized electromechanical systems by using the complex of the main and the additional quality factors are implemented.

**Key words:** dual circuit electromechanical system, harmonic disturbance compensation, internal model separation, synthesis and structural optimization of control devices, selective invariance.

В машиностроении применение индивидуальных приводных устройств технологических машин приводит к тому, что главный рабочий орган (РО) становится доминирующим элементом механической части электромеханических систем (ЭМС). Это обуславливает появление характерных гармонических возмущений момента нагрузки электродвигателя (ЭД) (рис. 1, а), которые в первом приближении можно представить в виде [1]

$$M_H = M_0 + M_1 \sin(\omega_1 t), \quad (1)$$

где  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $\omega_1$  - соответственно постоянная составляющая, амплитуда колебаний момента и скорость вращения РО.

Эффективным способом компенсации подобных воздействий является применение принципа селективной инвариантности систем автоматического управления (САУ), основанного на использовании внутренней модели возмущения (МВ) [2, 3]. При этом полиномы, формирующие постоянную и колебательную составляющие возмущения (1), вводятся в знаменатель передаточной функции (ПФ) регулятора в виде

$$G(s) = s \cdot (s^2 + \omega_1^2), \quad (2)$$

где  $s$  – комплексная переменная Лапласа,  $\omega_1 = \Omega/i$ ,  $\Omega$  – частота вращения ЭД,  $i$  – передаточное отношение редуктора.

Как показано в [4], сочетание принципа внутренней модели возмущения (МВ) с другими принципами построения САУ – подчиненного регулирования (П), каскадного регулирования (КР), регулирования состояния (РС), полиномиального регулирования по выходу (ПР), разделения темпов движения (РД) – позволяет получить самые разнообразные сочетания показателей качества отработки управляющего и возмущающего воздействий, помехоустойчивости, параметрической грубости, устойчивости к влиянию запаздывания сигналов и др. при различном уровне сложности регуляторов.

Однако степень достижения основного показателя ЭМС – качества отработки возмущения по моменту нагрузки ЭД, а также уровень сложности регуляторов в предложенных структурных решениях могут не удовлетворить проектировщика.

Повышение эффективности отработки гармонического возмущения (1) при одновременном снижении сложности регуляторов и сохранении других показателей качества возможно путем использования дополнительного принципа разделения модели возмущения (РМВ) (2)

на интегральную и колебательную составляющие с перемещением одной из них в «быструю» внутреннюю подсистему объединенной ЭМС.

Перемещение интегральной составляющей МВ в «быстрый» внутренний контур управления ЭМС призвано обеспечить улучшение качества обработки постоянной составляющей момента нагрузки ЭД и снижение (в той или иной мере) порядка полиномиального регулятора внешнего контура, содержащего колебательную часть МВ, а также префильтра.

Сочетание принципов РД и РМВ может быть обеспечено при измерении как вектора состояния (рис. 1, б), так и одной выходной координаты (рис. 1, в) объекта для внутренней «быстрой» подсистемы. Внешний контур с ПР содержит колебательную составляющую МВ. При его синтезе возможна аппроксимация внутренней подсистемы звеньями пониженного порядка.

Перемещение колебательной составляющей МВ во внутренний («быстрый») контур управления ЭМС (рис. 1, г) призвано обеспечить улучшение качества обработки переменной составляющей момента (1) нагрузки ЭД и снижение порядка регулятора внешнего контура, содержащего интегральную часть МВ, при соответствующем упрощении внеконтурного префильтра. Для реализации принципа селективной инвариантности такой ЭМС в ее внешнем и внутреннем контурах управления используются только полиномиальные регуляторы «входа-выхода».

Была выполнена сравнительная оценка эффективности работы управляющих устройств, синтезированных сочетанием перечисленных методов, по следующим факторам: качество раздельной отработки ступенчатого изменения постоянной составляющей момента нагрузки и воздействия его гармонической составляющей, диапазон допустимых вариаций момента инерции механической части, уровень пульсаций выходного сигнала скорости при наложении аддитивной помехи в виде «белого» шума в канале его измерения, максимальное значение времени «чистого» запаздывания сигнала в силовом преобразователе, при котором система сохраняет устойчивость, а также суммарный порядок динамических звеньев регуляторов.

Полученные результаты наглядно показывают, что применение принципа разделения модели гармонического возмущения момента нагрузки ЭД создает новые возможности для улучшения показателей качества селективно-инвариантных ЭМС различных исполнений.

Однако следует принимать во внимание, что улучшение качества обработки возмущений и уменьшение степени сложности регуляторов достигается при этом ценой определенного повышения чувствительности таких систем к влиянию факторов, не учтенных при их синтезе, например, к запаздыванию сигналов в силовом преобразователе.

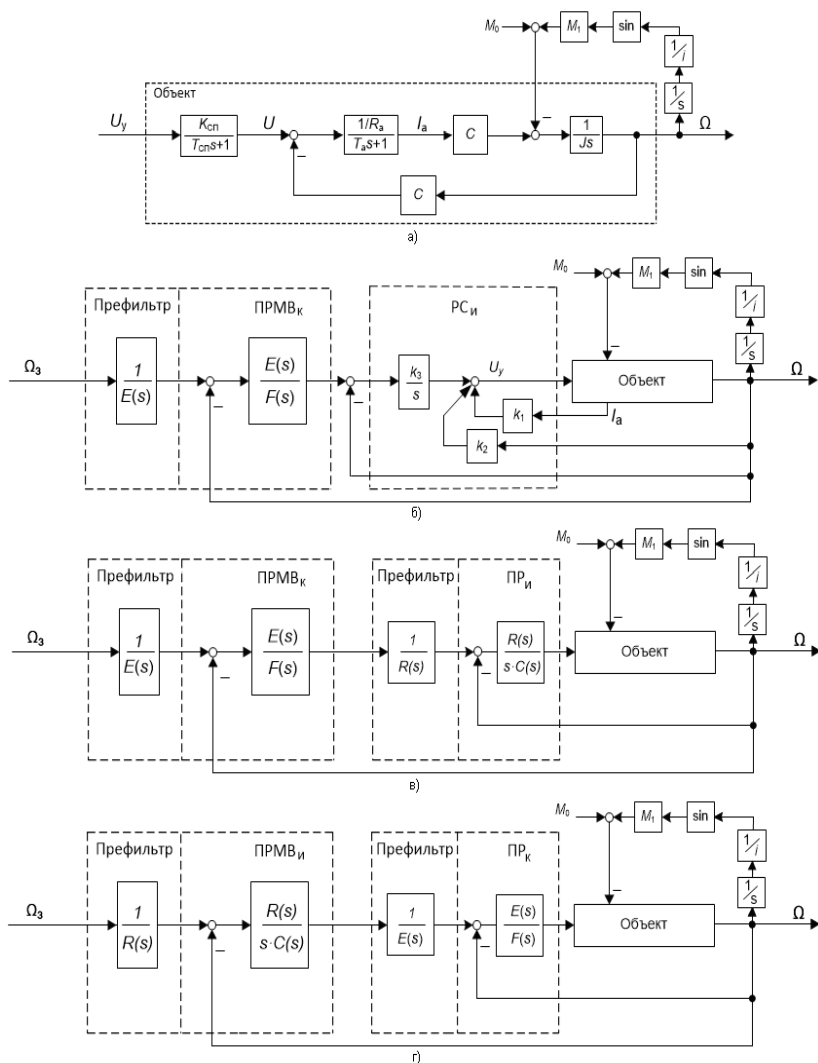


Рис. 1. Варианты структурного построения ЭМС

Этот неблагоприятный эффект становится более выразительным с увеличением порядка динамической составляющей регулятора, вводимой в состав «быстрой» подсистемы, поэтому структурные решения ЭМС, предполагающие введение более простой интегральной

составляющей модели возмущения в состав внутреннего контура управления, представляются более предпочтительными.

#### Литература

1. Шёнфельд Р. Автоматизированные электроприводы / Р. Шёнфельд, Э. Хабигер; пер. с нем.; под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
2. Кулебакин В.С. Об основных задачах и методах повышения качества автоматического регулирования систем / В.С. Кулебакин // Тр. II Всес. совещ. по теории автоматического регулирования. Т. II – М.: Наука, 1965.
3. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребе, М.Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.
4. Копылова Л.Г. Компенсация гармонических возмущений момента нагрузки в следящих электромеханических системах и элементы структурной оптимизации регуляторов / Л.Г. Копылова, С.В. Тарарыкин // Вестник ИГЭУ, 2012, Вып. 6.

*Копылова Лариса Геннадьевна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: klg@eims.ispu.ru

*Тарарыкин Сергей Вячеславович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: rector@ispu.ru

*Тихомирова Ирина Александровна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: 3kitti4@gmail.com

УДК 625.083

И.А. ТИХОМИРОВА, ассистент (ИГЭУ)

Л.Г. КОПЫЛОВА, к.т.н., доцент (ИГЭУ)

С.В. ТАРАРЫКИН, д.т.н., профессор (ИГЭУ)

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: rector@ispu.ru

### Частотный анализ инвариантных свойств электромеханических систем

**Аннотация.** На примере решения задачи регулирования скорости типового электропривода с одномассовой (жесткой) механической частью выполнен структурно-параметрический синтез и сделана сравнительная оценка эффективности отработки управляющего и возмущающего воздействий различных вариантов электромеханических систем.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, компенсация возмущений, селективная инвариантность, внутренняя модель возмущения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части Госзадания в сфере научной деятельности на 2014-2016 гг.*

I.A. TIKHOMIROVA, assistant,  
L.G. KOPYLOVA, Candidate of Engineering, docent,  
S.V. TARARYKIN, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, E-mail: rector@ispu.ru, klg@eims.ispu.ru

## Comparative analysis of efficiency of selectively invariant electromechanical systems

**Abstract.** Structural-parametric synthesis of different types of electromechanical systems is implemented by problem solving example of speed control of standard electric drive with single-mass (rigid) mechanical part.

**Key words:** electromechanical system, disturbances compensation, selective invariance, internal model of disturbance.

Погрешности изготовления, сборки и монтажа рабочих органов технологических машин являются причинами появления гармонических возмущений момента нагрузки электродвигателей (ЭД) электромеханических систем (ЭМС), которые в первом приближении можно представить в виде [1]:

$$M_H(t) = M_0 + M_1 \sin(\omega_1 t), \quad (1)$$

где  $M_0$  – постоянная составляющая;  $M_1$  и  $\omega_1$  – амплитуда колебаний момента и скорость вращения рабочего органа.

Уменьшить влияние доминирующего возмущения (1) можно путем повышения петлевого усиления и быстродействия ЭМС, которые могут строиться на принципах подчиненного регулирования координат (рис. 1, а), использования безынерционных регуляторов состояния (рис. 1, б) или динамических (полиномиальных) регуляторов «входа-выхода» (рис. 1, в).

Система подчиненного регулирования координат ЭМС постоянного тока настраивается на «технический оптимум» регуляторами тока (РТ) и скорости (РСК) с соответствующими передаточными функциями (ПФ)

$$H_{PT} = 0,0268 \cdot \frac{0,02s + 1}{0,02s}; H_{PCK} = 4,$$

но при подаче гармонического момента возмущения (1) в системе возникает высокий уровень колебаний скорости ЭД, который является неприемлемым для прецизионных систем электропривода.

На основе модального управления (МУ) возможен синтез регулятора состояния (РС) с вектором коэффициентов обратных связей по напряжению, току и скорости

$$\mathbf{K} = [k_1 k_2 k_3] = [-0,0009 \quad -0,015 \quad -0,091],$$

который обеспечивает биномиальное распределение полюсов синтезированной ЭМС и достижение более высокого быстродействия (50 мс) по сравнению с системой подчиненного регулирования.

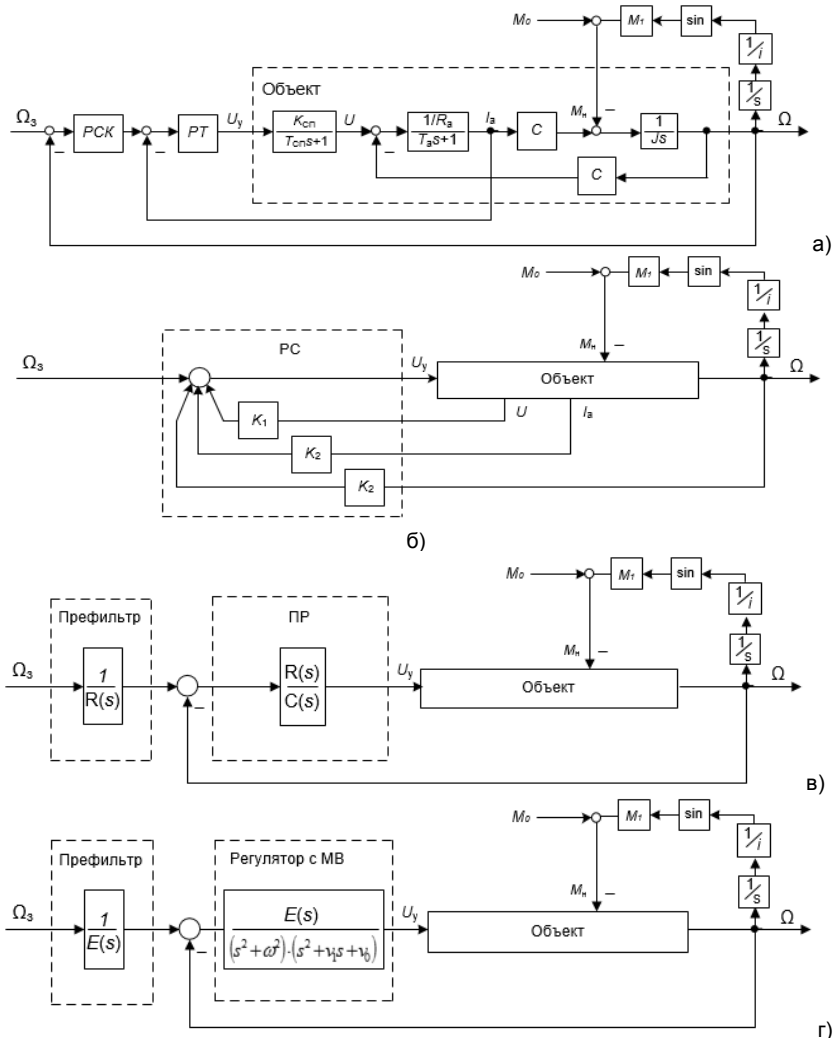


Рис. 1. Структурные схемы объекта управления и различных вариантов ЭМС (приняты следующие значения параметров объекта:  $K_{СП}=22$ ,  $T_{СП}=0,003$  с,  $R_a=0,177$  Ом,  $T_a=0,02$  с,  $C=1,37$  ВБ,  $J=0,2$  кг·м<sup>2</sup>,  $i=10$ ,  $M_1=8,22$  Нм)

Аналогичный по качеству обработки сигнала задания скорости результат получаем при синтезе методами МУ динамического полиномиального регулятора (ПР) с полиномами вида:

$$R(s) = 0,4638s^2 + 192,5s + 6676;$$

$$C(s) = s^2 + 516,7s + 106624,5.$$

Для ЭМС на базе ПР удается в большей степени уменьшить амплитуду колебаний скорости от синусоидальной составляющей момента нагрузки по сравнению с ЭМС на базе РС и КР, но происходит снижение ее помехоустойчивости из-за наличия высших производных выходной координаты в структуре управления.

Таким образом, в ЭМС традиционных структур попытки улучшить компенсацию гармонического возмущения момента нагрузки приводит к потере других составляющих качества.

Рациональным способом разрешения указанной проблематики является применение принципа селективной (избирательной) инвариантности САУ, основанного на использовании внутренней модели возмущения (МВ) [2].

Наиболее простым структурным решением систем данного типа регуляторов, является ЭМС, представленная на рис. 1, г, имеющая только один регулятор, объединяющий ПР и МВ. В результате синтеза объединенного регулятора на частоте настройки МВ  $\omega = 1,57 \text{ c}^{-1}$ , получены следующие выражения полиномов:

$$E(s) = 9,668s^4 + 4951,9s^3 + 728171,4s^2 + 55928854,5s + 1757743006;$$

$$F(s) = (s^2 + 1,57^2) \cdot (s^2 + 1156,667s + 553688,9).$$

Для всесторонней оценки возможностей синтезированной селективно-инвариантной ЭМС по обработке широкого спектра возмущений были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики всех рассмотренных вариантов систем по управляющему и возмущающему воздействиям. Соответствующие графики 1-4 для системы подчиненного регулирования, ЭМС на базе РС, ПР, а также селективно инвариантной ЭМС при различных частотах настройки МВ ( $\omega_1 = 1,57 \text{ c}^{-1}$ ,  $15,7 \text{ c}^{-1}$  и  $157 \text{ c}^{-1}$ ) приведены на рис. 2, а, б в логарифмических масштабах величин.

Сравнительный анализ «частотных портретов» различных систем управления типовым электромеханическим объектом позволяет сделать ряд важных наблюдений и выводов.

При малых различиях исследуемых ЭМС в обработке управляющих воздействий селективно-инвариантная САУ отличается лучшей обработкой возмущений по моменту нагрузки ЭД не только на частоте настройки МВ, но и на других частотах скоростного диапазона электропривода. Гораздо эффективнее селективно-инвариантная САУ отрабатывает возмущения в виде постоянного момента нагрузки (гармоники нулевой частоты), несинусоидальные периодические возмущения

момента ЭД с широким спектром гармоник, например, воздействия ударного характера, вызванные дисбалансом вращающихся масс, неравномерностью трения и т.п.

Селективно-инвариантная ЭМС имеет дополнительные резервы повышения качества обработки возмущений при адаптивной перестройке параметров МВ в соответствии с изменениями скорости электропривода, а также при введении интеграла в закон управления.

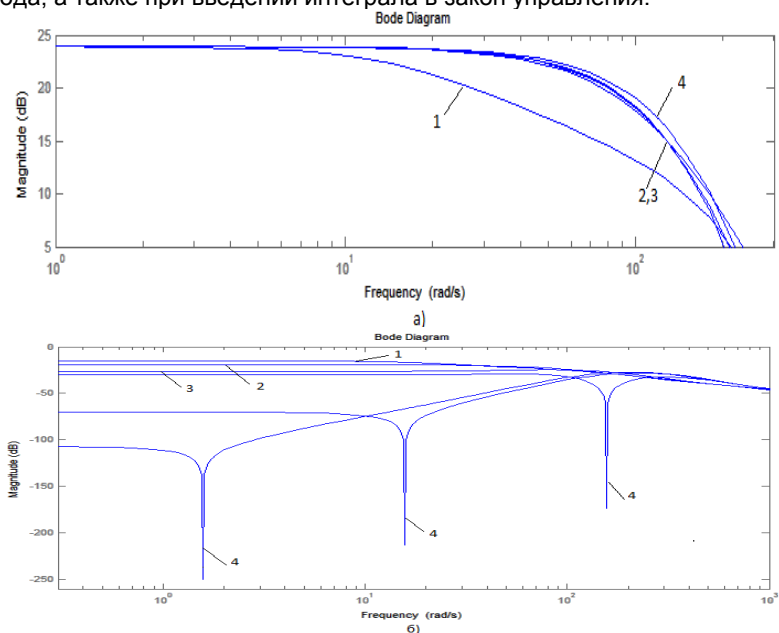


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики по управляющему (а) и по возмущающему (б) воздействиям для ЭМС: с РТ и РСК (графики 1), с РС (графики 2), с ПР (графики 3) и с внутренней МВ (графики 4).

Улучшение показателей селективно-инвариантной ЭМС обеспечивается ценой определенного повышения сложности управляющего устройства, которое должно содержать модель гармонического возмущения. Однако высокая эффективность такой структуры ЭМС делает эти усложнения вполне оправданными.

### Литература

1. Шёнфельд Р. Автоматизированные электроприводы / Р. Шёнфельд, Э. Хабигер; пер. с нем.; под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
2. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребе, М.Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.



*Тихомирова Ирина Александровна,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: 3kitti4@gmail.com

*Копылова Лариса Геннадьевна,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: klg@eims.ispu.ru

*Тарарыкин Сергей Вячеславович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: rector@ispu.ru

УДК 621.34 : 625.232 : 681.516.35

С.А. САМАРИНСКИЙ, инженер,  
Л.Г. КОПЫЛОВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: klg@eims.ispu.ru

### **Разработка стенда на основе платы ввода-вывода NI PCIe-6343 и библиотеки реального времени ПК MATLAB для исследования мехатронных систем**

**Аннотация.** Предложен и разработан способ построения многофункционального стенда на основе персонального компьютера, оснащенного программным комплексом MATLAB и платой ввода-вывода NI PCIe-6343, предназначенного для исследования и быстрого прототипирования мехатронных систем.

**Ключевые слова:** синтез регулятора, плата ввода-вывода, мехатронная система, программное и аппаратное обеспечение.

S. A. SAMARINSKIY, engineer,  
L. G. KOPYLOVA, Candidate of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34.  
E-mail: klg@eims.ispu.ru

### **Design of stand on the basis of the input-output circuit board NI PCIe-6343 and real time library of software package MATLAB for research of mechatronic systems**

**Abstract.** Method of design of multifunctional stand based on the personal computer equipped with the software package MATLAB and the input-output circuit board NI PCIe-6343 is offered and developed. The stand is designed for research and quick prototyping of mechatronic systems.

**Key words:** regulator design, input-output circuit board, mechatronic system, software and hardware.

*Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00972).*

При изучении мехатронных систем зачастую возникает необходимость выполнять тестовое включение того или иного объекта управления с целью предварительного анализа переходных процессов и выбора дальнейших путей синтеза регулятора. Подходы к решению этой задачи, наработанные в промышленности, являются несколько неудобными ввиду малой наглядности. Кроме того, в лабораторных условиях желательно иметь возможность оснастить исследуемый объект тем или иным регулятором за минимальное время без разработки дополнительного и доработки имеющегося аппаратного обеспечения. Поэтому была поставлена задача разработать удобный и наглядный стенд для исследования мехатронных систем.

С целью решения обозначенной выше задачи предлагается использовать плату ввода-вывода NI PCIe-6343 [1], обладающую достаточно широкими возможностями взаимодействия с внешними устройствами. Так, плата оснащена аналоговыми входами и выходами, счетчиками, дискретными линиями ввода-вывода, которых достаточно для осуществления коммуникации с многими мехатронными объектами. Для управления платой ввода-вывода и, в свою очередь, объектом, целесообразно применять персональный компьютер под управлением операционной системы семейства Windows и программный комплекс MATLAB с библиотекой реального времени [2]. В качестве объекта используется сервопривод серии СПШ [3]. Предполагается реализовать синтезированный регулятор с помощью среды Simulink ПК MATLAB. Управляющий сигнал с регулятора выдавать на привод посредством платы сопряжения NI PCIe-6343. Эта же плата служит промежуточным звеном для получения сигнала обратной связи регулятора, т. е. вводит в MATLAB текущее значение угловой скорости двигателя, измеряемой энкодером, установленным на его валу. Структурная схема стенда представлена на рис. 1.

Предложенный подход позволяет быстро и наглядно оснастить объект управления регулятором, изучить прямые показатели качества переходных процессов, протекающих в объекте и в системе, при необходимости внести любые коррективы в регулятор, в том числе полностью изменить его структуру. Кроме того, при такой конфигурации стенда проектируемый регулятор может быть исследован на модели (рис. 2, а) и перенесен на реальный объект управления (рис. 2, б) без необходимости внесения каких-либо изменений, связанных с адаптацией регулятора к иной аппаратной платформе.

В рамках предварительных испытаний стенда установлено, что плата ввода-вывода NI PCIe-6343 пригодна для подобного рода применений и позволяет осуществлять управление с периодом дискретизации 1 мс без запаздывания.

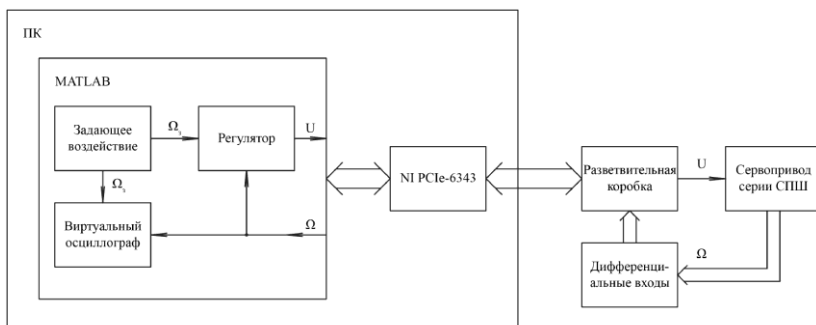


Рис. 1. Структура стенда

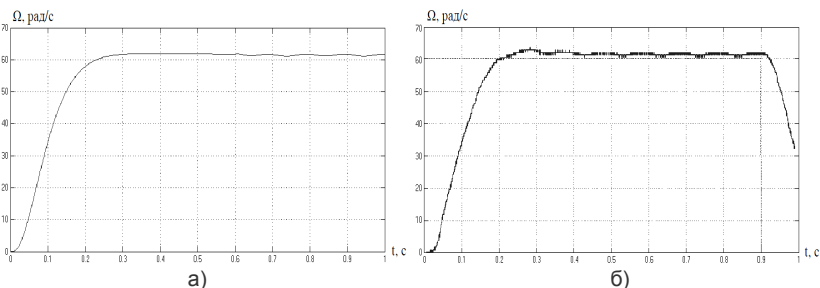


Рис. 2. Переходные процессы на выходе модели (а) и реального объекта (б)

Важно отметить, что стенд обладает высокой гибкостью и может быть адаптирован ко многим объектам управления.

### Литература

1. **NI PCIe-6343.** [Электронный ресурс] // National Instruments. [Офис. сайт]. URL: <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-890/lang/ru> (дата обращения: 08.03.2015).
2. **Simulink Desktop Real-Time.** [Электронный ресурс] // MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing. [Офис. сайт]. URL: <http://www.mathworks.com/products/simulink-desktop-real-time/index.html> (дата обращения: 08.03.2015).
3. **Интегрированный сервопривод СПШ.** [Электронный ресурс] // Сервотехника. [Офис. сайт]. URL: <http://www.servotechnica.ru/catalog/type/brand/index.pl?id=18> (дата обращения: 08.03.2015).

*Копылова Лариса Геннадьевна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: klg@eims.ispu.ru

*Самаринский Сергей Александрович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: klg@eims.ispu.ru

УДК 625.083

В.В. АПОЛОНСКИЙ, инженер-проектировщик (ИГЭУ)

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

*E-mail: vlad-apolonskiy@yandex.ru*

### **<sup>9</sup>Экспериментальные исследования цифровых робастных систем автоматического управления на базе безынерционных и динамических регуляторов состояния**

**Аннотация.** Показано влияние положительных обратных связей на робастные свойства САУ на базе безынерционных регуляторов состояния и динамических полиномиальных регуляторов на примере двухмассовой электромеханической системы, собранной на экспериментальном многодвигательном стенде. Приведены методы расширения зоны робастности, а также выбора оптимальной структуры регуляторов.

**Ключевые слова:** робастность, электромеханическая система, регулятор.

V.V. APOLONSKIY, Design engineer

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: vlad-apolonskiy@yandex.ru*

### **Experimental studies of robust digital automatic control systems on the basis of free-wheeling and dynamic state controllers**

**Abstract.** The effect of positive feedback on the robust properties of ACS based on the free-wheeling state controllers and dynamic polynomial controllers on the example of a two-mass electromechanical system collected the pilot multi-engine stand are showed. Methods extend the range of robustness, as well as the choice of the optimal structure of the controllers.

**Key words:** robustness, electromechanical system, the controller.

Несмотря на развитие аппаратно-программных средств моделирования сложных динамических систем, окончательный вывод об эффективности предложенных методов робастного управления следует делать по результатам натурных экспериментов на реальной системе автоматического управления (САУ).

Целью данной работы является практическая апробация полученных ранее результатов синтеза робастных САУ на базе полиномиальных, безынерционных и динамических регуляторов состояния [1-4]

---

<sup>9</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части госзадания в сфере научной деятельности на 2014-2016 г.г.

на физической модели двухмассовой электромеханической системы (ЭМС), реализованной с помощью многодвигательного стенда.

На рис. 1 представлены функциональная (рис. 1, а) и структурная (рис. 1, б) схемы ЭМС, построенные на базе двух взаимосвязанных электроприводов, где  $\Omega_3$  – сигнал задания;  $R_{\Omega 1}$  – цифровой регулятор скорости, реализованный на базе мезонинной платы РСМ-023-000111С1 с микроконтроллером LPC2294 ARM7TDMI-S; ЦАП1, ЦАП2 – цифро-аналоговые преобразователи;  $R_{I1}$ ,  $R_{I2}$  – аналоговые регуляторы тока; СП1, СП2 – силовые преобразователи типа ТПЕ-110; М1, М2 – двигатели постоянного тока ДК1-1.7-110-АТ; ИУ1, ИУ2 – измерители углового положения типа ВЕ-178А5;  $C_{12}$ ,  $K_d$  – коэффициент жесткости и вязкого трения вязкоупругой кинематической передачи;  $K_m$  – масштабирующий коэффициент.

Каждый привод имеет аналоговый токовый контур с регулятором  $R_I$ , что позволяет аппроксимировать передаточную функцию такой системы интегрирующим звеном с передаточной функцией  $K/s$ . Применение программной связи между приводами через звенья  $C_{12}/s$  и  $K_d$  дает возможность реализации различных структур ЭМС без применения механических узлов передачи.

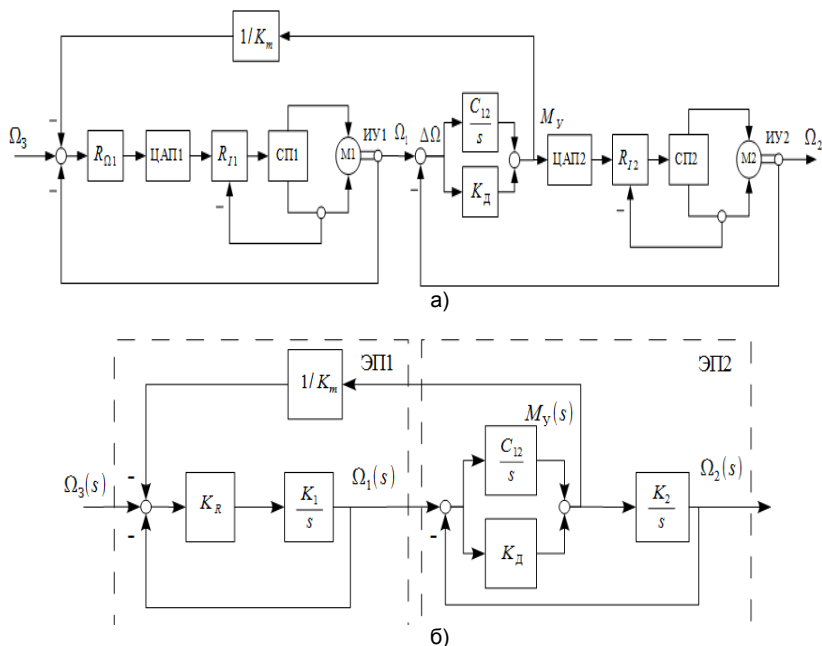


Рис. 1. Функциональная (а) и структурная (б) схемы двухмассовой ЭМС

Математическая модель двухмассовой ЭМС в пространстве состояний примет вид:

$$\dot{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{s} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u};$$

$$\Omega_2 = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}.$$

где  $u$  – управляющее воздействие;  $\Omega_2$  – выходная координата объекта;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  – матрицы состояния, входа и выхода соответственно. В соответствии со структурной схемой объекта (рис. 1,б.), вектор состояния  $\mathbf{x}$  будет иметь вид:  $\mathbf{x} = [\Omega_1 \quad M_y \quad \Omega_2]$ .

Подставляя данные из табл. 1, получим:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 5.78 & 1.16 & 0 \\ 0.67 & 1.33 & 5 \\ 0 & 0.62 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 5.78 \\ 4.33 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = [0 \quad 0 \quad 1]$$

Передаточная функция ЭМС примет следующий вид:

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{2.68s + 17.86}{s^3 + 7.11s^2 + 11.55s + 17.86}$$

Таблица 1. **Параметры объекта управления**

$K_R$	$K_1$	$C_{12}$	$K_d$	$K_2$	$K_m$
8	0.722	5	0.75	0.618	5

Для управления рассматриваемой ЭМС синтезируем САУ на базе полиномиальных регуляторов (ПР) «входа-выхода» с передаточной функцией общего вида:

$$H_R(s) = \frac{R(s)}{C(s)} = \frac{r_k s^k + r_{k-1} s^{k-1} + \dots + r_1 s + r_0}{c_l s^l + c_{l-1} s^{l-1} + \dots + c_1 s + c_0},$$

где  $k = \deg R(s)$ ,  $l = \deg C(s)$  – степени полиномов  $R(s)$  и  $C(s)$ . Введем обозначение ПР  $k/l$  для различных структур регулятора.

Для иллюстрации полученных ранее теоретических результатов в [1,2], проведем экспериментальные исследования САУ на базе минимального ПР 2/0 и неминимального ПР 2/1 с фильтром. Зоны робастности для этих регуляторов в корневой и временной областях, для желаемого характеристического полинома Ньютона, представлены в табл. 2.

Таблица 2. **Зоны робастности САУ**

Структура регулятора	Зона робастности САУ	
	в корневой области: $\Omega_0, c^{-1}$	во временной области: $t_n, c$
ПР 2/0	(3.27; 6.66)	(1.78; 0.88)
ПР 2/1	(2.65; 10.69)	(2.82; 0.70)
РС	(3.3; 19.8)	--

Результаты синтеза ПР2/1 при среднегеометрическом корне (СГК)  $\Omega_0 = 3,73 \text{ с}^{-1}$  и ПР1/0 при  $\Omega_0 = 3,27 \text{ с}^{-1}$  представлены в табл. 3. В данном случае, расположение желаемой динамической характеристики на границе зоны робастности позволяет провести редукцию регулятора ПР 2/0 в ПР1/0.

Переход к цифровому представлению передаточной функции ПР производится на основе замены производной  $s$  конечной разностью вида:  $s = (1-z^{-1})/T_0$ , где  $T_0$  – период квантования сигнала.

Таблица 3. Результаты синтеза ПР

Тип регулятора	$t, \text{с}$	$\Omega_0, \text{с}^{-1}$	$r_2$	$r_1$	$r_0$	$c_1$	$c_0$
ПР 2/1	2.0	3.73	1.13	6.62	6.06	1.0	4.78
ПР 1/0	1.78	3.27	0	1.0	0.94	--	1.0

На рис. 2 представлены экспериментально снятые переходные процессы САУ с неминимальным ПР2/1,  $\Omega_0 = 3.73 \text{ с}^{-1}$  (рис. 2, а) и редуцированным ПР1/0,  $\Omega_0 = 3.27 \text{ с}^{-1}$  (рис. 2, б), где графики 1 соответствуют начальным параметрам объекта, графики 2 – изменению коэффициента  $C_{12}$  на +40%. При этом применение фильтра в структуре регулятора (ПР2/1) позволяет существенно расширить зону робастности, а расположение желаемой характеристики на границе этой зоны позволяет синтезировать редуцированный регулятор (ПР1/0) с сохранением робастных свойств САУ.

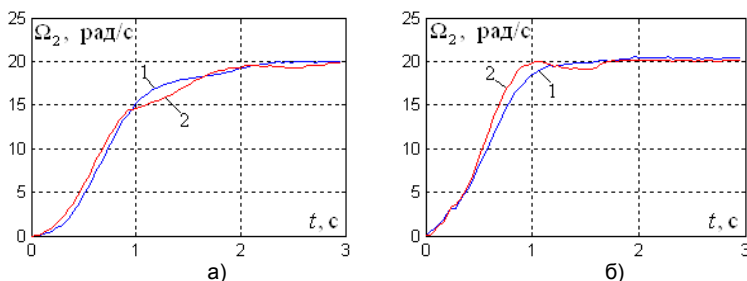


Рис. 2 Графики переходных процессов САУ с неминимальным ПР2/1 (а) и минимальным редуцированным ПР1/0 (б)

Экспериментальные исследования САУ с регуляторами состояния (РС) проводятся для случая безынерционного РС, а также РС с дополнительными производными по вектору состояния  $x$ .

Зона робастности САУ с безынерционным РС, для желаемого характеристического полинома Ньютона, представлена в таблице 2.

Согласно [3], для редукции регулятора достаточно расположить желаемую динамическую характеристику на одной из границ зоны

робастности, что позволит обнулить один из коэффициентов РС. Примем  $\Omega_0 = 3.3 \text{ с}^{-1}$ , что даст следующие значения вектора регулятора:

$$K = [0 \quad -0.64 \quad -1].$$

Результаты эксперимента представлены графиками переходных процессов (рис. 3, а), где график 1 соответствует исходным значениям параметров объекта, график 2 - изменение С12 на +40%. Таким образом, из рисунка видно, что выбор СГК на границе зоны позволяет синтезировать редуцированный регулятор состояния при сохранении устойчивости и робастных свойств САУ.

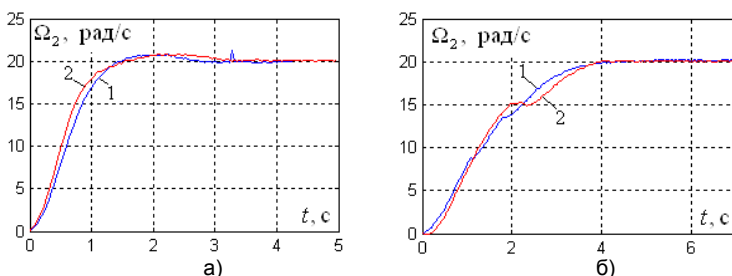


Рис. 3 Графики переходных процессов САУ с безынерционным (а) и дополненным гибкими обратными связями РС (б) при  $\Omega_0 = 3.3 \text{ с}^{-1}$  и  $\Omega_{01} = 6 \text{ с}^{-1}$ ,  $\Omega_{02} = 1.5 \text{ с}^{-1}$  соответственно

Рассмотрим далее метод расширения зоны робастности, для чего введем в структуру регулятора дополнительные производные по вектору состояния [4]. Полученные в результате синтеза вектора  $K$  и вектора производных  $K'$ , отвечающие за формирование статических и динамических показателей САУ независимо друг от друга. Принимая  $\Omega_{01} = 6 \text{ с}^{-1}$  и  $\Omega_{02} = 1.5 \text{ с}^{-1}$  получаем следующие значения векторов  $K$  и  $K'$  соответственно:

$$K = [-0.15 \quad -2.31 \quad -10.94]; \quad K' = [-5.15 \quad -7.66 \quad -12.99].$$

Проводя аналогичный анализ графиков (рис. 3, б), приходим к выводу о целесообразности применения дополнительного канала по производным координат состояния, что позволяет расширить зону сохранения робастных свойств САУ.

Таким образом, проведенные эксперименты наглядно демонстрируют возможность применения безынерционных и динамических регуляторов как полного порядка, так и редуцированных для построения робастных САУ на реальном технологическом оборудовании.

#### Литература

1. Тарарыкин С.В., Аполонский В.В., Терехов А.И. Исследование влияния структуры и параметров полиномиальных регуляторов «входа-выхода» на робастные свойства синтезируемых систем // Мехатроника Автоматизация Управление. – 2013. №11.



2. **Тарарыкин С.В., Аполонский В.В.** Методы синтеза редуцированных полиномиальных регуляторов динамических систем. // Мехатроника, автоматизация, управление, Том 16, 2015, №2.
3. **Аполонский В.В., Тарарыкин С.В.** Методы синтеза редуцированных регуляторов состояния линейных динамических систем // Известия РАН. Теория и системы управления, 2014, №6, с. 25-33.
4. **Аполонский В.В., Терехов А.И.** Применение гибких обратных связей для робастного управления состоянием электромеханических систем // Труды VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 708 с.

*Аполонский Владимир Викторович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vlad-apolonskiy@yandex.ru

УДК 625.083

А.А. АНИСИМОВ, д.т.н., доцент, В.И. ЛЕВИН, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, дом 34  
*e-mail: anis@eims.ispu.ru*

## **Автоматическая настройка регуляторов состояния с использованием искусственной нейронной сети\***

**Аннотация.** Рассматривается метод настройки регуляторов состояния, основанный на идентификации объекта при помощи радиальной нейронной сети, анализирующей переходные характеристики по координатам состояния системы, с последующим расчетом параметров регулятора методом модального управления. Предлагаемый подход позволяет существенно сократить длительность и повысить качество настройки системы управления.

**Ключевые слова:** регулятор состояния, автоматическая настройка, радиальная нейронная сеть, обучение нейронной сети, электромеханическая система.

A.A. ANISIMOV, Doctor of Engineering, Associate Professor,  
V.I. LEVIN, student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34. *e-mail: anis@eims.ispu.ru*

## **Automatic tuning of the state regulators with help of artificial neural network**

**Abstract.** The article deals with the problem of automatic tuning of the state regulators. The suggested method of tuning is based on the identification of control object with help of the radial neural network, processing system dynamic

characteristics, and the following calculation of regulator parameters by method of modal control. This approach allows significantly reduce an amount of time, needed for tuning of control system.

**Key words:** state regulator, automatic tuning, radial neural network, neural network training, electromechanical system.

*Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00972).*

Перспективным путем повышения качества управления сложными электромеханическими объектами в настоящее время считается применение регуляторов состояния (РС) различных типов [1]. Вместе с тем, для реализации потенциальных возможностей РС необходимо применение средств автоматической настройки. Это обусловлено погрешностями идентификации, применением упрощенных математических моделей объектов управления, а также большим количеством настраиваемых параметров подобных регуляторов. При этом большинство известных методов настройки основаны на рекуррентных алгоритмах численной оптимизации, что требует большого количества итераций [2].

Для снижения длительности настройки РС ранее было предложено применение искусственных нейронных сетей (ИНС), позволяющих проводить идентификацию объекта и коррекцию регулятора по результатам единственного эксперимента [2, 3, 4]. Однако подобные исследования проводились в основном для систем с регуляторами “входа-выхода”, синтезируемых по передаточной функции объекта. Значительно меньше внимания уделялось системам с обратной связью по вектору состояния, для синтеза которых необходима векторно-матричная модель объекта.

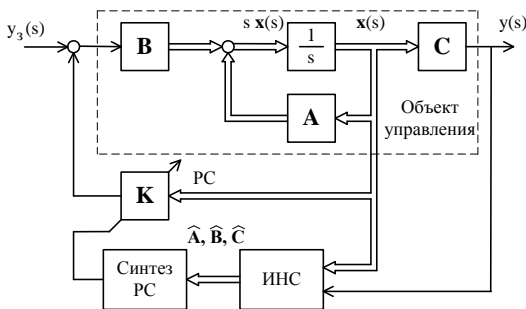


Рис. 1. Структурная схема системы автоматической настройки РС

С целью повышения эффективности автоматической настройки систем управления с безынерционными РС в данной работе предлага-

ется использовать радиальную ИНС, на входы которой поступает вектор переменных состояния (рис. 1). На вход объекта управления подается тестовый сигнал, затем по полученным переходным характеристикам ИНС выполняет идентификацию параметров векторно-матричной модели. На основе этих оценок блок “Синтез РС” выполняет расчет параметров регулятора методом модального управления.

В процессе настройки ИНС дает оценки матриц объекта **A**, **B** и **C** на основе анализа переходных характеристик для вектора состояния **x** и выходной координаты **y**, как показано на рис. 1, где  $s$  – переменная Лапласа;  $y_3$  – задающее воздействие; **K** – матрица РС. Такой подход позволяет наиболее точно оценить параметры объекта, в том числе слабо влияющие на выходную координату. При этом в процессе идентификации учитывается априорная информация об объекте управления в виде структуры и ряда известных параметров.

Расчет параметров РС проводится методом модального управления с использованием желаемого характеристического полинома  $D(s)$ , определяющего динамические свойства формируемой системы [1]. При этом полином  $D(s)$  выбирается из ряда стандартных (Ньютона, Бесселя, Баттерворта и других) или формируется путем параметрической оптимизации системы управления.

Как показывает анализ, для решения задачи идентификации параметров системы по переходным характеристикам целесообразно использовать радиальную ИНС, позволяющую наиболее эффективно классифицировать получаемые данные [3, 4]. Подобные ИНС состоят из двух слоев, причем нейроны первого слоя реализуют радиальные функции (в данном случае функции Гаусса), а нейроны второго слоя вычисляют взвешенную сумму входных сигналов.

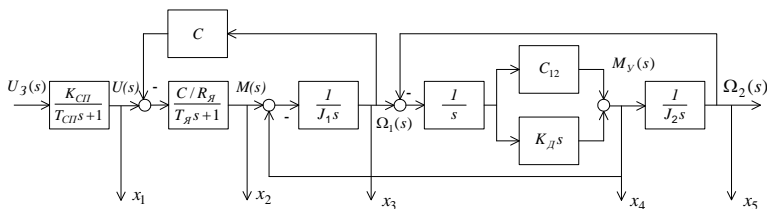


Рис. 2. Структурная схема линейной модели двухмассовой ЭМС

Для обучения радиальной ИНС используется алгоритм newrb(), входящий в состав программного комплекса MatLab 7.6, позволяющий оптимизировать количество нейронов 1-го слоя и координаты их центров. Обучающая выборка представляет собой массив переходных характеристик, полученных путем вариации параметров объекта управления методом Монте-Карло в диапазоне их возможных изменений.

Анализ массива переходных характеристик позволяет повысить точность идентификации, однако большой объем информации в дан-

ном случае приводит к резкому возрастанию количества переменных коэффициентов ИНС, что затрудняет процесс обучения [4]. Эффективным решением этой проблемы является использование на входе ИНС взвешенной суммы переменных состояния объекта.

Исследование предлагаемого метода автоматической настройки проводилось на примере типичной двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) [5], структура которой приведена на рис. 2, где  $U_3$  и  $U$  – задающее и выходное напряжения силового преобразователя (СП);  $M$  и  $M_{\gamma}$  – моменты двигателя и упругой передачи;  $\Omega_1, \Omega_2$  – угловые скорости 1-й и 2-й масс;  $K_{СП} = 7$  и  $T_{СП} = 0,01$  с – коэффициент передачи и постоянная времени СП;  $C = 2,17$  Вб – конструктивный параметр двигателя;  $T_{Я} = 0,044$  с,  $R_{Я} = 1,6$  Ом – постоянная времени и сопротивление якорной цепи;  $J_1 = 0,06$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_2 = 0,013$  кг·м<sup>2</sup> – моменты инерции 1-й и 2-й масс;  $C_{12} = 54,23$  Н·м/рад и  $K_{Д} = 0,15$  Н·м – коэффициенты жесткости и трения механической передачи.

Для данного объекта методом модального управления был синтезирован РС на основе желаемого характеристического полинома Ньютона при среднегеометрическом корне  $\Omega_0 = 225$  рад/с, в результате для номинальных параметров ЭМС были получены следующие значения:  $K = [-1,4 -21,3 -278,75 -448,98 -102,28]$ .

Учитывая особенности объекта, в качестве переменных параметров при формировании обучающей выборки ИНС были выбраны моменты инерции  $J_1$  и  $J_2$ , а также коэффициенты жесткости и трения –  $C_{12}$  и  $K_{Д}$ . Диапазон варьирования указанных параметров составлял  $\pm 30\%$  от номинальных значений, объем выборки 300 переходных характеристик. В результате обучения была сформирована радиальная ИНС, состоящая из 75 нейронов.

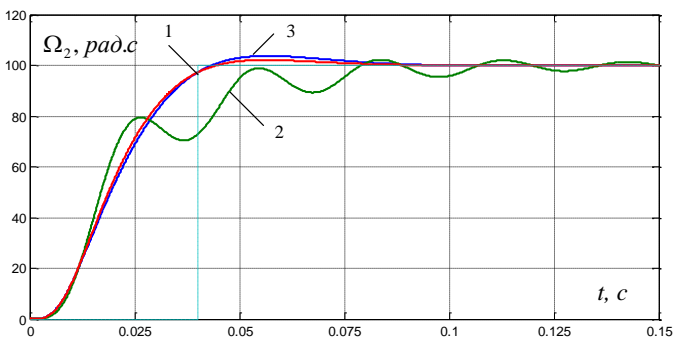


Рис. 3. Переходные процессы до и после автоматической настройки РС

Для тестирования сформированной таким образом ИНС использовалась выборка, аналогичная обучающей. Линейный характер ре-

грессионной зависимости оценок, полученных при помощи ИНС, от действительных значений параметров объекта говорит об адекватности обучения. При этом погрешность идентификации параметров ЭМС не превышает 0,1%, что существенно ниже погрешности оценивания соответствующих параметров только по выходной координате объекта.

Предлагаемый нейросетевой метод автоматической настройки систем управления с РС был реализован в виде программы на языке комплекса MatLab 7.6. Результаты моделирования процессов идентификации и настройки системы управления двухмассовой ЭМС приведены на рис. 3, где кривая 1 соответствует номинальным параметрам объекта. Отклонение параметров объекта управления от расчетных ( $J_1=0.105 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $J_2=0.0151 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $C_{12}=148.05 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$ ,  $K_d=0.087 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) приводит к существенному ухудшению динамики системы (кривая 2). Однако после идентификации параметров при помощи радиальной ИНС и расчета скорректированного РС переходная характеристика (кривая 3) практически совпадает с эталонной.

Таким образом, предложенный подход, основанный на идентификации параметров объекта управления при помощи радиальной ИНС, позволяет сократить длительность настройки безынерционного РС. При этом ИНС анализирует переходные характеристики по всем координатам состояния, что дает возможность повысить точность оценивания параметров объекта управления.

*\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части госзадания в сфере научной деятельности на 2014-2016 г.г.*

### Литература

1. **Методика** проектирования цифровых полиномиальных регуляторов электро-механических систем / С.В. Тарарыкин и др. // Электричество, 2000, N12, с. 33-39.
2. **Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.** Автоматическая настройка полиномиальных регуляторов электро-механических систем с использование искусственной нейронной сети // МАУ, 2008, N 8, с. 13-18.
3. **Методы** классической и современной теории автоматического управления. Т. 3: **Методы** современной теории автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.- 748 с.
4. **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
5. **Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.** Управление электроприводами: Учеб. пособие. – Л.: Энергоиздат, 1982.- 392 с.

*Анисимов Анатолий Анатольевич,*  
ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина",  
e-mail: anis@eims.ispu.ru

*Левин Владимир Иванович,*  
ФГБОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина",  
e-mail: amateur3@yandex.ru

УДК 621.38

С.А. КАПУСТИН, доцент (ИГЭУ),  
И.А. ТИХОМИРОВА, ассистент (ИГЭУ)

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: kapustin@eims.ispu.ru*

## **Разработка физических моделей тиристорov и схем с использованием тиристорov для учебных исследований**

**Аннотация.** Для учебного исследования прибора под названием «тиристор» разработана его полноценная физическая модель, созданная на основе биполярных транзисторов и стабилитронов.

**Ключевые слова:** тиристор, симистор, система импульсно-фазового управления.

S. A. KAPUSTIN, docent, I.A. Tikhomirova assistant

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: kapustin@eims.ispu.ru*

## **Comparative analysis of efficiency of selectively invariant electromechanical systems**

**Abstract.** For academic research unit called "thyristor" developed his full physical model developed on the basis of bipolar transistors and Zener diodes .

**Key words:** thyristor, symistor, system of pulse-phase control.

Одним из наиболее эффективных способов изучения свойств, классификационных параметров и характеристик любого вида полупроводникового прибора является его инструментальное исследование на учебном лабораторном оборудовании. Для большинства компонентов электроники – диодов, транзисторов, опто и фото приборов, процесс учебных лабораторных исследований не представляет сколь-нибудь значимых технических трудностей. Тиристоры же, представляющие собой один из основных преобразовательных компонентов электроники и очень широко применяемые в силовой электронике, полностью исследовать на учебно-лабораторном оборудовании невозможно.

Наиболее эффективным и комплексным способом изучения свойств практически любого электронного прибора является снятие его вольтамперной характеристики ВАХ  $I = f(U)$ . Особенно это относится к ВАХ тиристора (рис. 1). В учебных целях снять полную ВАХ реального тиристора практически невозможно по следующим причинам:

1. Учебные лабораторные стенды по электронике в целях безопасности в основном оборудуют маломощными низковольтными источниками питания, а диапазон испытательных токов и напряжений

при фиксации “характерных” точек ВАХ тиристора достигает  $10^7 \div 10^9$ , что нереально для учебно-лабораторного оборудования;

2. Нет реальных маломощных и низковольтных тиристоров, пригодных для учебно-лабораторных исследований;

3. Наличие в структуре тиристора сильнейшей положительной обратной связи, из-за действия которой повторяемость опытов исключена.

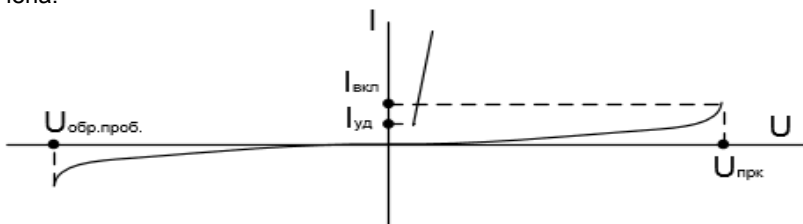


Рис. 1. Внешний вид ВАХ тиристора.

Отмеченные на ВАХ параметры любого вида тиристора являются нормируемыми, паспортными, значение которых для учебных целей является весьма значимым, но практическое определение, которых по выше перечисленным причинам весьма проблематично.

Для учебного исследования прибора под названием «тиристор» предлагается его полноценная физическая модель, созданная на основе биполярных транзисторов и стабилитронов, фиксированные напряжения стабилизации которых будут определять (моделировать) нормируемые напряжения определённого вида тиристора.

На схеме модели тиристора (рис.2) стабилитрон VD1 будет определять значение напряжения  $U_{прк}$ , при котором тиристор будет включаться, т.е. переходить из закрытого состояния в открытое при прямом напряжении на нем. Стабилитрон VD2 будет моделировать значение пробивного напряжения при обратной полярности напряжения на тиристоре. Постоянство параметров стабилитронов VD1 и VD2 обеспечивает высокую повторяемость экспериментов по снятию полной ВАХ тиристора в динисторном включении.

Данная модель позволяет снять выходную ВАХ исследуемого динистора  $I = f(U)$ , зафиксирована ней основные эксплуатационные параметры прибора: напряжение переключения (включения)  $U_{прк}$ , ток включения  $I_{вкл.}$ , ток удержания  $I_{уд.}$ , напряжение открытого состояния  $U_{откр.}$ , т., обратное пробивное напряжение  $U_{обр. проб.}$

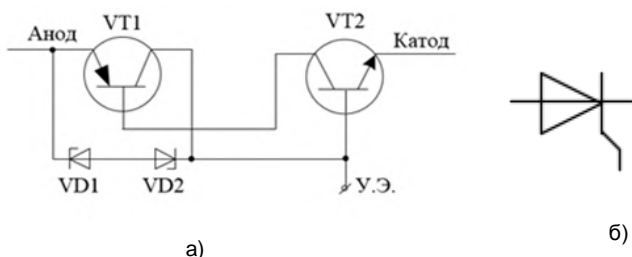


Рис. 2. Схема модели тиристора для лабораторных исследований: а) на основе комплементарной пары БТ; б) УГО тиристора.

Исследование и снятие ВАХ симметричного тиристора (симистора) будет выполняться на двух идентичных транзисторных аналогах диристоров, включенных встречно-параллельно, (рис. 3).

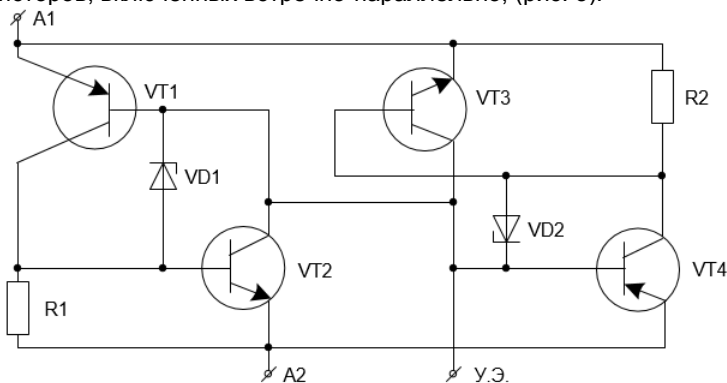


Рис. 3. Лабораторная схема для снятия ВАХ симметричного тиристора

Наличие управляющего электрода у тиристора и возможность управлять его моментом включения при прямой полярности приложенного к нему напряжения, позволяют строить выпрямители с плавным изменением среднего значения выпрямленного напряжения на нагрузке.

Для учебного исследования работы тиристора в схеме управляемого выпрямителя УВ предлагается однофазная двухполупериодная схема с “вертикальным” способом управления, на практике называемая “системой импульсно-фазового управления” СИФУ. Изменение фазы (угла регулирования) выполняется с помощью изменения скорости нарастания управляющего напряжения  $U_{\text{пилы}}$ .

Полная электрическая принципиальная схема УВ, реализующая предложенный способ, изображена на рис. 4.



Функции формирователя управляющих импульсов выполняет ключевая схема на транзисторах VT5 и VT6, представляющая собой аналог тиристора с регулируемым порогом переключения (R11, R12). Функции генератора пилообразного напряжения ГПН выполняет транзистор VT3 с подключённым параллельно ему конденсатором C1. Заряд конденсатора C1, соответствующий возрастанию амплитуды напряжения «Упилы», происходит при запертом состоянии транзистора VT3. Предельное значение амплитуды «Упилы» определяется настройкой узла сравнения, функционально состоящем из транзистора VT4 с учётом порога переключения аналога тиристора на VT5 и VT6. В момент равенства этих напряжений формируется импульс, открывающий тиристор. Синхронизация процессов «заряд/разряд» конденсатора C1 и, соответственно, формирование импульсов управления тиристором VS1, выполняется с помощью триггера Шмитта ТШ на транзисторах VT1 и VT2. В моменты времени, когда входное переменное напряжение проходит через «0», на выходе ТШ (коллектор VT2) формируется короткий импульс, открывающий транзистор VT3. Конденсатор C1 разряжается на открытый транзистор и с окончанием импульса от ТШ запускается новый цикл «заряд/разряд» конденсатора C1. Длительность короткого импульса сброса, формируемого ТШ, определяет значение минимального угла управления  $\alpha$  и устойчивость и стабильность работы всей системы в целом.

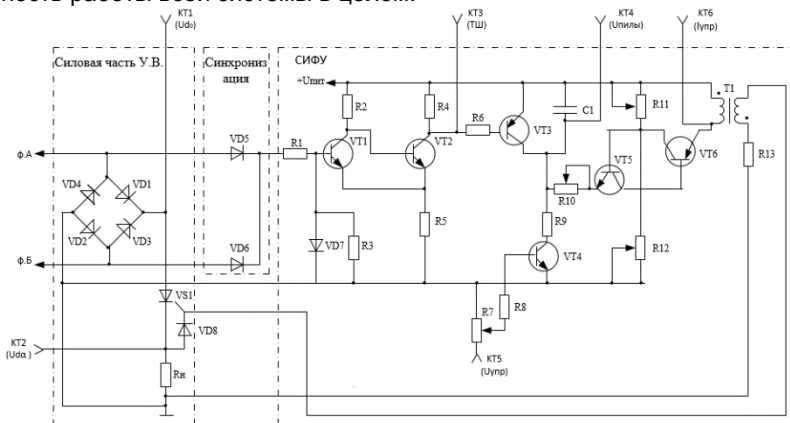


Рис. 4. Однофазный 2-х полупериодный управляемый выпрямитель, схема электрическая принципиальная

Предложенная для лабораторного исследования схема при относительной простоте, позволяет визуально проследить все характерные сигналы, изложенные в теории для данного способа управления, снять практически полную регулировочную характеристику  $U_{дс} = f(\alpha)$ ,

снять и построить внешние характеристики  $U_{\alpha} = f(I_d)$  для разных значений  $\alpha$  и при разных характерах нагрузки (активная, комплексная).

#### Литература

1. **Воронков, Эдуард Николаевич.** Твердотельная электроника: практикум: [учебное пособие для вузов] / Э. Н. Воронков. – М.: Академия, 2010. — 128 с.
2. **Замятин В. Я., Кондратьев Б.В.** Тиристоры. – М.: Сов. Радио, 1980.

*Капустин Сергей Алексеевич*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: kapustin@eims.ispu.ru

*Тихомирова Ирина Александровна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: 3kitti4@gmail.com

УДК 621.38

В.Г. ТЕРЕХОВ, к.т.н., доцент,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34  
E-mail: vladimirtg2@yandex.ru

### **Особенность исследования тиристорov на лабораторном оборудовании фирмы Профобразование»**

**Аннотация.** Для новых стендов разработана методика проведения лабораторной работы по исследованию тиристорov и симисторov. Разработан и реализован в формате элементов стенда блок СИФУ.

**Ключевые слова:** тиристор, симистор, СИФУ.

V.G. TEREHOV, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: vladimirtg2@yandex.ru

### **Peculiarities of thyristor's research on the labware of "Profobrazovanie" company**

**Abstract.** Have been developed a new method of laboratory workshop of thyristor's and symistor's research. It has been developed and made as the elements of "SIFUY" blok stand.

**Key words:** thyristor, symistor, SIFU.

Замена лабораторной базы для дисциплин «Электроника» на комплект типового учебно-лабораторного оборудования «Основы электроники ОЭ-ПО» фирмы «Профобразование» г. Казань потребовало модернизацию методических указаний и методики проведения лабораторных работ. Основная часть работ, выполнявшаяся на старых стен-

дах, без особых проблем реализуется на новых стендах. Исключение составляет работа по исследованию тиристоров и схем на их основе.

Модуль «Тиристор ВТ151», поставляемый со стендом, имеет максимальное напряжение 800 В; модуль «Симистор МАС97» - максимальное напряжение 600 В. Следовательно, исследование вольт-амперной характеристики реального прибора требует применения высоковольтных источников питания, которые отсутствуют в данном стенде. Кроме того, снятие характеристики не имеет смысла, так как в практике требуется лишь несколько точек характеристики (падение напряжения в открытом состоянии; минимальный ток управления; ток утечки в закрытом состоянии), которые определяются без снятия всей зависимости. Замена тиристора транзисторной моделью дает характеристики, далекие от реального прибора.

В связи с этим исследовать особенности работы прибора удобнее непосредственно в схемах, где они применяются, например - в управляемых выпрямителях.

Для управляемых выпрямителей в промышленных устройствах применяют специальные системы импульсно-фазового управления (СИФУ), обеспечивающие полный диапазон регулирования. К сожалению, такое устройство не входит в комплект оборудования стенда. Сборка студентами такого устройства из модулей стенда является неэффективной, так как подменяет исследование особенностей работы тиристоров отладкой достаточно сложной второстепенной схемы. Поэтому разработан и реализован в формате модулей данного стенда блок СИФУ (рис. 1). В зависимости от положения движка резистора управления СИФУ импульс управления формируется с задержкой  $\alpha$  от 6 до 170 градусов относительно питающего синусоидального напряжения.

СИФУ питается от силового источника напряжения стенда (~8 В) с помощью диодного моста VD1 - VD4 и стабилизатора DD1. Моменты близкие к переходу синусоиды напряжения через ноль выделяются и формируются в прямоугольные импульсы с помощью транзистора VT. Конденсатор C2 позволяет отстроиться от помех, образуя динамический гистерезис в работе данной схемы. На одновибраторе DD2 формируется регулируемая с помощью резистора R5 выдержка времени (от 6 до 170 градусов), по окончании которой на DD3 формируется короткий импульс управления. Оптронная развязка DD4 освобождает от взаимного влияния силовую цепь и цепи управления. Для защиты выходной цепи от ошибок при сборке включен диод VD7 и ограничивающий ток резистор R8.

На рис. 3 приведена схема для исследования полууправляемого однофазного мостового выпрямителя.

Импульсы управления формируются два раза за период и подаются одновременно на оба управляемых прибора.

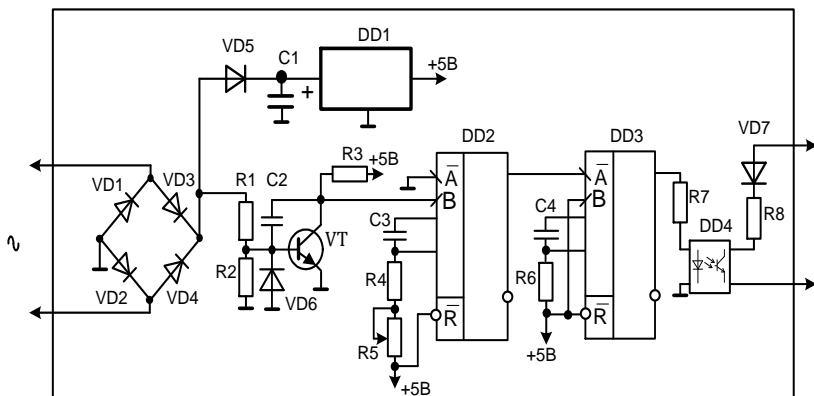


Рис. 1. Схема блока импульсно фазового управления

Вид модуля на наборном поле станда приведен на рис. 2.

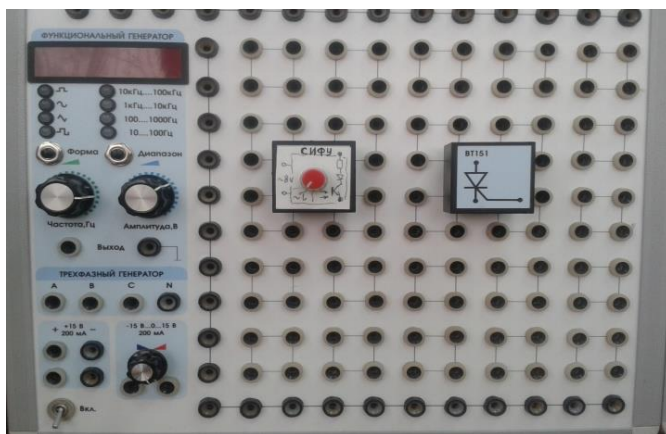


Рис. 2. Вид модуля на наборном поле станда

Схема позволяет определить минимальное значение тока управления  $I_{упр\ мин}$  по падению напряжения на  $R_{изм}$ .

Для регулирования напряжения в устройствах с ограниченным диапазоном управления, например, в бытовых регуляторах света и мощности, применяют простые схемы управления включением тиристора или симистора (рис. 4), которые также можно исследовать на данном стенде.

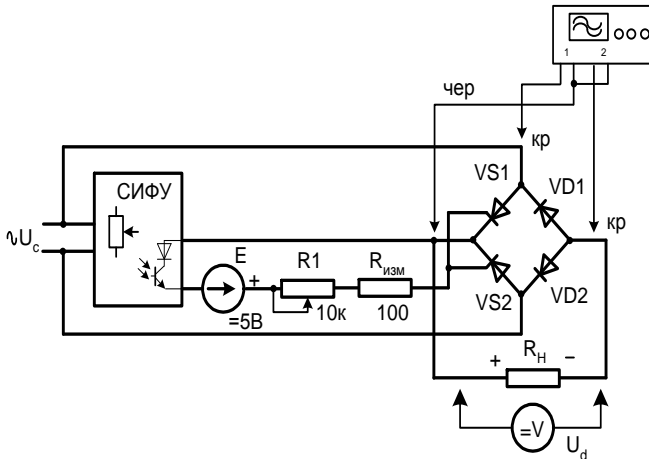


Рис. 3. Схема для исследования управляемого однофазного мостового выпрямителя

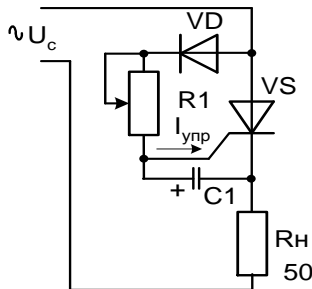


Рис. 4. Схема для проверки расчета цепей управления тиристором

По полученным в предыдущем исследовании значениям  $I_{упр\ мин}$  предлагается провести расчет элементов такой схемы управления ( $R1$ ,  $C1$ ) и проверить правильность расчета на практике.

*Терехов Владимир Григорьевич,*  
 ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 e-mail:vladimirtg2@yandex.ru

УДК 621.38

А.А. ХАФИЗОВ, Р.И. ВАЛИЕВ;  
Ю.И. ШАКИРОВ, к.т.н., доцент

ФГАОУ ВПО «Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского)  
федерального университета», г. Набережные Челны  
*E-mail: almazok75@yandex.ru*

## **Плазменная установка с жидким электродом для поверхностного упрочнения материалов**

**Аннотация.** На основе экспериментальных исследований разработана и создана технологическая плазменная электротермическая установка с жидким катодом для поверхностного упрочнения материалов. Разработанная установка позволяет повысить эффективность технологического процесса и обеспечивает стабильность показателей качества.

**Ключевые слова:** микротвердость, вольтамперная характеристика, жидкий катод.

Yu.I.SHAKIROV, Candidate of Engineering, docent,  
A.A.KHAFIZOV, senior Teacher, R.I. VALIEV, senior Teacher.

Branch of Kazan Federal University in Naberezhnye Chelny  
423800 Naberezhnye Chelny, Mira av./ 68/19  
*E-mail: almazok75@yandex.ru*

## **The plasma installation with liquid electrode for surface hardening materials**

**Abstract.** On the basis of experimental studies technological plasma electro-heat installation with liquid cathode for materials surface hardening has been designed and developed. Developed installation improves the efficiency of the process and ensures the stability of quality indicators.

**Key words:** microhardness, voltage-current characteristic, liquid cathode.

Плазменные методы нанесения износостойких покрытий или физико-химического модифицирования поверхностного слоя деталей позволяют снизить длительность технологического процесса, энергоемкость, сохранить базовые геометрические размеры деталей [1].

Обеспечение стабильности показателей качества поверхности деталей, а также высоких экономических показателей является приоритетной задачей. Исходя из этого, перспективным направлением совершенствования плазменной установки для термообработки деталей [2] является разработка головки технологической плазменной электротермической установки (ТПЭТУ).

Экспериментальные исследования электрического разряда между металлическим анодом и электролитическим катодом при атмосферном давлении проводились в широком диапазоне тока  $I=0,5\div 10$  А,

напряжения  $U=0,5 \pm 5$  кВ, межэлектродного расстояния  $l=5 \pm 50$  мм, диаметра анода  $d_a=5 \pm 40$  мм для различного состава и концентрации электролита. В экспериментах в качестве металлического анода использована медь с различной геометрической формой.

Одним из наиболее важных электрических параметров является вольтамперная характеристика (ВАХ) разряда. Результаты экспериментального исследования ВАХ разряда между электролитическим катодом из технической воды и медным анодом различного диаметра для различных межэлектродных расстояний при атмосферном давлении показаны на рис. 1.

При помощи пакета программ Excel и MathCad для разряда между электролитическим катодом из технической воды и металлическим анодом получили обобщенное критериальное уравнение в виде:

$$\frac{U \cdot I^{0,5}}{I} = 5752 \left( \frac{I}{I^{0,75}} \right)^{-1,1}$$

Зависимость  $\frac{U \cdot I^{0,5}}{I}$  от параметра  $\frac{I}{I^{0,75}}$  представлена на рис. 2.

На основе экспериментальных исследований разработана головка ТПЭТУ (рис.3). Она изготовлена из кварцевого стекла, которая охлаждается водой. В канал подается плазмообразующий газ, который показан стрелками. Разряд происходит между охлаждаемым медным анодом и электролитом.

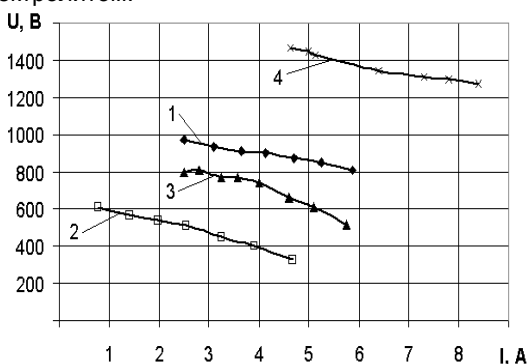


Рис. 1. ВАХ электрического разряда между медным цилиндрическим анодом и электролитическим катодом (техническая вода) для различных межэлектродных расстояний и диаметров анода: 1 –  $d_a=25$  мм,  $l=25$  мм; 2 –  $d_a=25$  мм,  $l=8$  мм; 3 –  $d_a=15$  мм,  $l=25$  мм; 4 –  $d_a=40$  мм,  $l=40$  мм

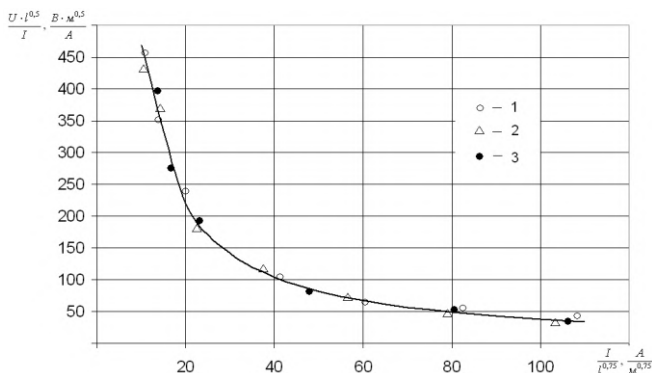


Рис. 2. Обобщенная вольтамперная характеристика разряда между электролитическим катодом из технической воды и металлическим анодом из меди при  $d_a=15$  мм: 1 –  $l=3$  мм; 2 –  $l=7$  мм; 3 –  $l=13$  мм



Рис. 3. Фотография головки технологической плазменной электротермической установки

Управление режимами упрочнения поверхности материалов осуществляется за счет изменения параметров напряжения формируемых в высоковольтном источнике напряжения (рис. 4).



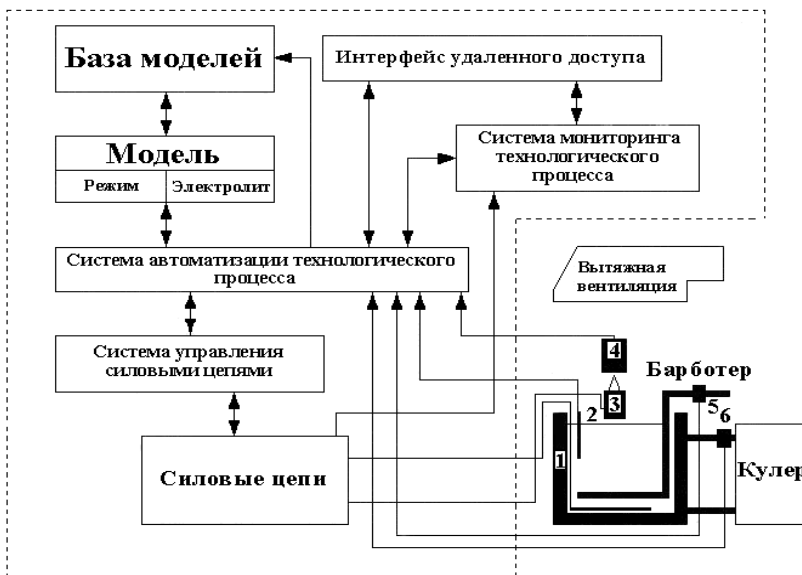


Рис. 4. Обобщенная блок-схема технологической плазменной электро-термической установки. 1 – электролитная ванна; 2 – датчик температуры электролита; 3 – головка ТПЭТУ; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – датчик расхода воздуха; 6 – датчик давления воды в системе охлаждения электролитной ванны

**Заключение.** На основе экспериментальных исследований получено обобщенное критериальное уравнение и разработана плазменная электротермическая установка для поверхностного упрочнения материалов.

#### Литература

1. Сулов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин/А.Г. Сулов. - М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
2. Ю.И. Шакиров, Р.И. Валиев, А.А. Хафизов, Г.Ю. Шакирова. Многоканальная плазменная установка с электролитическим катодом. Научно - технический журнал «Автомобильная промышленность». Москва, 2011, № 2, 36-38 с.

*Хафизов Алмаз Анзяпович,*

ФГАОУ ВПО «Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета», e-mail: almazok75@yandex.ru

*Валиев Рамиль Ильдарович,*

ФГАОУ ВПО «Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета», e-mail: rivaliev87@mail.ru

*Шакиров Юнус Идрисович,*

ФГАОУ ВПО «Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета», e-mail: inekashakirov@mail.ru

УДК 621.38

Р.И. ВАЛИЕВ, А.А. ХАФИЗОВ;  
Ю.И. ШАКИРОВ, к.т.н., доцент

ФГАОУ ВПО «Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского)  
федерального университета», г. Набережные Челны  
*e-mail: rivaliev87@mail.ru*

### **Оптимизация процесса очистки и снятия заусенцев с поверхности изделий плазменной электротермической установкой с жидким катодом**

**Аннотация.** Разработана плазменная электротермическая установка с жидким катодом. Исследованы и отработаны режимы процесса очистки и снятия заусенцев с поверхности изделий.

**Ключевые слова:** удаление заусенцев, шероховатость, плазма.

R.I. VALIEV, senior Teacher,  
A.A. KHAFIZOV, senior Teacher,  
Y.I. SHAKIROV, Candidate of Technical Sciences, associate professor

Branch of Kazan Federal University in Naberezhnye Chelny  
423800 Naberezhnye Chelny, Mira av 68/19. *E-mail: rivaliev87@mail.ru*

### **Optimization of the process of cleaning and deburring products surface plasma electrothermal installation with a liquid cathode**

**Abstract.** Developed plasma electrothermal installation with a liquid cathode. Studied and worked regimes cleaning process and deburring the surface of products.

**Key words:** deburring, roughness, plasma.

Одной из основных технологических операций при изготовлении и восстановлении изношенных деталей в машиностроении является операция очистки поверхности и снятия заусенцев после механической обработки. Операцию очистки поверхности полупроводников приходится выполнять в приборостроении и электронике. Удаление заусенцев определяет качество и надежность работы агрегата, повышает его эксплуатационные свойства, товарный вид.

Для оптимизации процесса очистки и снятия заусенцев разработана экспериментальная плазменная электротермическая установка (ПЭТУ) с жидким электродом для исследования характеристик разряда между металлическим анодом и жидким катодом: вольтамперных характеристик, распределение потенциала, напряженности электрического поля в плазме и плотности тока на электродах которые позволят разработку ПЭТУ с жидким катодом для технологического применения. [1] (рис.1). Экспериментальная установка предназначена для исследования электрического разряда в диапазоне параметров  $U_p = 0,3 - 3000$  В, токов  $I = 0,01 - 200$  А,  $j_s = 0,1 - 25$  А/см<sup>2</sup>, межэлектродных расстояний  $l =$

0,1 – 100 мм. Полученная обобщенная вольтамперная характеристика может быть рекомендована для использования в расчетах при разработке промышленной технологической ПЭТУ с жидким катодом для очистки и снятия заусенцев с поверхности изделий.

Для образования сплошной парогазовой оболочки, хотя бы и неустойчивой, необходимо обеспечить выделение в прианодной зоне энергии, достаточной для вскипания электролита в некотором объеме.

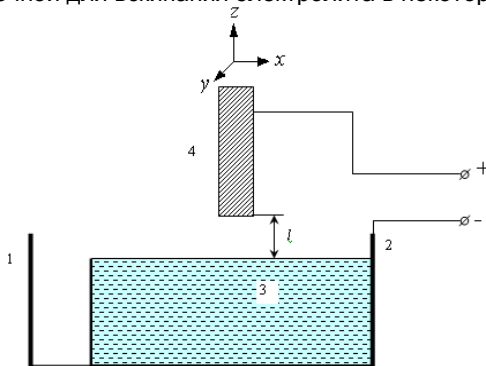


Рис. 1. Схема электролитической ванны с проточным электролитическим катодом: 1 – электролитическая ванна; 2 – токоподвод (металлическая ванна); 3 – электролит; 4 – металлический анод

Напряжение разряда ( $\approx 120$  В) практически не влияет на параметры качества поверхности и на скорость очистки детали (рис. 2). Плотность же анодного тока влияет и на качество обработки и на продолжительность обработки.



Рис. 2. Поверхность обрабатываемого изделия: а) до очистки; б) после очистки

Температура электролита влияет на качество обработанной поверхности. Исследования показали, что с увеличением температуры

электролита уменьшается производительность процесса. Поэтому мы охлаждали электролит с помощью проточной водопроводной воды.

Достигнуто эффективное удаление заусенцев (рис.3), оставшихся после механической обработки, с кромок деталей сложной конфигурации, электрическим разрядом между обрабатываемой деталью и жидким электродом. Площадь парогазового слоя начинает расширяться со скоростью  $0,005 \div 0,01 \text{ м/с}$ . Ток растет, и через  $8 \div 12 \text{ сек}$ , при критических условиях слой разрывается взрывом, далее процесс повторяется. При  $h = 10^{-3} \text{ м}$ , площадь поверхности слоя доходит до  $0,012 \div 0,015 \text{ м}^2$ , а ток разряда до  $200 \text{ А}$ . Исследования показали, что процесс снятия заусенцев следует вести при  $4 \text{ А/см}^2 < j_a < 13 \text{ А/см}^2$ , напряжении  $80 \text{ В} < U_p < 120 \text{ В}$  и температура  $\sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

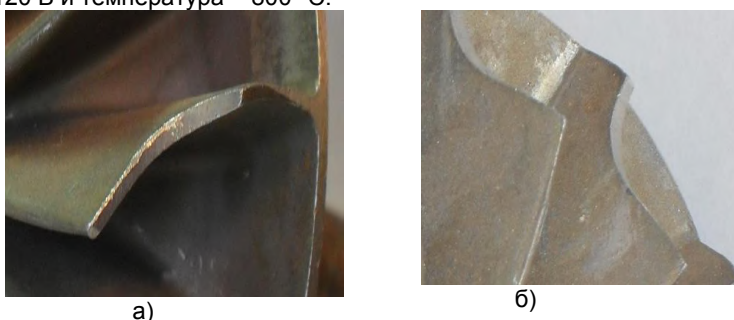


Рис. 3. Обработка детали сложной конфигурации  
а) до обработки; б) после обработки

**Закключение.** Для обработки деталей необходим источник питания выпрямленным напряжением  $U = 400 - 550 \text{ В}$  мощностью до  $100 \text{ кВт}$ . В процессе анализа установлены режимы, при которых производительность снятия заусенцев повышается в  $2 - 2,5$  раза по сравнению с электроэрозионным способом, одновременно шероховатость снижается до  $0,16 - 0,08 \text{ мкм}$  (класс шероховатости  $8 - 9$ ).

#### Литература

1. **Валиев Р.И., Ильин В.И., Шакиров Б.Ю., Шакиров Ю.И.** Система управления процессом обработки поверхности изделий плазменной электротермической установкой с жидким электродом. Научно - технический вестник Поволжья. Казань, 2012, №1, с.131-138.

*Хафизов Алмаз Анзяпович,*

ФГАОУ ВПО «Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета», e-mail: almazok75@yandex.ru

*Валиев Рамиль Ильдарович,*

ФГАОУ ВПО «Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета», e-mail: rivaliev87@mail.ru

*Шакиров Юнус Идрисович,*

ФГАОУ ВПО «Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета», e-mail: inekashakirov@mail.ru

УДК 621.38

А.М. АББЯСОВ, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, дом 34

### **Заточка зондов для атомно-силовой микроскопии**

**Аннотация.** Показан недостаток стандартного метода травления зонда для атомно-силовой микроскопии. Представлен метод улучшающий качество заточки острия металлического зонда методом электрохимического травления.

**Ключевые слова:** зонд, атомно-силовая микроскопия, заточка.

A. M. ABBYASOV , senior Teacher

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail:* alex@eims.ispu.ru

### **Sharpening probes for atomic force microscopy**

**Abstract.** Shows the lack of a standard method of etching probe for atomic force microscopy. Presents a method of improving qualities of sharpening the edge of the metallic probe by electrochemical etching.

**Key words:** probe, atomic force microscopy, sharpen.

Атомно-силовая микроскопия — один из видов сканирующей зондовой микроскопии, основанный на ван-дер-ваальсовских взаимодействиях зонда с поверхностью образца. Принцип действия атомного силового микроскопа (АСМ) основан на использовании сил атомных связей, действующих между атомами вещества. На малых расстояниях между двумя атомами действуют силы отталкивания, а на больших — силы притяжения. Обычно в приборе в качестве зонда используется игла с площадью острия в один или несколько атомов, закрепленная на кантилере (рис. 1, а), который плавно скользит над поверхностью образца. На выступающем конце кантилера (над шипом) расположена зеркальная площадка, на которую падает и от которой отражается луч лазера. Когда зонд опускается и поднимается на неровностях поверхности, отраженный луч отклоняется, и это отклонение регистрируется фотодетектором, а сила, с которой шип притягивается к близлежащим атомам — пьезодатчиком. Данные фотодетектора и пьезодатчика используются в системе обратной связи, которая может обеспечивать, например, постоянную величину силу взаимодействия между микронзондом и поверхностью образца (рис. 1, б). Разрешающая способность данного метода составляет примерно 0,1-1 нм по горизонтали и 0,01 нм по вертикали.

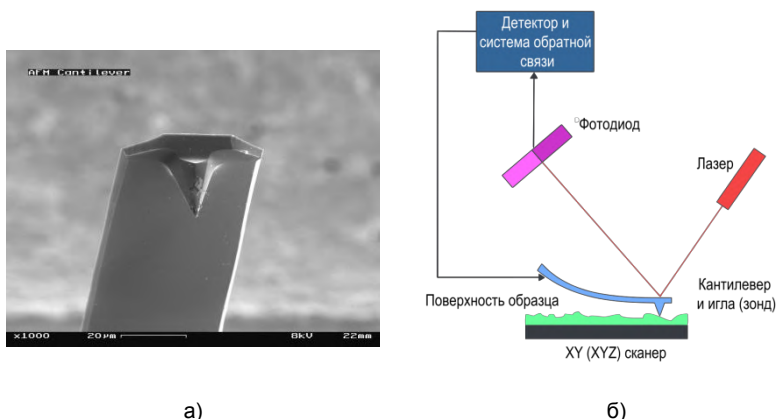


Рис. 1. а) Кантилевер атомно-силового микроскопа; б) Схема работы атомно-силового микроскопа

Кантилевер (от англ. cantilever – консоль, балка) — одна из основных составных частей сканирующего зондового микроскопа представляет собой массивное прямоугольное основание, размерами примерно  $1,5 \times 3,5 \times 0,5$  мм, с выступающей из него балкой (собственно кантилевером), шириной порядка  $0,03$  мм и длиной от  $0,1$  до  $0,5$  мм. На нижнем конце кантилевера располагается игла, взаимодействующая с образцом. Радиус острия иглы промышленных кантилеверов находится в пределах  $5$ — $90$  нм, лабораторных — от  $1$  нм.

В сравнении с растровым электронным микроскопом атомно-силовой микроскоп обладает рядом преимуществ. Атомно-силовая микроскопия позволяет получить истинно трёхмерный рельеф поверхности. Кроме того, изучаемая поверхность не требует нанесения проводящего металлического покрытия, которое часто приводит к заметной деформации поверхности. Для нормальной работы растрового электронного микроскопа требуется вакуум, в то время как большинство режимов атомно-силовой микроскопии могут быть реализованы на воздухе или даже в жидкости. Данное обстоятельство открывает возможность изучения биомолекул и живых клеток.

К недостаткам атомно-силовой микроскопии следует отнести небольшой размер поля сканирования. Максимальный перепад высот составляет несколько микрон, а максимальное поле сканирования в лучшем случае составляет порядка  $150 \times 150$  микрон. Другая проблема заключается в том, что при высоком разрешении качество изображения определяется радиусом кривизны кончика зонда, что при неправильном выборе зонда приводит к появлению артефактов на получаемом изображении.

Для учебных целей достаточно зондов заточенных электрохимическим способом. Преимущество таких зондов заключается в простоте

их изготовления. Зонды из твердых металлов очень широко используются в сканирующей зондовой микроскопии. В основном они использовались в сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), разработанной в 1982 году, а так же в атомно-силовой микроскопии (АСМ), разработанной в 1986 году. Зонд — это металлическая игла с очень острым окончанием: которая обычно изготавливается из вольфрама (W), платины (Pt), платиново-иридиевого сплава (Pt-Ir), золота (Au), тантала (Ta), железа (Fe) и, собственно, из иридия (Ir). Выбор материала обусловлен рядом таких качеств как прочность, твердость, активность металла и других характеристик. Основные методы изготовления зондов по характеру делятся на механические и физико-химические. Первые предусматривают простые механические воздействия, такие как сдвиг или срез проволоки, при котором непосредственно обеспечивается острый кончик. Вторые делятся на методы электрохимического травления и ионной заточки. Электрохимическое травление является методом, который используется для придания зонду формы конуса с острой вершиной. Ионная заточка заключается в создании в вакууме потока ионов аргона, который направлен по касательной к зонду.

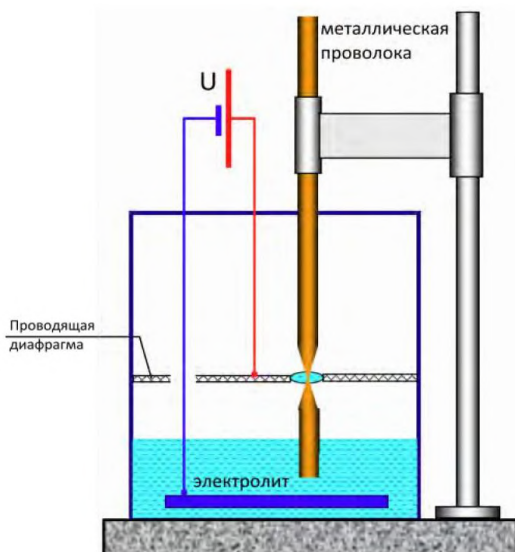


Рис. 2. Схема работы атомно-силового микроскопа

Изготовление зондов для сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) Nanoeducator II проводится на специальной установке, которая позволяет затачивать зонды с помощью электрохимического травления. Данную установку можно доработать с целью фиксации момента, когда происходит отрыв нижней части от получаемого острия зонда,

ведь именно в этот момент формируется самое тонкое острие. В базовой установке не предусмотрено фиксации момента отрыва нижней части от верхней.

С помощью доработанной установки можно получать зонды со стабильным радиусом закругления острия 70-80 нм, в то время как при обычной методике около 100 нм (наилучший единственный результат, полученный нами по обычной методике, 75 нм). Достигается это следующим образом: на рис. 2 хорошо показано, что электрическая цепь замкнута между проводящей диафрагмой и проводящей жидкостью (электролит). При этом происходит электрохимическое травление и формирование острия зонда в месте капли, которая находится на диафрагме. Когда в месте травления толщина зонда становится очень малой, то под действием силы тяжести происходит отрыв нижней части проволоки от верхней. В этот момент электрическая цепь разрывается и, одновременно с этим, формируется наиболее острое окончание. Новый метод травления совместно с подбором зонда позволяет получать более качественные и информативные изображения поверхностей самых различных материалов и наноструктур, а также позволяет повысить разрешение получаемого скана.

#### Литература

1. **Приборы** и методы зондовой микроскопии, Дедкова Е.Г., Чуприк А.А., Бобрицкий И.И., Неволин В.К., 2011.

*Аббясов Алексей Михайлович*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: [alex@eims.ispu.ru](mailto:alex@eims.ispu.ru)

УДК 621.38

В.П. АЛЕКСАНДРОВ, к.т.н., с.н.с.,  
ООО НТЦ «АРГО»,  
153000 г. Иваново, ул. Комсомольская 26  
E-mail: [89109843671@mail.ru](mailto:89109843671@mail.ru)

В.Н. ЕГОРОВ, к.т.н., доцент,  
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: [egorov@emf.ispu.ru](mailto:egorov@emf.ispu.ru)

### **Управление количеством транспортируемого в свободном состоянии параллельными потоками текстильного материала в технологической машине непрерывного действия**

**Аннотация.** Разработана структурная схема устройства для управления количеством транспортируемого в свободном состоянии параллельными пото-



ками текстильного материала в технологической машине непрерывного действия. Получено положительное решение о выдаче патента на изобретение.

**Ключевые слова:** текстильный материал, натяжение, управление.

V.P. ALEKSANDROV, Candidate of Engineering, senior staff scientist,  
ООО НТЦ «АРГО»  
153003 Ivanovo, Komsomol'skaya St., 26. E-mail: 89109843671@mail.ru

V.N. EGOROV, Candidate of Engineering, docent,  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: egorov@emf.ispu.ru

### **Device development for control of quantity of textile material transported in free state by means of parallel production lines in continuous operation technological machine**

**Abstract.** The block diagram of device for control of quantity of textile material transported in free state by means of parallel production lines in continuous operation technological machine is developed. Favourable decision of delivery of patent for an invention is obtained.

**Key words:** textile material, tensioning, control.

Изобретение относится к текстильной промышленности и может быть использовано для автоматизации технологических процессов обработки в свободном состоянии в форме жгута текстильных материалов в технологических машинах непрерывного действия.

Известен способ заправки и проводки ткани (Авторское свидетельство СССР № 341535, В05С3/12, 1972г.), состоящий в том, что расправленное полотно ткани при одинаковом натяжении перед входом в отбельную поточную линию накладывают одно на другое, а затем совместно сожгучивают, причём проводку сожгученных полотен через машины осуществляют таким образом, что направление движения ткани в спиральных в каждой мойной и материальной машине противоположно направлению движения спирали предыдущей и последующей машин и перпендикулярно общей оси линии, а выход жгута ткани в каждой машине производят напротив входа его в последующую машину линии.

Недостаток указанного способа связан с невозможностью его применения для управления количеством транспортируемого в свободном состоянии текстильного материала в технологической машине ввиду различия релаксационных свойств, т.е. степени усадки текстильного материала в процессе обработки, что неминуемо приводит к запутыванию параллельных потоков и, как следствие, вызывает аварийную остановку технологического процесса.

Наиболее близким к заявляемому способу, является приведённый в изобретении «Описание электропривода для агрегатов красиль-

но-отделочных и отбельных машин» (Авторское свидетельство СССР № 48121, 8А36, 1936г.) способ, заключающийся в транспортировании с заданной линейной скоростью текстильного материала и заполнении U-образной технологической машины непрерывного действия транспортируемым в свободном состоянии текстильным материалом, обеспечении контроля количества (веса) текстильного материала в технологической машине и релейном регулировании линейной скорости текстильного материала на входе в технологическую машину при отклонении веса текстильного материала в технологической машине за допустимые границы.

Недостатком данного способа является отсутствие отдельного регулирования количества текстильного материала в технологической машине, что вследствие естественного некоторого различия линейных скоростей параллельных потоков текстильного материала может привести к значительному отклонению количества текстильного материала в одном из потоков за допустимые границы и вызвать аварийный останов технологического процесса.

Технический результат предлагаемого способа заключается в обеспечении возможности отдельного регулирования количества текстильного материала в технологической машине и выравнивания количества текстильного материала в технологической машине в параллельных потоках.

Технический результат достигается тем, что в способе управления количеством транспортируемого в свободном состоянии параллельными потоками текстильного материала в технологической машине непрерывного действия, включающий транспортирование с заданной линейной скоростью текстильного материала и заполнение U-образной технологической машины непрерывного действия транспортируемым в свободном состоянии текстильным материалом, обеспечение контроля количества текстильного материала в технологической машине и релейное регулирование линейной скорости текстильного материала на входе в технологическую машину при отклонении веса текстильного материала в технологической машине за допустимые границы, измеряют количество текстильного материала в технологической машине отдельно в каждом из параллельных потоков, регулируют линейную скорость текстильного материала на входе в технологическую машину при отклонении в любом из параллельных потоков количества текстильного материала в технологической машине за допустимые границы, используют свойства эластичности текстильного материала для выравнивания его количества в технологической машине в параллельных потоках, причём увеличивают натяжение текстильного материала на входе в технологическую машину в потоке с большим количеством текстильного материала и уменьшают натяжение текстильного материала на входе в технологическую машину в потоке с меньшим количеством текстильного материала.

На рис.1 приведена блок-схема устройства, реализующего предлагаемый способ управления количеством транспортируемого в свободном состоянии параллельными потоками текстильного материала в технологической машине непрерывного действия.

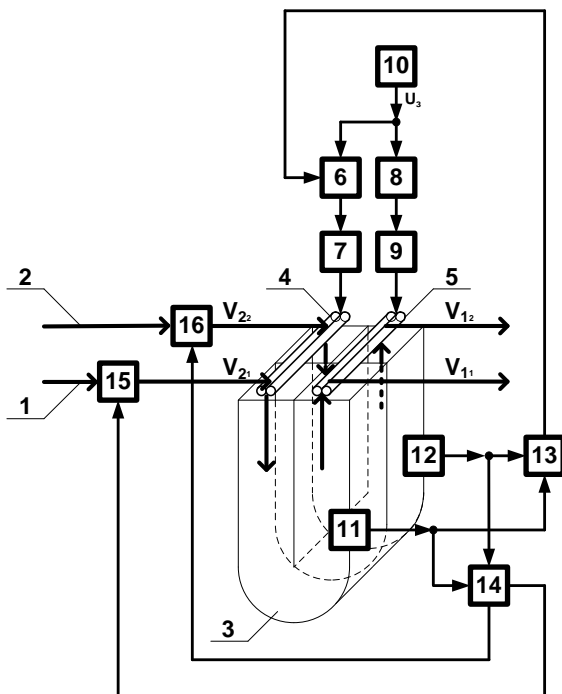


Рис.1.

Данное устройство содержит текстильный материал, обрабатываемый и транспортируемый в свободном состоянии в параллельных потоках 1 и 2 в двухсекционной U-образной технологической машине 3.

Транспортирование текстильного материала в технологической машине 3 производится входным рабочим органом 4 и выходным рабочим органом 5.

К входному рабочему органу 4 подключены соединённые последовательно блок управления 6 и привод 7, а к входному рабочему органу 5 подсоединены соединённые последовательно блок управления 8 и привод 9.

Входы блоков управления 6 и 8 объединены и связаны с выходом задающего блока 10.

Количество (вес) текстильного материала в технологической машине 3 контролируется в потоке 1 датчиком 11, а в потоке 2 - датчиком 12.

Выходы датчиков 11 и 12 соединены с соответствующими входами блока коррекции линейной скорости текстильного материала 13 и блока коррекции натяжения текстильного материала 14.

Выход блока коррекции линейной скорости текстильного материала 13 подключён ко второму входу блока управления 6.

Первый выход блока коррекции натяжения текстильного материала 14 подсоединён к входу регулятора натяжения 15 текстильного материала потока 1, а второй выход блока коррекции натяжения текстильного материала 14 подключён к входу регулятора натяжения 16 текстильного материала потока 2.

Способ осуществляется следующим образом.

В соответствии с сигналом задания  $U_3$  задающего блока 10 блоки управления 6 и 8 устанавливают линейные скорости текстильного материала в параллельных потоках на входе  $V_2$  и выходе  $V_1$  технологической машины 3:  $V_{11}$  и  $V_{21}$  для потока 1,  $V_{12}$  и  $V_{22}$  для потока 2.

Обычно

$$V_{11} = V_{21} \cdot (1 + \varepsilon_1), \quad (1)$$

$$V_{12} = V_{22} \cdot (1 + \varepsilon_2), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – относительное изменение длины (усадка) обрабатываемого текстильного материала соответственно в потоке 1 и в потоке 2.

В общем случае

$$\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2. \quad (3)$$

Кроме того, вследствие, например, различия в проскальзывании потоков текстильного материала во входном рабочем органе 4 и в выходном рабочем органе 5

$$V_{11} \neq V_{12}, \quad (4)$$

$$V_{21} \neq V_{22}. \quad (5)$$

Поскольку  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  величины случайные, из выражений (1) и (2) получаем условия целесообразной настройки соотношения линейных скоростей для параллельных потоков:

$$V_{11} = V_{21} \cdot (1 + m_{\varepsilon_1}), \quad (6)$$

$$V_{12} = V_{22} \cdot (1 + m_{\varepsilon_2}), \quad (7)$$

где  $m_{\varepsilon_1}$ ,  $m_{\varepsilon_2}$  – математическое ожидание относительного изменения длины (усадки) обрабатываемого текстильного материала соответственно в потоке 1 и в потоке 2.

Поскольку  $\varepsilon_1 \neq m_{\varepsilon_1}$  и  $\varepsilon_2 \neq m_{\varepsilon_2}$ , реальное соотношение линейных скоростей для параллельных потоков по формулам (1), (2) отличается от условия настройки соотношения линейных скоростей для параллельных потоков по формулам (6), (7), это с учётом различия в проскальзывании потоков текстильного материала во входном рабочем

органе 4 и в выходном рабочем органе 5 ведёт к значительному отклонению количества текстильного материала в одном из параллельных потоков за допустимые границы.

Если в каком-то потоке количество текстильного материала, контролируемого датчиками 11 и 12, выходит за максимальную границу, блок коррекции линейной скорости текстильного материала 13 воздействует на блок управления 6 и снижает линейные скорости  $V_{11}$  и  $V_{12}$  текстильного материала на входе технологической машины 3. Аналогично, при выходе количества текстильного материала за минимальную границу линейные скорости  $V_{11}$  и  $V_{12}$  текстильного материала на входе технологической машины 3 повышаются.

Одновременно блок коррекции натяжения текстильного материала 14 при недопустимом расхождении значений количества текстильного материала в технологической машине 3 по потокам производит с помощью регуляторов натяжения 15 и 16 коррекцию натяжения  $F$  текстильного материала, используя его свойства эластичности. При этом увеличивается натяжение текстильного материала на входе в технологическую машину 3 в потоке с большим количеством текстильного материала и уменьшается натяжение текстильного материала на входе в технологическую машину 3 в потоке с меньшим количеством текстильного материала.

Предположим, что в потоке 1 натяжение текстильного материала увеличилось на величину  $+\Delta F$ , а в потоке 2 уменьшилось на  $-\Delta F$ , тогда количество материала в потоках будет изменяться:

$$\Delta L_1 = -\Delta F \cdot (E_1)^{-1} \cdot \int_0^T V_{11} \cdot dt, \quad (8)$$

$$\Delta L_2 = \Delta F \cdot (E_2)^{-1} \cdot \int_0^T V_{12} \cdot dt, \quad (9)$$

где  $\Delta L_1$ ,  $\Delta L_2$  – приращения длины текстильного материала соответственно в потоке 1 и потоке 2, м;

$E_1$ ,  $E_2$  – модули упругости текстильного материала соответственно в потоке 1 и потоке 2, Н;

$T$  – интервал времени действия  $\Delta F$ , с.

В итоге в потоке 1 количество текстильного материала будет уменьшаться, а в потоке 2 – возрастать, что будет способствовать выравниванию количества текстильного материала технологической машины 3 по параллельным потокам.

Таким образом, реализация предложенного способа позволяет надёжно осуществлять раздельное регулирование количества текстильного материала в технологической машине и выравнивание количества текстильного материала в технологической машине в параллельных потоках.

### Литература

1. Заявка на изобретение №2013151215 от 18.11.13г. Способ управления количеством транспортируемого в свободном состоянии параллельными потоками текстильного материала в технологической машине непрерывного действия. Решение о выдаче патента от 18.03.15г.

*Александров Виктор Петрович,*

ООО НТЦ «АРГО»,

e-mail: 89109843671@mail.ru

*Егоров Валерий Николаевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: : egorov@emf.ispu.ru

УДК 621.38

В.П. АЛЕКСАНДРОВ, к.т.н., с.н.с.,

ООО НТЦ «АРГО»

153000 г. Иваново, ул. Комсомольская 26

E-mail: 89109843671@mail.ru

В.Н. ЕГОРОВ, к.т.н., доцент,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: egorov@emf.ispu.ru

## **Разработка устройства для управления количеством транспортируемого в свободном состоянии параллельными потоками текстильного материала в технологической машине непрерывного действия**

**Аннотация.** Разработан способ управления количеством транспортируемого в свободном состоянии параллельными потоками текстильного материала в технологической машине непрерывного действия. Получено положительное решение о выдаче патента на изобретение.

**Ключевые слова:** текстильный материал, натяжение, управление.

V.P. ALEKSANDROV Candidate of Engineering, senior staff scientist,

ООО НТЦ «АРГО»

153003 Ivanovo, Komsomol'skaya St., 26. E-mail: 89109843671@mail.ru

V.N. EGOROV Candidate of Engineering, docent,

Ivanovo State Power Engineering University

153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: egorov@emf.ispu.ru

## **A control of quantity of textile material transported in free state by means of parallel production lines in continuous operation technological machine**

**Abstract.** The control mode of quantity of textile material transported in free state by means of parallel production lines in continuous operation technological

machine is developed. Favourable decision of delivery of patent for an invention is obtained.

**Key words:** textile material, tensioning, control.

Изобретение относится к текстильной промышленности и может быть использовано для автоматизации технологических процессов обработки в свободном состоянии в форме жгута текстильных материалов в технологических машинах непрерывного действия.

Известно устройство для поддержания заданного количества (веса) транспортируемого в свободном состоянии параллельными потоками текстильного материала в технологической машине непрерывного действия (Шмелёв А.Н., Шишло К.С. Электрооборудование промышленных предприятий текстильной промышленности. М., «Лёгкая индустрия», 1975, с. 181-182), содержащее блок управления приводом входного рабочего органа, блок управления приводом выходного рабочего органа, датчик общего количества текстильного материала в технологической машине.

Недостаток указанного устройства связан с отсутствием раздельного регулирования количества текстильного материала в технологической машине, что вследствие естественного некоторого различия линейных скоростей параллельных потоков текстильного материала может привести к значительному отклонению количества текстильного материала в одном из потоков за допустимые границы и вызвать аварийный останов технологического процесса.

Наиболее близким к заявляемому устройству, является «Устройство для поддержания заданного количества ткани в зоне обработки при транспортировании её в несколько параллельных потоков» (Авторское свидетельство СССР № 650924, В65Н23/02, 1979г.), включающее блок управления приводом входного рабочего органа, блок управления приводом выходного рабочего органа, два датчика количества текстильного материала в параллельных потоках в U-образной технологической машине, блок сравнения, логический блок управления натяжением текстильного материала и два регулятора натяжения текстильного материала на входе в U-образную технологическую машину, установленные на соответствующих параллельных потоках, причём выходы датчиков количества текстильного материала подключены к соответствующим входам блока сравнения, а выход блока сравнения через соответствующие выходы логического блока управления натяжением текстильного материала подсоединён к входам регуляторов натяжения текстильного материала.

Недостатком данного устройства является низкая надёжность, обусловленная коррекцией линейной скорости текстильного материала на входе в U-образную технологическую машину в функции суммарного количества (веса) текстильного материала в технологической машине, поскольку значительное отклонение количества текстильного материала

ла в одном из потоков за допустимые границы может произойти и при допустимом суммарном количестве текстильного материала в технологической машине.

Технический результат предлагаемого устройства заключается в повышении надёжности отдельного регулирования количества текстильного материала в технологической машине и выравнивания количества текстильного материала в технологической машине в параллельных потоках.

Технический результат достигается тем, что в устройство для управления количеством транспортируемого в свободном состоянии параллельными потоками текстильного материала в технологической машине непрерывного действия, включающее блок управления приводом входного рабочего органа, блок управления приводом выходного рабочего органа, два датчика количества текстильного материала в параллельных потоках в U-образной технологической машине, блок сравнения, логический блок управления натяжением текстильного материала и два регулятора натяжения текстильного материала на входе в U-образную технологическую машину, установленные на соответствующих параллельных потоках, причём выходы датчиков количества текстильного материала подключены к соответствующим входам блока сравнения, а выход блока сравнения через соответствующие выходы логического блока управления натяжением текстильного материала подсоединён к входам регуляторов натяжения текстильного материала, введены задающий блок и логический блок управления линейной скоростью текстильного материала, при этом выход задающего блока соединён с объединёнными входами блока управления приводом входного рабочего органа и блока управления приводом выходного рабочего органа, входы логического блока управления линейной скоростью текстильного материала связаны с выходами соответствующих датчиков количества текстильного материала, а выход логического блока управления линейной скоростью текстильного материала подключен ко второму входу блока управления приводом входного рабочего органа, причём логический блок управления линейной скоростью текстильного материала содержит два релейных блока, два логических элемента «ИЛИ», ключ и блок коррекции, к первому входу которого через первый логический элемент «ИЛИ» подсоединены первые выходы релейных блоков, а вторые выходы релейных блоков через соединённые последовательно второй логический элемент «ИЛИ» и ключ связаны со вторым входом блока коррекции, при этом выход первого логического элемента «ИЛИ» соединён со вторым входом ключа, входами логического блока управления линейной скоростью текстильного материала являются входы релейных блоков, а выходом логического блока управления линейной скоростью текстильного материала служит выход блока коррекции.



На рис.1 приведена блок-схема устройства для управления количеством транспортируемого в свободном состоянии параллельными потоками текстильного материала в технологической машине непрерывного действия.

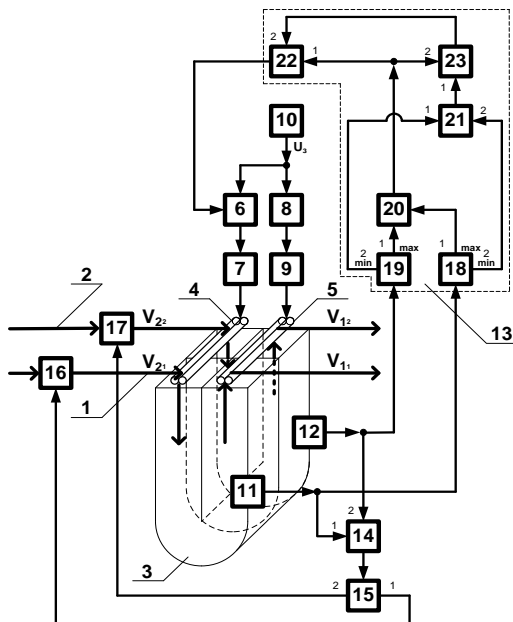


Рис. 1.

Данное устройство содержит текстильный материал, обрабатываемый и транспортируемый в свободном состоянии в параллельных потоках 1 и 2 в двухсекционной U-образной технологической машине 3.

Транспортирование текстильного материала в технологической машине 3 производится входным рабочим органом 4 и выходным рабочим органом 5.

К входному рабочему органу 4 подключены соединённые последовательно блок управления 6 и привод 7, а к входному рабочему органу 5 подсоединены соединённые последовательно блок управления 8 и привод 9.

Входы блоков управления 6 и 8 объединены и связаны с выходом задающего блока 10.

Количество (вес) текстильного материала в технологической машине 3 контролируется в потоке 1 первым датчиком 11, а в потоке 2 – вторым датчиком 12.

Выходы датчиков 11 и 12 соединены с соответствующими входами логического блока управления линейной скоростью текстильного материала 13 и блока сравнения 14.

Выход логического блока управления линейной скоростью текстильного материала 13 подключён ко второму входу блок управления 6.

Выход блока сравнения 14 подсоединён к входу логического блока управления натяжением текстильного материала 15, соединённого первым выходом с входом первого регулятора натяжения 16 текстильного материала потока 1, а второй выход логического блока управления натяжением текстильного материала 15 подключён к входу второго регулятора натяжения 17 текстильного материала потока 2.

Логический блок управления линейной скоростью текстильного материала 13 содержит первый релейный блок 18, подсоединённый входом к выходу первого датчика 11, и второй релейный блок 19, связанный входом с выходом второго датчика 12.

Первые выходы релейного блока 18 и релейного блока 19 подключены к соответствующим входам первого логического элемента «ИЛИ» 20, а вторые выходы первого релейного блока 18 и второго релейного блока 19 соединены с соответствующими входами второго логического элемента «ИЛИ» 21.

Выход первого логического элемента «ИЛИ» 20 соединён с первым входом блока коррекции 22, ко второму входу которого через ключ 23 подключён выход второго логического элемента «ИЛИ» 21.

Второй вход ключа 23 связан с выходом первого логического элемента «ИЛИ» 20.

Входами логического блока управления линейной скоростью текстильного материала 13 являются входы первого релейного блока 18 и второго релейного блока 19, а выходом логического блока управления линейной скоростью текстильного материала служит выход блока коррекции 22.

Устройство работает следующим образом.

В соответствии с сигналом задания  $U_3$  задающего блока 10 блоки управления 6 и 8 устанавливают линейные скорости текстильного материала в параллельных потоках на входе  $V_2$  и выходе  $V_1$  технологической машины 3:  $V_{11}$  и  $V_{21}$  для потока 1,  $V_{12}$  и  $V_{22}$  для потока 2.

Справедливы соотношения

$$V_{11} = V_{21} \cdot (1 + \varepsilon_1), \quad (1)$$

$$V_{12} = V_{22} \cdot (1 + \varepsilon_2), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – относительное изменение длины (усадка) обрабатываемого текстильного материала соответственно в потоке 1 и в потоке 2.

В общем случае

$$\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2. \quad (3)$$

Кроме того, вследствие, например, различия в проскальзывании потоков текстильного материала во входном рабочем органе 4 и в выходном рабочем органе 5

$$V_{11} \neq V_{12}, \quad (4)$$

$$V_{21} \neq V_{22}. \quad (5)$$

Поскольку  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  - величины случайные, из выражений (1) и (2) получаем условия целесообразной настройки соотношения линейных скоростей для параллельных потоков:

$$V_{11} = V_{21} \cdot (1 + m_{\varepsilon_1}), \quad (6)$$

$$V_{12} = V_{22} \cdot (1 + m_{\varepsilon_2}), \quad (7)$$

где  $m_{\varepsilon_1}$ ,  $m_{\varepsilon_2}$  – математическое ожидание относительного изменения длины (усадки) обрабатываемого текстильного материала соответственно в потоке 1 и в потоке 2.

Поскольку  $\varepsilon_1 \neq m_{\varepsilon_1}$  и  $\varepsilon_2 \neq m_{\varepsilon_2}$ , реальное соотношение линейных скоростей для параллельных потоков по формулам (1), (2) отличается от условия настройки соотношения линейных скоростей для параллельных потоков по формулам (6), (7), это с учётом также различия в проскальзывании потоков текстильного материала во входном рабочем органе 4 и в выходном рабочем органе 5 ведёт к значительному отклонению количества текстильного материала в одном из параллельных потоков за допустимые границы.

Если в каком-то потоке количество текстильного материала, контролируемого датчиками 11 и 12, выходит за максимальную границу, сигнал с выхода первого датчика 11 (или второго датчика 12) через первый логический элемент «ИЛИ» 20 воздействует на блок коррекции 22, и блок управления 6 снижает линейные скорости  $V_{11}$  и  $V_{12}$  текстильного материала на входе технологической машине 3. Аналогично, при выходе количества текстильного материала за минимальную границу линейные скорости  $V_{11}$  и  $V_{12}$  текстильного материала на входе технологической машине 3 повышаются.

В случае, когда в одном из параллельных потоков количество текстильного материала выходит за максимальную границу, а в другом потоке количество текстильного материала выходит за минимальную границу, сигнал с выхода первого логического элемента «ИЛИ» 20 блокирует ключ 23 и приоритет отдаётся повышению линейных скоростей  $V_{11}$  и  $V_{12}$  текстильного материала на входе технологической машине 3, и лишь после устранения переполнения одной из секций разрешается повышение линейных скоростей  $V_{11}$  и  $V_{12}$  текстильного материала на входе технологической машине 3 для увеличения количества текстильного материала во второй секции технологической машины 3.

Одновременно логический блок управления натяжением текстильного материала 15 на основании информации о различии в количествах текстильного материала в секциях технологической машины 3, формируемой блоком сравнения 14, при недопустимом расхождении значений количества текстильного материала в технологической машине 3 по потокам производит с помощью регуляторов натяжения 16 и 17 коррекцию натяжения  $F$  текстильного материала, используя его свойства эластичности. При этом увеличивается натяжение текстильно-

го материала на входе в технологическую машину 3 в потоке с большим количеством текстильного материала и уменьшается натяжение текстильного материала на входе в технологическую машину 3 в потоке с меньшим количеством текстильного материала.

Предположим, что в потоке 1 натяжение текстильного материала увеличилось на величину  $+\Delta F$ , а в потоке 2 уменьшилось на  $-\Delta F$ , тогда количество материала в потоках будет изменяться:

$$\Delta L_1 = -\Delta F \cdot (E_1)^{-1} \cdot \int_0^T V_{11} \cdot dt, \quad (8)$$

$$\Delta L_2 = \Delta F \cdot (E_2)^{-1} \cdot \int_0^T V_{12} \cdot dt, \quad (9)$$

где  $\Delta L_1$ ,  $\Delta L_2$  – приращения длины текстильного материала соответственно в потоке 1 и потоке 2, м;

$E_1$ ,  $E_2$  – модули упругости текстильного материала соответственно в потоке 1 и потоке 2, Н;

$T$  – интервал времени действия  $\Delta F$ , с.

В итоге в потоке 1 количество текстильного материала будет уменьшаться, а в потоке 2 – возрастать, что будет способствовать выравниванию количества текстильного материала технологической машине 3 по параллельным потокам.

Таким образом, реализация предложенного устройства позволяет надёжно осуществлять раздельное регулирование количества текстильного материала в технологической машине и выравнивание количества текстильного материала в технологической машине в параллельных потоках.

*Александров Виктор Петрович,*

ООО НТЦ «АРГО»,

e-mail: 89109843671@mail.ru

*Егоров Валерий Николаевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: : egorov@emf.ispu.ru

УДК 62-83:62-503.53

И.В. ВЕРШИНИН, аспирант, В.В.ТЮТИКОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

*E-mail: tvv@ispu.ru*

## **Метод больших коэффициентов при синтезе робастных систем модального управления**

**Аннотация.** Предложена методика синтеза одноконтурной системы автоматического управления с полиномиальным регулятором, гарантирующая получение как высокого коэффициента усиления в контуре управления, так и необходимого качества переходных процессов (быстродействие и характер процессов). Высокий коэффициент усиления обеспечивает системе параметрическую грубость и высокую статическую точность. Методика основана на формировании характеристического полинома системы, имеющего две группы корней, одна из которых обеспечивает наличие высокого коэффициента усиления, а другая качество переходных процессов.

**Ключевые слова:** модальное управление, полиномиальный регулятор, параметрическая грубость, высокий коэффициент усиления.

I. V. VERSHININ, aspirant

V. V. TYUTIKOV, doctor of technical sciences, professor

Ivanovo State Power Engineering University

153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34.

*e-mail tvv@ispu.ru*

## **Method of large coefficients in the synthesis robust modal control systems**

**Abstract.** The proposed method of synthesis of single-loop automatic control systems with polynomial controller, which guarantees to obtain a high gain in the control loop and the required quality of transient processes (performance, and the nature of the processes). High gain system provides parametric roughness and high static accuracy. The technique is based on the formation of the characteristic polynomial of a system having two groups of roots, one of which provides high gain and the other quality of transients.

**Keywords:** modal control, polynomial controller, parametric roughness, a high gain.

Вопросы параметрической грубости САУ, синтезированных с помощью аналитических методов, впервые были затронуты в работе [1]. Позднее анализу и синтезу таких систем было посвящено значительное количество работ [2-8]. Среди них можно выделить два направления, основу которых составляет расположение корней характеристических

полиномов САУ: методы больших коэффициентов усиления [7] и методы управления с использованием высшей производной [8].

Использование методов модального управления, также может приводить к получению САУ с высокой чувствительностью к вариациям параметров. Рассмотрим возможность использования метода больших коэффициентов усиления для обеспечения робастных свойств САУ с полиномиальными регуляторами (ПР) [9].

Пусть САУ описывается уравнениями:

$$A(s)y(s) = B(s)u(s), \quad C(s)u(s) = R(s)\Delta(s), \quad \Delta(s) = y_0^*(s) - y(s), \\ y_0^*(s) = R(s)^{-1}y_0(s),$$

где  $A(s)$ ,  $B(s)$ ,  $C(s)$ ,  $R(s)$  полиномы знаменателя и числителя передаточных функций (ПФ) объекта и ПР соответственно,  $y(s)$  – управляемая координата,  $u(s)$  – сигнал выхода регулятора,  $y_0(s)$  – сигнал задания. Степени полиномов  $C(s)$ ,  $R(s)$  определяются при синтезе.

Для упрощения изложения положим  $B(s) = b_0$  (это справедливо для большинства электромеханических систем) и  $C(s) = c_0 = 1$ , тогда уравнение синтеза ПР примет вид:

$$A(s) + b_0 R(s) = D(s), \quad (1)$$

где  $D(s)$  – характеристический полином ПФ замкнутой системы.

Из (1) очевидно, что при увеличении значений коэффициентов  $D(s)$  влияние коэффициентов  $A(s)$ , а, следовательно, и вариаций его параметров на значения коэффициентов регулятора  $R(s)$  снижается. Отметим, что при степенях полиномов  $B(s)$ ,  $C(s)$  отличных от нуля указанный эффект сохраняется.

Однако необходимо учитывать, что использование в качестве  $D(s)$  стандартных полиномов (Ньютона, Баттерворта и т.п.) при увеличении значений  $d_i$  приводит к росту быстродействия:

$$D(s) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \dots + d_1s + d_0 = s^n + d_{n-1}^* \Omega_0 s^{n-1} + \dots + d_1^* \Omega_0^{n-1} s + \Omega_0^n.$$

Здесь  $\Omega_0$  и  $d_i^*$  – среднегеометрический корень, определяющий быстродействие, и коэффициенты, устанавливающие характер переходных процессов, соответственно.

Известно, что быстродействие САУ зависит от расположения корней их ХП на комплексной плоскости: чем дальше они расположены от мнимой оси (чем выше значение  $\Omega_0$ ), тем выше быстродействие. Характерной особенностью стандартных полиномов является компактное расположение корней относительно друг друга. Поэтому их исполь-

зование при задании свойств САУ не позволяет в полной мере использовать потенциал модального управления.

Для обеспечения параметрической грубости систем предлагается разделить корни ХП САУ на две группы: первая будет обеспечивать повышение коэффициента петлевого усиления, а вторая – требуемое быстроедействие.

Исследования предложенного подхода выполним на математической модели объекта, соответствующей типовой упругой двухмассовой электромеханической системе с ПР, передаточная функция которой имеет вид

$$H(s) = C(Is - A)^{-1}B = \frac{\Omega(s)}{u} = \frac{100}{s^4 + s^3 + 3s^2 + 2s + 1}.$$

Исследовалась вариация момента инерции исполнительного механизма, параметра наиболее подверженного изменениям.

При синтезе полиномиального регулятора в условиях:

$$\deg A(s) = 4, \quad \deg B(s) = 0, \quad \deg R(s) = 4 - 1 = 3, \quad \deg C(s) = R(s) = 3,$$

$$\deg D(s) = \deg A(s) + \deg C(s) = 7$$

при использовании в качестве  $D(s)$  полинома Ньютона с  $\Omega_0 = 10c^{-1}$  ( $s_{1-7} = -10$ ) получаем

$$H_{p1}(s) = \frac{R(s)}{C(s)} = \frac{3110s^3 + 19975s^2 + 69324s + 99672}{s^3 + 69s^2 + 2026s + 32763},$$

а при полиноме, сформированном по корням  $s_{1-6} = -20$ ,  $s_7 = -3$ :

$$H_{p2}(s) = \frac{R(s)}{C(s)} = \frac{26896s^3 + 258732s^2 + 1212509s + 1918286}{s^3 + 122s^2 + 6235s + 171397}.$$

Графики переходных процессов при номинальных параметрах объекта управления приведены на рис. 2, а (темная линия для  $H_{p1}(s)$ , светлая линия для  $H_{p2}(s)$ ). Очевидно, что при сохранении качества процессов и быстрогодействия коэффициенты регулятора  $H_{p2}(s)$  значительно выше.

Графики, полученные при уменьшении момента инерции исполнительного механизма в два раза приведены на рис. 2, б, а при увеличении в 2 раза – на рис. 2, в (темная линия для  $H_{p1}(s)$ ).

Анализ результатов показывает, что система, синтезированная по предложенному принципу, обладает значительно большей параметрической грубостью.

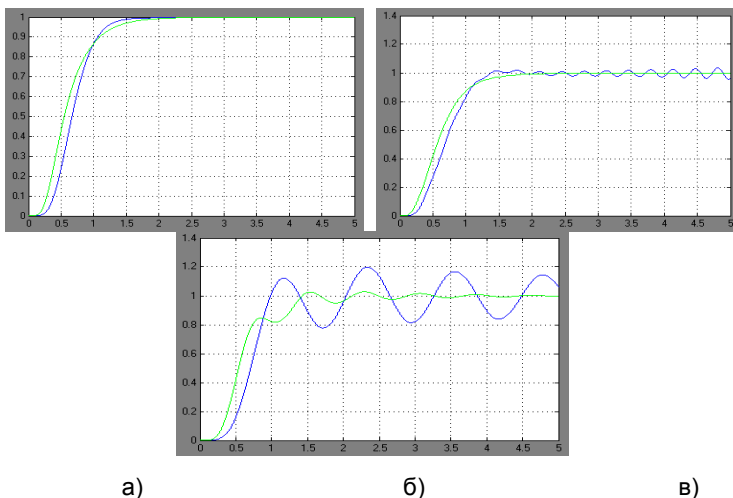


Рис. 2

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00972).

#### Литература

1. **Надеждин П.В.** О практической неустойчивости (негрубости) систем, полученных по методу статьи [1] // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 1973. – №5. – С. 196–198.
2. **Волгин Л. Н.** О грубых системах управления // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 4. – С. 186-187. 32
3. **Гончаров В. И.,** Лиепиньш А. В., Рудницкий В. А. Синтез робастных регуляторов низкого порядка // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 4. – С. 36–43.
4. **Джури Э. И.** Робастность дискретных систем // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 3. – С. 3–28.
5. **Колесников А. А.** Основы теории синергетического управления. – М.: Испо-сервис, 2000. – 264 с.
6. **Поляк Б.Т.,** Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
7. **Мееров М. В.** Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности – М.: Наука, 1967. – 424 с.
8. **Востриков А. С.** Синтез нелинейных систем методом локализации. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1990. – 120 с.
9. **Гайдук А. Р.** Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.

*Вершинин Иван Владимирович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vershinin.ivan@list.ru

*Тютиков Владимир Валентинович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: tvv@ispu.ru



УДК 621.382.8

А.И. ТЕРЕХОВ, к.т.н., профессор,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: [terehov@eims.ispu.ru](mailto:terehov@eims.ispu.ru)

## **Устройство для дифференцирования медленно изменяющихся сигналов**

Предлагаемое техническое решение относится к автоматике и может быть использовано в системах автоматического управления при построении оптимальных и самонастраивающихся систем автоматического управления при необходимости введения в законы регулирования производных от управляющих и возмущающих воздействий, например от временных трендов.

По сравнению с известными вариантами реализация устройства позволяет значительно упростить конструкцию, учитывая его использование при обработке входных медленно изменяющихся сигналах.

На рис.1 представлена структурная схема устройства для дифференцирования медленно изменяющихся функций.

Устройство содержит источник входного сигнала 1 и генератор тактовых импульсов 2. Источник входного сигнала формирует информацию о текущем значении измеряемого параметра и подает ее на вход элемента задержки 3. Аналого-цифровой преобразователь 4 подключен к выходу операционного усилителя 5, инвертирующий вход которого соединен с источником входного сигнала 1. В тоже время выход источника входного сигнала 1 подключен к информационному входу первого ключа 6, выход элемента задержки 3 соединен с информационным входом второго ключа 7 и с неинвертирующим входом операционного усилителя 5. Выходы первого 6 и второго 7 ключей подключены к первому и второму входам компаратора 8 соответственно. Выходы компаратора 8 соединены с соответствующими адресными входами дешифратора 9, при этом на управляющие входы первого 6 и второго 7 ключей, а также на управляющий вход дешифратора 9 поступают сигналы от генератора тактовых импульсов 2. Выход аналого-цифрового преобразователя 4 является выходом определения модуля производной, с выхода дешифратора 9 снимается сигнал о знаке производной. При этом блоки 1, 3, 4 и 5 образуют узел определения модуля производной, а блоки 2, 6, 7, 8 и 9 входят в состав узла определения знака производной.

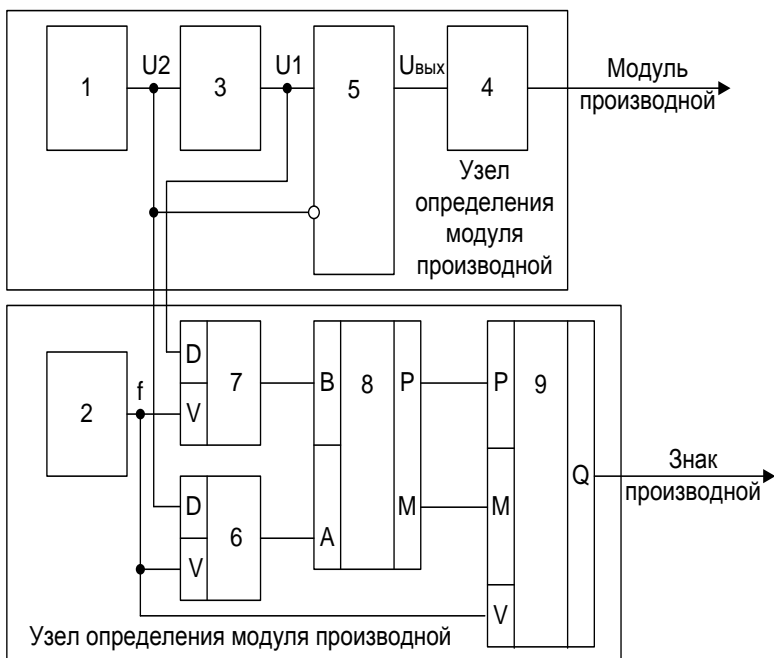


Рис. 1. Схема устройства

Устройство работает следующим образом.

На входах операционного усилителя 5 формируются сдвинутые во времени сигналы U1 и U2:

$$U1 = X(t - dt) \quad (1),$$

$$U2 = X(t), \quad (2),$$

где U1, U2 - входные напряжения, пропорциональные напряжению источника входного сигнала для соответствующих моментов времени; t - текущее значение времени);

dt - задержка, реализуемая элементом задержки.

На выходе операционного усилителя 5 формируется сигнал, пропорциональный модулю производной

$$U_{\text{вых}} = (U1 - U2)K, \quad (3)$$

где K коэффициент усиления операционного усилителя 5, равный по модулю значению 2f частоты генератора тактовых импульсов 2, поскольку при скважности импульсов генератора равной двум (форма импульсов генератора меандр) имеем

$$U_{\text{Вых}} = \frac{dU_{\text{Вх}}}{dt} \cdot \frac{U_1 - U_2}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{f} \cdot 2f \cdot (U_1 - U_2)} \quad (4)$$

Напряжение  $U_{\text{Вых}}$ , пропорциональное первой производной входного сигнала  $dU_{\text{Вх}}/dt$ , преобразуется АЦП 4 в код и может быть использовано для дальнейшей обработки в цифровом виде.

Знак производной определяется следующим образом.

Сигналы  $U_1 = X(t-dt)$  и  $U_2 = X(t)$  поступают на информационные D-входы первого 6 и второго 7 ключей, выходы которых соответственно связаны с первым A и вторым B входами компаратора 8. Если  $U_1 < U_2$  ( $A > B$ ), то на выходе ( $A > B$ ) m-выходе формируется признак 1, соответствующий положительному знаку производной. На r-выходе компаратора в этом случае имеем сигнал логического нуля. В противном случае ( $U_1 > U_2$   $A < B$ , знак производной отрицателен) на m-выходе компаратора имеем нулевой, а на r-выходе единичный сигналы, тем самым формируется признак "0". Дешифратор 9 производит логическое преобразование и формирует на своем выходе признак знака (0 положительный, 1 отрицательный) измеряемой величины.

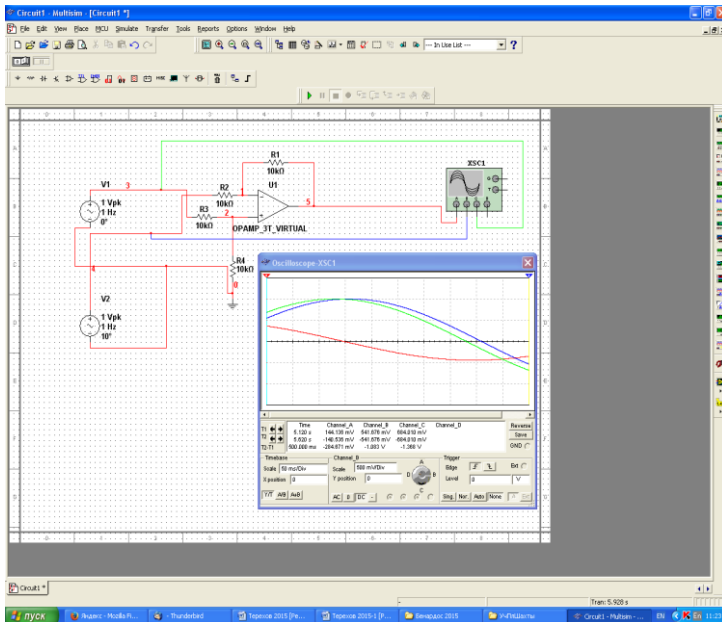


Рис. 2. Результаты моделирования устройства

На рис. 2 приведены результаты компьютерного моделирования работы устройства, Моделирование было проведено в программном комплексе Multisim. Анализ результатов моделирования подтверждает работоспособность предлагаемого технического решения.

Выполняя функции дифференцирования медленно изменяющегося входного сигнала, предлагаемое устройство проще известных.

#### **Литература**

1. **Ершов Ю.А.**, Терехов А.И. . Устройство для дифференцирования медленно изменяющихся сигналов. Патент РФ №2050591. Дата выдачи 20.12.1998.

## СЕКЦИЯ «ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ»

УДК 621.793.7

В.В. МАРКОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: markov-izumrud@mail.ru*

### Стекловидные и стеклообразующие смазочные компоненты

**Аннотация.** Произведен анализ разного рода стеклообразующих химических соединений для определения перспективных компонентов, участвующих в составе СОТС, позволяющих существенно увеличить диапазон их температурно-скоростного применения.

**Ключевые слова:** пластичные СОТС, стеклосмазки, стеклообразователи, энергетическое машиностроение, обработка, резание нержавеющей сталей.

V.V. MARKOV, Doctor of engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: markov-izumrud@mail.ru*

### Vitreous and glass-forming lubricating components

**Abstract.** The analysis of different kinds of glass-forming chemical compounds to identify promising components involved in the composition of COTS to significantly increase the range of temperature and high-speed applications.

**Key words:** cutting of COTS, glass lubricants, glass formers, power machinery, processing, cutting stainless steels.

Оксиды металлов имеют ограниченное применение в качестве компонентов смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Это связано с тем, что они обычно имеют более высокие, чем у породившего их металла, твердость и температуру плавления. Такие свойства приводят, как правило, к абразивно-механическому износу режущих инструментов. Имея высокую температуру плавления и достаточно большие размеры, оксиды находятся в СОТС в виде дисперсных твердых частиц, с трудом проникают в зону резания.

Применение оксидов металлов в качестве смазок может быть в какой-то мере эффективным при одновременном действии масел с присадками высокого давления или консистентных композиций поверхностно-активных веществ. Наиболее широко используются в качестве компонентов СОТС и пластичных смазок оксиды свинца, молибдена, кобальта. Эффективность присадок зависит от диапазона температур,

при которых каждый оксид проявляет смазочные свойства. Так, например, окись свинца  $PbO$  при температурах ниже  $400\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$  не является удовлетворительной смазкой вследствие образования соединения  $Pb_3O_4$ , обладающего низкими антифрикционными свойствами. При температурах свыше  $550\text{ }^\circ\text{C}$   $Pb_3O_4$  переходит в  $PbO$ , обладающий лучшими смазочными свойствами.

В составе пластичных СОТС могут применяться разнообразныe мелкодисперсные твердые присадки и наполнители, которые трудно применить в жидкотекучих СОТС ввиду проблемы обеспечения стабильности суспензий. В числе такого рода присадок на некоторых операциях обработки металлов давлением применяют порошковые оксиды, которые можно классифицировать как стекла или керамики. Мелкодисперсные стекла и шихты стекол, которые могут применяться в составе СОТС при обработке металлов, чаще всего являются силикатными соединениями, которые получаются в результате сплавления природных силикатов с другими компонентами. Силикатные стекла представляют собой смесь оксидов. По своей природе обычное силикатное стекло – это неопределенное химическое соединение, включающее, кроме кремнезема  $SiO_2$ , окислы металлов типа:  $Me_2O$ ,  $MeO$ ,  $Me_2O_3$ ,  $MeO_2$ ,  $Me_2O_5$ ,  $MeO_6$  [2].

Все силикатные стекла содержат группу  $Si_mO_n$ , а также различные катионы, анионы кислорода, а иногда фтора. Наиболее часто в стеклосмазках входят катионы  $Na$ ,  $K$ ,  $Mg$ ,  $Ca$ ,  $Ba$ ,  $B$ ,  $Al$ ,  $Si$ , реже –  $Li$ ,  $Zn$ ,  $Pb$ ,  $Ti$ ,  $Zr$ ,  $P$ . Стеклообразователями в силикатных стеклах являются кремнезем  $SiO_2$  и борный ангидрид  $B_2O_3$ , содержание которого в смазке достигает 40 %. В смазку его вводят в составе борной кислоты или буры. Стеклосмазки нашли широкое применение в горячей обработке металлов: прессовании, прокатке, ковке, штамповке и пробивке. Эти материалы при контакте с горячим деформированным металлом образуют тонкие пленки, обладающие высокими антифрикционными и теплоизолирующими свойствами.

Применение стеклосмазок позволяет снизить коэффициенты трения при прессовании до  $0,02\text{--}0,5\%$  уменьшить усилие прессования, повысить однородность свойств в деформируемом изделии, увеличить стойкость инструмента и улучшить качество готовых поверхностей. Силикаты являются аморфными веществами. Теория аморфной «вязаной» структуры позволяет выбрать необходимые составы смазок в зависимости от технологических параметров процесса. Наличие непрерывной вязи в стекле способствует образованию сплошных смазочных пленок на металле, что дает возможность защитить инструмент от теплового и абразивного износа.

В табл. 1. приведены некоторые составы и температуры плавления наиболее легкоплавких смазок.

Таблица 1. Состав и температура плавления стеклосмазок

№ п/п	Химический состав стекла, масс. %										T <sub>пл</sub> , °C
	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	BaO	PbO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> TiO	
1							80		20		350–450
2	27,5		1,5				71				600
3		30			2,5			7	61,5		454–482
4	33,5	21,5		10	25				10		442–503
5	66,4	4		3,5	9,8			9,8	5	1,5	555
6	33,5	21,5		5	12	10			18		472–513
7	33,5	21		10	21,5	5			8		443–487
8			28				58			14	640

Температуры плавления приведенных окисных систем находятся в пределах температур, возникающих в зоне резания при обработке большинства сталей, их сплавов и других металлов. Это дает возможность предположить, что смазки, включающие подобные системы, при переходе в жидкое состояние могут проникать на контактные поверхности инструмента и уменьшать фрикционное взаимодействие обрабатываемой детали и режущего инструмента, оказывать положительное влияние на улучшение качества обработанной поверхности, на уменьшение усилия резания, на увеличение стойкости режущего инструмента.

Учитывая перспективность применения стекловидных СОТС на жестких режимах обработки (высокие контактные температуры и удельные давления) нами были разработаны составы пластичных, легкоплавких, висмутсодержащих стекол, показавших хорошие результаты при высокоскоростной лезвийной обработке нержавеющей стали. Температура плавления таких стекол составляла 340-350 °С.

Применение таких смазочных материалов по сравнению с традиционными смазками на основе силикатных стекол позволило на 20-30 % снизить величины крутящих моментов при сверлении широко применяемой в энергетическом машиностроении нержавеющей стали 12Х18Н10Т и на 30-40 % уменьшить износ режущего инструмента, улучшить качество обработанных поверхностей.

Более эффективным оказалось применение шихт стекол, а не собственно стекол аналогичного состава. Это связано с термодинамикой процесса образования защитных смазочных слоев на контактных поверхностях режущих инструментов и прирезцовой поверхности стружки при резании металлов.

#### Литература

1. **Марков, В.В.** Киселева Е.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства обработки металлов резанием / В.В. Марков, Е.В. Киселева, ФГБОУ ВПО «Ивановский гос. энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, 2011. Монографии ИГЭУ. - 116 с.

2. **Марков, В.В.**, Годлевский В.А. Стеклопозолоточные материалы для обработки металлов резанием // Известия вузов РФ. Химия и химическая технология. 2004. Т.47. №8. С. 60-63.
3. **Аппен, А.А.** Химия стекла. – Л.: Химия, 1974. – 352 с.
4. **Марков, В.В.** Повышение эффективности и экологической безопасности лезвийного резания путем энергетической активации и оптимизации состава присадок СОТС. Дисс. докт. техн. наук. Иваново. 2004. 458 с.

*Марков Владимир Викторович*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: markov-izumrud@mail.ru

УДК 621.763

Д.В. ГУСЕВ, аспирант

Московский государственный университет путей сообщения  
127994 г. Москва, ул. Образцова д.9  
E-mail: dess.2010@mail.ru

### **Исследование точностных параметров деталей, полученных методом прототипирования**

**Аннотация.** Предложен процесс послойного построения физического изделия на основе трехмерной компьютерной модели (прототипирование). Для изучения закономерностей формирования цилиндрических поверхностей при применении методов прототипирования была разработана модель детали типа цилиндр.

**Ключевые слова:** компьютерная модель, технологический процесс, обработка.

D.V. GUSEV, a graduate student  
Moscow state University of railway engineering  
127994, Moscow, Obraztsova str. 9. E-mail: dess.2010@mail.ru

### **Study of the accuracy of the parameters of the parts obtained by the method of prototyping**

**Abstract.** Proposed a process for layering structure physical products on the basis of three-dimensional computer model (prototyping). To study the laws of formation of the cylindrical surface-not arise in the application of methods of prototyping model was developed details such as cylinder.

**Key words:** computer model, technological process processing.

На сегодняшний день в современном машиностроении масса трудно изготавливаемых деталей, обладающих сложной формой и конфигурацией. Множество этих изделий имеют различные полости и отвер-



ствия, которые используются для переноса различных жидкостей и газов, как пример лопатки газотурбин, пневмоклапана и др. Изготовление деталей основанное на механической обработке заготовок деталей является весьма трудоемкой и энергозатратной задачей, поэтому становится менее практичными и перспективными [1]. Производство таких деталей, с применением механической обработки иногда даже невозможно. Для штучного и мелкосерийного производства наиболее оптимальным решением является внедрение генеративных технологий, с применением методов быстрого прототипирования.

Прототипирование - это процесс послойного построения физического изделия на основе трехмерной компьютерной модели. Детали, выполненные по технологиям прототипирования, могут изготавливаться из различных материалов (в зависимости от применяемой технологии): из пластиков, жидких смол, специальных порошковых материалов, различных листовых материалов (бумаги, металла и др.). Процессы построения в значительной степени автоматизированы и позволяют получать качественные и сравнительно недорогие модели, затрачивая на их изготовление часы, а не дни и недели, как это было при использовании традиционных методов механообработки.

Особенно быстрое прототипирование востребовано в энергетическом машиностроении, в инструментальной промышленности, в аэрокосмической отрасли (изготовление размероподобных макетов для наземной аэрогазодинамической отработки изделий); и в ряде других областях. Технологии быстрого прототипирования стали очень желанными и многими промышленными предприятиями взяты на вооружение. Они обеспечили им значительную экономию времени и денежных средств, затрачиваемых на подготовку производства изделия. Они позволили существенно сократить сроки и стоимость конструкторских работ по изготовлению технологической оснастки, а также повысить качество выпускаемой продукции [2].

Существует различные методы быстрого прототипирования, к основным относятся: стереолитография, селективное лазерное спекание, построение модели путем нанесения расплавленного материала с помощью многоструйных головок и др. наиболее перспективным методом является метод Direct Light Projection - DLP (светоотверждения фотополимера) Суть его заключается в формировании так называемой «маски» каждого текущего сечения модели, проецируемой на рабочую платформу через специальную систему зеркал очень малого размера с помощью прожектора или лазерного луча с высокой яркостью света. Формирование и засветка видимым светом каждого слоя происходит относительно быстро – 3-5 секунд [3]. После окончания процесса построения, изделие можно практически сразу использовать. Ему зачастую не требуется последующая обработка.

Для изучения закономерностей формирования цилиндрических поверхностей при применении методов прототипирования была разра-

ботана деталь типа цилиндр эскиз, которого приведен на рис. 1. и изготовлена на установке 3D прототипирования Ultra 2 из материала НТМ-140 фирмы Envisiontec (Германия).

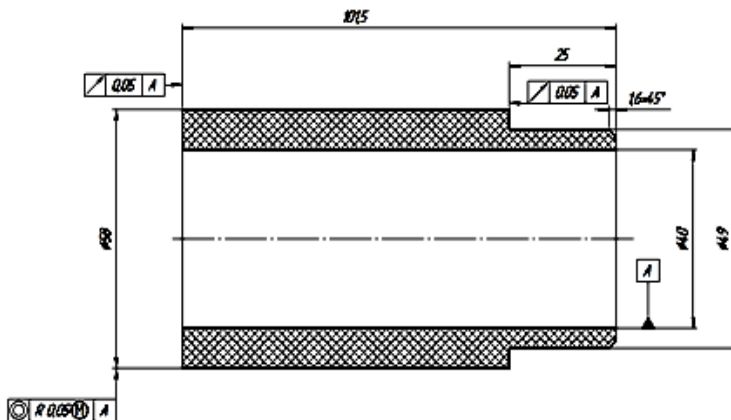


Рис. 1. Деталь цилиндр

По эскизу (рис. 1.) в среде CAD были созданы две трехмерные компьютерные детали типа цилиндр. Следующим шагом к достижению поставленной цели оказался перевод спроектированной и созданной трехмерной детали в STL формат.

Процесс прототипирования (выращивания) цилиндров происходил, на максимальной скорости построения ( $V_{\text{построения}}=12,7\text{мм/час}$ ) и при максимальной толщине слоя ( $S_{\text{слой}}=100\text{мкм}$ ).

После изготовления, без всякой дальнейшей механообработки, один из цилиндров первой серий был установлен на оправку и закреплен в трех кулачковый патрон токарного станка с целью измерения биения и отклонения от круглости. На рис. 2 показана схема измерения детали, которое проходило с помощью индикатора часового типа через каждые  $6^{\circ}$  на расстоянии 10 мм по поверхности детали, цена деления 0,002 мм.

Далее за цилиндром из первой серии на биение и отклонение от круглости был так же проверен и цилиндр второй серии. На основании полученных данных, можно сделать вывод, что на обоих цилиндрах прослеживается ярко выраженная седлообразность.

Причиной такого дефекта обеих деталей кроется в высокой скорости печати, а также толщине слоя. В свою очередь, нельзя исключить и того, что причиной такой погрешности может быть электронные ошибки во время перевода из CAD-среды, в которой создавался трехмерный объект в STL-формат. Еще одной причиной является позиционирование деталей на подложке во время печати, а именно слой фотополиме-

ра, который наносился во время печати и при этом не успевал затвердевать полностью.

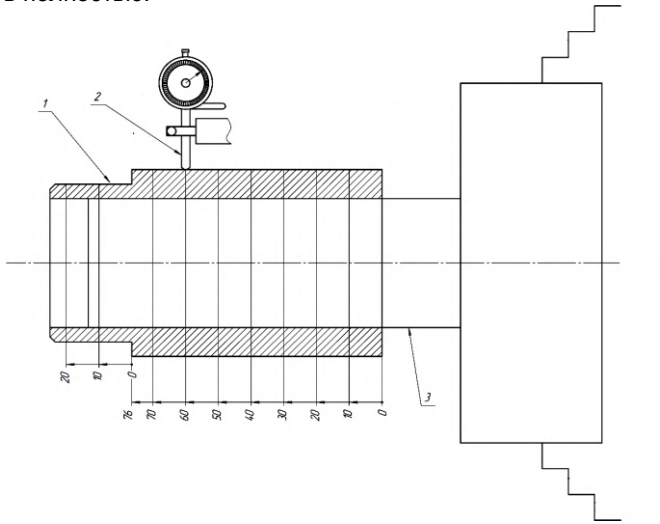


Рис. 2. Схема измерения:

1 – цилиндр первой серии; 2 – индикатор часового типа; 3 – оправка

### Литература

1. **Евсеев, Д.Г.**, Тарасевич О.М. Оптимизация процессов механической обработки. /Д.Г. Евсеев, О.М. Тарасевич. - М.: МИИТ, 2007.-107 с. – (Учебное пособие для аспирантов и студентов машиностроительных специальностей).
2. **Грабченко, А. И.** Интегрированные генеративные технологии. / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок В.Л.: ред. Грабченко А.И. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с. – (Учебное пособие)
3. **Материалы** с сайта компании Z-Corporation: <http://www.zcorp.com//>

Гусев Денис Викторович  
ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения»,  
e-mail: dess.2010@mail.ru

УДК 621.7.06

А.М. ВЛАСОВ, аспирант,  
В.А. ПОЛЕТАЕВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34.  
*E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

## Расчет моментов трения в магнитожидкостных устройствах при гидродинамической (жидкостной) смазке

**Аннотация.** Приведена формула расчета фактической площади контакта в рабочем зазоре магнитожидкостных герметизаторов.

**Ключевые слова:** фактическая площадь контакта, зазор, момент трения.

А.М. VLASOV, graduate,  
V.A. POLETAEV, Doctor of engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

## The calculation of the moments of friction in a magnetic liquid devices with hydrodynamic(liquid) lubricant

**Abstract.** Given the formula for calculating the actual contact area in the working gap of the magnetic liquid seals.

**Key words:** actual area of contact, the gap, the friction torque

В условиях жидкостной (гидродинамической) смазки между поверхностями трения взаимодействующих деталей возникает зазор, превышающий сумму максимальных высот микронеровностей и волн этих поверхностей. Подшипники скольжения со смазочной магнитной жидкостью и магнитожидкостные уплотнения, как правило, просты по устройству (рис. 1).

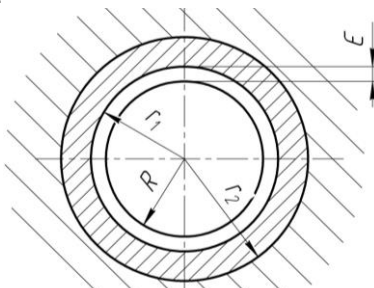


Рис. 1. Схема магнитожидкостного герметизатора при гидродинамической (жидкостной) смазке

Из-за различия в размерах вала и втулки между ними имеется радиальный зазор, заполненный ферромагнитной жидкостью:

$$\varepsilon = r_1 - R,$$

где  $r_1$  – внутренний радиус втулки;  $R$  – радиус вала.

Для определения момента сопротивления вращения вала, обусловленного трением с магнитной жидкостью (момента трения) используется формула

$$M_{\text{тр}} = \eta \cdot R \cdot S \cdot v / \delta \quad (1)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости,  $R$  – радиус вращающегося вала, соприкасающегося с магнитной жидкостью;  $v$  – окружная скорость вала;  $\delta$  – зазор между валом и полюсом заполненный жидкостью;  $S$  – площадь соприкосновения прослойки магнитной жидкости с валом.

Момент трения в этих условиях определяется толщиной слоя и вязкостью магнитной жидкости, величинами волн и шероховатости поверхности вала и внутренней поверхности втулки, а изнашивание контактирующих поверхностей здесь практически исключается.

Фактическая площадь контакта в рабочем зазоре магнитождкостных герметизаторов определяется не площадью соприкосновения прослойки магнитной жидкости с валом, а суммой площадей внутренней поверхности съемного полюса и наружной поверхности сменной втулки с прослойкой из ферромагнитной жидкости.

Расчет фактической площади контакта внутренней поверхности съемного полюса и наружной поверхности сменной втулки с прослойкой из ферромагнитной жидкости в магнитождкостных герметизаторах при гидродинамической (жидкостной) смазке производится по формуле

$$\eta_1 = \eta_2 \cdot \eta_3; \quad \eta_2 = \frac{A_r}{A_b}; \quad \eta_3 = \frac{A_b}{A_a}.$$

где  $A_r$  – фактическая площадь контакта;  $A_b$  – площадь контакта на поверхностях волн;  $A_a$  – номинальная площадь контакта.

$$\eta_1 = \eta_2 \times \eta_3 = \frac{1}{2} b \times K^{\frac{2V}{2V+1}} \left( \frac{1}{D_1} q \right)^{\frac{2V}{2V+1}} D_1 \quad (2)$$

где

$$K = \left( \frac{1,06\pi \cdot (1 - \mu^2) R^{0,5}}{K_2 \cdot V \cdot b \cdot R_{\text{max}}^{0,5}} \right);$$

$$D_1 = 2\pi \left( c_1^2 + \frac{c_1^2 b_1}{\sqrt{a_1^2 - c_1^2}} F(\lambda; K_0) + b_1 \sqrt{a_1^2 - c_1^2} \cdot E(\lambda; K_0) \right) \cdot \frac{1}{\ell_{\text{пр}} \cdot \ell_{\text{поп}}}$$

$$K_0 = \frac{a_1^2 (b_1^2 - c_1^2)}{b_1^2 (a_1^2 - c_1^2)};$$

$$\lambda = \arcsin \sqrt{\frac{a_1^2 - c_1^2}{a_1}}$$

где  $F(\lambda; K_0)$  и  $E(\lambda; K_0)$  – эллиптические интегралы первого и второго рода

$$F(\lambda; K_0) = \int_0^\lambda \frac{ds}{\sqrt{1 - K_0^2 \cdot \sin^2 \varphi}};$$

$$E(\lambda; K_0) = \int_0^\lambda \sqrt{1 - K_0^2 \cdot \sin^2 \varphi} \cdot d\varphi$$

где:  $b$  и  $v$  – константы, характеризующие опорную кривую;  $R$  – радиус закругления выступов;  $R_{\text{max}}$  – максимальная высота выступов;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\mu = 0,3$ ;  $C$  и  $X$  – константы;  $K_2$  – коэффициент;  $\ell_{\text{пр}1}$  и  $\ell_{\text{пр}2}$ ,  $\ell_{\text{поп}1}$  и  $\ell_{\text{поп}2}$  – длины волн поверхностей, соответственно, съемного полюса и сменной втулки в продольном и поперечном направлениях;  $q$  – номинальное удельное давление;  $a_1 > b_1 > c_1$  – полуоси эллипсоида общего вида.

### Литература

1. **Полетаев, В.А.**, Перминов С.М., Пахолкова Т.А. Исследование магнитного поля в рабочем зазоре с шероховатой магнитопроводящей поверхностью трения // Вестник ИГЭУ. Вып. 2. – Иваново, 2012. С. 36-39
2. **Полетаев, В.А.**, Пахолкова Т.А., Власов А.М. Установка для исследования величины рабочего зазора на момент трения магнитожидкостных устройств // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013- № 9. С.29-31.
3. **Полетаев, В.А.**, Пахолкова Т.А., Власов А.М. Расчет фактической площади контакта в подшипниках скольжения при гидродинамической (жидкой) смазке. / В.А. Полетаев, Т.А. Пахолкова, А.М. Власов // Трение и смазка в машинах и механизмах: – М.: «Машиностроение». – 2014. – № 11. – С 26 – 31.

*Власов Алексей Михайлович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

*Полетаев Владимир Алексеевич*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

УДК 620.1

И.И. ВЕДЕРНИКОВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34  
*E-mail: iv30-10-76@mail.ru*

## Изучение микротвердости упрочненной поверхности

**Аннотация.** Изучено влияние режимов лазерной обработки на структуру и свойства оксидного покрытия на алюминиевых сплавах. Исследования показали существенную зависимость структуры и микротвердости слоя от интенсивности импульса излучения.

**Ключевые слова:** лазерное упрочнение, прядильные камеры, микротвердость, оксидный слой, анодированная поверхность, интенсивность излучения.

I.I. VEDERNIKOVA, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St. 34. *E-mail: iv30-10-76@mail.ru*

## A studying of surface hardening's microhardness

**Abstract.** An influence of laser processing modes on structure and properties of oxide coating on aluminum alloys was studied. Researches are showed significant dependence structure and layer's microhardness from emitting's pulse intensity.

**Key words:** laser hardening, spinning cells, microhardness, oxide coating, anodized surface, emitting intensity.

Анализ научной литературы показывает, что перспективным методом улучшения механических свойств анодированной поверхности алюминиевых сплавов может явиться лазерное термическое упрочнение [1, 2, 3]. В то же время этот процесс остается практически неизученным.

Целью нашей работы являлось изучение влияния режимов лазерной термической обработки на структуру и свойства оксидного покрытия на алюминиевых сплавах.

Образцы для исследований влияния лазерной обработки на свойства оксидных покрытий изготавливались из серийной пневматической камеры, применяемой в прядильных машинах.

Камера является одним из основных элементов прядильного устройства пневматической прядильной машины. В камере происходит разделение и упорядочение волокон с последующим соединением в нить требуемой толщины. Она представляет собой тонкостенную деталь небольших размеров с большим количеством соосных цилиндрических, канонических поверхностей с шестью канавками, расположенными на наружной цилиндрической поверхности, а также радиальными отверстиями на конусной поверхности.

Вследствие высоких динамических нагрузок, а также непрерывного контакта поверхностей камеры с волокнистым материалом к ней предъявляются высокие технологические требования на изготовление. Шероховатость рабочих поверхностей  $R_a = 0,63$  мкм. Не допускается наличие на поверхности различных дефектов – вмятин, заусенцев, следов инструментов.

Для изучения строения и измерения микротвердости нами изготавливались косые шлифы исследуемой поверхности. Такая методика позволяет увеличить размер исследуемой зоны. Обработанный лазером образец опускали на уровне зон обработки под углом  $\alpha$  в специально подготовленную емкость, (она представляла собой кусок полый пластмассовой трубки), которая наполнялась эпоксидным клеем. Угол наклона образца необходим для измерения толщины и микротвердости оксидного слоя (чем больше угол наклона образца, тем больше исследуемая поверхность оксидного слоя) и определялся по формуле:

$$\sin \alpha = \frac{H}{h} \quad (1)$$

где  $H$  – толщина образца, а  $h$  – видимая толщина образца.

Клей застывал через 24 часа и обеспечивал неподвижность образца. Выступающую часть секции стачивалась на шлифовальном круге. Приготовленные таким образом образцы подвергают шлифованию для удаления слоя с искаженной микроструктурой. Шлифование выполняли в четыре – шесть заходов, причем при каждом заходе уменьшали зернистость шлифовального материала (шлифовальной шкурки). При переходе на другую, более мелкозернистую шкурку образец поворачивали на  $90^\circ$  и плоскость шлифовали до исчезновения рисков от предыдущего захода.

На завершающей стадии проводили полирование абразивными пастами. Полирование поверхности образца (шлифа) проводили на вращающемся диске обтянутом войлоком, с использованием абразивной пасты ГОИ. После полирования образец промывали в воде и спирте. Для получения объектов для структурного анализа использовался метод двухступенчатой репликации позволяющий получить тонкие двухступенчатые реплики, которые можно изучать в просвечивающем электронном микроскопе. Основным условием применения этой методики служит тщательное шлифование и механическое полирование до удаления всех царапин. Далее химическое травление 1...5 % раствором азотной и плавиковой кислот и промывание в чистом спирте. Для отделения реплики на исходный образец сначала наносят 5 % раствор желатина, а после подсыхания наносят еще 2 % раствор желатина.

Пленки промывали в дистиллированной воде, затем в спирте и далее вылавливали на предметные сетки. Этот метод применим для исследования эксплуатационных разрушений, когда прежде всего важна не поврежденность реплики. Однако при использовании этого



метода артефакты наблюдаются чаще, чем при одноступенчатой репликации, с получением угольных реплик.

Структура основного материала не имеет определенного текстурного характера. Включения всех структурных компонентов распределены равномерно. Основная матрица сплава – светло-серое поле с включениями отдельных пятен темного поля. Светло-серое поле представляет собой  $\alpha$ -фазу твердого раствора меди и магния в алюминии – основной фазы закаленного состояния. Повышенная травимость серых участков фазы обусловлена началом выделения сегрегаций меди и магния, получивших название зон Гинье-Престона. Светлые участки является слабо легированной  $\alpha$ -фазой, вследствие чего она травится хуже, чем серая. Темная фаза – эвтектика, представляющая собой фазовую смесь  $\alpha$ -фазы твердого раствора и интерметаллидных фаз – S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) и  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ).

При воздействии лазерного излучения интенсивностью ниже  $30 \text{ кВт/см}^2$  видимых изменений на поверхности не наблюдается. Внешние изменения начинаются при  $q$  свыше  $30 \text{ кВт/см}^2$ , поверхность становится матовой и плохо рассеивает свет. На некоторых участках поверхности темный цвет покрытия изменяется на белый, плотность и толщина покрытия уменьшаются. Это свидетельствует о начале термодеструкции покрытия. При  $q$  свыше  $100 \text{ кВт/см}^2$  на поверхности образуется зона оплавления. Она имеет форму эллипсоидного кратера размерами 3...5 мм с углублением по середине и натеками расплавленного металла по краям. Явно видны закалочные трещины.

Структура в зоне оплавления является типичной для сплавов, закаленных из расплавленного состояния при лазерной обработке. Она представляет собой мелкие ячейки светлого поля, очерченные темным полем размером несколько микрометров. Степень травимости различных макроучастков расплава различна, что свидетельствует о химической неоднородности легированного слоя. Форма макроучастков указывает на конвективный характер перемешивания расплава. Фазовый состав ЗПЛ – ячейки светлого поля –  $\alpha$ -фаза, на границах ячеек – квазиэвтектика.

Исследования показали существенную зависимость структуры и микротвердости слоя от интенсивности импульса излучения. Это наглядно видно на образцах, обработанных с высокой интенсивностью излучения – свыше  $100 \text{ кВт/см}^2$ , у которых образовался заметный кратер. По мере продвижения к кратеру микротвердость покрытия изменяется.

Средняя микротвердость оксидного слоя без лазерной обработки – 350–400 HV. Однако на расстояниях 100–200 мкм до начала кратера микротвердость покрытия существенно возростала до 600–700 HV. После оплавления покрытия микротвердость поверхности резко падала до значений 140–150 HV, что примерно соответствует уровню микротвердости основного материала – 123 HV.

Наличие зоны с повышенными механическими свойствами покрытия показало, что при обработке поверхности лазерным излучением требуемой интенсивности можно достичь упрочнения оксидного покрытия. Оптимальным режимом упрочняющей лазерной обработки является  $10 \dots 15 \text{ кВт/см}^2$ . При этом максимальное увеличение микротвердости достигает 700 HV.

#### Литература

1. **Бровер, Г.И.**, Пустовойт В.Н., Бровер А.В., Магомедов М.Г., Холодова С.Н. Повышение качества химических покрытий лазерным облучением // Машиностроитель. 2001 г. №5. С. 38-43.
2. **Новиков, В.В., Латышев В.Н.** Модификация и упрочнение трущихся поверхностей лазерной обработкой. Иваново ИвГУ, 2000. 119 с.
3. **Ведерникова, И.И.** Диссертация на соискание степени кандидата технических наук, Иваново, 2004.

*Ведерникова Ирина Игоревна*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: iv30-10-76@mail.ru

УДК 621.793.7

В.А. ПОЛЕТАЕВ, д.т.н., профессор,  
П.В. ПУЧКОВ, к.т.н., ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская 34  
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России  
153040, г. Иваново, пр. Строителей, 33,  
*E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

### **Исследование механических свойств деталей электронасосов, упрочненных электродуговым напылением**

**Аннотация.** Проведены исследования по упрочнению деталей электронасосов электродуговым напылением.

**Ключевые слова:** шероховатость поверхности, электродуговое напыление, микротвердость.

V.A. POLETAEV, Doctor of engineering, professor,  
P.V. PUCHKOV Candidate of Engineering, senior Teacher

Ivanovo State Power Engineering University. 153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
Ivanovo fire and rescue Academy of EMERCOM of Russia  
153040, Ivanovo, pr. Builders, 33, E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

### **Investigation of mechanical properties of parts of electropumps, reinforced by the electric arc spraying**

**Abstract.** Conducted research on the hardening of parts of electric pumps electric arc spraying.

**Keywords:** surface roughness, electric arc spraying, micro hardness.

Агрегаты электронасосные центробежные скважинные предназначены для подачи воды.

На рис. 1 показана часть электронасосного агрегата с электродвигателем. Электронасосный агрегат состоит из центробежного насоса и электродвигателя. Валы центробежного насоса и электродвигателя, изготовленные из стали 45, вращаются в резинометаллических подшипниках. В местах контакта с подшипниками на валы насажены втулки из стали 40Х13 или 12Х18Н10Т. Зазор между поверхностью втулки и внутренней поверхностью подшипника не более 0,15 мм. В результате действия внешней среды (песка, влаги, резкой смены температуры, агрессивных газов и аэрозолей, контактов с морской водой и щелочными растворами и др.) во время работы агрегата происходит сильный износ поверхностей трения втулок. Изнашивание поверхности роторной втулки носит абразивный характер за счет абразивных включений, находящихся в потоке жидкости. При увеличении зазора в результате износа подшипника скольжения через зазор может проходить часть потока жидкости, прокачиваемой насосом. Кроме того, может произойти перекосяк и заклинивание вала двигателя. Кроме того, имеются факторы внешней среды: влага, резкая смена температуры, агрессивные газы и аэрозоли, контакты с морской водой и щелочными растворами.

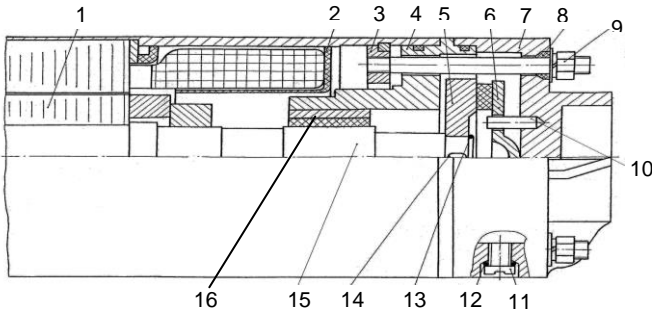


Рис. 1. Электродвигатель погружной: 1 – статор; 2 – пескосбрасыватель; 3 – основание; 4 – щит подшипниковый; 5 – пята; 6 – подпятник; 7 – днище; 8 – уплотнитель; 9 – гайка; 10 – штифт; 11 – болт; 12 – кольцо уплотнительное; 13 – кольцо пружинное; 14 – шпонка; 15 – ротор; 16 – подшипник резинометаллический

В данной работе предлагается в конструкции электродвигателя (рис. 1) вместо втулки на поверхность ротора 15 под подшипником 16 нанести покрытие из металла методом электродугового напыления.

Электродуговое покрытие производилось с применением электродугового металлизатора ЭДМ-5М, токарного станка и сварочного вы-

прямителя типа ВДУ-600. В качестве наплавочного материала использовалась порошковая проволока диаметром 2 мм марки 40X13. С целью обеспечения прочности сцепления напылительного материала с поверхностью ротора на последней нарезалась «рваная» резьба глубиной 3 мм и шагом 1,5 мм с последующей струйно-коррундовой обработкой до получения сплошного матового состояния поверхности. После этого осуществлялось нанесение покрытия на металлизаторе ДМ-5М. Металлизация выполнялась способом колебания металлизатора по всей ширине шейки ротора. Частота колебаний – 20 колеб/мин, дистанция металлзации – 110–120 мм, ток – 230 А, частота вращения вала – 200 об/мин, скорость линейного перемещения металлизатора (подача) – 1 мм/об (0,2 м/мин). Покрытие толщиной  $\varnothing_{\text{ном}} + 1,0$  мм (припуск на обработку) наносилось за 2 прохода. Металлизированные шейки ротора обрабатывались точением с последующим шлифованием или алмазным выглаживанием до номинального размера.

Для измерений микротвердости использовался прибор микротвердомер ПМТ-3 (ГОСТ 1156). На рис. 2 показаны гистограммы изменения микротвердости HV в зависимости от метода механической и упрочняющей обработки деталей из стали 45. Анализ рис. 2. выявил изменение величины микротвердости HV сталей в зависимости от метода механической обработки. После нанесения металлizationного покрытия и последующих точения и алмазного выглаживания происходит значительное повышение микротвердости HV поверхности.

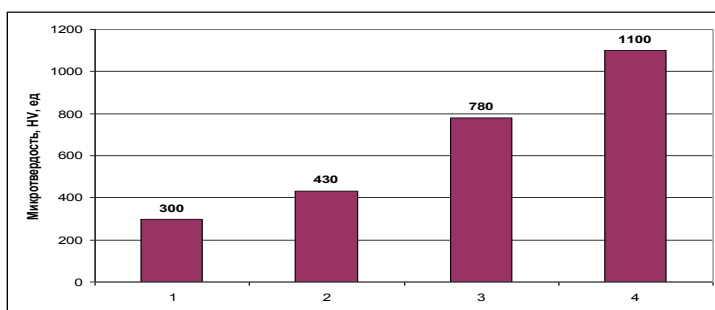


Рис. 2. Гистограммы изменения микротвердости HV в зависимости от метода механической обработки детали из стали 45:

1 – точение; 2 – точение + алмазное выглаживание (АВ); 3 – точение металлizationного покрытия; 4 – точение металлizationного покрытия + (АВ)

Измерение шероховатости производилось на приборе профиле-метре-профилографе модели АБРИС-ПМ7. На рис. 3 показаны гистограммы изменения шероховатости Ra в зависимости от методов механической обработки и упрочнения для деталей из стали 45. Проведенные эксперименты по измерению величины шероховатости Ra поверхно-

стей деталей из стали 45 позволили сделать следующие выводы: исходная величина шероховатости Ra после точения составляет у деталей из стали 45–0,799 мкм, с металлизационным покрытием – 0,536 мкм. После алмазного выглаживания величина шероховатости Ra у деталей с металлизационным покрытием составляет 0,305 мкм.

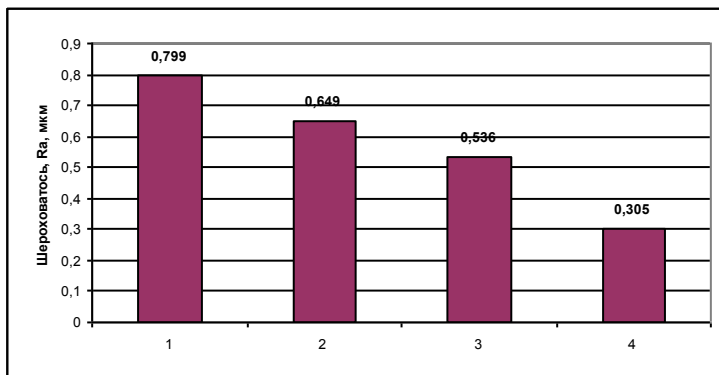


Рис. 3. Гистограммы изменения шероховатости Ra в зависимости от метода обработки для деталей из стали 45:

- 1 – точение; 2 – точение + алмазное выглаживание (АВ);  
 3 – металлизационное покрытие (точение);  
 4 – металлизационное покрытие (точение + АВ)

Проведенные исследования по упрочнению деталей электронасосов электродуговым напылением показали возможность замены дорогостоящих сталей 40Х13 и 12Х18Н10Т на более дешевую сталь 45 с металлизационным покрытием и последующим алмазным выглаживанием.

#### Литература

1. **Полетаев, В.А.** Королькова, Г.С., Ведерникова И.И. Упрочнение деталей электронасосов дугвым напылением /В.А. Полетаев, Г.С. Королькова, И.И. Ведерникова // Металлообработка. – 2010. - № 5(59). – С. 18-21.
2. **Полетаев В.А.,** Королькова Г.С., Ведерникова И.И. Исследование на износостойкость деталей, упрочненных электродуговой металлизацией. / В.А. Полетаев, Г.С. Королькова, И.И. Ведерникова Трение и смазка в машинах и механизмах, 2010, № 6, С.40-45.

*Полетаев Владимир Алексеевич*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

*Пучков Павел Владимирович*

ФГБОУВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России»  
 E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

УДК.621.793.4

И.И. ВЕДЕРНИКОВА, к.т.н., доцент,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская 34  
*E-mail: iv30-10-76@mail.ru*

## **Влияние лазерного воздействия на фазовый состав покрытия**

**Аннотация.** Дополнительная обработка анодированных покрытий лазерным излучением позволяет воздействовать на структуру покрытия, устранять ее дефекты, увеличивать прочность сцепления покрытия и матрицы. В связи с этим актуальным является изучение фазового состава полученного покрытия.

**Ключевые слова:** лазерное упрочнение, микродифрактограммы, фазовый состав, электронная микроскопия.

I.I. VEDERNIKOVA, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St. 34. *E-mail: iv30-10-76@mail.ru*

## **An influence of laser treatment on phase composition of coating**

**Abstract.** An additional processing of anodized cover with laser emitting is allow to effect on structure of coating, eliminate it's defects, increase durability of cover's cohesion and matrix. Studying of phase composition of received covering is relevant in this connection.

**Key words:** laser hardening, micro diffraction pattern, phase composition, electron microscopy

Согласно литературным данным дополнительная обработка покрытий лазерным излучением позволяет воздействовать на структуру покрытия, устранять ее дефекты, увеличивать прочность сцепления покрытия и матрицы [1, 2]. Для исследования фазового состава применяли методы электронной микроскопии.

Электроннографическое исследование состоит в изучении дифракционной картины, получаемой с поверхности данной фазы в результате взаимодействия атомов, входящих в состав этой фазы, с пучком электронов. Метод микродифракции является одним из наиболее эффективных методов определения фазового состава [4].

Выделение избыточных фаз можно зафиксировать в оксидных слепках, полученных окислением поверхности или в результате соответствующего травления или нагрева. Так как разные фазы обладают различной способностью к окислению, то они образуют оксидные пленки неодинаковой толщины и состава. При соответствующем химическом воздействии можно растворить матрицу таким образом, чтобы при

отделении оксидной пленки вместе с ней были отделены и расположенные в пленке частицы избыточной фазы.

Для фазового анализа в режиме микродифракцииготавливалась реплика, содержащая частицы порошка, полученного при диспергировании поверхности микромированием алмазным натфилем. После соскабливания порошок оксидного покрытия переносился на очищенную путем кипячения в дистиллированной воде стеклянную подложку – предметное стекло. Затем на поверхность подложки наносилась капля этилового спирта для дополнительной диспергации порошка, после чего спирт испарялся. В дальнейшем порошковая реплика готовилась по стандартной методике [3]. Съемка велась в режиме микродифракции.

Дифракция электронов на объекте для малых углов рассеивания описывается уравнением:

$$d = \frac{r\lambda}{R}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $R$  – расстояние от рефлекса до следа первичного пучка,  $r$  – расстояние образец пленка.

Так как обычно  $\lambda$  и  $r$  трудно вычислить точно, то величину  $C = \lambda/r$  и называемую постоянной прибора вычисляют по известным периодам эталона TaCl.

Формула (1) преобразуется:

$$d_{\text{HKL}} = C / R. \quad (2)$$

Параметры съёмки в эксперименте — разность потенциалов  $U = 50$  кВ, расстояние образец–пленка  $r = 803$  мм. Постоянная электроногафа в опытах  $C = 25,3 \text{ \AA} \cdot \text{мм}$ .

Расчет микродифрактограмм поликристаллических образцов заключается в определении межплоскостных расстояний. Анализ рассчитанных межплоскостных расстояний в случае кубической сингонии позволяет произвести индентирование отражений и определение периода решетки. В случае кубической сингонии имеем

$$1/d^2_{\text{HKL}} = (H^2 + K^2 + L^2) / a^2 \quad (3)$$

Следовательно, отношение квадратов межплоскостных расстояний должно соответствовать отношению целых чисел:

$$1/d^2_{\text{H}_1\text{K}_1\text{L}_1} : 1/d^2_{\text{H}_2\text{K}_2\text{L}_2} : 1/d^2_{\text{H}_3\text{K}_3\text{L}_3} \dots = (H^2 + K^2 + L^2)_1 : (H^2 + K^2 + L^2)_2 : (H^2 + K^2 + L^2)_3 \dots \quad (4)$$

Зная индексы плоскостей период решетки определяют по формуле

$$a = d_{\text{HKL}} (H^2 + K^2 + L^2)^{1/2} \quad (5)$$

Результаты расчета периода решетки, полученной для разных колец, усредняют. Кроме того, в результате анализа интенсивностей дифракционной картины проверяют и уточняют результаты определения структуры. Оценка интенсивностей велась визуально по пятибалльной системе.

Точечная электронограмма образуется при съемке монокристалльных объектов. Точечную электронограмму можно рассматривать как практически неискаженную проекцию плоскости обратной решетки на плоскость фотографической пластинки. Если кристаллическая решетка вещества известна, то ориентировка кристалла может быть установлена по известным данным. Если ось зоны занимает частное положение, т.е. ее индексы не имеют степеней свободы, то ориентировка этим определяется однозначно. Если ось зоны занимает общее положение, то необходимо проиндексировать электронограмму и установить ее индексы оси. Для индексирования всех точек электронограммы достаточно задать два направления. Тогда индексы точек вдоль каждого из этих направлений определяется как  $hkl$ ,  $2(hkl)$ ,  $3(hkl)$ .

Если заданы индексы двух узловых прямых, то, пользуясь ими как координатными осями, можно определить индексы любого узла. Следует помнить, что в плоскости обратной решетки могут располагаться лишь такие узлы, индексы которых ( $hkl$ ) содержат только две независимые переменные. Знание индексов двух направлений в плоскости обратной решетки достаточно для определения ориентировки кристалла. Индикация и расчет электронограмм производились с помощью специальной программы.

Установлено, что микродифрактограммы поверхности до лазерной обработки являются микродифрактограммами поликристаллического объекта, т.е. кольцевыми. Согласно этих результатов, структура может быть интерпретирована как ГЦК с периодом решетки  $a = 4,051 \pm 0,022$ , что соответствует поликристаллическому алюминию ( $a = 4,0494 \text{ \AA}$ ). Других фаз, например, оксидов или гидроксидов алюминия не обнаружено. Очевидно, оксидное покрытие до обработки не имеет выраженной кристаллической структуры – оно аморфно. Дифракция же получается только от частичек матрицы сплава Д16, отделяемых вместе с покрытием при микротомографии.

Вид микродифрактограмм после лазерной обработки существенно изменяется. Все полученные дифрактограммы точечные, что говорит о том, что порошок имеет кристаллическую структуру. Из-за сложности индексирования точечных электронограмм мы затрудняемся определить тип кристаллической решетки образующейся фазы. Анализ затрудняется еще и тем, что алюминий с кислородом и водой может образовывать большое число возможных соединений с различными типами кристаллических решеток. Тем не менее, можно говорить о том, что при лазерной обработке перед его разрушением в изначально аморфном оксидном покрытии интенсивно развиваются процессы кристаллизации. Этот факт косвенным образом подтверждает и внешнее изменение цвета покрытия – с темно-коричневого на белый.

При интенсивности излучения свыше  $25 \text{ кВт/см}^2$  начинается термодеструкция покрытия, изменяется его цвет и уменьшается микротвердость и износостойкость. Анализ микродифрактограмм показал, что при лазер-



ной обработке перед его разрушением в изначально аморфном оксидном покрытии интенсивно развиваются процессы кристаллизации.

#### Литература

1. **Бровер, Г.И.**, Пустовойт В.Н., Бровер А.В., Магомедов М.Г., Холодова С.Н. Повышение качества химических покрытий лазерным облучением // Машиностроитель. 2001 г. №5. С. 38-43.
2. **Верещака, А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение 1993 г. 336 с.
3. **Горелик, С.С.**, Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСИС. 1994. 328 с.

*Ведерникова Ирина Игоревна*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: iv30-10-76@mail.ru

УДК 621.7.06

Л.К. ЧЕРНОВ, инженер;  
В.А. ПОЛЕТАЕВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

### Расположение магнитов в магнитно-абразивном устройстве для магнитной галтовки

**Аннотация.** Приведены рабочие схемы расположения постоянных магнитов в магнитно-абразивном устройстве для магнитной галтовки.

**Ключевые слова:** магнитная галтовка, магнитное поле, постоянный магнит.

L.K. CHERNOV, engineer; V.A. POLETAEV, Doctor of engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

### The location of the magnets in magnetic abrasive device for magnetic tumbling

**Abstract.** Shows the working scheme of arrangement of permanent magnets in magnetic abrasive device for magnetic tumbling.

**Key words:** magnetic tumbling, magnetic field, permanent magnet.

Магнитная галтовка – вид суперфинишной обработки резанием. Режущим инструментом является ферромагнитный галтовочный наполнитель (иглы). Обработка происходит в неподвижном рабочем объеме, окруженном постоянными магнитами, в который загружены наполнитель, представляющий короткие обоюдоострые иглы, обраба-

тываемые детали и смазочно-охлаждающая технологическая среда.. Магнитное поле в качестве средства передачи обрабатываемого усилия позволяет управлять потоком наполнителя, так как он движется в соответствии с конфигурацией магнитного поля, индуцируемого постоянными магнитами. Для проведения экспериментов были разработаны рабочие схемы расположения постоянных магнитов на подвижном диске установки для магнитной галтовки (рис. 1).

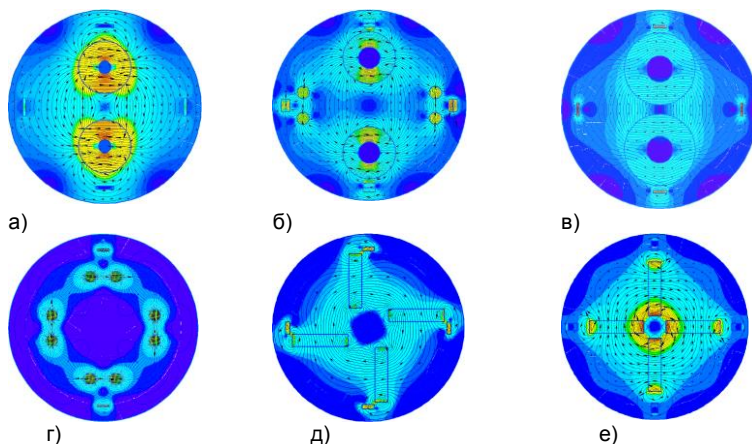


Рис.1. Схемы расположения магнитов в установке для магнитной галтовки

Схема №1 (рис. 1, а) составлена из двух групп постоянных магнитов: основной и вспомогательной. Основная группа: 2 магнита ЭМЦ097Н, материал – NdFeB, размеры 60хг15х3 мм, физические характеристики  $B_r = 1$  Тл,  $H_{eb} = 700$  кА/М. Вспомогательная группа: 4 магнита ИЖКГ, материал – феррит стронция, размеры 20х4 мм, физические характеристики  $B_r = 0,3$  Тл,  $H_{eb} = 185$  кА/М.. Данное поле индуцируют шесть постоянных магнитов – два сильных кольцевых магнита составляют основную группу, четыре слабых магнита дискообразной формы составляют вспомогательную группу. Как видно на схеме, поле наиболее напряжено в области кольцевых магнитов и на пространстве между ними. Вспомогательная группа постоянных магнитов создаёт дополнительную неоднородность магнитного поля. Общая энергия магнитного поля  $W = 827,25$  Дж.

Схема № 2 (рис. 1, б) составлена из двух групп постоянных магнитов: основной и вспомогательной. Основная группа: 2 магнита ЭМЦ097Н; материал – NdFeB; размеры – d60 x r15 x 5 мм; физические характеристики  $B_r = 1$  Тл,  $H_{eb} = 700$  кА/М; 4 магнита ИЖКГ; материал – NdFeB; размеры d14,5x5 мм; физические характеристики  $B_r = 0,95$  Тл,

$H_{eb} = 750$  кА/М. Вспомогательная группа: 16 магнитов ИЖКГ; материал – NdFeB; размеры  $d14,5 \times 5$  мм; физические характеристики  $B_r = 0,95$  Тл,  $H_{eb} = 750$  кА/М. Данное поле индуцируют 22 постоянных магнита – два сильных кольцевых магнита и четыре дискообразных составляют основную группу, 16 сильных магнитов дискообразной формы составляют вспомогательную группу. Вспомогательная группа постоянных магнитов создаёт дополнительную неоднородность магнитного поля. Общая энергия магнитного поля  $W = 899,12$  Дж.

Схема № 3 (рис. 1, в) составлена из двух групп постоянных магнитов: основной и вспомогательной. Основная группа: 2 магнита ЕАЖИ; материал – феррит стронция; размеры  $d80 \times d30 \times 10$  мм; физические характеристики  $B_r = 0,37$  Тл,  $H_{eb} = 230$  кА/М. Вспомогательная группа: 4 магнита ЕАЖИ; материал – NdFeB; размеры  $64 \times 15 \times 3$  мм; физические характеристики  $B_r = 1,1$  Тл,  $H_{eb} = 850$  кА/М. Данное поле индуцируют шесть постоянных магнитов – два слабых больших кольцевых магнита составляют основную группу, четыре сильных магнита в форме пластины составляют вспомогательную группу. В данном случае поле имеет высокую напряженность между кольцевыми магнитами. Вспомогательная группа постоянных магнитов создаёт дополнительную неоднородность магнитного поля. Общая энергия магнитного поля  $W = 209,12$  Дж.

Схема № 4 (рис. 1, г) составлена из двух групп постоянных магнитов: основной и вспомогательной. Основная группа: 8 магнитов ИЖКГ; материал – NdFeB; размеры  $d14,5 \times 5$  мм; физические характеристики  $B_r = 0,95$  Тл,  $H_{eb} = 750$  кА/М. Вспомогательная группа: 2 магнита ЕАЖИ; материал – NdFeB; размеры  $64 \times 15 \times 3$  мм; физические характеристики  $B_r = 1,1$  Тл,  $H_{eb} = 850$  кА/М. Данное поле индуцируют десять постоянных магнитов – восемь сильных дисковых магнита составляют основную группу, два сильных магнита в форме пластины составляют вспомогательную группу. Поле наиболее напряжено в области кольцевых магнитов и на пространстве между ними, а также у вспомогательных магнитов. Вспомогательная группа постоянных магнитов создаёт дополнительную неоднородность магнитного поля. Общая энергия магнитного поля  $W = 240,78$  Дж.

Схема №5 (рис. 1, д) составлена из двух групп постоянных магнитов: основной и вспомогательной. Основная группа: 4 магнита ЕАЖИ; материал – NdFeB; размеры  $64 \times 15 \times 3$  мм; физические характеристики  $B_r = 1,1$  Тл,  $H_{eb} = 850$  кА/М. Вспомогательная группа: 4 магнита ИЖКГ; материал – NdFeB; размеры  $d14,5 \times 5$  мм; физические характеристики  $B_r = 0,95$  Тл,  $H_{eb} = 750$  кА/М. Данное поле индуцируют восемь постоянных магнитов – четыре сильных магнитов в форме пластины составляют основную группу, четыре сильных цилиндрических магнита составляют вспомогательную группу. Поле наиболее напряжено в области схождения основной группы, область высокой напряженности имеет форму кольца. Вспомогательная группа постоянных магнитов создаёт

дополнительную неоднородность магнитного поля. Общая энергия магнитного поля  $W = 491,14$  Дж.

Схема № 6 (рис. 1е) составлена из двух групп постоянных магнитов: основной и вспомогательной. Основная группа: 4 магнита ЕАЖИ; материал – NdFeB; размеры 64 x 15 x 3 мм; физические характеристики  $B_r = 1,1$  Тл,  $H_{cb} = 850$  кА/М. Вспомогательная группа: 4 магнита ИЖКГ; материал – феррит стронция; размеры 20 x 4 мм, физические характеристики  $B_r = 0,3$  Тл,  $H_{cb} = 185$  кА/М. Схема поля представляет собой двумерный план размещения постоянных магнитов с нанесенными на него магнитными силовыми линиями, векторами направления магнитной индукции и разметкой напряженности поля. Данное поле индуцируют восемь постоянных магнитов – четыре сильных магнита в форме пластины составляют основную группу, четыре слабых цилиндрических магнита составляют вспомогательную группу. Вспомогательная группа постоянных магнитов создаёт дополнительную неоднородность магнитного поля. Общая энергия магнитного поля  $W = 550,47$  Дж.

От расположения постоянных магнитов в рабочей области магнитной галтовки зависит сила резания и траектория движения игл в рабочем контейнере. В установке необходимо использовать постоянные магниты с высокой коэрцитивной силой и располагать их таким образом, чтобы разноименные полюса были направлены друг против друга и достигалась высокая общая неоднородность магнитного поля.

### Литература

1. **Полетаев В.А.**, Павлюкова Н. Л., Чернов Л. К. Патент на полезную модель РФ № 97076. Устройство для магнитно-абразивной галтовки. Оpubл. в Б.И. №24, 27.08.2010.
2. **Полетаев В.А.**, Чернов Л. К. Патент на полезную модель РФ №111795. Устройство для магнитно-абразивной галтовки. Оpubл. в Б.И. №36, 27.12.2011.
3. **Полетаев В.А.**, Чернов Л.К Патент № 115279 на полезную модель Устройство для магнитно-абразивной галтовки. Оpubл. Б.И. №12 27.04.2012.

*Чернов Леонид Константинович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
*Полетаев Владимир Алексеевич*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

УДК 621.9.01

А.С. ОРЛОВ, к.т.н., доцент;  
В.А. ПОЛЕТАЕВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

## Исследование упрочнения сверл импульсной магнитной обработкой

**Аннотация.** Проведены исследования износа задних поверхностей кромок сверла диаметром 6 мм из быстрорежущей стали Р6М5.

**Ключевые слова:** износ, сверло, импульсная магнитная обработка.

A. S. ORLOV, Candidate of Engineering, docent;  
V.A. POLETAEV, Doctor of engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

## Research hardening drills pulsed magnetic treatment

**Abstract.** The investigation of the wear of the rear surfaces of the edges of the drill 6 mm diameter high-speed steel R6M5.

**Keywords:** wear, drill, pulsed magnetic treatment.

При исследовании влияния продолжительности импульсной магнитной обработки, величины напряженности магнитного поля на стойкость и величину износа фаски задней поверхности сверл диаметром 6 мм из быстрорежущей стали Р6М5 при резании углеродистых качественных конструкционных сталей 45 эксперименты проводились на радиально-сверлильном станке 2А135 с автоматической подачей инструмента и его охлаждением СОЖ «Эмульсол ОТ» при концентрации 5 %. Обрабатываемым материалом были выбраны заготовки в форме пластин толщиной 15 мм. Режущие кромки сверл фотографировались на специальных установках при помощи цифрового фотоаппарата. Сверла обрабатывались импульсным магнитным полем.

Применялись следующие режимы механической обработки для сталей (45):  $s = 0,18-0,22$  мм/об.,  $v = 14-18$  м/мин. Были выбраны заготовки в форме пластин толщиной 15 мм.

Проведены исследования износа задних поверхностей кромок сверла диаметром 6 мм из быстрорежущей стали Р6М5 с МИО при  $H = 500$  кА/м с разным количеством импульсов и с применением ферромагнитного порошка при обработке стали 45.

На рис. 1 показана зависимость износа фаски задней поверхности сверла диаметром 6 мм из быстрорежущей стали Р6М5 от суммарной величины сверления детали из стали 45 при МИО при напряженности  $H = 500$  кА/м с ферромагнитным порошком.

Анализ рис. 1 показывает, что при обработке стали 45 износ фаски задней поверхности сверла при упрочнении МИО с ферромагнитным порошком магнитным полем с напряженностью  $H = 500$  кА/м находится в пределах 0,34–0,42мм, а суммарная глубина сверления в пределах 800–1200 мм. Причем наименьший износ фаски задней поверхности сверла происходит при количестве импульсов, равно трем.

На рис. 2 представлена относительная стойкость сверл при сверлении стали 45. При оптимальной напряженности магнитного поля 500 кА/м при использовании ферромагнитного порошка максимальная относительная стойкость сверл достигается при количестве импульсов, равном трем (рис. 2).

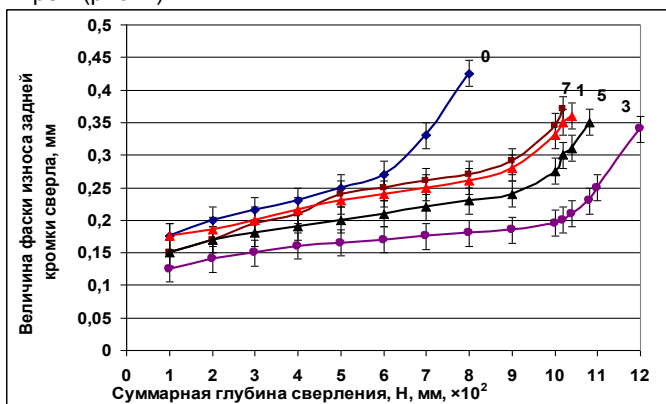


Рис. 1. Зависимость износа фаски задней поверхности сверла диаметром 6 мм из быстрорежущей стали Р6М5 от суммарной глубины сверления при обработке стали 45 при МИО с  $H = 500$  кА/м с ферромагнитным порошком: 0 – без упрочнения МИО; 1 – с МИО и одним импульсом; 3 – с МИО и тремя импульсами; 5 – с МИО и пятью импульсами; 7 – с МИО и семью импульсами

На рис. 3 представлена зависимость изменения крутящего момента от суммарной глубины сверления при обработке стали 45 при МИО с  $H = 500$  кА/м с ферромагнитным порошком.

Эксперименты по измерению крутящего момента при обработке деталей из стали 45 показали, что наименьший крутящий момент возникает при обработке сверлами, упрочненными МИО с напряженностью магнитного поля  $H = 500$  кА/м с ферромагнитным порошком и количестве импульсов, равно трем.

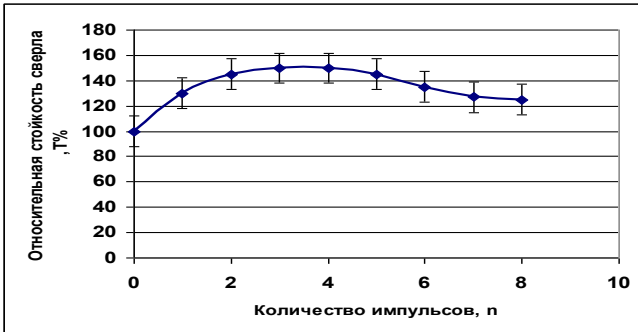


Рис. 2. Влияние количества импульсов магнитной обработки с использованием ферромагнитного порошка на относительную стойкость сверл

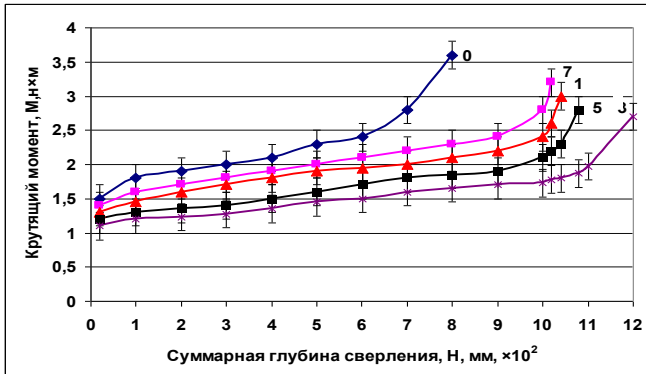


Рис. 3. Зависимость изменения крутящего момента от суммарной глубины сверления при упрочнении стали 45 импульсным магнитным полем напряженностью  $H = 500$  кА/м с ферромагнитным порошком: 0 – без обработки МИО; 1 – с МИО и одним импульсом; 3 – с МИО и тремя импульсами; 5 – с МИО и пятью импульсами; 7 – с МИО и семью импульсами

Экспериментами установлено, что износ фаски задней поверхности сверл, упрочненных МИО напряженностью  $H = 500$  кА/м, при сверлении стали 45 находится в пределах 0,34–0,42мм, а суммарная глубина сверления в пределах 800–1200 мм. Причем наименьший износ фаски задней поверхности сверла происходит при количестве импульсов, равном трем. По измерению крутящего момента при сверлении деталей из стали 45 установлено, что наименьший крутящий момент возникает при упрочнении сверлами, обработанными  $H = 500$  кА/м и количестве импульсов, равном трем.

### Литература

1. Орлов, А.С., Полетаев В.А. Повышение износостойкости сверл методом импульсной магнитной обработки / А.С. Орлов, В.А. Полетаев // Вестник, 2007. – Вып. 3. – С. 54–55.
2. Орлов, А.С. Исследование на износостойкость сверл, упрочненных импульсной магнитной обработкой / А.С. Орлов // Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сб. ст. III междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2007. – С. 35–37.
3. Орлов, А.С., Полетаев В.А. Упрочнение сверл методом импульсной магнитной обработки / А.С. Орлов, В.А. Полетаев // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 3. – С. 27.
4. Орлов, А.С. Упрочнение режущего инструмента импульсной магнитной обработкой / А.С. Орлов, // Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Иваново. – 2013. – Т. 3. – С. 241–243.

*Орлов Александр Станиславович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
*Полетаев Владимир Алексеевич*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

УДК 621.793.7

В.А. ПОЛЕТАЕВ, д.т.н., профессор;  
А. В. НИКОНОРОВ к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

## Коррозионная стойкость деталей электронасосов

**Аннотация.** Проведены исследования коррозионной стойкости образца с покрытием из хрома с ультра алмазами в растворах 5%-й серной кислоты  $H_2SO_4$  и 5%-й щелочи NaOH.

**Ключевые слова:** коррозионная стойкость, ультраалмаз.

V.A. POLETAEV, Doctor of engineering, professor,  
A. V. NIKONOROV, Candidate of Engineering, docent;

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

## The corrosion resistance of parts of electropumps

**Abstract.** Conducted research of corrosion resistance of the sample with coating-ment of chromium from ultra diamonds in solutions of 5 % sulfuric acid  $H_2SO_4$  and 5 % alkali NaOH.

**Keywords:** corrosion resistance, ultra diamond.



Детали электронасосов испытывают воздействие факторов внешней среды: агрессивных газов и аэрозолей, морской воды, отделочных растворов и т.п. При этом у деталей разрушается рабочая поверхность, контактирующая, например, с жидкостью. В основном эти детали изготовляют из дорогостоящих сталей 40X13 и 12X18H10T или из стали 45 с металлизированным покрытием. Основные методы контроля склонности стали к коррозии в соответствии с ГОСТ 6032 – это испытания в растворах сернокислой меди, серной кислоты и азотной кислоты и др. Эти методы охватывают широкий диапазон потенциалов для коррозионнстойких сталей, включенных в классификационный ГОСТ 5632. В зарубежной практике применяются аналогичные методы испытаний.

Процесс коррозии можно представить в виде следующих основных стадий: транспортировка реагирующих веществ к поверхности раздела фаз; химическое или электрохимическое взаимодействие; отвод продуктов реакции из реакционной зоны.

Скорость коррозии определяется двумя основными показателями коррозионной стойкости металлов:

– глубинный показатель коррозии  $K_n$  (глубина коррозионного разрушения  $P$  в единицу времени  $\tau$ );

$$K_n = P/\tau \text{ (мм/год)} \quad (1)$$

– показатель изменения массы  $K_m$  (изменение массы образца металла в результате коррозии, отнесенное к единице поверхности металла  $n$  к единице времени)

$$K_m = \Delta m/S \cdot \tau \text{ (г/м}^2 \cdot \text{час).} \quad (2)$$

Скорость коррозии определяется объемным методом, т.е. по объему выделившегося водорода. Затем определяется группа и балл коррозионной стойкости.

В качестве агрессивных сред использовались 5 % раствор NaOH и 5 %-й раствор серной кислоты  $H_2SO_4$ . Для исследования изготовлялись образцы из сталей 40X13, 12X18H10T и сталь 45 с покрытиями. Образцы с размерами  $h \times a \times b$  (3 мм×10 мм×20 мм) с боков и снизу покрывали специальным составом (раствором целлулоида в ацетоне) за исключением исследуемой верхней поверхности.

Для исследования использовался аппарат с самоциркуляцией для коррозионных испытаний в случае с выделением водорода (по Льюису и Эвансу). После взвешивания образцов и измерения площадей поверхностей образцов, они помещались в пробирки с агрессивной средой (в растворах 5 % серной кислоты  $H_2SO_4$  и 5 % щелочи NaOH). Через каждые 5 минут снимались показания выделившегося водорода.

По окончании опыта образцы вновь взвешивались, а поверхности после коррозии фотографировались. По объему выделившегося водорода (пробирка с делениями) с помощью формулы находилось изменение массы образцов

$$\Delta m = \frac{A \cdot V_0}{n \cdot 11,2 \cdot 1000}, \quad (3)$$

где  $A$  – атомный вес металла;  $V_0$  – объем выделившегося водорода (мл);  $n$  – валентность металла.

Затем определялся показатель изменения массы  $K_m$  и глубинный показатель коррозии  $K_n$  соответственно по формулам:

$$K_m = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau} \text{ (г/м}^2 \cdot \text{час)}, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь поверхности образца (м<sup>2</sup>);  $\tau$  – время испытаний (час).

$$K_n = \frac{K_m \cdot 8,76}{\gamma_{\mu e}} \text{ (мм/год)}, \quad (5)$$

где  $\gamma_{\mu e}$  – плотность материала (г/см<sup>3</sup>).

На рис. 2–3 показаны гистограммы изменения глубины коррозионного разрушения  $K_n$  и массы  $K_m$  покрытия из хрома с ультраалмазами в растворах 5 % серной кислоты  $H_2SO_4$  и 5 % щелочи  $NaOH$ .

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что коррозионная стойкость деталей, обработанных алмазным выглаживанием выше, чем при обработке точением и шлифованием. Основной причиной повышения коррозионной стойкости при алмазном выглаживании являются остаточные напряжения сжатия, а для металлизированного покрытия – технология нанесения покрытия, приводящая к увеличению твердости поверхности.

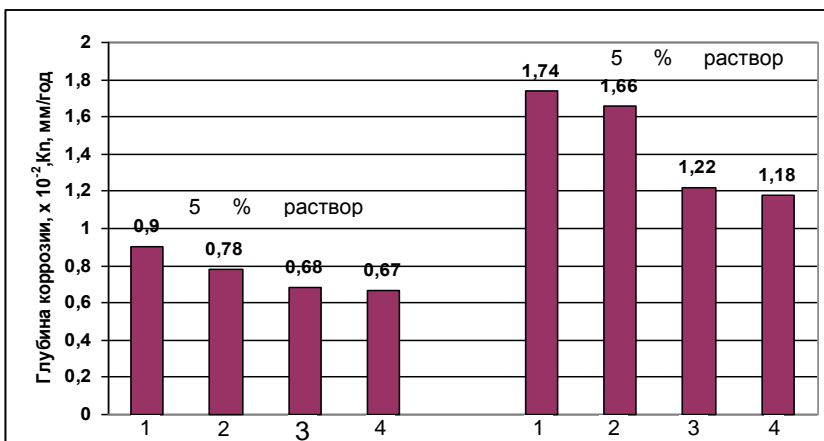


Рис. 2. Изменение глубины коррозионного разрушения покрытия из хрома с ультраалмазами в растворах 5 %-й серной кислоты  $H_2SO_4$  и 5 % щелочи  $NaOH$ : 1 – точение; 2 – шлифование; 3 – точение алмазное выглаживание; 4 – точение+ алмазное выглаживание +магнитно-импульсная обработка

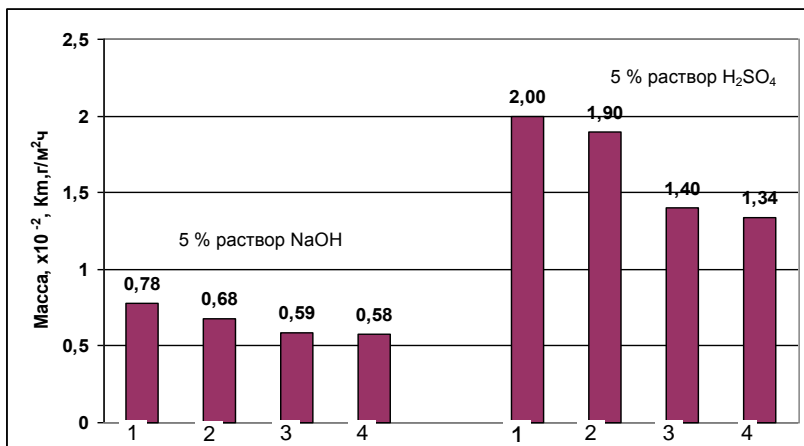


Рис. 3. Изменение массы образца с покрытием из хрома с ультраалмазами в результате коррозии в растворах 5 % серной кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 5 % щелочи NaOH: 1 – точение; 2 – шлифование; 3 – точение+ алмазное выглаживание; 4 – точение+ алмазное выглаживание +магнитно-импульсная обработка

### Литература

1. **Полетаев В.А.**, Ведерникова И.И., Королькова Г.С. Коррозионная стойкость деталей электронасосов. / В.А. Полетаев, И.И. Ведерникова, Г.С. Королькова // Физика, химия и механика трибосистем – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2010. – Вып. 9. – С.125 – 129.

*Никоноров Алексей Владимирович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
*Полетаев Владимир Алексеевич*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

УДК 621.7.06

А.М. ВЛАСОВ, аспирант,  
В.А. ПОЛЕТАЕВ, д.т.н., профессор,  
Т.А. ПАХОЛКОВА, доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

## Построение модели шероховатой поверхности

**Аннотация.** Разработана и использована методика построения трехмерной модели шероховатой поверхности деталей.

**Ключевые слова:** величина шероховатости, профилограмма, моделирование, поверхность.

A.M. VLASOV, graduate, V.A. POLETAEV, Doctor of engineering, professor,  
T.A. PANKOVA, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

## Building a model of a rough surface

**Abstract.** Developed and used a method of constructing a three-dimensional model of rough surface parts.

**Keywords:** roughness value, the depth of roughness, modeling, surface.

Известно, что после механической обработки на поверхностях деталей образуются микронеровности. Рельеф поверхности состоит из чередующихся выступов и впадин. Для наилучшего изучения шероховатости поверхности разработан и использован метод построения трехмерной модели шероховатой поверхности деталей. Для создания трехмерной модели поверхности использовались следующие данные: значения  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_{max}$  для участка поверхности; профилограмма и фотоснимок участка поверхности.

Фотография моделируемого участка представлена на рис. 1, а профилограмма поверхности – на рис. 2.

Анализируя фотографию поверхности (рис. 1) определяются неровности трех типов: тип 1: глубокие борозды на поверхности образца; тип 2: неглубокие борозды на поверхности образца; тип 3: прочие малые неровности.

По полученным значениям шероховатости поверхности и профилограмме определялись значения величины  $L$  для каждого типа неровности (1, 2, 3):

$$L_1 = R_{max} \quad (1)$$

$$L_2 = ((H_{2max} - H_{2min}) + k_1 * R_z) / 2 \quad (2)$$

$$L_3 = ((H_{3\max} - H_{3\min}) + k_2 * R_a) / 2 \quad (3)$$

где  $k$  понижающий коэффициент, введенный для корректирования значений  $R_z$  и  $R_a$ ;  $H_{i\min}$  и  $H_{i\max}$  – максимальное и минимальное значения по каждому типу неровностей.

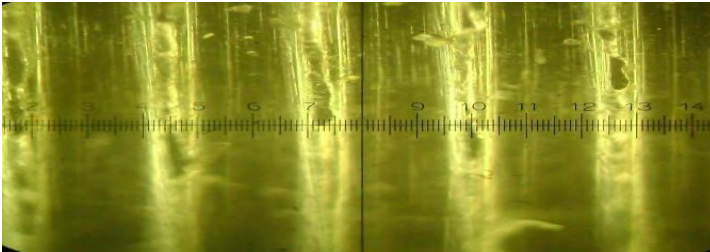


Рис. 1. Фотография моделируемого участка

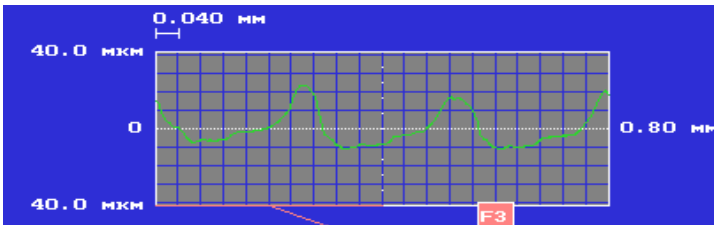


Рис. 2. Профиллограмма поверхности детали

Коэффициент  $k$  определяется следующим образом:

$$k_2 = \frac{n - n_2}{n} \quad (4)$$

$$k_3 = \frac{n - n_3}{n} \quad (5)$$

где  $n$  – общее число ячеек в профиллограмме,  $n_1$  – число ячеек, в которых значение отклонения профиля от линии  $m$  превышает  $\frac{R_z}{2}$ ,  $n_2$  – число ячеек, в которых значение отклонения профиля от линии  $m$  превышает  $\frac{R_a}{2}$ .

При создании трехмерной модели шероховатости поверхности детали моделируется в масштабе плоскость (размер моделируемого участка – 0,8 x 0,8мм, размер моделируемой плоскости 300x200 мм) с заданными конечными элементами – вершинами, причем плоскость содержит 200x200 ячеек (рис. 3).

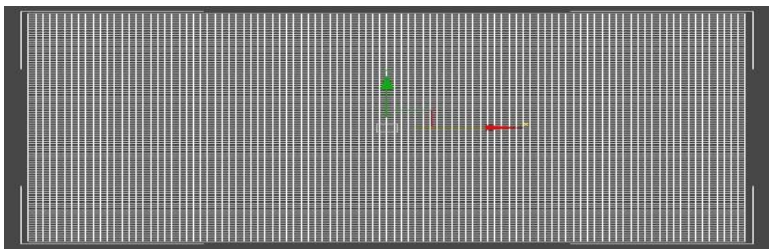


Рис. 3. Моделируемая поверхность

Далее на плоскость наносится текстура, созданная из фотографии моделируемого участка поверхности (рис. 4).

На плоскости определяются вершины, соответствующие областям неровности типа 1, и им задается в масштабе, указанном выше величина  $L_1$ , причем ее значение после приведения в соответствии с действующим в модели масштабом, умножается на 10 для упрощения визуального восприятия модели.

Неровностям типа 2 и 3 таким же образом задаются величины  $L_2$  и  $L_3$  соответственно. Моделируемая поверхность с заданными величинами  $L$  для каждого типа неровностей принимает вид (рис. 5).

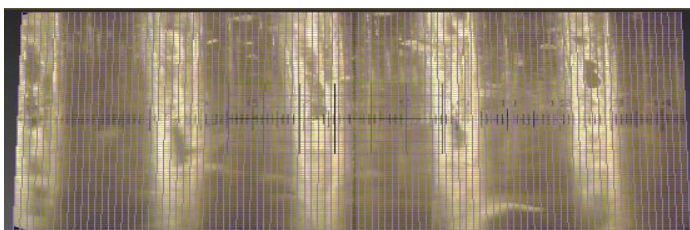


Рис. 4. Моделируемая поверхность с нанесенной текстурой

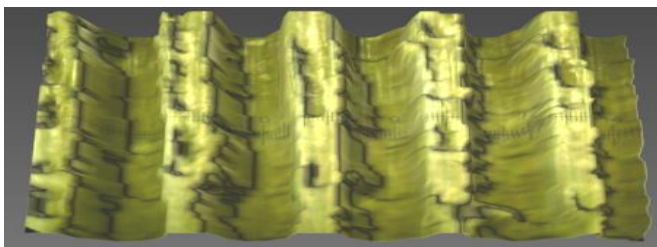


Рис. 5. Моделируемая поверхность с заданными величинами  $L$

После выполнения всех операций моделирования, программой рассчитывается рендер поверхности (рис. 6).

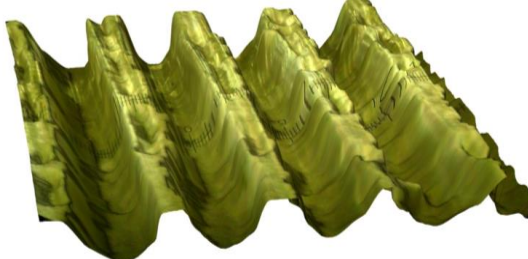


Рис. 6. Трехмерная модель участка поверхности образца

Полученную трехмерную модель можно считать адекватной моделью участка поверхности образца. Так же в построении модели были использована фотография данного участка, как источник информации о расположении неровностей на поверхности участка.

#### Литература

**1. Власов, А.М.,** Полетаев В.А., Пахолкова Т.А. Построение трехмерной модели шероховатой поверхности / А.М. Власов, В.А. Полетаев, Т.А. Пахолкова // Новые материалы и технологии в машиностроении: Сборник научных трудов. Выпуск 20. Брянск, БГИТА, 2014. – С.19 –22.

*Власов Алексей Михайлович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
*Полетаев Владимир Алексеевич*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

УДК 621.793.7

В.А. ПОЛЕТАЕВ, д.т.н., профессор;  
П.В.ПУЧКОВ, к.т.н., ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России  
153040, г. Иваново, пр. Строителей, 33,  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

### Исследование механических свойств деталей с гальванопокрытием

**Аннотация.** Проведены исследования механических свойств деталей из сталей 45, 40X13 и 12X18Н10Т.

**Ключевые слова:** Шероховатость поверхности, микро твердость, упрочнение детали.

V.A. POLETAEV, Doctor of engineering, professor,  
P.V. PUCHKOV, Candidate of Engineering, senior Teacher

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
Ivanovo fire and rescue Academy of EMERCOM of Russia  
153040, Ivanovo, pr. Builders, 33, *E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

### **Investigation of mechanical properties of parts of plated**

**Abstract.** Conducted research of mechanical properties of parts made of steels 45, 40X13 and 12X18H10T.

**Keywords:** surface roughness, micro hardness, reinforcement details.

В большинстве случаев электродвигатели и насосы выходят из строя вследствие износа нагруженных деталей (валов, втулок и т.д.) в результате их контакта с резинометаллическими подшипниками и жидкостью, проходящей через элементы электронасоса. При этом у электродвигателей разрушается только рабочая поверхность деталей (втулки, валы), которая контактирует с подшипниками и с жидкой массой. В основном эти детали изготавливают из дорогостоящих сталей – 40X13 и 12X18H10T. Качество поверхности из этих сталей уже нельзя существенно увеличить за счет легирования или термической обработки. Поэтому дальнейшее улучшение качества рабочих поверхностей деталей агрегатов возможно только за счет замены марок сталей 12X18H10T и 40X13 на другую сталь, например, сталь 45 более дешевую, и применения многокомпонентных покрытий.

Для реализации технологии получения хромированных покрытий с ультраалмазами использовалось специальное оборудование, включающее ванну хромирования, резервуар, циркуляционный насос, фильтры и трубопроводы.

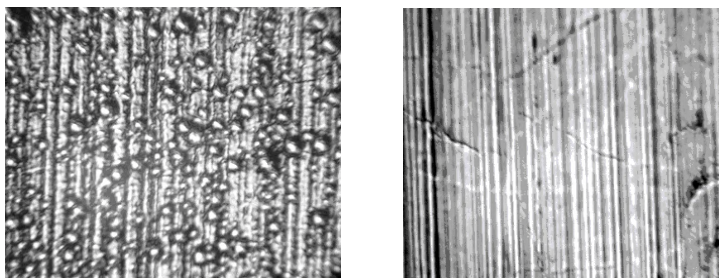
Технические характеристики ультраалмазов: размер частиц – 4–8 нм (первичные микрокристаллиты 20–30 нм – первичные агрегаты); удельная поверхность –  $300 + 30 \text{ м}^2/\text{г}$ ; фазовый состав: кубический алмаз – 80–100 %; алмазоподобный рентгеноаморфный углерод – до 20 %; содержание примесей – не более 3,0 %.

Технология нанесения гальванопокрытия включает следующие этапы: подготовку деталей к нанесению гальванопокрытия, приготовление электролита, нагрев и термостатирование электролита.

Технология упрочнения деталей алмазным выглаживанием включает следующие этапы: токарная обработка (точение) на станке типа ИЖ 250 ИТВМФ1 при режимах:  $n = 800 \text{ об/мин}$ ,  $S = 0,15 \text{ мм/об}$ ; алмазное выглаживание при режимах:  $n = 200 \text{ об/мин}$ ,  $S = 0,015 \text{ мм/об}$ , сила выглаживания – 200 Н для неупрочненных деталей и 300 Н для деталей, упрочненных термообработкой (ТО) или нанесением гальванопокрытия из хрома с ультраалмазами (УА).



На рис. 1 представлена поверхность стали 45: а) с нанесённым слоем хрома и ультра алмазами; б) – после точения и алмазного выглаживания слоя хрома и ультра алмазами.



а) б)  
Рис. 1. Поверхность стали 45: а) – с нанесённым слоем хрома и ультра алмазами после точения; б) – после точения и алмазного выглаживания слоя хрома и ультра алмазами (ув.× 2500)

Для измерений микротвердости использовался прибор микротвердомер ПМТ-3 (ГОСТ 1156).

На рис. 2 показаны гистограммы изменения микротвердости HV в зависимости от метода механической и упрочняющей обработки деталей из стали 45.

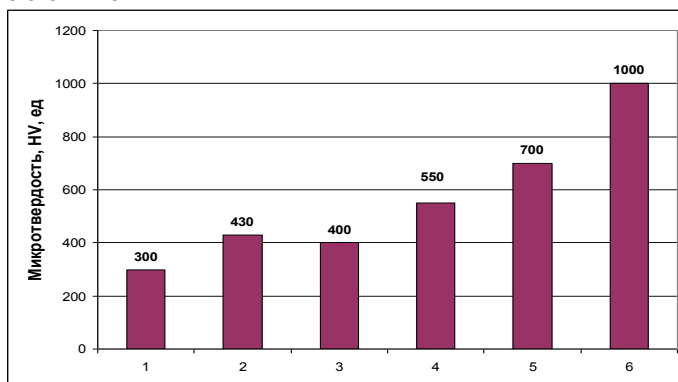


Рис. 2. Гистограмма изменения микротвердости HV в зависимости от метода механической обработки детали из стали 45: 1 – точение без термической обработки; 2 – точение + алмазное выглаживание (АВ); 3 – термическая обработка (ТО) + точение; 4 – ТО + АВ; 5 – точение + нанесение покрытия из хрома с ультраалмазами (УА); 6 – (УА) + точение + АВ

Анализ рис. 2. показывает изменение микротвердости стали 45 в зависимости от метода механической обработки. Максимальная твердость после термообработки, точения, алмазного выглаживания составляет 550 ед. HV. После нанесения покрытия из хрома с ультраалмазами и с последующим алмазным выглаживанием микротвердость 1000 ед.HV. Измерение шероховатости производилось на приборе профилометре-профилографе модели АБРИС-ПМ7, запись профилограмм производилась на ПЭВМ.

На рис. 3. показаны гистограммы изменения шероховатости Ra в зависимости от методов механической обработки и упрочнения для деталей из стали 45.

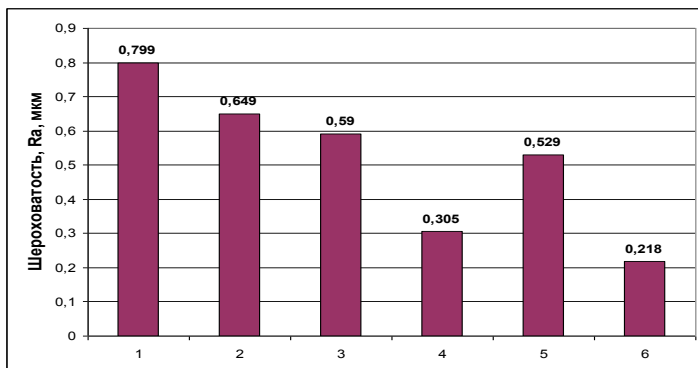


Рис. 3. Гистограмма изменения шероховатости Ra в зависимости от метода обработки для деталей из стали 45: 1 – точение; 2 – точение + алмазное выглаживание (АВ); 3 – шлифование; 4 – шлифование + АВ; 5 – шлифование покрытия с хромом и ультраалмазами; 6 – шлифование + АВ покрытия с хромом и ультраалмазами

Анализ рис. 3 показывает, что величина шероховатости Ra после точения и шлифования и последующего алмазного выглаживания уменьшается с 0,799 мкм до 0,305 мкм, а после нанесения покрытия из хрома с ультра алмазами и последующего алмазного выглаживания – до 0,208 мкм. Проведенные исследования механических свойств деталей из сталей 45, 40Х13 и 12Х18Н10Т после точения, шлифования, алмазного выглаживания и нанесения покрытия из хрома с ультраалмазами на сталь 45 показали возможность замены дорогостоящих сталей 40Х13 и 12Х18Н10Т на дешевую сталь 45 с покрытием из хрома с ультраалмазами.

#### Литература

1. Полетаев, В.А., Самок Г.С., Королькова Г.С. Исследование механических свойств деталей электронасосов, упрочненных комбинированным способом // В.А. Полетаев, Г.С. Самок, Г.С. Королькова //Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3 С. 22-25.

2. **Самок Г.С.**, Королькова Г.С. Влияние метода упрочняющей обработки на качество поверхностного слоя деталей машин. // Г.С. Самок, Г.С. Королькова // Вестник ИГЭУ. - Иваново: - ИГЭУ, 2011. - Вып. 1. С.57-61.

*Полетаев Владимир Алексеевич*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

*Пучков Павел Владимирович*

ФГБОУВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России»  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

УДК 621.7.06

А.М. ВЛАСОВ, аспирант;  
В.А. ПОЛЕТАЕВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

## **Исследование влияния температуры на изменение моментов трения в рабочем зазоре магнитожидкостных устройств**

**Аннотация.** Проведены исследования влияния температуры на изменение моментов трения в рабочем зазоре магнитно-жидкостных уплотнений.

**Ключевые слова:** шероховатость, нагрев, магнитно-жидкостной герметизатор, момент трения.

A.M. VLASOV, graduate,  
V.A. POLETAEV, Doctor of engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

## **The calculation of the moments of friction in a magnetic liquid devices with hydrodynamic(liquid) lubricant**

**Abstract.** Investigated the effect of temperature on the change in moments of friction in the working gap of the magnetic-fluid seals.

**Keywords:** roughness, heat, magnetic liquid sealer, the friction torque.

Момент трения является одним из важнейших параметров магнитожидкостных герметизаторов, который влияет на величины передаваемых моментов и мощности. На момент трения магнитожидкостного устройства влияет вязкость используемой магнитной жидкости, напряженность магнитного поля, градиент скорости сдвига в рабочем

зазоре устройства, величина рабочего зазора, включающая величины шероховатости поверхностей полюсов и втулки, контактирующих с магнитной жидкостью.

Для исследования влияния температуры на изменение моментов трения в рабочем зазоре магнитно-жидкостных уплотнений была спроектирована и изготовлена установка, показанная на рис. 1.

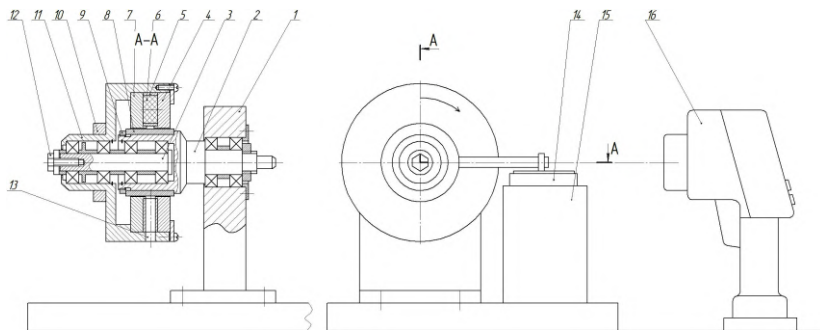


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – стойка; 2 – подвижный вал; 3 – неподвижный вал; 4 – съемный полюс;
- 5 – диск (обойма); 6 – магнит; 7 – съемный полюс; 8 – сменная втулка; 9 – гайка;
- 10 – хомут; 11 – корпус; 12 – болт; 13 – отверстие для измерения температуры;
- 14 – весы; 15 – стойка; 16 – тепловизор

Магнитная жидкость размещается с равномерном рабочем зазоре с однородным магнитным полем между сменными полюсами 4 и сменной втулкой 9. Источником магнитного поля являются цилиндрические постоянные магниты 6, равномерно размещенные по окружности между полюсными приставками. Вал приводится в движение электродвигателем с регулируемой скоростью вращения. Момент трения, создаваемый магнитной жидкостью и опорными подшипниками, передается на магнитную систему устройства и измеряется электронными весами 14. Сменные втулки вала 9 выполнены из стали 3. Измерение шероховатости наружной поверхности сменных втулок производилось на приборе профилометре-профилографе АБРИСПМ7. Температура на поверхности сменной втулки 8 измеряется через отверстие 13 при помощи тепловизора 16. Тепловизор – устройство, позволяющее визуализировать картину теплового излучения наблюдаемого объекта. Это открывает ряд уникальных возможностей для разных сфер деятельности: точных измерений, контроля технологических процессов, и конечно – обеспечения безопасности. Принцип действия современных тепловизоров основан на способности некоторых материалов фиксировать излучение в инфракрасном диапазоне. В данной работе для проведения исследований использовался тепловизор Testo 882. Это модель с

размером матрицы 320x240 пикселей и температурной чувствительностью  $< 50$  мК. Тепловизоры такого класса, как правило, используются для теплового контроля небольших объектов с близкого расстояния при плавном перепаде температур или объектов с большой разностью температуры, когда равномерность ее распределения не имеет значения (электрооборудование, системы нагрева и охлаждения, контакты электропроводки, строительная теплоизоляция квартир, малоэтажных домов и других объектов строительства).

На рис. 2 показана зависимость момента трения от температуры в рабочем зазоре, образованном сменной втулкой (сталь 40X13,  $Ra=8,028$  мкм) и сменным полюсом (сталь 3;  $Ra=9,477$  мкм) и заполненным магнитной жидкостью типа МКУ 100-40, с разными частотами вращения втулки: 1 – 556 об/мин; 2 – 1146 об/мин; 3 – 1793 об/мин; 4 – 2331 об/мин; 5 – 2897 об/мин.

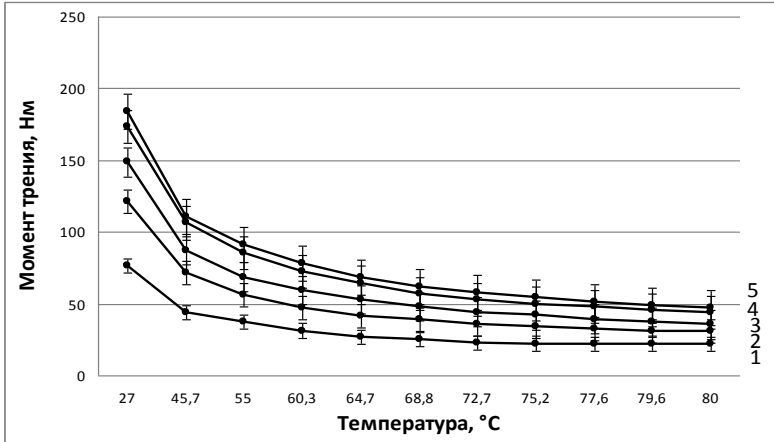


Рис. 2. Зависимость момента трения от температуры в рабочем зазоре, образованном сменной втулкой (сталь 40X13,  $Ra=8,028$  мкм) и сменным полюсом (сталь 3;  $Ra=9,477$  мкм) и заполненным магнитной жидкостью типа МКУ 100-40, с разными частотами вращения втулки:

1 – 556 об/мин; 2 – 1146 об/мин; 3 – 1793 об/мин; 4 – 2331 об/мин; 5 – 2897 об/мин

На рис. 3 представлена зависимость момента трения от температуры в рабочем зазоре, образованном сменной втулкой (сталь 3,  $Ra = 7.210$  мкм) и сменным полюсом (сталь 3;  $Ra=9,477$  мкм) и заполненным магнитной жидкостью типа МКУ 100-40, с разными частотами вращения втулки: 1 – 556 об/мин; 2 – 1146 об/мин; 3 – 1793 об/мин; 4 – 2331 об/мин; 5 – 2897 об/мин.

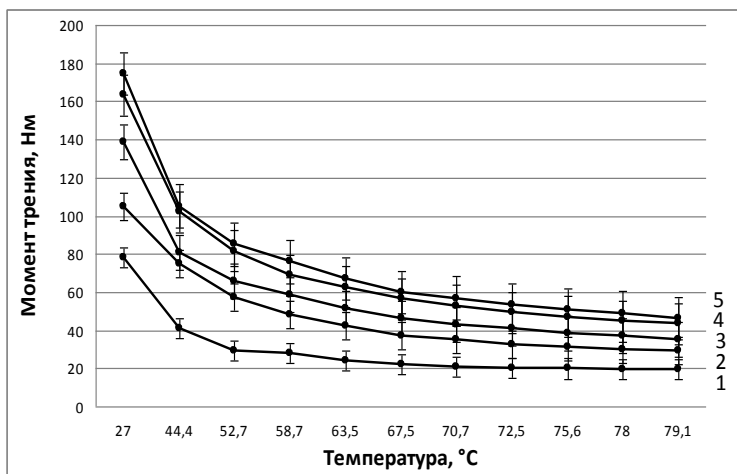


Рис. 3. Зависимость момента трения от температуры в рабочем зазоре, образованном сменной втулкой (сталь 3, Ra=7.210 мкм) и сменным полюсом (сталь 3; Ra=9,477мкм) и заполненным магнитной жидкостью типа МКУ 100-40, с разными частотами вращения втулки: 1 – 556 об/мин; 2 – 1146 об/мин; 3 – 1793 об/мин; 4 – 2331 об/мин; 5 – 2897 об/мин

В процессе работы в магнитно-жидкостном герметизаторе выделяется тепловая энергия, прежде всего за счет вязкостного трения слоев магнитной жидкости. Увеличение температуры ведет к уменьшению вязкости жидкости и величины момента трения.

#### Литература

1. **Полетаев В.А.**, Пахолкова Т.А. Исследование моментов трения в рабочем зазоре герметизаторов при использовании разных типов магнитных жидкостей. Вестник ИГЭУ, 2012. № 4. с. 35–39.
2. **Полетаев В.А.**, Арефьев И.М., Казаков Ю.Б., Пахолкова Т.А. Исследование зависимости момента трения магнитожидкостного устройства от величины рабочего зазора.// Вестник ИГЭУ, Вып. 4, Иваново, – 2013. – С.36–41.
3. **Полетаев В.А.**, Пахолкова Т.А., Власов А.М. Установка для исследования величины рабочего зазора на момент трения магнитожидкостных устройств.// Трение и смазка в машинах и механизмах. – Москва. – М.: «Машиностроение». – 2013. – № 9. – С. 29– 31.УДК 621.7.06

*Власов Алексей Михайлович,*  
 ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
*Полетаев Владимир Алексеевич*  
 ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

УДК 621.7.06

Е.В. ЕГОРЫЧЕВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: kig@kig.ispu.ru*

## **Трансформация субструктуры инструмента из быстрорежущей стали в процессе резания**

**Аннотация.** Рассмотрена трансформация дислокационной структуры поверхностных слоев режущего инструмента из стали Р6М5, возникающих в процессе механической обработки. Представлены экспериментальные данные по изменению плотности дислокаций, микронапряжений на рабочих поверхностях инструмента после резания стали 45 в зависимости от скорости резания.

**Ключевые слова:** дислокационная структура, плотность дислокаций, скорость резания.

E.V. EGORYCHEVA, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: kig@kig.ispu.ru*

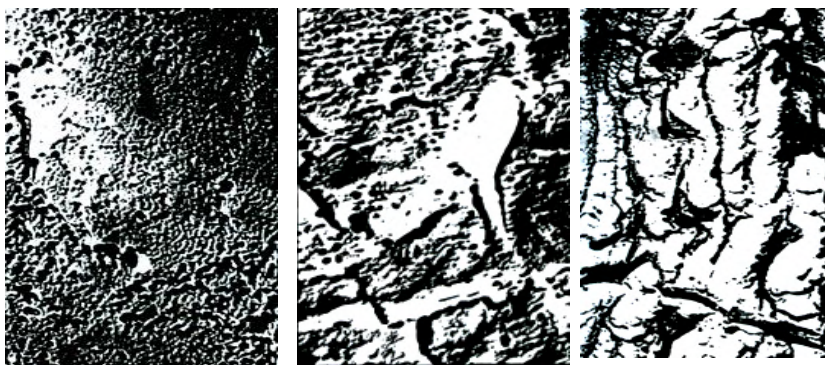
## **The transformation of the substructure of tool in the cutting process**

**Abstract.** The article considers the transformation of the structure of the surface layers of the cutting tool made of steel R6M5, which appear in the process of mechanical processing. Experimental data with respect to a change in the dislocation density, microstresses on the working surfaces of tool after the cutting of steel 45 depending on cutting speed are represented.

**Key words:** dislocatory structure, dislocation density, cutting speed.

В настоящей работе изучалось изменение субструктуры режущего клина инструмента Р6М5 на разных этапах изнашивания в процессе обработки сталей 45, 40Х и 12ХЛ8Н10Т в диапазоне скоростей  $V=10 \dots 80$  м/мин и подач  $S=0,1 \dots 0,3$  мм/об.

Анализ электронографического исследования показал, что развитие субструктуры поверхностного слоя режущего инструмента при данных режимах обработки протекает аналогично. В начале периода приработки под действием деформации происходит инициирование процессов зарождения и движения дислокаций. Наблюдается образование скоплений дислокаций, которые участвуют в формировании малоугловых границ с углом разориентации соседних частей кристалла менее  $10^\circ$  (рис. 1, а).



а) б) в)  
 Рис. 1. Эволюция субструктуры поверхностных слоев инструмента Р6М5 при обработке стали 45 ( $V=10$  м/мин;  $S=0.3$ мм/об)

Малоугловые границы выявляются в виде цепочек ямок травления, каждая из которых соответствует линейному дефекту в дислокационной стенке.

Расстояние между дислокациями в стенке  $D$  определяется:

$$D = b / \Theta, \quad (1)$$

где  $b$ -вектор Бюргерса;  $\Theta$  - угол разориентации частей кристалла.

Процесс образования малоугловых границ связан с аннигиляцией дислокаций в стенках и уменьшением плотности дислокаций. Активное образование и взаимодействие дислокаций, приводит к их торможению и образованию ячеек (рис.1, б), что согласуется с уменьшением размеров блоков когерентного рассеяния и увеличения плотности дислокации в поверхностном слое режущего инструмента, по результатам рентгенографического анализа. Также наблюдается формирование оборванных высокоугловых границ межзеренного типа (рис. 1, в). Образование таких границ связано с увеличением плотности линейных дефектов в дислокационных стенках субструктуры поверхностных слоев инструмента. Это приводит к тому, что дислокации располагаются настолько близко друг к другу, что теряют свою индивидуальность - их ядра сливаются, и происходит увеличение угла разориентации между соседними частями кристалла более  $10^\circ$ .

В период нормального изнашивания в матрице поверхностного слоя происходит образование развитой фрагментированной структуры с высокоугловыми границами межзеренного типа. Трансформация дислокаций структуры наблюдается также и в карбидной фазе инструментального материала. Высокоугловая фрагментированная структура является наиболее износостойкой из-за высокой устойчивости и макси-



мального сопротивления по отношению к деформации из-за следующих факторов:

- наличия большого количества препятствий движению дислокаций в виде сетки высокоугловых границ фрагментов межзеренного типа;
- уменьшения вероятности достижения критического значения плотности линейных дефектов в дислокационной “лавине”, необходимого для вскрытия микротрещины по границе фрагмента межзеренного типа из-за масштабного фактора (размеры фрагмента меньше или равны размерам зерна);
- предотвращения концентрации скоплений дислокаций в локальных субмикрообъемах (у высокоугловых границ фрагментов);
- более равномерного распределения линейных дефектов кристаллической структуры материала.

С формированием высокоугловой фрагментированной структуры в поверхностных слоях режущего инструмента связана минимальная интенсивность износа в период нормального изнашивания. Образование микротрещин по границам фрагментов межзеренного типа приводит на микроуровне к вырыву частиц матрицы, а так же к расколу и вырыву частиц карбидов, на макроуровне - к адгезионному износу режущего инструмента.

Динамическое развитие субструктуры поверхностного слоя режущего инструмента при обработке стали 45 со  $V=60$  м/мин,  $S=0,3$  мм/об, в первую очередь, определяются температурным фактором:

- процесс разупрочнения матрицы поверхностного слоя инструмента;
- полигонизация реализуется посредством диффузионного механизма движения дислокаций, и обусловлен высокой подвижностью линейных дефектов;
- развитие турбулентного скольжения, т. е. движения дислокаций по нескольким плоскостям скольжения в основных фазах поверхностного слоя режущего инструмента, свидетельствует о потере их сдвиговой устойчивости.

Таким образом, на основе анализа экспериментальных данных определены условия образования высокоугловой фрагментированной структуры в режущем клине инструмента из быстрорежущей стали в процессе резания:

$$1) \rho_i < \rho_{фр},$$

где  $\rho_i$  - плотность дислокаций, недостаточная для образования высокоугловых границ;

$$2) Q_i < Q_{фр} < Q_j,$$

где  $Q_i$  - температура, обуславливающая малую подвижность дислокаций;  $Q_j$  - температура, достаточная для обхода препятствий - диффузионное движение;

$$3) N_i < N_{\text{фр}} < N_j,$$

где  $N_i$  – количество препятствий (примесных атомов, сцепленных дислокаций), недостаточное для создания высокоугловых границ;  $N_j$  – количество препятствий, уменьшающих длину свободного пробега дислокаций;

$$4) t_i < t_{\text{фр}},$$

где  $t_i$  – время, нахождения микрообъемов в условиях, необходимых для фрагментации,  $t_{\text{фр}}$  – время, в течении которого происходит фрагментация при выполнении условий 1–3.

#### Литература

1. **Гордиенко Л.К.** Субструктурное упрочнение металлов и сплавов / Л.К. Гордиенко.–М.: Наука, 2005. – 284с.
2. **Ливоров А.В.** Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / А.В. Ливоров.– М.: Новость, 2006. –90с.
3. **Егорычева Е.В.** Трансформация дислокационной структуры инструмента из быстрорежущей стали в процессе резания / Е.В. Егорычева, А.В. Никоноров // Вестник научно-промышленного общества. – 2012. – Вып. 19. – С. 23.
4. **Егорычева Е.В.** Фазовые превращения в режущем клине инструмента в процессе изнашивания / Е.В. Егорычева // Вестник научно-промышленного общества. – 2012. – Вып. 19. – С. 28.

*Егорычева Елена Валерьевна,*  
ФГБОУВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина,  
e-mail: egoryh@mail.ru

УДК 658.52.011.56

В.Н. КОПОСОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: vnkoposov@mail.ru

### **Обоснование требований к автоматизированным системам инструментального обеспечения ГПС**

**Аннотация.** Обоснованы и сформулированы требования к автоматизированным системам инструментального обеспечения гибких производственных систем и разработаны показатели их эффективности.

**Ключевые слова:** гибкая производственная система, автоматизированная система инструментального обеспечения, требования, показатели эффективности.

V.N. KOPOSOV, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: vnkoposov@mail.ru

## Justification requirements for automated systems of tool for FMS

**Abstract.** Grounded and formulated requirements for automated systems instrumental to ensure flexible production systems and developed indicators of their effectiveness.

**Key words:** flexible manufacturing systems, automated tool support, requirements, performance indicators.

Важнейшей подсистемой гибкой производственной системы (ГПС) является автоматизированная система инструментального обеспечения (АСИО). Она оказывает существенное влияние на технологические возможности и эффективность функционирования ГПС. Материальные и эксплуатационные затраты и в итоге эффективность функционирования ГПС и ее подсистем, в том числе и АСИО, в значительной мере зависит от решений, принятых на стадии проектирования. Эти затраты обусловлены не только значительной капиталоемкостью оборудования ГПС и АСИО, но и ощутимыми расходами на проектирование. Важным моментом на стадии проектирования ГПС является формулирование требований, предъявляемых к АСИО. Необоснованное завышение требований приводит к неоправданным дополнительным затратам, а занижение – к низкому качественному уровню проектных решений и низкой эффективности системы. С одной стороны проектировщику необходимо учитывать специфику того производства, для которого проектируется ГПС. С другой стороны, учитывая уровень тех или иных показателей эффективности лучших мировых образцов этих систем, он должен иметь в виду тенденции развития АСИО ГПС. При формулировании требований к АСИО и, как следствие, показателей ее эффективности необходимо учитывать один из принципов системного подхода к проектированию этой системы – принцип непротиворечивости ее показателей эффективности по отношению к показателям эффективности ГПС. Автоматизированная система инструментального обеспечения является подсистемой гибкой производственной системы. А если рассматриваемая система (в данном случае АСИО) является частью (подсистемой) некоторой большой системы (ГПС), то любое ее улучшение будет оправдано только в том случае, когда при этом будет повышаться эффективность большой системы [1]. Принципы системной организации ГПС были сформулированы и обоснованы д.т.н., профессором Наянзиным Н.Г. [2]. Применительно к проектированию АСИО необходимо было установить логические связи между этими принципами системной организации ГПС (как большой системы), соответству-

ющими требованиями к АСИО (как подсистемы этой большой системы) и показателями эффективности, характеризующими выполнение этих требований. Результаты работы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Требования к АСИО ГПС

Принципы системной организации ГПС		Требования к АСИО	Показатели эффективности АСИО
Первый уровень	Второй уровень		
1. Технологическая универсальность	-	Обеспечить требуемый уровень технологической универсальности	Коэффициент технологической универсальности
2. Принцип самоорганизации	Принципы: 2.1. Живучести	Обеспечить живучесть АСИО	Живучесть АСИО
	2.2. Надежности	Обеспечит надежность АСИО	Коэффициент готовности АСИО
	2.3. Самовосстановления	Придать АСИО свойства самодиагностики и самовосстановления отказавших элементов	Наличие и количество средств диагностики состояния режущих инструментов и элементов АСИО
	2.4. Эволюционно-адаптивного проектирования	Обеспечить: - возможность независимой отладки и пуска элементов АСИО; - ступенчатого наращивания элементов АСИО; - замену морально устаревшего и физически изношенного оборудования без прерывания работы других элементов АСИО	Наличие возможности: - независимой отладки и пуска элементов АСИО; - ступенчатого наращивания элементов АСИО; - замены морально устаревшего и физически изношенного оборудования без прерывания работы других элементов АСИО
3. Техно-экономические принципы	Принципы: 3.1. Интенсификации технологических процессов	Обеспечить минимум цикловых потерь времени, связанных с работой режущих инструментов	Величина цикловых потерь времени, связанных с работой режущих инструментов
	3.2. Непрерывности технологических процессов	Обеспечить минимум внецикловых потерь времени, связанных с работой режущих инструментов	Величина внецикловых потерь времени, связанных с работой режущих инструментов. Величина потерь времени при переналадке магазинокомплектов инструментов

Окончание табл. 1

3.Технико-экономические принципы	3.3. Экономии материальных, трудовых, энергетических и др. ресурсов	Обеспечить минимум материальных, трудовых, энергетических и др. ресурсов АСИО	Величина годовых затрат на инструментальное обеспечение ГПС
	3.4. Компактности конструктивно-компоновочного оформления	Обеспечить: - минимум занимаемой элементами АСИО площади; -требуемый уровень интеграции выполнения функции АСИО	Величина занимаемой элементами АСИО площади. Коэффициент интеграции выполнения функций
	3.5. «Безлюдности»	Обеспечить: - минимум обслуживающего персонала АСИО; - максимум уровня автоматизации АСИО	Число операторов инструментального обеспечения ГПС Коэффициент автоматизации выполнения функций
	3.6. Технологичности	Обеспечить технологичность изготовления нестандартного оборудования и сборки элементов АСИО	Технологичность изготовления нестандартного оборудования и сборки элементов АСИО
	3.7. Стандартизации и унификации	Обеспечить выполнение требований стандартизации и унификации элементов АСИО	Уровень стандартизации и унификации элементов АСИО

Для расчета количественных показателей эффективности разработаны соответствующие математические зависимости.

Качественные показатели (возможность ступенчатого наращивания элементов АСИО, технологичность изготовления нестандартного оборудования и сборки элементов АСИО и др.) определяются экспертным путем.

Использование обоснованных требований и показателей эффективности позволит проектировать конкурентоспособные АСИО ГПС.

#### Литература

1. **Чумаков Н.М.** Оценка эффективности сложных технических устройств / Н.М. Чумаков, Е.И. Серебряный. – М.: Сов. радио, 1980. – 192 с.
2. **Наянзин Н.Г.** Поисковое проектирование гибких производственных систем / Н.Г. Наянзин. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 76 с.

*Копосов Виктор Николаевич,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: [vnkoposov@mail.ru](mailto:vnkoposov@mail.ru)

УДК 669.058

В.В. КИСЕЛЕВ, к.т.н., доцент, А.В. ТОПОРОВ, к.т.н., ст. преподаватель  
С.А. НИКИТИНА, к.т.н., доцент, П.В. ПУЧКОВ, к.т.н., ст. преподаватель  
А.А. ПОКРОВСКИЙ, к.т.н., доцент В.П. ЗАРУБИН, к.т.н., доцент,  
И.А. ЛЕГКОВА, к.т.н., доцент

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России  
153040, адрес: г. Иваново, пр. Строителей, 33  
*e-mail: palpuch@mail.ru*

## **Повышение качественных характеристик моторных масел за счет введения присадок**

**Аннотация.** В статье описана разработанная противоизносная присадка к моторным маслам, содержащая соли мягких металлов. Показаны триботехнические показатели разработанной смазки. Указана возможная область внедрения смазочной композиции.

**Ключевые слова:** пожарная техника, безизносное трение, смазочная композиция.

KISELEV V.V., TOPOROV A.V., NIKITINA S.A.,  
PUCHKOV P.V., POKROVSKIY A.A.,  
ZARUBIN V.P., LEGKOVA I.A.

(IFRA of SFS of EMERCOM of Russia)  
*e-mail: palpuch@mail.ru*

## **Improving the quality characteristics of motor oils by introducing additives**

**Abstract.** The article describes the developed antiwear additive for engine oils, salts containing soft metals. Recently developed tribological performance lubricant. Contains the possible area of implementation of the lubricant composition.

**Keywords:** Fire equipment, wearless friction, lubricating composition.

Автомобильная техника подвержена негативным воздействиям ряда факторов. Это и неустановившийся режим работы, и реверс, и вибрации, и возможность попадания абразивных частиц в зону контакта трущихся поверхностей, и разнообразие внешних условий эксплуатации, вызванное как переменными нагрузками, так и изменениями в окружающей среде, – все это приводит к существенному повышению интенсивности изнашивания трущихся поверхностей деталей машин.

Для снижения износа деталей машин требуется использование качественных смазочных материалов или улучшение имеющихся смазок введением в них различных добавок. Некоторые добавки способны приводить к созданию в зоне трения металлических пленок. В ряде работ отмечается, что образование таких пленок во всех случаях приводит к повышению износостойкости узлов трения, а иногда и к прояв-

лению безызносности. Достигаемое повышение износостойкости может быть объяснено осуществлением в зоне трения явления избирательно-го переноса. Авторами проводится активная работа по созданию противоизносных присадок, содержащих в своей основе соли мягких металлов. Ранее была разработана и испытана присадка «Смазочная композиция» [1] на основе солей меди и олова предельных жирных кислот. Присадка предназначена для промышленных масел общего назначения и трансмиссионных масел. Действие указанной присадки описано в работах [2].

В данной работе приводим триботехнические показатели новой смазочной композиции на основе солей никеля, олова, меди и кобальта. Указанные металлические компоненты находятся в смазке в ионном виде и способны проходить через системы фильтров. Смазочная композиция предназначена для качественного улучшения триботехнических показателей минеральных и полусинтетических масел и смазок любой вязкости, применяемых в технике любого назначения. Для оценки и сравнения разработанных присадок были исследованы зависимость коэффициента трения от приложенной нагрузки, зависимость интенсивности изнашивания от пробега при фиксированной нагрузке и коррозионная активность разработанной смазочной композиции. Эти характеристики определяют границы работоспособности пары трения. Стойкость материалов к изнашиванию в различных средах и при различных режимах трения позволяют выявить ресурс и срок службы узлов трения.

Измерение линейного износа проводили методом «искусственных баз» по заранее нанесенным отпечаткам на твердомере ТКС - 1 М коническим твердосплавным индентором с углом при вершине  $120^\circ$ . Диаметры отпечатков определялись с помощью микроскопа МБС - 10.

Коррозионная активность масла с присадкой определялась согласно ГОСТа 20502–75. Сущность метода заключается в определении изменения массы металлических пластин, подвергшихся периодическому воздействию испытываемого объекта и воздуха, нагретых до температуры  $140^\circ\text{C}$ . Коррозионность определялась на приборе аналогичном ДК – НАМИ по ГОСТ 13371–67.

Коррозионность масла определяли без добавления катализатора. Испытания проводили в течение 10 часов при нормативной температуре ( $80\text{--}90^\circ\text{C}$ ) и непрерывном вращении мешалки. Пластины свинца толщиной 1 мм маркировали, протирали ватой, смоченной бензолом, просушивали 1–3 минуты и полировали до блеска и взвешивали с погрешностью не более 0,0002 г. Математическая обработка экспериментов показала, что оптимальным содержанием присадки в масле является 2 мас.%, что и было заложено в следующую серию исследований. Вводимая 2% концентрация разработанной присадки в моторные масла позволила качественно улучшить его основные триботехнические характеристики (рис. 1–2).

Можно заметить на представленном рис. 1, что модифицированное масло позволило значительно (1,5–2 раза) снизить коэффициент трения. Кроме этого в некоторой степени увеличился и показатель нагрузочной способности в контактирующей паре. Такие результаты были получены, благодаря образованию на поверхности трения химически чистых, постоянно возобновляемых слоев антифрикционных металлов, а именно меди, олова, никеля и кобальта. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что при модифицировании базового моторного масла М8В разработанной присадкой интенсивность изнашивания значительно снижается с увеличением пробега контактирующей пары, а именно до 10 раз.

Испытания на коррозионную активность разработанной смазочной композиции показали, что потери массы пластин в масле с разработанным стеаратом составили от 0,88 до 0,99 г/м<sup>2</sup>, что согласно ГОСТа 20502–75 соответствует отсутствию коррозионного воздействия данной присадки на испытуемое масло.

Отмечаем и тот факт, что моторное масло, модифицированное разработанным стеаратами меди, олова, кобальта и никеля гораздо стабильнее работает во всем диапазоне изученных нами нагрузок и температур, что не наблюдается в моторном масле без присадки.

Поэтому разработанная присадка позволяет в достаточной мере избежать эффекта повышенного износа во время прогрева двигателя. Применение прогрессивных смазочных материалов позволит добиться значительных положительных результатов, а именно продлить ресурс работы узлов автотранспортной техники до 2 раз, резко снизить аварийные разрушения оборудования, сократить затраты на внеплановые ремонты оборудования, сэкономить горюче-смазочные материалы.

Разработанная присадка химически нейтральна ко всем видам минеральных и полусинтетических масел отечественного и импортного производства. Присадка полностью растворима маслами, не задерживается системами фильтров, не способствует коррозионным процессам. Присадка может найти широкий круг применения. Выявленные в ходе экспериментов некоторые качественные показатели, значительно превосходят показатели других аналогичных присадок. Не последним достоинством присадки является простота в применении и относительно низкая стоимость в изготовлении.



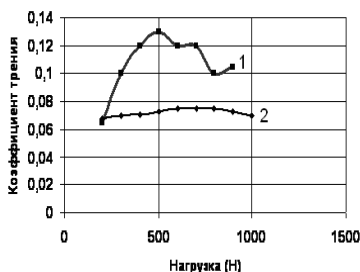


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от давления базового масла М8В и того же масла, модифицированного разработанной присадкой:  
 1 – моторной масло М8В ГОСТ 10541-78 SAE 20W-20 API CB;  
 2 – моторное масло М8В с 2 % разработанной присадкой

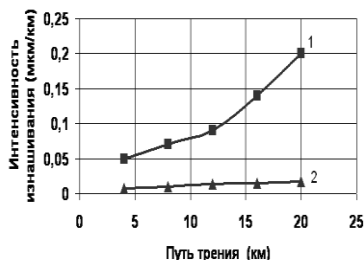


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания от пути трения при постоянной давлении 5 (МПа);  
 1 – моторной масло М8В ГОСТ 10541-78 SAE 20W-20 API CB;  
 2 – моторное масло М8В с 2 % разработанной присадкой

### Литература

1. Киселев В.В., Мельников В.Г. Исследование свойств разработанных присадок на основе солей мягких металлов.// Эффект безызносности и триботехнологии. – 2004. – №1. – С. 16 – 20.
2. Киселев В.В. К проблеме улучшения триботехнических свойств смазочных материалов.// Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2006. – Т.49. – № 12. – С.113 -114.УДК 621.787.

*Киселев Вячеслав Валериевич,*  
 ФГБОУВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
*Топоров Алексей Валериевич*  
 ФГБОУВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России  
*Никитина Светлана Александровна,*  
 ФГБОУВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
*Пучков Павел Владимирович*  
 ФГБОУВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
 e-mail: palpuch@mail.ru  
*Покровский Аркадий Алексеевич*  
 ФГБОУВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
*Зарубин Василий Павлович,*  
 ФГБОУВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
 e-mail: palpuch@mail.ru  
*Легкова Ирина Анатольевна*  
 ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России.  
 e-mail: palpuch@mail.ru

УДК 621.058

М.Ю. ВОЛКОВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: kig@kig.ispu.ru*

## **Исследование отражательной способности поверхностей из металла**

**Аннотация.** Работа посвящена изучению проблем, связанных с восприятием и оценкой отражательной способности поверхностей из металла. В работе рассматриваются вопросы повышения эффективности финишной обработки и оценке блеска поверхности.

**Ключевые слова:** отражательная способность, шероховатость поверхности.

M. Y. VOLKOVA, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: margaret\_wolf@mail.ru*

## **Metal surfaces reflectivity research**

**Annotation.** The article studies the problems associated with the perception and evaluation of metal surfaces reflectivity. It deals with questions of improving the efficiency of finishing process and evaluation of surface gloss.

**Key words:** reflectivity, surface roughness

Отражательная способность металлической поверхности обусловлена тем, что падающий на поверхность металла свет не рассеивается равномерно по всем направлениям, как в случае матовых поверхностей, а отражается под углом, равным углу падения. Чем меньше света рассеивает поверхность и чем больше его отражается, тем более блестящей становится поверхность.

Различные способы отделки поверхности позволяют за счет уплотнения и выглаживания верхних слоев металла добиться не только увеличения прочностных характеристик, но и блеска изделия. Непосредственным результатом полирования является уменьшение толщины внешнего деформированного слоя металла вследствие изменения микрогеометрии поверхности и возникновение блеска. Полирование оказывает влияние на те свойства металла, которые связаны с состоянием его поверхности. Эффективность влияния полирования на свойства металла зависит от природы полируемого металла или сплава, его химического состава, кристаллической структуры и механической обработки. Полирование оказывает заметное влияние на твердость, прочность металла. Процессы финишной абразивной обработки, относящиеся к низкотемпературным и малоотходным, позволяют при минималь-

ном съеме материала заготовки управлять микрометрическими и физическими показателями поверхностных слоев деталей. Оптические системы позволяют контролировать шероховатость поверхности и уровень её отражательной способности. Это обеспечивается зависимостью интенсивности рассеивания света при отражении его от микронеровностей поверхности

Для изучения отражения использовались образцы после шлифовки на стеклянных вращающихся дисках (шлифованных) последовательно различными номерами пасты ГОИ и полировки сначала на суконном, затем на замшевом и бархатном вращающихся дисках с применением в качестве абразива окиси хрома или окиси алюминия. Измерения производились на кварцевом фотоэлектрическом спектрофотометре с помощью специально сконструированной для этой цели насадки, позволяющей измерять абсолютным методом коэффициенты отражения при угле падения лучей в  $45^\circ$ . Хотя угол падения лучей на поверхность образца при исследовании под микроскопом близок к нормальному, однако опыты показали, что при изменении угла падения от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  коэффициент отражения металлов изменяется приблизительно на 1%, что фактически находится в пределах погрешности измерения (2–3 %). Абсолютно гладкая поверхность, не имеющая дефектов хорошо и однородно отражает падающий свет и имеет высокую отражательную способность. При визуальном осмотре отмечено, что она сильно отражает или очень блестит. Если смотреть через лупу или под микроскопом на поверхность не отполированного изделия (рис.1, а), то отмечено, что она "поцарапана" и имеет полосы, которые идут во всех направлениях. Поверхность, обработанная абразивной шкуркой (рис. 1,б) вся в полосах. Это можно почувствовать даже прикоснувшись пальцами. Эти недостатки поверхности отражают падающий свет в различных направлениях, поэтому поверхность кажется не отражающей, то есть без блеска и света.

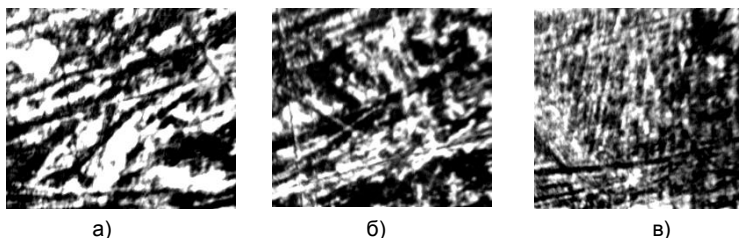


Рис. 1. Образцы под микроскопом:

а – поверхность не отполированного изделия; б – поверхность обработанная абразивной шкуркой; в – поверхность после полирования без съема металла

Выявлено, что полирование без съема металла в конце обработки уменьшает шероховатость и увеличивает микротвердость по-

верхности изделия (рис. 1, в). Для получения перехода от активного резания к полированию – смятию без съема металла – целесообразно выполнять, в первую очередь, центробежно-ротационную обработку, а затем магнитно-абразивное полирование и галтовку.

При исследовании в отраженном свете четкое изображение получается только при полном отражении световых лучей от хорошо полированной зеркальной поверхности. В случае некачественной полировки падающий свет рассеивается шероховатостями поверхности и разрешающая способность микроскопа резко снижается. Неправильное шлифование сильно искажает структуру металла и может привести к ошибкам при металлографическом анализе. При использовании ультрафиолетовых лучей, имеющих меньшую длину волны, влияние шероховатостей поверхности шлифа возрастает.

При шлифовке образца необходим последовательный переход от грубой отделки к тонкой, чтобы не допустить так называемой ложной шлифовки. Иначе говоря, отражательная способность или блеск поверхности определяется соотношением между интенсивностью зеркально-отраженного и диффузно рассеянного света.

Поэтому блеск поверхности может быть охарактеризован следующим уравнением:

$$B = I_o / I_o + I_p = I_o / I_c$$

где  $I_o$  – интенсивность зеркально-отраженного света;  $I_p$  – интенсивность диффузно рассеянного света;  $B$  – блеск поверхности;  $I_c = I_o + I_p$  – суммарная интенсивность светового луча.

В случае идеально зеркальной поверхности это отношение  $I_o / I_c = 1$ , так как  $I_p = 0$ . Чем больше блеск поверхности, тем ближе к единице отношение  $I_o / I_c$ . Измерение интенсивности зеркально-отраженного света для характеристики степени блеска металлической поверхности применяется чаще других методов. Зеркально-отраженный свет при измерении улавливается либо оптическим прибором – фотометром (фотометрический метод), либо фотоэлектрическим прибором – фотоэлементом (фотоэлектрический метод). Указанный способ определения блеска поверхности применяется только для плоских поверхностей и для поверхностей с очень малой кривизной.

Блеск оценивался качественно следующим образом:

- а) зеркальный – резкость изображения рисунка на поверхности соответствует изображению на зеркале;
- б) блестящий – резкое изображение рисунка на поверхности, но верхний конец изображения несколько размыт;
- в) полублестящий – изображение рисунка заметное, но не резкое;
- г) матовый – изображение рисунка сильно размыто и заметно лишь на ближней к рисунку части образца;
- д) глубокоматовый – изображение предмета отсутствует.

Для установления блеска берется результат из трех независимых определений. В условиях отсутствия приборов для определения блеска покрытий можно также использовать визуальный метод сравнения с эталонами.

Для исследований по оценке блеска были изготовлены эталоны от совершенно матового до зеркально-блестящего. Величина блеска исследуемого образца определялась номером эталона.

Проведены эксперименты, направленные на изучение влияния последовательности технологических операций на качество отражательной способности поверхности.

#### Литература

**1. Волкова М.Ю.** Исследование влияния отделки изделия на формообразование поверхности изделий малой пластики // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2011 г., том 3, (С. 288-291).

**2. Волкова М.Ю., Егорычева Е.В.** Влияние качества обработки поверхностей деталей на продление срока службы промышленных изделий // Современные проблемы теории машин. II международная заочная научно-практическая конференция, 20 июня 2014 г., г. Новокузнецк: материалы конференции. – Новокузнецк: Издательский центр "СибГИУ". - 2014. - №2. - С. 138–140.

*Волкова Маргарита Юрьевна,*  
ФГБОУВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина,  
E-mail: margaret\_wolf@mail.ru

УДК 621.7.06

А.М. ВЛАСОВ, аспирант,  
А.А. ГОЛЯС студент,  
В.А. ПОЛЕТАЕВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

### Применение программы ANSYS для теплового анализа магнитожидкостного герметизатора

**Аннотация.** Рассмотрен процесс охлаждения магнитно-жидкостного уплотнения, выполненный в среде программы ANSYS.

**Ключевые слова:** температура, программа ANSYS, охлаждение, магнитожидкостное уплотнение.

A.M. VLASOV, graduate,  
V.A. POLETAEV, Doctor of engineering, professor,  
A.A. GOLYAS, student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

## The application of ANSYS software for the thermal analysis of magnetic fluid seals

**Abstract.** The process of cooling the magnetic liquid seal realized in the framework of the program ANSYS.

**Keywords:** temperature, the program ANSYS, cooling, magnetic fluid seal.

Программа ANSYS – это гибкое, надежное средство проектирования и анализа. Каждая ее версия включает новые и расширяет прежние возможности пакета, что делает программу быстродействующей, более гибкой и удобной. Эти ее качества помогают пользователям справиться с непрерывно возрастающими запросами современного промышленного производства.

Для исследования влияния величины температуры на момент трения в рабочем зазоре магнитожидкостного устройства была спроектирована и изготовлена установка с радиальным магнитожидкостным уплотнением. В процессе работы уплотнение нагревается до 60 °С. Для решения задачи распределения температуры приняты условия: начальная температура нагрева уплотнения 60 °С; температура окружающей среды 22 °С; время охлаждения 30 минут.

Порядок действий:

1. Запустить *ANSYS Workbench*.
2. Выбрать тип решателя. Добавить в рабочую область проекта блок *TransientThermal*.
3. В *EngineeringData* из базы данных материалов добавить в расчёт необходимые данные.
4. Загрузить геометрической моделью уплотнения, заранее созданную в CAD системе «КОМПАС 3D» (рис. 1). Загруженная геометрическая модель представлена на рис. 2.
5. Зайти в *Geometry* и выбрать для каждой детали сборки тип элемента *Fluid* (жидкий) или *Solid* (твердый) (рис. 3).
6. Приступить к созданию конечно-элементной модели. Зайти в ячейку *Model*. Откроется приложение *Mechanical*. Выбрать ветку *Geometry – Solid* и завести данные по материалам деталей. Далее через ветку *Mesh* задать параметры конечно-элементной модели. Затем вызвать контекстное меню ветки *Mesh* и пункт *GenerateMesh* (Создать сетку) (рис. 4). При этом будет создана конечно-элементная модель уплотнения (рис. 5).

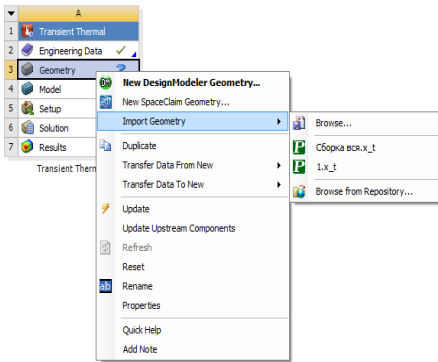


Рис. 1. Добавление расчетной CAD модели

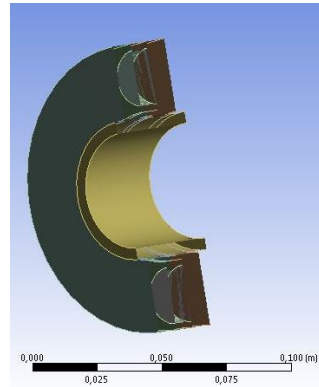


Рис. 2. Геометрическая модель уплотнения

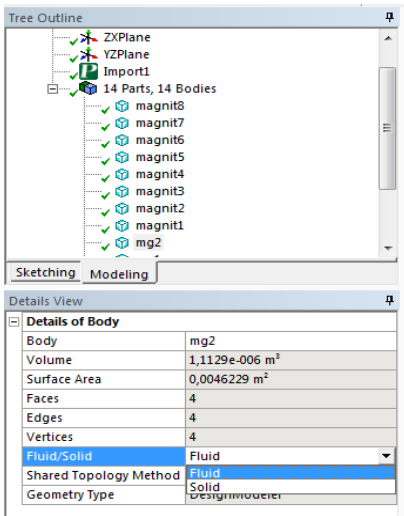


Рис. 3. Выбор типа элемента

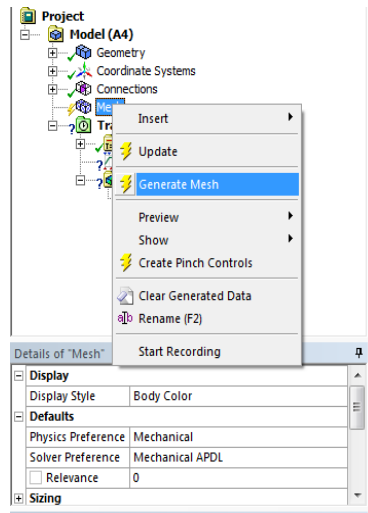


Рис. 4. Генерирование конечно-элементной сетки

7. Далее задать начальные условия для расчета. В *InitialTemperature* установить начальную температуру уплотнения равной 60°C (рис. 6,..... а).

8. Затем в *AnalysisSettings* определить последовательность расчета. В свойствах *AnalysisSettings* отключить автоматический выбор шага расчета (*AutoTimeStepping*), а время окончания расчета установить в 1800 с; шаг расчета 180 с (рис. 6, б).

9. Далее задать параметры теплообмена уплотнения с окружающей средой. Добавить тепловое воздействие типа конвекция (*Convection*). В свойстве *Geometry* ветки *Convection* определить область уплотнения, на которое происходит тепловое воздействие. Также задать температуру окружающей среды 22 °C и коэффициент теплопередачи (*FilmCoefficient*).

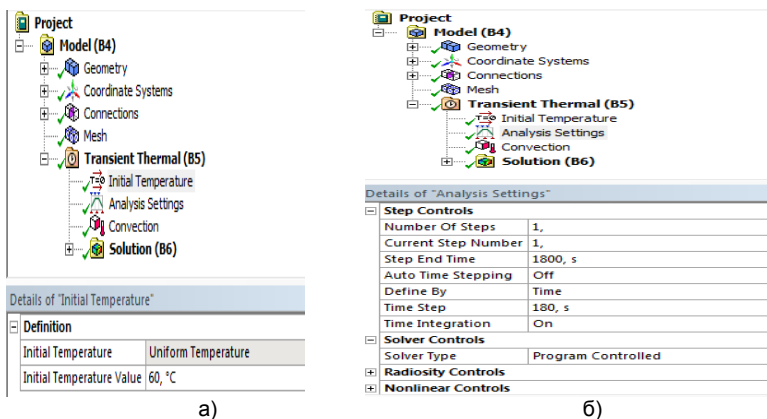


Рис. 6. Задание условий моделирования:  
а) начальная температура; б) условия моделирования

10. В *Solution* добавить расчетный параметр *Temperature* (температура) и выбрать *Solve* с целью начала расчета задачи.

11. После вычисления получен результат (рис.7).

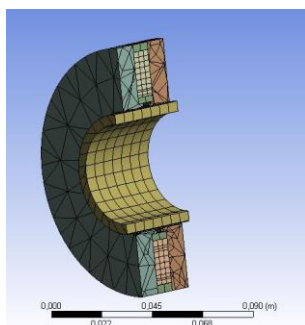


Рис. 5. Конечно-элементная модель уплотнения

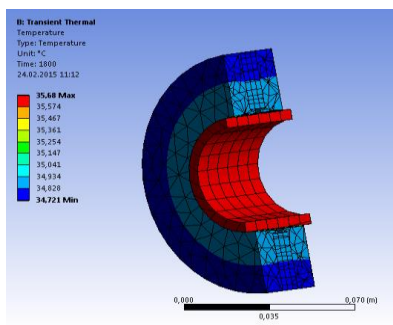


Рис. 7. Температурное поле



### Литература

1. Полетаев В.А. Пахолкова Т.А., Власов А.М. Установка для исследования величины рабочего зазора на момент трения магнитожидкостных устройств // Трение и смазка в машинах и механизмах. – Москва. – М.: «Машиностроение». – 2013. – № 9. – С. 29– 31.УДК 621.7.06

*Власов Алексей Михайлович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

*Полетаев Владимир Алексеевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

*Голяс Антон Андреевич*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

УДК 621.058

А.В. НИКОНОРОВ, к.т.н., доцент

Е.В. ЕГОРЫЧЕВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

*E-mail: kig@kig.ispu.ru*

### Роль структуры инструментального материала в процессе изнашивания твердосплавного режущего инструмента

**Аннотация.** Представлена физическая модель изнашивания режущего инструмента из твердого сплава при обработке стали. Описаны процессы в кобальтовой связке и карбидной составляющей инструментального материала. Обоснована необходимость упрочнения в первую очередь кобальтовой связки.

**Ключевые слова:** твердый сплав, резание, упрочнение.

A.V. NIKONOROV, Candidate of Engineering, docent

E.V. EGORICHEVA, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University

153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34.

*E-mail:453954@gmail.com, egorich@mail.ru*

### The role of the structure of the tool material in the process of wear of carbide cutting tools

**Abstract.** Presents the physical model of the wear of cutting tools from solid carbide for machining steel. Described processes in cobalt binder and the carbide component of the tool material. The necessity of hardening primarily of cobalt binder.

**Key words:** hard alloy, cutting, hardening.

При проектировании составов новых инструментальных материалов и разработке методов предварительного упрочнения необходимо иметь точное представление о процессе изнашивания инструмента

при резании. В настоящее время не существует единого подхода к описанию процесса разрушения твердого сплава при изнашивании режущего инструмента. Остается невыясненным и вопрос о влиянии отдельных элементов структуры инструментального материала на механизм изнашивания и стойкость инструмента.

В данной статье представлены результаты исследования процесса изнашивания твердых сплавов групп ТК и ВК при обработке углеродистых сталей в диапазоне скоростей резания 20-750 м/мин. Исследования выполнены с использованием растровой и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного и микродифракционного анализом. Многокомпонентное строение твердого сплава, обуславливает требование оценки удельного вклада элементов структуры в суммарный механизм разрушения инструментального материала. Вид разрушения элементов структуры исследовался методами количественной фракталграфии.

При принятых условиях резания и геометрии режущего инструмента, максимум стойкости располагается в диапазоне скоростей резания 50-60 м/мин. Для выяснения причин изнашивания контактной поверхности производились исследования качественных и количественных характеристик субмикроструктуры карбидных фаз и кобальтовой связки твердого сплава:

- плотности дислокаций  $\rho$ ;
- размера и угла разориентации блоков когерентного рассеяния  $d$  и  $\Theta$ ;
- микродеформаций кристаллической решетки  $\varepsilon$ .

Установлено, что на скоростях резания восходящей ветви стойкостной зависимости, субструктура всех фаз инструментального материала характеризуется высокой плотностью дефектов кристаллического строения и хаотическим распределением дислокаций.

В объеме кобальтовой фазы обнаружены локальные скопления дислокаций. Плотность дислокаций в них значительно выше средней и достигает значений  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

Локальные скопления дислокаций в кобальтовой фазе служат источником зарождения дислокационных субмикротрещин. Разрушение инструментального материала происходит вследствие слияния субмикротрещин в микротрещину в объеме кобальтовой связки, что приводит к вырыву карбидного зерна или блока зерен. В диапазоне скоростей резания, близких к оптимуму стойкостной зависимости "Т-V", наблюдается постепенное развитие блочной субструктуры в кобальтовой связке. Формирование блоков связано с механизмом поперечного скольжения дислокаций, образованием дислокационных стенок и постепенным ростом плотности дислокаций в стенках. Повышение числа дислокаций в стенке на единицу ее длины обуславливает увеличение угла разориентации блоков кристаллитов до 6-10°. Границы блоков кристаллитов, разориентированные на угол более 8°, практически исключают прохождение дислокаций из внутреннего объема блока через его границу. Гене-

рируемые под действием контактных нагрузок дислокации расходятся на построение новых дислокационных стенок и увеличение угла разориентации блоков.

Результатом описанного выше процесса, является формирование в связке мелкоблочной ( $d=250$  нм) и разориентированной ( $\Theta=8.8^\circ$ ) структуры. Малый размер блоков кристаллитов препятствует формированию длинных очередей дислокаций и, как следствие, слиянию дислокаций в субмикротрещину.

Дислокационная структура карбидной фазы в диапазоне скоростей резания, соответствующих максимальной стойкости режущего инструмента, характеризуется средним размером блока кристаллита 25-30 нм и углом разориентации блоков около  $10^\circ$ . На участках поверхности контакта, имеющих развитую дислокационную субструктуру, разрушение карбидной фазы происходит вследствие микроскола частиц, размер которых сравним с размером блока кристаллита (30-40 нм). Разрушение кобальтовой связки наблюдается на участках, свободных от дислокационных стенок, обычно у границ зерен карбидной фазы. Разрушение происходит вследствие образования дислокационной трещины или поры по границе MeC-Co.

Для скоростей резания, незначительно превышающих оптимальные, характерно развитие диффузионных процессов по границам зерен карбидных фаз. Дислокационная субструктура состоит из оборванных дислокационных стенок и хаотически распределенных дислокаций. Вследствие интенсивного поперечного скольжения дислокаций, в связке не формируется развитая субструктура. Изнашивание поверхности контакта сопровождается образованием дислокационных и диффузионных пор на границах зерен карбидов, в результате происходит разрушение материала по границам MeC-Co.

Зерна карбидной фазы имеют средний размер блоков кристаллитов равный 75 нм при угле разориентации около  $6^\circ$ . Обнаружены скопления дислокаций в виде широких полос. В большинстве зерен WC наблюдаются разные стадии деформации по одной и двум плоскостям скольжения.

В диапазоне скоростей резания 250-450 м/мин, изнашивание сопровождается диффузией кобальта в обрабатываемый и железа в инструментальный материал. Разрушение поверхности контакта происходит вследствие среза групп зерен (250 м/мин), либо слоя зерен карбидной фазы (до 450 м/мин).

Для скоростей резания 450-750 м/мин характерна дислокационная структура, близкая к исходному инструментальному материалу. Распределение дислокаций - хаотическое, формирования дислокационных стенок и границ не наблюдалось.

Как показали проведенные исследования, варьирование условий (скорости) резания, приводит к изменению проявлений изнашивания по-

верхности контакта. Причем эти изменения могут быть разбиты на два вида:

- изменения относительной интенсивности разрушения по компонентам твердого сплава;
- изменения механизма изнашивания сплава в целом.

На основе предложенной классификации изменений, построены модели изнашивания твердосплавного инструментального материала двух различных типов:

- модели механизмов изнашивания элементов структуры твердого сплава;
- модели изнашивания сплава в целом, в данных условиях резания.

На основании определения вклада разрушения элементов структуры инструментального материала при изнашивании, аргументирован выбор компонент твердого сплава, лимитирующих стойкость режущего инструмента в зависимости от скорости резания. Стойкость инструмента в диапазоне скоростей резания 20-250 м/мин определяется процессами, протекающими в кобальтовой связке. Время, в течение которого кобальтовая связка в состоянии удерживать карбидное зерно на поверхности контакта, определяет вклад карбидной фазы в суммарную стойкость инструмента.

#### Литература

1. **Егорычева Е.В.** Трансформация дислокационной структуры инструмента из быстрорежущей стали в процессе резания / Е.В. Егорычева, А.В. Никоноров // Вестник научно-промышленного общества. – 2012. – Вып. 19. – С. 23.

*Егорычева Елена Валерьевна,*

ФГБОУВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина,  
e-mail: egoryh@mail.ru

*Никоноров Алексей Владимирович,*

ФГБОУВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина,

УДК 658.52.011.56

В.Н. КОПОСОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: vnkoposov@mail.ru

### **Оценка надежности автоматизированных систем инструментального обеспечения ГПС**

**Аннотация.** Приведена методика оценки надежности автоматизированных систем инструментального обеспечения ГПС.

**Ключевые слова:** гибкая производственная система, автоматизированная система инструментального обеспечения, надежность, коэффициент готовности.

V.N. KOPOSOV, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: vnkoposov@mail.ru

## Evaluation of reliability of automated systems of tool for FMS

**Abstract.** Method of evaluating the reliability of automated systems of tool for FMS.

**Key words:** flexible manufacturing systems, automated tool support, reliability, and availability.

При проектировании гибких производственных систем (ГПС) и отдельных ее подсистем необходима количественная оценка уровня их надежности. Отсутствие этой оценки может привести к созданию неэффективной системы.

Одной из важнейших подсистем ГПС является автоматизированная система инструментального обеспечения (АСИО). Проектирование АСИО как подсистемы ГПС также требует оценки ее надежности.

На этапе проектирования для оценки надежности элементов (подсистем) и системы в целом целесообразно использовать коэффициент готовности (коэффициент технического использования). Подобным образом поступают многие фирмы, проектирующие станочные системы. Применительно к АСИО коэффициент готовности  $K_G$  в общем виде определится:

$$K_G = \frac{T_p}{T_p + T_{нпл1} + T_{нпл2}}, \quad (1)$$

где  $T_p$  – время работы АСИО за период эксплуатации ГПС;  $T_{нпл1}$  – время на обнаружение, поиск причины и непланового ремонта по устранению отказов устройств АСИО;  $T_{нпл2}$  – время на обнаружение и замену отказавших режущих инструментов.

Разделив числитель и знаменатель в правой части уравнения (1) на  $T_p$ , получим:

$$K_G = \frac{1}{1 + K_{нпл1} + K_{нпл2}}, \quad (2)$$

где  $K_{нпл1}$  – удельная длительность восстановления (устранения отказов) элементов АСИО;  $K_{нпл2}$  – удельная длительность замены отказавших инструментов.

Для определения численных значений  $K_{нпл1}$  и  $K_{нпл2}$  необходимы данные статистических исследований (наблюдений) за работой элементов АСИО и режущих инструментов. Для примера приведена часть данных статистических наблюдений за работой устройств автоматической смены инструментов (УАСИ) станков типа «обрабатывающий центр» (ОЦ) моделей ИР320ПМФ4, ИР500ПМФ4 и ИР800ПМФ4, произ-

веденных специалистами Ивановского станкостроительного производственного объединения имени 50-летия СССР (табл. 1).

Таблица 1. Данные по простоям станков типа «обрабатывающий центр» моделей ИР320ПМФ4, ИР500ПМФ4 и ИР800ПМФ4 по причине выхода из строя механизмов УАСИ

Наименование механизма УАСИ	Причина отказа	Число отказов	Суммарное время восстановления, ч.	Число отказавших станков
1. Манипулятор	Сломался сухарь	1	20	1
2. Манипулятор	Пробило манжету гидроцилиндра	1	6	1
3. Механизм зажима инструмента шпиндельного устройства	Износ тарельчатых пружин	4	99	3
4. Механизм зажима инструмента шпиндельного устройства	Вышла из строя цанга	1	36	1
5. Механизм зажима инструмента шпиндельного устройства	Сломались кулачки	1	2,5	1
6. Инструментальный магазин	Магазин не выходит в позицию	1	8	1

Примечание: общее количество исследованных станков – 5; наработка каждого станка – 8300 ч.

При определении удельной длительности восстановления нескольких станков использовались рекомендации специалистов экспериментального научно-исследовательского института металлорежущих станков. Для УАСИ нескольких станков:

$$K_{\text{нпл1}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{\text{вi}}}{\sum_{j=1}^N t_j}. \quad (3)$$

Числитель формулы (3) представляет собой суммарное время на обнаружение, поиск причины и устранение последствий  $m$  отказов (сбоев) механизмов УАСИ. А знаменатель этой формулы – суммарную наработку  $N$  станков за время наблюдений.

Для данных, приведенных в табл. 1, удельная длительность восстановления устройств автоматической смены инструментов  $K_{\text{нпл1}} = 171,5 / (5 \cdot 8300) = 0,004$ . В табл. 2 сведены результаты расчета  $K_{\text{нпл1}}$  для разных периодов наблюдений за работой станков типа «обрабатывающий центр» моделей ИР320ПМФ4, ИР500ПМФ4 и ИР800ПМФ4. Приведенные величины  $K_{\text{нпл1}}$  могут служить ориентиром при определе-

нии  $K_G$  для устройств автоматической смены инструментов станков ГПС. С накоплением опыта эксплуатации станков и ГПС в целом необходимо уточнять эти величины для различных моделей станков, а также значения  $K_G$  для других устройств АСИО.

**Таблица 2. Значения удельной длительности восстановления механизмов УАСИ станков типа ОЦ моделей ИР320ПМФ4, ИР500ПМФ4 и ИР800ПМФ4**

Длительность обследования	Наработка каждого станка, ч	Число обследованных станков	Суммарное время восстановления механизмов УАСИ, ч	Удельная длительность восстановления УАСИ
2 года	8300	5	171,5	0,004
2 года	8300	11	618	0,007
0,5 года	2052	6	19,5	0,002
3 месяца	1000	5	20	0,004

Ниже приведены расчетные формулы для определения коэффициента готовности  $K_{G(\text{АСИО})}$  в целом для АСИО. Они получены на основе использования средств теории вероятностей. Для других АСИО формулы могут быть получены по аналогии.

Для ГПС, в которой каждый станок оснащен УАСИ и работает автономно, коэффициент готовности АСИО определится:

$$K_{G(\text{АСИО})} = 1 - (1 - K_{G(\text{УАСИ1})})(1 - K_{G(\text{УАСИ2})}) \times \dots \times (1 - K_{G(\text{УАСИ}N)}), \quad (4)$$

где  $K_{G(\text{УАСИ1})}$ ,  $K_{G(\text{УАСИ2})}$ , ...,  $K_{G(\text{УАСИ}N)}$  – коэффициенты готовности УАСИ<sub>1</sub>, УАСИ<sub>2</sub>, ..., УАСИ<sub>N</sub> 1-го, 2-го, N-го станков ГПС.

В ГПС имеется центральный магазин инструментов (ЦМИ), общий для всех станков. Инструменты из ЦМИ в шпиндели станков и обратно доставляются с помощью общего для всех станков технического средства транспортирования инструментов (ТСТИ). Для такой АСИО коэффициент готовности рассчитывается по формуле:

$$K_{G(\text{АСИО})} = K_{G(\text{ЦМИ})} K_{G(\text{ТСТИ})}, \quad (5)$$

где  $K_{G(\text{ЦМИ})}$  – коэффициент готовности ЦМИ;  $K_{G(\text{ТСТИ})}$  – коэффициент готовности ТСТИ.

В ГПС имеется центральный инструментальный склад (ЦИС), общий для всех станков. Каждый станок оснащен УАСИ. Замена инструментов в инструментальных магазинах станков производится автоматически с помощью технического средства транспортирования инструментов, расположенного между ЦИС и станками. В этом случае коэффициент готовности АСИО равен

$$K_{G(\text{АСИО})} = (1 - (1 - K_{G(\text{УАСИ1})})(1 - K_{G(\text{УАСИ2})}) \times \dots \times (1 - K_{G(\text{УАСИ}N)})) K_{G(\text{ТСТИ})} K_{G(\text{ЦИС})}, \quad (6)$$

где  $K_{G(\text{ЦИС})}$  – коэффициент готовности ЦИС.

Величина  $K_{Г(АСИО)}$  зависит от величин  $K_{Г}$  отдельных ее элементов и инструментов, а также от структуры системы. Это необходимо учитывать на этапе проектирования АСИО, принимая рациональные структурные решения. При этом следует понимать также, что оценку эффективности АСИО в целом необходимо производить по системе показателей эффективности, среди которых  $K_{Г(АСИО)}$  является только одним из них, и решать задачу многокритериальной оптимизации системы.

*Копосов Виктор Николаевич,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: vnkoposov@mail.ru

УДК 621.7.06

Е.В. ЕГОРЫЧЕВА, к.т.н., доцент  
А.В. НИКОНОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: kig@kig.ispu.ru

### **Влияние деформации на карбидную фазу инструмента из быстрорежущей стали**

**Аннотация.** В статье рассмотрены фазовые изменения инструментального материала в процессе резания на разных этапах изнашивания. Представлены экспериментальные данные по изменению плотности дислокаций, микронапряжений на рабочих поверхностях инструмента в процессе резания.

**Ключевые слова:** режущий инструмент; фазовый состав; стойкость инструмента, дислокационная структура, плотность дислокаций, скорость резания.

E.V. EGORYCHEVA, Candidate of Engineering, docent  
A.V. NIKONOROV, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: kig@kig.ispu.ru

### **The effect of deformation on the carbide phase tool of high-speed steel**

**Abstract.** The article considers the material phase change during the cutting process at different stages of wear. Experimental data with respect to a change in the dislocation density, microstresses on the working surfaces of tool in the cutting.

**Key words:** cutting tools; phase composition; the resistance of the tool, dislocatory structure, dislocation density, cutting speed.



В процессе резания в структуре инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 происходит ряд изменений, которые охватывают не только мартенситную основу, но и карбидную составляющую материала.

Рентгенографическое исследование позволило установить влияние деформации на карбидную фазу инструментального материала. Проводился анализ изменений, происходящих в карбидной фазе  $Me_6C$ , путем исследования интерференционных максимумов (333,511); (400); (644). За критерий структурных изменений принималась физическая ширина интерференционных линий на рентгенограммах. Так как уширение линий вызвано одновременным влиянием микроискажений и дисперсности, то учитывались уширения  $n$  и  $m$ , обусловленные микроискажениями и мелкодисперсностью соответственно:

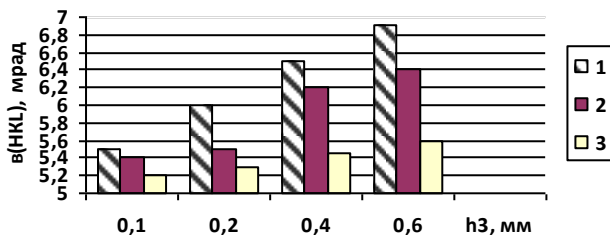
$$\beta = nm \int_{-\infty}^{+\infty} N(x)M(x) dx,$$

где  $N(x)$  – функция микроискажений решетки;  $M(x)$  – функция мелкодисперсности

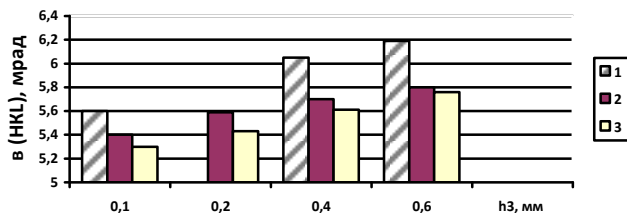
Анализ данных указывает на существование зависимости ширины рентгеновских линий от индексов (HKL). Это, по существу, связано с тем, что уширение отражений от поверхностных пластически деформированных слоев вызывается уменьшением размеров блоков мозаики, а также микроискажениями кристаллической решетки. Характерно, что в процессе резания со скоростью  $V=20$  м/мин для кристаллографических плоскостей с малой суммой индексов (400) зафиксировано наименьшее значение физической ширины. Это указывает на преимущественную связь изменений физической ширины интерференционных пиков с размерами блоков когерентного рассеяния.

На рис. 1 демонстрируются интерференционные пики карбида  $Me_6C$  (644) на разных этапах изнашивания режущего инструмента. В процессе изнашивания инструмента при обработке со скоростью 20 м/мин наблюдается интенсивное размытие рентгеновских линий (рис. 2, б, 2,в), что свидетельствует о дроблении элементов субструктуры [1]. Данного эффекта при обработке со скоростью резания  $V=60$  м/мин не зарегистрировано.

Изменение интенсивности дифракционного пика  $Me_6C$  (644) к фону  $I(644)/I_{фон}$  показало, что в процессе резания происходит увеличение элементарных искажений в карбидной фазе режущего инструмента во всем исследуемом диапазоне скоростей.



а)



б)

Рис. 1. Зависимость изменения физической ширины интерференционных линий  $\beta$  карбидной фазы от фаски износа по задней поверхности  $h_3$  инструмента Р6М5 в процессе обработки стали 45: а– $V=20$  м/мин: 1– $Me_6C(644)$ ; 2– $Me_6C(333)$ ; 3– $Me_6C(400)$ ; б –  $V=60$  м/мин: 1– $Me_6C(644)$ ; 2– $Me_6C(333)$ ; 3– $Me_6C(400)$

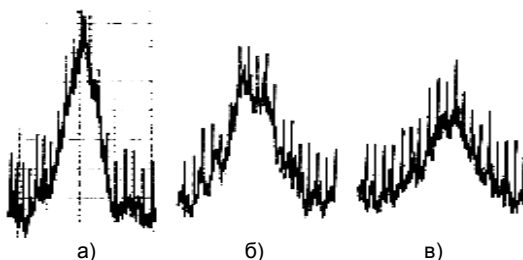


Рис. 2. Интерференционные линии  $Me_6C(664)$  карбидной фазы инструмента Р6М5 при обработке стали 45 ( $V=20$  м/мин;  $S=0,3$  мм/об): а – без резания; б –  $h_3=0,1$  мм; в –  $h_3=0,3$  мм

Таким образом, рентгеновский анализ показал, что в процессе изнашивания наблюдаются искажения атомно-кристаллической структуры карбидной фазы инструмента: наблюдается формирование дис-

локационной структуры при резании со скоростью  $V=20\ldots 60$  м/мин и уменьшение размеров блоков мозаики при скорости  $V=20$  м/мин.

В настоящей работе проводилось исследование характера карбидной фазы инструментального материала по глубине режущего клина инструмента путем послойного удаления металла. Исследования показали, что ширина рентгеновских линий по глубине режущего клина инструмента существенно изменяется. Ширина линий, а следовательно, и плотность дислокаций максимальны в самых тонких слоях инструментального материала.

В более глубоких слоях исследуемой поверхности (до  $b=140$  мкм) наблюдается значительно меньшая ширина линий  $\beta$  (НКЛ).

Также изучалась зависимость ширины интерференционной линии  $\beta$  (644) в поверхностных слоях инструмента различной толщины инструмента от времени обработки стали 45. Исследование показало, что в слоях глубиной 50 и 100 мкм, то есть в случае, когда интерференционная картина формируется в основном кристаллитами, расположенными относительно далеко от поверхности, увеличение времени резания вызывает лишь незначительное повышение значения ширины линии.

Таким образом, в процессе резания структурные изменения в карбидной фазе инструмента, связанные с накоплением плотности дислокаций, происходят в основном в тонких поверхностных слоях.

#### Литература

1. **Егорычева Е.В.** Трансформация дислокационной структуры инструмента из быстрорежущей стали в процессе резания / Е.В. Егорычева, А.В. Никоноров // Вестник научно-промышленного общества. – 2012. – Вып. 19. – С. 23.
2. **Егорычева Е.В.** Фазовые превращения в режущем клине инструмента в процессе изнашивания / Е.В. Егорычева // Вестник научно-промышленного общества. – 2012. – Вып. 19. – С. 28. УДК 621.313

*Егорычева Елена Валерьевна,*

ФГБОУВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина,  
e-mail: egoruh@mail.ru

*Никоноров Алексей Владимирович,*

ФГБОУВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина,

УДК 621.313

А.М. ШУРЫГИН, к.т.н., доцент,  
М.Н. ШУРЫГИН, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: admin@tam.ispu.ru

## Разработка объектно-ориентированных моделей приводных устройств

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы разработки объектно-ориентированных моделей приводных устройств технологического оборудования. Представлены математические модели двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и синхронного двигателя с постоянными магнитами в пространстве состояний.

**Ключевые слова:** модель, двигатель, пространство состояний.

A.M. SHURYGIN, Candidate of Engineering, docent,  
M.N. SHURYGIN, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: admin@tam.ispu.ru

## Development of object-oriented models of drive devices

**Abstract.** Deals with the development of object-oriented models of drive devices of technological equipment. Presents the mathematical models of direct current motor with independent excitation and synchronous motor with permanent magnets in the state space.

**Key words:** model, motor, state space.

При моделировании автоматизированных систем, представляющих собой совокупности устройств непрерывного и дискретного действия, целесообразным является использование численно-аналитического метода пространства состояний, позволяющего определить значения переменных в дискретные моменты времени  $t$ , соответствующие моментам переключения отдельных блоков системы.

В общем случае устройство непрерывного действия описывается матричным уравнением состояния

$$\frac{d}{dt} [x_{\text{ext}}] = [A_{\text{ext}}] [x_{\text{ext}}], \quad (1)$$

где  $[x_{\text{ext}}]$  – расширенный вектор состояния,  $[A_{\text{ext}}]$  – расширенная матрица состояния.

Решение уравнения состояния (1) в произвольный момент времени  $t = t_{\text{нач}} + \Delta t$  имеет следующий вид [1]:

$$[x_{\text{ext}}] = e^{[A_{\text{ext}}] \Delta t} [x_{\text{ext}}]_{\text{нач}}, \quad (2)$$

где  $[x_{\text{ext}}]_{\text{нач}}$  – значение расширенного вектора состояния  $[x_{\text{ext}}]$  в начальный момент времени  $t_{\text{нач}}$ .

При моделировании вычисления организуются следующим образом. Состояние устройств дискретного действия определяется в момент времени  $t=t_{\text{нач}}$  и принимается неизменным в течение времени шага расчета  $\Delta t$ . На каждом расчетном интервале  $\Delta t$  сначала формируется расширенная матрица состояния  $[A_{\text{ext}}]$ , определяются значения коэффициентов ее характеристического уравнения, и рассчитываются ее собственные числа. Затем вычисляется переходная матрица состояния [1]

$$e^{[A_{\text{ext}}]\Delta t} = \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i \Delta t} \frac{\prod_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N ([A_{\text{ext}}] - \lambda_j [I])}{\prod_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N (\lambda_i - \lambda_j)}, \quad (3)$$

где  $N$  – порядок расширенной матрицы состояния  $[A_{\text{ext}}]$ ,  $\lambda$  – собственные числа матрицы  $[A_{\text{ext}}]$ ,  $[I]$  – единичная матрица, и определяется расширенный вектор состояния  $[x_{\text{ext}}]$  по выражению (2).

Значение вектора  $[x_{\text{ext}}]$ , полученное в момент времени  $t = t_{\text{нач}} + \Delta t$ , и значение времени  $t$  принимаются начальными для расчета на следующем интервале. Затем процесс вычислений повторяется.

Таким образом, основной задачей при использовании метода пространства состояний является приведение исходных дифференциальных уравнений моделируемого устройства непрерывного действия к форме матричного уравнения состояния (1). Рассмотрим варианты решения такой задачи на примере двух электромеханических устройств: двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТНВ) и синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ).

Модель ДПТНВ в пространстве состояний составляется на основе известных уравнений данного двигателя [2], записанных при традиционных допущениях. Полагая напряжение обмотки якоря  $u_a$  и момент сопротивления  $M_c$  неизменными в течение малого расчетного интервала  $\Delta t$ , представим дифференциальные уравнения ДПТНВ в форме матричного уравнения (1), удобной для моделирования:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(-R_a)}{L_a} & \frac{(-K_e)}{L_a} & \frac{u_a}{L_a} \\ K_m & 0 & \frac{(-M_c)}{J_{\text{пр}}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $u_a, i_a$  – напряжение и ток обмотки якоря,  $R_a, L_a$  – активное сопротивление и полная индуктивность обмотки якоря,  $K_e, K_m$  – постоянные коэффициенты (при неизменном магнитном потоке),  $M_c$  – момент сопротивления,  $J_{пр}$  – приведенный момент инерции,  $\omega$  – угловая скорость двигателя.

Модель СДПМ в пространстве состояний составляется на основе известных уравнений данного двигателя [2, 3] в неподвижной относительно статора системе координат  $\alpha, \beta$ , записанных при традиционных допущениях. Полагая напряжения обмоток статора  $u_\alpha, u_\beta$  и угловую скорость ротора  $\omega_{эл}$  неизменными в течение малого расчетного интервала  $\Delta t$ , представим дифференциальные уравнения СДПМ в форме матричного уравнения (1), удобной для моделирования:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(-R_s)}{L_s} & 0 & \frac{(-1)}{L_s} & 0 & \frac{u_\alpha}{L_s} \\ 0 & \frac{(-R_s)}{L_s} & 0 & \frac{(-1)}{L_s} & \frac{u_\beta}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 & (-\omega_{эл}) & 0 \\ 0 & 0 & \omega_{эл} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta, e_\alpha, e_\beta$  – напряжения, токи и противо- э.д.с. обмоток статора по осям  $\alpha, \beta$ ,  $R_s, L_s$  – активное сопротивление и полная индуктивность обмотки фазы статора,  $\omega_{эл}$  – угловая скорость ротора ( $\omega_{эл}=p_n\omega$ ),  $p_n$  – число пар полюсов двигателя, при этом

$$\begin{cases} e_\alpha = (-\Psi_{пм})\omega_{эл} \sin \varphi_{эл}, \\ e_\beta = \Psi_{пм}\omega_{эл} \cos \varphi_{эл}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\Psi_{пм}$  – потокосцепление, обусловленное наличием постоянных магнитов,  $\varphi_{эл}$  – угол положения ротора ( $d\varphi_{эл}/dt=\omega_{эл}$ ).

Электромагнитный момент СДПМ определяется по выражению

$$M_{эм} = \frac{m}{2} p_n \Psi_{пм} (i_\beta \cos \varphi_{эл} - i_\alpha \sin \varphi_{эл}), \quad (7)$$

где  $m$  – число фаз двигателя, позволяющему с учетом соотношений (6) вычислить значения электромагнитного момента  $M_{эм \text{ нач}}$  в момент времени  $t_{нач}$  и  $M_{эм}$  в момент времени  $t=t_{нач}+\Delta t$ .

Производная электромагнитного момента СДПМ по времени на расчетном интервале  $\Delta t$  определяется как

$$k_t = \frac{M_{эм} - M_{эм \text{ нач}}}{\Delta t}. \quad (8)$$

Для расчета угловой скорости двигателя  $\omega$  в момент времени  $t=t_{нач}+\Delta t$  используется выражение, полученное с учетом допущения, что

момент сопротивления  $M_c$  остается неизменным в течение малого расчетного интервала  $\Delta t$ :

$$\omega = \frac{1}{J_{пр}} \left( \frac{K_t}{2} \Delta t^2 + (M_{эм\ нач} - M_c) \Delta t \right) + \omega_{нач}, \quad (9)$$

где  $\omega_{нач}$  – значение скорости  $\omega$  в начальный момент времени  $t_{нач}$ .

Таким образом, численно-аналитический метод пространства состояний может применяться для моделирования различных приводных устройств, динамических объектов и систем.

### Литература

1. **Деруссо, П.** Пространство состояний в теории управления (для инженеров): пер. с англ. / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз. – М.: Наука: Главная редакция физико-математической литературы, 1970. – 620 с.
2. **Копылов, И.П.** Электрические машины: учеб. для вузов / И.П. Копылов. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Высшая школа: Логос, 2000. – 607 с.
3. **Шурыгин, А.М.** Математическое описание бесколлекторного двигателя в неподвижной системе координат / А.М. Шурыгин, М.Н. Шурыгин, А.А. Масляева // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2011. – Т. 3: Электротехника. – С. 154-156.

*Шурыгин Андрей Михайлович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: admin@tam.ispu.ru

*Шурыгин Михаил Николаевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: admin@tam.ispu.ru

УДК 681.511.4

А.А. КИСЕЛЕВ, к.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: kaa\_alp@mail.ru

## Адаптер сопряжения электропривода с агрегатом

**Аннотация.** Для управления цифровыми электроприводами технологических агрегатов, снабженных промышленными контроллерами, используются адаптеры, которые также построены на микроконтроллерах. При этом они выполняют задачу преобразования слова задания скорости ЭП, получаемого от контроллера агрегата, в формат, необходимый для управления скоростью ЭП, и последующую передачу результата преобразования по последовательному интерфейсу RS-232 в цифровую систему управления электроприводом.

**Ключевые слова:** цифровой электропривод, адаптер связи, технологический агрегат.

A.A. KISELEV, Candidate of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: kaa\_alp@mail.ru

## Electric actuator with interface adapter unit

**Abstract.** Electric drive technology for managing digital units are industrial controllers, use adapters that are also based on microcontrollers. They perform the task of converting a Word set the speed controller by the EP unit, in the format required for the speed control of the EP, and the subsequent transfer of the transform on the serial interface RS-232 in a digital electric drive control system.

**Key words:** Digital power, power connection, the technology unit.

Адаптер разработан и предназначен для сопряжения электропривода бесконтактного с фазовой модуляцией (далее ЭП) с микроконтроллером агрегата (МКА), на котором установлен данный электропривод.

Адаптер поддерживает четыре скорости обмена с ЭП по интерфейсу RS-232: 9600, 19200, 38400, 57600 (бит/с).

Формат передачи данных: восемь «бит данных», один «стоп бит».

Для задания скорости обмена по интерфейсу RS-232 используются переключатели «BR0» и «BR1», устанавливаемые на выводы разъёма XP4 согласно табл. 1.

После включения напряжения питания микроконтроллер (далее МК) адаптера начинает выполнять программу, записанную в его внутреннюю память программ.

Таблица 1. Варианты установки переключателей «BR0» и «BR1»

Скорость обмена [бит/с]	Переключатели	
	BR0 (XP4:1 – XP4:2)	BR1 (XP4:3 – XP4:4)
9600	Есть	Есть
19200	Есть	Нет
38400	Нет	Есть
57600	Нет	Нет

На первом этапе выполнения программы в зависимости от установки переключателя «TEST» (X1) выбирается один из двух режимов работы адаптера:

- а) тестовый режим;
- б) рабочий режим.

**Тестовый режим** предназначен для проверки работоспособности адаптера после завершения его сборки или ремонта, связанного с заменой электронных компонентов, а также в случае возникновения подозрений на неисправность адаптера.

Адаптер переводится в тестовый режим установкой переключателя «TEST» (X1:1 – X1:2).



Действия, необходимые для проведения проверки адаптера в тестовом режиме:

- отключить все внешние цепи от разъемов XP2 и XP3;
- снять, если установлены, перемычки «BR0» и «BR1» с выводов разъема XP4;
- соединить между собой выводы XP5:2 (RXD) и XP5:3 (TXD) разъема XP5;

- включить питание адаптера.

В тестовом режиме проводятся следующие тесты:

- тестирование светодиодной индикации («TX», «RUN», «ALM»);
- тестирование портов ввода/вывода МК на отсутствие короткого замыкания между соседними выводами;
- тестирование ОЗУ МК;
- тестирование памяти программ МК;
- тестирование последовательного порта МК и приемопередатчика (DD2) интерфейса RS-232.

Если в ходе проведения теста была выявлена ошибка, то дальнейшее выполнение тестов прекращается, с помощью светодиодов «RUN», «ALM» и «TX» отображается код ошибки (неисправности) в соответствии с табл. 2.

Если все тесты были пройдены успешно, то с частотой 1 Гц одновременно переключаются светодиоды «RUN» и «TX».

*Примечание:*

*Для перехода от теста светодиодной индикации (1) к тесту портов ввода/вывода МК (2) необходимо кратковременно замкнуть выводы XP4:1 и XP4:2 разъема XP4.*

Таблица 2. Индикация результатов тестирования адаптера

Светодиоды			Номер ошибки	Значение индикации
«ALM»	«RUN»	«TX»		
●	○	●	1	Ошибка порта B (PORT B) МК
●	●	●	3	Ошибка порта D (PORT D) МК
●	○	●	5	Ошибка ОЗУ МК
●	●	○	6	Ошибка памяти программ МК
●	●	●	7	Ошибка передачи данных в по интерфейсу RS-232
○	●	●	-	Адаптер в режиме «Тест», все тесты пройдены успешно*

● – светодиод включен; ○ – светодиод выключен; ● – светодиод переключается с частотой 1 Гц; \* – светодиоды переключаются синхронно.

**Рабочий режим** является основным режимом работы адаптера. Находясь в этом режиме, адаптер обеспечивает преобразование слова задания скорости ЭП, получаемого от контроллера агрегата, в формат,

необходимый для управления скоростью ЭП и последующую передачу результата преобразования по последовательному интерфейсу RS-232.

Адаптер переходит в рабочий режим после включения питания при условии, что переключатель «TEST» (X1) не установлена.

Первый этап работы – тестирование внутренних устройств МК.

Выполняются следующие тесты:

- а) тест ОЗУ МК;
- б) тест памяти программ МК.

Если в ходе выполнения теста ОЗУ или теста памяти программ была выявлена ошибка, то дальнейшее выполнение тестов прекращается, индицируется код ошибки в соответствии с табл. 2. Адаптер неработоспособен и нуждается в ремонте.

Если тесты пройдены успешно, включается светодиод «RUN», адаптер готов к работе. В процессе работы адаптер контролирует наличие связи с контроллером объекта.

Если в течение 1,2 с не будет получено слово задания скорости от МКА или принятое слово будет некорректным (больше 0x0FFF), адаптер передаст команду на останов ЭП (0x0000) и отобразит отсутствие связи с МКА согласно табл. 3.

Адаптер будет передавать команду на останов ЭП с периодичностью 1,2 с, пока связь с МКА не будет восстановлена. После передачи задания скорости электроприводу, адаптер ожидает подтверждения приёма от ЭП в течении 10 мс и в случае отсутствия ответа однократно повторяет передачу задания. Если ответ ЭП вновь не будет получен, адаптер индицирует отсутствие связи с ЭП согласно табл. 3.

Светодиод «ТХ» индицирует передачу слова управления от адаптера к электроприводу.

Таблица 3. Индикация состояний адаптера в рабочем режиме

Светодиоды		Значение индикации
«ALM»	«RUN»	
○	●	Адаптер функционирует нормально
⦿	●	Нет связи с электроприводом
●	⦿	Нет связи с МКА в течении времени, большего 1,2 с
⦿	⦿	Нет связи с МКА и с электроприводом

(1) – светодиоды переключаются синхронно (одновременно) с частотой 1 Гц.

Адаптер сопряжения электропривода с микроконтроллером агрегата позволяет оперативно протестировать его работоспособность после сборки, ремонта и в случае возникновения подозрений на его неисправность, а также обеспечивает связь электропривода с рабочим агрегатом, включая управление скоростью электропривода по запросу от агрегата.

Киселев Александр Анатольевич  
 ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 E-mail: kaa\_alp@mail.ru

УДК 544.653.22

Н.Г. ДЕМЬЯНЦЕВА,<sup>1</sup> к.т.н., доцент;  
С.М.КУЗЬМИН,<sup>2</sup> к.х.н., доцент,  
А.В. БАЛМАСОВ,<sup>3</sup> д.т.н., профессор

<sup>1-2</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени  
В.И. Ленина 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: demyantseva@bk.ru*

<sup>3</sup>Ивановский государственный химико-технологический  
университет, пр. Шереметевский, 7, г. Иваново, 153000, Россия,  
*E-mail: balmasov@isuct.ru*

## Стратегия математического моделирования процесса электрохимической размерной обработки металлов

**Аннотация.** В работе решается задача определения стратегии для математического моделирования процесса электрохимической обработки в импульсных электрических режимах. Предложенная стратегия математического моделирования позволяет сократить время исследования, так как в этом случае изменение параметров режимов и условий не требует создания новой экспериментальной установки.

**Ключевые слова:** электрохимическая размерная обработка, импульсные электрические режимы, математическое моделирование.

DEMYANTSEVA, N.G.<sup>1</sup>, Ph.D. (techn.), Assoc. Prof.  
KUZ'MIN, S.M.<sup>2</sup>, Ph.D. (chem.), Assoc. Prof.  
BALMASOV, A.V.<sup>3</sup>, D.Sc. (techn.), Professor

<sup>1-2</sup>*V.I. Lenin Ivanovo State Power University*  
*34, Rabfakovskaya st., Ivanovo 153003, Russia. E-mail: demyantseva@bk.ru*  
<sup>3</sup>*Ivanovo State University of Chemistry and Technology*  
*7, Sheremetevsky pr., Ivanovo 153000, Russia. E-mail: balmasov@isuct.ru*

## A strategy for mathematic simulations of electrochemical machining of metals

**Abstract.** Computer-aided simulations aimed to determination of optimal modes of electrochemical machining significantly reduce the time needed to conduct research and facilitate development of new manufacturing machinery. The simulation strategy proposed allows to reduce the time needed to conduct research, because changes in parameters, modes and conditions do not require to build a new experimental setup.

**Keywords:** electrochemical machining, pulsed electrical modes, mathematical simulations.

Известно, что привлечение компьютерных моделей существенно облегчает разработку нового технологического оборудования и сокращает время исследования, так как в этом случае изменение парамет-

ров и условий не требует создания новой экспериментальной установки и проведения дорогостоящего эксперимента. Для процесса электрохимической размерной обработки металлов развитие таких моделей является актуальным так как он находит применение при обработке турбинных лопаток, каналов систем газового охлаждения (например, в роторах турбогенераторов) и т.п.

Ранее [1, 2] нами доказано, что в случае нестационарной электрохимической размерной обработки (ЭХО) никеля в 1М  $\text{NaNO}_3$  существенное влияние на точность копирования электрода-инструмента оказывает частота следования и форма импульсов. Так как лимитирующей стадией ЭХО обычно является процесс отвода продуктов растворения металла от межфазной границы [3], нами было выдвинуто предположение, что влияние на точность формообразования может быть связано с характером влияния нестационарного неоднородного электрического поля в межэлектродном зазоре на траекторию движения заряженных частиц (ионов) [4]. Обоснование данного положения базируется на стадийной природе электрохимических процессов: стадию разряда-ионизации всегда сопровождают стадии массопереноса: реагирующее вещество сначала должно подойти к электроду, а затем образовавшиеся продукты реакции должны быть удалены с поверхности электрода. При высоких плотностях тока скорость растворения металла лимитируется скоростью массопереноса, который, в общем случае, представляет собой сумму диффузионной, миграционной и конвективной составляющих. Плотность тока в электрохимической системе определяется плотностью потока заряженных частиц.

Однако, изложенных выше положений недостаточно для построения строгой математической модели ЭХО и требуется учет дополнительных факторов.

Во-первых, следует учесть, что плотность тока зависит от скачка потенциала между поверхностью электрода и объемом жидкости. В ходе высокоскоростного анодного растворения металлов возникает значительный градиент концентрации ионов в тонком прианодном слое, что приводит к значительным изменениям межфазного скачка потенциала. Влияние потенциала  $\text{Ni}$  рабочего электрода (измеренного относительно насыщенного каломельного электрода) на плотность тока определено в серии поляризационных измерений на вращающемся дисковом электроде (ВДЭ). На рис. 1 даны характерные зависимости плотности тока от потенциала рабочего электрода при разных скоростях вращения ВДЭ. Наблюдаемые на поляризационных кривых осцилляции тока связаны с периодическим образованием и разрушением оксидного слоя.

При высоких потенциалах эти пульсации происходят в пределах определенных значений тока, поэтому можно говорить о некотором максимальном (предельном) его значении. Величина максимального тока практически линейно зависит от квадратного корня от частоты вращения дискового электрода (рис. 2). Такая зависимость согласуется

с предположением о диффузионном контроле процесса растворения никеля в данном растворе.

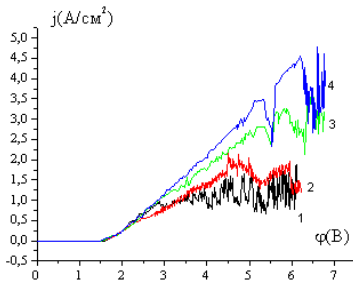


Рис. 1. Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения никеля в 1М растворе  $\text{NaNO}_3$  при разных скоростях вращения дискового электрода: 1 – без вращения; 2 – 400 об/мин; 3 – 2000 об/мин; 4 – 2500 об/мин. Скорость развертки потенциала 20 мВ/с,  $T = 298 \text{ K}$ .

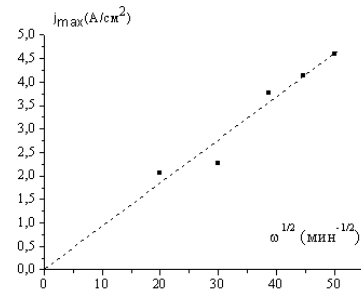


Рис. 2. Зависимость максимального анодного тока от квадратного корня из скорости вращения дискового электрода при анодном растворении никеля в 1М растворе  $\text{NaNO}_3$ .

Во-вторых, следует учесть, что эффективность растворения металла возрастает с увеличением плотности тока. В условиях, описанных в работах [1, 2] это приводит к влиянию амплитуды импульсов напряжения на выход растворения металла по току. Такая зависимость оказывается типичной в случае протекания в электрохимической системе конкурирующего электрохимического процесса. В рассматриваемом случае – это разложение воды с образованием газообразного кислорода. Изменение отношения выхода по целевой и побочной реакциям связывают с активирующим действием анионов  $\text{NO}_3^-$ .

Упомянутые выше особенности электрохимической обработки позволяют предложить следующую стратегию математического моделирования процесса ЭХО:

- 1) Моделирование первичного распределения потенциалов между электродом инструментом и рабочим электродом (деталью).
- 2) Определение плотностей первичных токов в приближении однородной проводящей среды.
- 3) Определение межфазного скачка потенциалов, необходимого для поддержания первичной плотности тока.
- 4) Корректировка распределения потенциала по рабочему электроду (с учетом скачка потенциала).
- 5) Моделирование вторичного распределения потенциалов между электродом инструментом и рабочим электродом и вторичных

токов (несколько итераций для формирования стационарной картины плотностей токов).

6) Корректировка плотности тока на эффекты, связанные с нестационарностью ЭХО.

7) На основании известной зависимости выхода по току от плотности тока расчет скорости съема металла.

8) Расчет нового положения электрода-инструмента и межфазной границы для рабочего электрода (при заданном шаге по времени)

9) Повторение шагов 5-8 до достижения заданного времени ЭХО.

#### Литература

1. **Демьянцева Н.Г.** Влияние параметров импульсной поляризации на формообразование никеля /Н.Г.Демьянцева, С.М.Кузьмин, М.А. Солунин, А.М. Солунин, С.А. Лилин / Журнал прикладной химии. 2010. Т. 83. Вып. 2. С.249 – 254.
2. **Demyantseva N. G.** Evaluation of Shaping Accuracy upon Electrochemical Machining of Metals. Surface Engineering and Applied Electrochemistry/ N.G. Demyantseva, S.M. Kuzmin, A.V. Balmasov. – 2012. – Vol. 48. – № 3. – pp. 230 – 233.
3. **Дикусар А. И.** Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке металлов/ А. И. Дикусар, Г. Р. Энгельгардт, В. И. Петренко, Ю. Н. Петров. – Кишинев: Штиинца, 1984. – 208 с.
4. **Демьянцева Н.Г.** О движении заряженных частиц в переменном неоднородном электрическом поле/ Н.Г. Демьянцева, С.М. Кузьмин, М.А. Солунин, С.А. Солунин, А.М. Солунин. – Журнал технической физики. – 2012. – Т.82., Вып. 11, – С. 1-10.

*Демьянцева Наталья Григорьевна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры физики, e-mail: demyantseva@bk.ru

*Кузьмин Сергей Михайлович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат химических наук, доцент кафедры физики, e-mail: smk@isc-ras.ru

*Балмасов Анатолий Викторович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии электрохимических производств, e-mail: balmasov@isuct.ru

УДК 621.89.017

Е.В. БЕРЕЗИНА, д.т.н., профессор

В.В. НОВИКОВ, к.т.н., старший научный сотрудник

С.В. МИРОНОВ, студент магистратуры

К.С. БУРЧЕНКОВ, студент, Р.Ю. ЛИСИЦЫН, аспирант

Ивановский государственный университет

153025, ул. Ермака, 39

E-mail: novikov-ww@mail.ru

### **Исследование смазочного действия машинных масел в условиях высоких контактных давлений**

**Аннотация.** Приведена методика испытаний на трение и изнашивание металлических и неметаллических материалов в условиях применения различ-

ных смазочных материалов. Сформулирована концептуальная модель, объясняющая влияние смазки на процесс трения.

**Ключевые слова:** присадка, трение, зона контакта.

E. V. BEREZIN, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
V. V. NOVIKOV, Ph. D., senior researcher,  
S. V. MIRONOV, MBA student,  
K. S. BURENKOV, student, R. J. LISSITZYN, graduate student

Ivanovo state University  
153025, Ermak str., 39. E-mail: [novikov-ww@mail.ru](mailto:novikov-ww@mail.ru)

## **Investigation of lubricating engine oils actions under conditions of high contact pressures**

**Abstract.** Describes a method tests on friction and wear of metallic and nonmetallic materials in conditions of the application of various lubricants. Formulated a conceptual model explaining the effect of lubricant on the friction process.

**Key words:** additive, friction, contact zone.

Надежное тестирование смазочных свойств масел, трибоактивных присадок является одной из актуальных задач, стоящей в энергетическом машиностроении. В настоящее время существуют большое число испытательных установок, обеспечивающих различные схемы трения [1]. Однако, большинство из них являются лабораторными приборами, которые были выполнены в единственном экземпляре. Поэтому важно иметь надежную методику испытаний на серийно выпускаемых трибометрах.

Целью наших исследований являлось изучение трения смазочных масел в условиях высоких контактных давлений на машине трения МТУ-01. Машина трения универсальная модели МТУ-01 (ТУ 4271-001-29034600-2004) предназначена для испытаний на трение и изнашивание металлических и неметаллических материалов в условиях применения различных смазочных материалов. Метод испытаний основан на взаимном перемещении прижатых друг к другу с заданным усилием испытываемых образцов в среде смазочных материалов или без них. Скорость вращения образца без нагрузки, плавно регулируется от 200 до 2500 об/мин, усилие прижима испытываемых образцов, от 50 до 1000 Н.

Схема контакта, используемого в эксперименте – торец вращающегося ролика и плоскость неподвижного диска. Момент трения и осевая нагрузка регистрируется тензодатчиками, температура – капеллярной термопарой. Регистрируемые параметры записываются и обрабатываются с использованием ПЭВМ в реальном времени. Программное обеспечение при испытании позволяет фиксировать момент трения, осевую нагрузку и температуру в реальном времени с графическим отображением их изменений. Установка дает возможность проводить длительные испытания продолжительностью несколько часов.

Характеристики машины позволяют проводить исследования в условиях высоких контактных давлений от 100 МПа и выше. Для обеспечения этих условий была применена следующая схема испытаний.

К пластине из закаленной стали 40X твердостью HRC 52 с помощью нагружающего устройства прижималась насадка из трех неподвижно закрепленных шариков из стали ШХ15 диаметром 12,3 мм, которая устанавливалась в шпиндель машины. Сила прижатия варьировалась от 0 до 400 Н. Перед проведением испытаний на шариках были сформированы стабильные пятна износа диаметром 1,0...1,1 мм. Это позволило проводить опыты в стационарных условиях по рабочему давлению в зоне контакта. При этом величина давлений составляла 100... 300 МПа. Частота вращения шпинделя в эксперименте была постоянной 200 об/мин, линейная скорость движения шариков по плоскости – 11,3 м/мин.

Трение пары исследовалось в среде индустриального масла И-20 (ГОСТ 20799-88), моторного масла М-8В (ТУ 0253-052-04001396-02) и трансмиссионного масла SAE 80W900 (ГОСТ 17479,2-85). После установки образцов перед проведением измерений проводилась притирка пары трения в течении 15 минут.

Анализ результатов эксперимента по влиянию нагрузки на силу трения показал, что кривые зависимости силы трения  $F_{тр}$  от нагрузки  $N$  для любых видов испытанных смазочных материалов отклоняются от линейного закона и могут быть аппроксимированы полиномом второго порядка

$$F_{тр} = \beta_1 N - \beta_2 N^2, \quad (1)$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — эмпирические коэффициенты.

Это означает, что коэффициент трения  $\mu$  для тяжело-нагруженных пар трения снижается с повышением нагрузки на контакте пропорционально нагрузке.

$$\mu = F_{тр}/N = \beta_1 - \beta_2 N \quad (2)$$

Методом наименьших квадратов был произведен расчет коэффициентов модели (1), результаты которого представлены в табл. 1.

Нами сформулирована концептуальная модель, объясняющая полученные зависимости влияния смазки на процесс трения.

Известно, что коэффициент трения в тяжелонагруженных парах трения определяется процессом разрушения микровыступов контакта за счет пластической деформации или разрыва адгезионных связей в местах нарушения смазочного слоя соприкасающихся поверхностей. Силу трения, возникающую между телами можно выразить как

$$F_{тр} = \alpha(p) \cdot S_0 \cdot \tau_{ср}, \quad (3)$$

где  $\alpha(p)$  — доля поверхности фактического металлического контакта микровыступов пары трения,  $p = N/S_0$  — давление на контакте,  $N$  — нагрузка,  $S_0$  — номинальная площадь контакта,  $\tau_{ср}$  — среднее напряжение среза в мостике схватывания.



Таблица 1. Показатели регрессионной модели зависимости силы трения от нагрузки

Смазочная среда	$\beta_1$	$\beta_2 \times 10^{-4} H^{-1}$	$R^2$
Индустриальное масло И-20	0,164	1,53	0,99
Моторное масло М-8В	0,122	0,28	0,98
Трансмиссионное масло ТНК 80W90	0,076	0,19	0,99

Из теории контактного взаимодействия пар при трении [2] известно, что доля фактического металлического контакта поверхностей трения можно оценить как

$$\alpha(p) = k \cdot p / HB, \quad (4)$$

где  $HB$  — твердость наименее твердого материала пары,  $k$  — коэффициент металлического (несмазанного) контакта.

Реальное давление на контакте отклоняется от номинального давления из-за гидростатического эффекта. Величину расклинивающего давления можно определить по формуле Петрова [2]

$$\Delta p = \eta \cdot V / h(p), \quad (5)$$

где  $\eta$  — динамическая вязкость смазки,  $V$  — скорость скольжения,  $h(p)$  — зазор между поверхностями.

Подставляя выражения (4) и (5) в формулу (3) можно получить выражения для расчета коэффициента трения

$$\mu(p) = \frac{F_{тр}}{N} = \left[ 1 - \frac{\eta \cdot V}{p \cdot h(p)} \right] \cdot \frac{k \cdot \tau_{ср}}{HB} \quad (6)$$

Выражение (6) отражает то, что смазка при трении тяжело нагруженных пар уменьшает коэффициент трения как за счет экранирования поверхностей, так и за счет гидродинамического расклинивания.

Работа выполнена в рамках гранта № 9.700.2014/К, выполняемого по проектной части государственного задания вузу на проведение НИР.

#### Литература

1. **Комбалов В.С.** Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов. Справочник. — М.: Машиностроение, 2008. 384 с. — Гомель: ИМПС НАН, 2002. 310 с.

*Березина Елена Владимировна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный университет»,

*Новиков Виктор Владимирович,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный университет», E-mail: novikov-ww@mail.ru

*Миронов Сергей Владимирович*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный университет»,

*Бурченко Константин Сергеевич*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный университет»,

*Лисицын Роман Юрьевич*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный университет»,

УДК 681.511.4

А.А. КИСЕЛЕВ, к.т.н., профессор, (ИГЭУ)

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская, 34  
*E-mail: kaa\_alp@mail.ru*

## Проверка адекватности наблюдателя тока

**Аннотация.** Для улучшения точностных характеристик в системах управления электроприводами широко используется контур тока. Источником информации о токе в фазных обмотках электродвигателя служит либо ток, непосредственно измеренный с помощью координатных преобразователей (восстановленный ток), либо ток, вычисленный наблюдателем по напряжению на фазных обмотках и частоте вращения вала. Точность электропривода при этом существенно зависит от свойств наблюдателя тока.

**Ключевые слова:** электропривод, контур тока, наблюдатель тока.

A.A. KISELEV, Candidate of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: kaa\_alp@mail.ru*

## Checking the adequacy of the current observer

**Abstract.** To improve the accuracy characteristics of electric drive control systems widely used path current. Source of information on the current in the motor windings phase is either currents directly measured using coordinate converters (recycled current), or current, calculated by the phase windings of voltage and frequency of rotation of the motor. The accuracy significantly depends on the properties of the current observer.

**Key words:** Electric circuit current, the observer of current.

Данная работа посвящена оценке возможностей электропривода с непосредственным и косвенным измерением тока (момента).

В электроприводе с двигателем 2ДВМ115 для определения тока используется наблюдатель тока, который вычисляет его значение по напряжению на фазных обмотках и частоте вращения вала. Полученное значение тока будем называть вычисленным (косвенно измеренным).

В то же время конфигурация электропривода позволяет определять величину момента непосредственно по токам фазных обмоток с помощью координатных преобразований. Полученное при непосредственном измерении значение тока будем называть восстановленным.

Для измерения тока используются датчики тока с разрешением 8 дискрет/А.

На рис. 1 показана форма восстановленного тока при частоте вращения вала 50 об/мин и практически полном отсутствии нагрузки.

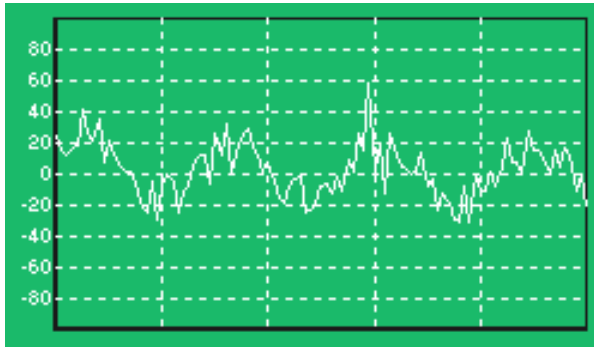


Рис. 1. Восстановленное значение тока

Анализ представленных данных показывает, что имеет место периодическое изменение восстановленного значения тока с полюсной частотой двигателя. Это объясняется тем, что уровень измеряемого сигнала практически совпадает с разрешающей способностью датчика тока. Исследования показывают, что при увеличении нагрузки на двигатель периодическая составляющая в восстановленном значении тока уменьшается, что подтверждает результаты теоретического исследования данной проблемы.

На рис. 2 представлены формы вычисленного значения тока (более плавная кривая) и его восстановленного по фазным токам значения (более ломаная кривая) при разгоне и торможении двигателя.

Из рис. 2 видно, что вычисленное значение тока достаточно точно отражает реальную картину изменения тока (момента) как в пусковых, так и в тормозных режимах работы электродвигателя. Некоторое отклонение траекторий изменений вычисленного и восстановленного значений тока обусловлено достаточно мягкой характеристикой используемого источника питания с внутренним сопротивлением 10 Ом.

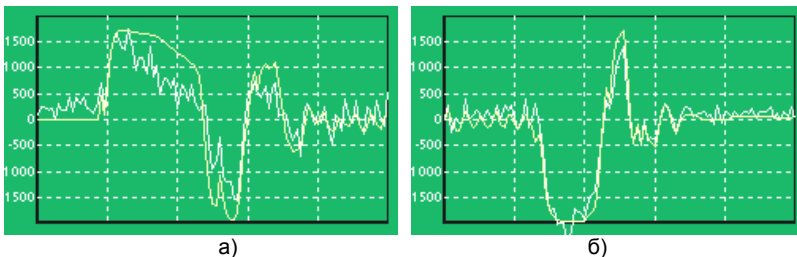


Рис. 2. Формы тока и его оценка: а) при разгоне до частоты вращения 800 об/мин, б) при торможении с частоты вращения 800 об/мин

Анализ представленных данных свидетельствует о малой погрешности вычисления тока посредством наблюдающего устройства при отсутствии влияния внутреннего сопротивления источника питания.

На рис. 3 показаны формы вычисленного (более плавная кривая) и измеренного фазного (более ломаная кривая) токов при разгоне двигателя на частоту вращения 800 об/мин.

Полученные характеристики показывают высокую степень адекватности разработанного наблюдателя тока.

Снижение погрешности координатного преобразования для тестируемого типа двигателя 2ДВМ115 может быть достигнуто использованием датчика тока с большей разрешающей способностью.

Для сравнения возможностей электропривода с непосредственным и косвенным измерением токов, определяющих момент двигателя, проведена оценка точностных показателей электропривода при его различной конфигурации. Результаты экспериментов приведены на рис. 4 и рис. 5.

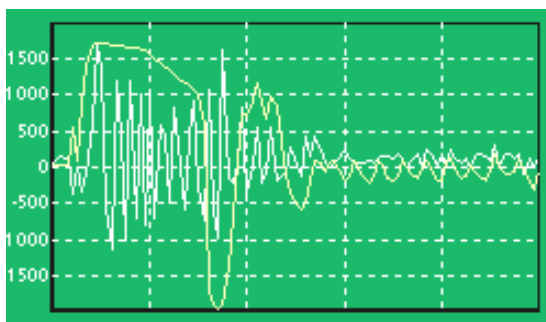


Рис. 3. Наблюдаемый ток и ток одной из фаз двигателя (разгоне на 800 об/мин)

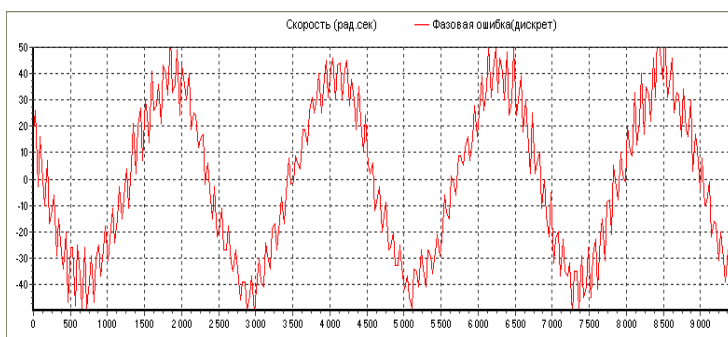


Рис. 4. Фазовая ошибка электропривода при непосредственном измерении тока при частоте вращения 10 об/мин

Из анализа данных, приведенных на рис. 4, следует, что при управлении по непосредственно измеренному току статорных обмоток БКД, коэффициент неравномерности скорости равен 0.3 при фазовой ошибке 22 мрад. Это обусловлено погрешностью координатного преобразования, определяемого малой разрешающей способностью измерителя тока.

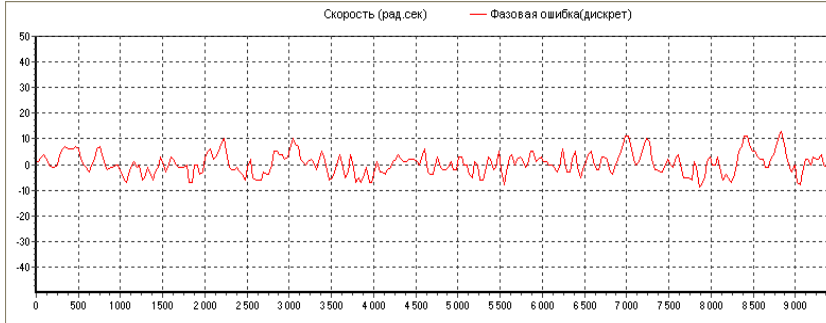


Рис. 5. Фазовая ошибка электропривода при косвенном измерении тока при частоте вращения 10 об/мин.

Обработка результатов, представленных на рис. 5, полученных при косвенном измерении показывает, что неравномерность скорости составляет всего лишь 0.07 при фазовой ошибке 3.9 мрад, что значительно превосходит результаты, полученные при непосредственном измерении тока (рис. 5).

*Киселев Александр Анатольевич*  
 ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 E-mail: kaa\_alp@mail.ru

УДК 621.9

Д.А. БЕКТАШОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
 E-mail: bekaterina@mail.ru

### **Разработка блок-схемы алгоритма для написания программы ЭВМ при определении параметров экспоненциального закона**

**Аннотация.** Решение большинства задач, связанных с оценкой уровня надежности технологического оборудования применяемого в энергетике, режущего инструмента и т.д., всегда сопряжено со сбором статистических данных об

отказах, возникающих в процессе эксплуатации. Для того, чтобы установить закон распределения наблюдаемой случайной величины и определить его основные параметры необходимо произвести огромное количество расчетов. Для экономии времени создаются алгоритмы и программы расчетов для обработки всех данных и установлении законов распределения с использованием ЭВМ.

**Ключевые слова:** блок - схема, экспоненциальный закон.

D.A. BEKTASHOV, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: [bekaterina@mail.ru](mailto:bekaterina@mail.ru)

### **Implementation of the tasks of statistical data and determining the main parameters of reliability for the exponential distribution of the observed random variables on a computer**

**Abstract.** Most of the tasks related to assessing the reliability of process equipment used in the power industry, cutting tools, etc., is always associated with the collection of statistical data on failures occurring during use. In order to establish the distribution of the observed random variable and define its basic parameters necessary to make a huge number of calculations. To save time, algorithms and software for the calculation of all the data processing and the establishment of distributions using computers.

**Key words:** block - scheme, the exponential law.

Экспоненциальный закон распределения находит широкое применение при решении практических вопросов надежности. Этому виду распределения подчиняется наработка на отказ ремонтируемых и неремонтируемых изделий при рассмотрении внезапных отказов, а также время безотказной работы сложных систем, прошедших период приработки и состоящих из элементов с различной интенсивностью отказов.

Процесс подготовки задачи для решения с помощью ЭВМ состоит из следующих основных этапов:

- математическая формулировка задачи;
- выбор метода вычисления;
- разработка блок-схемы алгоритма;
- составление программы;
- подготовка исходных данных;
- перенос программы и исходных данных на носители информации;
- формирование задания с помощью операторов языка управления;
- отладка программы, заключающаяся в обнаружении и устранении ошибок, допущенных на всех предыдущих этапах.

На этапе математической формулировки условие задачи задается в виде уравнений или формул, необходимых для ее решения.

На этапе выбора метода вычислений математическая формулировка преобразуется в процедуру решения задачи, представляющую собой последовательность действий и логических связей между ними.

Математическая формулировка и выбор метода вычисления являются основой при разработке *алгоритма* - некоторой конечной последовательности предписаний (правил), однозначно определяющих процесс преобразования исходных данных в результаты решения задачи. Для наглядного изображения алгоритмов используют схемы – последовательность блоков, предписывающих выполнение определенных функций и связей между ними. Внутри блоков указывается поясняющая информация, характеризующая выполняемые ими действия [2].

Составление программы на алгоритмическом языке заключается в разработке последовательности команд, реализующих алгоритм решения задачи. Реализация команд осуществляется с помощью операторов.

Общую задачу обработки статистических данных можно разбить на ряд частных задач:

- определение величины частного интервала;
- построение интервального вариационного ряда и определение частоты попадания случайной величины в частный интервал;
- расчет накопленных частот и частостей;
- расчет числовых характеристик распределения;
- расчет всех параметров экспоненциального закона распределения;
- построение графических зависимостей.

Задача определения величины частного интервала относится к алгоритмам циклической структуры.

Для организации цикла необходимо выполнять следующие условия:

1. Перед входом в цикл задать начальное значение параметра (переменной), изменяющегося в цикле. Это производится с помощью операторов задания начальных параметров, чаще всего с помощью операторов присвоения.

2. Вычислить в цикле текущее значение параметра цикла (с помощью операторов присвоения).

3. Проверить условия повторения или окончания цикла (с помощью логического выражения).

4. Управлять циклом, то есть переходить к его началу, если цикл не завершен, или выходить из него (с помощью управляющего оператора).

Алгоритм программного расчета уровня надежности состоит из следующих модулей:

- модуль организации начала работы (блок 1); модуль ввода данных (блок 2);
- модуль формирования массива данных из введенного вариационного ряда (блоки 3,4);
- модуль определения параметров разброса значений ряда (блоки 5,6);
- модуль расчета частоты попадания случайной величины в частотный интервал (блоки 7-14);
- модуль расчета частотности попадания случайной величины (блоки 15,16);
- модуль расчета накопленной частности (блоки 17,18);
- модуль расчета средних значений интервалов ряда (блоки 19,20)
- модуль расчета средней наработки на отказ (блоки 21-27);
- модуль расчета среднеквадратического отклонения (блоки 28-37);
- модуль определения закона распределения (блоки 38-39);
- модуль расчета интенсивности отказов (блок 40);
- модуль расчета вероятности безотказной работы (блоки 41-42);
- модуль расчета вероятности отказов (блоки 43-44);модуль расчета параметра потока отказов (блоки 45-46).

В результате проведенных исследований была реализована задача по обработке статистических данных после проведения эксперимента, построена блок – схема, рассмотрен алгоритм и написана программа для определения экспоненциального закона распределения наблюдаемой случайной величины с помощью ЭВМ.

Эта программа позволяет рассчитать основные параметры надежности, а именно: вероятность безотказной работы, вероятность отказа, параметр потока распределения, интенсивность отказов и построить соответствующие графические зависимости.

### Литература

1. **Пирогов, К.М.** Основы надежности текстильных машин / К.М. Пирогов, С.А. Егоров. Учебное пособие для вузов. Иваново: ИГТА, 2004 г. – 268 с.
2. **Вяткин, Б.А.** Практикум по методам оценки эксплуатационной надежности текстильных машин. Учебное пособие. Иваново: ИВТИ, 1994 г. - 140 с.
3. **Бекташов, Д.А.** Исследования надежности механических систем чистового формообразования деталей машин энергетических устройств / Д.А. Бекташов, А.А. Крапостин. Вестник ИГЭУ, выпуск № 2: Иваново: ИГЭУ, 2012 г. – с. 34 - 36.
4. **Бекташов, Д.А.** Определение основных параметров надежности минералокерамического режущего инструмента / Д.А. Бекташов, А.А. Крапостин. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Выпуск №5: Орел, ГУУНПК, 2012 г. – с. 94-98.

*Бекташов Дмитрий Алиевич*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
E-mail: bekaterina@mail.ru



## СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ»

УДК 519.178

А.Л. АЛЫКОВА, к.т.н., доцент  
Г.В. ЧЕКАН, старший преподаватель  
М.А. ЛОБАНОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: w-308@yandex.ru*

### **Оценка эффективности алгоритмов расчета показателей надежности технических систем**

**Аннотация.** Предложено эффективное развитие топологического метода для систем, функционирование которых описывается многосвязным графом переходов и состояний. Разработан алгоритм определения показателей надежности технических систем, в основе которого лежит модифицированный топологический метод. Доказана его эффективность по сравнению с другими методами.

**Ключевые слова:** надежность систем, топологический метод, граф, алгоритм.

A.L. ALYKOVA Candidate of Engineering, docent,  
G.V. CHEKAN senior Teacher,  
M.A. LOBANOV student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: w-308@yandex.ru*

### **Estimation of efficiency of algorithms of account of reliability indexes of engineering systems**

**Abstract.** Effective development of the topological method for the systems which functioning is presented by a multiply connected transition graph and conditions is offered. The algorithm of definition of reliability indexes of engineering systems in which basis the inoculated topological method lays is developed. Its efficiency in comparison with other methods.

**Keywords:** reliability of systems, a topological method, the graph, algorithm.

Топологический метод очень удобен для определения показателей надежности технических систем, описанных графами типа “дерево”, так как не требуется составлять и решать сложные системы уравнений, а все показатели надежности можно определить непосредственно из самого графа.

Финальная вероятность для  $i$ -го состояния определяется как [1]:

$$P^{(i)} = \frac{B_{mi}}{\sum_{i=1}^n B_{mi}}, \quad (1)$$

где  $n$  – число узлов графа,  $B_{mi}$  – произведение интенсивностей переходов из всех крайних свободных узлов в узел, соответствующий  $i$ -му состоянию системы при перемещении в направлении стрелок.

Однако, большинство восстанавливаемых технических систем с неравнонадежными элементами, избыточные системы и системы с приоритетным обслуживанием описываются многосвязными графами. В этих случаях в графе может быть несколько путей в  $i$ -е состояние из начального и конечных отказных состояний.

Существующий алгоритм определения показателей надежности технических систем, описанных такими графами, с использованием топологического метода подразумевает преобразование сложного многосвязного графа в совокупность простых графов типа “дерево” [1], что весьма трудоемко даже для графов малой размерности. Для графов большой размерности (десятки и сотни состояний) этот подход использовать не целесообразно в принципе. Поэтому было проведено развитие топологического метода. Модифицированный топологический метод, дополненный алгоритмом выбора пути, при наличии нескольких альтернатив представлен в [2]. Данный алгоритм предлагает при формировании расчетных выражений при наличии альтернативы выбирать путь, имеющий больший удельный вес.

Для удобства и автоматизации оценки надежности была создана программная оболочка DoRI\_CL [3], общий вид интерфейса которой представлен на рис. 1. Ее отличительной особенностью является программная реализация комплексного подхода к оценке надежности технических систем, описанных многосвязными графами переходов и состояний с использованием как модифицированного топологического метода [2], так и теории Марковских процессов [1].

В первом случае реализуется модифицированный топологический метод, основанный на поиске путей, имеющих больший удельный вес при формировании расчетных выражений, а во втором - по графу переходов и состояний составляется система уравнений для нахождения требуемых показателей надежности и производится ее решение методом Гаусса.

В качестве примера была рассмотрена реальная техническая система (участок распределительной электрической сети). Для нее проведен вычислительный эксперимент с целью выявления наиболее эффективного алгоритма расчета показателей надежности. В ходе эксперимента оценивалось время расчета показателей надежности, на рис. 2 приведена наглядная иллюстрация сравнения эффективности предложенного алгоритма (модифицированный топологический метод) по отношению к эталонному (теория Марковских процессов). Стоит

также отметить, что погрешность расчетов с использованием модифицированного топологического метода практически не повлияла на результаты и по отношению к эталонному составила  $4,6 \cdot 10^{-6} \%$ .

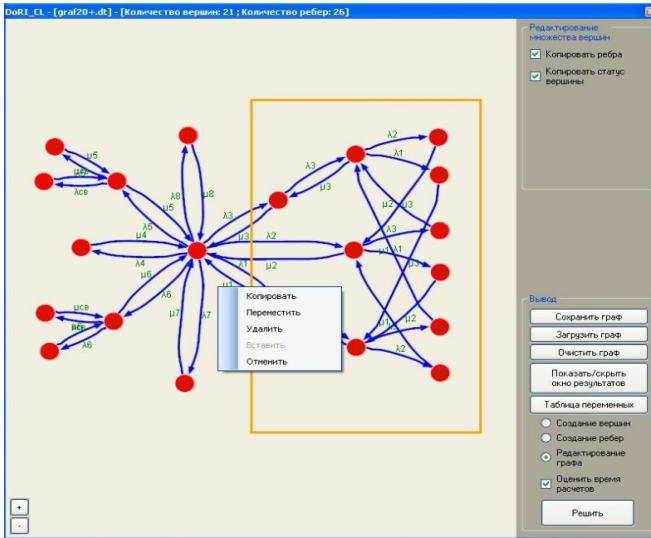


Рис. 1. Общий вид интерфейса программы DoR1\_CL

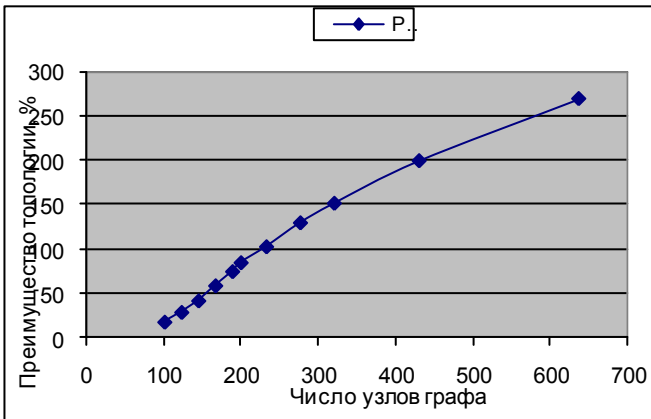


Рис. 2. Оценка эффективности модифицированного топологического метода

Для графов, содержащих менее 100 узлов сравнение не объективно, так как время расчета каждым методом менее 10 мс.

Анализируя полученные результаты можно увидеть, что предложенный алгоритм показывает наибольший прирост производительности расчетов при увеличении числа узлов графа со 100 до 400. Дальнейшее увеличение размерности задачи носит исключительно академический интерес, и не рассматривалось в связи с резким увеличением продолжительности времени расчетов.

Созданный программный продукт позволяет эффективно рассчитывать показатели надежности реальных технических систем, функционирование которых может быть описано графами переходов и состояний.

### Литература

1. **Половко А.М., Гуров С.В.** Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. / – СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 704с.
2. **Чекан Г.В.** Развитие топологического метода для комплексного подхода к определению показателей надежности технических систем // Вестник ИГЭУ / Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново. – 2014. – Вып. 5. – С. 51-57.
3. **Чекан Г.В., Лобанов М.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Расчет показателей надежности технических систем» (DoRI\_CL) №2015611559. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 января 2015 г.

*Алыкова Алеетина Леонидовна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: alla@poks.ispu.ru

*Чекан Георгий Васильевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: w-308@yandex.ru

*Лобанов Максим Андреевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: kingcss@mail.ru

УДК 519.35

С.В. АНИСИМОВ, к.т.н, доцент

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

### Изменения классической модели инвестирования

Используем для максимизации прибыли многофилиальной фирмы за определённый период времени модель инвестирования [1], основанной на классической задаче динамического программирования.

Изменение классической модели связано со следующими особенностями:

1. обеспечение наиболее эффективного использования фиксированной суммы инвестиций при оптимизации распределения её по разным филиалам: для  $n$  филиалов  $n-1$  – факторной моделью;

2. учёт сезонного характера работ, отражённый в прибыли фирмы по рентабельностям филиалов: например, сезонная рентабельность по кварталам  $R_p(n, m)$  имеет следующий вид (рис. 1, где  $n$  – количество оборудования,  $m$  – номер сезонного периода):

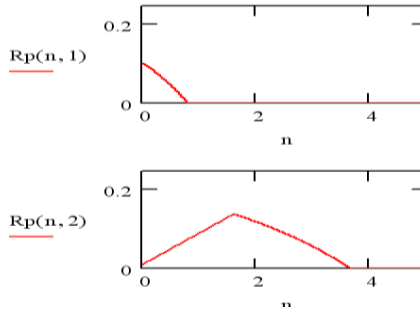


Рис. 1. Графики рентабельности продукции в 1 и 2 кварталах

3. учёт «остаточного инвестирования», определяемого аккумулируемым инвестициям предыдущих периодов:

4. оптимизация общей суммы инвестиций за определённый период времени при решении задачи динамического программирования с учётом 1÷3 изменений;

5. учёт ценовой политики фирмы за счёт её многовариантной стратегии развития.

#### Литература

1. Анисимов С.В. Особенности матмоделирования распределения инвестиций. М.: Алев, Вестник №20, 2013.

УДК 378.14:004.588

А. А. БОЙКОВ, доцент

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

*E-mail: albophx@mail.ru*

### Машинная проверка задачи построения чертежа

**Аннотация.** Показан алгоритм автоматизированной проверки задания на построение чертежа детали в курсе инженерной графики.

**Ключевые слова:** автоматизированная обучающая система, автоматизированная проверка решений, графический тренажер, инженерная графика.

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: [albophx@mail.ru](mailto:albophx@mail.ru)

## Automated check of the solution to the task of making drawings

**Abstract.** Algorithm of automated check of the solution to the task of making drawings for engineering drawing course is shown.

**Key words:** automated training system, automated check, graphical exercise machine, graphical trainer, engineering drawing.

Проверка графических заданий в курсе инженерной графики весьма трудоемка. Поэтому актуальна разработка способов машинной проверки графических задач. Это, в частности, призвано экономить время преподавателя для проверки задач творческих за счет автоматизации проверки задач типовых. В предыдущих работах [1, 2] было показано применение автоматизированной системы для проверки ряда задач начертательной геометрии. В настоящей статье рассмотрим организацию автоматизированной проверки задачи построения чертежа по заданию. Правильно выполненный чертеж подразумевает три уровня проверки: 1) адекватность модели определяется выбором числа изображений, главного вида и соответствием их форме объекта, 2) правильность типа размеров и их нанесения, 3) правильность оформления. Такое разделение задачи подразумевает ступенчатую обработку чертежа [3].

На вход системы поступает совокупность параметризованных примитивов (линий, надписей и др.). Нормализация склеивает линии одного типа в полилинии, объединяет группы отрезков и стрелок с надписями в размерные блоки, стрелки взгляда и мультивыноски. Цель этапа – очистить набор примитивов от «шума».

Не берясь на решение задачи проверки в общем, ограничимся чертежами без сложных разрезов, без линий обрыва внутри длинных видов. Выделение видов производится в следующем порядке: 1) примитивы (без размеров, мультивыносок, надписей) разделяются на связанные группы (рис. 1, 1); 2) анализируются надписи и характерные («А-А», «Б (п:т)», «В») относятся к ближайшей группе (рис. 1, 2); 3) для групп без обозначения устанавливается соответствие по линиям связи (рис. 1, 3); 4) из групп выделяются совмещенные изображения (рис. 2); 5) для видов с обозначением ищется значок образования (стрелка взгляда, выносной элемент); 6) связанные проверяются по габаритам.

На выходе формируется структура изображений, корнем которой является главный вид. Используется классификатор: **F\_VIEW** (код 1) – вид; **F\_SECTION** (код 2) — сечение; **F\_CUT** ( $F\_VIEW+F\_SECTION=3$ ) – разрез; **F\_PARTIAL** (код 4) – ограничен линией обрыва, «местный»; **F\_OVERLAP** (код 8) – наложенный ( $F\_CUT+F\_OVERLAP=11$  – совме-

щенный разрез); **F\_LINKED** (код 16) – в проекционной связи ( $F\_VIEW+F\_PARTIAL+F\_LINKED=21$  – местный вид в проекционной связи); **F\_SIGNED** (код 32) – с обозначением ( $F\_VIEW+F\_SIGNED=33$  – вид по стрелке). Для рис. 1 будет сформирована структура:

*главный вид ( $F\_VIEW$ )*

*|-- совмещенный разрез ( $F\_CUT+F\_OVERLAP$ )*

*|-- вид сверху ( $F\_VIEW+F\_LINKED$ )*

*|-- вид слева ( $F\_VIEW+F\_LINKED$ )*

*| |-- вид сзади ( $F\_VIEW+F\_LINKED$ )*

*|-- сечение B-B ( $F\_SECTION+F\_SIGNED$ )*

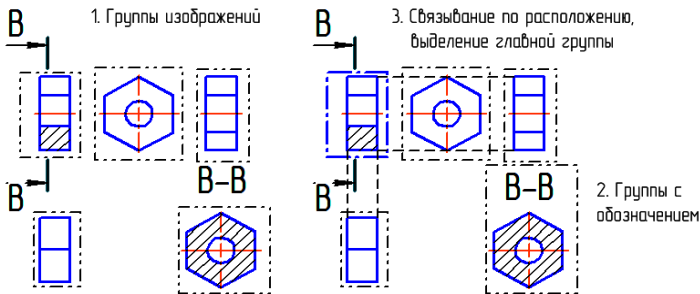


Рис. 1. Выделение структуры видов

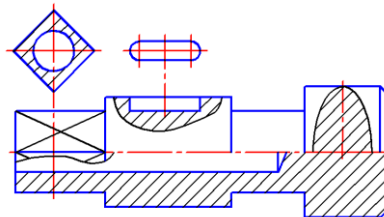


Рис. 2. Совмещенные изображения

Проверка моделей (решения А и Б) производится на основе эталона (рис. 3, справа). В нем хранятся изображения с весами для каждого в качестве главного вида (1-5 – ожидаемые на чертеже изображения, в скобках – веса, тонкие линии – необязательные, в примере: 1, 2 и 4 – обязательны, а 5 – альтернатива вида 2). Сравнивая главное изображение пользователя с каждым эталонным, находится подходящий и считается показатель соответствия. Если он ниже порогового значения, сообщается об ошибке выбора главного вида. Далее система производит поиск каждого изображения из эталона с маркером обязательности. Система отыскивает вариант сопоставления с самым высоким показателем. Система также «штрафует» за наличие «лишних» видов (например, при наличии и вида 1, и разреза 4) и частей изображения.





ученых, 16 апреля 2014 г., г. Иваново: Материалы конференции. – Иваново: УИУНЛ ИГЭУ. – 2014. – т.5. – С. 363–364.

*Бойков Алексей Александрович,*  
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
E-mail: alborph@mail.ru

УДК 621.787.

М.Ю. ВОЛКОВА, к.т.н., доцент,

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

### **Использование информационных систем для повышения качества образовательного процесса**

**Аннотация.** Рассматриваются возможности электронного учебника при подготовке учебно-научных и творческих студенческих работ. Отмечено, что качество учебного процесса напрямую зависит от применения целого комплекса средств компьютерных технологий.

**Ключевые слова:** информационные системы, мультимедийные ресурсы, компьютерные технологии

M. Y. VOLKOVA, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: margaret\_wolf@mail.ru

### **Information systems using for improving the educational process quality**

**Annotation.** The article deals with the electronic textbook possibility in educational and scientific and creative student work preparing. It is noted that the quality of the educational process depends on the application of a whole complex of computer technologies' means.

**Key words:** information systems, multimedia resources, computer technologies.

Использование информационных систем, мультимедийных ресурсов и компьютерных технологий для обработки, передачи, систематизации информации, создания базы данных, презентации результатов образовательной деятельности, позволяет успешно решать практические задачи прикладного характера в широком спектре разнообразных профессиональных ситуаций. Сегодня неотъемлемой частью современной методики обучения являются информационные и коммуникационные технологии (ИКТ), использующие широкий арсенал цифровых образовательных ресурсов. Качество современного учебного процесса напрямую зависит от применения целого комплекса средств ИКТ.

Педагогические технологии функционируют и в качестве науки, исследующей наиболее рациональные пути обучения, и в качестве системы способов, принципов и регулятивов, применяемых в обучении, и в качестве реального процесса обучения. К вопросам улучшения качества образования можно отнести культуру оформления студенческих работ, рефератов, научных докладов и публикаций.

Компьютер повсеместно используется на всех этапах образовательного процесса: как при подготовке семестровых заданий, так и в процессе самостоятельной или научной работы студентов.

Создание электронных учебников при этом позволяет расширить потенциал образовательных услуг и облегчить процесс понимания взаимосвязей различных дисциплин. Использование потенциала программ создания электронных учебников дает не только возможность расширенного доступа к передаче информации, но и возможность обратной связи и контроля усвоенного материала. Это немаловажный факт, направленный на улучшение качества образования студентов как очной, так и заочной форм обучения.

На протяжении всего периода обучения студенты выполняют множество графических, письменных учебно-научных и творческих работ. Результатом любой учебной и научной деятельности студентов является не только разработка, но и оформление различных научных студенческих работ, в том числе научных рефератов, докладов, курсовых работ (проектов).

Методический подход для решения конкретных задач при подготовке тех или иных учебно-научных и творческих работ различен, но методологические основы являются общими для всех работ студенческой научной направленности, равно как и правила оформления этих работ.

Исследование возможностей электронного учебника для улучшения качества образования при изучении «Microsoft Office» **проводилось на основе программы Help & Manual.**

**Выявлено что возможности** программы **Help & Manual** позволяют осуществлять быстрый доступ к учебным и презентационным материалам по конкретной тематике. Главным преимуществом программы является ее универсальность. С ее помощью можно получить файл справочной информации в любом из наиболее распространенных на сегодняшний день форматов (CHM, HLP, HXS, HTML, PDF, RTF, EXE, XML). Интуитивно понятный интерфейс делает программу простой в освоении. Основной блок программы составляет текстовый редактор, мало отличимый от MS Word как по интерфейсу, так и по количеству возможностей. Интерфейс состоит из двух областей. Первая – это панель Navigation с древовидной структурой содержания файла. Вторая – редактор страниц.

В дереве задается вся структура файла содержания, так как его будет видеть пользователь. Здесь задаются заголовки папок и страниц.

Для каждого элемента дерева можно задать собственную иконку и статус. В зависимости от статуса элемент выделяется своим цветом (желтый – редактируется, голубой – требует доработки, белый – готов), тем самым делая работу по наполнению страниц более наглядной.

Редактор страниц состоит из трех закладок: Topic Options (опции), Page Editor (редактор страницы), XML Source Code (исходник в формате XML).

На первой закладке определялись основные параметры текущей страницы: идентификатор страницы, идентификатор окна, в котором она будет открываться, ключевые слова, якорь по умолчанию, компиляторы, включающие данную страницу в конечный файл.

Вторая закладка – это непосредственно сам редактор, на котором пользователь пишет текст, форматирует его, добавляет таблицы, рисунки, медиафайлы, ссылки, якоря и прочее.

Третья закладка – это исходный текст страницы в формате XML. При желании имеется возможность редактировать страницу прямо в исходнике или добавлять код, который невозможно ввести с помощью редактора (хотя такое трудно себе представить).

Якорем в программе служит невидимая метка в тексте страницы, к которой будет осуществляться переход по ключевому слову или по гиперссылке. Добавляя якорь, мы указываем для него идентификатор и ключевые слова. Все ключевые слова, указанные как целиком для страниц, так и для якорей, будут выводиться на странице "Указатель (Предметный указатель, Index) сгенерированных файлов помощи". Щелкнув по выбранному ключевому слову, будет осуществлен переход к объекту, на который то ссылается: страницу или якорь.

Для вставки в электронный учебник рисунков использовались программы-адапторы «Microsoft Office Word», «**Paint**».

Кроме того, электронный учебник позволяет, пользуясь использованием различных ссылок (рис.1) (таких как система «якорей») находить путь к самой программе «**Help & Manual**». Это дает возможность уже в рамках программы объяснять различные манипуляции с созданными или создаваемыми изображениями, корректировать их. В тексте электронного учебника можно использовать ссылки и на другие программы. Например, программы 3D-MAX.

В результате рассмотрения принципов работы с программой «Microsoft Office Word» выполнялись методические разработки направленные на качество подготовки студентов при изучении графических дисциплин. Кроме того, методические разработки позволяют совершенствовать учебный процесс в направлении самостоятельной и научной деятельности студентов.

Работа с различными инструментами и панелями параметров дала возможность закреплять полученные теоретические знания и стремиться к самосовершенствованию при изучении программ **Help & Manual** и 3Ds Max.



УДК 517.53

Б.С. ЗИНОВЬЕВ, к.ф.-м. н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34.  
E-mail: higher@math.ispu.ru (ISPU)

### Интегральные формулы с ядрами Бергмана для некоторого класса функций и мер для круга

Пусть  $U(0, R) = \{z : |z| < R\}$  – круг в  $\mathbb{C}^1$ . Рассмотрим функции вида

$$f(z) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} a_{\alpha} z^{p\alpha+m}, \quad (1)$$

$p = 1, 2, \dots$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$  голоморфные в замкнутом круге  $\overline{U(0, R)}$ .

Зададим в круге стандартную меру

$$d\lambda = \frac{1}{2\pi i} d|\zeta|^2 \frac{d\zeta}{\zeta} \quad (2)$$

и будем искать ядра Бергмана  $K(z\zeta^{-})$  для этого класса функций в интегральной формуле

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \iint_{|\zeta| \leq R} f(\zeta) K(z\zeta^{-}) d|\zeta|^2 \frac{d\zeta}{\zeta} \quad (3)$$

Ядра  $K(z\zeta^{-})$  надо искать в виде ряда

$$K(z\zeta^{-}) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} b_{\alpha} (z\zeta^{-})^{p\alpha+m} \quad (4)$$

Тогда

$$\begin{aligned} f(z) &= \sum_{\alpha=0}^{\infty} a_{\alpha} z^{p\alpha+m} = \frac{1}{2\pi i} \iint_{|\zeta| \leq R} \left( \sum_{\alpha=0}^{\infty} a_{\alpha} \zeta^{p\alpha+m} \right) \left( \sum_{v=0}^{\infty} b_v (z\zeta^{-})^{pv+m} \right) d|\zeta|^2 \frac{d\zeta}{\zeta} = \\ &= [\alpha = v] = \sum_{\alpha=0}^{\infty} a_{\alpha} \left[ b_{\alpha} \frac{1}{2\pi i} \iint_{|\zeta| \leq R} (|\zeta|^2)^{p\alpha+m} d|\zeta|^2 \frac{d\zeta}{\zeta} \right] z^{\alpha p+m} = \\ &= \sum_{\alpha=0}^{\infty} a_{\alpha} \left[ b_{\alpha} \int_0^R (|\zeta|^2)^{p\alpha+m} d|\zeta|^2 \right] z^{p\alpha+m} \text{ и} \\ & b_{\alpha} = \frac{p\alpha + m + 1}{(R^2)^{p\alpha+m+1}}. \end{aligned}$$

Далее просуммируем ряд

$$K(z\bar{\zeta}) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} \frac{p\alpha + m + 1}{(R^2)^{p\alpha + m + 1}} (z\bar{\zeta})^{p\alpha + m} =$$

$$= \left[ \frac{z\bar{\zeta}}{R^2} = x \right] = \frac{x^m x^p (p - m - 1) + m + 1}{R^2 (1 - x^p)^2} = K(x) \quad (5)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи:

$$1. m = 0, K(x) = \frac{x^p (p - 1) + 1}{R^2 (1 - x^p)^2}; \quad (6)$$

$$2. m = 0, p = 1. K(x) = \frac{1}{R^2} \frac{1}{(1 - x)^2}; \quad (7)$$

$$3. m = 0, p = 2. K(x) = \frac{1}{R^2} \frac{x^2 + 1}{(1 - x^2)^2}; \quad (8)$$

$$4. m = 1, p = 2. K(x) = \frac{x}{R^2} \frac{2}{(1 - x^2)^2}; \quad (9)$$

Далее рассмотрим случай, когда

$$f(z) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} a_{\alpha} z^{p\alpha} \quad (10)$$

и мера  $d\lambda = \frac{1}{2\pi i} |\zeta|^m d|\zeta| \frac{d\zeta}{\zeta}$  – более общая мера на  $\overline{U(0, R)}$ .

Тогда

$$b_{\alpha} = \frac{2\alpha p + m + 1}{R^{2\alpha p + m + 1}} \quad (11)$$

и ядра Бергмана имеют вид

$$K(z\bar{\zeta}) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} \frac{2\alpha p + m + 1}{R^{2\alpha p + m + 1}} (z\bar{\zeta})^{\alpha p} =$$

$$= \frac{1}{R^{m+1}} \left( 2px^p \frac{1}{(1 - x^p)^2} + \frac{m+1}{1 - x^p} \right). \quad (12)$$

### Литература

1. **Шабат Б.В.** Введение в комплексный анализ, ч. 1 / Б.В. Шабат – Ф.М., Москва, 1976.
2. **Зиновьев, Б.С.** Избранные вопросы теории голоморфных функций одного комплексного переменного / Б.С. Зиновьев, Д.И. Коровин, Ю.И. Масляков – Иваново, ИГЭУ, 2013.
3. **Зиновьев, Б.С.** Элементы комплексного анализа, теория и практика / Б.С. Зиновьев – Иваново, ИГЭУ, 2014.

УДК 004.9

С.В. КОСЯКОВ, д.т.н., профессор,  
А.М. САДЫКОВ,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: ksv@ispu.ru*

### **Метод построения в ГИС тематических карт стоимости технологического присоединения потребителей к сетям водо- и газоснабжения**

**Аннотация.** Показаны метод и алгоритм автоматического построения в ГИС тематической карты по критерию стоимости присоединения потребителя к трубопроводным сетям с учетом имеющихся препятствий для прокладки новых трубопроводов имеющихся резервов мощности.

**Ключевые слова:** ГИС, стоимость технологического присоединения, тематическая карта.

S.V. KOSYAKOV Doctor of Engineering, professor,  
A.M. SADYKOV senior Teacher

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: ksv@ispu.ru*

### **The method of the thematic maps generating for the cost of consumers technological connection to the gas and water networks**

**Abstract.** It is shown a method and algorithm of the thematic maps generating in the automatic mode in GIS for the cost of consumers technological connection to the gas and water networks.

**Keywords:** GIS, consumers technological connection, thematic map

При выборе мест размещения новых объектов в городах инвесторам приходится учитывать множество различных территориальных факторов. Одним из таких факторов является стоимость присоединения потребителей к инженерным сетям (электрическим, водопроводным, газовым и другим). Величина этих затрат и их относительный вес в общей стоимости проектов могут составлять значительную долю затрат на строительство

объекта. При этом стоимость присоединения существенно зависит от характеристик сети в месте подключения. В этих условиях инвесторам важно видеть и сопоставлять оценки стоимости присоединения ко всем видам инженерных сетей во всех потенциальных местах размещения объектов. Такие оценки могут быть рассчитаны и представлены в сети Интернет в виде тематических карт, как показано в [1]. Однако построить карту города, отображающую прогнозируемые затраты на подключение объектов разной мощности к инженерным сетям с учетом конкретных территориальных факторов довольно сложно.

В статье [2] предложен метод построения тематических карт зонирования территории по стоимости подключения к электрическим сетям. Новизна метода заключается в использовании моделей и алгоритмов автоматического построения на карте территории прогнозируемых маршрутов прохождения ЛЭП к потенциальным местам присоединения. При этом расчет стоимости включает стоимость строительства новых ЛЭП и затраты на увеличение мощностей в местах присоединения. Формула для расчета получена на основе методик, утвержденных федеральной службой по тарифам РФ, и имеет вид:

$$Z = c_1 l + c_2 N, \quad (1)$$

$c_1$  — стандартизированные тарифные ставки на покрытие расходов на строительство единицы длины новых линий сети;

$l$  — протяженность строящейся линии;

$c_2$  — стандартизированные тарифные ставки на покрытие расходов на строительство единицы новых мощностей в местах присоединения;

$N$  — величина недостатка резерва мощности в точке подключения.

Недостаток резерва  $N$  определяется по формуле

$$N = \begin{cases} 0, N^Q \geq N^P \\ N^P - N^Q, N^Q < \end{cases} \quad (2)$$

$N^Q$  — величина доступной резервной мощности в точке подключения к сети;

$N^P$  — величина присоединяемой мощности.

Карта территории, на которой отображены все источники, потребители и препятствия для прокладки новых линий сети, представляется в виде растровой модели. Через каждую ячейку растра по вертикали, горизонтали и диагоналям проходят дуги графа, который используется для поиска кратчайших путей от потенциальных мест размещения потребителей  $P_i$  к существующим источникам  $w_j$ . Выбор варианта присоединения рассматривается как задача двухкритериальной оптимизации. С одной стороны, нужно стремиться выбрать источник  $w_j$  с достаточным резервом мощности  $N^Q$ , чтобы обнулить  $N$  по формуле (2). С другой стороны, нужно минимизировать длину новой линии  $l_j$  в (1) с учетом имеющихся ограничений на конкретном участке местности.

В электрических сетях подключение потребителей обычно производится на электрических подстанциях, которые представляются на



картах точечными объектами, что позволяет применять известные алгоритмы трассировки по растровым моделям территории. В сетях водо- и газоснабжения присоединения осуществляются путем врезки в существующие трубопроводы, которые являются линейными объектами. В этом случае традиционные алгоритмы поиска оптимальных маршрутов между двумя точками оказываются неэффективными. Поэтому для развития метода применительно к сетям водо- и газоснабжения авторами разработан модифицированный алгоритм поиска в ширину на основе алгоритма Дейкстры [3], который осуществляет поиск оптимального способа подключения к линейным источникам ресурса с учетом особенностей решаемой задачи. На псевдокоде этот алгоритм выглядит следующим образом:

```

узел n, n', s
s.стоимость = 0
s.родитель = null // s - стартовый узел
положить s в Q
отметить все wi как нерассмотренные
minz=9999999
пока очередь Q не пуста
  извлечь n из Q // n - узел с наименьшей стоимостью в Q
  если n один из нерассмотренных узлов wi
    отметить wi как рассмотренный
    сконструировать путь и рассчитать zwi
    если zwi<minz
      minz=zwi
      если Nwi>=Np или нет нерассмотренных wi
        zi=minz
        выйти с кодом "успешное завершение"
  для каждого наследника n' узла n
    newcost = n.стоимость + стоимость(n,n')
    если n' находится в Q и n'.стоимость <= newcost
      пропустить n'
    n'.родитель = n
    n'.стоимость = newcost
    если n' не находится в Q
      добавить n' в Q
  выйти с кодом "путь не найден"

```

Этот алгоритм использует очередь просмотренных узлов Q. Он осуществляет поиск оптимального способа подключения для точки возможного размещения объекта  $p_i$ , которая рассматривается как стартовый узел графа  $s$ , одновременно выбирая кратчайший маршрут и конечную точку  $w_j$ , таким образом, чтобы суммарная стоимость присоединения по критерию (1) была минимальной. Изначально значение минимальной стоимости присоединения  $z_i$  для точки  $p_i$  принимается как заведомо большое число. Далее алгоритм выполняет поиск «в ширину» и уменьшает эту стоимость при нахождении источников  $w_i$ . Поиск осуществляется до тех пор, пока не найдется источник мощности с резервом  $Nw_j$ , который превышает требуемую для присоединения мощность  $N^p$ . В этом

случае дальнейший поиск теряет смысл, поскольку все другие варианты будут иметь более длинный путь при отсутствии возможности уменьшения второго слагаемого критериальной функции (1).

Разработанный алгоритм позволяет построить карту распределения по территории прогнозируемой стоимости технологического присоединения к сетям водо- и газоснабжения и разделить всю исследуемую территорию на зоны по величине этой стоимости. С помощью алгоритма была построена карта нормативной стоимости потребителей к газовой сети среднего давления в городе Иваново. Результаты разработки могут быть использованы при создании систем поддержки принятия решений в сфере инвестиционного планирования.

#### Литература

1. **Косяков С.В., Пантелеев Е.Р., Садыков А.М.** Построение и публикация в сети интернет карт зонирования систем электроснабжения территорий// Вестник ИГЭУ, №5, 2012. с. 59-62.
2. **Косяков С.В., Садыков А.М.** Метод зонирования территории по стоимости технологического присоединения к электрическим сетям // «Вестник ИГЭУ», №5, 2013, - С.77-81
3. **Dijkstra, E. W.** A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik, № 1, 1959, p. 269–271.

*Косяков Сергей Витальевич,*

ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина",  
e-mail: [ksv@ispu.ru](mailto:ksv@ispu.ru)

*Садыков Артур Мунавирович,*

ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина",  
e-mail: [amsadykov@gmail.com](mailto:amsadykov@gmail.com)

УДК 681.3

Е.П. МИЛОСЕРДОВ, к.т.н. доцент  
А.А. СИДОРОВ, к.п.н. доцент

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская. 34  
E-mail: [mepal@mail.ru](mailto:mepal@mail.ru)

### Моделирование параметров естественного освещения помещений

**Аннотация.** Приводятся результаты моделирования естественного освещения, выполненного в среде 3D-MAX. Для исследования условий инсоляции были разработаны сцены нескольких видов помещений с различными конфигурациями оконных проемов и различной ориентацией относительно сторон света. По результатам моделирования сделаны выводы.

**Ключевые слова:** инсоляция помещений, естественное освещение, моделирование в 3D-MAX

E.P. MILOSSERDOV, Ph.D. assoc.  
AA SIDOROV, Ph.D. assoc.

Ivanovo State Power University, VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya. 34  
*e-mail: mepal@mail.ru*

## Simulation parameters of natural interior lighting

**Abstract.** The results of the simulation of natural lighting, realized in the framework 3D-MAX. To investigate the conditions insolation were developed several kinds of scenes rooms with different configurations and window openings different orientation relative to the cardinal. On simulation results conclusions.

**Keywords:** insolation areas, natural lighting, modeling in 3D-MAX

Режим освещения служит важным фактором в образовании точного ритма - закономерного чередования периодов покоя и активности. Облучение помещений солнечными лучами (инсоляция) и естественное освещение - важные компоненты микроклимата квартиры. В соответствии с введенными в 2002 году и действующими в настоящее время СанПиН 2.2.1/2.1.1. 1076-01 "Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащите помещений жилых и общественных зданий и территорий" [1] следует обеспечить для одной жилой комнаты 1-3-комнатных и 2 жилых комнат 4-х и более комнатных квартир непрерывную продолжительность инсоляции (ПИ): в северной зоне (севернее 58° с.ш.) - не менее 2,5 часов в день на календарный период с 22 апреля по 22 августа; в центральной зоне (с 58° с.ш. по 48° с.ш.) - не менее 2 часов в день на период с 22 марта по 22 сентября; в южной зоне (южнее 48° с.ш.) - не менее 1,5 часа в день на период с 22 февраля по 22 октября.

Нормами проектирования жилых зданий не допускается такая ориентация квартир, в которых все комнаты выходили бы на одну сторону дома. Это вызвано тем, что северные фасады домов в холодную погоду совсем не облучаются солнцем, а летом получают немного утренних и вечерних «скользящих» лучей, почти не проникающих в помещения.

При недостаточных расстояниях между домами и ориентации их на северо-запад и северо-восток продолжительность инсоляции в период равноденствия меньше трех часов (март-сентябрь). Однако такие случаи ориентации бывают обусловлены сложившейся сеткой улиц городов, повернутой к сторонам горизонта на 45°.

Однако, условия инсоляции для отдельных квартир могут быть значительно ухудшены не только из-за неудачной ориентации домов, но также и неудачной конструкции оконных проемов. Для исследования условий инсоляции в среде 3D-MAX были разработаны сцены нескольких видов помещений с различными конфигурациями оконных проемов и различной ориентацией относительно сторон света. В качестве ис-

точника наружного освещения в моделях выбирался «солнечный свет»: источник параллельного излучения, угол наклона к горизонтальной плоскости и азимутальное направление которого изменялось в зависимости от широты местности, времени суток и дня года [2].

На рис. 1, 2, 3 показаны результаты моделирования по освещению помещения, расположенного на 57 параллели (широта г. Иванова) фасад которого ориентирован на южную сторону и имеющего три больших оконных проема. Приведены данные для 10, 12, и 14 часов дня для дней летнего и зимнего солнцестояния а также в дни весеннего и осеннего равноденствия. Ожидаемое совпадение результатов моделирования для весеннего и осеннего равноденствия подтверждает достоверность используемого метода.

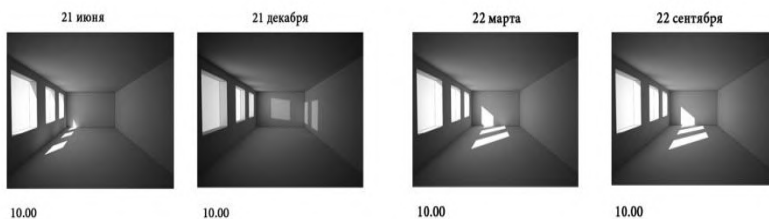


Рис. 1. Освещение помещения для 10 часов утра

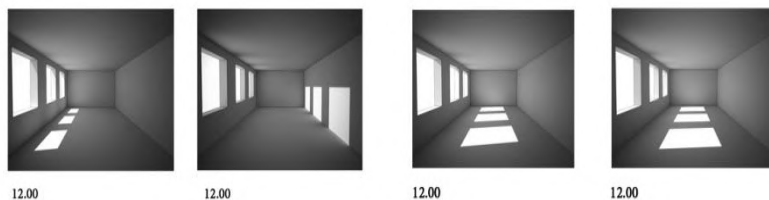


Рис. 2. Освещение помещения для 12 часов утра (полдень)

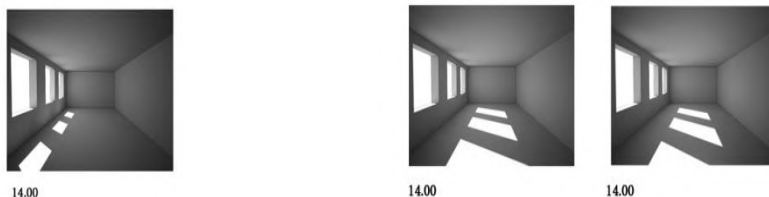


Рис. 3. Освещение помещения для 14 часов дня

Анализируя результаты моделирования можно сформулировать две группы выводов. Первая группа выводов является подтверждением априорных представлений об освещенности помещений, которые

возникли у людей ввиду их жизненного опыта. Значительно больший интерес представляет собой вторая группа выводов – нетривиальные выводы о характере освещенности помещений, имеющие особенности конфигурации оконных проемов и ориентации относительно сторон света. Предварительно можно сформулировать следующие выводы, принадлежащие второй группе:

1. Высокие окна улучшают прохождение лучей и обеспечивают инсоляцию внутри помещений.

2. В относительно узких помещениях инсоляция улучшается за счет освещенности стен. Особенно важно, что это имеет место при небольшом наклоне солнечных лучей, т.е. в зимнее время года.

3. Окна, расположенные на южном фасаде, обеспечивают зимой хорошую инсоляцию за счет глубокого проникновения солнечных лучей, а летом высокий наклон лучей уменьшает освещенность помещений.

4. Окна юго-восточного и юго-западного фасадов обеспечивают летом и зимой хорошую инсоляцию помещений солнечными лучами небольшого наклона.

5. В окна, ориентированные на восток и на запад, во время равноденствия проникают горизонтальные лучи; к летнему солнцестоянию угол падения лучей увеличивается.

6. В окна северо-восточного и северо-западного фасадов солнечные лучи зимой не попадают, зато обеспечивается интенсивная инсоляция весной и осенью.

#### Литература

1. **Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076-01:** Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащите помещений жилых и общественных зданий и территорий: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 19 октября 2001
2. **Хейфец А.Л.** Расчет продолжительности инсоляции средствами 3D-моделирования пакета AutoCAD: сб. науч. тр.: выпуск 7. Екатеринбург. 2004.
3. **Е.П. Милосердов** Расчет продолжительности солнечного освещения «Состояние и перспективы развития электротехнологии» XVII Бенардосовские чтения. III том, Иваново, 2013 стр.404-406
4. **Косо Йожеф.** Квартира, загородный дом. Планировка и дизайн интерьера. Перевод А. Гусева. Издательская группа «Контент», 2006, - 216 с. ISBN 5-98150-077-8

*Милосердов Евгений Павлович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: meral@mail.ru

*Сидоров Андрей Александрович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: andipaint@yandex.ru

УДК 681.3

Е.П. МИЛОСЕРДОВ, к.т.н. доцент  
А.А. СИДОРОВ, к.п.н. доцент

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*e-mail mepal@mail.ru*

### **Алгоритмы расчета инсоляции помещений**

**Аннотация.** Предлагается алгоритм программного расчета солнечного освещения для помещений с произвольной конфигурацией и произвольной ориентировкой фасадов с оконными проемами. Алгоритм основан на расчете теней (световых пятен) от совокупности прямоугольников оконных проемов. Суточное движение солнца, представляется как источник параллельного излучения, направление которого меняется в течении дня в соответствии с широтой местности, временем года и суток.

**Ключевые слова:** инсоляция помещений, естественное освещение, алгоритм расчета.

E.P MILOSSERDOV, Ph.D. Assoc. AA SIDOROV, Ph.D. Assoc.

Ivanovo State Power University. VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya. 34. *e-mail mepal@mail.ru*

### **Algorithms for calculating insolation premises**

**Abstract.** We propose an algorithm for calculating software sunlight for areas with an arbitrary configuration and arbitrary the orientation of the facades with window openings. The algorithm is based on the calculation of shadows (light spots) on the set of rectangles window openings. The daily movement of the sun, represented as parallel radiation source, whose direction varies During the day, in accordance with the latitude, the time of year and days.

**Keywords:** insolation areas, natural lighting, calculation algorithm.

Лучистая энергия солнца в жизни человека имеет большое значение. С гигиенической точки зрения необходимо, чтобы лучи солнца проникали через световые проемы в жилые комнаты и облучали их (разумеется, без излишнего перегрева в теплое время года).

Продолжительность инсоляции для жилых помещений в соответствии с санитарными нормами и правилами должна составлять не менее трех часов в день [1] При проектировании зданий световой климат местности должен учитываться при создании не только нормальных условий для освещения, но и архитектурной композиции, он имеет также технико-экономическое значение (устройство светопроемов, фонарей, эксплуатационные расходы, связанные с расходами на отопление и т.п.). Существующие методы моделирования и расчета солнечного освещения [2,3] ориентированы на расчеты инсоляции с учетом теней от зданий и сооружений, но не приспособлены для расчетов внутри помещений. Учитывая перечисленные обстоятельства разра-

ботка методов расчета инсоляции внутри помещений с заданными конфигурациями стен и оконных проемов представляется важной и актуальной задачей.

Предлагается алгоритм программного расчета солнечного освещения для помещений с произвольной конфигурацией и произвольной ориентировкой фасадов с оконными проемами.

На начальной стадии определяется суточное движение солнца, которое представляется как источник параллельного излучения, направление которого меняется в течении дня в соответствии с широтой местности, временем года и суток [4] Для определения положения Солнца используются соотношения, полученные преобразованием координат из эклиптической системы в геоцентрическую [6]:

$$\begin{aligned} \sin h &= \sin f \sin d + \cos f \cos d \cos t \\ \sin \alpha &= \cos d \sin t \cos f \end{aligned} \quad (1)$$

где  $h$  – высота стояния солнца (угловая),  $f$  – географическая широта,  $t$  – время, выраженное в градусах (часовой угол 1 час = 15 градусов)  $\alpha$  – азимут Солнца,  $d$  – склонение, определяется по соотношению:

$$d = 23,5 \sin \left[ \frac{360}{365} (n - 81) \right], \text{ где } n - \text{ номер дня, } 1 \text{ января} = 1$$

Азимут отсчитывается в южном направлении по часовой стрелке положительные значения.

На втором этапе проводится расчет освещенности внутри помещений. Конфигурация световых пятен в любой момент времени можно представить как параллельную проекцию (тень) оконного проема. Алгоритм основан на расчете теней (световых пятен) от совокупности прямоугольников оконных проемов Расчет освещенности предполагается проводить через заданные промежутки времени, что позволит определить с точностью до заданного промежутка времени как общую продолжительность инсоляции, так и наибольшее значение времени непрерывной инсоляции в течение дня в соответствии с методикой [5]. Для определения конфигурации светового пятна предлагается использовать следующую модель (рис. 1):

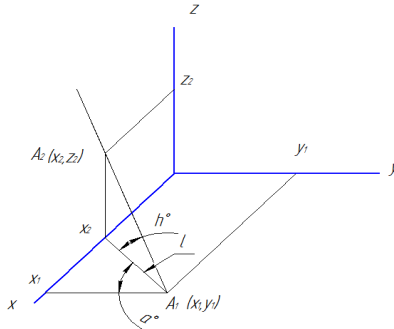


Рис. 1. Модель для определения конфигурации светового пятна

Если считать точку A2 одним из углов прямоугольного оконного проема, то в системе декартовых координат  $x, y, z$  с центром в углу комнаты в заданный момент времени по соотношениям (1) определяются значения углов  $h$  и  $\alpha$ , что позволит определить координаты точки A1:

$$l = \text{ctg}(h)$$

$$x_1 = x_2 + \text{ctg}(h)\sin(\alpha)$$

$$y_1 = z \text{ctg}(h)\cos(\alpha)$$

Учитывая, что параллельная проекция плоского четырехугольника сохраняет параллельность сторон, световые пятна от оконных проемов имеют формы параллелограммов. При малых углах наклона солнца: в зимнее время а также в утренние и вечерние часы в комнатах небольшой ширины световые пятна возникают также на стенах – эти случаи будут исследованы отдельно. Приведенные соотношения получены при южном расположении фасада с оконными проемами : при произвольном расположении фасада с нормальным вектором плоскости окна, повернутым относительно южного азимута на угол  $\beta$  ( по часовой стрелке положительные значения, против часовой – отрицательные, соотношения для расчета координат меняют вид:

$$x_1 = x_2 + z\text{ctg}(h)\sin(\alpha-\beta)$$

$$y_1 = z \text{ctg}(h)\cos(\alpha-\beta)$$

Таким образом, применение полученной расчетной методики открывает возможность разработки расчетных программ инсоляции помещений с произвольной конфигурацией и произвольной ориентировкой фасадов с оконными проемами.

#### Литература

1. **Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076-01:** Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащите помещений жилых и общественных зданий и территорий: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 19 октября 2001
2. **Хейфец А.Л.** Расчет продолжительности инсоляции средствами 3D-моделирования пакета AutoCAD: сб. науч. тр.: выпуск 7. Екатеринбург. 2004.
3. **Бахарев Д.В.** О нормировании и расчете инсоляции / Д.В.Бахарев, Л.Н. Орлова // Светотехника. 2006. № 1. С. 18-27.
4. **Е.П. Милосердов** Расчет продолжительности солнечного освещения «Состояние и перспективы развития электротехнологии» XVII Бенардосовские чтения. III том, Иваново, 2013 стр.404-406
5. **Роджерс Д.** Алгоритмические основы машинной графики: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989.
6. **Кононович Э.В., Мороз В.И.** Общий курс астрономии: Учебное пособие. М.,» Едиториал УРСС»,2004

*Милосердов Евгений Павлович,*  
 ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 e-mail: meral@mail.ru  
*Сидоров Андрей Александрович,*  
 ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,



e-mail: andipaint@yandex.ru  
УДК 681.3

Е.П. МИЛОСЕРДОВ, к.т.н. доцент,  
С.П.ШАРЫКИН,  
А.А. ШИЛКИН, студенты

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская , 34  
E-mail: mepal@mail.ru

## Дискретная геометрическая модель дорожного движения

**Аннотация.** Предложена дискретная модель дорожного движения, в виде сетевого графа, позволяющая исследовать пропускную способность и определять относительное количество автомобилей в пробках в зависимости от интенсивности движения, топологии и реальных геометрических размеров дорожной сети.

**Ключевые слова:** модель дорожного движения, сетевой граф, клеточные автоматы

E.P. MILOSSERDOV Ph.D. Assoc.  
S.P.SHARYKIN, AA SHILKIN students

Ivanovo State Power University. VI Lenin  
153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya, 34. e-mail mepal@mail.ru

### Discrete geometric model traffic

**Abstract.** We propose a discrete model of traffic in the form of network graph, allowing to investigate the capacity and determine the relative number of vehicles in traffic depending on traffic, topology and geometric dimensions of the real road network.

**Keywords:** model road , network graph, cellular automata

В настоящее время весьма актуальными являются задачи моделирования и расчета транспортных потоков, характерных для дорожного движения в условиях больших городов. Математические модели автомобильных потоков могут быть весьма различны: от гидродинамических аналогий типа движения сжимаемой жидкости, описываемых дифференциальными уравнениями с частными производными, до дискретных игровых моделей, где объектам задается индивидуальное поведение при движении по сети улиц с перекрестками. [1]

Для широкого класса рассматриваемых моделей численные решения могут быть получены при переходе к дискретным моделям, в которых дорожные полосы разбиваются на клетки, время меняется дискретно, в каждой клетке может находиться только один автомобиль, скорости движения автомобилей имеют тоже дискретный набор значений, в частном случае одна средняя. Такие модели предложены в 50-х годах прошлого века Дж. фон Нейманом , который дал им название «клеточные автоматы» [2]

Предложена дискретная модель дорожного движения, имеющая следующую структуру:

- узлы графа соединяются двунаправленными ребрами (дорогами) с четным числом полос ( как правило две полосы).

- каждый отрезок дороги имеет заданную длину (количество клеток), соответствующую реальным геометрическим размерам дорожной сети.

- транспортные средства спонтанно появляются в висячих вершинах графа дорожной сети. Частота появления меньше или равна шагу по времени.

- выбор направлений движения (ребер графа) для каждого транспортного средства в узлах сети производится с равной вероятностью.

- движение транспортных средств будет осуществляться по ребрам от узла к узлу до выхода из сети через висячую вершину.

- в каждом внутреннем узле с заданной периодичностью в несколько шагов по времени происходит блокировка движения по отдельным ребрам, связанных с этим узлом ( работа светофоров)

- каждое транспортное средство занимает одну клетку модели и движется по ребру с одной и той же скоростью. Занятая клетка по ходу движения останавливает движение транспортного средства на текущем такте.

Нетрудно показать, что условия движения транспортных средств в данной модели соответствуют методике расчета известных физических моделей – распространению электромагнитных волн в электрических сетях и гидравлических колебаниях в трубопроводных системах. Как известно, для описания этих процессов широко используются системы уравнений математической физики: волновые или гиперболические системы уравнений. Построение разностных схем и поиск численных решений этих уравнений в виде совокупности прямых и отраженных волн [3] (метод Бержерона) позволяет на каждом такте определить количество транспортных средств в каждом ребре графа модели, в том числе и число заблокированных на подходе к узлам и соседних с ними транспортных средств.

Разработана программа для исследования этой модели. Были проведены вычислительные эксперименты по определению зависимости максимального потока транспортных средств от количества появляющихся в модели автомобилей, оценки влияния режимов работы светофоров на транспортные потоки а также на относительное количество автомобилей, находящихся в пробках. Проводились также оценки относительных значений максимально возможного числа автомобилей на ребрах графа при сохранении потоков.

#### Литература

1. **Введение** в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б. Под ред. А.В. Гасникова. — М.:МФТИ, 2010. — 362 с

2. Куликовский А. Г., Погорелов Н. В., Семенов А. Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. – М.: Физматлит, 2001.
3. Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети. Общий графический метод расчета. (Перевод с франц.). – М., Машгиз, 1962. 348 с.

УДК 004.4

Е.Р. ПАНТЕЛЕЕВ, д.т.н., профессор,  
Г.А. МОРОЗ, студент

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

### **Разработка информационной модели гео-ориентированного планирования мероприятий**

**Аннотация.** Предложена информационная модель гео-ориентированного планирования мероприятий, обеспечивающая решение задачи построения нелинейного маршрута с учетом персональных предпочтений и бюджета времени пользователя.

**Ключевые слова:** планирование, маршрут, мероприятие, модель.

G.A.MOROZ, student  
E.R. PANTELEEV, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: moroz@gapps.ispu.ru

### **Development of information model for geo-oriented planning**

**Abstract.** Information model of geo-oriented planning is proposed, providing solution to the problem of constructing a non-linear route taking into account user's personal preferences and time budget.

**Key words:** planning, route, event, model.

В ходе решения задачи планирования последовательности мероприятий, которые привязаны к определенным географическим координатам был выбран генетический алгоритм, который позволит построить маршрут из имеющегося набора точек. Необходимо разработать информационную модель, которая определит набор данных, который содержат точки, используемые для построения маршрута.

Таким образом, разработка информационной модели гео-ориентированного планирования мероприятий является актуальной задачей в рамках рассматриваемой области применения.

- рассмотрение примера задачи, решаемой с помощью рассматриваемого алгоритма;
- определение ключевых данных необходимых для обработки алгоритмом.

В качестве реального примера была рассмотрена задача планирования мероприятий в рамках путешествия из Иваново в Санкт-Петербург. Расстояние между населенными пунктами 891 км. Пользователь желает проехать не больше 1500 км за все путешествие. Его предпочтения: усадьба, наличник, церковь, архитектура, кофе, река, рыбалка.

После этого, определяется некоторая буферная зона на протяжении всего маршрута, в которой производится поиск подходящих мест для данного пользователя. Данные о точках на карте которые могут быть интересны пользователю, выбираются с помощью InstagramAPI, на основании набора данных, который мы можем получить с его помощью и будем строить информационную модель.

На основе InstagramAPI была построена модель состоящая из:

- Координата – широта;
- Координата – долгота;
- Ключевые слова;

Именно с этими основными данными и будет оперировать генетический алгоритм.

Отобрав некоторое количество таких точек, попадающих в буферную зону, будут отобраны наиболее релевантные для данного пользователя, и уже после работы генетического алгоритма, они будут включены в маршрут.

Имеется возможность подключить к каждой точке поле «Комментарии», таким образом, пользователь сможет прочитать отзывы о данном месте, или оставить свой отзыв.

В итоге, для решения поставленной задачи были определены данные, необходимые для обработки алгоритмом и рассмотрен пример постановки задачи. Предполагается учесть все вышеперечисленное при разработке алгоритма.

### Литература

1. Генетический алгоритм. Просто о сложном [Электронный ресурс]. URL: <http://habrahabr.ru/post/128704/>.
2. InstagramAPI. Help. [Электронный ресурс]. URL: <https://instagram.com/developer/>.

*Мороз Григорий*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: moroz@gapps.ispu.ru

*Пантелеев Евгений Рафаилович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: erp@poks.ispu.ru

УДК 004.7:378.1

М.А. НИКОЛАЕВ, студент; А.А. БЕЛОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: Maks113nik@gmail.com*

## **Особенности интеграции информационного портала в образовательной деятельности**

**Аннотация.** Представлена структура информационного портала образовательной деятельности. Показаны особенности программно - аппаратных решений.

**Ключевые слова:** информационный портал, база данных, web - технология.

M. A. NIKOLAEV, student; A. A. BELOV, candidate of engineering, docent  
Ivanovo State Power University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya 34. *E-mail: Maks113nik@gmail.com*

## **Features of informational web-portal integration in educational process**

**Abstract.** In the article the structure of informational web-portal of educational process is presented. Features of hardware and software decisions are presented

**Key words:** Informational web-portal, database, web-technology

Информационный портал рассматривается как интегрированная система, применимая для информационной поддержки любого вида деятельности. В данной работе представлен информационный портал в образовательной деятельности, ограниченный деятельностью отдельной выпускающей кафедры. Применительно к выпускающей кафедре информационный портал имеет тройственное назначение:

1. Информационная поддержка организации и управления учебным процессом по советуемому ООП;
2. Комплекс для проведения лабораторных работ по целому ряду дисциплин;
3. Полигон для научно-исследовательской деятельности студентов и молодых ученых в области прикладной информатики.

Как в целом, так и по отдельным приложениям разработанный комплекс может быть использован в целях информационного обеспечения решения различного рода задач: производственных, коммерческих, научных и т.д.

Основными требованиями к portalу являются: легкая расширяемость и простота добавления функций, кроссплатформенность и защищенность. Аналогичные требования предъявляются к системам, средой работы которых является интернет, что делает web-технологии

наиболее пригодными для использования при реализации портала.

В портал кафедры входит 9 подсистем: актуализации знаний, обеспечения кадровым ресурсом, обеспечения материально-техническим ресурсом, обеспечения методическим ресурсом, оценки состояния студента, управления нормативным ресурсом, формирования проблемного пространства, формирования РПД, хранилище знаний. Часть подсистем имеет общий характер и может использоваться как для процесса обучения на кафедре, так и для использования на производстве. Каждая подсистема может работать отдельно от других приложений портала, но, в таком случае, большую часть данных подсистемы приходится вводить вручную.

Выбор средств реализации осуществлялся на основании вышеуказанных требований с учетом популярности, наличия поддержки и документации. Выбор был сделан в пользу двух платформ: фреймворка PHP Yii2, и фреймворка Python Django.

В процессе проектирования возникла проблема интеграции этих подсистем, так как используемые данные для многих из них совпадают. Общие цели организации взаимодействия приложений можно сформулировать следующим образом:

1. Уменьшить стоимость эксплуатации совокупности приложений;
2. Увеличить скорость выполнения типизированных задач или гарантировать сроки их выполнения;
3. Поднять качество выполнения задач за счет минимизации человеческого фактора, как основного источника ошибок.

Учитывая специфику подсистем было рассмотрено несколько способов взаимодействия, а именно: обмен файлами, асинхронный обмен сообщениями, удаленный вызов процедур (CORBA, DCOM, RMI, SOAP), общая база данных [2]. Данные способы позволяют взаимодействовать приложениям как напрямую, используя определенный формат данных, так и с использованием временного хранилища. Было решено использовать для взаимодействия приложений общую базу данных так как ее использование позволяет предъявить явные требования к формату данных, а также поддерживать их семантическую целостность на уровне БД, в отличие от метода обмена файлами, и избавиться от излишней степени связывания приложений, характерной для методов удаленного вызова процедур и обмена сообщениями.

Использование общей базы данных позволило:

1. Обеспечить доступ к данным при отсутствии одной или нескольких подсистем;
2. Обеспечить гибкость добавления новых подсистем;
3. Обеспечить доступ к данным при отказе одной или нескольких подсистем;
4. Классифицировать информацию по типу;
5. Повысить скорость актуализации данных.

Однако, при использовании данного метода появляются некото-

рые трудности:

1. Разработка общей схемы данных, удовлетворяющей требованиям нескольких различных приложений;

2. Возрастание числа запросов к общей базе данных, при котором последняя может стать узким местом интеграционного решения, что приведет к снижению производительности приложений и увеличит вероятность блокировки данных;

3. Использование коммерческого программного обеспечения, в котором часто есть ограничения на использование сторонних баз данных.

4. Распределение прав пользователей и создание единой системы авторизации.

В данном проекте эти проблемы решаются созданным регламентом ведения общей базы данных, оптимизацией количества обращений к общей базе данных и неиспользованием коммерческих решений для реализации подсистем портала. Проблема распределения доступа решается созданием отдельного сервера авторизации, на который возложена задача управления профилями пользователей и контроля доступа к функциям подсистем.

В качестве СУБД была выбрана система MySQL, так как она является популярным и бесплатным решением. Для формирования структуры данных общей базы данных используется атрибутивная модель системы. Данная структура подразумевает деление данных из подсистем на ресурсы (R), продукты (P), проблемы (W), цели (Z), сырьевые ресурсы (Rp) и функции (F) (технологии решения проблемы), также добавляются служебные таблицы профилей пользователей, групп, истории изменений [1]. Поддержка разнообразности данных от подсистем реализуется за счет поля, содержащего строку в текстовом формате обмена данными JSON и наличия регламента на формат данных. Причиной выбора формата JSON является его распространенность, удобочитаемость, краткость и кроссплатформенность. При использовании MySQL максимальная длина строки составляет 4 294 967 295 символов, что является достаточным в подавляющем большинстве случаев.

Данная структура взаимодействия приложений соответствует требованиям к portalу кафедры, обеспечивает высокую скорость взаимодействия между приложениями и обеспечивает повторное использование данных, что исключает вероятность ошибки со стороны человека. Поскольку использовался системный принцип формирования портала, он может использоваться при непрерывном образовательном процессе любой организации.

### Литература

1. Белов А.А. Информационно-синергетическая концепция управления сложными системами: методология, теория, практика/ ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 424 с.

**2. Шаблоны** интеграции корпоративных приложений: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 672 с. – Парал. тит. англ.

*Белов Александр Аркадьевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
e-mail: belov@it.ispu.ru

*Николаев Максим Алексеевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: maks113nik@gmail.com

УДК 004.9

С.С. НОВОСЕЛЬЦЕВА, к.т.н., доцент  
И.И. НОВОСЕЛЬЦЕВ, к.т.н., инженер-программист

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
ООО «ТеконАвтоматика»  
153000 г. Иваново, пер. Подгорный, 5.  
*E-mail: svsnov@hotmail.com*

## **Перспективы использования технологии информационных обменов OPC UA в сфере автоматизации объектов энергетики**

**Аннотация.** Описаны проблемы совместимости и взаимозаменяемости оборудования, усложнения процесса системной интеграции элементов управления и контроля SCADA-систем при использовании широкого спектра протоколов. Обозначены пути преодоления этих проблем.

**Ключевые слова:** протокол, обмена данными, SCADA-системы, OPCUA.

S.S. NOVOSELTSEVA Candidate of Engineering, docent,  
I.I. NOVOSELTSEV Candidate of Engineering, software developer  
IvanovoStatePowerEngineeringUniversity  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34.  
*E-mail: svsnov@hotmail.com, bdfyy@hotmail.com*

## **Prospects of using of information interchange technology OPC UA in the field of automation of power facilities**

**Abstract.** Problems of the compatibility and interoperability of equipment and the complexity of the process of system integration of control and monitoring SCADA-systems, using a wide range of protocols, are described. The ways of overcoming these problems are stated.

**Key words:** communications protocol, SCADA, OPC UA.

Организацию обмена данными в системах промышленной автоматизации разработчики все чаще реализуют в соответствии со стандартом OPC UA - OLE for Process Control Unified Architecture ассоциации OPC Foundation.



Для обеспечения контроля технологических процессов в режиме реального времени на крупных энергетических объектах широко используются SCADA-системы. Так, например, в зависимости от поставленной задачи данные, получаемые от множества контроллеров (значения температуры и давления в отдельных узлах, положения управляющей арматуры и т.п.), могут отображаться на мониторах оперативного персонала, архивироваться или пересылаться на сторонние системы обработки данных.

Для обмена данными с устройствами, подключенными к SCADA-системе, как правило, используется широкий спектр протоколов – SNMP, Modbus, МЭК-61850 и другие. Поскольку каждый производитель отдельных элементов управления и контроля строит свою систему на основе тех протоколов передачи данных, которые он считает наиболее подходящими для решения своей задачи, существующее разнообразие решений приводит к отсутствию совместимости и взаимозаменяемости оборудования и усложнению процесса системной интеграции.

Реализацию указанных протоколов на стороне SCADA-системы должен обеспечить разработчик этой системы, что сопровождается определенными трудностями: большой трудоемкостью процесса разработки протокола, закрытостью некоторых протоколов и, как следствие, необходимостью капитальных вложений для приобретения документации таких протоколов или готовых решений.

Помимо перечисленного, существует и проблема интеграции разрабатываемой SCADA-системы со сторонними информационными системами разных разработчиков. Для решения этой задачи в настоящее время часто используется протокол OPC, имеющий ряд недостатков, основным из которых можно считать использование технологии DCOM, и как следствие, зависимость от платформы MS Windows, в то время как при проектировании систем автоматизации объектов стратегически важных отраслей необходимо выполнять требование открытости исходных кодов на всех уровнях системы автоматизации – ПО устройств, операционных систем, SCADA-систем, драйверов отдельных устройств, что подразумевает разработку кросс-платформенных приложений.

Для устранения существующих недостатков ассоциацией OPC Foundation был разработан стандарт OPC UA, на основе которого в настоящее время и реализуются многие SCADA-системы для предприятий энергетического комплекса. Стандарт OPC UA устанавливает методы обмена сообщениями между OPC сервером и клиентом, не зависящие от аппаратно-программной платформы, от типа взаимодействующих систем и сетей, обеспечивает надежную и безопасную коммуникацию, противостоит вирусным атакам, гарантирует идентичность информации клиента и сервера. Необходимая интеграция элементов систем автоматизации, уже используемых на промышленных объектах в настоящее время, обеспечивается использованием конвер-

торов, преобразующих спектр промышленных протоколов (SNMP, Modbus, МЭК-61850 и другие) в OPC UA.

Область применения многих элементов систем автоматизации не ограничивается использованием в SCADA-системах, поэтому необходимость в конверторах будет существовать всегда. Однако многие разработчики устройств, в том числе и отечественные, уже сейчас внедряют поддержку OPC UA, что позволяет унифицировать интерфейс для взаимодействия аппаратного и верхнего уровней автоматизации предприятий.

#### Литература

1. **Mahnke W., Leitner S.-H., Damm M.** OPC Unified Architecture. – Berlin: Springer, 2009. - ISBN 978-3-540-68898-3.

2. **OPC Unified Architecture Specification.** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.opcfoundation.org>.

3. **Богданов Н., Киселева О.** OPC Unified Architecture: изменения в популярной технологии информационных обменов с точки зрения инженера / Н. Богданов, О. Киселева // Современные технологии автоматизации. – 2010. – №3. – С. 82.

*Новосельцева Светлана Сергеевна,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail:svsnov@hotmail.com

*Новосельцев Иван Иванович,*

ООО «ТеконАвтоматика», г. Иваново,

e-mail:bdffy@hotmail.com

УДК 004.4

Е.Р. ПАНТЕЛЕЕВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: erp@poks.ispu.ru

### **Разработка электронной информационно-образовательной среды преподавателя вуза на платформе Google Apps**

**Аннотация.** Предложен шаблон реализации персонального сайта преподавателя на базе сервиса «Сайты» и методика организации самостоятельной работы студентов на базе сервиса «Класс» платформы Google Apps. Практическая реализация среды преподавателя на платформе этих сервисов обеспечивает асинхронное взаимодействие участников учебного процесса в интернет и ведение электронных портфолио обучающихся.

**Ключевые слова:** электронная информационно-образовательная среда, высшее образование, сервисы Google Apps.

E.R. PANTELEEV Doctor of Engineering, professor,

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: *erp@poks.ispu.ru*

## Development of e-educational environment of the university teacher on the basis of Google Apps services

**Abstract.** Implementation template of high school teacher personal site is proposed based on "Sites" service as well as method of organization of independent work of students on the basis of "Classroom" service. The practical implementation of these approaches allows to conclude that proposed environment provides asynchronous interaction between participants of educational process via Internet and students' electronic portfolios management.

**Key words:** electronic information and educational environment, higher education, Google Apps services.

Актуальность разработки и внедрения электронной информационно-образовательной среды (ЭИОС) вуза в настоящее время является общепризнанной и зафиксирована федеральными стандартами РФ. В этих нормативных документах регламентируются следующие функции ЭИОС<sup>10</sup>:

- доступ к учебным планам, рабочим программам дисциплин (модулей), практик, к изданиям электронных библиотечных систем и электронным образовательным ресурсам, указанным в рабочих программах;
- фиксация хода образовательного процесса, результатов промежуточной аттестации и результатов
- освоение основной образовательной программы;
- проведение всех видов занятий, процедур оценки результатов обучения, реализация которых предусмотрена с применением электронного обучения, дистанционных образовательных технологий;
- формирование электронного портфолио обучающегося, в том числе сохранение работ обучающегося, рецензий и оценок на эти работы со стороны любых участников образовательного процесса;
- взаимодействие между участниками образовательного процесса, в том числе синхронное и (или) асинхронное взаимодействие посредством сети Интернет.

В то время как стандарт предполагает системную реализацию этих функций, на практике они часто воплощаются в виде разрозненных и информационно несогласованных решений, не образующих единой среды. Даже при условии, что каждое из таких решений идеально покрывает ту или иную функцию, их информационная несо-

<sup>10</sup> Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования. Уровень высшего образования – магистратура. Направление подготовки – 09.04.04 «Программная инженерия». Утвержден приказом МОН РФ от 30.10.2014 г. № 1406

гласованность приводит к необходимости реформатирования и/или повторного ввода больших массивов данных, что увеличивает трудозатраты, создает риски нарушения актуальности и целостности информации и в конечном счете дискредитирует саму идею создания ЭИОР. Поэтому успех создания ЭИОР определяется выбором интеграционного решения для ее реализации. Передовая практика разработки и внедрения ЭИОР такими образовательными организациями, как Ленинградский областной институт развития образования (ЛОИРО) свидетельствует о том, что перспективной платформой создания ЭИОР может быть Google Apps. Google Apps – это пакет интегрируемых сервисов, размещенных на серверах компании Google. Пакет включает в себя инструменты для размещения документов и совместной работы с ними, планирования и контроля проведения учебных занятий, сетевого общения в онлайн и оффлайн форматах, хостинга мультимедийных материалов и других инструментов. Этот пакет доступен образовательным организациям на бесплатной основе в пределах домена («подоблака») Google Apps, который организация конфигурирует самостоятельно путем создания виртуального диска для размещения документов, регистрации пользователей, предоставления им прав доступа к документам и планирования совместной работы на уровне отдельных пользователей и групп. Работа по конфигурированию домена Google Apps была начата в 2014 г. на кафедре ПО КС ИГЭУ в рамках гранта по образовательным инновациям. Результатом этой работы стало создание хранилища документации кафедры на виртуальном диске Google Apps, в котором размещены нормативные документы (ФГОС, УМКД) и документы текущего учебного процесса (учебные пособия, методические указания, отчеты студентов) и организация ролевого доступа студентов и преподавателей к этому хранилищу.

В докладе рассматривается наиболее логичное направление продолжения этой работы – создание электронной информационно-образовательной среды преподавателя вуза, центром которой является персональный сайт преподавателя (ПСП). ПСП является представителем преподавателя в ЭИОР, выступающим, с одной стороны центром общения преподавателя со студентами в контексте учебного процесса и его информационного обеспечения, а с другой – инструментом оценки деятельности самого преподавателя, своего рода его электронным портфолио.

Двоякая функция ПСП определяет требования, предъявляемые к содержанию сайта и его оформлению при помощи сервисов Google Apps. Что касается содержания, представляется, безусловно, необходимым присутствие таких разделов ПСП, как общая информация о преподавателе (фото, сведения о профессиональной квалификации, контактные данные), информация о научной специализации преподавателя, выполненных им проектах и опубликованных результатах исследований, информация о читаемых дисциплинах со ссылкой на УМКД и

другие информационные ресурсы, информация об учебном процессе (расписание, календарь мероприятий: текущих и промежуточных контролей, консультаций, сроков сдачи отчетов – с функциями планирования, рассылки уведомлений и контроля выполнения, текущие документы: задания и отчеты студентов с функциями совместного доступа к этим документам). Оформление ЭИОС преподавателя обеспечивают сервисы GoogleApps: «Сайты» - система управления контентом сайта, «Диск» - сервис доступа к хранилищу кафедральной документации, «Документы», «Таблицы» и «Презентации» - сервисы для совместной работы с документами, «Почта» - сервис рассылки уведомлений, «Календарь» - сервис планирования мероприятий, «Класс» – новый сервис Google Apps для образования, который помогает преподавателям быстро создавать и упорядочивать задания, выставлять оценки, оставлять комментарии и общаться с учащимися, «Чат» и «Hangouts» - сервисы онлайн-мероприятий в сети интернет в формате текстового, аудио- и видео- общения.

#### Литература

1. **Возина Н.Ф.** Химия и микробиология воды. – М.: Высш. школа. 1979.
2. **Дифференцированные** тарифы... / В.К.Коробашкина, Б.В. Папков, Е.И.Татаров, и др. // XV науч.- техн. конф. “Актуальные проблемы ...” : тез. докл. НГТУ. – Н. Новгород. 1996. – С. 40-43.

*Пантелеев Евгений Рафаилович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: erp@poks.ispu.ru

УДК 681.518

В.А. ЗУЙКОВ, аспирант  
Е.Р. ПАНТЕЛЕЕВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: *mysterio@ya.ru*

### **Разработка многоуровневой модели методической поддержки действий проектировщика в среде САПР**

**Аннотация.** Предложена структурированная многоуровневая модель действий проектировщика САПР и рассмотрен вариант журналирования действий пользователя. Практическая реализация системы журналирования позволяет анализировать действия пользователя и интерпретировать траекторию его действий для формирования методических рекомендаций и оказания помощи по оптимизации проектных решений.

**Ключевые слова:** методическая поддержка, системы автоматизированного проектирования, журналирующая система.

V.A. ZUIKOV, graduate student  
E.R. PANTELEEV, Doctor of Engineering, professor,

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: [mysterio@ya.ru](mailto:mysterio@ya.ru)

## Development of a multi-level model of methodological support actions designer in CAD environment

**Abstract.** A structured multi-level model of action of the CAD designer is proposed as well as the variant of logging user actions. The practical implementation of the system log allows to analyze and interpret the trajectory of user actions for the formation of guidelines and assistance to optimize project decisions.

**Key words:** methodological support, computer-aided design, the logging system.

Грамотное применение САПР имеет большой потенциал повышения производительности труда, чем все известные технические нововведения [1, 2, 6]. Сложность объектов проектирования постоянно возрастает, современные САПР требуют от проектировщиков и знаний в своей предметной области, и навыки применения технологий автоматизации проектирования, сформированные в процессе решения проектных задач в среде САПР. Поэтому актуальна разработка моделей и алгоритмов методической поддержки, работающих по принципу «learning by doing» - обучения в процессе работы. Методическая поддержка, предоставляемая пользователю САПР в процессе решения проектных задач, должна опираться на анализ и интерпретацию его действий. При этом она должна обеспечивать информацией задачи регистрации действий пользователя, интерпретации этих действий в контексте интерфейса САПР и в контексте (локальном и глобальном) проектной задачи, и, в конечном счете, задачу формирования импульсов методической поддержки на основе результатов решения вышеупомянутых задач [4].

Исходя из этого, предлагается многоуровневая иерархическая модель действий проектировщика (рис. 1).

На нижнем уровне иерархии находятся «примитивные события» от устройств ввода: нажатие клавиатуры, клавиш мыши или действия других устройств, предусмотренных при использовании САПР.

Следующий – уровень элементарных действий с объектами интерфейса: управляющие кнопки, раскрывающие списки, флажки и переключатели, регуляторы, различные поля ввода и другие действия.

Далее - модель содержит информацию в виде цепочек команд, которые можно интерпретировать, как попытку выполнить ту или иную проектную операцию. Такая интерпретация возможна путем сопоставления цепочки действий пользователя с эталонными для данной операции.

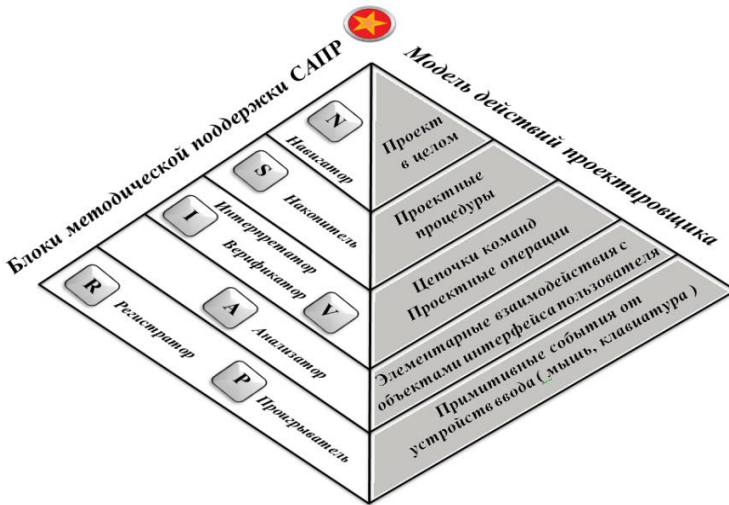


Рис. 1. Многоуровневая модель действий проектировщика

Следующий уровень модели интерпретируется как попытка решения проектной задачи при помощи последовательности проектных процедур. Это решение базируется на сопоставлении действий пользователя с готовыми, отлаженными и выверенными проектными задачами.

Пятый уровень – выполнение самого проекта в целом.

Вершину пирамиды, венчает, та заветная, мечта любого проектировщика, так называемая «красная кнопка», когда по нажатию клавиши, можно выдать всю документацию на все проектные решения.

Рассмотрим модель с точки зрения методической поддержки.

Для протоколирования примитивных событий действий пользователя САПР предлагается журналирующая система (СЖ). Предложенная СЖ отличается от прототипов (Syslog) [5] тем, что оперирует не с сообщениями, а с координатами положения курсора мыши и кодами нажатых клавиш – с самыми низкими по уровню операциями. Это позволяет регистрировать события с практически любым уровнем детализации (R-Регистратор). Также для удобства дальнейшей работы вводится своя иерархия уровней и категории действий, которые может совершать пользователь, и которые могут быть запротоколированы журналирующей системой. Предлагаемый вид журнала (табл.1).

На втором уровне предполагается изучение и приобретение элементарных навыков по использованию всех имеющихся в распоряжении объектов интерфейса пользователя. Задача методической поддержки помимо журналирования переходит на информативный уровень и предполагает давать пользователю не только уместную информацию,

соответствующую его текущим действиям, но и производить анализ последовательности его действий (траекторий) (**A**-Анализатор).

Табл. 1. Вид журнала записи действий пользователя

№	событие, действие	уровень	категория	координаты мыши		системный код клавиши		время
				X:	Y:	символ	код	
1	мышь	2	1	68	23			12:34:05
2	мышь	2	1	68	33			12:34:06
3	клавиатура	2	2	68	33	A	65	12:34:07
4	клавиатура	2	2	68	33	C	67	12:34:20
5	мышь	2	2	314	216			12:34:24
...	...	...	...		...		...	...
98	мышь	2	1	78	12	F1	112	12:38:56
99	другое	0	0					12:38:58

На третьем уровне выделяются проектные операции. Проектные операции – это законченные последовательности действий проектировщика, завершающиеся определенными промежуточными результатами [3]. Здесь предполагается приобретение навыков составления шаблонов, определённых повторяющихся цепочек команд, путём сравнения текущей траектории действия - с эталонами (**V**-Верификатор) и осуществления перевода записанной траектории действий пользователя на язык имеющихся проектных решений (**I**-Интерпретатор).

Четвёртый - уровень проектных процедур. Под проектными процедурами принято понимать последовательность проектных операций, приводящих к решению конкретных задач [7]. Здесь методическая поддержка даёт возможность создавать базу готовых проектных решений для формирования направления последующих действий проектировщика и при положительном варианте предоставит возможность сохранить весь алгоритм выполненных процедур (**S**-Накопитель).

Пятый уровень - сам проект в целом, а точнее библиотека или база знаний в виде готовых, отлаженных и выверенных проектных решений, подразумевающих под собой описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования (**N**-Навигатор).

Представленная в статье многоуровневая модель позволяют создать эффективные средства в виде блоков модуля AddInCad для повышения эффективности внедрения САПР. Создание инструмента для обучения и заполнения базы готовых решений различных задач проектирования позволит решить задачу по нехватке узкоспециализированных проектировщиков, что значительно увеличит количество выполняемых работ меньшим количеством людей и гарантирует отсутствие случайных ошибок, снижение трудозатрат, сокращение сроков



проектирования и повышение качества выпускаемой проектной документации.

### Литература

1. **Алтунин, В.К.** Проектирование компьютерных систем обучения и интеллектуальной тренажерной подготовки / В.К. Алтунин, А.М. Стручков; под ред. О.М. Туровского. – Тверь: ЦПС, 2004. – 204 с.
2. **Конвисар, Е.** Кадры в САПР / Е.Конвисар // САПР и графика. – 2006. - № 1. – С.11
3. **Новакова, Н.Е.** Модели и методы принятия проектных решений в сложно-структурированных предметных областях / Н.Е. Новакова. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 168 с.
4. **Пантелеев, Е.Р.** Технология информационной интеграции процессов методической поддержки автоматизированного проектирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.12, 05.13.17 / Пантелеев Евгений Рафаилович. – Иваново, 2005. – 377 с.
5. **Робачевский А.Н.**, Немнюгин С.А., Стесик О.Л. Журнальные файловые системы / Глава 4. Файловая система // Операционная система UNIX. — 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – С. 351 – 353. – 656 с.
6. **Филатова Н.Н.**, Ахремчик О.Л. Образовательные технологии и общество. 2000. Т. 3. № 2. С. 150-160.
7. **Целищев Е.С.**, Глязнецова А.В., Кудряшов И.С. Методика эффективной автоматизации проектирования технического обеспечения АСУТП: учеб. пособие/под ред. Ю.С. Тверского; Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2012. -192 с.

Зуйков Виталий Аркадьевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: mysterio@ya.ru

Пантелеев Евгений Рафаилович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: erp@poks.ispu.ru

УДК 371.3

Е.Р. ПАНТЕЛЕЕВ, д.т.н., профессор  
Н.И. ДЮПОВКИН, к.т.н., доцент  
Ю.Ю. РОГОЖНИКОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: jur@bjd.ispu.ru

### Методика проведения дистанционных учебных занятий в среде Adobe Connect

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы организации и проведения дистанционных занятий в ИГЭУ с использованием системы Adobe Connect. Представлены особенности подготовки и проведения учебного занятия с применением компьютерных дистанционных технологий.

**Ключевые слова:** дистанционное обучение, система дистанционного обучения, Adobe Connect.

E.R. PANTELEEV, Doctor of Engineering, Professor  
N.I. DYUPOVKIN, Candidate of Engineering, Associate Professor  
YU.YU. ROGOZHNIKOV, Candidate of Engineering, Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: [jur@bjd.ispu.ru](mailto:jur@bjd.ispu.ru)

## Application of online learning technology in the environment of Adobe Connect

**Abstract.** Issues of development and carrying out distant courses in ISPU with the use of Adobe Connect system are considered. Peculiarities of application of online learning technology are discussed.

**Key words:** online learning, system of distance learning, Adobe Connect.

Для организации и проведения дистанционных занятий в ИГЭУ приобретены и используются приложения Adobe Connect Central и Adobe Connect Meeting. В рамках ИГЭУ пользователи Adobe Connect разделяются на четыре группы:

- администраторы – главные распорядители, осуществляющие управление Adobe Connect в рамках организации;
- субадминистраторы – администраторы с ограниченным набором прав, координаторы ресурсов Adobe Connect;
- преподаватели – организаторы собраний, которые могут являться также субадминистраторами;
- слушатели – рядовые участники собраний (студенты, абитуриенты, слушатели курсов повышения квалификации и т.п.), которые могут быть также и докладчиками собраний.

Система Adobe Connect развёрнута на сервере управления телекоммуникаций ИГЭУ. Администрирование сервера осуществляется сотрудниками указанного управления.

Для работы с Adobe Connect на компьютере пользователя должно быть установлено следующее программное обеспечение:

- веб-браузер (рекомендуется Internet Explorer 10 и выше, Mozilla Firefox 32.0 и выше);
- Adobe Flash Player – бесплатное приложение для просмотра интерактивного содержимого и приложений в сети интернет;
- Adobe Connect Add-in – надстройка для организации совместного доступа к ресурсам рабочей станции.

Компьютеры организаторов и докладчиков собраний должны быть оборудованы веб-камерой и аудиогарнитурой. Компьютеры участников могут быть оборудованы только аудиогарнитурой.

Учетные записи студентов и преподавателей импортируются в Adobe Connect главным администратором. Субадминистратор может редактировать их и добавлять другие учетные записи по необходимости.

Выполнение своих функций субадминистратор осуществляет посредством веб-приложения Adobe Connect Central, для доступа к которому необходимо с помощью веб-браузера загрузить страницу по адресу <http://connect.ispu.ru> и указать «Имя для входа» и «Пароль», выданные администратором.

Пользователи и группы пользователей, в зависимости от набора прав, могут организовывать или участвовать в собраниях – конференциях в режиме реального времени. Преподаватели организуют и создают собрания на основе, имеющихся шаблонов собраний. Для проведения собрания используется интерактивное приложение (Adobe Connect Meeting), в терминологии Adobe Connect – комната для проведения собрания. Комната включает в себя различные панели (модули) и компоненты. В комнате для проведения собраний пользователи или посетители имеют возможность совместно использовать экраны компьютеров или файлы, общаться в чате, транслировать аудио и видео.

Работа преподавателя по организации, подготовке и проведению дистанционного занятия (собрания), так же как и обычного занятия, состоит из подготовки к занятию, проведения занятия и анализа результатов.

Подготовка к занятию в виртуальном классе (комнате собрания) включает:

- анонсирование темы, сроков проведения и рассылку приглашений;

- публикацию документов для предварительного ознакомления;

- разработку презентаций;

- разработку опросов и др.

Проведение занятия включает:

- настройку связи до начала занятия;

- организацию совместной работы в чате, с документами, приложениями, экраном и др.;

- модерирование слушателей, т.е. управление функциями и поведением слушателей в интерактивном приложении: предоставление слова, вызов к доске, доступ к чату, проведение опросов, запись занятия и др.

Анализ результатов занятия включает постобработку конференции, в том числе анализ статистической информации.

По умолчанию создатель собрания (преподаватель, субадминистратор) является одновременно и его организатором.

В Adobe Connect для создания собрания существуют три встроенных шаблона: «*Шаблон мероприятия по умолчанию*», «*Шаблон собрания по умолчанию*», «*Шаблон обучения по умолчанию*». На основе встроенных шаблонов преподаватель может создавать свои. Кроме встроенных шаблонов разработаны шаблоны: «*Лекция*», «*Консультация*», «*Семинар*», «*Организационное собрание*». Собрание, созданное на основе шаблона «*Семинар*» (рис. 1) содержит следующие модули:

«Опрос», «Совместное использование», «Примечания», «Видео», «Посетители», «Чат», «Вопросы и ответы».

Преподаватель в процессе проведения занятия может добавлять, удалять и перемещать необходимые модули, делать доступными для совместного использования документы, которые он загрузил в свою библиотеку.

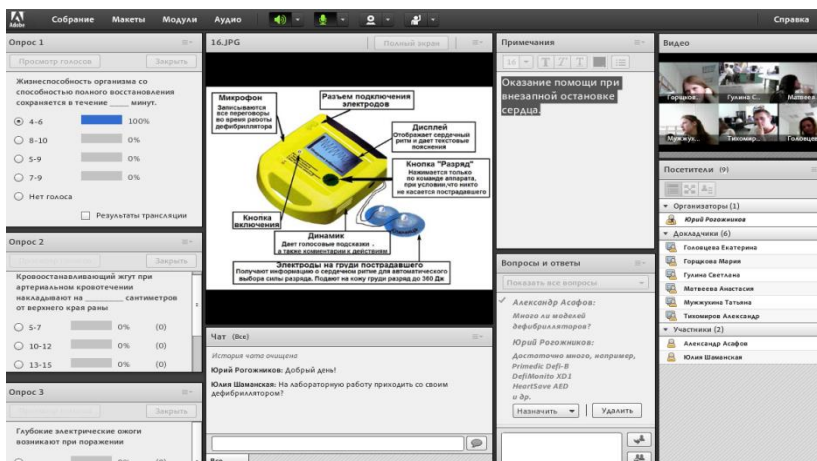


Рис. 1. Комната собрания на основе шаблона «Семинар»

Преподаватель имеет возможность записать собрание. Записывается все, что происходит в комнате собрания, кроме области «Только для докладчиков». Если запись собрания сделать доступным для посетителей, то её смогут посмотреть участники, которые отсутствовали на нем или пожелали посмотреть собрание ещё раз. При воспроизведении отображается всё, что видели и слышали посетители в реальном времени.

В Adobe Connect Central доступны четыре типа отчетов по результатам собрания: «Сводка», «По посетителям», «По сеансам», «По вопросам». В отчете «Сводка» содержатся такие сведения о собрании как наименование, URL-адрес для просмотра, уникальные сеансы, время входа последнего приглашенного посетителя, число приглашенных и число посетивших слушателей, пик посещения комнаты собрания за все время проведения. В отчете «По посетителям» представлен список посетителей собрания с указанием адресов электронной почты, а также времен входа и выхода. В отчете «По сеансам» находится список дат начала и завершения каждого сеанса, номер сеанса и число посетителей. При щелчке по номеру сеанса появляется список участников данного сеанса со временами входа и выхода каждого участника.

отчете «По вопросам» содержатся сведения о проведенных опросах во время собрания.

*Пантелеев Евгений Рафаилович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: egr@poks.ispu.ru

*Дюповкин Николай Иванович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: dean@fzvo.ispu.ru

*Рогожников Юрий Юрьевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: jur@bjd.ispu.ru

УДК 004.912:378.1

С.В. ПУТИЛОВ студ.,  
А.А. БЕЛОВ к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: ceregaputilov@gmail.com

## **Система семантического анализа научных коммуникаций**

**Аннотация.** Представлена система обеспечения актуальной научной информацией инновационного образовательного процесса, построенная на базе разработанных методических и программных инструментариев.

**Ключевые слова:** знания, инновация, понятие, семантический системный анализ, коммуникации.

S.V. PUTILOV student,  
A.A. BELOV Candidate of Engineering., docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: ceregaputilov@gmail.com

## **A semantic analysis of scientific communication's system**

**Abstract.** This article presents a system providing actual scientific information about innovative education process. The system is developed on methodical and program tools.

**Key words:** knowledge's, innovation, terms, semantics system analysis, communication

В процессе познания (непрерывный образовательный процесс) возникает проблема, связанная с получением актуальных знаний по определенной предметной области, на понятном человеку «языке». Философией и когнитивной психологией было доказано, что данная проблема решается в процессе коммуникации между экспертом и

человеком, который нуждается в знаниях. Видов коммуникаций огромное количество, мы рассматриваем основные из них – это диалог, а точнее его разновидность (электронный аналог, представленный в Internet пространстве в виде специализированного форума), и коммуникация в виде обмена знаниями посредством печатных изданий (периодическая литература, учебные пособия и пр.). Любая информация (информационный ресурс), независимо от формы её представления, имеет схожую структуру, в состав которой входят слова, в нашей интерпретации термины, соответствующие определенным понятиям, которые рождают в «голове человека» смысл.

Исследованию научных коммуникаций посвящено множество работ, но их результаты в основном затрагивают синтаксические проблемы общения, в частности интенсивность, топологию коммуникаций и т.п. В данной работе рассматриваются возможности использования компьютерных средств для семантического анализа научных коммуникаций, в основе которых лежит триада <термин>–<понятие>–<смысл>.

В общем виде система семантического анализа научных коммуникаций изображена на рис. 1.

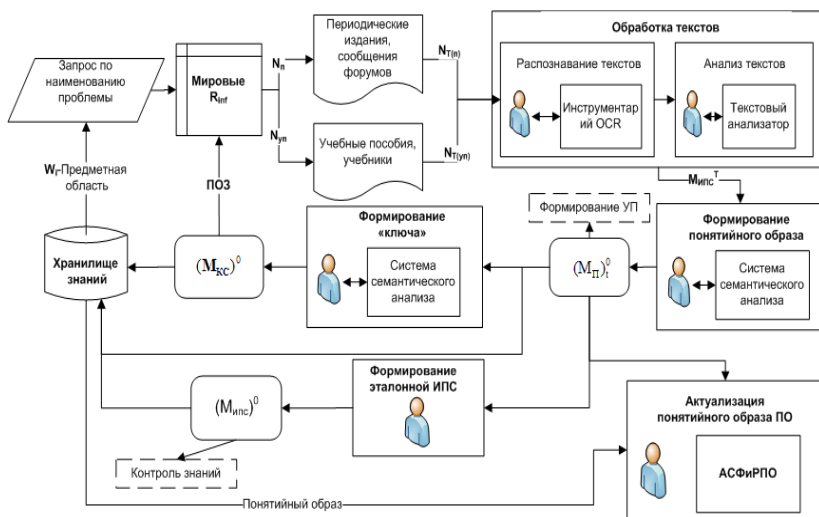
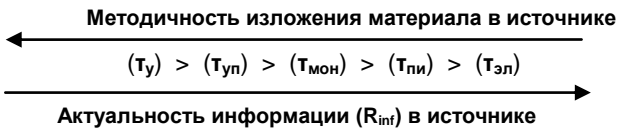


Рис. 1. Схема системы семантического анализа научных коммуникаций

Основным ее компонентом является текстовый анализатор, позволяющий в автоматическом режиме, при обработке любого объема текста получить терминологическое множество по проблеме. В отличие от существующих текстовых анализаторов разработанный позволяет решать требуемые для целевого анализа задачи: подбор параметров

анализа, удаление незначимых словоформ и концентрации основных терминов, отражающих главный смысл научных текстов. Компьютер - это машина, работающая на заданных алгоритмах, которая не может «мыслить» как человек, в виду этого терминологическое множество, передается эксперту для его необходимого редактирования и дополнения. Затем с использованием разработанных на основе законов информетрии алгоритмов компьютером автоматически формируется множество ключевых слов ( $M_{кс}$ ), необходимых для поиска источников знаний и понятийное множество ( $M_n$ ), используемое для создания иерархической понятийной структуры (ИПС), необходимой для контроля знаний по данной предметной области[1].

Созданные множества не являются статическими, они изменяются (актуализируются) со временем в зависимости от периодичности обновлений материалов по данной предметной области. Весь перечень информационных ресурсов (источников знаний) по предметной области делится на пять классов: электронные издания (специализированные Internet форумы), периодические издания, монографии, учебные пособия, учебники. Каждый класс источников обладает временным показателем ( $\tau_i$ ), отражающим степень актуальности и степень методичности изложения материала в источнике, представить которые можно следующим образом:



С использованием текстов электронных изданий и периодики, формируется эталонное (актуальное) на текущий момент времени понятийное множество ( $M_n$ )<sup>t</sup>. Затем в автоматизированном режиме системой осуществляется актуализация устаревшего понятийного образа на основе разработанных алгоритмов, созданных по законам информетрии. Период актуализации ( $M_n$ )<sup>t</sup> зависит от периодичности обновления научных изданий по предметной области.

На основании периодических изданий, являющихся эталоном актуальности, невозможно вести непрерывный образовательный процесс, ввиду отсутствия методичности изложения материала доступным любому человеку языком. Поэтому необходимо обратиться в специализированные библиотечные фонды, для поиска на основе поискового образа запроса (ПОЗ) учебников и учебных пособий, имеющих по рассматриваемой проблеме. Каждый из найденных источников предварительно проходит обработку текстовым анализатором, в процессе которой формируются понятийные множества по каждому из найденных источников ( $M_{уп[i]}$ ). Для формирования управляющего воздействия в непрерывный образовательный процесс в рамках рассматриваемой

предметной области, необходимо из всего найденного перечня учебных пособий ( $n_y$ ), автоматически, на основе понятийного образа ( $M_{yn[i]}$ ), выбрать наиболее подходящее учебное пособие, в соответствии с минимальным количеством ( $m_{yn}$ ) расхождений относительно эталонного множества:

$$m_{yn} = \operatorname{argmin}[(M_{\Pi})_i^2 \setminus (M_{yn[i]})]$$

Если найденные учебные пособия не подходят ввиду минимального количества пересечений с эталонным множеством, то эксперт самостоятельно создает учебное пособие, являющееся эталоном для последующего обучения по данной предметной области, опираясь на  $(M_n)^t$ .

Таким образом, можно сделать вывод о том, что созданная система позволит находить наиболее подходящие источники информации (знаний) по любой предметной области на основе сформированных множеств  $M_{кс}$  и  $(M_n)^t$ , поддерживать актуальность этих источников, на основе  $(M_n)^t$ , и осуществлять оперативный контроль знаний методом ИПС.

#### Литература

1. **Белов А.А.** Информационно-синергетическая концепция управления сложными системами: методология, теория, практика / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 423с.

*Белов Александр Аркадьевич,*  
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
e-mail: belov@it.ispu.ru

*Путилов Сергей Владимирович,*  
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
e-mail: sergaputilov@gmail.com

УДК 519.2 УДК 519.2

Б.Ф. СКОВОРОДА, к.ф.-м.н., доцент  
И.А. ТИХОМИРОВА, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: sbf2011@yandex.ru

### Теорема о распределении Стьюдента

**Аннотация.** Для случайной величины, заданной определенной комбинацией независимых случайных величин, имеющих стандартное нормальное распределение, доказано, что она имеет распределение Стьюдента.

**Ключевые слова:** случайная величина, стандартное нормальное распределение, распределение Стьюдента.



B.F. SKOVORODA, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent,  
I.A. TIKHOMIROVA, student, group 5-47

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: sbf2011@yandex.ru

### Student's t-distribution theorem

**Abstract.** It was proved that a random variable, defined by a certain combination of independent random variables with standard normal distribution, has the Student's t-distribution.

**Key words:** random variable, standard normal distribution, Student's t-distribution.

Теорема. Пусть  $X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_n$  - независимые случайные величины, имеющие стандартное нормальное распределение, тогда случайная величина

$$T_n = \sqrt{n} \cdot \frac{X_1 Y_1 + \dots + X_n Y_n}{Y_1^2 + \dots + Y_n^2}$$

имеет распределение Стьюдента с  $n$  степенями свободы ( $n \in \mathbb{N}$ ).

Доказательство.

При  $n = 1$  утверждение теоремы хорошо известно, например, оно приведено в [1] в параграфе 10.3.

Приведём доказательство теоремы для  $n = 2$ . Рассмотрим случайную величину

$$T_2 = \sqrt{2} \cdot \frac{X_1 Y_1 + X_2 Y_2}{Y_1^2 + Y_2^2}$$

и случайный вектор  $Z = (T_2, Y_1, Y_2)$ . Тогда справедлива формула:

$$f_Z(t, y_1, y_2) = f(y_1, y_2) \cdot f(t|y_1, y_2),$$

где  $f_Z(t, y_1, y_2)$  – плотность совместного распределения случайных величин  $T_2, Y_1$  и  $Y_2$ ;

$f(t|y_1, y_2)$  – условная плотность распределения случайной величины  $T_2$  при заданных значениях случайных величин  $Y_1 = y_1$  и  $Y_2 = y_2$ ;

$f(y_1, y_2)$  – плотность совместного распределения случайных величин  $Y_1$  и  $Y_2$ .

Заметим, что условная плотность распределения  $f(t|y_1, y_2)$  совпадает с плотностью распределения случайной величины

$$U_2 = \frac{\sqrt{2}}{y_1^2 + y_2^2} (y_1 X_1 + y_2 X_2),$$

Случайная величина  $U_2 \sim N(0, \frac{2}{y_1^2 + y_2^2})$ , так как  $X_1$  и  $X_2$  – независимые случайные величины, имеющие стандартное нормальное распределение. Тогда

$$f(t|y_1, y_2) = \frac{\sqrt{y_1^2 + y_2^2}}{2\sqrt{\pi}} e^{-\frac{1}{4}t^2(y_1^2 + y_2^2)}$$

Поскольку  $Y_1$  и  $Y_2$  – независимые случайные величины,  $Y_1 \sim N(0,1)$  и  $Y_2 \sim N(0,1)$ , то

$$f(y_1, y_2) = f_{Y_1}(y_1) \cdot f_{Y_2}(y_2) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2}(y_1^2 + y_2^2)}$$

Найдём плотность распределения случайной величины  $T_2$

$$\begin{aligned} f_{T_2}(t) &= \iint_{\mathbb{R}^2} f_2(t, y_1, y_2) dy_1 dy_2 = \iint_{\mathbb{R}^2} f(y_1, y_2) \cdot f(t|y_1, y_2) dy_1 dy_2 = \\ &= \iint_{\mathbb{R}^2} \frac{\sqrt{y_1^2 + y_2^2}}{4\sqrt{\pi^3}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t^2}{2} + 1)(y_1^2 + y_2^2)} dy_1 dy_2; \end{aligned}$$

Перейдем к полярным координатам:

$$\begin{aligned} y_1 &= r \cos \varphi; \quad y_2 = r \sin \varphi; \\ y_1^2 + y_2^2 &= r^2; \quad |J| = r \\ f_{T_2}(t) &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{+\infty} \frac{r}{4\sqrt{\pi^3}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t^2}{2} + 1)r^2} r dr = 2\pi \int_0^{+\infty} \frac{r}{4\sqrt{\pi^3}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t^2}{2} + 1)r^2} r dr \end{aligned}$$

Сделаем замену переменной:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{1}{2} \left( \frac{t^2}{2} + 1 \right) r^2; \quad r = \sqrt{2} \left( \frac{t^2}{2} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \xi^{\frac{1}{2}}; \\ d\xi &= \left( \frac{t^2}{2} + 1 \right) r dr; \\ f_{T_2}(t) &= 2\pi \int_0^{+\infty} \frac{\sqrt{2} \left( \frac{t^2}{2} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \xi^{\frac{1}{2}}}{4\sqrt{\pi^3}} e^{-\xi} \left( \frac{t^2}{2} + 1 \right)^{-1} d\xi = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left( \frac{t^2}{2} + 1 \right)^{-\frac{3}{2}} \int_0^{+\infty} \xi^{\frac{1}{2}} e^{-\xi} d\xi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left( \frac{t^2}{2} + 1 \right)^{-\frac{3}{2}} \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left( \frac{t^2}{2} + 1 \right)^{-\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{\pi}}{2} = (t^2 + 2)^{-\frac{3}{2}}. \end{aligned}$$

Осталось заметить, что  $f_{T_2}(t) = (t^2 + 2)^{-\frac{3}{2}}$  – плотность распределения Стюдента с двумя степенями свободы. Таким образом, для  $n = 2$  теорема доказана.

При  $n > 2$  доказательство проводится аналогичным образом.

#### Литература

1. Джонсон Н.Л., Кац С., Балакришнан Н. Одномерные непрерывные распределения. В двух частях. М.: БИНОМ, 2012.

*Сковорода Борис Федосьевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: sbf2011@yandex.ru

*Тихомирова Ирина Александровна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: tihomirova47@yandex.ru

УДК 801.541.20

В.П. ЗУБКОВ, к.т.н., доцент,  
М.Л. СОЛОВЬЕВ к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153013 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: V\_P\_Z@rambler.ru

### Исследование приобретения знаний на основе аналогии

**Аннотация.** В работе предложен новый алгоритм выявления аналогий в текстовых описаниях. Новизна проведенных исследований состоит в попытке машинной реализации выделения аналогий по сходству и по подобию.

**Ключевые слова:** аналогия, знание, алгоритм.

V.P. ZUBKOV Candidate of Engineering, docent,  
M.L. SOLOVJEV Candidate of Engineering, docent.

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: V\_P\_Z@rambler.ru

### The research of knowledge acquisition on the basis of analogies

**Abstract.** In this paper we propose a new algorithm to identify similarities in the textual description. The novelty of the research is an attempt to computer implementation of detection of analogies by similarity and likeness.

**Key words:** analogy, knowledge, algorithm.

Выделение аналогий является актуальной задачей в системах поиска неисправностей сложных технических объектов. В работе предложен новый алгоритм выявления аналогий в текстовых описаниях.

Новизна проведенных исследований состоит в попытке машинной реализации выделения аналогий по сходству и по подобию.

Автоматизация выделения аналогий по сходству и по подобию представляет трудную задачу реализации. В настоящее время используется подход привлечения эксперта для направления процесса выделения аналогий в тексте на естественном языке, а также большое количество справочников.

Различные виды аналогий приведены на рис. 1.

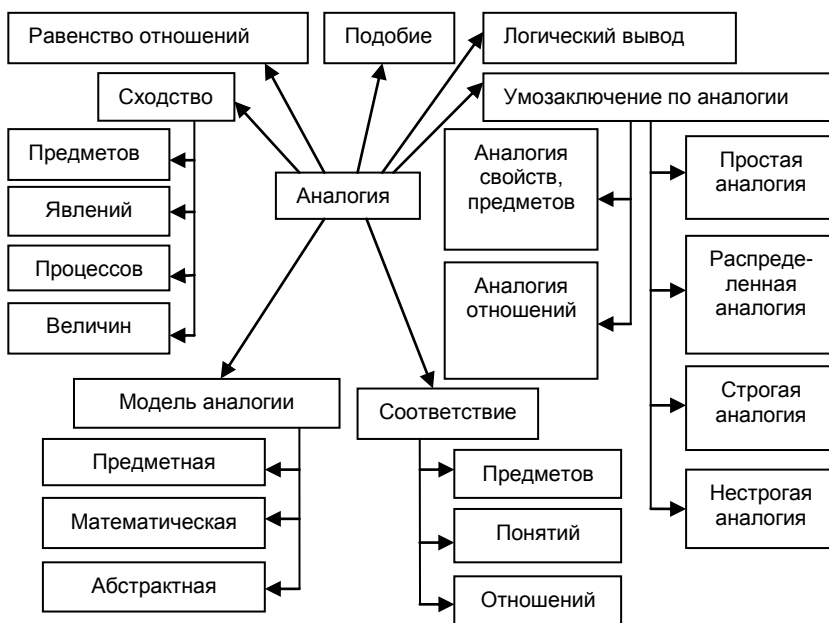


Рис. 1. Классификация видов аналогий

И\_П\_О\_1[Св1,Св2,Св3] – Первый исследуемый Процесс или Объект обладает свойствами Св1, Св2, Св3;

И\_П\_О\_2[Св1,Св2] – Второй исследуемый Процесс или Объект обладает свойствами Св1, Св2;

В(И\_П\_О\_2[Св3]) – вероятно, второй исследуемый Процесс или Объект обладает свойством Св3

Аналогия [1] – индуктивное умозаключение, когда на основе сходства двух объектов по каким-то одним параметрам делается вывод

об их сходстве также по другим параметрам. Примеры формального представления аналогий по сходству приведены на рис. 2-4.

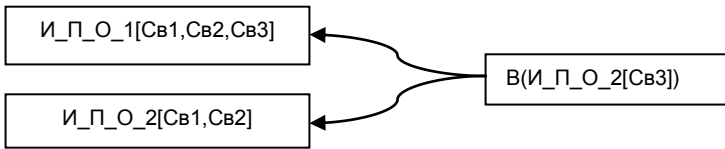


Рис.2. Аналогия по сходству свойств:

И\_П\_О\_1[Св1,Св2,Св3] – Первый исследуемый Процесс или Объект обладает свойствами Св1, Св2, Св3;

И\_П\_О\_2[Св1,Св2] – Второй исследуемый Процесс или Объект обладает свойствами Св1, Св2;

В(И\_П\_О\_2[Св3]) – вероятно, второй исследуемый Процесс или Объект обладает свойством Св3

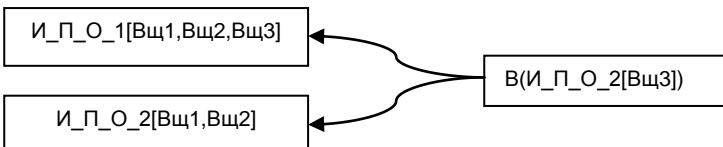


Рис. 3. Аналогия по сходству вещей:

И\_П\_О\_1[Вщ1,Вщ2,Вщ3] – Первый исследуемый Процесс или Объект содержит вещи Вщ1, Вщ2, Вщ3;

И\_П\_О\_2[Вщ1,Вщ2] – Второй исследуемый Процесс или Объект содержит вещи Вщ1, Вщ2;

В(И\_П\_О\_2[Вщ3]) – вероятно, второй исследуемый Процесс или Объект содержит вещь Вщ3

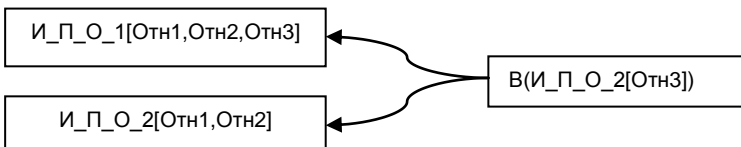


Рис. 4. Аналогия по сходству отношений:

И\_П\_О\_1[Отн1,Отн2,Отн3] – Первый исследуемый Процесс или Объект находится в отношениях с внешней средой Отн1, Отн2, Отн3;

И\_П\_О\_2[Отн1, Отн2] – Второй исследуемый Процесс или Объект находится в отношениях с внешней средой Отн1, Отн2;

В(И\_П\_О\_2[Отн3]) – вероятно, второй исследуемый Процесс или Объект находится в отношении Отн3 с внешней средой

Сопоставление двух объектов, как бы далеко оно не шло, способно дать только предположительное знание, гипотезу, нуждающуюся в дальнейшей проверке. Помимо аналогии свойств существует также аналогия отношений. Аналогия отношений, способная сопоставить и сблизить все что угодно, является средством человеческого мышления, требующим особой осторожности и рассудительности при его применении.

Аналогия во всех случаях означает определенное подобие, сходство: вещей, свойств, отношений. Сходство всегда связано с различием и без различия не существует. В этом плане аналогия – это всегда попытка найти сходство несходного.

Аналогия во всех случаях означает определенное подобие, сходство: вещей, свойств, отношений. Сходство всегда связано с различием и без различия не существует. В этом плане аналогия – это всегда попытка найти сходство несходного.

Умозаключение по аналогии не дает достоверного знания. Если посылки такого умозаключения являются истинными, то это еще не означает, что и его заключение будет истинным: оно может быть истинным, но может оказаться и ложным.

Аналогию, дающую высоковероятное знание, принято называть строгой или точной. Научные аналогии обычно являются строгими. Аналогия часто используется для облегчения понимания.

Аналогия является неотъемлемым структурным компонентом любой формы научного моделирования. Модель – это «представитель» или «заместитель» оригинала в познании или практике. Когда невозможно изучать оригинал, строят его модель, исследуют ее и затем полученные результаты переносят на оригинал. Возможность такого переноса основана на том, что модель в определенном смысле «повторяет» оригинал, отображает какие-то его свойства. Различают предметные и знаковые модели.

Предметные модели воспроизводят определенные характеристики оригинала. Знаковые модели – это схемы, чертежи, формулы. Важным видом таких моделей являются математические модели, представляющие собой системы математических формул.

Таким образом, в работе предложен новый алгоритм выявления аналогий в текстовых описаниях для облегчения поиска неисправностей сложных технических объектов[2].

#### **Литература**

1. **Ивин, А.А.** Логика: Учеб. для гуманитарных факультетов. М.: Изд-во ФАИР-ПРЕСС, 2002.

2. **Зубков, В.П.,** Соловьев, М.Л. Автоматизация процесса приобретения знаний./ФГБОУ ВПО, ИГЭУ – Иваново, 2014.- 268 с.

*Зубков Валентин Петрович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: V\_P\_Z@rambler.ru

*Соловьев Михаил Леонидович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: V\_P\_Z@rambler.ru

УДК 801.541.20

В.П. ЗУБКОВ, к.т.н., доцент,  
М.Л. СОЛОВЬЕВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153013 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: V\_P\_Z@rambler.ru*

## **Разработка аналитического аппарата приобретения навыков и знаний путем умозаключений**

**Аннотация.** В данной работе рассматриваются подходы к созданию тренажера по изучению применения умозаключений. Исследуются способы построения конкретных алгоритмов выделения суждений.

**Ключевые слова:** умозаключение, тренажер, суждение.

V.P. ZUBKOV Candidate of Engineering, docent,  
M.L. SOLOVJEV Candidate of Engineering, docent.

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: V\_P\_Z@rambler.ru*

## **Development of analytical apparatus to acquisition of skills and knowledge by inference**

**Abstract.** This paper discusses the approaches to the creation of the simulator to study the application of inference. Explores ways to build specific detection algorithms judgments.

**Key words:** inference, simulator, judgment.

Повышение квалификации операторов в информационно-обменном процессе является актуальной задачей. Информационно-интеллектуальная деятельность мышления оператора, направлена на выработку представлений, понятий, суждений, умозаключений, проведение креативной мыслительной деятельности.

В данной работе рассматривается подход создания тренажера по изучению применения умозаключений.

Трудности состоят в построении конкретных алгоритмов выделения суждений. Например, для превращения суждения на языке CLisp был реализован следующий алгоритм.

Создаются справочники кванторов, отношений, правил вывода, а также набор суждений, которые уже предполагаются выделенными из текста. С помощью ассоциативных списков строятся структуры суждений, по которым находят соответствующие правила. После применения правил и обратного построения суждения получается новый вид суждения.

По такому же принципу создаются алгоритмы обращения суждений, преобразования согласно логическому квадрату и т.д.

Выстраивая умозаключения в некоторые последовательности можно, применяя правила логического квадрата простого категорического силлогизма производить некоторые умозаключения при управлении пользователя.

Умозаключение [1] – это форма мышления, посредством которой из одного или нескольких суждений выводится новое суждение. Существование такой формы в нашем мышлении, как понятия и суждения, обусловлено самой объективной действительностью. В основе понятия лежит предметный характер действительности, в основе суждения – связь (отношение) предметов. Объективную основу умозаключения составляет более сложная взаимная связь предметов, их взаимные отношения.

Суждение, содержащее новое знание, может быть получено посредством преобразования некоторого суждения. К ним относятся: превращение, обращение, противопоставление предикату, умозаключения по логическому квадрату.

Превращение суждения состоит в установлении отношения субъекта к понятию, противоречащему по качеству предикату исходного суждения.

Превращать можно общеутвердительные (А), общеотрицательные (Е), частноутвердительные (I) и частноотрицательные суждения (О):

- все S есть P → ни одно S не есть не-P ( $\forall S * P \Rightarrow \sim 1S \sim * \sim P$ );
- ни одно S не есть не-P → все S есть P ( $\sim 1S \sim * \sim P \Rightarrow \forall S * P$ );
- некоторые S есть P → некоторые S не есть не-P ( $\exists S * P \Rightarrow \exists S \sim * \sim P$ );
- некоторые S не есть P → некоторые S есть не-P ( $\exists S \sim * P \Rightarrow \exists S * \sim P$ ).

При обращении субъектом (S) становится предикат (P), а предикатом – субъект исходного суждения. Различают обращения простые и обращения с ограничением. В простом обращении количества суждения не изменяются.

В обращении с ограничением объемы в суждениях ограничиваются:

- все S есть P → некоторые P есть S ( $\forall S * P \Rightarrow \exists S * P$ );
- все S, и только S, есть P → все P есть S ( $\forall! S * P \Rightarrow \forall P * S$ );
- ни одно S не есть P → ни одно P не есть S ( $\sim 1S \sim * P \Rightarrow \sim 1P \sim * S$ );
- некоторые S есть P → некоторые P есть S ( $\exists S * P \Rightarrow \exists P * S$ );
- некоторые S и только S есть P → некоторые P есть S ( $\exists! S * P \Rightarrow \exists P * S$ ).

Субъектом суждения при противопоставлении предикату является не предикат исходного суждения, как в обращении, а понятие, противоречащее предикату: все S есть P → ни одно не-P не есть S ( $\forall S * P \Rightarrow \sim 1P \sim * S$ ).

Схемы противопоставления следующие:

- ни одно S не есть P → некоторые не-P есть S ( $\sim 1S \sim * P \Rightarrow \exists \sim P * S$ );
- некоторые S не есть P → некоторые не-P есть S ( $\exists S \sim * P \Rightarrow \exists \sim P * S$ ).



Широко распространенным видом опосредствованных умозаключений является простой категорический силлогизм, заключение в котором получается из двух категорических суждений (рис. 1).

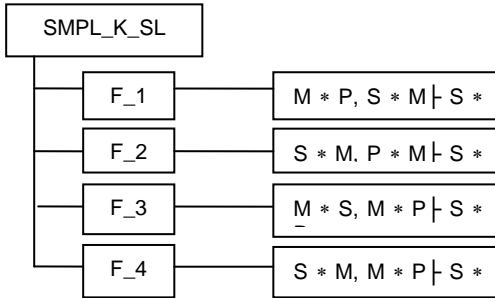


Рис. 1. Виды простого категорического силлогизма:  
SMPL\_K\_SL – простой категорический силлогизм; F<sub>i</sub> – i-я фигура

В основе вывода по категорическому силлогизму лежит аксиома силлогизма: «Все, что утверждается или отрицается о роде (или классе), необходимо утверждается или отрицается о виде (или члене данного класса), принадлежащем к данному роду».

В простом категорическом силлогизме необходимо соблюдать следующие правила:

Пр\_1) в силлогизме должно быть только три термина ( $\exists!3T \in SL$ ).

Пр\_2) средний термин должен быть распределен хотя бы в одной из посылок  $(M \in P1) \vee (M \in P2)$ .

Пр\_3) термин, не распределенный в посылке, не может быть распределен и в заключении  $(T \notin P1) \wedge (T \notin P2) \Rightarrow (T \notin Z)$ .

Пр\_4) хотя бы одна из посылок должна быть утвердительным суждением  $(P1 = A) \vee (P1 = I) \vee (P2 = A) \vee (P2 = I)$ .

Пр\_5) если одна из посылок – отрицательное суждение, то и заключение должно быть отрицательным  $(P1 = E) \vee (P1 = O) \vee (P2 = E) \vee (P2 = O) \Rightarrow (Z = E) \vee (Z = O)$ .

Пр\_6) хотя бы одна из посылок должна быть общим суждением  $\exists P (P = A) \vee (P = E)$ .

Пр\_7) если одна из посылок – частное суждение, то и заключение должно быть частным  $(P1 = I) \vee (P1 = O) \vee (P2 = I) \vee (P2 = O) \Rightarrow (Z = I) \vee (Z = O)$ .

В работе предложены конкретные алгоритмы преобразования суждений. Обобщенный алгоритм программной системы получения знаний путем умозаключений можно представить следующим образом[2]:

1. Обработка текста на естественном языке.
2. Распознавание формальных структур в тексте.

3. Выделение суждений и их анализ.
4. Построение структуры суждений.
5. Определение связей между суждениями.
6. Построение цепи логически связанных суждений.
7. Применение правил вывода.
8. Получение нового знания.

#### Литература

1. **Тимошук, А.С.** Методическая разработка проведения занятия по теме "Умозаключение" курса "Логика" для слушателей дневной формы обучения./ А.С. Тимошук – Владимир, 1999. - 18 с.
2. **Зубков, В.П., Соловьев, М.Л.** Автоматизация процесса приобретения знаний./ФГБОУ ВПО, ИГЭУ – Иваново, 2014.- 268 с.

*Зубков Валентин Петрович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: V\_P\_Z@rambler.ru  
*Соловьев Михаил Леонидович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: V\_P\_Z@rambler.ru

УДК 378.14: 514.18

А.М. ФЕДОТОВ, к.т.н., доцент

Ивановский энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: fams@ispu.ru*

### Методическое и программное обеспечение тест контроля

**Аннотация.** По дисциплинам «начертательная геометрия» и «инженерная графика» предлагается система тестового контроля, имеющая методические, теоретические и практические компоненты, позволяющие проводить тестовый контроль в трех режимах: обучающий, контрольно- обучающий и контрольный.

**Ключевые слова:** Начертательная геометрия, инженерная графика, тест-контроль

A.M. FEDOTOV, Ph.D., Associate Professor

Ivanovo Energy University Lenin 153003 Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34  
*E-mail: fams@ispu.ru*

### Methodology and software test control

**Abstract.** In the disciplines "nachertatel'naya geometry" and "Engineering Graphics", a system test control, which has methodological, theoretical and practical components, allowing to carry out a test-control in three modes: training, control and training and control.

**Keywords:** Descriptive geometry, engineering graphics, test control

Система обучения любым дисциплинам, в том числе и начертательной геометрии и инженерной графики включает в себя теоретическую и практическую части и в обучающей системе должны быть реализованы следующие учебные компоненты:

1) теоретическая, которая вводит понятия и определения, определяет круг решаемых в рамках дисциплины задач; легко реализуется в виде связанных страниц с возможностью перехода между разделами и темами;

2) теоретико-обучающая часть, которая позволяет закреплять аксиоматические знания предметной области, реализуется в виде тестов с многоуровневой подсказкой и ссылками на разделы теоретической части;

3) теоретико-контролирующая часть, которая проверяет аксиоматические знания, владение терминами и пр., традиционно реализуется наборами тестов;

4) практическая демонстрационная часть, которая дает обзор основных методов решения задач, демонстрирует применение методов для решения типовых задач; реализуется в виде учебного фильма, презентации или flash-ролика;

5) практико-обучающая часть, которая подразумевает самостоятельное решение под контролем преподавателя или системы, с возможностью получения подсказки или ссылки на разделы теории и демонстрации задач;

6) практико-контролирующая часть, которая подразумевает полностью самостоятельное решение задачи и определение итоговой оценки.

Основополагающим является второй и третий учебные компоненты, а именно, теоретико-обучающая и теоретико-контролирующая части, которые позволяют закреплять аксиоматические знания предметной области, на базе которых решаются все остальные. Данная работа посвящена разработке методического и программного обеспечения контрольно-обучающего комплекса на примере одной из тем курса «Начертательная геометрия».

Использование компьютерных технологий позволяет объединить в одной программной единице как функции обучения так и функции контроля, т.е. объединить второй и третий учебные компоненты.

Для реализации данных учебных компонент необходимо выделить в каждой дисциплине ряд основополагающих элементов, причем в каждой выделенной компоненте должно присутствовать максимум три-четыре элемента, определяющих данную компоненту. Общее количество не должно превышать пяти-шести вопросов по данной теме. Для реализации указанных ограничений предлагается использовать «прямой» и «обратный» вопросы. Разделение на «прямой» и «обратный» вопросы чисто условно. Данный подход позволяет использовать теоре-

тическую часть обучающей части комплекса одинаковую для обоих вопросов.

Рассмотрим данный подход на примере одной из тем курса «Начертательная геометрия», а именно «Прямая. Взаимное положение прямых».

По данной теме возможны следующие контрольные моменты:

- определение положения прямой относительно плоскостей проекций;
- определение принадлежности точки прямой;
- определение взаимного положения прямых.

В качестве «прямого» и «обратного» вопроса рассмотрим первый из указанных моментов, а именно «Определение положения прямой относительно плоскостей проекций». Рассмотрим на данном примере «прямой» и «обратный» вопрос. «Прямой» вопрос: «На каком черте изображена горизонталь?»; «Обратный» вопрос: «На чертеже изображена ...».

В настоящей момент существует достаточно много программ по обеспечению тестовых программ по ряду дисциплин. Однако они имеют ряд недостатков с точки зрения аспектов обучения.

Наиболее приближено к системе обучения по дисциплине «Начертательная геометрия» является «Интернет тестирование», которое так же можно существенно улучшить.

Существующие программы нацелены в основном на контроль, а для обеспечения самостоятельной работы студентов основным является режим обучения.

В данной работе рассматриваются в основном вопросы обучающей компоненты контрольно-обучающих комплексов.

В обучении важным является внедрение в систему компоненту «преподаватель».

Рассмотрим процесс обучения студентов при традиционных методах обучения.

При проверке знаний студентов методом тестирования в первую очередь студенту задается вопрос, на который студент дает ответ. В случае неправильного ответа студенту предлагается еще раз ознакомиться с теоретической частью данного вопроса и повторить ответ. В случае повторно неправильного ответа студенту дается правильный ответ с обоснованием правильности с теоретической точки зрения. При желании студента, ему объясняется неправильность других ответов.

Рассмотрим реализацию «эффекта преподавателя» при реализации программного обеспечения обучающего режима.

В режиме обучения студенту предлагается вопрос, на который он должен ответить. До той поры, пока студент не ответит на заданный вопрос, ему нет возможности обратиться к помощи в виде теоретической части. После ответа студент имеет возможность обратиться к теоретической части. Для того чтобы получить правильный ответ, ему

необходимо дать повторный ответ и только после этого он имеет возможность получить правильный ответ. При желании студента, ему предоставляется возможность получить ответ, почему другие вопросы были неправильные.

Таким образом, реализуется стимулирование студента для изучения данного вопроса. Студент в данном режиме (обучающем) имеет возможность выбрать любой вопрос и неоднократно с ним работать.

Данная программа реализует еще два традиционных режима – контрольно-обучающий и контрольный. В контрольно-обучающем режиме студент имеет возможность обращаться к любому вопросу и к базе теории без возможности обращения к базе правильных ответов.

В контрольном режиме каждый вопрос генерируется датчиком случайных чисел, при этом блокируется возможность получить одинаковый «прямой» и «обратный» вопросы.

*Федотов Александр Михайлович*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: mfams@kig.ispu.ru

## СЕКЦИЯ «РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

УДК 621.321.925

Т.Ю. ВИНУКUROVA, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: shuin@rza.ispu.ru*

### **Условия применимости защиты от замыканий на землю сетей 6–35 кВ, основанной на сравнении высших гармоник фазных токов**

**Аннотация.** Аналитическим способом получены условия применимости токовой защиты от замыканий на землю, основанной на способе относительного замера высших гармоник в фазах защищаемого присоединения. На основе исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор определено, что на селективность и устойчивость функционирования рассматриваемой защиты существенное влияние оказывает наличие высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой, включенной в конце линии. Сделан вывод о применимости способа выполнения защиты, основанного на сравнении уровней высших гармоник в фазах защищаемого присоединения.

**Ключевые слова:** электрические сети 6–35 кВ, однофазные замыкания на землю, токовые защиты от однофазных замыканий на землю, высшие гармоники.

T.Yu. VINOKUROVA, PhD student  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: shuin@rza.ispu.ru*

### **The applicability conditions of protection against single-phase earth faults based on the comparing of higher harmonics of the phase currents in 6–35 kV networks**

**Abstract.** The applicability conditions of current protection against single-phase earth faults based on the method of relative measurement of higher harmonics in the phase of protected connection are obtained by the analytical method. Research on simulation models of 6–10 kV cable networks with neutral grounding through arcing reactor have shown that the presence of higher harmonics generated by nonlinear load that is connected to the line end has a significant influence on the selectivity and stability of protection functioning. The conclusion about the applicability of method for performing the protection based on a comparison of the higher harmonics levels in the phases of the protected connection is made.

**Key words:** electric networks 6–10 kV, single-phase earth fault, current protection against single-phase earth faults, higher harmonics

**Введение.** В компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ для выполнения селективной защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) основное применение получили максимальные токовые защиты абсолютного замера общего уровня высших гармоник (ВГ) в токе нулевой последовательности защищаемого присоединения [1]. Область применения таких защит существенно ограничена нестабильностью спектра и общего уровня ВГ в фазных напряжениях и, соответственно, в токе ОЗЗ контролируемой сети. Более широкую область применения в принципе позволяют получить токовые защиты относительного замера ВГ, основанные на сравнении между собой уровней ВГ в токах  $3I_0$  присоединений защищаемого объекта или в фазных токах защищаемого присоединения. Первый из указанных способов требует централизованного исполнения устройства защиты, что ограничивает возможности его применения. Преимуществом второго из указанных способов выполнения селективной защиты от ОЗЗ, предложенного и реализованного ВНИИЭ в экспериментальных образцах защиты типа ЗЗО [2], является не только возможность его использования в локальных (на одно присоединение) устройствах защиты, но и подключения к фазным трансформаторам тока. Информация об опыте эксплуатации экспериментальных образцов защиты типа ЗЗО в литературных источниках отсутствует, поэтому представляет интерес анализ условий применимости устройств защиты по данному способу.

**Условия применимости защиты от ОЗЗ компенсированных сетей 6–35 кВ, основанной на сравнении ВГ фазных токов.** При достаточно высокой избирательной чувствительности измерительного органа защиты, сравнивающего уровни ВГ в фазах защищаемого присоединения, условия применимости защиты по данному способу определяются следующими соотношениями (при ОЗЗ на фазе "А"):

$$K_{\text{повр}}^{\text{ВГ}} = \frac{I_{\text{повр. ф. А}}^{\text{ВГ}}}{I_{\text{неп. ф. В(С)}}^{\text{ВГ}}} = \frac{2\sqrt{3}(C_{\text{М1}} + C_{0\Sigma})}{\sqrt{4(1,5C_{\text{М1}} + 0,5C_{01})^2 + 3(C_{\text{М1}} + C_{01})^2}} \geq K_{\text{отс}}; \quad (1)$$

$$K_{\text{неп}}^{\text{ВГ}} = \frac{I_{\text{неп. ф. В(С)}}^{\text{ВГ}}}{I_{\text{повр. ф. А}}^{\text{ВГ}}} = \frac{\sqrt{4(1,5C_{\text{М2}} + 0,5C_{02})^2 + 3(C_{\text{М2}} + C_{02})^2}}{2\sqrt{3}C_{\text{М2}}} \geq K_{\text{отс}}, \quad (2)$$

где  $C_{01}$ ,  $C_{\text{М1}}$  – емкость фазы на землю и междуфазная емкость поврежденного присоединения;  $C_{02}$ ,  $C_{\text{М2}}$  – емкость фазы на землю и междуфазная емкость неповрежденного присоединения;  $C_{0\Sigma}$  – суммарная емкость фазы на землю электрической сети.

В [3] на основе статистического анализа параметров компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ показано, что в пределах собственной емкости присоединения может достигать 35–40% от емкости сети, т.е.  $C_{0i} = 0,35\text{--}0,4 C_{0\Sigma}$ . Для кабельных сетей 6–35 кВ, выполненных с применением трехжильных кабелей, соотношение между рабочей емкостью и емкостью фазы на землю  $K_{\text{С}} = C_{\text{раб}}/C_0 = (C_0 + 3C_{\text{М}})/C_0 \approx 1,5\text{...}2,0$ .

Принимая  $K_{отс} = 2,5$ ,  $C_{01} = 0,4C_{0\Sigma}$  и  $K_c = 2$ , из (1) и (2) получим

$$K_{i \text{ повр}}^{BG} \approx 3,22 \geq K_{отс} = 2,5;$$

$$K_{i \text{ неп}}^{BG} \approx 3,22 \geq K_{отс} = 2,5,$$

т.е. условия применимости токовой защиты относительного замера ВГ в фазах защищаемого присоединения при условии, что источником ВГ является только ЭДС источника питания, выполняются даже при наиболее неблагоприятных соотношениях между междуфазной емкостью и собственной емкостью фазы на землю  $C_M$  и  $C_0$  поврежденного присоединения и максимальных значениях  $K_c$ .

Расчеты на имитационных моделях компенсированных кабельных сетей 6–35 кВ подтверждают полученные аналитическим способом соотношения среднеквадратичных значений токов ВГ в поврежденной и неповрежденных фазах для неповрежденного и поврежденного присоединений (1) и (2).

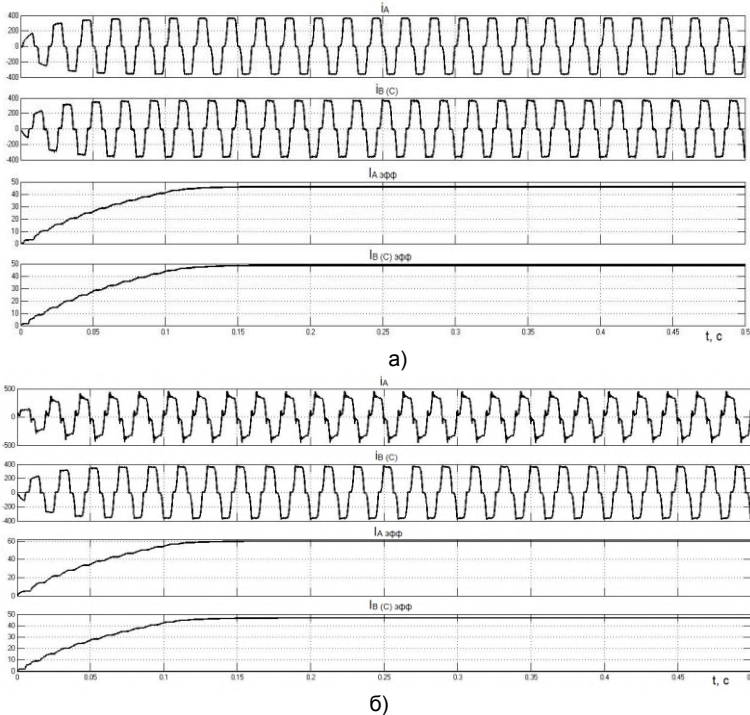


Рис. 1. Фазные токи  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  и их среднеквадратичные (эффективные) значения на присоединении с нелинейной нагрузкой – источником ВГ ( $U_{ном} = 6$  кВ,  $I_{C\Sigma} = 30$ ,  $I_{C \text{ собс}} = 3$  А): а – при внешнем ОЗЗ на фазе «А»; б – при внутреннем ОЗЗ на фазе «А»



Однако уравнения (1) и (2), определяющие условия применимости защиты, основанной на сравнении уровней ВГ в фазных токах, не учитывают влияние на селективность и устойчивость ее функционирования высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой, включенной в конце линии (электротермические и электросварочные установки, преобразователи переменный/ постоянный ток и т.п.). Исследования влияния указанного фактора на работу рассматриваемой защиты, выполненные на имитационных моделях кабельной сети, показали, что ВГ, генерируемые нелинейной нагрузкой, включенной в конце защищаемой линии, значительно уменьшают соотношения уровней ВГ в фазных токах по сравнению с рассчитанными по (1) и (2) значениями (например, рис. 1), что может привести к неправильному функционированию защиты.

На соотношения уровней ВГ в фазных токах при ОЗЗ, а, следовательно, и на устойчивость функционирования токовой защиты по данному способу могут оказывать также существенное влияние такие факторы, как переходное сопротивление в месте ОЗЗ, неравенство уровней ВГ по фазам сети и др.

**Заключение.** Учитывая изложенное, способ выполнения индивидуальной защиты от ОЗЗ, основанный на сравнении уровней ВГ в фазах защищаемого присоединения, представляется неперспективным.

#### Литература

1. **Кискачи В.М., Назаров Ю.Г.** Сигнализация однофазных замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях 6-10 кВ / Труды ВНИИЭ, вып. 16. - М.: Госэнергоиздат, 1963. – С. 219 – 251.
2. **А.С. 221121** (СССР). Способ защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью / В.М. Кискачи. Оpubл. в Б.И., 1968, № 21.
3. **Шагурина Е.С.** Повышение эффективности функционирования в переходных режимах устройств релейной защиты на основе высших гармоник / Дис. .... канд. техн. наук. – Иваново, Ивановск. гос. энерг. ун-т. – 2012.

*Шуин Владимир Александрович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: shuin@rza.ispu.ru

*Винокурова Татьяна Юрьевна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

УДК 621.314

В.А. ШУИН, д.т.н., профессор,  
Г.А. ФИЛАТОВА, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34  
*E-mail: fgala90@mail.ru*

### **Частотные характеристики и модель трансформатора напряжения в аспекте задачи определения места замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ**

**Аннотация.** Показано влияние частотных характеристик первичных датчиков напряжения на точность определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ.

**Ключевые слова:** трансформаторы напряжения, распределительные сети 6-10 кВ.

V.A. SHUIN, Doctor of Engineering, professor,  
G.A. FILATOVA, assistant

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: fgala90@mail.ru*

### **Frequency characteristics and model of voltage transformer in terms of determining of the earth fault place in the medium-voltage cable networks**

**Abstract.** The influence of the frequency characteristics of the primary voltage sensors on the accuracy of determining the place of the single-phase earth fault in the cable networks of 6-10 kV is shown.

**Key words:** voltage transformers, distribution medium-voltage networks.

**Введение.** Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ и часто являются первопричиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом [1 и др.]. Защита от ОЗЗ на кабельных линиях, как правило, действует на сигнал, а поврежденный участок отключается от сети "вручную" в процессе оперативных переключений в сети, производимых без нарушения электроснабжения потребителей. Сокращение затрат времени на поиск и ликвидацию повреждения и повышение надежности электроснабжения потребителей возможны только при решении задачи дистанционного определения места (зоны) ОЗЗ (ОМЗЗ). Особенно актуальным представляется решение данной задачи для кабельных сетей 6 – 10 кВ городского электроснабжения и разветвленных и сложных по конфигурации кабельных сетей электроснабжения предприятий некоторых отраслей промышленности с большим электропотреблением.

**Частотный диапазон работы устройств ОМЗЗ, основанных на использовании параметрических способов (ПАР).** Для определения места замыкания на землю, в том числе кратковременного или дугового перемежающегося ОЗЗ, на линиях, находящихся под рабочим напряжением, предпочтительнее использовать токи и напряжения переходного процесса (так называемые параметрические методы ОМЗЗ).

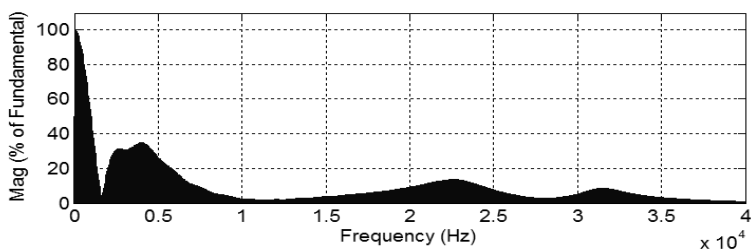
В качестве информационных параметров в таких устройствах могут использоваться различные величины переходного процесса (переходный ток нулевой последовательности и его свободные составляющие; переходное напряжение нулевой последовательности и его свободные составляющие; ток и напряжение поврежденной фазы поврежденной линии). На точность измерения электрических величин переходного процесса в устройствах ОМЗЗ, основанных на использовании параметрических способов, существенное влияние могут оказывать частотные характеристики первичных преобразователей тока и напряжения.

Исследования на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ, выполненных в среде системы моделирования Simulink, показали, что частотный спектр электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в основном находится в диапазоне частот до 30 – 35 кГц (например, табл. 1). На рис. 1 в качестве примера приведены спектры переходного тока в месте ОЗЗ и переходного напряжения нулевой последовательности для кабельной сети 6 кВ с суммарным емкостным током  $I_{C\Sigma} = 30$  А.

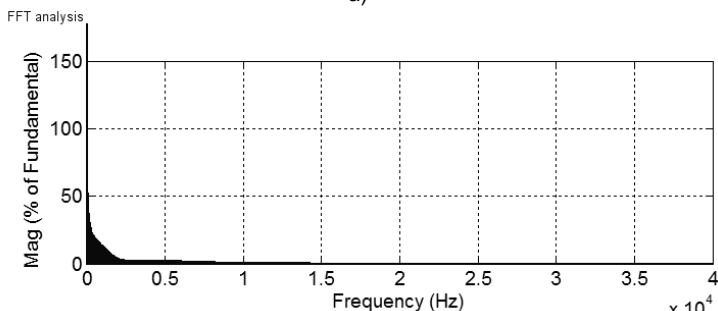
**Таблица 1. Частотный спектр электрических величин переходного процесса при ОЗЗ вблизи шин для сети 6 кВ с суммарным емкостным током 30 А**

Частота, Гц	Процентное содержание относительно первой гармоники (50 Гц) для кабельной линии 0,1 км		Процентное содержание относительно первой гармоники (50 Гц) для кабельной линии 1 км	
	Для тока нулевой последовательности	Для напряжения нулевой последовательности	Для тока нулевой последовательности	Для напряжения нулевой последовательности
50	100	100	100	100
500	85,7	19,9	56,3	21,72
1000	49,75	13,72	64,02	14,68
2000	20,31	4	252,94	3,98
5000	20,6	2,67	16,42	2,83
10000	2,5	1,17	43,65	1,21
20000	9	0,44	8,34	0,66
30000	5,22	0,57	1,2	0,36
40000	0,88	0,34	0,82	0,31
50000	2,09	0,2	3,1	0,06

**Частотная характеристика и модель трансформатора напряжения 6–10 кВ.** Устройства ОМЗЗ по цепям тока могут подключаться к кабельным трансформаторам тока нулевой последовательности (ТТНП). Экспериментальные исследования и исследования на имитационных моделях показали, что при малых вторичных нагрузках (порядка долей Ом) кабельные ТТНП типа ТЗЛМ и ТЗЛ в указанном выше частотном диапазоне обеспечивают погрешности по току не более 10%, что в первом приближении приемлемо для определения зоны ОЗЗ (т.е. участка, который можно выделить для проведения высоковольтных испытаний).



а)



б)

Рис. 1. Частотный спектр тока переходного процесса (а) и напряжения нулевой последовательности (б) при ОЗЗ вблизи шин кабельной сети 6 кВ с суммарным емкостным током  $I_{C\Sigma} = 30$  А

На рис. 2 приведена полученная экспериментально зависимость амплитудной погрешности для трансформатора напряжения (ТН) типа НТМИ 6-66 в диапазоне частот до 90 кГц.

Из рис. 2 можно видеть, что ТН 6–10 кВ обеспечивают приемлемую для решения рассматриваемой задачи точность измерений (с погрешностью до ~10%) только в диапазоне частот до 15–20 кГц, что недостаточно для решения задачи ОМЗЗ. Для обеспечения приемлемой точности измерений напряжений переходного процесса при ОЗЗ

входные цепи напряжения устройства ОМЗЗ должны содержать блок, моделирующий частотную характеристику реального ТН.

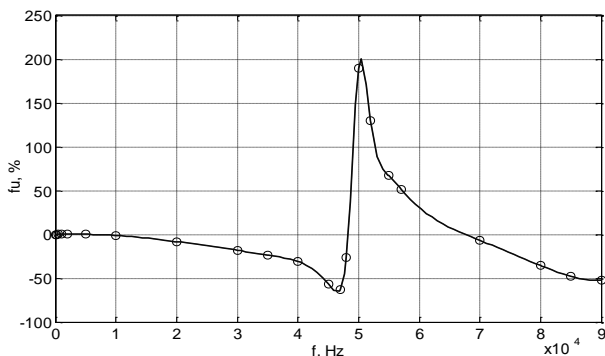


Рис. 2. Относительная амплитудная погрешность трансформатора напряжения типа НТМИ в зависимости от частоты

**Подходы к моделированию ТН.** Наиболее простой вариант модели (в виде эквивалентной схемы замещения) и ее частотные характеристики приведены на рис. 3.

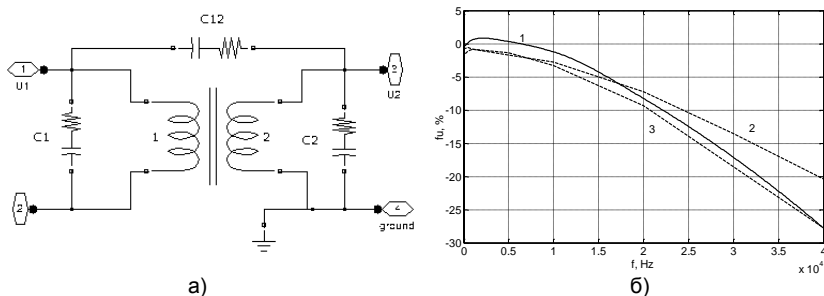


Рис. 3. Модель трансформатора напряжения (а) и оценка погрешности модели в диапазоне частот до 40 кГц: кривая 1 – экспериментальная зависимость для реального ТН; 2 – модель ТН без учета емкостей; 3 – модель ТН с учетом емкостей обмоток и между обмотками

### Литература

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.

Шуин Владимир Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vshuin@mail.ru

Филатова Галина Андреевна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: fgala90@mail.ru

УДК 621.316.925

Л.М. КОЛЕСОВ, к.т.н., доцент,  
В.В. МОЖУХИНА, ассистент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: [mvv277@gmail.com](mailto:mvv277@gmail.com)

### **Анализ возможности распознавания режимов резервной дистанционной защитой, использующей сумму токов двух сторон, на линии с несколькими ответвлениями**

**Аннотация.** Для повышения чувствительности дистанционной защиты к коротким замыканиям (КЗ) на стороне низшего напряжения (НН) трансформатора ответвления предлагается выполнить дополнительное реле сопротивления, включаемое на сумму токов двух питающих концов линии и напряжение одной из сторон, математически смещенное к месту ответвления. Разработаны критерии для оценки возможности распознавания режимов КЗ и без КЗ на стороне НН трансформатора. Проведенный анализ показал, что предлагаемое устройство имеет значительно большую возможность распознавания режимов КЗ, чем существующие резервные защиты.

**Ключевые слова:** дистанционная защита, линия с ответвлениями, возможность распознавания режимов.

L.M. KOLESOV, Candidate of Engineering, docent,  
V.V. MOZHZHUKHINA, assistant

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: [kolesovlm@yandex.ru](mailto:kolesovlm@yandex.ru), [mvv277@gmail.com](mailto:mvv277@gmail.com)

### **Analysis the modes discernment possibility of the backup distance protection which uses the sum of currents of two supplying line ends on a line with several taps**

**Abstract.** To increase the sensitivity of the line distance protection in case of short circuits on the low-voltage side of the tap transformers it was suggested to use an additional impedance relay which uses the sum of currents of two supplying line ends and the voltage of one line end mathematically shifted to the place of the tap. Criterias to evaluate the discernment possibility of short-circuit conditions and the non-short-circuit modes on the low-voltage side of the tap transformer were developed. Analysis of the results showed that the proposed device has a significantly greater possibility of the discernment the short-circuit conditions than the existing backup protections.

**Key words:** distance protection, tapped line, the possibility of the modes discernment.

В настоящее время в большинстве случаев для действия при коротких замыканиях (КЗ) на стороне низшего напряжения (НН) транс-

форматоров ответвлений используется резервная ступень токовой или дистанционной защиты (ДЗ) линии [1], подключаемая к трансформаторам тока и напряжения одного из концов линии. При этом возникают значительные трудности в обеспечении требуемой чувствительности к КЗ за трансформатором [2]. Для действия при КЗ на стороне НН трансформаторов ответвлений также применяется специальная резервная ступень продольной дифференциальной токовой защиты (ДЗЛ) линии. При КЗ на ответвлении ДЗЛ функционирует как максимальная токовая защита (МТЗ), включенная на сумму токов двух питающих концов линии [3]. В этой защите при выборе тока срабатывания необходимо обеспечить отстройку от тока самозапуска суммарной нагрузки всех ответвлений. Поэтому обеспечение требуемой чувствительности данной ступени при наличии на линии нескольких ответвлений затруднительно.

Для повышения чувствительности дистанционной защиты к КЗ на стороне НН трансформатора ответвления предлагается выполнить дополнительное реле сопротивления, включаемое на сумму токов двух питающих концов линии и напряжение одной из сторон, математически смещенное к месту отвлечения [4] (рисунок 1). Для повышения чувствительности при двухфазных КЗ на стороне НН трансформаторов ответвления данный измерительный орган сопротивления (ИОС) включается на фазные величины [4].

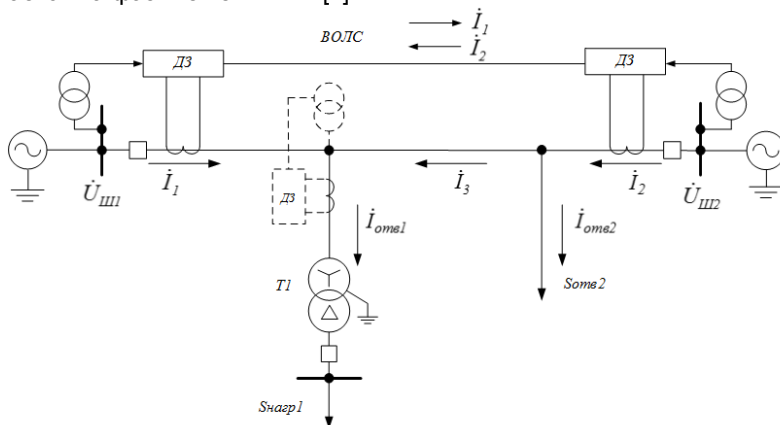


Рис. 1. Схема подключения предлагаемого ИОС

Для исследования возможности распознавания режимов КЗ и без КЗ была разработана математическая модель участка сети, составлена система уравнений для определения замеров ИО предлагаемого и существующих устройств, и получено ее решение. Кроме того, для проверки полученных результатов были разработаны комплексные

математические модели системы «объект-устройство» с использованием программного комплекса Matlab/Simulink.

Наличие на линии нескольких ответвлений заменялось в модели двумя ответвлениями, одно из которых являлось защищаемым трансформатором с нагрузкой, а второе – эквивалентной нагрузкой остальных ответвлений.

Исследования проводились для случаев установки на защищаемом ответвлении трансформаторов мощностью от 2,5 до 80 МВА при эквивалентной мощности нагрузки остальных ответвлений от 0 до 200 МВА при различных значениях коэффициента самозапуска нагрузки ( $K_{зап}$ ).

При оценке возможности распознавания режимов КЗ и без КЗ разными устройствами выбирались два наиболее тяжелых режима.

В качестве наиболее тяжелого режима без КЗ для всех устройств принимался режим самозапуска суммарной нагрузки всех ответвлений линии. В качестве наиболее тяжелого режима внутреннего КЗ для предлагаемой дистанционной защиты рассматривался режим КЗ на стороне НН трансформатора ответвления при наличии максимальной рабочей нагрузки остальных ответвлений. А для резервной ступени ДЗЛ рассматривался режим КЗ на стороне НН трансформатора ответвления при отсутствии нагрузки.

У предлагаемого устройства для оценки возможности распознавания режимов КЗ и без КЗ предложены два критерия: по углу и по величине. В качестве критерия возможности распознавания режимов по углу предлагается использовать наименьшую разность углов между областями замеров сопротивления ИО в режимах КЗ на стороне НН трансформатора и в режимах без КЗ ( $\Delta\phi$ ). В качестве критерия по величине предлагается использовать относительное значение разности замера ИОС в режиме без КЗ и при КЗ к величине замера при КЗ ( $\Delta Z_{отн}$ ).

Для оценки возможности распознавания режимов резервной ступенью ДЗЛ использован критерий, определяемый отношением разности между минимальным значением тока в режиме КЗ и максимальным значением тока в режиме без КЗ к величине тока КЗ ( $\Delta I_{отн}$ ).

Для определения возможности распознавания режимов КЗ при любых мощностях трансформаторов и нагрузки определены зависимости указанных критериев от относительного значения мощности нагрузки, характеризуемого отношением суммарной мощности нагрузки ответвлений к номинальной мощности защищаемого трансформатора ( $S_{отн}$ ).

Результаты исследований показали, что величина  $\Delta Z_{отн}$  во всех рассмотренных режимах является положительной, и, следовательно, предлагаемое устройство имеет возможность распознать режимы КЗ и без КЗ практически для любых реально возможных  $S_{отн}$ . При малых значениях указанного критерия для распознавания режимов целесообразно использование величины  $\Delta\phi$ .



Критерий  $\Delta I_{отн}$  положителен только при определенных значениях относительной мощности нагрузки (например, при  $K_{зап}=1,5$   $\Delta I_{отн} > 0$  только при  $S_{отн} < 5$ ). Следовательно, существующее устройство имеет теоритическую возможность распознать режим КЗ только в ограниченных пределах соотношения мощностей. С учетом того, что при выборе уставок необходимо учитывать коэффициент отстройки, коэффициент возврата и коэффициент чувствительности, существующее устройство может быть использовано только при  $S_{отн}$  меньшем 2-3.

Анализ распознавания режимов существующей дистанционной защиты был выполнен в [4]. Результаты исследований показали, что существующая дистанционная защита может не обеспечить распознавание режимов даже при наличии только одного ответвления.

Анализ результатов расчета предложенных критериев показал, что предлагаемое устройство имеет значительно большую возможность распознавания режимов КЗ, чем существующие.

Результаты.

1. Наличие нескольких ответвлений на линии значительно уменьшает возможности распознавания режимов КЗ и без КЗ для всех рассматриваемых устройств защиты.

2. Для дистанционной защиты при оценке возможности распознавания предлагается использовать два критерия: минимальную разность углов между областями КЗ и без КЗ и наименьшее значение сопротивления между указанными областями. Для токовой защиты критерием является разность между минимальным значением тока в режиме КЗ и максимальным значением тока в режиме без КЗ (в режиме самозапуска нагрузки).

3. Предлагаемое устройство дистанционной защиты имеет возможность распознать режимы КЗ и без КЗ практически для любых реально возможных соотношений между мощностью трансформаторов и суммарной мощности нагрузки всех ответвлений линии.

#### Литература

1. **Федосеев А.М.** Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976.
2. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 7: Дистанционная защита линий 35-330 кВ. М. – Л.: Энергия, 1966.
3. Микропроцессорное устройство защиты «Сириус-2-ДЗЛ-01». Руководство по эксплуатации. – М.: ЗАО «РАДИУС Автоматика», 2012.
4. **Колесов Л.М., Можжухина В.В.** Повышение чувствительности дистанционных защит линий с ответвлениями и автотрансформаторов к коротким замыканиям на стороне низшего напряжения // Релейная защита и автоматика энергосистем, XXII конференция: тезисы докладов. – Москва, 2014. – С.123-127.

*Колесов Лев Михайлович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: kolesovlm@yandex.ru

*Можжухина Виктория Владимировна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: mvv277@gmail.com

УДК 621.316.925

О.В. ФРОЛОВА, к.т.н., доцент, О. Ю. ШИШУЛИН, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: Loga-ispu@yandex.ru*

## **Анализ применения телеускорения и телеотключения при ликвидации повреждений воздушных линий 110-220 КВ**

**Аннотация.** Проведен анализ работы устройств телеускорения и телеотключения при различных вариантах действия релейной защиты, определены преимущества и недостатки устройств, рассмотрены алгоритмы работы телеотключения при отказах релейной защиты.

**Ключевые слова:** телеускорение, телеотключение, релейная защита.

O.V. FROLOVA, Candidate of Engineering, docent,  
O.U. SHISHULIN, student,

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: loga-ispu@yandex.ru*

## **Analysis of the application and transfer trip teleprotection in liquidation damages air lines 110-220**

**Abstract.** The analysis of the devices teleprotection and remote switch for different actions of relay protection and identified the advantages and disadvantages of devices considered algorithms remote switch at fault relaying.

**Keywords:** teleprotection, transfer trip, relay protection.

Для сохранения устойчивой работы электроэнергетических систем и снижения ущерба потребителей необходимо быстрое отключение повреждения на линиях электропередачи (ЛЭП). Для этого применяются такие средства автоматического управления, как телеускорение и телеотключение.

В настоящее время на воздушных линиях 110-220 кВ в основном применяется взаимное телеускорение (ТУ) ступеней резервных защит.

В основе действия ТУ лежит ускорение ступеней защит от междупазных коротких замыканий (КЗ) и от коротких замыканий на землю, охватывающих всю линию, до действия без выдержки времени, при срабатывании аналогичных защит на противоположном конце ЛЭП.

Телеускорение имеет ряд недостатков:

- при ТУ необходима блокировка от реверса мощности;
- при переходе КЗ с одной линии на другую (для параллельных ЛЭП) взаимное ТУ может отказать из за блокировки от реверса мощности;

– ТУ не сработает при полном отказе защит с одной из сторон защищаемой линии;

– некоторые приемопередатчики, работающие по высокочастотному (ВЧ) каналу каналу, позволяют передавать в реальном времени только одну команду, в связи с чем требуется объединять ТУ защит от междуфазных КЗ и от КЗ на землю, так как ТУ при работе по ВЧ каналу требует передачи команды на время существования сработавшего состояния ступеней.

Для защиты ВЛ от КЗ на землю использовались токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТЗНП), ток в данных защитах зависит от конфигурации сети, вследствие чего невозможно иметь перекрываемые с двух сторон ступени, не выходящие за пределы защищаемой ЛЭП. В силу этого недостатка ТЗНП не было возможности осуществить ТО и было необходимо использовать ТУ.

В настоящее время появилась возможность более эффективного использования телеотключения (ТО) противоположного конца ЛЭП от выходных реле комплекта ступенчатых защит (КСЗ) (ДЗЛ+КСЗ или ДФЗ+ КСЗ), воздействуя непосредственно на электромагнит отключения выключателя без контроля команды телеотключения защитами.

При использовании современных микропроцессорных устройств в качестве защиты от КЗ на землю применяются защиты на дистанционном принципе, не зависящие от режима сети и не имеющие вышеописанных недостатков.

Современные дистанционные защиты (ДЗ) от КЗ на землю, как и ДЗ от междуфазных КЗ охватывают 0,85 длины линии. Используя полигональные характеристики срабатывания и обеспечивая с помощью уставки по активному сопротивлению чувствительность к КЗ через переходное сопротивление, можно обеспечить работу защит при КЗ в любой точке ЛЭП.

Главным преимуществом ТО является отключение выключателя на противоположном конце защищаемой линии при полном отказе защит, например при исчезновении цепей напряжения. Данный принцип используется в дополнение к дальнему резервированию. В этом случае 85% линии отключается без выдержки времени, а оставшиеся 15% со временем ступеней, охватывающих всю линию. При наличии таких выдержек времени действие ТО опережает защиты, которые должны срабатывать по условию дальнего резервирования и оно потребуются лишь при полной потере оперативного тока на подстанции. Вероятность таких случаев крайне мала, поэтому возможно применение менее жестких требований к дальнему резервированию.

Это дает возможность уменьшать выдержки времени ступеней, отвечающих за дальнейшее резервирование, и допускает их неселективную

работу в ремонтных режимах. Защищаемая же линия имеет три или более защиты: основная защита, КЗ3 и защита противоположного конца, отключающая выключатель данной стороны ЛЭП. ТО от КЗ3 является дополнительной защитой, отключающей КЗ по всей длине ЛЭП без выдержки времени. Это позволяет сохранить минимальное время отключения КЗ при выводе в техобслуживание или отказе основных защит.

Имея две или более быстродействующие защиты, можно сократить время автоматического повторного включения (АПВ) до 1с в силу отсутствия необходимости отстраиваться от резервных защит противоположного конца линии, охватывающих весь защищаемый объект.

Для ЛЭП 110-220 кВ ТО может быть выполнено следующим образом: от выходных реле защит, устройства резервирования отказа выключателей (УРОВ) и ЗНФР посылается команда ТО, разрешающая АПВ с противоположного конца, в случае неуспешного АПВ - команда «запрет АПВ».

Команда «запрет АПВ» при неуспешном АПВ может формироваться запоминанием сигнала АПВ на время, большее времени последних ступеней защит (обычно 10с). Данная команда позволяет производить АПВ только с одной стороны ЛЭП без установки шкафа отбора напряжения (ШОН) на воздушной линии.

Возможны два варианта работы ТО при действии АПВ на устойчивое КЗ с отказом защит:

- при отказе защит выключателя, включающегося вторым, повторное включение его будет запрещено командой «запрета АПВ», сформированной на противоположной стороне.

При отказе защит выключателя, включающегося первым, он будет отключен по ТО в момент АПВ второго выключателя. При этом необходимо учесть, что разница времени между АПВ с двух сторон должен быть меньше времени срабатывания защит по дальнему резервированию.

- действие АПВ на одной из сторон проводится по факту отсутствия напряжения на линии, а на другой с использованием контроля синхронизма. Алгоритм работы ТО предлагается выполнить при помощи дополнительной логики в терминале автоматического управления выключателем. Такое отключение может быть полезным и при ручном опробовании ЛЭП. Для линий без отпаек в качестве токовых реле могут быть использованы реле УРОВ. Для линий с отпаечными трансформаторами должны применяться токовые реле, срабатывание которых отстроено от величины броска тока намагничивания отпаечных трансформаторов.

Из-за недостатка средств или дефицита частот схему ТУ применяли редко. В настоящее время появились средства ВЧ связи, позво-

ляющие передавать и принимать команды независимо от работы дифференциально-фазной защиты. Так же появилась возможность передачи команд по оптоволоконному каналу связи. С помощью данных возможностей получается недорогое решение ТО для ЛЭП 110-220 кВ. Кроме того сохраняется работа ТО при повреждении своего канала связи, надежность отключения повышается в два раза.

Применение ТО вместо ТУ, кроме сохранения время отключения КЗ без выдержки времени обеспечивает повышенную надежность отключения КЗ при отказах защит, сокращает время дальнего резервирования и упрощает логику отключения.

#### Литература

1. **Лейман Р.Э., Ермаков С.В.** Использование телеотключения вместо телеускорения в защитах ВЛ 110-750кВ // Релейная защита и автоматизация. 2013 г. №1.
2. **Руководство** по эксплуатации ЭКРА.656453.234 РЭ//Шкаф защиты линии и автоматики управления линейным выключателем типа ШЭ2607 01.

*Фролова Ольга Васильевна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: loga-ispu@yandex.ru

*Шишулин Олег Юрьевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: 2inferral2@mail.ru

УДК 621.316.786

В.Е. ГЛАЗЫРИН, к.т.н., доцент,  
В.В. ВАСИЛЬЕВ, к.т.н., ст. преп.,  
К.С. ТОРАМБЕТОВ, аспирант

Новосибирский Государственный Технический Университет  
630073, г. Новосибирск, ул. К. Маркса 20  
E-mail: karamatdin86@mail.ru, glazirin.ve@power.nstu.ru

### Применение устройств комплексного управления нагрузкой в дефицитных энергосистемах

**Аннотация.** Обоснована эффективность применения комплексной автоматики управления нагрузкой в дефицитных энергосистемах. Показана её более высокая эффективность по сравнению с применением отдельных видов автоматики, таких как автоматическая частотная разгрузка и автоматика ограничения снижения напряжения.

**Ключевые слова:** энергосистема, частота, напряжение.

V.E. GLAZYRIN Candidate of Engineering, docent,  
V.V. VASIL'EV Candidate of Engineering, senior Teacher,  
K.S. TORAMBETOV post-graduate student

Novosibirsk State Technical University  
630073 Novosibirsk, K. Marksa St., 20  
*E-mail: karamatdin86@mail.ru, glazirin.ve@power.nstu.ru*

## The application of electrical load complex control devices in deficit power systems

**Abstract.** The application of electrical load complex control devices has been proved in deficit power systems. Higher efficiency of this automation in comparison with underfrequency load shedding and automatic limitation of voltage fall has been shown.

**Key words:** power system, frequency, voltage.

Для противоаварийного управления при возникновении дефицита активной мощности в энергосистемах получила широкое распространение специальная автоматика ограничения нагрузки (CAOH). Этот вид противоаварийной автоматики (ПА) является частью общесистемной автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) и действует под управлением устройств системной ПА. Такая стратегия построения ПА хорошо себя показала и получила самое широкое распространение. Однако для успешного функционирования такой системы должен быть обеспечен надёжный обмен информацией между аппаратными средствами АПНУ и распределёнными по системе устройствами CAOH.

Поскольку вероятность потери связи между устройствами, особенно в аварийных режимах, достаточно велика, необходимо использование дополнительных устройств автоматики, использующих информацию о состоянии контролируемого объекта только в месте его установки. Отсутствие таких дополнительных устройств может приводить к возникновению лавины частоты и напряжения, приводящие к массовой потере питания потребителей на продолжительное время. Для этой цели обычно используется автоматическая частотная разгрузка (АЧР), обеспечивающая предотвращение лавины частоты. В том случае, если возможно возникновение также лавины напряжения, используется автоматика ограничения снижения напряжения (АОСН).

Однако использование двух отдельных видов автоматики для реализации указанных функций имеет определённые недостатки. В связи с этим существующими устройствами АЧР, сложно построить эффективную разгрузку. Это связано, во-первых, с низкой точностью измерения частоты, во-вторых, разгрузка по частоте и по напряжению выполняются раздельно, в-третьих, не учитывается предыдущий режим работы системы и текущее значение мощности отключаемых нагрузок.

Наличие традиционных очередей АЧР I, АЧР II и дополнительной разгрузки приводит к большой сложности в построении разгрузки. [1]

Для повышения надёжности работы современных энергосистем необходим комплексный подход к реализации таких функций как АЧР и АОСН. С этой целью следует построить автоматику, эффективно сочетающую функции разгрузки как по активной, так и по реактивной мощности. Устройство, выполняющее такое совмещение функций, может быть названо комплексной автоматикой управления нагрузкой (КАУН).

Устройство КАУН должно реагировать не только на снижение частоты, но и на снижение напряжения в контролируемом узле в переходном процессе развития аварии, возникающей при дефиците активной и реактивной мощности и сопровождающейся снижением частоты и напряжения. Применение устройств КАУН в дефицитных энергосистемах, то есть имеющих значительный дефицит генерирующих мощностей и, в то же время значительный объём ответственных потребителей, является весьма актуальным.

По мере развития энергосистемы суммарная мощность потребления возрастает, растёт доля ответственных потребителей, а также растёт число потребителей, предъявляющих повышенные требования к качеству электроэнергии. Ужесточенные требования к энергосистемам в таких условиях должны удовлетворяться повышением устойчивости работы при возникающих дефицитах мощности, сопровождающихся снижением частоты и напряжения. Используя КАУН, можно существенно повысить эффективность работы противоаварийной автоматики.

Эффективность действия противоаварийной автоматики при снижении частоты может быть повышена использованием в качестве входных параметров не только величину снижения частоты, но и скорость её снижения. Использование скорости снижения частоты позволяет практически мгновенно оценить относительную величину внезапного дефицита мощности и оперативно отключить требуемый объём потребителей. В результате появляется принципиальная возможность исключить избыточное отключение нагрузки и существенно уменьшить глубину снижения частоты. При тяжелых авариях, приводящих к большим дефицитам активной мощности, имеется дополнительная опасность возникновения локальных дефицитов реактивной мощности. При этом могут возникать глубокие снижения напряжения, приводящие к нарушению устойчивости и возникновению "лавины напряжения". Если разгрузка по признаку снижения частоты будет осуществлять отключение потребителей в первую очередь в узлах, имеющих наиболее низкие напряжения, то могут быть предотвращены нарушения устойчивости в послеаварийных режимах. Такая дополнительная избирательность при отключении нагрузок по факту снижения частоты позволяет не только совместить в одном устройстве сразу две функции: АЧР и АОСН, но и сделать её более эффективной. Таким образом, реализация КАУН позволяет не только совместить функции АЧР и АОСН в одном устройстве, но и получить качественно более совершенное и эф-

фективное устройство противоаварийной автоматики. Это тем более актуально, поскольку в настоящее время энергосистемы с установленными устройствами АОСН обладают недостаточной живучестью, т.к. не способны противостоять системному развитию аварий, которые могут вызвать лавинообразные снижения напряжения и тем самым привести к обесточиванию целых энергорайонов, в том числе и потребителей первой категории. [2]

Современные микропроцессорные средства предоставляют возможность реализовать алгоритмы, учитывающие одновременно длительность и тяжесть режима, как по напряжению, так и по частоте, что может повысить эффективность разгрузки и надёжность функционирования энергосистемы. При микропроцессорной реализации КАУН необходимо создать единый комплекс с тем, чтобы полностью перекрыть функции очередей АЧР I, АЧР II, дополнительной разгрузки, а также разгрузки при снижении напряжения.

#### Литература

1. **Васильев В.В.** Разработка автоматики комплексного аварийного управления нагрузкой/Автореф. дис. канд. техн. наук. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2011.
2. **Алексеев О. П., Максимов Б. К.** Противоаварийное управление в энергосистемах при глубоких снижениях напряжения. – Энергетик, 2008, №11, с.2-4.

*Глазырин Владимир Евлампиевич,*  
ФГБОУ ВПО "Новосибирский государственный технический университет",  
e-mail: glazirin.ve@power.nstu.ru

*Васильев Владимир Владимирович,*  
ФГБОУ ВПО "Новосибирский государственный технический университет",  
e-mail: vvv@iaes.ru

*Торамбетов Караматдин Сметович,*  
ФГБОУ ВПО "Новосибирский государственный технический университет",  
e-mail: karamatdin86@mail.ru

УДК 621.3.014.7

Р.Г. ХУЗЯШЕВ, к. ф.-м. н., доцент,  
И.Л. КУЗЬМИН, к. т. н, С.И. НОВИКОВ

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51  
E-mail:090390ns@mail.ru

### **Определение расстояния до места однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью 6-35 кВ по частоте свободных колебаний**

**Аннотация.** Работа посвящена моделированию параметров свободных колебаний линии электропередач (ЛЭП) при замыканиях на землю, и исследова-



нию зависимости параметров свободных колебаний от параметров системы аварийной ЛЭП.

**Ключевые слова:** замыкания на землю, свободные колебания, отражения волн.

R. G. HUZYASHEV Candidate of Physico-mathematical Sciences, docent,  
I.L. KUZMIN Candidate of Engineering,  
S. I. NOVIKOV

Kazan state power engineering university  
420066 Kazan, Krasnoselskaya St., 51.  
*E-mail: 090390ns@mail.ru*

### **Phase-to-earth fault location technology on network with isolated neutral on 6-35 kV on natural frequency**

**Abstract.** Article is devoted to model operation of parameters of the natural frequency of a power line at earth fault, and to research of dependence of parameters of the natural frequency on parameters of system of the emergency power line.

**Key words:** earth fault, natural frequency, wave reflection.

Работа посвящена моделированию параметров свободных колебаний линии электропередач (ЛЭП) при замыканиях на землю, и исследованию зависимости параметров свободных колебаний от параметров системы аварийной ЛЭП.

Согласно [1] на участке ЛЭП до места повреждения возбуждаются две частоты свободных колебаний: низшая частота, величина которой не зависит от расстояния до места повреждения; и высшая частота, обусловленная разрядом собственной фазной емкости поврежденной фазы, величина которой обратно пропорциональна расстоянию до места повреждения. В [1] предлагается определять расстояние до места повреждения исходя из экспериментально определенной величины высшей частоты свободных колебаний, используя график зависимости величины высшей частоты свободных колебаний от расстояния до места повреждения, полученное путем проведения численного или любого другого моделирования этой зависимости.

Согласно [2] многократные отражения волн, возникающих при нормальных и аварийных коммутациях в длинной линии, приводят к разным осциллограммам сигналов тока и напряжения в зависимости от соотношения величин сопротивлений источника и нагрузки на обоих концах длинной линии и волнового сопротивления линии. В качестве сопротивления источника в ЛЭП, как правило, выступает сопротивление трансформатора, сопротивление которого намного меньше волнового сопротивления ЛЭП, вследствие чего коэффициент отражения источника будет отрицательным. Нагрузка, как правило, является активно-индуктивной, сопротивление которой намного больше волнового сопротивления ЛЭП, вследствие чего коэффициент отражения источника будет положительным. При

одинаковых знаках коэффициента отражения волны от концов линии, что характерно для ЛЭП высокого напряжения с двусторонним питанием, осциллограммы тока и напряжения при включении ЛЭП под напряжение ступенчато аperiодически нарастают до установившихся значений. Длительность каждой ступеньки определяется удвоенным временем пробега длинной линии. При разных знаках коэффициента отражения волны от концов линии, что характерно для тупиковых ЛЭП с односторонним питанием, осциллограммы тока и напряжения, во время переходного процесса при включении ЛЭП под нагрузку, изображаются затухающими колебаниями вокруг некоторых установившихся значений. Период таких колебаний определяется учетверенным временем пробега длинной линии, а обратная величина называется собственной частотой длинной линии. При появлении на воздушной ЛЭП повреждения в виде любого вида замыкания всю ЛЭП можно разбить на два участка: первый участок – расстояние от источника до места замыкания, второй участок – это расстояние от места замыкания до нагрузки. На обоих участках появляются свободные колебания, обусловленные процессами переотражения от концов линии с разными знаками коэффициента отражения.

С целью исследования зависимости параметров свободных колебаний (частоты, амплитуды, состава гармоник) от расстояния до места повреждения были исследованы три модели ЛЭП: однофазная линия с повреждением в виде короткого замыкания (КЗ), трехфазная линия с повреждением в виде трехфазного КЗ и трехфазная линия с разными типами заземления нейтрали и соответственно с повреждениями двух видов - однофазное КЗ и однофазное замыкание на землю.

Для каждой модели ЛЭП в пакете MATLAB были получены осциллограммы и спектры фазных сигналов тока и напряжения вблизи начала и конца ЛЭП. Построены зависимости собственных частот и их амплитуд при перемещении места повреждения от начала к концу ЛЭП. Сделан вывод о большей информативности осциллограмм, полученных вблизи конца ЛЭП. Схема замещения представляет собой последовательное соединение источника с сопротивлением трансформатора 10 кВА, приведенного к низкой стороне 6 кВ, ЛЭП с распределенными параметрами длиной 20 км и активно-индуктивной нагрузки с  $\text{tg}\varphi=0,5$ . Замыкания на землю моделировались замыканием выключателя на заземлитель в момент прохождения синусоиды напряжения промышленной частоты максимального значения. АЧХ были построены для осциллограмм напряжения, зарегистрированных в начале и в конце ЛЭП.

Анализ АЧХ показал, что параметром, который характеризует расстояние до места ОЗЗ, является частота гармоники свободных колебаний с наибольшей амплитудой.

В однофазной схеме частота свободных колебаний в начале и в конце ЛЭП изменяется пропорционально расстоянию до места замыкания. Амплитуда свободных колебаний в начале ЛЭП меленькая, что объясняется механизмом переотражения от концов однородной линии с одинаковыми знаками коэффициента отражения (сопротивления источника и места замыкания меньше волнового сопротивления ЛЭП), что существенно усложняет процедуру их регистрации. Амплитуда свободных колебаний в конце ЛЭП намного выше амплитуды свободных колебаний в начале ЛЭП, что объясняется механизмом переотражения от концов однородной линии с разными знаками коэффициента отражения (сопротивления места замыкания меньше волнового сопротивления ЛЭП, а сопротивление нагрузки больше волнового сопротивления ЛЭП), что существенно упрощает процедуру их регистрации. Также при больших удалениях места замыкания от начала ЛЭП наблюдается выравнивание амплитуд всех гармоник свободных колебаний для осциллограмм, зарегистрированных в начале ЛЭП, частоты которых представляют ряд натуральных чисел, что затрудняет определение гармоники с наибольшей амплитудой. Зато частоты гармоник, зарегистрированных в конце ЛЭП, представляют ряд нечетных чисел, амплитуда которых быстро уменьшаются с увеличением номера гармоники, что облегчает определение гармоники с наибольшей амплитудой.

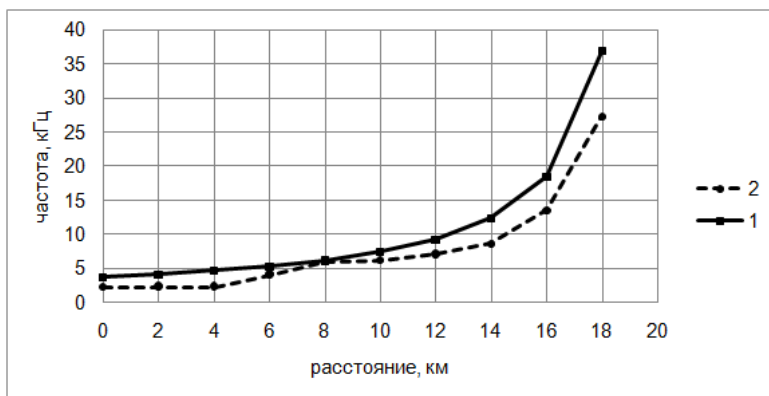


Рис. 1. Зависимость частоты свободных колебаний, зарегистрированных в конце ЛЭП длиной 20 км, от расстояния от начала ЛЭП до места ОЗЗ для однофазной (1) и трехфазной (2) схемы.

В трех фазной схеме при ОЗЗ все усугубляется, вследствие межфазных связей, результатом чего является исчезновение зависимости между частотой свободных колебаний в начале ЛЭП и расстоянием до места ОЗЗ. Однако для осциллограмм, зарегистрированных в

конце ЛЭП, сохраняется явная зависимость между частотой свободных колебаний и расстоянием до места повреждения. На рис. 1 представлена зависимость частоты свободных колебаний, зарегистрированных в конце ЛЭП, от расстояния от начала ЛЭП до места ОЗЗ для однофазной и трехфазной схемы. Полученные результаты будут использованы при разработке алгоритма работы аппаратного комплекса по определению места повреждения.

#### Литература

1. **Качесов В. Е.** Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением / В. Е. Качесов // *Электричество*, №6, 2005, с. 9-19.
2. **Зевеке Г.В. и др.** Основы теории цепей. Учебник для вузов. Изд. 4-е, переработанное / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. - М.: Энергия, 1975. - 752 с.

*Хузяшев Рустэм Газизович*

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»

e-mail: [142892@mail.ru](mailto:142892@mail.ru)

*Кузьмин Игорь Леонидович*

Филиал ОАО «СО ЕЭС» РДУ Татарстана

e-mail: [to\\_kigor@list.ru](mailto:to_kigor@list.ru)

*Новиков Сергей Иванович*

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»

e-mail: [090390ns@mail.ru](mailto:090390ns@mail.ru)

УДК 621.311

Е.А. ВОРОБЬЕВА, аспирант,  
В.А. ШУИИ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: [shuin@rza.ispu.ru](mailto:shuin@rza.ispu.ru)

### **Анализ достоверности эквивалентных моделей кабельных сетей 6–10 кВ для расчета переходных процессов при однофазных замыканиях на землю**

**Аннотация.** Переходные процессы при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в полных имитационных моделях трехфазных кабельных сетей 6 – 10 кВ, содержащих линии с распределенными параметрами, описываются "жесткой" системой дифференциальных, интегро-дифференциальных и алгебраических уравнений высокого порядка. В связи с этим актуальным является вопрос об условиях и области их применения эквивалентированных схем замещения кабельных сетей 6–10 кВ при анализе переходных процессов при ОЗЗ.

**Ключевые слова:** однофазные замыкания на землю, схема замещения.

E.A. VOROBYEVA, postgraduate;  
V.A. SHUIN, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: shuin@rza.ispu.ru

## **Analysis of validity of equivalent model of 6-10 kV cable networks for the calculation of single-phase earth faults transients**

**Abstract.** The single-phase earth faults transients in simulation models of 6 – 10 kV three-phase cable networks, containing the line with distributed parameters, described by the "hard" system of differential, integro-differential and algebraic equations of a high order. In this context, most relevant question is related to the conditions and their applications for the equivalent circuits of 6 –10 kV cable networks in the analysis of single-phase earth faults transients.

**Key words:** single-phase earth faults, equivalent circuit.

**Введение.** Переходные процессы при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в полных имитационных моделях трехфазных кабельных сетей 6 – 10 кВ, содержащих линии с распределенными параметрами, описываются "жесткой" системой дифференциальных, интегродифференциальных и алгебраических уравнений очень высокого порядка. По этой причине использование полных имитационных моделей исследуемых объектов связано с большими затратами времени на проведение вычислительных экспериментов. При практических расчетах стремятся максимально уменьшить порядок системы уравнений, описывающей переходные процессы при ОЗЗ, путем представления отдельных кабельных линий и частей исследуемой сети в виде упрощенного эквивалента при сохранении приемлемой точности расчетов наблюдаемых переходных токов и напряжений. В связи с этим актуальным является вопрос об условиях и области их применения эквивалентированных схем замещения кабельных сетей 6–10 кВ при анализе переходных процессов при ОЗЗ.

**Требования к точности расчетов переходных процессов при ОЗЗ** определяются типом решаемых задач. К таким задачам относятся: расчеты переходных перенапряжений при ОЗЗ; расчеты интегральных значений переходных токов при дуговых перемежающихся замыканиях; расчеты мгновенных значений переходных токов и напряжений для устройств защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов и др. Как известно, в переходном процессе при ОЗЗ условно можно выделить две стадии, связанные соответственно с разрядом емкости поврежденной фазы и дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз. Первой стадии в кабельных сетях 6–10 кВ соответствуют частоты до десятков килогерц, второй стадии – от сотен до 2000–3000 Гц. Таким образом, требования к точности расчетов переходных процессов в

основном определяются необходимой точностью отображения тех или иных частотных составляющих.

**О подходе к эквивалентированию схем замещения кабельных сетей 6–10 кВ для расчета переходных процессов при ОЗЗ.** Исследования на полных имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ показали, что интегральные (например, среднеквадратичные) значения переходного тока определяются спектром частот до 2–3 кГц. Максимальные значения переходных перенапряжений в нейтрали сети и на неповрежденных фазах с высокой точностью определяются зарядной составляющей, имеющей максимальные частоты также до 2–3 кГц. Учитывая, что переходные токи ОЗЗ в данном диапазоне частот сохраняют преимущественно емкостный характер, в качестве упрощенного эквивалента для неповрежденных участков сети и линий при решении задач, связанных с расчетами интегральных значений переходного тока и переходных перенапряжений, а также большей части задач, связанных с разработкой устройств защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов, работающих в частотном диапазоне до 2–3 кГц, можно принять схему замещения по рис 1, а.

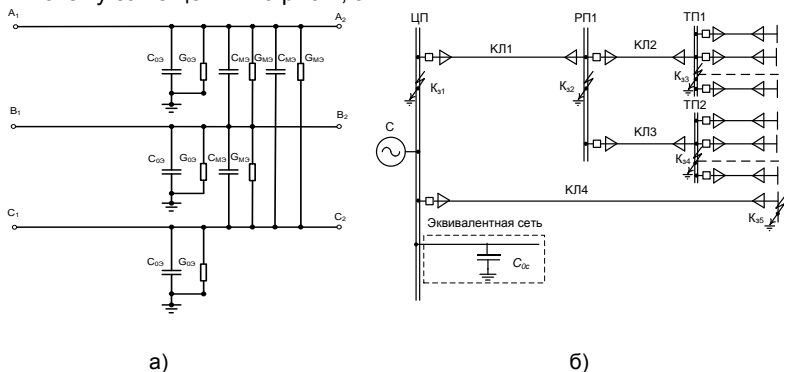


Рис. 1. Эквивалентирование кабельной сети 6–10 кВ для расчета переходных процессов при ОЗЗ: а – эквивалентная схема замещения для неповрежденных участков сети; б – эквивалентная схема замещения кабельной сети с учетом поврежденного и неповрежденных присоединений

Значения емкостных и активных проводимостей фаз на землю  $C_{03}$  и  $G_{03}$  в эквивалентной схеме замещения выбираются таким образом, чтобы не изменились суммарный емкостный ток сети  $I_{c\Sigma}$  и его активная составляющая  $I_{a\Sigma}$ , а значения междуфазных емкостей и проводимостей принимаются такими, чтобы соотношения  $C_{03}/C_{0M}$  и  $G_{03}/G_{M3}$  были равны соответствующим соотношениям в полной схеме сети. Представление неповрежденной части сети в виде эквивалента по схеме рис. 1, а позволяет применять более точные модели (например, с распределенными параметра-

ми) только для тех объектов, в которых непосредственно исследуются переходные токи и напряжения (например, для поврежденной и одной из неповрежденной линий (рис. 1,б).

**Оценка достоверности расчетов переходных токов и напряжений с использованием эквивалентированных сетей.** На рис. 2 приведена полная схема радиальной кабельной сети напряжением 6– 10 кВ для системы промышленного электроснабжения, ЦП которой является ГПП, принятая для исследования переходных процессов при ОЗЗ.

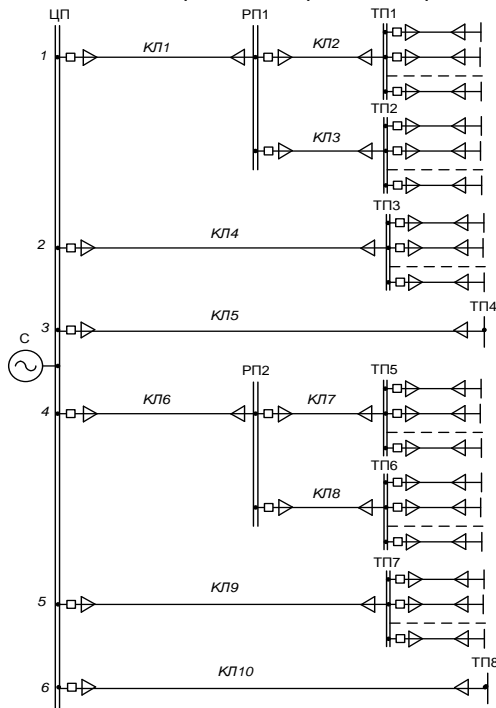


Рис. 2. Полная однолинейная схема модели кабельной сети 6-10 кВ промышленного электроснабжения для исследования переходных процессов при ОЗЗ

В полной (рис. 3) и эквивалентной (рис. 2) моделях для исследования максимальной погрешности по мгновенным значениям переходных токов в нулевой момент времени и среднеквадратичной погрешности на интервале существования кривой переходного тока варьировались значения суммарного емкостного тока сети  $I_{C\Sigma} = 5 \div 30$  А, тока короткого замыкания  $I_{кз} = 5 \div 20$  кА, имитация ОЗЗ в различных точках сети.

Сравнение результатов расчетов, полученных с использованием полной (рис. 3) и эквивалентированной (рис. 2) моделей кабельных сетей 6–10 кВ, показали, что при изменении суммарного емкостного тока максимальная погрешность в нулевой момент времени составляет около 10% для разрядной составляющей и 5% для зарядной, а средняя погрешность на интервале существования кривой для обеих составляющих составляет примерно 5%. При исследовании дугового перемежающегося ОЗЗ погрешность на всем интервале существования кривой находится в тех же пределах. Данные результаты показали, что рассмотренный способ эквивалентирования обеспечивает приемлемую точность расчета амплитудных и среднеквадратичных значений разрядной составляющей и практически точный расчет значений зарядной составляющей переходного тока в месте ОЗЗ, переходных напряжений, а также переходных токов нулевой последовательности в поврежденном и неповрежденных присоединениях.

*Воробьева Екатерина Андреевна,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: v\_ea@rambler.ru

*Шуин Владимир Александрович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: [shuin@rza.ispu.ru](mailto:shuin@rza.ispu.ru)

УДК 621.311

С.С. БОДРУХИНА, к.т.н., доцент,  
П.В. ВАГАЙСКИЙ, студент

ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ»  
111250 г. Москва, ул. Красноказарменная 14  
E-mail: [vagayskiy@yandex.ru](mailto:vagayskiy@yandex.ru)

## **Адаптация микропроцессорных устройств релейной защиты**

**Аннотация.** Приведены недостатки микропроцессорных устройств релейной защиты (МурЗ) при адаптации в энергетическом комплексе России. Произведен анализ ситуации на рынке релейной защиты. Определены основные критерии при эксплуатации и проектировании МурЗ.

**Ключевые слова:** релейная защита, автоматика, адаптация, Sepam.

## **Adaptation of microprocessor devices relay protection**

**Abstract.** These disadvantages of microprocessor-based relay protection devices (MPD) during adaptation in the energy sector of Russia. The analysis of the market situation of relay protection. Main criteria in the operation and design of the MPD.

**Keywords:** relay protection, automation, adaptation, Sepam.



Создание современных систем релейной защиты и автоматики (РЗА) является важным направлением для обеспечения устойчивой и надежной работы потребителей электрической энергии.

На сегодняшний день в области эксплуатации устройств РЗА выделяются следующие основные задачи:

- поддержка в работоспособном состоянии существующих систем;
- своевременная диагностика и замена морально и физически устаревших устройств РЗА;
- применение устройств РЗА, отвечающих современным требованиям.

Решить поставленные задачи можно путем внедрения современных устройств РЗА, выполненных на микропроцессорной (МП) элементной базе. Микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ) и автоматики нашли широкое применение при защите электротехнических установок в странах СНГ и дальнего зарубежья.

Микропроцессорное реле – это обычный компьютер на основе процессора фирмы Intel или AMD, содержащий дополнительно плату с входными трансформаторами тока и напряжения, согласованными по параметрам с внешними трансформаторами тока и напряжения, а также плату с набором миниатюрных выходных реле.

На кафедре Электроснабжения промышленных предприятий Национального исследовательского университета «МЭИ» существует лаборатория по исследованию МП терминалов релейной защиты Schneider Electric. В рамках учебной программы проводятся занятия и лабораторные работы на демонстрационных терминалах серии Sepam для ознакомления студентов и преподавателей с современными устройствами релейной защиты и их возможностями.

В лаборатории при работе с представленными терминалами был произведен анализ, который позволил не только оценить преимущества МП устройств, но и выявить серьезные недостатки при адаптации данных устройств.

Например, в терминалах Sepam 80 ввод логики и основных характеристик присоединения защищен паролем «Параметрирование». Ввод функций и уставок защищен паролем «Настройка». При наладке терминала на месте эксплуатации оказывается, что наладочному персоналу нужно иметь доступ не только к вводу функций и уставок защит, но и к разделу программы, защищенному паролем «Параметрирование». Это требуется для ввода основных характеристик защищаемого присоединения, данных по ТТ и ТН, уставок таймеров логики, ввода-вывода логической защиты и других параметров. Поэтому для наладки Sepam 80 на месте эксплуатации приходится открыть полный доступ к программированию терминала, что недопустимо. Из-за этого вообще теряет всякий смысл деление доступа с паролями.

К недостаткам можно отнести и отсутствие в серии Seram 80 функций дифференциальной защиты трехобмоточных трансформаторов и шин.

Переход на цифровые методы обработки информации в микропроцессорных реле не принес какие-либо новые принципы построения релейных защит, но существенно улучшил некоторые эксплуатационные качества:

- надежность, быстродействие, непрерывный автоматический контроль и самодиагностика;
- малое потребление электроэнергии от измерительных трансформаторов тока и напряжения;
- возможность регистрации в памяти устройства параметров аварийных режимов;
- возможность реализации более сложных и совершенных алгоритмов защиты и управления электроэнергетического объекта, удобство наладки, настройки и эксплуатации, а также сервисные возможности;
- интеграция с системами оперативного и автоматического управления, позволяющая создать терминал в пределах одного защищаемого объекта [1].

В настоящее время при реконструкции или проектировании новых подстанций (ПС) и распределительных пунктов (РП) повсеместно предусматривается установка МП защит вместо защит на базе электромеханических реле. Однако полный отказ от электромеханики обоснован не в полной мере, так как имеющийся опыт эксплуатации микропроцессорных защит выявил ряд существенных недостатков. Для повышения надежности функционирующих МП систем, а также только вводимых в ближайшем будущем будет стоять необходимость устранять все неисправности и недостатки данных защит.

В связи с появлением МУРЗ появились новые проблемы, требующие решения, среди них особенно актуальны: резервирование МУРЗ, запасные части и комплектующие, количество функций в одном устройстве, человеческий фактор, критерии электромагнитной совместимости, условия эксплуатации, требования к конструкции, параметрам и программному обеспечению МУРЗ [2].

Обратимся к ситуации с электромеханическими реле, сложившейся в 70-80-х годах. Под напором стремительно развивавшихся полупроводниковых технологий заводы, производившие реле на электромеханической элементной базе, в срочном порядке переоснащались под производство полупроводниковых устройств релейной защиты или закрывались.

Однако через несколько лет выпуск электромеханических реле был восстановлен. Модернизированные контактные материалы и сплавы, новые пластмассы и лаки позволили резко уменьшить размеры и повысить надежность электромеханических реле. Сегодня стало абсо-

лютно ясно, что полупроводниковые реле могут занять лишь определенную нишу, но не способны полностью вытеснить электромеханические реле, например, на ПС и РП с переменным оперативным током. Кроме того, электромеханические реле не требуют наличия постороннего источника питания.

Недостатки и справедливые нарекания на некоторые конкретные типы электромеханических реле не должны распространяться на весь класс электромеханических реле. Стремление избавиться от постоянного обслуживания изношенных электромеханических реле является важным стимулом при переходе на МП устройства для отечественных инженеров, занимающихся проектированием и обслуживанием устройств РЗА. Однако затраты на обслуживание старых реле могут быть ничуть не больше затрат на приобретение вышедших из строя и не подлежащих ремонту дорогостоящих электронных блоков МУРЗ [3].

Если провести аналогию с ситуацией, возникшей с приходом полупроводниковых устройств релейной защиты, можно предположить, что МУРЗ надлежит занять определённую нишу, создать здоровую конкуренцию, однако полностью вытеснить электромеханические аналоги в современных реалиях не представляется возможным.

Эксплуатирующие и проектные организации должны обоснованно подходить к выбору МУРЗ, полностью изучать особенности энергообъекта, выполнять технико-экономическое обоснование применения МП устройств РЗА различных фирм-производителей, учитывать расходы на эксплуатацию этих устройств.

На данный момент при реконструкции и проектировании новых ПС и РП повсеместно закладываются МП защиты. Очевидно, что выработка руководящих указаний в области проектирования, создание и эксплуатация МП устройств РЗА должны жестко регламентироваться.

### Литература

1. **Гуревич В.И.** Еще раз о надежности микропроцессорных устройств релейной защиты // Электротехнический рынок, 2012. № 3 (29). С. 40–45.
2. **Гуревич В.И.** О некоторых оценках эффективности надежности микропроцессорных устройств релейной защиты // Вести в электроэнергетике, 2012. № 5. С. 29–32.
3. **Нудельман Г.С., Шалин А.И.** Микропроцессорные системы РЗА. Оценка эффективности и надежности. – Новости электротехники, 2008, № 3 (51).

*Вагайский Павел Владимирович,*  
ФГБОУВПО Научный исследовательский университет «Московский энергетический институт», e-mail: [vagayskiy@yandex.ru](mailto:vagayskiy@yandex.ru)  
*Бодрухина Светлана Степановна,*  
ФГБОУВПО Научный исследовательский университет «Московский энергетический институт», e-mail: [bodrukhinass@yandex.ru](mailto:bodrukhinass@yandex.ru)

УДК 621.315.1

А. Л. КУЛИКОВ, д.т.н., М. Д. ОБАЛИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
603950, ГСП-41 Н.Новгород, ул. Минина, д. 24  
*obalin\_misha@mail.ru*

### **Повышение точности ОМП ЛЭП в цикле АПВ**

**Аннотация.** В статье авторы приводят опыт повышения точности расчета расстояния до места повреждения (и сокращения зоны осмотра ВЛ) за счет использования специальной статистической обработки замеров расстояния до повреждения в цикле АПВ. Объединение результатов расчета по нескольким методам ОМП (или, например, в цикле АПВ) обратно пропорционально ошибке позволяет повысить результирующую точность.

**Ключевые слова:** Определение мест повреждения линий электропередачи, имитационное моделирование, статистическая информация, повышение точности ОМП ЛЭП.

A.L. KULIKOV Doctor of Engineering,  
M.D. Obalin, Engineer

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev  
Minin St., 24, Nizhny Novgorod, 603950 . *E-mail: obalin\_misha@mail.ru*

### **Improving the accuracy of fault location in a loop of automatic reclosing**

**Abstract.** In the article the authors use the experience to improve the accuracy of calculating the distance to fault (and reduce inspection area) through the use of special statistical treatment of measurements of the distance in the cycle the AR. The consolidation of the calculation results for several methods of determining the location of the damage (or, for example, in a cycle AR) is inversely proportional to the error can improve the resulting accuracy.

**Key words:** Fault Location on Power Transmission Lines, Simulation of Power Systems, Statistical Information, Improving the Accuracy of Fault Location.

Дистанционное точное определение места повреждения (ОМП) является сложной и актуальной задачей автоматики и релейной защиты энергосистем. Решение данной задачи позволяет существенно сократить время нахождения линии электропередачи (ЛЭП) в ремонте после ее аварийного отключения.

Автоматическое повторное включение (АПВ) является одним из эффективных средств повышения надежности функционирования энергосистем и энергообъединений. АПВ позволяет в большинстве случаев аварийных отключений быстро восстанавливать первоначальное состояние электрической сети путем повторного включения отключившихся выключателей.

В соответствии с нормативными требованиями предприятий электрических сетей, даже в случае успешного АПВ, отключившаяся линия электропередачи должна быть осмотрена, а причина вызвавшая

ее отключение определена. Бригада ремонтного персонала должна быть направлена в точку максимально приближенную к точке повреждения, а зона обхода линии должна содержать точку повреждения. На сегодняшний день зона обхода линии определяется в зависимости от длины линии (для ВЛ до 50 км – 15%, для ВЛ от 50 до 100 км – 10%, для ВЛ больше 100 км – 7%).

Для определения расчетного места повреждения на ЛЭП применяются стационарно установленные микропроцессорные приборы ОМП (например, ИМФ-3Р) и специальные программные комплексы (WinBres, АРМ СРЗА, Transcor и др.).

К сожалению, лишь некоторые из имеющихся средств ОМП ЛЭП имеют возможность расчета расстояния до повреждения в цикле АПВ. Например, микропроцессорные терминалы защит пускаются каждый раз при действии защит на выключатель и при этом производят расчет ОМП. Специальные программные комплексы не имеют возможности работы в цикле АПВ и производят расчет, как правило, по данным до АПВ.

Проанализируем возможности повышения точности ОМП ЛЭП за счет использования данных до и после АПВ ЛЭП. На рисунке 1 представлены осциллограммы тока и напряжения поврежденной фазы С при автоматическом отключении ВЛ 500 кВ Арзамасская-Радуга Южная, а так же временные характеристики методов ОМП ЛЭП.

В пролете опор 177-178 (75 км) ВЛ 500 кВ Арзамасская-Радуга Южная из-за валки деревьев в охранной зоне на фазу С упала береза. Как видно из осциллограммы дерево постепенно прогорало, изменяя переходное сопротивление КЗ. Переходный процесс продолжался до отключения ВЛ. На 3-м периоде с момента распознавания повреждения на ЛЭП приборы ОМП (ИМФ-3Р) произвели расчет расстояния до повреждения (85.4 км).

После бестоковой паузы и повторного включения (в цикле ОАПВ) приборы ОМП на ПС Арзамасская показали 75.7 км. Программный комплекс WinBres для данной осциллограммы выдал значение 84.7 км. За счет большого переходного сопротивления и неустановившегося переходного процесса замер получился завышенным. Расчетное место повреждения было определено на 85 км от ПС 500 Арзамасская, а зона обхода составила 7% длины линии (76.5-93.5). Место повреждения в зону обхода не попало.

Для данной осциллограммы авторами были проанализированы временные характеристики различных алгоритмов ОМП ЛЭП. До ОАПВ анализируемые алгоритмы имеют разброс в определении расстояния до места повреждения от 74 до 88 км в зависимости от выбранного момента времени, после ОАПВ большинство алгоритмов принимают установившееся значение в диапазоне 74-77 км.

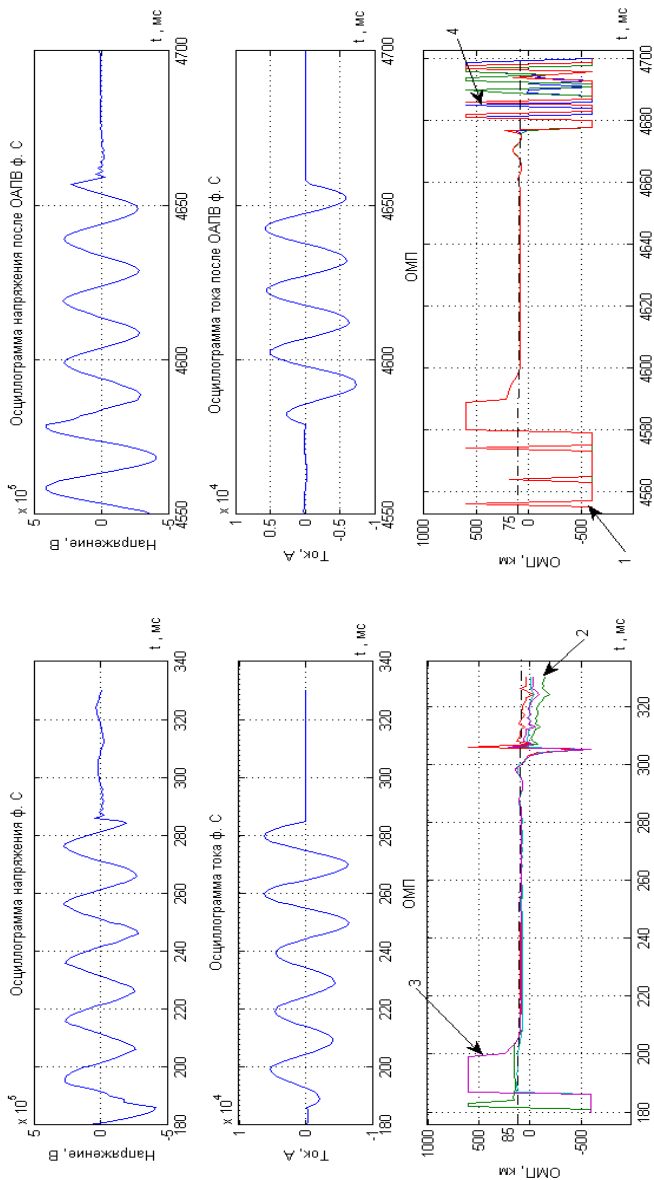


Рис. 1. Осциллограмма тока и напряжения, временная характеристика методов ОМП при аварийном отключении ВЛ 500 кВ Арзамасская - Радауга Южная в цикле ОАПВ ф. С  
 На рис. 1 методы ОМП: 1 – ИМФ-3P[1], 2 – метод на основе решения квадратного уравнения [1], 3 – компенсационный метод ОМП [2], 4 – итерационный метод полного сопротивления [2].

Авторами ранее предлагались варианты повышения точности ОМП ЛЭП при использовании данных до и после АПВ, а так же способы объединения результатов расчета ОМП по нескольким методам в соответствии с теорией статистического оценивания[3]. При объединении результатов ОМП до и после АПВ обратно пропорционально разбросу значений расчетное место повреждение составляет 77.4 км, расчетная зона обхода 71-83 км.

#### **Выводы:**

1. Использование информации аварийных осциллограмм как до, так и после АПВ позволяет повышать результирующую точность расчета расстояния до места повреждения.

2. При неустановившемся переходном (до АПВ) процессе погрешность расчета расстояния до места повреждения составляет более 10%.

3. Целесообразно объединение результатов ОМП до и после АПВ в целях повышения результирующей точности.

#### **Литература**

1. **Аржаников, Е. А.** Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / В. Ю. Лукоянов, М. Ш. Мисриханов; под ред. В. А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003.– 272 с.
2. **Диагностика** состояния воздушных линий электропередачи 10-110 кВ в нормальных и аварийных режимах: Учебное пособие / Под ред. А.Н. Висячева. – Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2012. – 270 с.
3. **Куликов, А. Л.** Комплексные алгоритмы определения мест повреждения линии электропередачи на базе статистических методов / М. Д. Обалин, П.А. Колобанов // Энергетик. – 2012г. - №1. – С. 7-10.

*Куликов Александр Леонидович,*

ФГБОУ ВПО «Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева», e-mail: inventor61@mail.ru

*Обалин Михаил Дмитриевич,*

ФГБОУ ВПО «Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р. Е. Алексеева», e-mail: obalin\_misha@mail.ru

УДК 621.316.926

Е.С. ЗАЙЦЕВ, ст. преподаватель,  
В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: evgeniy1589@mail.ru

### **Разработка математической модели для прогнозирования нагрева жил высоковольтной кабельной линии**

**Аннотация.** Предложены новые методики расчёта параметров тепловой схемы замещения высоковольтной кабельной линии, проложенной в грунте.

Причём рассматривались параметры той части схемы, которая моделирует окружающую среду кабельной линии. Адекватность полученной математической модели оценивали путём сравнения с моделью, построенной с помощью метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** высоковольтная кабельная линия, температура, тепловая схема замещения, тепловая ёмкость, тепловое сопротивление.

V.D. LEBEDEV, Candidate of Engineering, docent,  
E.S. ZAITSEV, senior Teacher

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: [vd\\_lebedev@mail.ru](mailto:vd_lebedev@mail.ru), [evgeniy1589@mail.ru](mailto:evgeniy1589@mail.ru)

### **Development of a mathematical algorithm to calculate the conductor temperature in real time**

**Abstract.** The new methodology of calculating the parameters of the High-Voltage Cable Line thermal equivalent circuit was proposed. And we consider the parameters of that circuit part which simulates the environment of the cable line. Adequacy of the obtained mathematical model was evaluated by comparing with another model built using the finite element method.

**Key words:** high voltage cable line, temperature, thermal equivalent circuit, heat capacity, thermal resistance.

В [1] обоснована необходимость использования математических моделей нестационарного теплового поля совместно со средствами измерения распределённой температуры экранов кабелей, а также тока в жилах и экранах для создания системы мониторинга пропускной способности высоковольтных кабельных линий (ВКЛ) с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Известно, что пропускная способность высоковольтных кабелей определяется температурой жилы в длительном рабочем режиме. Для выполнения превентивных мер по созданию оптимальных токовых нагрузок ВКЛ, обеспечивающих непрерывность электроснабжения потребителей и снижения вероятности возникновения аварийных событий необходимо прогнозирование изменения этой температуры.

Для решения задачи прогнозирования нагрева кабелей в [2] авторы разработали тепловую схему замещения для трёхфазной кабельной линии, учитывающую взаимные тепловые сопротивления кабелей и тепловые параметры грунта для суточного цикла переменной нагрузки (рис. 1).

Расчёт теплового сопротивления изоляции и внешней оболочки кабеля ( $R_{iw}$  и  $R_{i0}$ ), а также тепловых ёмкостей  $C_1$  и  $C_2$  рассмотрен в [3]. В предложенной в [2] схеме необходимо определить взаимные тепловые сопротивления  $R_{t,AB}$ ,  $R_{t,BC}$ ,  $R_{t,AC}$ , а также тепловые сопротивления грунта



частичным тепловым потокам от каждого кабеля в отдельности ( $R_{t,sp}^A$ ,  $R_{t,sp}^B$ ,  $R_{t,sp}^C$ ).

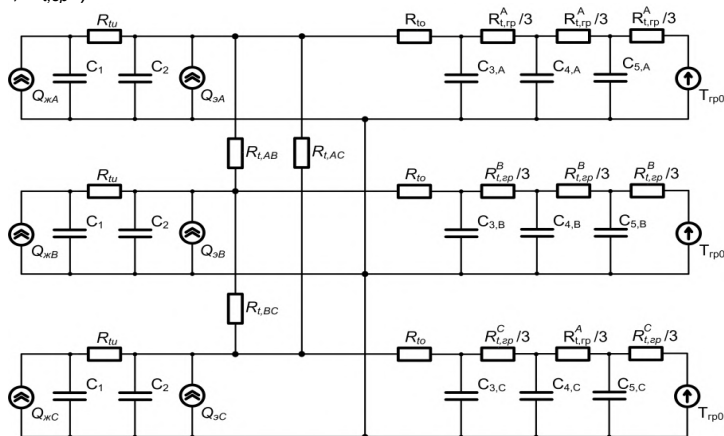


Рис. 1. Тепловая схема замещения для трёхфазной ВКЛ

Аналогичная задача решалась в [4], где производился расчёт сопротивлений тепловой схемы замещения самонесущих изолированных проводов (СИП) воздушных линий электропередачи на основе вычислительных экспериментов с помощью конечно элементного метода моделирования стационарного теплового поля СИП-а. При этом необходимо составлять систему уравнений по методу узловых потенциалов для схемы замещения в установившемся режиме. Затем производить вычислительные эксперименты с различными значениями тепловыделений в кабелях.

С помощью этой методики были получены значения перечисленных выше сопротивлений для двух вариантов укладки (треугольником и в плоскости) однофазных кабелей ПвПу 1x1200/95 – 127/220 при теплопроводности грунта  $\lambda_2 = 1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Результаты расчётов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сопротивления тепловому потоку от кабелей в грунте

Тип укладки кабелей	$R_{t,A}$ , К·м/Вт	$R_{t,B}$ , К·м/Вт	$R_{t,C}$ , К·м/Вт	$R_{t,AB}$ , К·м/Вт	$R_{t,BC}$ , К·м/Вт	$R_{t,AC}$ , К·м/Вт
Треугольником	0,979	0,979	0,979	0,693	0,693	0,693
В плоскости с просветом, величиной равной диаметру кабеля $D_k$	0,68	1,041	0,68	1,16	1,16	7,572

При определении теплоёмкостей схемы замещения количество грунта, нагреваемое тепловым потоком от каждой фазы, определяли на основе предположения о том, что количество грунта, нагреваемого одним кабелем, обратно пропорционально сопротивлению тепловому потоку от этого кабеля. Затем частичные тепловые поля от каждого кабеля заменяли эквивалентными осесимметричными полями и расчёт теплоёмкостей  $C_3$ ,  $C_4$  и  $C_5$  для каждой фазы производили с помощью метода Ван-Вормера [5]. Таким образом, для грунта с удельной теплоёмкостью  $c_a = 1250$  Дж/(кг·К) и плотностью  $\rho_a = 1600$  кг/м<sup>3</sup> были получены значения теплоёмкостей схемы замещения, приведённые в табл. 2.

Оценку адекватности полученной математической модели можно выполнить путём сравнения результатов её расчёта с результатами, полученными с помощью метода конечных элементов (МКЭ). В [1, 6] описаны примеры таких моделей.

Поскольку тепловая схема замещения (рис. 1) была разработана для прогнозирования нагрева кабелей на сутки вперёд [2], проверку тепловой модели трёхфазной в ВКЛ выполняли при протекании тока по жилам постоянной амплитуды в течение 36 часов. Результаты расчётов для двух вариантов укладки кабелей приведены на рис. 2.

Таблица 2. Тепловые ёмкости схемы замещения

Укладка кабелей	Фаза	$C_3$ , Дж/(м·К)	$C_4$ , Дж/(м·К)	$C_5$ , Дж/(м·К)
Треугольником	A	44792,119	154771,302	534785,055
	B	44792,119	154771,302	534785,055
	C	44792,119	154771,302	534785,055
В плоскости с просветом, величиной с диаметр кабеля $D_x$	A	136265,794	310203,065	706163,584
	B	84480,361	192315,813	437798,458
	C	136265,794	310203,065	706163,584

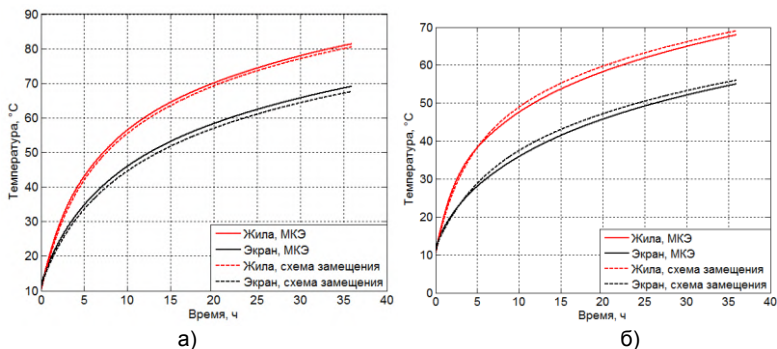


Рис. 2. Температуры жилы и экрана кабеля, рассчитанные различными методами:

а) при укладке треугольником; б) при укладке в плоскости с просветом

На основе полученных графиков можно сделать вывод о достаточной точности прогноза, так как абсолютные значения погрешностей расчётов не превышают 2°C.

#### Литература

1. **Лебедев В.Д., Зайцев Е.С.** Интеллектуальная система мониторинга пропускной способности и защиты от перегрева высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена // XXII междунар. науч.-практ. конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем 2014»: сб. докл. Москва: 2014. С. 292-298.
2. **Zaytsev E., Lebedev V.** Development of the Thermal Equivalent Circuit for Evaluating the Capacity of High Voltage Cables in Real Time. // Applied Mechanics and Materials Vol. 698 (2015) pp 586-591 © (2015) Trans Tech Publications, Switzerland
3. **IEC 60853-2** Calculation of the Cyclic and Emergency Current Ratings of Cables, Part 2: Cyclic Rating Factor of Cables Greater than 18/30 (36) kV and Emergency Ratings for Cables of All Voltages, *IEC Std. 60853-2*, 1989.
4. **Бубенчиков А.А.** Расчёт температуры и потерь электрической энергии в самонесущих изолированных проводах воздушных линий электропередачи электроэнергетических систем: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.14.02 / ОмГТУ. – М., 2012. – 20 с.
5. **Van Wormer, F.C.**, An Improved Approximate Technique for Calculating Cable Temperature Transients, *Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs*, Vol. 74, Pt. 3, 1955, pp. 277-280.
6. **Грешняков Г.В., Ковалёв Г.Г.** Численный метод анализа нагрузочной способности высоковольтной кабельной системы. // "КАБЕЛЬ-news", №3, 2013, с. 32-37.

*Лебедев Владимир Дмитриевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vd\_lebedev@mail.ru

*Зайцев Евгений Сергеевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: evgeniy1589@mail.ru

ДК 621.314, 621.31

В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент,  
Д.А. ЛЕБЕДЕВ, А.В. НАУМОВ, А.А. ЯБЛОКОВ, аспиранты

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: vd\_lebedev@mail.ru

## Исследование электромагнитной совместимости оптических и цифровых трансформаторов тока и напряжения

**Аннотация.** Выполнен анализ влияния токопроводящих элементов ОРУ подстанции на чувствительные элементы оптического трансформатора напряжения. Показаны уровни наводок, создаваемые соседними фазами на оптический трансформатор напряжения. Предложены меры по снижению влияния наводок на точность измерений.

**Ключевые слова:** оптический трансформатор, цифровой трансформатор, электромагнитная совместимость

V.D. LEBEDEV, Candidate of Engineering, docent,  
D.A. LEBEDEV, A.V. NAUMOV,  
A.A. YABLOKOV, post-graduate student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: [vd\\_lebedev@mail.ru](mailto:vd_lebedev@mail.ru)

## The study of electromagnetic compatibility of optical and digital current transformers and voltage

**Abstract.** The analysis of the effect of conductive elements switchyard substation optical sensors voltage transformer. Shows the levels of interference generated by neighboring phases on the optical voltage transformer. The measures to reduce the impact of interference on the measurement accuracy.

**Key words:** optical transformer, digital transformer, electromagnetic compatibility

Применение микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, устройств измерения и определения качества электроэнергии способствует внедрению и развитию цифровых цепей, идущих от первичных преобразователей тока и напряжения (ТТ и ТН). Использование оптических каналов для цифровых цепей решает задачу отстройки от электромагнитных наводок и выноса потенциала. Создание оптических и цифровых трансформаторов тока и напряжения (ЦТТН) с оцифровкой сигнала сразу на высоком потенциале измерительного трансформатора лучшим образом решает указанную задачу [1]. Однако возникает проблема обеспечения электромагнитной совместимости чувствительных элементов и микроэлектронной аппаратуры, находящихся в непосредственной близости от токоведущих частей. Данная работа посвящена исследованию влияния электромагнитного поля на чувствительные элементы и решению задач электромагнитной совместимости оптических и цифровых трансформаторах тока и напряжения.

В последнее время широко рекламируются оптические трансформаторы тока и напряжения. В оптических трансформаторах напряжения чувствительные элементы-оптические кристаллы, расположенные в теле изоляционной колонны, реагируют на электрическое поле, вращая плоскость поляризации света, что измеряется с помощью оптических датчиков. Электрическое поле в теле изолятора трансформатора и самих кристаллах определяется напряжением, подключенным к трансформатору, а также зависит от ряда факторов таких как наличие в непосредственной близости высоковольтных токоведущих частей и заземленных элементов металлических конструкций электротехнического оборудования. Все эти элементы искажают электрическое поле не только вокруг, но и в теле изолятора самого трансформатора.

Для исследования электрического поля разработаны математические модели на основе интегральных уравнений электрического поля, а также модели, основанные на решении дифференциальных уравне-

ний методом конечных элементов с использованием программных пакетов Matlab и ComsolMultiphysics [2].

Анализ влияния токопроводящих элементов осуществлялся для типового расположения оборудования на ОРУ подстанции. Исследования показывают, что наибольшее влияние на чувствительные элементы самого трансформатора будут оказывать токопроводы ошиновки, находящиеся под высоким напряжением как собственной фазы, на которой измеряется напряжение, так и соседних фаз.

Расчетная картина электрического поля для расположения трех трансформаторов напряжения представлена на рис. 1.

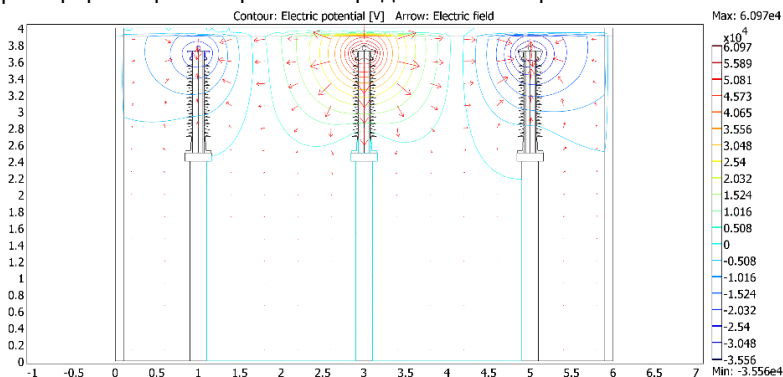


Рис. 1. Распределение электрического потенциала (контуры) и электрическое поле (стрелки)

В результате расчетов определены значения величин электрического поля в чувствительных элементах измерительного трансформатора, обусловленных как приложенным напряжением, так и напряжениями соседних фаз (рис. 2). Уровень наводок от соседних фаз достаточно высок и достигают 10% от величины полезного сигнала.

Снижение влияния наводок на точность измерений можно осуществить за счет:

- использования металлических экранов с достаточными изоляционными промежутками;
- применения материалов с высокой диэлектрической проницаемостью;
- алгоритмической обработки сигналов с учетом напряжения на соседних фазах.

Все указанные решения не могут в полной мере исключить описанные недостатки, так как трудно реализуемы технически.

Следует отметить, что в классических электромагнитных и емкостных трансформаторах данной проблемы не существует, так как электрическое поле формируется делителем напряжения сформиро-

ванным отдельными каскадами трансформаторов в электромагнитных трансформаторах, либо каскадами из конденсаторов в емкостных трансформаторах.

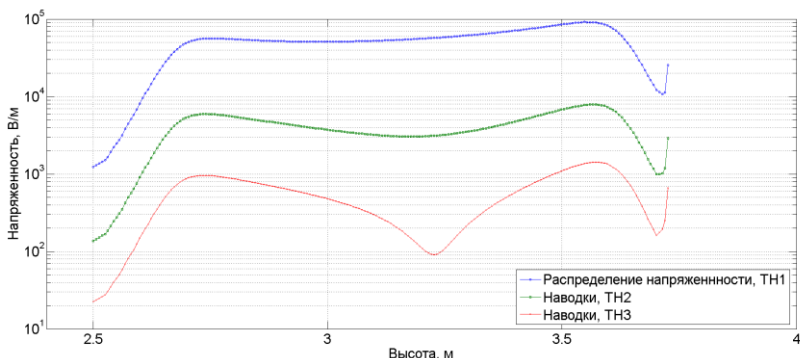


Рис. 2. Наводки, создаваемые соседними фазами на трансформатор напряжения

В авторской разработке цифровых трансформаторов напряжения используются маломощные делители напряжения, обладающих собственной проводимостью, достаточной для обеспечения заданного класса точности с учетом влияния наводок электромагнитного поля.

Цифровые измерительные трансформаторы тока (ЦТТ) и комбинированные цифровые трансформаторы тока и напряжения (ЦТТН) содержат электронные блоки на первичной стороне, т.е. под потенциалом первичного провода в зоне интенсивных электромагнитных полей.

В ЦТТ и ЦТТН предусматривается расположение микропроцессорной аппаратуры внутри токопроводящего экрана, используемого непосредственно в качестве токопровода.

В результате исследований получены решения, исключающие влияние на микроэлектронные элементы и блоки, одним из решений подтвержденным теоретически и экспериментально является расположение электронных блоков внутри цилиндрического токопровода с измеряемым током [3].

*Исследования выполнены в ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме «Разработка и исследование цифровых трансформаторов напряжения 110 кВ, основанных на фундаментальных физических законах с оптоэлектронным интерфейсом для учета электроэнергии в интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивной сетью» (Соглашение №14.574.21.0072 о предоставлении субсидии от 27 июня 2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57414X0072).*

### Литература

1. Гречухин В.Н. Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110-750 кВ станций и подстанций энергосистем. Вестник ИГЭУ, вып. 4, 2006, с. 35-42.
2. Лебедев В.Д., Яблоков А.А. Моделирование физических процессов технических устройств в программе COMSOL Multiphysics. – Иваново, 2013. – 328с.
3. Лебедев В.Д. Исследование электромагнитной совместимости цифровых трансформаторов тока и напряжения 220 кВ// Релейная защита и автоматика энергосистем: Сборник докладов XX конференции (Москва, 1–4 июня 2010). – Москва: «Научно-инженерное информационное агентство», 2010, с.329-335.

*Лебедев Дмитрий Антоньевич,*

ООО «Нейрософт», e-mail: swanbox@mail.ru

*Намов Алексей Владимирович,*

ОАО «Ивэлектронладка», e-mail: movav@mail.ru

*Яблоков Андрей Анатольевич,*

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: AndrewYablokov@yandex.ru

УДК 621.314, 621.31

В.К. СЛЫШАЛОВ, д.т.н., В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент,  
А.А. ЯБЛОКОВ, аспирант,  
А.Ю. МЕРКУЛОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: vd\_lebedev@mail.ru

## Моделирование делителя напряжения цифрового измерительного трансформатора

**Аннотация.** Представлены методики анализа влияния токов электрического смещения с учетом токов утечки в изоляции трансформатора, выполненного на основе резистивного делителя, на точность измерения напряжения. Представленные методики могут быть использованы для оптимизации расположения резистивных элементов и их параметров.

**Ключевые слова:** цифровой трансформатор, резистивный делитель напряжения, токи электрического смещения

V.K. SLYSHALOV, doctor of engineering, professor,  
V.D. LEBEDEV, candidate of engineering, docent,  
A.A. YABLOKOV, post-graduate student  
A.YU. MERKULOV, student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: vd\_lebedev@mail.ru  
**Simulation of voltage divider digital measuring transformer**

**Abstract.** Techniques of analysis of the influence of currents of electric displacement in view of leakage currents in transformer insulation, made on the basis

of the resistive divider, on the accuracy of the voltage measurement. The presented technique can be used to optimize the location of the resistive elements and their parameters.

**Key words:** digital transformer, resistive voltage divider, currents of electric displacement

Разработка высоковольтного измерительного трансформатора напряжения на основе резистивного делителя напряжения актуальна в условиях развития направления создания электронных высоковольтных измерительных трансформаторов [1]. Рассматривается конструкция делителя напряжения, содержащего резистивные элементы в твердотельной изоляции. Использование такой изоляции в трансформаторе создает дополнительное тепловое сопротивление, препятствующее отводу тепла от резистивных элементов. Нагрев резистивных элементов приводит к изменению их сопротивления, а, следовательно, и к уменьшению точности измерения напряжения резистивным делителем. Чтобы уменьшить негативный эффект от нагрева резистивных элементов необходимо выбирать резистивные элементы с минимальным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), максимальной поверхностью и максимальным сопротивлением (в соответствии с законом Джоуля-Ленца  $Q=U^2/R$ ). Однако, с увеличением сопротивления резистивных элементов увеличивается влияние токов электрического смещения и токов утечки в изоляции трансформатора, что также уменьшает точность измерения напряжения.

Учитывая вышесказанное, задача разработки и исследования трансформатора на основе резистивного делителя сводится к определению оптимального значения сопротивления резистивных элементов и их взаимного расположения с учетом распределения теплового и электромагнитного полей для достижения максимальной точности измерения. Резистивные элементы, их расположение и параметры задают и определяют уровни электромагнитного и теплового полей, таким образом это итерационная взаимосвязанная задача.

Целью настоящего исследования является разработка методики анализа влияния токов электрического смещения с учетом токов утечки в изоляции трансформатора выполненного на основе резистивного делителя (рис. 1) на точность измерения напряжения.

Расчетная схема замещения трансформатора на основе резистивного делителя напряжения с учетом частичных емкостей представлена на рис. 2.

Расчет частичных емкостей был выполнен на математической модели трансформатора, основанной на численном решении методом конечных элементов уравнения Лапласа, записанного для электрического поля:

$$-\nabla \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V = 0, \quad (1)$$



где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость, Ф/м;  $V$  – электрический потенциал, В.

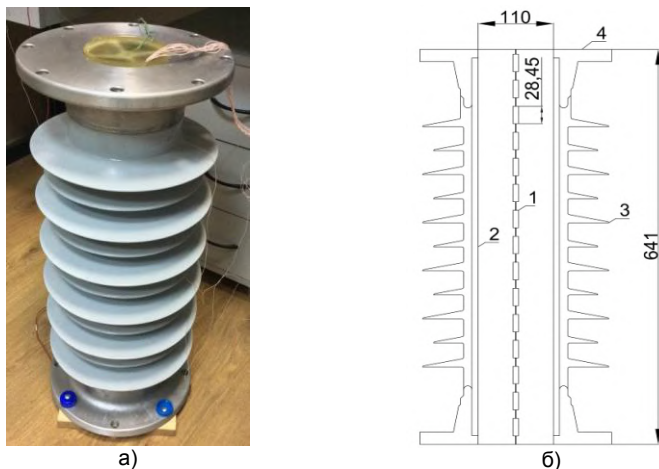


Рис. 1. Трансформатор на основе резистивного делителя напряжения:  
а – фотография экспериментального образца; б – эскиз; 1 – резистивные элементы; 2 – стеклотекстолитовая труба; 3 – силиконовая покрывка; 4 – фланец

Моделирование трансформатора для исследования поля осуществлялось в программной среде COMSOL Multiphysics [2]. В зависимости от расположения резистивных элементов осуществлялось как двумерное (осесимметричное, рис. 1б), так и трехмерное моделирование.

Для проверки правильности расчетов по определению величин частичных емкостей выполнены расчеты с использованием аналитических формул представленных в [3], а также осуществлялась моделирование методом интегральных уравнений.

В результате исследований получены значения частичных емкостей, что позволило выполнить расчеты по схеме замещения (рис. 2), определить погрешности трансформатора, а также выполнить оптимизацию по расположению резистивных элементов и их параметров.

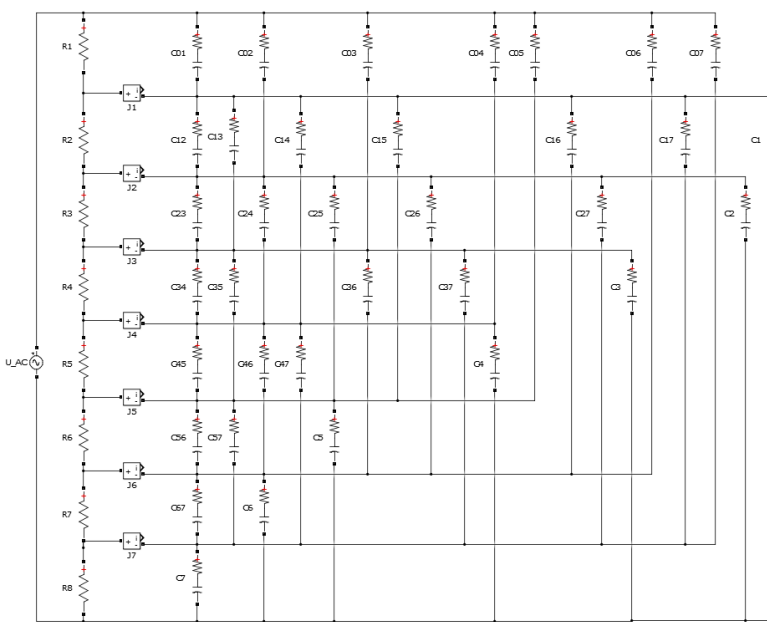


Рис. 2. Схема замещения трансформатора на основе резистивного делителя напряжения

*Исследования выполнены в ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме «Разработка и исследование цифровых трансформаторов напряжения 110 кВ, основанных на фундаментальных физических законах с оптоэлектронным интерфейсом для учета электроэнергии в интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивной сетью» (Соглашение №14.574.21.0072 о предоставлении субсидии от 27 июня 2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57414X0072).*

### Литература

1. **Гречухин В.Н.** Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110-750 кВ станций и подстанций энергосистем. Вестник ИГЭУ, вып. 4, 2006, с. 35-42.
2. **В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков,** Моделирование физических процессов технических устройств в программе COMSOL Multiphysics, Иваново, 2013, 328с.
3. **Ю.Я. Иоссель,** Расчет электрической емкости, Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1981, 288 с.

*Слышалов Владимир Константинович,  
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
Лебедев Владимир Дмитриевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: vd\_lebedev@mail.ru  
*Яблоков Андрей Анатольевич*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: AndrewYablokov@yandex.ru  
*Меркулов Александр Юрьевич*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: mercylov-s@mail.ru

УДК 621.321

М.С. АЛЬ-ХОМИДИ, аспирант,  
В.А. ШУИН, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34,  
*E-mail: shuin@rza.ispu.ru*

### **Особенности оценки чувствительности резервных ступеней дистанционных защит при двухфазных коротких замыканиях за трансформатором Y/Δ-11**

**Аннотация.** Дана аналитическая оценка влияния на замер измерительных органов дистанционной защиты трансформации "звезда – треугольник" при двухфазном замыкании за трансформатором Y/Δ-11.

**Ключевые слова:** дистанционная защита, трансформатор Y/Δ-11, трансформация "звезда – треугольник".

V.A. SHUIN, doctor of engineering, professor,  
M.S. Al-Homidi, phd student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: shuin@rza.ispu.ru*

### **Features of evaluate the sensitivity of the reserve distance protection stages for double-phase short circuit per the transformer Y / Δ-11**

**Abstract.** The analytical evaluation of the influence on the measurement of the distance protection measuring elements of "wye - Delta" transformation effect for double-phase short circuit per transformer with a winding connection group Y/Δ-11.

**Key words:** distance protection, transformer Y / Δ-11 transformation "wye - delta".

**Состояние вопроса и актуальность задачи.** Уставки по сопротивлению срабатывания резервных ступеней дистанционных защит (ДЗ), как правило, выбираются из условия обеспечения требуемой чувствительности к коротким замыканиям (КЗ) через расчетное переходное сопротивление в конце смежных линий и за трансформаторами смежных понизительных подстанций. Существующие методики выбора

установок не учитывают влияние на замер измерительных органов ДЗ трансформации "звезда – треугольник", а также комплексное влияние указанной трансформации в сочетании с другими факторами, прежде всего, переходным сопротивлением в месте КЗ. Ниже дается аналитическая оценка этого влияния для схемы электропередачи, включающей питающую систему С, линию электропередачи Л и понизительный трансформатор Т с группой соединения обмоток  $Y/\Delta$ -11.

**Аналитическое определение замера реле сопротивления ДЗ при двухфазном КЗ за трансформатором  $Y/\Delta$ -11.** Расчетная схема электропередачи для исследования влияния трансформации "звезда – треугольник" на замер реле сопротивления ДЗ приведена на рис. 1.

В [1] рассмотрен подход к решению данной задачи с использованием метода симметричных составляющих. Если пренебречь различием сопротивлений питающей системы С для составляющих прямой и обратной последовательности, т.е. принять  $X_{1C} = X_{2C}$ , то аналитическое решение в более наглядной форме можно получить в фазных составляющих.

Примем, что векторная диаграмма ЭДС системы и напряжений в месте установки защиты до возникновения КЗ имеет вид, показанный на рис. 2.

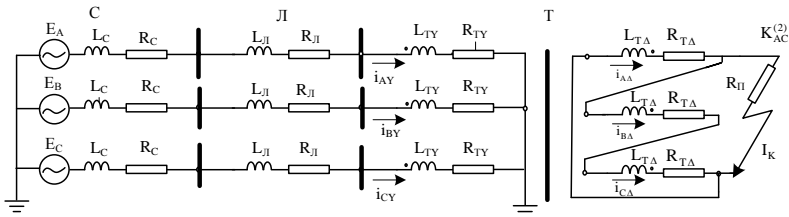


Рис. 1. Схема электропередачи для исследования влияния трансформации  $Y/\Delta$  на замер реле сопротивления ДЗ

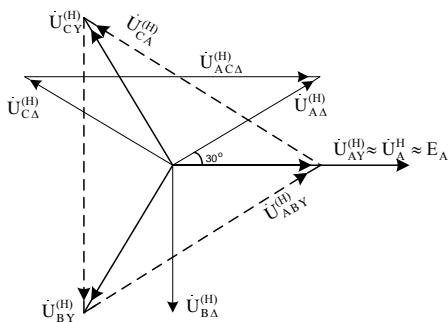


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений на шинах системы С в нормальном режиме

Для определения напряжений и токов в месте установки защиты (в начале линии Л) воспользуемся методом наложения, рассматривая режим КЗ как наложение режима, предшествующего КЗ (нормального режима) и дополнительного режима, обусловленного включением в цепь КЗ источника напряжения  $-\dot{U}_{AC}^H(t)$ , равного по величине и противоположного по фазе напряжению нормального режима.

Так как в нормальном режиме токи в обмотках трансформатора отсутствуют, то при КЗ они определяются только токами дополнительного режима. Принимая, что токи в обмотках трансформатора приведены к стороне ВН (т.е.  $N_T = 1$ ), из схемы замещения рис. 1 получим:

$$\dot{i}_{aA} = \dot{i}_{aA}^{(доп)} = \frac{2}{3} \cdot \dot{i}_K; \quad (1)$$

$$\dot{i}_{bA} = \dot{i}_{cA} = \dot{i}_{bA}^{(доп)} = \dot{i}_{cA}^{(доп)} = \frac{1}{3} \cdot \dot{i}_K; \quad (2)$$

$$\dot{i}_{AY} = \dot{i}_{aA} \cdot \frac{W_A}{W_Y} = 2 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \cdot \dot{i}_K = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \dot{i}_K = \frac{2}{3} \cdot \dot{i}_K; \quad (3)$$

$$\dot{i}_{BY} = \dot{i}_{cY} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \dot{i}_K = -\frac{1}{3} \cdot \dot{i}_K, \quad (4)$$

где  $\dot{i}_K$  – ток КЗ, приведенный к стороне ВН трансформатора и определяемый из уравнения

$$\dot{i}_K = \frac{\dot{U}_{ACA}}{\sqrt{3}j \cdot \frac{2}{3}X_\Sigma + \frac{2}{3}R_\Sigma + R_H} = \frac{1,5 \cdot E_A}{Z_\Sigma + 1,5 \cdot R_H}; \quad (5)$$

$$Z_\Sigma = jX_\Sigma + R_\Sigma + (X_H + X_T + R_H + R_T) \cdot \tau. \quad (6)$$

Для напряжений в начале линии Л (в месте установки защиты) из схемы замещения рис. 1 с учетом векторной диаграммы напряжений (рис. 2) получим следующие соотношения

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AB}^H + \dot{U}_{AB}^{доп} = \sqrt{3} \cdot E_A \cdot e^{j30^\circ} - \dot{i}_K \cdot Z_C = E_A \sqrt{3} e^{j30^\circ} \frac{1,5 \cdot Z_C}{Z_\Sigma + 1,5 \cdot R_H} \quad (7)$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CA}^H + \dot{U}_{CA}^{доп} = \sqrt{3} E_A e^{j150^\circ} + \dot{i}_K Z_C = E_A \sqrt{3} e^{j150^\circ} \frac{1,5 Z_C}{Z_\Sigma + 1,5 R_H} \quad (8)$$

Из уравнений (7)–(8) и (3)–(4) можно определить сопротивления на зажимах реле сопротивления ДЗ

$$\dot{Z}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{i}_A - \dot{i}_B} = \frac{E_A \sqrt{3} e^{j30^\circ} \frac{1,5 Z_C}{Z_\Sigma + 1,5 R_H}}{\frac{1,5 E_A}{Z_\Sigma + 1,5 R_H}} = \sqrt{3} e^{j30^\circ} (Z_\Sigma + 1,5 R_H) \cdot \dot{Z}_C; \quad (9)$$

$$\dot{Z}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{i_C - i_A} = \frac{\dot{E}_A (\sqrt{3} e^{j150^\circ} + \frac{1,5 \dot{Z}_C}{\dot{Z}_\Sigma + 1,5 R'_\Pi})}{\frac{1,5 \dot{E}_A}{\dot{Z}_\Sigma + 1,5 R'_\Pi}} = \frac{\sqrt{3} e^{j150^\circ} (\dot{Z}_\Sigma + 1,5 R'_\Pi)}{1,5} - \dot{Z}_C. \quad (10)$$

Замер реле сопротивления, включенного на фазы "В" и "С"

$$\dot{Z}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{i_B - i_C} = \frac{E_A \sqrt{3} e^{j90^\circ}}{0} \rightarrow \infty.$$

При трехфазном КЗ замер всех трех реле сопротивления будет равен

$$\dot{Z}_{ABC,CA}^{(3)} = \dot{Z}_\Sigma - \dot{Z}' + R'_\Pi = \dot{Z}_\Sigma + \dot{Z}_T + R'_\Pi. \quad (11)$$

Рис. 3 иллюстрирует искажающее влияние трансформации Y/Δ-11 на замер реле сопротивления III ступени ДЗ при двухфазном КЗ за трансформатором.

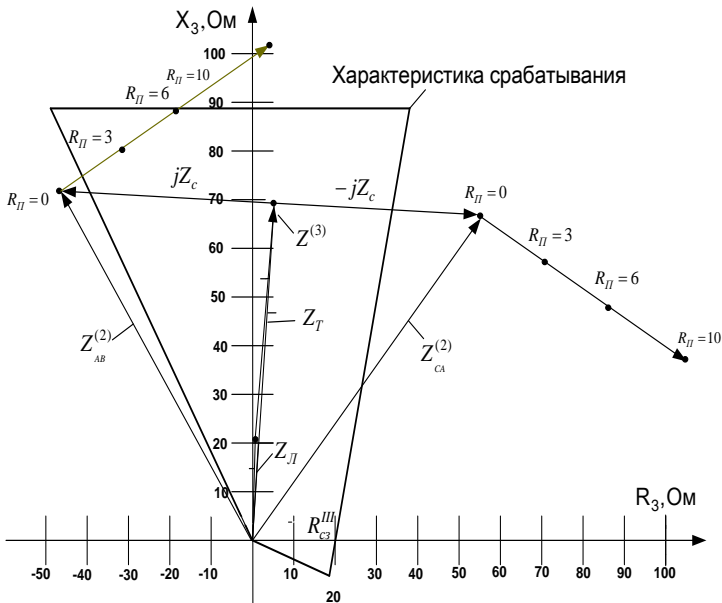


Рис. 3. Влияние трансформации Y/Δ-11 на замер реле сопротивления III ступени ДЗ ЛЭП 110 кВ при двухфазном КЗ  $K_{AC}^{(2)}$  за трансформатором через переходное сопротивление ( $X_c = 17 \text{ Ом}$ ,  $l_\Pi = 50 \text{ км}$ ,  $S_{ном. T} = 25 \text{ МВА}$ ,  $R_\Pi = 0 \dots 10 \text{ Ом}$ )

Из рис. 3 можно видеть, что при металлическом КЗ искажается замер по активной составляющей  $R_3$ , при КЗ через переходное сопротивление может искажаться также и замер по реактивной составляющей сопротивления на зажимах защиты  $X_3$ .

#### Литература

1. **Атабеков Г.И.** Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957.

*Шуин Владимир Александрович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: shuin@rza.ispu.ru

*Марван Саид Саиф Аль-Хомиди,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
e-mail: maroan\_2008@mail.ru

УДК 65.015.2

В.Ф. КОРОТКОВ, к.т.н, профессор,  
А.А. ФОМИЧЕВ, к.т.н, доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: kvf1937@rambler.ru

### **Учет требований образовательного стандарта при автоматизированном обучении дисциплине «Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах»**

**Аннотация.** Показаны возможности использования компетентного подхода при автоматизированном формировании знаний, умений и навыков. Предложены методики оценки и контроля знаний, умений и навыков в рамках профессиональных компетенций непосредственно в процессе автоматизированного обучения

**Ключевые слова:** автоматизированное обучение, компетентный подход, результаты обучения.

V.F. KOROTKOV, candidate of engineering, professor,  
A. A. FOMICHOV, candidate of engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: kvf1937@rambler.ru, aaf6@rambler.ru

## **The requirements of educational standards in the automated training discipline "Automatic regulation in power systems"**

**Abstract.** The possibilities of the use of competence-based approach in the automated formation of knowledge, abilities and skills. The proposed methodology for the assessment and control of knowledge, abilities and skills within the professional competence directly in the process automation learning

**Keywords:** computer-assisted learning, competently approach, learning outcomes.

Введение федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) диктует необходимость разработки и создания для современных технологий автоматизированного обучения методов контроля и оценки знаний, умений и навыков, формируемых у студентов в соответствии с требуемыми профессиональными компетенциями [1,2].

В течение ряда лет на кафедре автоматического управления электроэнергетическими системами ИГЭУ ведется планомерная работа по созданию и эффективному использованию автоматизированных программно-методических комплексов по профилирующим дисциплинам и накоплен определенный опыт. Авторами предлагаются критерии контроля и оценки степени усвоения компетенций непосредственно в процессе автоматизированного дистанционного обучения (АСДО) студентов дисциплине «Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах» [3] по направлению подготовки бакалавров «Электроэнергетика и электротехника».

АСДО по дисциплине «Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах» содержит учебный материал, включающий содержательную (теоретическую), практическую, экспериментальную, контролирующую (включая самоконтроль) и тренировочную части.

В соответствии с основной образовательной программой дисциплина «Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах» поддерживает компетенции: ПК-3, ПК-4, ПК-7, ПК-37 [4]. Рабочей программой также определены знания, умения и навыки, приобретаемые студентом в рамках каждой компетенции.

Компетентностный подход предполагает структурирование учебного материала дисциплины в соответствии с заданными компе-



тенциями и дифференцирование результатов обучения на основе интегральных оценок отдельно по каждой компетенции.

Оценка знаний по каждой отдельной компетенции дисциплины может быть сформирована в виде

$$O_i^3 = \frac{n_i^{\Pi}}{n_i^B} \leq 1,$$

где  $i$  – номер компетенции;

$n_i^{\Pi}$  – число правильных ответов (решений) на вопросы (задания), относящиеся к  $i$  – й компетенции;

$n_i^B$  – общее число заданных вопросов (заданий), относящихся к  $i$  – й компетенции.

Для формирования умений используются практическая и экспериментальная части АСДО. Предполагается, что студент владеет заданными умениями, если научится правильно решать профессиональные задачи и грамотно проводить соответствующие эксперименты. Оценка степени владения умениями может быть получена по результатам функционального контроля, входящего в практическую и экспериментальную части, где контролируется правильность и рациональность самостоятельных действий студента на каждом из этапов и шагов решения задачи или проведения эксперимента. Оценка умения может быть представлена как

$$O_i^Y = \frac{\sum_1^k \frac{n_i^{\Pi}}{n_i^{\Delta}} + \sum_1^m \frac{n_i^{\Pi}}{n_i^{\Delta}}}{2} \leq 1,$$

где  $k$  – число задач  $i$  – й компетенции, решенных студентом;

$m$  – число экспериментов  $i$  – й компетенции, выполненных студентом;

$n_i^{\Pi}$  – число правильных действий, выполненных студентом при решении задачи или проведении эксперимента;

$n_i^{\Delta}$  – общее число действий, необходимое для решения задачи или проведения эксперимента.

Под навыком можно понимать умение, состоящее из заданной последовательности действий, выполнение которых доведено до автоматизма. Предполагается, что приобретение навыков происходит путем многократных решений типовых задач, относящихся к соответствующей компетенции в составе тренажерной части АСДО. Степень овладения

соответствующим навыком может быть оценена по результатам мониторинга динамики изменения успешности этих решений.

Оценка степени владения навыком в решении профессиональных задач может быть получена по выражению

$$O_i^H = \max\left(\frac{N_i - M_i}{N_i}\right) \leq 1,$$

где  $N_i$  – заданное число задач, безошибочное решение которых достаточно для овладения  $i$  – й компетенцией;

$M_i$  – число задач  $i$  – й компетенции, в решении которых были допущены ошибки в ходе одного сеанса работы с тренажёром.

Интегральная оценка успешности усвоения отдельной компетенции по мнению авторов может быть представлена в виде произведения оценок знаний, умений и навыков

$$O_i^K = O_i^Z \times O_i^Y \times O_i^H \leq 1,$$

соответствующего объёму некоторого параллелепипеда в трёхмерном пространстве оценок.

Такая оценка позволяет рассматривать профессиональные компетенции как некоторые стандартизованные “кубики, из соответствующего набора которых собирается заданная «конструкция» квалификации.

Представленная система оценок результатов усвоения профессиональных компетенций не претендует на абсолютную достоверность в оценке и полноту. К тому же в оценках подобного рода вряд ли стоит стремиться к абсолютной достоверности, если она вообще возможна. Авторы пытались показать возможность получения таких оценок непосредственно в ходе автоматизированного обучения, что, конечно, не исключает наличие других подходов в этом вопросе, например [5].

#### Литература

1. **Азарова Р.Н., Борисова Н.В., Кузов Б.В.** Один из подходов к проектированию основных образовательных программ вузов на основе компетентностного подхода. (Часть I). -М. — Уфа: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2007. 56 с.
2. **Азарова Р.Н., Борисова Н.В., Кузов Б.В.** Один из подходов к проектированию основных образовательных программ вузов на основе компетентностного подхода. (Часть II). -М. Уфа : Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2007. - 42с.
3. **Перечень компетенций** (в соответствии с ФГОС направлений подготовки) [Электронный ресурс] – [http://ispu.ru/files/u2/RPD\\_Perechen\\_kompetenciy.pdf](http://ispu.ru/files/u2/RPD_Perechen_kompetenciy.pdf)
4. **Коротков В.Ф., Фомичев А.А.** Автоматизированное обучение дисциплине «Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах» // Вестник

Ивановского государственного энергетического университета. - 2015. - Вып. 1.

5. **Разработка системы дистанционного обучения** по курсу физики, основанной на принципах компетентностного подхода/А.И. Тихонов, В.Г. Комин, И.А. Корнев и др. // Внутривузовские инновационные образовательные проекты (работы) 2013 г.: Сборник отчетов / Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2014.

*Коротков Владимир Федорович*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,  
e-mail: kvf1937@rambler.ru

*Фомичев Андрей Альбертович*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,  
e-mail: aaf6@rambler.ru

## АВТОРСКИЙ ИНДЕКС

### А

АББЯСОВ А.М.	257
АЛЕКСАНДРОВ В.П.	260, 266
АЛЫКОВА А.Л.	373
АЛЬ-ХОМИДИ М.С.	479
АНИСИМОВ А.А.	237
АНИСИМОВ С.В.	376
АПОЛОНСКИЙ В.В.	232
АСИЕДУ-БААХ Ж.	42

### Б

БАГАНОВ Д.М.	86
БАЛМАСОВ А.В.	359
БЕКТАШОВ Д.А.	369
БЕЛОВ А.А.	401, 417
БЕЛОВ И.А.	32
БЕЛЫШЕВ А.В.	80
БЕРЕЗИНА Е.В.	362
БОДРУХИНА С.С.	460
БОЙКОВ А.А.	377
БУРЧЕНКОВ.	362

### В

ВАГАЙСКИЙ П.В.	460
ВАЛИЕВ Р.И.	250, 254
ВАСИЛЬЕВ В.В.	449
ВЕДЕРНИКОВА И.И.	291, 298
ВЕРШИНИН И.В.	273
ВИЛКОВ П.В.	115
ВИНОГРАДОВ А.Б.	90, 94, 98
ВИНОКУРОВА Т.Ю.	434
ВИХРЕВ С.В.	3
ВЛАСОВ А.М.	288, 312 319, 337
ВОЛКОВА М.Ю.	334, 381
ВОРОБЬЕВА Е.А.	456

### Г

ГЛАЗУНОВ В.Ф.	112, 115
ГЛАЗЫРИН В.Е.	449
ГЛЕБОВ Н.А.	94
ГНЕЗДОВ Н.Е.	83, 90 94, 98
ГОЛЯС А.А.	337
ГОРБАЧЕВ Е.Е.	132
ГРАЧЕВ П.Ю.	132
ГРОМОВ А.К.	149
ГУСЕВ Д.В.	284

### Д

ДЕМЬЯНЦЕВА Н.Г.	359
ДЮПОВКИН Н.И.	413

### Е

ЕВГРАФОВА К.И.	26
ЕГОРОВ В.Н.	260, 266
ЕГОРЫЧЕВА Е.В.	323, 341 348
ЕРЕМИН И.В.	209

### Ж

ЖУРАВЛЕВ С.В.	90, 94
ЖУРАВЛЕВ С.В.	

### З

ЗАЙЦЕВ А.С.	200
ЗАЙЦЕВ Е.С.	467
ЗАРУБИН В.П.	330
ЗАРУБИН З.В.	26, 29
ЗАХАРОВ А.В.	120
ЗАХАРОВ А.М.	73
ЗАХАРОВ М.А.	73
ЗАХАРОВ П.А.	73
ЗЕНКИН Д.М.	83
ЗИНОВЬЕВ Б.С.	385
ЗУБКОВ В.П.	423, 427
ЗУБКОВ Ю.В.	128
ЗУЙКОВ В.А.	409

### И

ИГНАТЬЕВ К.В.	42, 46 50, 54
ИЛЬИНА Е.Э.	29

### К

КАЗАКОВ Ю.Б.	139, 142, 145
КАПУСТИН С.А.	242
КАРСАКОВ А.Ю.	132
КИРПИЧЁВ И.В.	3
КИСЕЛЕВ А.А.	355, 366
КИСЕЛЕВ В.В.	330
КОБЕЛЕВ А.С.	120
КОЛГАНОВ А.Р.	83, 86 102
КОЛЕСОВ Л.М.	442
КОЛОБОВ А.Б.	10, 14
КОПОСОВ В.Н.	326, 344

КОПЫЛОВА Л.Г.	220, 224, 229	НИКОЛАЕВ М.А.	401
КОПЫЧЕВ М.М.	42, 46, 50 54	НИКОНОРОВ А.В.	308, 341 348
КОРНЕВ И.А.	177	НОВИКОВ В.В.	362
КОРНИЛОВ Д.С.	142	НОВИКОВ С.И.	452
КОРОСТЕЛЕВ К.А.	181	НОВОСЕЛЬЦЕВ И.И.	404
КОРОТКОВ В.Ф.	483	НОВОСЕЛЬЦЕВА С.С.	404
КОСЯКОВ С.В.	387	НОЗДРИН М.А.	26, 29
КРАЙНОВА Л.Н.	23	<b>О</b>	
КРЮКОВ О.В.	61, 65, 69	ОБАЛИН М.Д.	464
КУЗНЕЦОВА Ю.Н.	128	ОГУРЦОВ Ф.Б.	10, 14
КУЗЬМИН И.Л.	452	ОРЛОВ А.С.	305
КУЗЬМИН С.М.	359	<b>П</b>	
КУЛЕШОВ П.В.	197	ПАЙКОВ И.А.	185, 189
КУЛИКОВ А.Л.	464	ПАЛИЛОВ И.А.	139
КУНСБАЕВ И.А.	18	ПАНТЕЛЕЕВ Е.Р.	399, 406 409, 413
КУРНЫШЕВ Б.С.	105, 108	ПАХОЛКОВА Т.А.	312
<b>Л</b>		ПАШАЛИ Д.Ю.	18
ЛАПИН А.Н.	167	ПЕРМИНОВ С.М.	212, 216
ЛЕ СУАН ХОНГ	58	ПЕРМИНОВА А.С.	212, 216
ЛЕБЕДЕВ В.Д.	467, 471 475	ПИРОГОВ Д.А.	21
ЛЕБЕДЕВ Д.А.	471	ПОДОБНЫЙ А.В.	170
ЛЕБЕДЕВ С.К.	83, 86	ПОКРОВСКИЙ А.А.	330
ЛЕВИН В.И.	237	ПОЛЕТАЕВ В.А.	288, 294 301,305
ЛЕГКОВА И.А.	330		308, 312
ЛИСИЦИН Р.Ю.	362		315, 319
ЛИХАЧЕВА А.В.	149		337
ЛОБАНОВ М.А.	373	ПОПОВ Г.В.	209
<b>М</b>		ПРУДНОВ А.В.	112
МАРКОВ В.В.	281	ПУТИЛОВ С.В.	417
МАСЛОВ Л.Б.	3, 7	ПУТОВ А.В.	42, 46, 50, 54
МЕРКУЛОВ А.Ю.	475	ПУТОВ В.В.	46
МИЛОСЕРДОВ Е.П.	390, 394 397	ПУЧКОВ П.В.	294, 315, 330
МИРОНОВ С.В.	362	<b>Р</b>	
МОЖЖУХИНА В.В.	442	РОГОЖНИКОВ Ю.Ю.	413
МОНОВ Д.А.	90	РОГОЗИН Р.М.	167
МОРОЗ Г.А.	399	РОЗИН И.А.	189
МОРОЗОВ А.Д.	3	РУСЯЕВ Н.А.	54
МОРОЗОВ А.Н.	156	<b>С</b>	
МОРОЗОВ Н.А.	156	САДЫКОВ А.М.	387
МУНИЦЫН А.И.	23	САМАРИНСКИЙ С.А.	229
<b>Н</b>		СЕВРЮГОВ Д.М.	197
НАУМОВ А.В.	471	СЕРЕБРЯКОВ А.В.	65, 69
НЕСТЕРОВ С.А.	160	СЕРЕГИНА Е.П.	3
НИКИТИНА С.А.	330	СИБИРЦЕВ А.Н.	90, 98

СИДОРОВ А.А.	390, 394	ФИЛАТОВА Г.А.	438
СКОВОРОДА Б.Ф.	420	ФИЛИЧЕВ В.Т.	115
СЛЫШАЛОВ В.К.	475	ФОМИЧЕВ А.А.	483
СОЛДАТОВ И.Н.	34	ФРОЛОВА О.В.	446
СОЛОВЬЕВ М.Л.	423, 427	<b>Х</b>	
СОЛОМАНИЧЕВ М.А.	112	ХАНГУЛИЕВ А.Х.	105
СОЛУНИН М.А.	170	ХАФИЗОВ А.А.	250, 254
СТРАДОМСКИЙ Ю.И.	153, 212	ХЛЫНИН А.С.	65
	216	ХУЗЯШЕВ Р.Г.	452
СТУЛОВ А.В.	174, 177, 181	<b>Ч</b>	
<b>Т</b>		ЧЕКАН Г.В.	373
ТАРАРЫКИН С.В.	220, 224	ЧЕРНОВ Л.К.	301
ТЕРЕХОВ А.И.	277	<b>Ш</b>	
ТЕРЕХОВ В.Г.	246	ШАКИРОВ Ю.И.	250, 254
ТИХОМИРОВА И.А.	220, 224, 242, 420	ШАПИН В.И.	38
ТИХОНОВ А.И.	170, 174 177, 181 185, 189, 193, 197 200, 204, 209	ШАРЫКИН С.П.	397
ТОПОРОВ А.В.	330	ШВЕЦОВ Н.К.	145
ТОРАМБЕТОВ К.С.	449	ШИЛКИН А.А.	397
ТРОФИМОВИЧ И.В.	204	ШИРЯЕВ А.Н.	76, 80
ТЮТИКОВ В.В.	273	ШИШКИН В.П.	136
<b>У</b>		ШИШУЛИН О.Ю.	446
УШКОВ А.С.	102	ШМЕЛЕВ А.С.	189, 193
<b>Ф</b>		ШУИН В.А.	438, 456 479
ФЕДОТОВ А.М.	430	ШУРЫГИН А.М.	164, 352
ФИЛАТОВ Ю.Е.	36	ШУРЫГИН М.Н.	164, 352
		<b>Я</b>	
		ЯБЛОКОВ А.А.	471, 475
		ЯКУБЕНКО А.В.	105

## СОДЕРЖАНИЕ

Секция "ДИНАМИКА, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ" .....	3
Секция "МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ И УСТАНОВКАМИ" .....	42
Секция "ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА" .....	120
Секция "МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ" .....	220
Секция "ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ" .....	281
Секция "ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ" .....	373
Секция "РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ" .....	434

МАТЕРИАЛЫ  
Международной научно-технической конференции  
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**  
(XVIII Бенардосовские чтения)

*Печатаются в авторской редакции*

III том  
**Электротехника**

Подписано в печать 27.04.2015. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 28,60. Уч.-изд. л. 29,60. Тираж 200 экз. Заказ .  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет  
имени В. И. Ленина»  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.  
Типография ООО «ПресСто»  
153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39