

**Министерство науки и высшего
Образования Российской Федерации**

**федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»**

**МАТЕРИАЛЫ
ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**«Актуальные проблемы развития
науки, техники, экономики»**

Иваново 2018

Научный комитет:

Председатель - д.т.н., проф., проректор по НР Тютиков В.В.

Крайнова Л.Г. - к.т.н., декан ЭМФ;

Мурзин А.Ю. - к.т.н., доц., декан ЭЭФ;

Плетников С.Б. - к.т.н., доц., декан ТЭФ;

Андрианов С.Г.- к.т.н., доц., декан ИФФ;

Маршалов Е.Д. - к.т.н., декан ИВТФ;

Карякин А.М.- д.э.н., проф., декан ФЭУ.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Энергетика.....	3
Секция 2. Информационные системы.....	85
Секция 3. Электромеханика.....	152

Секция 1. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 519.87

А.Е. АРЖАННИКОВА, к.т.н., доцент
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: aae@eef.ispu.ru

Об использовании математических и физических моделей при решении оптимизационных задач на примере выбора оптимальной компенсации реактивной мощности

Аннотация: На примере выбора оптимальной мощности компенсирующих устройств в системе электроснабжения произведено сравнение трех видов моделирования (аналитического, имитационного и физического) для решения оптимизационных задач.

Ключевые слова: оптимизация, математическая, физическая модели, компенсация реактивной мощности, статическая характеристика нагрузки.

A.E. ARZHANNIKOVA, Candidate of Engineering, docent
Ivanovo State Power Engineering University, 153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: aae@eef.ispu.ru

On the application of mathematical and physical models for the optimization problem of assigning proper reactive power compensation

Abstract: based on the example of choosing the optimal power of compensating devices in power supply system, three types of modeling (analytical, simulation and physical) were compared for solving optimization problems.

Key words: optimization, mathematical, physical models, reactive power compensation, static load characteristic.

При исследовании систем электроснабжения (СЭС) с помощью моделей используют физическое или математическое моделирование. Выбор оптимальной компенсации реактивной мощности в СЭС – актуальная задача оптимизации мгновенного режима работы с целью минимизации эксплуатационных затрат, зависящих от режима – издержек на возмещение потерь активной мощности в элементах сети. В этом случае может быть использован критерий минимизации потерь активной мощности $\Delta P \rightarrow \min$.

Выработка реактивной мощности батареями статических конденсаторов (БК) в месте потребления разгружает питающую сеть и снижает потери в ней, но появляются потери активной мощности в самих БК на покрытие диэлектрических потерь в конденсаторах (0,5 % от номинальной мощности БК). С учетом этого целевая функция $\Delta P(Q_{БК})$ приобретает вид

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_{БК})^2}{U^2} R + \Delta P_{\text{доБК}} Q_{БК} \rightarrow \min, \quad (1)$$

Для сравнения видов моделирования, оптимальная мощность БК выбрана с помощью математических (аналитической и имитационной) и физической моделей участка СЭС. Результаты представлены в относительных единицах.

Математическое моделирование состоит в использовании совокупности математических соотношений, определяющих структуру системы и описывающих ее поведение. Для достаточно простых систем применяется аналитическое (оптимизационное) исследование математической модели, которое заключается в расчете оптимальной мощности БК по формуле (1), в которой одна переменная – $Q_{БК}$, а все остальные величины постоянны – номинальны, статические характеристики нагрузки и БК (СХН и СХБК) не зависят от напряжения, их характеристики горизонтальны (рис. 1,а). Результат исследования показывает необходимость почти полной компенсации реактивной мощности нагрузки для минимизации потерь активной (рис. 1,б). Оптимальная компенсация немного меньше номинальной из-за наличия потерь в самих БК.

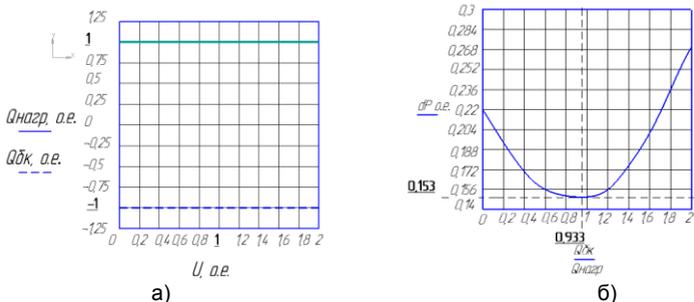


Рисунок 1. СХН и СХБК (а) и целевая функция $\Delta P(Q_{БК})$ (б) при аналитическом исследовании математической модели

Имитационное (оценочное) моделирование – это процесс конструирования модели реальной системы с помощью цифровой вычислительной машины и постановки экспериментов на ней. Имитационная модель подобна физической при меньших затратах на проведение моделирования и большем объеме решаемых задач. Модель участка СЭС создана на базе учебно-диалогового комплекса для расчета и анализа установившихся режимов работы электрической сети «Энергия», разработанного на кафедре электрических систем ИГЭУ. «Энергия», как и физическая модель дает возможность задавать и типовые, и необходимые пользователю СХ. Нагрузка и БК были заданы объектами с типовыми статическими характеристиками (рис. 2,а). Результаты расчета (рис. 2,б) близки к аналитическим расчетам за счет того, что статизм (наклон) типовых СХН и СХБК (по модулю) почти одинаков.

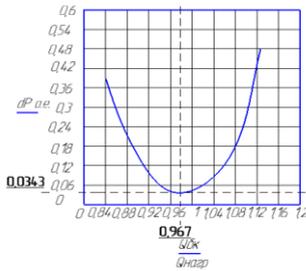
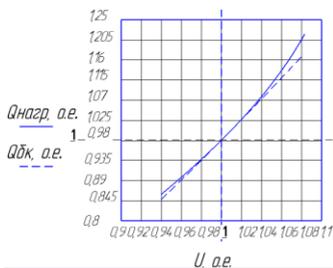


Рисунок 2. СХН и СХБК (по модулю) (а) и целевая функция $\Delta P(Q_{БК})$ (б), полученные с помощью имитационной модели

Физическая модель участка СЭС создана на лабораторном стенде производства Челябинского ИПЦ «Учебная техника». Нагрузки, в том числе и ёмкостные, заданы в блоках стенда СХН по напряжению (рис. 3,а). Замеры показали, что минимум потерь наступает при почти полной компенсации реактивной мощности нагрузки (рис. 3,б), что также можно объяснить малым отличием степеней наклона СХН и СХБК (по модулю).

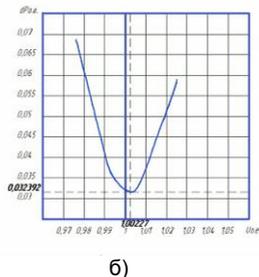
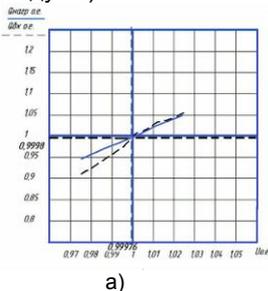


Рисунок 3. СХН и СХБК (по модулю) (а) и целевая функция $\Delta P(Q_{БК})$ (б), измеренные на физической модели

Выводы:

1. Все перечисленные модели дают близкие результаты.
2. Для повышения точности оптимизации нужно реальную СХН объекта реализовать в имитационной или физической модели.
3. К сложным многопараметрическим моделям лучше применять имитационный подход.

О технологии математического моделирования комплекса взаимосвязанного оборудования энергоблоков с ПГУ

Аннотация. Целью работы является исследование проблем создания математических моделей взаимосвязанного оборудования энергоблоков с ПГУ и возможности использования моделей в структуре многофункциональных АСУТП.

Ключевые слова: парогазовые технологии, математическая и имитационная модели, энергоблока, режимные и климатические факторы.

Yu.S. TVERSKOY, doctor of engineering, professor,
A.V. GOLUBEV, candidate of technical sciences, assistant professor,
I.K. MURAVEV, candidate of technical sciences.

Ivanovo State Power Engineering University 153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

On the technology of mathematical modeling of the complex of interconnected equipment of power units with CCGTs

Abstract. The aim of the work is to research the problems of creating mathematical models of interconnected equipment of power units with CCGTs and the possibility of using models in the structure of multifunctional process control systems (APCS).

Key words: steam and gas technologies, mathematical and simulation models, power unit, regime and climatic factors.

Современные АСУТП электростанций строятся на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры и служат единым системообразующим компонентом информационно-технологической среды управления энергоблоком. Технология проектирования многофункциональных АСУТП на базе ПТК предусматривает широкое использование математических моделей взаимосвязанного технологического оборудования энергоблоков тепловых и атомных электростанций [1–4]. При этом синтез полноценных АСУТП требует, как правило, решения целого ряда междисциплинарных задач.

Особенно остро междисциплинарные проблемы проявились при освоении инновационных парогазовых технологий. Энергоблоки с парогазовыми установками (ПГУ) существенно поднимают эффективность использования топливо-энергетических ресурсов. Расчетные оценки КПД энергоблоков с ПГУ достигают 50...60%.

Однако опыт эксплуатации, экспериментальные исследования показывают, что эффективность использования топлива на энергоблоках с

ПГУ весьма чувствительна к изменениям режимных и климатических факторов.

Разработка высокоточных математических моделей сложного тепломеханического оборудования электростанций создает возможность уже на ранних стадиях функционального проектирования рассмотреть особенности проектируемых технических решений, осуществить своевременную подготовку эксплуатационного персонала и др. Эффективность применения математического моделирования для корректного решения задач управления сложными объектами подтверждена многочисленными исследованиями и уже давно не оспаривается в научных и производственных кругах.

Трудности решения задачи разработки высокоточных математических моделей сложного тепломеханического оборудования связаны, прежде всего, с обоснованием структуры модели и требуемой глубиной моделирования.

Математическая модель энергоблока с ПГУ как комплекса взаимосвязанного оборудования должна включать следующее оборудование и протекающие в них процессы:

- компрессор ГТУ (процесс сжатия воздуха, расчеты объема поступающего воздуха, распределения воздуха на охлаждения газовой турбины);

- камера сгорания ГТУ (химические процессы сжигания топлива, расчеты объема окислителя для топлива, параметров выходящих дымовых газов);

- газовая турбина ГТУ (процесс расширения дымовых газов, расчеты неконтролируемых и нерегулируемых «присадок» холодного воздуха из компрессора);

- котел-утилизатор (границы образования пароводяной смеси в поверхностях нагрева, рециркуляция конденсата, материальные балансы воды и пара в барабанах высокого и низкого давлений);

- паровая турбина (процесс расширения пара);

- конденсационная установка (процесс конденсации пара).

Одним из перспективных направлений в технологии математического моделирования сложных технологических объектов управления (ТОУ) относят разработку так называемого полимодельного комплекса.

Полимодельный комплекс отличается тем, что в его состав могут входить разнородные и комбинированные модели, т.е. как показано выше исследуемый объект описывается несколькими разного рода моделями, при этом каждая из входящих в состав комплекса моделей может оцениваться своей системой показателей [5].

Качественно «правильное» поведение модели ТОУ во всех режимах работы энергоблока говорит об отсутствии в реализации математической модели грубых ошибок в привязке уравнений фундаментальных физических законов к моделируемому объекту управления.

Особые требования должны предъявляться к верификации полимодельного комплекса и оценки меры его адекватности. Предлагается выполнять это в несколько этапов.

Первый этап заключается в определении соответствия с результатами тепло-гидравлического расчета. При этом используются статические данные, полученные по результатам тепло-гидравлических расчетов оборудования при различной нагрузке.

Второй этап заключается в сравнении эксплуатационных трендов из архива АСУТП и данных из режимной карты при разных значениях условиях внешней среды. При этом уточняются коэффициенты модели, а также устанавливаются входные параметры в модели на значения согласно испытаниям.

Третий этап заключается в нахождение значений абсолютных и относительных максимальных погрешностей, СКО на заданном интервале времени и проч., что может служить количественной оценкой меры адекватности.

При этом для линеаризованной математической модели необходимо обеспечить совпадение динамических характеристик модели и объекта в частотной области. В случае если адекватность модели в частотной области не доказана, то разработанная модель не может быть применена для синтеза и анализа систем автоматического управления в составе АСУТП [6,7].

Литература

1. **Теория и технология** систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн. 1. Проблемы и задачи. Кн. 2. Проектирование. Кн. 3. Моделирование. / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2013. – Кн. 1 – 260с. – Кн. 2 – 436 с. – Кн.3 – 176с.
2. **Аракелян, Э. К.** Моделирование процессов в контурах естественной циркуляции котлов-утилизаторов ПГУ / Э.К. Аракелян, А.С. Рубашкин, А.С. Обуваев, В.А. Рубашкин // Теплоэнергетика. – 2009. – №2. – С. 61-63.
3. **Давыдов, А.В.** Опыт освоения парогазовых энергоблоков ПГУ-450Т / А.В. Давыдов, Ю.А. Радин // Электрические станции. 2009. № 9. С. 22–26.
4. **Maojian Wang.** Simultaneous optimization and integration of gas turbine and air separation unit in IGCC plant / Wang Maojian, Liu Guilian, Wai Hui Chi // Energy, vol. 116, part. 2, 2016, pp. 1294-1301. doi: 10.1016/j.energy.2016.07.053.
5. **Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Концептуальные и методические основы квалификации моделей и полимодельных комплексов, Тр. СПИИРАН, 2004, выпуск 2. – Т.1. – С.10–35.
6. **Тверской, Ю.С.** Исследование на математической модели эффективности совместной работы газовой и паровой турбин энергоблока с ПГУ / И.К. Муравьев, Ю.С. Тверской // Автоматизация в промышленности. – 2016. – №1. – С.53-57.
7. **Муравьев, И.К.** Технология и методология разработки полимодельных комплексов для АСУТП энергоблоков с парогазовыми установками / И.К. Муравьев, Ю.С. Тверской [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018.– Вып. 3.– С. 20-28.

Исследование метода повышения точности показаний датчика уровня

Аннотация. В работе проанализированы различные способы вычисления показаний уровня воды в барабане по перепаду давлений, измеряемому датчиком. Рассматриваются классический способ вычисления при настройке датчика на номинальный режим работы оборудования, а также способ вычисления уровня воды при динамическом определении параметров воды.

Ключевые слова: измерение уровня, датчик, автоматическое регулирование, погрешность.

Yu.S. TVERSKOY, doctor of engineering, professor,
A.V. GOLUBEV, candidate of technical sciences, assistant professor,
D.S. OMAROV, postgraduate student.

Ivanovo State Power Engineering University 153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

Influence of calculation method of boiler drum water level indications for the quality of its regulation

Abstract. In this paper, various ways of calculating the drum water level indications by the pressure difference measured by the sensor are analyzed. The article deals with the classical calculation method for tuning the sensor to the nominal operating mode of the equipment, as well as the way to calculate the water level with water parameters dynamically determining.

Key words: level measurement, sensor, automatic control, error.

Эффективная эксплуатация барабанных парогенераторов в условиях теплоэлектроцентралей и теплоэлектростанций может осуществляться при условии строго поддержания уровня воды в барабане в требуемых пределах.

Существующие системы контроля уровня воды в барабанах парогенераторов основаны на измерении уровня с помощью гидростатических уровнемеров. Основной проблемой существующих систем контроля является то, что формируемый программным путем сигнал по уровню в барабане характеризуется большой погрешностью. Существующие решения по минимизации погрешности получаемой оценки предполагают использование дополнительных датчиков для корректировки [1, 2], либо полученных в результате аппроксимации формул, справедливых только при строгих ограничениях абсолютного давления и разности температур воды на линии насыщения и в нижней части измерительного сосуда [3]. Измерение уровня жидкости в барабане котлоагрегата на

уровне точности, определяемом технологическими требованиями, является важной и актуальной задачей при их эксплуатации. В данной статье проанализированы способы корректировки показаний датчика уровня на имитационной модели барабана котла-утилизатора.

С целью повышения точности уровня воды в барабане парогенератора необходимо рассчитывать перепад давления датчика с учетом изменения плотности измеряемого столба жидкости от плотности воды на линии насыщения до плотности воды в нижней части уравнительного сосуда. Для учета различных режимов работы энергоблока определение плотностей производится с помощью таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара.

Для исследования точности была разработана имитационная модель датчика уровня в барабане высокого давления котла-утилизатора энергоблока ПГУ-450.

Метод измерения протестирован на имитационной модели и проведен сравнительный анализ способов вычисления показаний уровня в барабане [4]. Для этого были построены графики зависимостей показаний датчика от реального значения уровня при отклонении давления пара в барабане от номинального (рис.1).

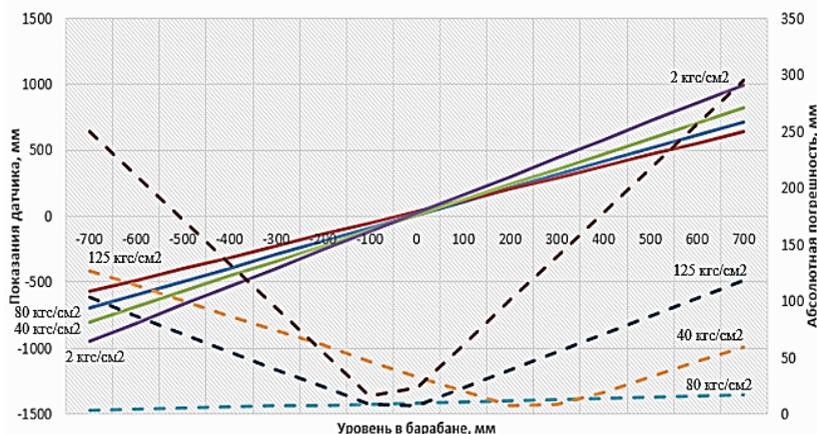


Рис.1. График изменения показаний уровнемера при классической настройке датчика на рабочее давление (8 МПа).

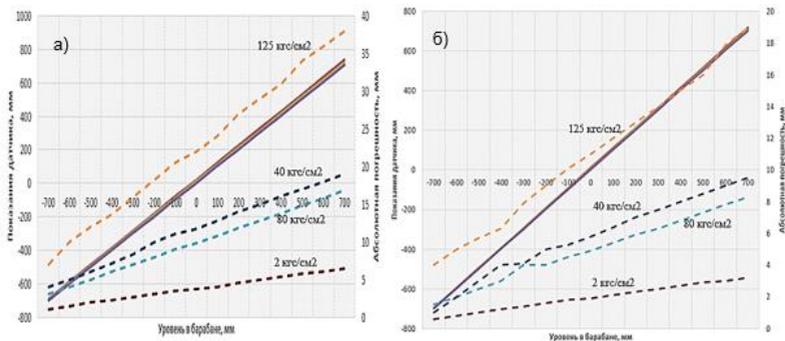


Рис. 2. График изменения показаний уровнемера по предлагаемому методу

По графикам изменения показаний при классической настройке датчика видно, что минимальное значение отклонения находится на уровне, соответствующем точке пересечения графиков, а также отклонение параметров среды в барабане сильно искажает показания уровнемера. Предлагаемый метод вычисления уровня (рис. 2) существенно снижает влияние параметров среды в барабане на показания уровня, но величина абсолютной погрешности также зависит от текущего показания уровня и увеличивается по мере его возрастания.

Литература

1. **Калашников А.А.** Корректировка показаний измерительных каналов уровня с датчиками разности давлений на АЭС // Контроль.Диагностика. 2015. № 12.
2. **Авраменко С.В., Тарасюк В.П.,** Компьютерная система мониторинга уровня жидкости в барабане котла// Вычислительная техника и автоматизация – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2012.
3. **Давыдов В.В., Таламанов С.А., Голубев А.В.,** Особенности нового алгоритма расчета уровня в барабане с учетом режима работы котла-утилизатора энергоблока ПГУ-450Т// Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования // Материалы конференции./ Под ред. А.В.Мошкарина – Иваново: ИГЭУ, 2005.
4. **Голубев А.В., Омаров Д.С.,** Разработка и исследование метода повышения точности показаний датчика уровня // Материалы 13 МНТК студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2018", 2018 г., г. Иваново.-Т.5.с.14

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

Оптимизация размещения электрических подстанций на базе алгоритмов построения трасс ЛЭП

Аннотация: В работе приведены результаты исследования возможностей применения алгоритмов трассировки маршрутов прохождения ЛЭП для определения мест оптимального размещения электрических распределительных подстанций 6/10 кВ в условиях городской застройки.

Ключевые слова: размещение электрических подстанций, построение маршрутов, трассировка ЛЭП, ГИС.

S.V. Kosyakov, doctor of engineering
A.B. Gadalov, engineer

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

Optimizing the location of electrical power substations on the basis of algorithms for pathfinding

Abstract: The paper presents the results of the study of the possibility of using algorithms for tracing the routes of transmission lines to determine the optimal location of electrical distribution sub-stations 6/10 kV in urban areas.

Keywords: the location of power stations, path finding, power lines, GIS.

В настоящее время для определения местоположения трансформаторных подстанций (ТП) при проектировании электрических сетей используются аналитические методы, предполагающие определение длин будущих линий электропередачи по евклидовому расстоянию между подстанцией и потребителями [1]. В условиях городской застройки кабельные ЛЭП прокладываются в обход зданий и других объектов, что приводит к увеличению их длин. Современные геоинформационные системы (ГИС) позволяют учитывать такие факторы за счет моделирования маршрутов прохождения трасс ЛЭП в обход существующих препятствий. Для этого используются алгоритмы поиска кратчайших путей на растровых моделях территории.

В рамках проведенного исследования разработан опытный образец программного модуля ГИС, который позволяет оценивать длины трасс ЛЭП, соединяющих размещаемую ТП с существующими нагрузками. Для построения трасс используется известный алгоритм поиска кратчайших путей на графе A^* [2]. Граф формируется путем наложения

равномерной сетки на участок территории. Пример наложения сетки с шагом 2 метра и построения маршрута приведен на рис. 1. Кроме вертикальных и горизонтальных участков сетки в граф включаются диагональные элементы (на рисунке не показаны). Участки графа, которые ограничивают ячейки модели, пересекающиеся со зданиями, считаются непроходимыми для трассировки.



Рис. 1. Построение маршрута прохождения кабельной ЛЭП в обход зданий

Применение трассировки с использованием подобных моделей и алгоритмов позволяет рассчитать длину ЛЭП и оценить ее стоимость с учетом реального размещения объектов на территории. Проведенные сравнения построенных трасс и реальных трасс ЛЭП в городе показали, что рассчитанные на основе данной модели длины ЛЭП обычно несколько меньше реальных, но, что очевидно, они больше, чем прямолинейные расстояния. При этом наблюдается корреляция между увеличением длины реальных трасс, обусловленной наличием зданий и увеличением длины трасс, определяемых путем расчета на модели. Это дает основание для утверждения, что задача оптимизации размещения ТП с использованием трассировки решается более точно, нежели в традиционных методах, подобных рассмотренному в [1].

Литература

1. **Справочник** по электроснабжению и электрооборудованию: в 2 т. /под общ. ред. А. А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. Т.1. – 568 с.
2. Bayili, S.; Polat, F. Limited-Damage A*: A Path Search Algorithm That Considers Damage as a Feasibility Criterion. Know.-Based Syst. 2011, 24, 501–512.

Полигон «Цифровая подстанция» в ИГЭУ для подготовки кадров современной электроэнергетики

Аннотация. В работе обоснована актуальность, поставлены цель и задачи создания полигона «Цифровая подстанция». Показано, что ключевым элементом полигона будет выступать моделирующий комплекс реального времени. Представлена структурно-функциональная схема полигона. Представлен спектр технических вопросов, которые будут решаться с использованием оборудования установленного на полигоне.

Ключевые слова: электроэнергетика, «цифровая подстанция», интеллектуальная энергетика, моделирование процессов в реальном времени

V.D. LEBEDEV, Ph.D., Head of the Department

Ivanovo State Power Engineering University
E-mail: vd_lebedev@mail.ru

Polygon "Digital Substation" in ISPU for the training of modern electric power industry personnel

Annotation. The work substantiates the relevance, the goal and objectives of creating the Digital Substation landfill. It is shown that a real-time modeling complex will be required as a polygonal one. The structural-functional scheme of the landfill is presented. A range of technical issues that will be addressed using the equipment installed at the site is presented.

Keywords: electric power industry, "digital substation", intellectual energy, real-time process modeling

Актуальность создания полигона продиктована необходимостью развития отрасли электроэнергетики. Уровень технического развития позволил ввести новое направление в развитии экономики в целом и энергетики в частности с названием «цифровизация» [1].

В электроэнергетике термин «Цифровая подстанция» подразумевает широкое внедрение систем автоматизации и управления, построенных на базе открытых стандартов МЭК 61850» [2]. Также в настоящее время внедряются понятия «Цифровой РЭС», «Цифровой трансформатор» в месте с «цифровым электромонтером», за которыми стоит широкое внедрение автоматизации на различных уровнях с различным участием персонала.

В данных условиях подготовка высококвалифицированных кадров для цифровой энергетики становится весьма актуальной проблемой для решения которой поможет организация полигона «Цифровая подстанция».

Задачи, на решение которые направлена организация полигона являются:

- организация научной работы студентов всех курсов;
- организация курсов повышения квалификации.

- создание устройств многофункциональной системы на основе цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения;
- анализ условий и алгоритмов работы оборудования цифровых подстанций;
- разработка передового электроэнергетического оборудования для энергосистем в России и за рубежом;
- формирование инфраструктуры для обучения в области инновационных технологий цифровых подстанций: учебные планы, учебные материалы, и др.;

В основе полигона планируется использование моделирующего комплекса RTDS. RTDS – это специализированный комплекс, предназначенный для изучения стационарных режимов и электромагнитных переходных процессов в электроэнергетической системе (ЭС) в реальном масштабе времени. Исследования ЭС высокого напряжения переменного (HVAC) и постоянного (HVDC) тока выполняются путем цифрового моделирования процессов с использованием алгоритмов, аналогичных тем, что используются в программах типа EMTP (Electromagnetic Transients Program).

RTDS позволяет решать следующие задачи:

полный цикл проверки релейной защиты, единой защиты и схем управления;

полный цикл проверки систем управления для HVDC, SVC, TCSC и синхронных машин;

разработка устройств FACTS и связанных с ней средств управления;

изучение работы систем переменного тока, включая режим генерации и передачи электрической энергии;

исследование взаимодействия оборудования для энергетики;

изучение взаимодействия между объединенными AC/DC системами;

обучение и тренировка инженерно-технического персонала объектов электроэнергетики.

Полная структура полигона представлена на рисунке. 1, которая дополнительно к комплексу RTDS включает в себя необходимое испытательное и моделирующее оборудование.

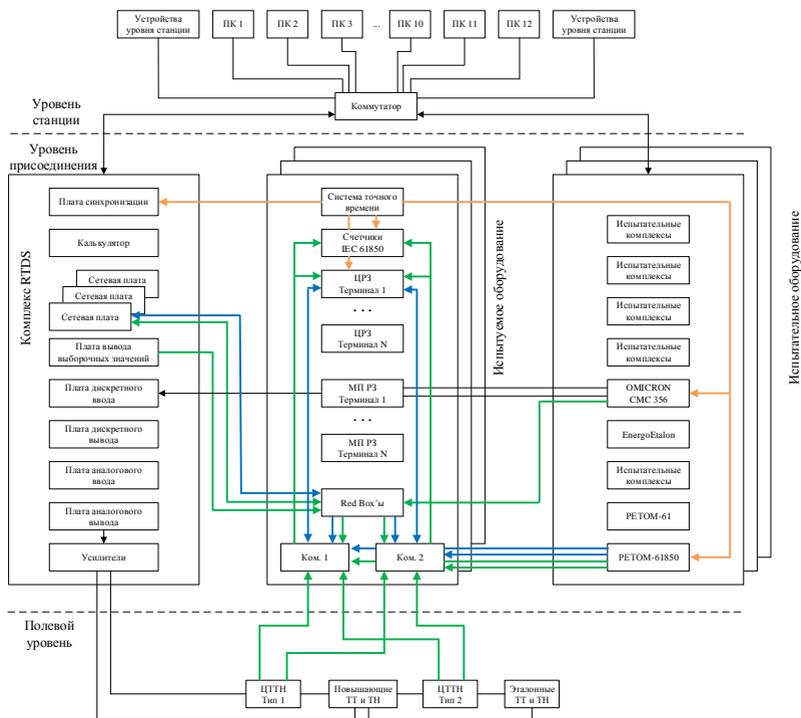


Рисунок. 1 Структурно-функциональная модель цифровой подстанции

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ФГБОУ ВО «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 «Мультифункциональная система на основе цифровых трансформаторов тока и напряжения для цифровой подстанции» (Соглашение №14.577.21.0276 о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57717X0276).

Литература

1. **Капанова Л.Д.** Цифровая экономика в России: состояние и перспективы развития. // Экономика и управление. Москва. №2 2018 г. С. 58-69
2. <http://digitalsubstation.com>.

УДК 621.314

А.В. Гусенков, к.т.н., В.Д. Лебедев, к.т.н., С.Н. Литвинов, С.А. Словесный, к.т.н.,
А.А. Яблоков, к.т.н.

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

Повышение надежности работы цифровых измерительных трансформаторов за счет мониторинга частичных разрядов при вводе и в процессе эксплуатации

Аннотация. В работе представлены результаты исследования в области частичных разрядов в инновационной разработке – цифровом измерительном трансформаторе. Показано, что использование системы мониторинга частичных разрядов позволит максимально быстро внедрять новые разработки в производство без снижения надежности в целом.

Ключевые слова: частичные разряды, цифровой измерительный трансформатор, «цифровая подстанция», математическое моделирование.

A.V. Gusenkov, Ph.D., V.D. Lebedev, Ph.D., S.N. Litvinov, S.A.
Slovesnyj, Ph.D., A.A. Yablokov, Ph.D.

Ivanovo State Power Engineering University
E-mail: vd_lebedev@mail.ru

Improving the reliability of digital instrument transformers by monitoring partial discharges during commissioning and in operation

Annotation. The paper presents the results of research in the field of partial discharges in an innovative solution - a digital instrument transformer. It is shown that the use of the partial discharges monitoring system will allow as quickly as possible to introduce new developments in operation without reducing the reliability as a whole.

Keywords: partial discharges, digital measuring transformer, "digital substation", mathematical modeling.

Состояние вопроса. В настоящее время в электроэнергетике активно применяются решения, которые основаны на масштабном использовании цифровых технологий. Речь идет о практической реализации концепции Smart Grid, которая включает в себя ряд тезисов по повышению автоматизации объектов электроэнергетики с целью повышения надежности их работы, обеспечения наилучших эксплуатационных характеристик и т.п. Эта концепция нашла отражение в так называемых «цифровых подстанциях» – объектах высокой автоматизации, на которых сигналы токов и напряжений в цифровых трансформаторах преобразуется в кодированный цифровой сигнал, содержащий информацию

о мгновенных значениях токов и напряжений. Данный сигнал затем используется в устройствах измерения, релейной защиты и автоматики, учета электроэнергии, определения показателей качества электроэнергии. Таким образом, наиболее ответственным звеном в преобразовательной цепи являются именно цифровые трансформаторы тока и напряжения. Цифровые трансформаторы тока и напряжения – новые устройства, не имеющие накопленного багажа длительной эксплуатации. Поэтому вопросам контроля их технического состояния следует уделять больше внимания при решении задач цифровизации энергетики. Разработка методов и средств контроля технического состояния отдельных узлов цифровых трансформаторов, в том числе изоляции, позволит повысить надежность функционирования объектов электроэнергетики в целом и трансформаторов в частности.

Для исследования процессов возникновения частичных разрядов [1,2] в цифровых трансформаторах использованы следующие материалы: масштабные физические модели преобразователей тока и напряжения цифровых трансформаторов, опытные образцы комбинированных цифровых трансформаторов тока и напряжения, высоковольтная испытательная установка, цифровой осциллограф, измерительные датчики. Регистрация частичных разрядов производилась дифференциальным методом [3]. Для математического моделирования индуктивных преобразователей использовался программный пакет COMSOL Multiphysics. Одна из схем замещения, отображающая контуры протекания импульсных токов при частичных разрядах, использованная в исследованиях, представлена на рис. 1.

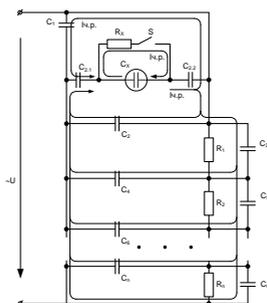


Рис. 1. Электрическая схема замещения первичных преобразователей цифровых измерительных трансформаторов, содержащих дефектный участок изоляции

В ходе исследований создана физическая модель для отработки методов регистрации частичных разрядов в цифровом измерительном трансформаторе тока и напряжения класса 6(10) кВ дифференциальным методом. На практике показана жизнеспособность метода контроля частичных разрядов с помощью индуктивного датчика, который является частью цифрового измерительного трансформатора. Показаны основные характеристики частичных разрядов, возникающих как внутри трансформатора, так и во внешних цепях.

Полученные данные свидетельствуют о возникновении частичных разрядов в случае, если в твердотельной изоляции цифровых измерительных трансформаторов присутствуют газовые включения, обуславливающие неоднородность электрического поля в дефектной зоне. Амплитуда высокочастотных импульсов напряжения, фиксируемых с помощью индуктивного датчика лежит в диапазоне 0,28-5,2 В при значениях приложенного к дефектной зоне напряжения 3-7 кВ. Существующая корреляция между приложенным напряжением и максимальным зарегистрированным значением высокочастотных импульсов напряжения говорит о тенденции роста максимального значения при росте напряжения. Полученные результаты устанавливают факт возможности регистрации частичных разрядов, встроенными индуктивными датчиками, с последующей реализацией метода определения состояния изоляции по характеристикам частичных разрядов. Таким образом, расширение функционала электронного (микропроцессорного) блока цифрового трансформатора с целью мониторинга состояния изоляции в режиме реального времени на основе обработки информации, поступающей с встроенного датчика частичных разрядов, позволяет повысить надежность цифрового трансформатора.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ФГБОУ ВО «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 «Мультифункциональная система на основе цифровых трансформаторов тока и напряжения для цифровой подстанции» (Соглашение №14.577.21.0276 о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проект) RFMEFI57717X0276).

Список литературы

1. **V. Vahidinasab, A. Mosallanejad, A. Gholami.** Partial Discharge Theory, Modeling and Applications To Electrical Machines. roc. of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Tenerife, Spain, December 16-18, 2005, pp. 130-135.
2. **Коробейников С.М., Вечёркин М.В.** Физика возникновения, характеристика и классификация частичных разрядов в высоковольтном оборудовании // Электротехнические системы и комплексы. – 2010. – №18. – С. 204-212.
3. **С.А. Словесный.** Применение мостовых схем для регистрации частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования // VI международная научно-практическая конференция «Повышение эффективности энергетического оборудования». – Иваново: ИГЭУ, 2011. – С.469-472.

А.Б. ГНАТЮК, к.т.н., доцент, Е.М.ВОТЯКОВА, аспирант
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: abg-07@mail.ru

Решение задачи многокритериального выбора технической компоновки цифровой подстанции с помощью прямого метода анализа иерархии

Аннотация: в современных условиях значительно повысилась необходимость технического перевооружения управления эклектическими подстанциями. В связи с этим определение наилучшего компоновочного состава цифровых подстанций из предлагаемых различными производителями вариантов является актуальной задачей многокритериального выбора из имеющихся альтернатив. Для решения задач многокритериального выбора применяются методы экспертных оценок, сочетающие опыт, знания, интуицию лиц, принимающих решение, и современные технологии автоматизированной поддержки принятия решений. Наиболее всего этим требованиям отвечает метод экспертных оценок – метод анализа иерархии (МАИ). Однако этот метод имеет ряд недостатков: большая трудоемкость процедуры попарных оценок, возможность несогласованности отдельных оценок, неравномерная дискретность шкалы оценок.

Ключевые слова: цифровая подстанция, многокритериальный выбор, метод анализа иерархии, прямой метод, линейная шкала оценок, сопоставимые группировки критериев, наращиваемый набор критериев.

A.B.GNATYUK Doctor of Engineering, assistant professor, E.M.VOTYAKOVA, post-graduate student
Ivanovo State Power Engineering University 153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34.
E-mail: abg-07@mail.ru

Solving multiple criteria selection problems for choosing digital substation components using direct analytic hierarchy process

Abstract: Nowadays necessity of technical upgrading of power substations supervision increased significantly. That is why actual problem of multiple-criteria selection among available alternatives is selection of components for digital substations among equipment produced by different companies. For solving of multiple-criteria selection problems different expert evaluation methods are used. They are based on experience, knowledge and intuition of the decision maker, and modern technologies of automated decision support system. The most convenient is expert evaluation method - analytic hierarchy process (AHP). However, the disadvantages of this method are: difficulty of pairwise comparisons, incoordination of separate evaluations, irregular sampling of rate scale.

Key words: digital substation, multiple criteria selection, analytic hierarchy process, direct method, linear scale of assessments, comparable criteria groups, extensible set of criteria.

В современных условиях экономики значительно повысилась необходимость технического перевооружения электросетевых компаний. Особенно это относится к средствам автоматического контроля и управления электроподстанциями. Эти средства достаточно хорошо разработаны и используются с самого начала создания и развития сетей электроснабжения. Более того, они постоянно улучшаются и модернизируются в соответствии с общим развитием науки и техники, превратившись на современном этапе в комплексные решения, получившие название – цифровая подстанция.

Цифровая подстанция - это объект нового типа, представляющий собой систему управления, которая обеспечивает эффективное использование информации о процессах на подстанции, повышает согласованности действия различных видов оборудования. Она состоит из интеллектуального первичного и вторичного оборудования, объединённого в сеть для обеспечения информационного обмена и взаимодействия. Такая подстанция оснащается комплексом цифровых устройств, обеспечивающих функционирование систем релейной защиты и автоматики, учета электроэнергии, АСУ ТП, регистрации аварийных событий и т.д.[1, 2, 3].

Однако в силу ряда экономических и организационных причин образовался существенный разрыв между современными потребностями в автоматизированных системах контроля и управления и теми возможностями, которые предлагает рынок в виде достаточно широкого набора технических и программных средств, на основе которых можно создать системы с требуемыми характеристиками. В связи с этим возникает необходимость определения состава оборудования (задача компоновки) таким образом, чтобы они отвечали существующим технологическим требованиям, российским и международным стандартам, ряду дополнительных условий при реализации конкретного проекта и критерию приемлемой стоимости. Эта проблема особенно остро стоит в условиях экономического кризиса и существующих на данный момент санкций, т.к. комплектующие цифровых подстанций первоначально представляли собой оборудование европейских фирм (Siemens, ABB и др.). В настоящее время осуществляется их импортозамещение на комплектующие российских и китайских производителей. Следовательно, определение наилучшего компоновочного состава цифровых подстанций из предлагаемых различными производителями вариантов является актуальной проблемой. Эта проблема связана с необходимостью решения двух взаимосвязанных задач: формирование системы показателей (критериев), на основе которых необходимо осуществлять выбор компоновочного состава цифровой подстанции, и определение метода многокритериальной оценки альтернатив.

Основу цифровой подстанции составляет автоматизированная система управления подстанцией (АСУ ТП ПС). Поэтому в первую очередь необходимо учитывать такие укрупненные требования, как возможность интеграции АСУ ТП уровня ПС; наличие функций мониторин-

га и управления режимами работы сети в текущих и аварийных ситуациях; обеспечение экономической целесообразности внедрения АСУ ТП на ПС. И свою очередь, каждый из этих критериев необходимо детализировать. Например, критерий возможность интеграции декомпозируется на следующие составляющие: открытость стандартов обмена данными; масштабируемость архитектура и многоплатформенность; использование единой информационной модели электрических сетей.

Таким образом, состав набора критериев сравнительной оценки альтернатив представляет многоуровневую иерархическую структуру, в которую входят технические, эксплуатационные и экономические показатели. Для решения задач такого многокритериального выбора наиболее подходит метод экспертных оценок – метод анализа иерархии (МАИ) [4, 5, 6].

Основные этапы МАИ заключаются в следующем:

- структуризация задачи в виде иерархи с несколькими уровнями: обобщающие критерии (требуемые показатели, характеристики, свойства); детализирующие критерии или параметры, которых может быть, в свою очередь, несколько уровней; сравниваемые альтернативы;

- попарное сравнение экспертами элементов каждого уровня на основе использования девятибалльной шкалы;

- вычисление коэффициентов веса (значимости) элементов каждого уровня.

- расчет результирующих показателей значимости (веса) каждой из альтернатив и их ранжирование по этим показателям.

Главным достоинством МАИ является наличие первого этапа, на котором производится декомпозиция сложной многокритериальной задачи выбора на систему значительно более простых, иерархически связанных между собой задач сравнения. Именно благодаря такому системному представлению задачи оценки альтернатив МАИ имеет значительные преимущества перед другими экспертными технологиями принятия решений. Этот этап является самым сложным, творческим и слабо формализуемым.

Следующие этапы МАИ являются достаточно формализованными. Именно их рассмотрению и посвящено большинство исследований, в которых, в основном, решаются задачи по уменьшению влияния ряда недостатков этого метода на качество многокритериального выбора: большая трудоемкость процедуры попарных оценок, возможность несогласованности (противоречивости) отдельных оценок между собой, неравномерная дискретность шкалы оценок.

Ниже рассмотрен принципиально новый способ прямого метода анализа иерархии, позволяющий устранить эти недостатки.

На рис. 1 представлен фрагмент иерархии критериев, по которым осуществляется отбор альтернативных решений. На рисунке обозначено:

К – критерий (показатель) предшествующего уровня;

$A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_{n-1}, A_n$ – детализирующие критерии (показатели).

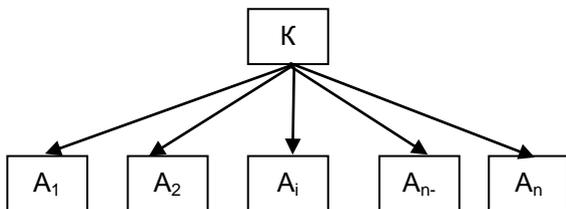


Рис. 1 Фрагмент иерархии критериев (показателей)

В соответствии с общепринятой методикой детализирующие критерии попарно сравниваются между собой [4, 5, 6], и из численных значений величин относительной значимости этих критериев формируется матрица **A** попарных или парных сравнений:

$$A = \begin{array}{c|ccccc} & A_1 & A_2 & A_i & A_n \\ \hline A_1 & a_{11} & a_{12} & a_{1i} & a_{1n} \\ \hline A_2 & a_{21} & a_{22} & a_{2i} & a_{2n} \\ \hline A_i & a_{i1} & a_{i2} & a_{ii} & a_{in} \\ \hline A_n & a_{n1} & a_{n2} & a_{ni} & a_{nn} \end{array}$$

Её элементы a_{ij} определяются по следующим правилам: если критерий A_i имеет вес или значимость w_i , а критерий A_j – вес, равный w_j в α раз больший или меньший, то

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} = \alpha, \quad (1)$$

где α - результат сравнения значимости критерия или показателя по девятибалльной шкале (1 - критерии или показатели равны по значимости, 2 - небольшое преимущество A_i перед A_j и т.д., 9 - подавляющее преимущество A_i перед A_j).

Из (1), очевидно, следует, что

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} = \frac{1}{\alpha}, \quad (2)$$

Если оценки обоих критериев или показателей равны, то

$$a_{ij} = 1, \quad (3)$$

Кроме того, $a_{ii} = 1$, т.к. отношение значимости (веса) i -того критерия к самому себе равно 1.

Из (2) и (3) следует, что диагональные элементы матрицы **A** равны единице, а поддиагональные – обратным по величине соответствующим наддиагональным элементам.

После представления количественных суждений о парах (A_i, A_j) в числовом выражении через a_{ij} задача сводится к тому, чтобы определить множество числовых коэффициентов относительных весов w_1, w_2, \dots, w_n , показателей или критериев A_1, A_2, \dots, A_n , которые соответство-

вали бы зафиксированным суждениям. Не сложно доказать, что w_1, w_2, \dots, w_n являются составляющими максимального собственного вектора матрицы \mathbf{A} [4].

Для формирования матрицы \mathbf{A} размерностью $n \times n$ необходимо $\frac{n(n-1)}{2}$ попарных сравнений критериев или показателей. Из этого

следует, что общее количество попарных сравнений, которое требуется провести для всей иерархии показателей, значительно возрастает при увеличении n . Например, если $n = 3$, то количество необходимых сравнений равно тоже 3, а если $n = 4$, то попарных сравнений необходимо уже 6 и т.д. Для иерархии древовидной структуры, имеющей r уровней, с одинаковыми коэффициентами ветвления, равными n , количество требуемых сравнений будет определяться выражением:

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \cdot \frac{n^{r-1} - 1}{n-1} = \frac{n(n^{r-1} - 1)}{2}. \quad (4)$$

На нижнем уровне иерархии число показателей, по которым должны оцениваться альтернативы будет:

$$m = n^{r-1}.$$

Следовательно, если количество альтернатив равно d , то число попарных сравнений для оценки альтернатив будет определяться выражением:

$$M = \frac{n^{r-1}(n^{r-1} - 1)}{2} d \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует, что общее количество требуемых попарных сравнений

$$K = M + N = \frac{n(n^{r-1} - 1)}{2} (n^{r-2}d + 1). \quad (6)$$

Этим определяется большая трудоемкость процедуры попарных оценок. Например, при $r=3, n=3$ и $d=3$ из (6) получается, что $K = 120$. Из этого следует другая проблема, заключающаяся в том, что при большом количестве операций попарных сравнений неизбежно возникает несогласованность (противоречивость) в суждениях экспертов.

Строгая или кардинальная согласованность оценок между собой определяется очевидным соотношением:

$$a_{ik} a_{kj} = \frac{w_i}{w_k} \frac{w_k}{w_j} = a_{ij} \quad (7)$$

Суждения экспертов в большинстве случаев не дают строгого соотношения (7), что может привести в итоге к некорректной оценке альтернатив. Для контроля непротиворечивости экспертных оценок Т.Саати [4] предложил использовать индекс согласованности каждой матрицы \mathbf{A} :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение матрицы **A**.

Матрица **A** считается приемлемо согласованной, если выражение (8) дает значение индекса не более 0,1. Однако это положение строго не доказано. Численные эксперименты показывают, что соблюдение условия $CI \leq 0,1$ гарантирует лишь транзитивность оценок и не гарантирует допустимых количественных погрешностей в оценках. При не соблюдении условия согласованности требуется заново корректировать попарные оценки, что ещё более увеличивает трудоемкость процесса. Поэтому такие корректировки часто сводятся к процессу числовых подгонок. Это порождает во многих случаях сомнения в правильности результатов, приводимых в различных публикациях.

Для устранения этого существенного недостатка МАИ ряд авторов предлагает ограничиться только $n - 1$ попарными сравнениями, составляющими первую строку матрицы **A** (сравнение «по образцу»), а остальные элементы получать, используя зависимость (7), расчетным путем [7,8].

Наглядное графическое представление этой процедуры попарных сравнений дано в [6]. Пример аналогичного графического изображения попарного сравнения «по образцу» в общем виде представлена на рис.2.

Очевидно, что согласованность матрицы в этом случае получается автоматически. Однако такая последовательность сравнения показателей или критериев не всегда целесообразна.

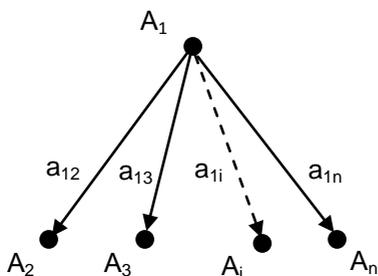


Рис. 2 Попарное сравнение «по образцу»

Например, необходимо сравнить такие показатели технической комплектации цифровой подстанции: «габариты», «масса», «полнота функциональных возможностей», «цена». Пары «габариты – цена» и «масса – цена» слабо коррелированы. Более уместным является парное сравнение «полнота функциональных возможностей – цена». В подобных случаях более подходит последовательное сравнение – «по соседству», составляющих наддиагональные элементы матрицы **A**.

Воспользуемся также методом наглядного графического представления (см. [6]) этой процедуры попарных сравнений в общем виде (рис.3).

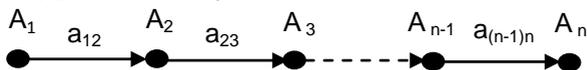


Рис. 3 Попарное последовательное сравнение

В случаях попарного сравнения «по образцу» или «по соседству» количество требуемых сравнений для определения весовых коэффициентов будет определяться выражением:

$$N = (n - 1) \cdot \frac{n^{r-1} - 1}{n - 1} = n^{r-1} - 1 \quad (9)$$

Число попарных сравнений для оценки альтернатив, соответственно, будет равно

$$M = (n^{r-1} - 1)d \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует, что общее количество требуемых попарных сравнений

$$K = M + N = (n^{r-1} - 1)(d + 1) \quad (11)$$

Из сопоставления выражений (8) и (11) следует, что требуемое количество попарных сравнений значительно сокращается. Например, при $r=3$, $n=3$ и $d=3$ из (11) получается, что $K = 32$, т.е. почти в 4 раза меньше, чем при полном наборе попарных сравнений.

Определенным недостатком данного способа по сравнению с полным набором попарных сравнений является то, что эти сравнения осуществляется однократно, что может привести к увеличению субъективных ошибок в экспертных оценках. Компромиссным решением является объединение попарных сравнений «по образцу» с последовательным сравнением. Используя методику графического представления, приведенную в [6], на рис.4 представлена в общем виде объединенная процедура попарных сравнений «по образцу» с последовательными попарными сравнениям.

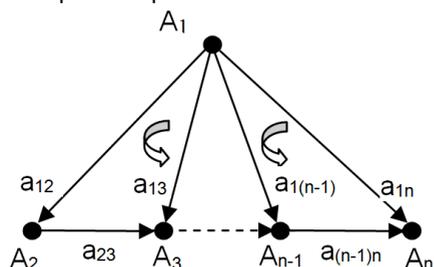


Рис. 4 Объединенное попарное сравнение «по соседству» и «по образцу»

В этом случае увеличение количества необходимых парных оценок происходит в 2 раза

$$K = 2(n^{r-1} - 1)(d + 1), \quad (12)$$

что часто является вполне приемлимым, но при этом возникает проблема согласования парных оценок без использования матрицы **A**. Для этого необходимо использовать выражение (7). Однако оно является излишне радикальным. В связи с этим в [6] предложено ввести допуск на нечеткость экспертных оценок. С этой целью выражение (7) представляется в следующем виде:

$$a_{ik} a_{kj} = a_{ij} \pm e \quad (13)$$

Выражение (13) дает возможность определить допустимый интервал нечеткости оценок (суждений). Числовые примеры показывают, что при $e = 1$ нечеткость оценок является допустимой. При большем интервале нечеткости необходима коррекция одной из оценок. При этом итоговый контроль согласованности оценок можно проводить, используя индекс (8) матрицы **A**, сформированной с помощью соотношений (3) и (7) из попарных сравнений «по образцу» и/или «по соседству».

Однако остается ряд проблем, связанных с неравномерной дискретностью шкалы парных оценок, с формированием наиболее сопоставимых для сравнения группировок критериев и альтернатив, с оценкой альтернатив поэтапным наращиванием набора показателей и критериев.

Для наиболее простого случая, когда попарно оцениваются только два критерия или показателя, отношение (1)

$$a_{12} = \frac{w_1}{w_2} = \alpha \quad (14)$$

должно удовлетворять правилу нормализации:

$$w_1 + w_2 = \frac{\alpha}{\alpha + 1} + \frac{1}{\alpha + 1} = 1 \quad (15)$$

или

$$w_1 \% + w_2 \% = 100 \quad (16)$$

Справедливость выражения (15) вытекает из (14).

Изменение на единицу попарного сравнения (14) дает следующее изменение приращения коэффициента веса (значимости):

$$\Delta w_1 = w_1(\alpha) - w_1(\alpha + 1) \quad (17)$$

Из (17) следует, что недостатком используемой девятибалльной шкалы является, как уже отмечалось, ее дискретность, которая дает неравномерность в оценках соотношений (15) и (16). При малых величинах α это изменение максимально. Например, при $\alpha = 1$ $\Delta w_1 = w_1(1) - w_1(1 + 1) = 0,5 - 0,666 = -0,166$.

При больших величинах α (например, $\alpha = 8$) это изменение минимально:

$$\Delta w_1 = w_1(8) - w_1(8+1) = 0,888 - 0,9 = -0,012.$$

Поэтому целесообразно перейти от определения отношения значимости (весов), на основе чего построены все известные методики анализа иерархии [4, 5, 6], к прямому определению соотношения (15) или (16). В этом случае шкала попарных отношений заменяется на линейную шкалу парных соотношений. Как показывают исследования, психологически минимальный шаг такой шкалы составляет 0,05 или 5%, хотя нет никаких ограничений на изменение величин оценок и с меньшим шагом, например, в 1%.

Шкала перевода качественных экспертных парных оценок соотношения (15) и (16) в цифровой вид приведена в Таблице 1.

Таблица

1.

Цифровая шкала качественных экспертных парных оценок

Цифровая оценка парного соотношения A_1 и A_2		Определение
в частях	в %	
0,5; 0,5	50; 50	Одинаковая значимость (вес) показателей или критериев A_1 и A_2
0,6; 0,4	60; 40	Некоторое преобладание значимости (веса) параметра (критерия) A_1 , по сравнению с A_2 (слабое превосходство)
0,7; 0,3	70; 30	Существенное или сильное преобладание значимости (веса) A_1 по сравнению с A_2
0,8; 0,2	80; 20	Очень сильная или очевидная значимость (весомость) A_1 по сравнению с A_2
0,9; 0,1	90; 10	Абсолютная значимость (весомость) A_1 по сравнению с A_2
0,55; 0,65; 0,95	55; 65;...95	Промежуточные значения между соседними значениями шкалы

Данная линейная шкала удобней в применении и дает значительно меньше отклонений в согласованности экспертных оценок.

Прямой метод оценок, основанный на использовании аддитивного соотношения значений весов, состоит в следующем. При сравнении «по образцу» n критериев A_1, A_2, \dots, A_n экспертно формируются соотношения (15) или (16) с использованием линейной шкалы (Таблицы 1):

$$w_1^{(1)} + w_2 = 1;$$

.....

$$w_1^{(i)} + w_{i+1} = 1; \quad (18)$$

.....

$$w_1^{(n-1)} + w_n = 1$$

Из соотношений аддитивных оценок весовых коэффициентов (18) определяются переходные попарные отношения весовых коэффициентов:

$$a_{12} = \frac{w_1^{(1)}}{w_2}; \quad a_{13} = \frac{w_1^{(2)}}{w_3}; \dots \quad a_{1n} = \frac{w_1^{(n-1)}}{w_n} \quad (19)$$

В соответствии с правилом нормализации должно соблюдаться следующее равенство:

$$w_1^{(n)} + w_2^{(n)} + \dots + w_i^{(n)} + \dots + w_{n-1}^{(n)} + w_n^{(n)} = 1 \quad (20)$$

или

$$w_1^{(2)} (1 + a_{21} + \dots + a_{i1} + \dots + a_{n1}) = 1, \quad (21)$$

где в соответствии с (2)

$$a_{21} = \frac{1}{a_{12}}; \dots \quad a_{i1} = \frac{1}{a_{1i}}; \dots \quad a_{n1} = \frac{1}{a_{1n}}. \quad (22)$$

Из (21) и (22) следует, что

$$w_1^{(n)} = \frac{1}{1 + a_{21} + \dots + a_{i1} + \dots + a_{n1}}. \quad (23)$$

Остальные весовые коэффициенты определяются, как

$$w_2^{(n)} = a_{21} w_1^{(n)}; \dots \quad w_n^{(n)} = a_{n1} w_1^{(n)} \quad (24)$$

При использовании сравнений «по соседству» экспертно формируются следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
w_1^{(1)} + w_2 &= 1; \\
\dots\dots\dots \\
w_1^{(i)} + w_{i+1} &= 1; \\
\dots\dots\dots \\
w_{n-1}^{(n-1)} + w_n &= 1.
\end{aligned}
\tag{25}$$

Из аддитивного соотношения весовых коэффициентов (25) определяются следующие переходные попарные отношения:

$$a_{21} = \frac{w_2}{w_1^{(1)}}; \quad a_{32} = \frac{w_3}{w_2^{(2)}}; \quad a_{n(n-1)} = \frac{w_n}{w_{n-1}^{(n-1)}}. \tag{26}$$

Используя зависимость (7), на следующем шаге вычисляются отношения «по образцу»:

$$a_{i1} = a_{i(i-1)} \cdot a_{(i-1)(i-2)} \cdot \dots \cdot a_{(i-n+2)(i-n+1)}, \tag{27}$$

где $i = 2, \dots, n$

Далее с помощью выражений (23) и (24) определяется весовые коэффициенты.

Таким образом, пропорциональная шкала и выражения (18) – (27) делают возможным получать согласованные значения весовых коэффициентов сравниваемых показателей, критериев, и альтернатив, не прибегая к формированию матрицы парных сравнений **A**, что значительно упрощает процедуру МАИ.

Данный прямой метод позволяет перейти к одновременному сравнению большего количества критериев или показателей. Наиболее просто экспертами находится соотношение коэффициентов веса одновременно трех показателей или критериев:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1. \tag{28}$$

В этом случае набор возможных соотношений весовых коэффициентов значительно расширяется. Например, возможны соотношения $0,5+0,3+0,2=1$; $0,7+0,2+0,1=1$ и т.д.

Если количество критериев $n=4$, то их одновременное сравнение становится психологически затруднительным. В этом случае выражение (28) дополняется экспертной оценкой парного соотношения:

$$w_1^{(1)} + w_4 = 1. \tag{29}$$

Объединение зависимостей (28) и (29) производится путем определения попарного отношения:

$$a_{41} = \frac{w_4}{w_1^{(1)}}.$$

Затем используются выражение (23)

$$w_1^{(2)} = \frac{1}{1 + a_{11} + a_{21} + a_{31}}$$

и выражение (24)

$$w_2^{(2)} = a_{21}w_1^{(2)}; w_3^{(2)} = a_{31}w_1^{(2)}; w_4^{(2)} = a_{31}w_1^{(2)}.$$

Аналогично осуществляется определение коэффициентов веса произвольного количества критериев или показателей путем их группировки на пересекающиеся соотношения вида (28) и (29). Например, при сравнении пяти параметров или критериев их можно сгруппировать в две пересекающиеся тройки:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \text{ и } w_1^{(1)} + w_4 + w_5 = 1.$$

Дальнейшая процедура определения весовых коэффициентов производится рассмотренным способом.

Прямо метод МАИ автоматически решает проблему оценки динамических наборов альтернатив или критериев (см. [7, 9]). Эта проблема связана с тем, что последовательность предпочтений, определенных на всем наборе критериев или альтернатив, может отличаться от последовательности предпочтений, определенной на части этих критериев или альтернатив.

Применяя предлагаемый метод можно, например, сначала ранжировать альтернативы по техническим характеристикам, на следующем этапе выбрать наилучший вариант, исходя из капитальных и эксплуатационных затрат, а затем их объединить, т.е. можно поэтапно решать проблему выбора по критериям «цена-качество».

Заключение. Набора критериев сравнительной оценки альтернатив технической компоновки цифровой подстанции представляет многоуровневую иерархическую структуру, в которую входят технические, эксплуатационные и экономические показатели, такие, как возможность интеграции АСУ ТП подстанции; наличие функций мониторинга и управления режимами работы сети; обеспечение экономической целесообразности внедрения цифровой подстанции. Поэтому для выбора альтернатив наиболее подходит метод анализа иерархии

Предлагается прямой метод анализа иерархии, который даёт следующие преимущества: значительно сокращается количество операций экспертных оценок; применяется линейная шкала оценок с малым шагом дискретности; обеспечивается лучшая согласованность экспертных оценок; появляется возможность формирования наиболее удобных для сравнения групп критериев и альтернатив; решается проблема оценки динамических наборов альтернатив и критериев. Поэтому данный метод наиболее целесообразно использовать для определения технической компоновки цифровых подстанций.

Литература

1. Цифровая подстанция // Электронный журнал. URL: <http://digitalsubstation.ru/> (дата обращения 20.12.2015).
2. Многофункциональные, многотарифные электронные счетчики электроэнергии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gosan.ru> (дата обращения 20.12.2015).
3. Alstom в России [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alstom.com> (дата обращения 20.12.2015).
4. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
5. Староверов Б.А., Малков А.В. Методика определения приоритетности функций АСКУЭ исходя из оценки рисков // Вестник ИГЭУ. Вып. 4, Иваново, 2007 г., с. 92-94
6. Огурцов А.Н., Староверова Н.А. Алгоритм повышения согласованности экспертных оценок в методе анализа иерархии // Вестник ИГЭУ. Вып. 5, Иваново, 2007 г., с. 71-79
7. Ногин В.Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2004, т. 44, №7, с. 1261–1270.
8. Трофимец В.Я. К вопросу разработки вспомогательных вычислительных процедур метода анализа иерархий // Электронный журнал "Исследовано в России", 79, 2004, стр. 864-872, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/079.pdf> (дата обращения 20.12.2015).
9. Колесникова С.И. Модификация метода анализа иерархии для динамических наборов альтернатив // Прикладная дискретная математика 2009. №4, с. 102-109

Разработка комплексного алгоритма, имитирующего функционирование устройства синхронизированных векторных измерений

Аннотация: осуществлено всестороннее исследование типовых методов цифровой обработки сигналов, используемых в устройствах синхронизированных векторных измерений, на основе чего разработан и успешно верифицирован оригинальный алгоритм, имитирующий функционирование устройства векторных измерений.

Ключевые слова: дискретное преобразование Фурье, синхронизированные векторные измерения, синхрофазор, скорость изменения частоты, цифровая обработка сигналов, частота.

Igor Ivanov, assistant professor

Ivanovo State Power Engineering University

34 Rabfakovskaya St., Ivanovo, 153003 Russian Federation

Email: iivanov@mtu.edu

Implementation of an integrated algorithm simulating the operation of a phasor measurement unit

Abstract: typical digital signal processing techniques used in phasor measurement units (widely known as PMUs) have been thoroughly analyzed, and a new algorithm simulating the PMU operation has been developed and tested successfully.

Key words: digital signal processing, discrete Fourier transform, frequency, rate of change of frequency, synchronized phasor measurements, synchrophasor.

Введение. Технология синхронизированных векторных измерений (СВИ) напряжений и токов развивается с 80-х гг. прошлого столетия [1]. В настоящее время количество устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ), устанавливаемых в электроэнергетических системах (ЭЭС), неуклонно увеличивается [2]. По состоянию на июнь 2015 г. в Российской Федерации внедрено около четырехсот подобных устройств [3], а в Северной Америке общее количество УСВИ в 2015 г. составляло около 2000 [4]. Наличие точно синхронизированных комплексных значений токов и напряжений – *синхрофазоров* – потенциально может использоваться для решения многих задач электроэнергетики, в частности, следующих [2, 5, 6]:

- визуализация режимных параметров;
- определение фактических параметров схем замещения элементов ЭЭС;
- оценка состояния режима электрической сети;
- выявление межзональных низкочастотных колебаний;

- послеаварийный анализ предшествующего режима ЭЭС.

Сетевые компании выражают заинтересованность в решении прикладных задач на базе СВИ [7], а мнение о том, что функция СВИ станет повсеместно интегрироваться в цифровые устройства релейной защиты, было высказано более десяти лет назад [8]. Очевидно, что возможность реализации приложений на основе СВИ во многом определяется качеством данных, предоставляемых УСВИ. При этом стандарт [9], посвященный векторным измерениям, практически не регламентирует, какие алгоритмы обработки мгновенных значений напряжений и токов должны применяться в УСВИ для получения необходимых выходных данных. Производители коммерческих УСВИ не раскрывают в полном объеме технические особенности своих решений, что вполне объяснимо. В то же время точность ряда коммерческих УСВИ не удовлетворяет требованиям стандарта, что было выявлено в ходе сравнительного тестирования [10].

Отмеченные обстоятельства обуславливают **актуальность** изучения, сопоставления и модификации различных методик определения значений параметров, требуемых стандартом [9]: синхрофазоров, частоты и скорости изменения частоты. Таким образом, **основная цель работы** – исследование типовых методов цифровой обработки сигналов, применяемых в УСВИ, а также создание и тестирование комплексного алгоритма, имитирующего функционирование УСВИ.

Основными **методами исследования** являются математическое моделирование с применением «*MATLAB*» для реализации в программном коде и тестирования разрабатываемых алгоритмов, а также физико-математическое моделирование на испытательном стенде с использованием современного оборудования (такого как универсальный испытательный комплекс «*OMICRON CMC 356*») и специализированного программного обеспечения (в частности, «*Wireshark*» и «*PMU Connection Tester*»).

Практическая ценность работы существенно подкрепляется тем, что в ИГЭУ разрабатываются измерительные преобразователи напряжения и тока с цифровым интерфейсом. Учитывая, что стандарт *IEEE C37.118*, посвященный СВИ, становится одним из стандартов «де-факто» в электроэнергетике, целесообразной представляется реализация в этом цифровом интерфейсе функции СВИ.

Исследование и модификация алгоритмов вычисления синхрофазоров. Основным параметром, рассчитываемый УСВИ, – синхрофазор – может быть определен с помощью различных методов, например, нелинейной регрессии [1], однако наиболее распространенным вариантом можно считать различные версии **дискретного преобразования Фурье (ДПФ)**. Одной из типовых форм записи ДПФ является следующая:

$$\underline{X} = \frac{\sqrt{2}}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} n}, \quad (1)$$

где \underline{X} – рассчитанное комплексное значение напряжения или тока, которое будем условно отождествлять с синхрофазором; N – количество дискретных отсчетов (выборок) сигнала за период промышленной частоты (50 Гц); x_n и n – численное значение и номер выборки соответственно.

ДПФ в форме (1) является *нецентрированным* и *нерекурсивным*. Первое определение означает то, что фаза сигнала рассчитывается на начало (а не на центр) окна данных, содержащего дискретные отсчеты сигнала, а второе отражает тот факт, что каждый последующий синхрофазор вычисляется из нового окна данных.

В алгоритме *рекурсивного ДПФ* при вычислении каждого нового комплексного значения используется информация о соответствующем предыдущем значении [1]. Этот вариант ДПФ является более эффективным с вычислительной точки зрения, но имеет и существенный недостаток: погрешность расчета очередного синхрофазора отразится и на многих последующих вычислениях [1, 11].

Центрированное ДПФ, в отличие от рассмотренного выше нецентрированного, обеспечивает расчет фазы сигнала непосредственно на центр окна данных, содержащего оцифрованные мгновенные значения сигнала [12]:

$$\underline{X} = \frac{\sqrt{2}}{N} \cdot \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} x \left[\Delta t \left(k + \frac{1}{2} \right) \right] \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} \left(k + \frac{1}{2} \right)}, \quad (2)$$

где Δt – интервал дискретизации, а количество выборок N предполагается четным.

Центрированное ДПФ, как и нецентрированное, может быть *нерекурсивным* или *рекурсивным*. Учитывая отмеченный выше недостаток рекурсивного ДПФ, в качестве основного варианта вычисления синхрофазоров было принято *нерекурсивное центрированное ДПФ*. Фазовый угол по стандарту [9] должен определяться относительно соответствующего угла для сигнала на частоте 50 Гц, поэтому при использовании *нерекурсивного* алгоритма, очевидно, должен осуществляться «поворот фазы назад» посредством домножения очередного синхрофазора с номером m на $e^{-j \cdot \Delta t \cdot \omega_0 \cdot m}$, где $\omega_0 = 2\pi f_0$ – номинальная угловая частота. Таким образом, **окончательное принятое нами выражение можно записать в следующем виде** (в предположении, что при $m=0$ временная метка центра окна данных совпадает с меткой времени GPS/ГЛОНАСС):

$$\underline{X}(m) = \frac{\sqrt{2}}{N} \cdot \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} x \left[\Delta t \left(k + \frac{1}{2} \right) \right] \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} \left(k + \frac{1}{2} \right)} \cdot e^{-j \cdot \Delta t \cdot \omega_0 \cdot m}. \quad (3)$$

Амплитуда и фаза синусоиды, рассчитанные по выражению (3), оказываются определенными без погрешностей только для сигнала на номинальной частоте (поскольку количество выборок на период и интервал дискретизации подстроены под пятидесятигерцовый сигнал). Это определяет необходимость восстановления корректных значений синхрофазоров на основе информации о реальной частоте сигнала. В ходе исследования **были выведены следующие аналитические соотношения, связывающие «эталонное» и рассчитанное значения синхрофазора:**

$$\hat{X} = A \cdot \underline{X}_{true} + B \cdot \underline{X}_{true}^* \cdot e^{-2j\omega_0 \cdot \Delta t \cdot m}; \quad (4)$$

$$A = \frac{\sin\left(\pi \cdot \left(\frac{f}{f_{nom}} - 1\right)\right)}{N \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N} \cdot \left(\frac{f}{f_{nom}} - 1\right)\right)}; \quad (5)$$

$$B = \frac{\sin\left(\pi \cdot \left(\frac{f}{f_{nom}} - 1\right)\right)}{N \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} + \frac{\pi}{N} \cdot \left(\frac{f}{f_{nom}} - 1\right)\right)}, \quad (6)$$

где \hat{X} – рассчитанное значение синхрофазора; \underline{X}_{true} – искомое «истинное» значение синхрофазора; \underline{X}_{true}^* – комплексно-сопряженное значение по отношению к \underline{X}_{true} ; f и f_{nom} – значения реальной и номинальной частот соответственно.

Предположим, что нам известно актуальное значение частоты сигнала f . Тогда, разделив уравнение (4) на вещественную и мнимую части и решая систему из двух уравнений, можно легко восстановить «истинное» значение синхрофазора. **Предлагаемый оригинальный алгоритм восстановления корректных значений синхрофазоров был протестирован в «MATLAB» и показал стопроцентную работоспособность для синусоидальных сигналов на произвольной частоте, не равной 50 Гц.**

Информация о реальной текущей частоте f необходима не только для вычисления коэффициентов A и B в выражениях (5) и (6) с целью корректировки значений синхрофазоров, но также и для удовлетворения требования стандарта [9], согласно которому УСВИ обязано рассчитывать и передавать на верхний уровень иерархии значения синхрофазоров, частоты и скорости изменения частоты.

Исследование и модификация методов оценивания частоты и скорости изменения частоты. В настоящем исследовании были подробно изучены, запрограммированы на языке «MATLAB» и протестированы на типовых моделях сигналов четыре различных алгоритма

(табл. 1). Отметим, что все рассмотренные алгоритмы, за исключением алгоритма по переходам сигнала через «нуль», предполагают одно-временное оценивание как частоты, так и скорости ее изменения.

Таблица 1. Алгоритмы оценивания частоты и скорости изменения частоты сигнала, изученные в ходе исследования

Принцип функционирования алгоритма	Название алгоритма	Оценивается ли скорость изменения частоты?	Литературный источник
По мгновенным значениям (дискретным отсчетам) сигнала	По переходам сигнала через «нуль»	Нет	[13]
	Нелинейная регрессия	Да	[1]
По значениям фазовых углов синхрофазоров	Линейная регрессия	Да	[1]
	По производным фазового угла синхрофазора	Да	[14]

Результаты проведенных вычислительных экспериментов позволили сделать вывод о том, что **алгоритм линейной регрессии обеспечивает наилучшие результаты, поэтому он был выбран в качестве основного**. Идея алгоритма основана на аппроксимации изменения фазового угла синхрофазора полиномом второй степени $\varphi(t)$, коэффициенты которого a_0 , a_1 и a_2 содержат информацию о частоте сигнала и скорости ее изменения:

$$\varphi(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2; \quad (7)$$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + 2\pi \cdot (\Delta f_0 - f' \cdot t_0) \cdot t + \pi \cdot f' \cdot t^2, \quad (8)$$

где $\varphi_0 = \varphi(0)$; Δf_0 – отклонение частоты от номинальной в момент времени $t = t_0$; f' – скорость изменения частоты.

Для оценки неизвестных используется *линейный метод наименьших квадратов*. Размер окна данных (содержащего совокупность фазовых углов синхрофазоров) должен составлять несколько периодов изменения сигнала (но не более 5–6). В нашем случае используется окно размером в четыре периода (количество фазовых углов равно $4N + 1$), центр которого соответствует моменту времени $t = t_0$.

Корректное функционирование алгоритма линейной регрессии предполагает монотонное изменение фазового угла в пределах рассматриваемого окна данных. В связи с этим необходимо, во-первых, устранить скачкообразные изменения углов в районе $\pm 180^\circ$, а во-вторых, обеспечить максимальное сглаживание «колебаний» рассчитанных значений углов. Для решения этих задач были разработаны отдельные подпрограммы.

Разработка и тестирование комплексного алгоритма, имитирующего функционирование УСВИ. Совокупность разработанных и детально проанализированных методов и алгоритмов, часть из которых кратко описана в предыдущих разделах статьи, позволила *составить и реализовать в программном коде на языке «MATLAB» комплексный алгоритм, имитирующий функционирование УСВИ* (в части формирования выходных величин, определяемых стандартом [9]). Основная сложность заключалась в том, что в реальных условиях дискретные отсчеты сигнала доступны не одновременно, но «порциями», поэтому алгоритмизация итеративной обработки этих отсчетов требует тщательного предварительного анализа.

Часть дискретных отсчетов, необходимых для вычисления очередного синхрофазора, может оказаться недоступной (данные из «будущего»), что определяет необходимость организации буфера для хранения выборок, присоединяемых впоследствии к данным из «будущего». Оценивание частоты сигнала на основе метода линейной регрессии требует достаточно длинного (в несколько периодов основной гармоники) окна данных, образованного последовательно рассчитанными с помощью ДПФ фазовыми углами синхрофазоров. Недостаток «порции» синхрофазоров для формирования очередного окна данных является основанием для организации отдельного буфера синхрофазоров.

Отмеченные выше практические соображения, а также ряд других, были учтены при разработке комплексного алгоритма, имитирующего функционирование УСВИ. Таким образом, алгоритм, упрощенная блок-схема которого представлена на рис. 1, является не «статическим», а как бы имитирует этапы обработки очередной «порции» дискретных значений сигнала в «динамике». Алгоритм объединяет несколько файлов-подпрограмм и в настоящий момент состоит более чем из 2000 строк кода на языке «MATLAB».

В начале алгоритма в общем случае выполняется оцифровка сигнала с большой частотой, за которой следуют низкочастотная фильтрация и прореживание сигнала (рис. 1). Далее производится расчет синхрофазоров при помощи указанных выше методов (предпочтительные варианты выделены жирным шрифтом). На следующем шаге осуществляется оценивание частоты и скорости ее изменения, после чего производится корректировка значений синхрофазоров. Наконец, формируются выходные данные с требуемой дискретностью.



Рисунок 1. **Блок-схема комплексного алгоритма, имитирующего функционирование УСВИ**

С целью верификации разработанного комплексного алгоритма была осуществлена серия вычислительных экспериментов с различными моделями тестовых сигналов. На рис. 2 в качестве примера представлены результаты тестирования алгоритма на модели синусоидального сигнала с частотой 52 Гц и «шумом» со среднеквадратическим отклонением в 1 % амплитуды сигнала. Очевидно, что даже при наличии «шума» значения частоты сигнала и скорости ее изменения, рассчитанные алгоритмом, в целом практически не выходят за пределы, регламентированные стандартом [9] («Лимиты» на рис. 2), а величина *полной векторной погрешности* («total vector error», или «TVE») существенно ниже «порога» в 1 %, определенного для «стационарных» тестовых сигналов, описанных в [9].

Таким образом, можно заключить, что **предложенный комплексный алгоритм в целом справляется с возложенными на него задачами, в связи с чем перспективной представляется его доработка и реализация на аппаратной платформе.**

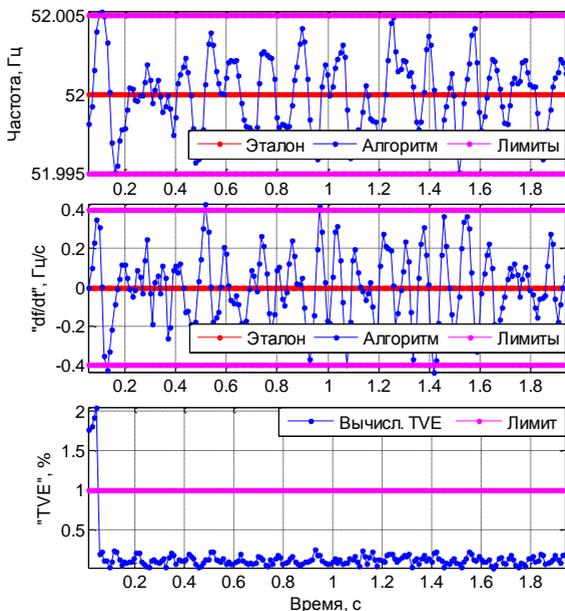


Рисунок 2. Некоторые результаты тестирования комплексного алгоритма на модели синусоидального сигнала с частотой 52 Гц и «шумом» в 1 %

Заключение. Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

- изучены типовые методы цифровой обработки сигналов, используемые в УСВИ для определения параметров, регламентируемых стандартом *IEEE C37.118.1-2011*, и выяснено, что использование стандартного ДПФ, настроенного на работу с пятидесятигерцевым сигналом, может приводить к значительным погрешностям расчета синхрофазоров;
- выведено аналитическое выражение, связывающее «эталонное» и расчетное значения синхрофазора при использовании централизованного ДПФ, а также разработан и протестирован алгоритм восстановления корректных значений синхрофазоров на основе информации о фактической частоте сигнала;
- протестировано несколько методик отслеживания частоты сигнала. В качестве предпочтительного варианта выбран алгоритм линейной регрессии, использующий информацию об изменении фазовых углов синхрофазоров;
- разработан, реализован в программном коде на языке «*MATLAB*» и успешно верифицирован комплексный алгоритм, имитирующий функционирование УСВИ в части формирования выходных величин, определяемых стандартом [9].

Дальнейшее направление исследований должно быть связано с разработкой, аппаратной реализацией и всесторонним тестированием созданного комплексного алгоритма, реализующего функцию СВИ.

Литература

1. **A.G. Phadke and J.S. Thorp**, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. Springer, 2008.
2. **S. Chakrabarti, E. Kyriakides, T. Bi, D. Cai, and V. Terzija**, "Measurements get together," IEEE Power and Energy Magazine, Jan.-Feb. 2009. Reprinted in Special Issue: Smart Grid-Putting it All Together, a 2010 reprint journal from PES, pp. 15-23.
3. **Жуков А.В., Сацук Е.И., Дубинин Д.М., Опалев О.Л., Уткин Д.Н.** Опыт разработки, внедрения и эксплуатации системы мониторинга переходных режимов в ЕЭС России // Сборник докладов 5-й Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Сочи, 2015.
4. **NASPI 2014 Survey of Synchrophasor System Networks – Results and Findings, NASPI Technical Report.** NASPI Data and Network Management Task Team, Network Systems Group, July 2015.
5. **Небера А.А.** Прикладные вопросы применения векторных измерений параметров электрического режима // Сборник докладов 3-й Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Санкт-Петербург, 2011.
6. **E.O. Schweitzer and D.E. Whitehead**, "Real-world synchrophasor solutions," in Proc. 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, March 30-April 2, 2009.
7. **Объединенный семинар исследовательских комитетов В5 и D2 РНК СИГРЕ /** Российский национальный комитет СИГРЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cigre.ru/news/industry/2149/>, свободный (20.12.2016).
8. **M. Adamiak and B. Kasztenny**, "Implementation and performance of synchrophasor function within microprocessor based relays," Protection and Control Journal, GE Multilin, pp. 35-45, December 2007.
9. **IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems**, IEEE Standard C37.118.1-2011.
10. **Балабин М.А., Лаврушенко Н.Б., Наумкин Р.И.** Современный тестовый стенд для испытания устройств синхронизированных векторных измерений // Сборник докладов 4-й Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Екатеринбург, 2013.
11. **D. Hou**, "Relay element performance during power system frequency excursions," in Proc. 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA, April 1-3, 2008.
12. **J. Sykes, K. Koellner, W. Premerlani, B. Kasztenny, and M. Adamiak**, "Synchrophasors: a primer and practical applications," in Proc. Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, Clemson, SC, USA, March 13-16, 2007.
13. **W. Rebizant, J. Szafran, and A. Wiszniewski**, Digital Signal Processing in Power System Protection and Control. Springer, 2011.
14. **IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems – Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements**, IEEE Std C37.118.1a-2014, March 2014.

УДК 621.311

И.Н. СУЛЫНЕНКОВ, к.т.н., доцент, А.А. СКОРОБОГАТОВ, к.т.н., доцент

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

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА НАДЕЖНОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 220 кВ

Аннотация. В работе приведены результаты расчетов показателей надежности выключателей 220 кВ. Представлены выводы о влиянии схемы распределительного устройства на надежность выключателей.

Ключевые слова: высоковольтные выключатели, надежность, схема распределительного устройства.

I.N. SULYENKOV, candidate of technical sciences, associate professor,
A.A. SKOROBOGATOV, candidate of technical sciences, associate professor

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
E-mail: sulynenkov@mail.ru

IMPACT ANALYSIS OF THE SWITCHGEAR SCHEMES ON THE RELIABILITY OF THE HIGH VOLTAGE CIRCUIT BREAKERS WITH A VOLTAGE OF 220 kV

Abstract. The paper presents the results of calculations of reliability indexes of 220 kV circuit breakers. Conclusions about the influence of the switchgear scheme on the reliability of circuit breakers are presented.

Keywords: high voltage circuit breakers, reliability, switchgear scheme.

Выбор схемы распределительного устройства (РУ) является важной задачей при проектировании подстанций. При ее решении необходимо использовать достоверные данные о показателях надежности элементов РУ, основным из которых являются высоковольтный выключатель.

В работе [1] показано, что при расчетах надежности схем РУ для выключателей целесообразно использовать математическую модель с учетом причин возникновения отказов. При этом необходимо учитывать все дополнительные операции коммутации, выполняемые выключателем в различных схемах РУ, что отличает ее от классического подхода, представленного в [2]. В настоящей работе произведено сравнение двух методик на основе расчетов показателей надежности выключателей схемы РУ 220 кВ с использованием фактических статистических данных. Число присоединений для всех схем принято равным восьми: 6 воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) и 2 трансформатора. Для

рассматриваемого класса напряжения и числа присоединений возможны следующие варианты схем:

- схема 9 – «Одна рабочая секционированная выключателем система шин»;
- схема 9Н – «Одна рабочая секционированная по числу трансформаторов система шин с подключением трансформаторов к секциям шин через развилку выключателей»;
- схема 9АН – «Одна рабочая секционированная система шин с подключением ответственных присоединений через полуторную цепочку»;
- схема 17 – «Полуторная схема».

Перечисленные схемы представлены на рис.1-4.

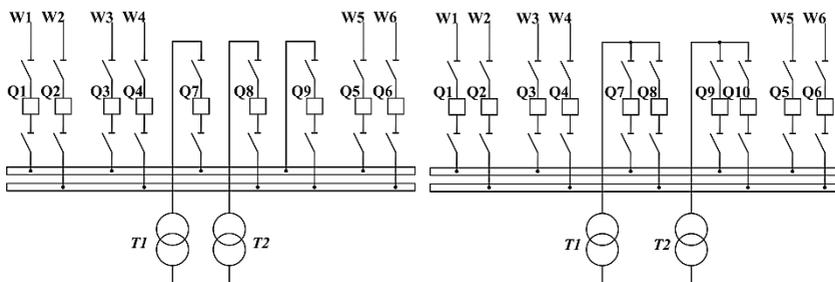


Рис. 1. Схема 9

Рис. 2. Схема 9Н

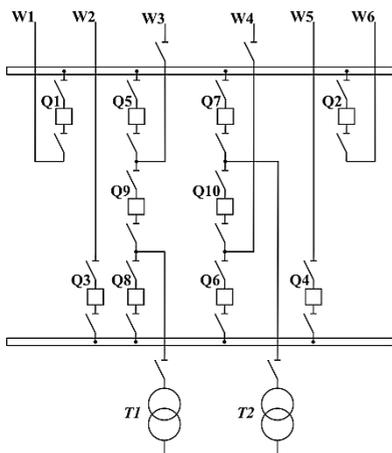


Рис. 3. Схема 9АН

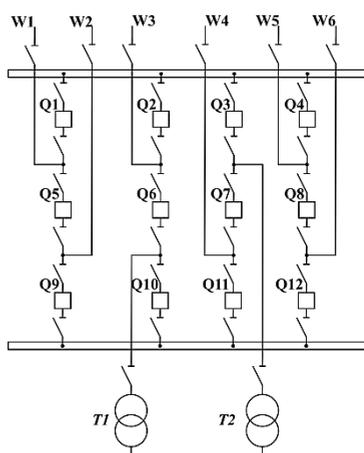


Рис. 4. Схема 17

Показатели надежности элементов схемы РУ: сборные шины 220 кВ $\omega=0,013$ 1/(год*прис.), $\mu=0,166$ 1/(год*прис.); трансформатор ТРДН-63000/220 мощностью 63 МВА с $\omega=0,035$ 1/год, $\mu=0,75$ 1/год; ВЛЭП про-

тяженностью 100 км каждая с $\omega_0=0,36$ 1/(100км*год), $\mu=1,8$ 1/год; выключатели воздушные с $a_{оп}=a_{кз}=0,006$ 1/операцию и $\omega_{ст}=0,002$ 1/год.

В таблицах 1-2 представлены сводные данные для различных групп выключателей рассматриваемых схем РУ.

Таблица 1. Показатели надежности выключателей для схем 9 и 9АН

Параметр	Значения параметров для схемы/выключателя						
	Схема 9			Схема 9АН			
	ЛШВ Q1-Q6	ТШВ Q7-Q8	ШВ Q9	ЛШВ-1 Q1-Q4	ЛШВ-2 Q5-Q6	ТШВ Q7-Q8	ТЛВ Q9-Q10
$\omega_1 \cdot 10^{-3}$, 1/год	2,64	1,54	1,63	2,64	2,64	2,17	3,18
$\omega_2 \cdot 10^{-2}$, 1/год	2,75	1,67	1,87	2,74	2,78	2,31	3,25
Δ , %	3,9	7,2	12,8	3,4	4,8	6,0	1,9

Примечание: ω_1 и ω_2 – частоты отказов без учета и с учетом схемы РУ соответственно, Δ – разница между частотами отказов ω_1 и ω_2 в процентах; ЛШВ – выключатель, коммутирующий линию и систему/секцию шин; ТШВ – выключатель, коммутирующий трансформатор и систему/секцию шин; ШВ – выключатель, коммутирующий две системы/секции шин; ТЛВ – выключатель, коммутирующий трансформатор и линию.

Таблица 2. Показатели надежности выключателей для схем 9Н и 17

Параметр	Значения параметров для схемы/выключателя						
	Схема 9Н			Схема 17			
	ЛШВ Q1-Q6	ТШВ Q7-Q10	ЛШВ-1 Q1,4,9,12	ЛШВ-2 Q2,11	ТШВ Q3,10	ЛЛВ Q5,8	ТЛВ Q6,7
$\omega_1 \cdot 10^{-2}$, 1/год	2,64	1,54	4,37	4,37	2,17	7,11	4,91
$\omega_2 \cdot 10^{-2}$, 1/год	2,75	1,68	4,60	4,57	2,4	7,22	5,00
Δ , %	3,8	8,3	4,9	4,4	9,4	1,5	1,7

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

- в ряде случаев разница частот отказов выключателей с учетом схемы РУ и без учета превышает допустимую погрешность 5%;
- наибольшее влияние схема РУ оказывает на секционные и трансформаторные выключатели;
- для выключателей, коммутирующих одинаковые присоединения в различных схемах РУ, степень влияния схемы РУ выключателей различна.

Литература

3. Сулыненков И.Н., Назарычев А.Н., Таджибаев А.И. Учет действия УРОВ в модели надежности высоковольтных выключателей// Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып.63. Проблемы надежности систем энергетики в рыночных условиях / Отв. ред. Н.И. Воропай, Н.А. Юсифбейли. – Баку: АзНИИПИИЭ, 2013. – С. 432-442.
4. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 200 с.

УДК 661.522

А.И. Сокольский, д.т.н., профессор
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Термообработка тальковой руды

Аннотация: С помощью экспериментальных методов изучены: внутренняя пористая структура, физические и теплофизические свойства, массопереносные характеристики тальковой руды

Ключевые слова: тальковая руда, коэффициент теплопроводности, коэффициент массопроводности, изотерма десорбции

A.I.Sokolsky, doctor of engineering, professor
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

Heat treatment of talc ore

Abstract: With the help of experimental methods studied: internal porous structure, physical and thermophysical properties, mass transfer characteristics of talc ore.

Key words: talc ore, thermal conductivity, mass diffusivity, desorption isotherm

Во всем мире проводятся фундаментальные исследования закономерностей ведения процессов с дисперсными системами, появился обширный класс оборудования, в наибольшей мере отвечающего особенностям обработки дисперсных материалов - аппараты со взвешенным слоем. Наиболее эффективными являются аппараты с высокими скоростями взаимодействующих фаз. При обработке дисперсных материалов в закрученном потоке высокотемпературного теплоносителя создается высокоразвитая поверхность контакта взаимодействующих фаз, полностью ликвидируется внешнедиффузионное сопротивление процессам межфазного обмена, таким образом продолжительность процесса определяется скоростью удаления влаги из материала.

Внедрение в различные отрасли промышленности этого прогрессивного технологического метода позволяет интенсифицировать процесс сушки, автоматизировать его, повысить эффективность работы аппаратов, снизить энергозатраты, создать установки большой производительности и увеличить производительность труда. Для организации процесса сушки необходима информация о свойствах объекта сушки, к ним относятся: внутренняя пористая структура, физические и теплофизические свойства, массопереносные характеристики.

Объектом исследования выбрана тальковая руда следующего гранулометрического состава:

Размер сит, мм	0,5+	0,25+	0,18+	0,125+	0,08+	0,063+0,056	0,056+дно
Доля продукта, %	5,985	3,21	7,316	11,234	51,741	8,942	11,572

Эквивалентный диаметр составляет $d_{\text{экв}}=0,0695$ мм.

Наиболее рациональным для исследования внутреннего пористого строения влажного материала является адсорбционный метод, методика проведения которого достаточно приближена к условиям сушки [1,2]. По экспериментально полученным данным (изотермам сорбции-десорбции) можно определить влагосодержание продукта, находящегося в термодинамическом равновесии с газом. Характер этих изотерм дает возможность оценить особенности строения вещества с учетом связи влаги с материалом, влияние пористой структуры на протекание внутренней диффузии влаги и пара.

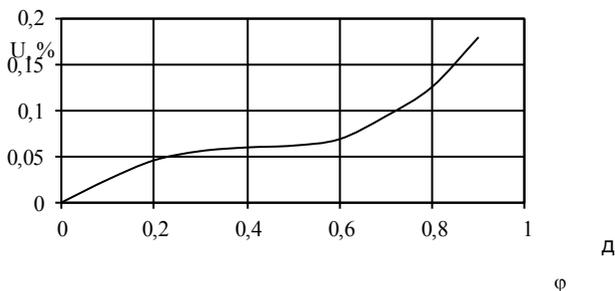


Рис. 1. Кривая десорбции тальковой руды.

На рис.1. приведена изотерма десорбции тальковой руды. По своей S-образной форме изотерма характерна для капиллярно-пористых тел, влага в которых в основном связана адсорбционными и капиллярными силами. По существующей классификации влажных тел [1] тальковую руду можно отнести к материалам с микрокапиллярной структурой ($r < 10^{-7}$).

Метод определения теплофизических величин, базируется на методе диатермической оболочки Ю.П.Барского и способе О.А.Краева [3,4].

В результате проведенного эксперимента было получено эмпирическое выражение для расчета коэффициента теплопроводности тальковой руды:

$$\lambda = 0,45(1 + 0,0025t) \quad (1)$$

Истинная плотность тальковой руды определяется с помощью объемомера Ле-Шателье, она составила $\rho_{\text{ист}}=3700$ кг/м³.

Экспериментальным путем были получены кривые кинетики сушки тальковой руды при условии, исключающем внешнее диффузионное

сопротивление.

Обработка полученных данных зональным методом [5] позволила получить следующую эмпирическую зависимость для расчета эффективного коэффициента массопроводности:

$$k=a+b(1+(U \cdot t_M/c)^d) \quad (2)$$

Постоянные коэффициенты а, в, с, d аппроксимированы в зависимости от температуры теплоносителя:

$$a=1,0209 \cdot 10^{-7} + 9,7672 \cdot 10^{-7} / t_r^{0,5}$$

$$b=1,4948 \cdot 10^{-8} + 1,5791 \cdot 10^{-1,5} \cdot t_r^3$$

$$c=5,9863 + 4,2011 \cdot 10^{-7} \cdot t_r^3$$

$$d=30,0176 + 2,4196 \cdot 10^{-6} \cdot t_r^3$$

Проведенные исследования по изучению свойств объекта сушки необходимы для составления математических моделей описывающих модели протекающие в аппаратах, а также для выбора эффективной конструкции аппарата. Для термообработки тальковой руды рекомендуется использовать вихревые аппараты, в которых время обработки составляет от нескольких секунд до минуты.

На рис.2. представлены экспериментальные данные по сушке тальковой руды в аппарате с активной гидродинамикой двухфазного потока.

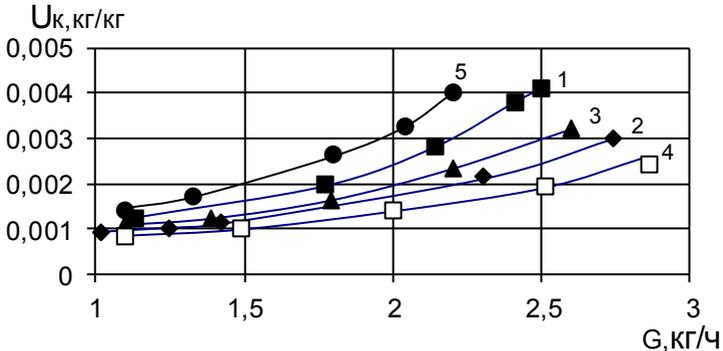


Рис. 1. Экспериментальные данные по сушке тальковой руды.
 1-L=20.59кг/ч, t=250°C; 2-L=20.59кг/ч, t=300°C; 3-L=26.75кг/ч, t=250°C;
 4-L=39.17кг/ч, t=200°C; 5-L=39.17кг/ч, t=150°C.

При проведении опытов подача твердой фазы варьировалась в пределах от 1,02 до 2,87 кг/час. Пределы изменения расходной концентрации составляли 0,028÷0,0133 кг/кг. В этих диапазонах обеспечивалось существование устойчивого газодисперсного потока. Расход теплоносителя составлял L=20,59÷39,17кг/час, а температура теплоносителя t=150÷300°C.

Анализ кривых показывает, что увеличение температуры теплоносителя значительно снижает конечное влагосодержание готового про-

дукта, но следует заметить, что увеличение расходной концентрации влечет за собой увеличение конечной влажности, особенно при низкой температуре теплоносителя. При больших расходах теплоносителя подводится больше теплоты, что соответственно снижает конечное влагосодержание.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выдать наиболее рациональные режимные параметры ведения процесса сушки и рекомендовать разработанную конструкцию аппарата в производство.

Литература

1. **Сажин Б.С., Сажин В.Б.** Научные основы техники сушки. - М.: Наука, 1997. – 488с.
2. **Лыков А.В.** Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. - 470с.
3. **Чиркин В.С.** Теплопроводность промышленных материалов. – 2е изд., перераб. и доп. - М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962.-248с.
4. **Сокольский А.И.,** Федосов С.В., Бокинов Д.В., Козлов А.В. Новый метод определения теплофизических характеристик материалов в процессе сушки. Тез. докл. на 1 Междунар. конф. " Актуальные проблемы химии и химической технологии", "Химия-97", Иваново, 1997.
5. **Рудобашта С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой / Под ред. А.Н. Плановского.- М.: Химия, 1980.-248с.

Сушка декагидрата тетрабората натрия

Аннотация: Представлены экспериментальные данные по термообработке декагидрата тетрабората натрия в вихревом аппарате. Получен декагидрат тетрабората натрия в неслеживаемой форме. Определены режимные параметры ведения процесса.

Ключевые слова: декагидрат тетраборат натрия, сушка, вихревой аппарат, изотерма десорбции

A.I.Sokolsky, doctor of engineering, professor
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

Drying sodium tetraborate decahydrate

Abstract: Experimental data on the heat treatment of sodium tetraborate decahydrate in a vortex apparatus are presented. Sodium tetraborate decahydrate was obtained in non-traceable form. Defined operational parameters of the process.

Key words: decahydrate sodium tetraborate, drying, vortex apparatus, desorption isotherm

В качестве объекта экспериментальных исследований нами был выбран продукт, нашедший применение в технологии производства искусственной кожи ВИК-Т тентовой, придающий термостойкость лицевому покрытию, используемому также в электротехнической и стекольной промышленности, это техническая бура.

Процесс получения буры из борной кислоты основан на реакции нейтрализации кислоты кальцинированной содой в растворе:



Указанный способ применяется только в России и Италии. После процесса нейтрализации, фильтрации и охлаждения кристаллы буры отделяют от маточного раствора на центрифуге. Выход буры составляет 96-98%.

Промышленные способы получения буры имеют в качестве завершающей операции процесс сушки полученного продукта. Эта заключительная стадия имеет особое значение в производстве буры, так как вид товарной продукции определяется именно процессом сушки.

Применяя различные способы сушки стремятся получить продукт стабильный по содержанию основного вещества. Выбор способа сушки буры прежде всего должен определяться ее физико-химическими свойствами.

В связи с этим, равномерность времени пребывания буры в сушильной установке является основным условием, обеспечивающим получение неслеживаемой десятиводной буры.

Выбор конструкции сушильной установки в значительной степени зависит от физико-химических свойств высушиваемого материала. Одним из важнейших свойств является природа связи влаги с материалом и его термостойкость. Природа связи с материалом может характеризоваться зависимостью влажности материала от его температуры[1]. При исследовании процесса сушки буры целесообразней использовать зависимость содержания основного вещества от температуры материала, которая отражает аналогичные закономерности[2]. С целью выявления этой зависимости были проведены специальные опыты. Результаты данной серии опытов представлены на рис.1.

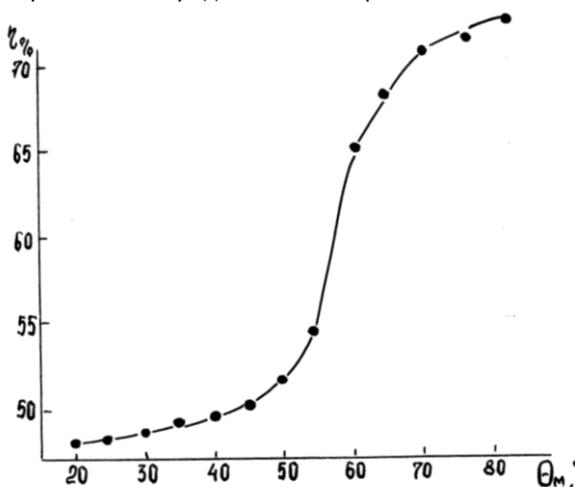


Рис. 1. Зависимость содержания основного вещества от температуры материала.

Следует учитывать, что начальное содержание основного вещества в исходном продукте составляет 47-48%. А это значит, что при получении десятиводной буры необходимо удалить всего лишь 4-5% свободной влаги. При этом удаление влаги более 5% приводит к ухудшению свойств получаемого продукта. В связи с этим, процесс сушки влажной десятиводной буры целесообразней проводить в аппаратах, гидродинамический режим которых близок к режиму идеального вытеснения. Таким аппаратом является безрешетчатая противоточная сушилка с вихревым слоем.

Принципиальная схема безрешетчатой противоточной установки с вихревым слоем изображена на рис.2.

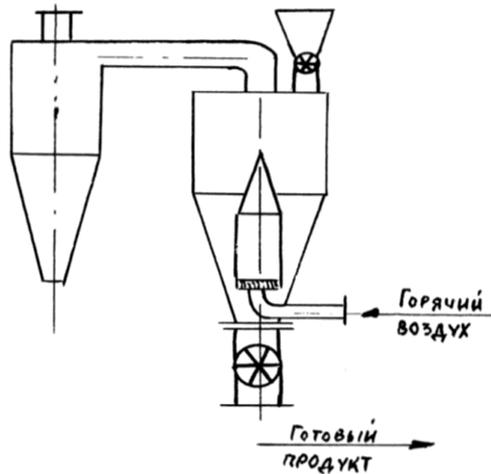


Рис. 2. Установка с вихревым слоем.

Основной целью экспериментальных исследований являлось получение информации о влиянии регулируемых параметров процесса сушки на содержание основного вещества в готовом продукте. В качестве регулируемых параметров были выбраны: расход и температура воздуха на входе в аппарат и подача твердой фазы.

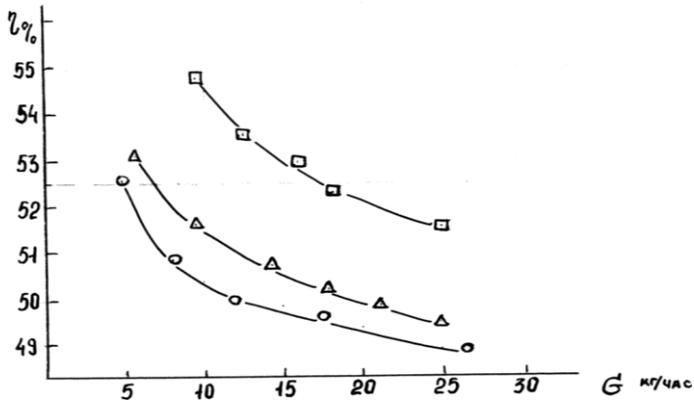


Рис. 3 Зависимость содержания основного вещества от производительности аппарата. O – $t_{вх} = 100^{\circ}\text{C}$; Δ – $t_{вх} = 150^{\circ}\text{C}$; □ – $t_{вх} = 200^{\circ}\text{C}$; L = 57 кг/час.

Обработка экспериментальных данных позволила выбрать наиболее рациональные параметры ведения процесса сушки буры с получением продукта, содержащего 52,5% основного вещества. Значения этих параметров представлены в таблице 1.

Содержание основного в- ва в исходном продукте %	Расходная концентрация твердой фазы μ	Температура теплоносителя оС	Удельный расход воздуха кг/кг	Удельный расход теплоты кДж/кг	Содер- жание основ- ного в-ва %
47,9	0,091	100	124	4014	52,5
47,9	0,116	150	98	6582	52,5
47,9	0,28	200	40	4487	52,5
47,9	0,127	100	89	3222	52,5
47,9	0,165	150	69	4370	52,5
47,9	0,253	200	45	3813	52,5

Литература

1. **Сажин Б.С., Сажин В.Б.** Научные основы техники сушки. - М.: Наука, 1997. – 488с.
2. **Лыков А.В.** Теория сушки. - М.: Энергия, 1968.- 470с.

УДК 621.311.22

Ю.Е. БАРОЧКИН, аспирант, Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, д.т.н., доцент,
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор, Е. В. Барочкин, д.т.н., профессор

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

Обоснование выбора математической модели процесса десорбции растворенного кислорода при попадании перегретой воды в зону разрежения

Аннотация: выполнено статистическое обоснование выбора из альтернативных вариантов математической модели десорбции растворенного кислорода из воды при её попадании в зону разрежения.

Ключевые слова: десорбция растворенного кислорода; термическая деаэрация, начальный эффект, математическая модель, термодинамический подход.

Y.E. BAROCHKIN postgraduate student,
G.V. LEDUHOVSKY Doctor of Engineering, associate professor,
V.P. ZHUKOV Doctor of Engineering, professor,
E. V. BAROCHKIN Doctor of Engineering, professor

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

Justification of the choice of a mathematical model dissolved oxygen desorption process when hot water enters the vacuum zone

Abstract: A statistical substantiation of the choice of a mathematical model for the desorption of dissolved oxygen from water when it is in the rarefaction zone has been performed. Considered alternative models.

Key words: desorption of dissolved oxygen; thermal deaeration, the initial effect of the mathematical model, thermodynamic approach.

Ранее на основе термодинамических соотношений разработана математическая модель деаэрации перегретой воды, попадающей в зону разрежения [1]:

$$\zeta = 1 - \frac{C}{C_0} = 1 - (1 + Ku^{-1}Ar)^{-1}; \quad Ar = \frac{P_e}{\rho_n} - 1; \quad Ku = \frac{r}{c_p \Delta t}, \quad (1)$$

где ζ – эффект деаэрации, ед.; C и C_0 – массовые концентрации растворенного в воде кислорода соответственно на выходе и входе деаэрационного элемента, мкг/дм^3 ; Ar и Ku – критерии Архимеда и Кутателадзе; $\rho_{ж}$ – плотность воды, кг/м^3 ; $\rho_{п}$ – плотность сухого насыщенного пара, кг/м^3 , при давлении в деаэраторе p_d ; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг ; c_p , $\text{кДж/(кг}\cdot\text{град.)}$ – удельная теплоемкость воды. Значение r принимается по p_d , а $\rho_{ж}$ и c_p – по средней температуре воды в деаэрационном элементе.

Поскольку термодинамический подход дает результаты, соответствующие асимптотическому по времени состоянию системы, а в реальных условиях время пребывания воды в аппарате недостаточно для достижения равновесия, результаты расчетов по (1) оказываются существенно отличными от экспериментальных данных [1, 2]. В связи с этим выполнена разработка двух моделей, базирующихся на (1), с привлечением методов теории подобия процессов теплообмена.

Модель 1 получена в виде:

$$\zeta = 1 - \left(1 + 54,14Ku^{-1,21}Ar^{0,47}\right)^{-1}, \quad (2)$$

и учитывает те же факторы, что и исходная модель (1).

Модель 2 позволяет учесть два дополнительных параметра, влияние которых установлено при анализе экспериментальных данных: начального перегрева воды $\Delta t_{вх} = t_{вх} - t_s$ ($t_{вх}$ – температура воды на входе; t_s – температура насыщения при давлении в деаэраторе p_d) и относительной гидравлической нагрузки $g = G/G_n$ (G и G_n – соответственно текущая и номинальная гидравлическая нагрузка деаэрационного устройства), косвенно показывающей относительное время пребывания воды в деаэрационном устройстве. Модель получена в виде:

$$\zeta = 1 - \left(1 + [0,37 - 0,18g + 0,0070\Delta t_{вх}]Ku^{-1}Ar\right)^{-1}. \quad (3)$$

Обоснование выбора модели из двух альтернативных вариантов выполнено с использованием статистических критериев при сопоставлении результатов расчета по (2) и (3) с экспериментальными данными:

– обе модели адекватны: критерий Фишера составил 29,4 (модель 1) и 81,6 (модель 2) при критическом значении 1,7;

– множественное корреляционное отношение (с учетом поправки на число степеней свободы) составило 0,983 для модели 1 и 0,994 для модели 2 (значимость доказана по критерию Стьюдента);

– среднеквадратическое отклонение результатов расчета от экспериментальных значений C составило 18,2 % (модель 1) и 11,6 % (модель 2);

– точность модели 2 статистически значимо отличается от точности модели 1 (критерий Фишера, определяющий отношение остаточных дисперсий для рассматриваемых моделей, равен 2,5 при критическом значении 1,7).

Последнее дает основания рекомендовать в качестве окончательного варианта использование модели 2. Сопоставление результатов расчета по (3) с экспериментальными данными выполнено на рисунке.

Результаты работы будут способствовать решению задач совершенствования конструкций, технологических схем и режимов эксплуатации деаэрационных устройств рассматриваемых типов.

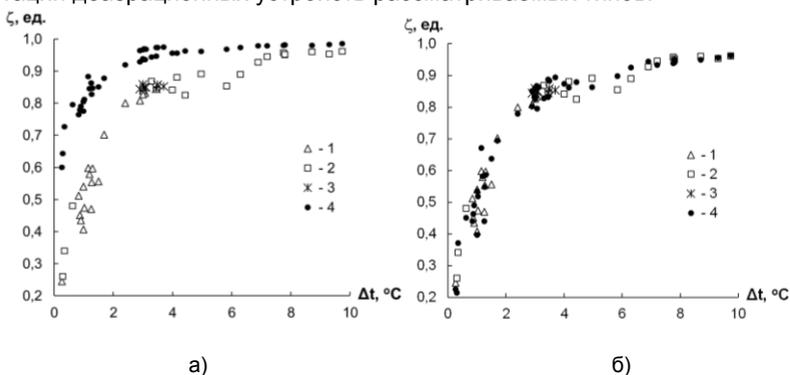


Рисунок. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета по исходной модели (1) (а) и выбранной модели 2 (б): 1, 2 и 3 – экспериментальные данные соответственно по центробежно-вихревым деаэраторам [1], КД [1] и ДКС [2, 3]; 4 – результаты расчета при условиях опытов; прочие обозначения приведены в тексте

Литература

1. **Исследование** начального эффекта при десорбции растворенного кислорода в деаэраторах перегретой воды / Барочкин Ю.Е., Жуков В.П., Ледуховский Г.В., Барочкин Е.В. // Вестник ИГЭУ. – 2016. – вып. 5. – С. 5-10.
2. **Повышение** эффективности технологических систем ТЭС с применением кавитационных деаэрационных устройств / Ледуховский Г.В., Барочкин Ю.Е., Виноградов В.Н., Барочкин А.Е. // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 1. – С. 5-13.
4. **Выбор** схемы включения прямоточных деаэрационных устройств / Шатова И.А., Барочкин Е.В., Ледуховский Г.В. // Материалы IV Российской науч.-практ. конф. «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования». – Иваново, 2005. – С. 63-65.

УДК 621.311.22

А.Е. Барочкин, к.т.н., доцент, В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор,
Е.В. Барочкин, д.т.н., профессор, Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, д.т.н., доцент

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

О матричном подходе к моделированию тепловой схемы электрической станции

Аннотация: В рамках методологии матричной формализации разработана математическая модель турбоустановки, на основании которой предложено замкнутое математическое описание всей тепловой схемы ТЭС, приведены результаты расчетного анализа решения модели с целью построения энергетических характеристик теплофикационного турбоагрегата, выполнено сравнение результатов расчета с энергетическими характеристиками действующего турбоагрегата, показана достоверность и обоснованность предложенного подхода.

Ключевые слова: моделирование, матричная формализация, электрическая станция, баланс энергии, баланс массы, энергетические характеристики, многопоточные системы, энергомассообмен.

A.E. BAROCHKIN, Candidate of Engineering, associate professor,
V.P. ZHUKOV, Doctor of Engineering, professor,
E.V. BAROCHKIN, Doctor of Engineering, professor,
G.V. LEDUHOVSKY Doctor of Engineering, associate professor

Ivanovo State Power Engineering University,
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

About the matrix approach to modeling a heat-electric circuit of an electric station

Abstract: Within the framework of the matrix formalization methodology, a mathematical model of a turbine installation has been developed, on the basis of which a closed mathematical description of the whole thermal power plant thermal scheme has been proposed, the results of a computational analysis of the model solution are presented with the aim of building the energy characteristics of a heat-generating turbine unit, the calculation results are compared with the energy characteristics of the existing turbine unit, the validity and validity are shown proposed approach..

Key words: modeling, matrix formalization, electric station, energy balance, mass balance, energy characteristics, multithreaded systems, energy-mass exchange

В рамках методологии матричной формализации разработаны модели деаэрационных установок, многоступенчатых теплообменных аппаратов с произвольной конфигурацией потоков, конденсаторов турбин, котельных агрегатов и систем теплофикации [1]. Из оборудования ТЭС в рамках матричной формализации не разработан подход к расчету

турбоустановки – собственно турбоагрегата и системы регенеративного подогрева питательной воды. Разработка в рамках единой методологии матричного описания всех подсистем позволит создать замкнутое математическое описание тепловой схемы ТЭС, которое обеспечит возможность более обоснованного определения энергетических характеристик оборудования, разработки компьютерных тренажеров и программных средств оптимизации режимов оборудования ТЭС, анализа показателей работы как отдельных агрегатов так и всей станции [2].

Объектом исследования являются методы расчета режимов работы и структуры схем включения оборудования ТЭС. Предметом исследований является матричная формализация расчета тепловой схемы ТЭС как многопоточной энергомассообменной системы. Целью исследования является разработка в рамках методологии матричной формализации модели турбоустановки ТЭС для её использования при расчете энергетических характеристик выбранной подсистемы станции.

Разработка математического описания многопоточной энергомассообменной системы рассматривается на примере турбоустановки типа ПТ с конденсацией пара и двумя регулируемыми отборами – производственным и теплофикационным. Принципиальная тепловая схема исследуемого объекта представлена на рисунке. Топливо (Т) подается в котел (КА), где организуется его сжигание с преобразованием химической энергии топлива в тепловую энергию пара. В паровой турбине (ТА) тепловая энергия пара преобразуется в механическую энергию вращения ротора, которая, в свою очередь, в турбогенераторе переходит в электрическую энергию. В конденсаторе (К) отработавший в турбине пар конденсируется. Образовавшийся при конденсации турбинный конденсат из конденсатора подается конденсатным насосом (КН) в регенеративный подогреватель (П), в котором организуется его нагрев паром нерегулируемого отбора турбины. Система регенеративного подогрева питательной воды для наглядности представлена на рисунке только одним смешивающим подогревателем. После подогревателя питательная вода с помощью питательного насоса (ПН) подается в котел. Из регулируемых отборов турбины пар направляется на производственные нужды (тепловая мощность Q_p) и теплофикацию (Q_t).

Традиционно котел, турбина, система регенеративного подогрева питательной воды, деаэрационная установка, схемы теплофикации и циркуляционного водоснабжения рассматриваются отдельно. Объединение при моделировании указанных подсистем в одну многопоточную систему связано с необходимостью учета взаимного влияния этих подсистем на эффективность производства тепловой и электрической

Расчетный анализ показал, что найденное решение системы позволяет при ограниченном объеме экспериментальных данных определять энергетические характеристики установки. Сравнение результатов расчета с энергетическими характеристиками действующего турбоагрегата показало достоверность и обоснованность предложенного подхода.

Литература

1. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново: ИГЭУ, 2009. – 176 с.
2. **Ледуховский Г.В., Поспелов А.А.** Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – 468 с.

Б.М. ЛАРИН, д.т.н.,
А.Б. ЛАРИН, д.т.н.,
В.В. КОЗЛОВСКИЙ, соискатель

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.
Ленина»,
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru, kozlovsky_vti@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТЭЦ С ПГУ-450 МВт

Аннотация. В работе приведен анализ данных по коррозии системы оборотного охлаждения конденсаторов паровых турбин и представлены результаты по применению ингибиторов коррозии и отложений.

Ключевые слова: система оборотного охлаждения (COO), водно-химический режим, ингибиторы отложений и коррозии, коррекционная обработка

B.M. LARIN, Doctor of Engineering,
A.B. LARIN, Doctor of Engineering,
V.V. KOZLOVSKY, job seeker

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya st. 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru, kozlovsky_vti@mail.ru

STUDY OF THE WATER REGIME OF THE CIRCULATING COOLING SYSTEM CHP PLANT PGU-450 MW

Abstract. The paper presents an analysis of data on corrosion of the revolving cooling system of steam turbine condensers and presents the results on the use of corrosion inhibitors and sediments.

Keywords: circulating cooling system (COO), water chemistry, scale and corrosion inhibitors, corrective treatment

Системы оборотного охлаждения (COO) конденсаторов турбин характеризуются большими расходами циркулирующей охлаждающей воды. При эксплуатации оборотных систем за счет многократного нагрева и последующего охлаждения оборотной воды на градирнях происходит ее упаривание и концентрирование в ней различных солей,

в том числе и солей жесткости (CaCO_3) [1,2]. Для восполнения потерь в систему охлаждения подается добавочная (подпиточная) вода.

Отклонения нормируемых показателей качества оборотной воды, происходящие из-за ненадлежащего качества подпиточной (добавочной) воды, сезонных факторов, естественного развития микробиологических загрязнений, отсутствия или недостаточной эффективности коррекционной обработки, а также из-за изменения режимов эксплуатации системы оборотного охлаждения, приводят к загрязнению теплообменных поверхностей и трубопроводов отложениями органического и минерального характера, а также к интенсификации коррозионных процессов углеродистых сталей и медных сплавов.

Для предотвращения накипеобразования на внутренних поверхностях конденсатора и теплообменного оборудования в настоящее время на ТЭЦ ПГУ-450 МВт применяется коррекционная обработка с добавлением серной кислоты, для подкисления подпиточной воды и снижения ее щелочности и щелочности оборотной воды, а также дозирования оксиэтилидендифосфоновой кислоты (ОЭДФК) для предотвращения образования накипных отложений. Некоторые показатели качества подпиточной и циркуляционной воды приведены в табл. 1.

Таблица 1. Среднегодовые (2018 г.) показатели качества подпиточной и циркуляционной воды СОО ТЭЦ ПГУ-450 МВт

Показатель	Размерность	Подпиточная вода	Циркуляционная вода
Жесткость общая ($J_{\text{о}}$)	мг-экв/дм ³	4,6	9,7
Щелочность общая ($Щ_{\text{о}}$)	мг-экв/дм ³	3,8	9,5
Концентрация хлоридов	мг/дм ³	18,8	51,9
Концентрация сульфатов	мг/дм ³	31,7	165,5
Концентрация фосфатов	мг/дм ³	0,5	2,1

На основании данных аналитического контроля оборотной и подпиточной воды рассчитывались коэффициенты упаривания (концентрирования) по значению кальциевой жесткости и содержанию хлоридов. Расчет коэффициентов упаривания проводился по следующим формулам:

$$K_y^{J_{\text{Ca}}} = \frac{J_{\text{Ca}_{\text{об}}}}{J_{\text{Ca}_{\text{подп}}}}; K_y^{\text{Cl}} = \frac{\text{Cl}_{\text{об}}}{\text{Cl}_{\text{подп}}}$$

где $J_{\text{Ca}_{\text{об}}}$, $J_{\text{Ca}_{\text{подп}}}$, $\text{Cl}_{\text{об}}$, $\text{Cl}_{\text{подп}}$ – соответственно кальциевая жесткость и содержание хлоридов в оборотной и подпиточной воде.

По результатам данных расчетов было выявлено, что в 2017-2018 годах система оборотного водоснабжения ТЭЦ ПГУ-450 МВт работала с

коэффициентами упаривания, рассчитанным по содержанию хлоридов, $2,11 \div 3,43$ ед., среднее значение коэффициента упаривания составило 2,8 ед.

Для оценки вероятности протекания процессов отложения карбонатных солей на теплообменном оборудовании и трубопроводах, на основании данных аналитического контроля качества оборотной и подпиточной воды был проведен расчет существующих значений коэффициента стабилизации транспорта кальция).

$$T_{\text{ЖCa}} = \frac{K_y^{\text{ЖCa}}}{K_y^{\text{Cl}}} \cdot 100\%$$

где $K_y^{\text{ЖCa}}$; K_y^{Cl} – коэффициенты упаривания, рассчитанные по значению кальциевой жесткости и содержанию хлоридов.

Расчет коэффициента стабилизации напрямую связан и следует из оценки эффективности реагентной (коррекционной) обработки оборотной воды.

При эффективной реагентной обработке коэффициент упаривания по общей или кальциевой жесткости должен быть практически равен коэффициенту упаривания по хлоридам или их отношение (коэффициент стабилизации) должно стремиться к 100%. Из практики реагентной обработки оборотных систем охлаждения, допустимое значение коэффициента стабилизации (транспорта кальция) должно составляет не менее 85 %.

На основании расчетов было установлено, что среднее значение коэффициента стабилизации для системы оборотного охлаждения ТЭЦ ПГУ-450 МВт составит 74%. Высокие накипеобразующие свойства оборотной воды системы охлаждения ТЭЦ ПГУ-450 МВт и недостаточная эффективность существующей коррекционной обработки подтверждаются результатами осмотра трубок конденсатора и вспомогательного теплообменного оборудования, а также результатами качественного анализа отложений.

Литература

1. **А.С. Копылов, В.Ф. Очков, Ю.В. Чудова.** Процессы и аппараты передовых технологий водоподготовки и их программированные расчеты. М. Издат. Дом МЭИ. 2009. 22 с.

2. **Дрикер Б.Н., Мурашова А.И., Тарантаев А.Г., Никифоров А.Ф.** Методологические аспекты выбора реагентов для предотвращения минеральных отложений // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. №2 (88). С. 2 – 4.

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Реализация технологий обработки воды в энергетике

Аннотация. Для вод средней минерализации экономические показатели ионообменного и обратноосмотического методов обессоливания близки. Совершенство технологии на традиционных ВПУ ТЭС с параллельно-точными фильтрами характеризуется уменьшением расхода воды на собственные нужды, ионитов и реагентов. Приведены примеры отдельных решений, некоторые технико-экономические показатели по группам станций.

Ключевые слова: водоподготовка на ТЭС, АЭС и ПГУ; ионообменные и мембранные технологии; технологические и экономические показатели; проблемы эксплуатации и пути совершенствования.

B.M. LARIN, Doctor of Engineering,

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya st. 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Implementation of water treatment technologies in the energy sector

Abstract. For the waters of average salinity, the economic indicators of ion-exchange and reverse osmosis desalting methods are close. The perfection of technology at traditional TLU TPPs with parallel-accurate filters is characterized by a decrease in water consumption for own needs, ion exchangers and reagents. Examples of individual solutions, some technical and economic indicators by station groups are given.

Keywords: water treatment at TPP, NPP and CCGT; ion exchange and membrane technologies; technological and economic indicators; operational problems and ways to improve.

Ионообменные технологии химического обессоливания воды получили развитие во второй половине прошлого века с переходом тепловой энергетики на сверхвысокие и сверхкритические параметры. Большинство водоподготовительных установок (ВПУ) электростанций, пущенных в этот период, до сих пор работают в штатном режиме, как правило, с пониженными, против проектных, расходами воды на собственные нужды. Примером может служить один из флагманов отечественной энергетики прошлого века – Костромская ГРЭС (КГРЭС), обследование ВПУ которой проводилось в 2014 году. При работе на

волжской исходной воде с почти 50%-ым добавком собственных дренажей, при химическом обессоливании на 3-х ступенях блоков фильтров до следующего качества: удельная электропроводность – $0,15 \div 0,20$ мкСм/см; концентрация кремниевой кислоты – $8 \div 10$ мкг/дм³; концентрация натрия – $3 \div 5$ мкг/дм³, сроки работы ионитов в ряде фильтров существенно превысили нормативные значения [1].

Проведенное обследование выявило скрытые резервы по сокращению расхода воды на собственные нужды [2].

Приведенные результаты показывают большие возможности повышения технико-экономических и экологических показателей схем химического обессоливания воды на ТЭС. Основной проблемой таких ВПУ является их старение (физическое и моральное) и необходимость замены оборудования, которое находится в эксплуатации 40-50 лет. Современный рынок энергетического оборудования предлагает, в основном, два варианта новых ВПУ: на основе противоточных ионитных фильтров и на основе мембранных технологий. Общими преимуществами водоподготовительных установок с противоточными фильтрами или обратноосмотическими установками в сравнении с традиционными установками химического обессоливания на основе параллельноточных фильтров представляются:

- для противоточного ионирования: сокращение числа установленных фильтров и снижение расхода реагентов на регенерацию и воды на собственные нужды;
- для мембранных технологий: отказ от использования кислоты и щелочи и повышение экологических показателей ВПУ.

Опыт эксплуатации импортных противоточных фильтров на ВПУ показал, что такие фильтры требуют специального подбора ионитов для работы в условиях зажатого слоя, усложнения конструкции их сборно-распределительных устройств и глубокой автоматизации управления. При отсутствии отечественного производства надежную работу противоточных ионитных фильтров можно ожидать на основе импортных поставок, что сказывается на их стоимости.

Привлекательный по физической простоте исполнения метод на основе мембранных технологий: ультрафильтрация (УУФ) и обратный осмос (УОО) – содержит ряд проблемных моментов, основными из которых до последнего времени была импортная поставка оборудования, высокие требования УОО к качеству поступающей воды, необходимость финишной доочистки воды до норм качества добавочной воды [3] и большие расходы сточных вод (по отношению к производительности установки).

Сотрудниками ОАО «ВТИ» с привлечением ИГЭУ выполнено в 2014-2015 годах технико-экономическое обследование водоподготовительных установок ТЭС компании АО «Интер РАО-Электрогенерация», включающее определение технологических характеристик ВПУ, расчет себестоимости обессоленной воды и ее составляющих. Обследованы ВПУ на 21-ой ТЭС. Все станции распределены на 5 групп по признаку технологии схемы водоподготовки для подпитки основного цикла.

Сравнение показало, что себестоимость производства обессоленной воды на новых установках мембранной технологии значительно выше, чем на установках других типов. Такое же соотношение наблюдается и при исключении из себестоимости затрат на оплату труда эксплуатационного персонала и ремонты оборудования, что весьма существенно при малой выработке обессоленной воды.

Несмотря на негативные результаты сравнения мембранных ВПУ по отношению к химическому и термическому обессоливанию, установки обратного осмоса и схемы ВПУ на их основе остаются перспективными и должны занять свое место среди применяемых технологий водоподготовки на ТЭС и АЭС.

Литература

1. **Основные** требования к применению ионов на водоподготовительных установках тепловых электростанций. СТО ВТИ 37.002-2005.ОАО «ВТИ» М. – 2005.
2. **Ларин Б.М.** Измерения электропроводности и рН в системах мониторинга водного режима ТЭС / Ларин Б.М., Колегов А.В., Ларин А.Б. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – 332 с.
3. **Пантелеев А.А.**, Очков В.Ф., Орлов К.А., Гавриленко С.С. / Подходы к проектированию и оптимизации водоподготовительных установок, основанных на интегрированных мембранных технологиях // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. №6. С. 14-18.

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Реализация технологий обработки воды в энергетике

Аннотация. Для вод средней минерализации экономические показатели ионообменного и обратноосмотического методов обессоливания близки. Совершенство технологии на традиционных ВПУ ТЭС с параллельно-точными фильтрами характеризуется уменьшением расхода воды на собственные нужды, ионитов и реагентов. Приведены примеры отдельных решений, некоторые технико-экономические показатели по группам станций.

Ключевые слова: водоподготовка на ТЭС, АЭС и ПГУ; ионообменные и мембранные технологии; технологические и экономические показатели; проблемы эксплуатации и пути совершенствования.

B.M. LARIN, Doctor of Engineering,
M.P. SAVINOV, Eng.

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya st. 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Implementation of water treatment technologies in the energy sector

Abstract. For the waters of average salinity, the economic indicators of ion-exchange and reverse osmosis desalting methods are close. The perfection of technology at traditional TLU TPPs with parallel-accurate filters is characterized by a decrease in water consumption for own needs, ion exchangers and reagents. Examples of individual solutions, some technical and economic indicators by station groups are given.

Keywords: water treatment at TPP, NPP and CCGT; ion exchange and membrane technologies; technological and economic indicators; operational problems and ways to improve.

Ионообменные технологии химического обессоливания воды получили развитие во второй половине прошлого века с переходом тепловой энергетики на сверхвысокие и сверхкритические параметры. Большинство водоподготовительных установок (ВПУ) электростанций, пущенных в этот период, до сих пор работают в штатном режиме, как правило, с пониженными, против проектных, расходами воды на собственные нужды. Примером может служить один из флагманов отечественной энергетики прошлого века – Костромская ГРЭС (КГРЭС), об-

следование ВПУ которой проводилось в 2014 году. При работе на волжской исходной воде с почти 50%-ым добавком собственных дренажей, при химическом обессоливании на 3-х ступенях блоков фильтров до следующего качества: удельная электропроводность – $0,15 \div 0,20$ мкСм/см; концентрация кремниевой кислоты – $8 \div 10$ мг/дм³; концентрация натрия – $3 \div 5$ мг/дм³, сроки работы ионитов в ряде фильтров существенно превысили нормативные значения [1].

Проведенное обследование выявило скрытые резервы по сокращению расхода воды на собственные нужды [2].

Приведенные результаты показывают большие возможности повышения технико-экономических и экологических показателей схем химического обессоливания воды на ТЭС. Основной проблемой таких ВПУ является их старение (физическое и моральное) и необходимость замены оборудования, которое находится в эксплуатации 40-50 лет. Современный рынок энергетического оборудования предлагает, в основном, два варианта новых ВПУ: на основе противоточных ионитных фильтров и на основе мембранных технологий. Общими преимуществами водоподготовительных установок с противоточными фильтрами или обратноосмотическими установками в сравнении с традиционными установками химического обессоливания на основе параллельноточных фильтров представляются:

- для противоточного ионирования: сокращение числа установленных фильтров и снижение расхода реагентов на регенерацию и воды на собственные нужды;
- для мембранных технологий: отказ от использования кислоты и щелочи и повышение экологических показателей ВПУ.

Опыт эксплуатации импортных противоточных фильтров на ВПУ показал, что такие фильтры требуют специального подбора ионитов для работы в условиях зажатого слоя, усложнения конструкции их сборно-распределительных устройств и глубокой автоматизации управления. При отсутствии отечественного производства надежную работу противоточных ионитных фильтров можно ожидать на основе импортных поставок, что сказывается на их стоимости.

Привлекательный по физической простоте исполнения метод на основе мембранных технологий: ультрафильтрация (УУФ) и обратный осмос (УОО) – содержит ряд проблемных моментов, основными из которых до последнего времени была импортная поставка оборудования, высокие требования УОО к качеству поступающей воды, необходимость финишной доочистки воды до норм качества добавочной воды [3] и большие расходы сточных вод (по отношению к производительности установки).

Сотрудниками ОАО «ВТИ» с привлечением ИГЭУ выполнено в 2014-2015 годах технико-экономическое обследование водоподготовительных установок ТЭС компании АО «Интер РАО-Электрогенерация», включающее определение технологических характеристик ВПУ, расчет себестоимости обессоленной воды и ее составляющих. Обследованы ВПУ на 21-ой ТЭС. Все станции распределены на 5 групп по признаку технологии схемы водоподготовки для подпитки основного цикла.

Сравнение показало, что себестоимость производства обессоленной воды на новых установках мембранной технологии значительно выше, чем на установках других типов. Такое же соотношение наблюдается и при исключении из себестоимости затрат на оплату труда эксплуатационного персонала и ремонты оборудования, что весьма существенно при малой выработке обессоленной воды.

Несмотря на негативные результаты сравнения мембранных ВПУ по отношению к химическому и термическому обессоливанию, установки обратного осмоса и схемы ВПУ на их основе остаются перспективными и должны занять свое место среди применяемых технологий водоподготовки на ТЭС и АЭС.

Литература

1. **Основные** требования к применению ионов на водоподготовительных установках тепловых электростанций. СТО ВТИ 37.002-2005.ОАО «ВТИ» М. – 2005.
2. **Ларин Б.М.** Измерения электропроводности и рН в системах мониторинга водного режима ТЭС / Ларин Б.М., Колегов А.В., Ларин А.Б. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – 332 с.
3. **Пантелеев А.А.**, Очков В.Ф., Орлов К.А., Гавриленко С.С. / Подходы к проектированию и оптимизации водоподготовительных установок, основанных на интегрированных мембранных технологиях // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. №6. С. 14-18.

Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., доцент
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Анализ основных направлений снижения потребности в исходной воде на установках обратного осмоса, при обессоливании воды на ТЭС

Аннотация. В работе по результатам выполненного численного исследования, представлен анализ основных направлений по снижению расхода воды на собственные нужды для установки обратного осмоса, используемой для получения обессоленной воды на ТЭС.

Ключевые слова: ТЭС, водоподготовительная установка, обессоливание воды, установка обратного осмоса, ресурсосбережение

E.N. BUSHUEV, Doctor of Engineering, professor

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

Analysis of the main directions of reducing the need for source water at reverse osmosis plants, desalting wa- ter at TPPs

Abstract. In this paper, based on the results of a numerical study, an analysis of the main directions for reducing water consumption for own needs for a reverse osmosis plant used to obtain demineralized water at TPPs is presented.

Key words: TPP, water treatment plant, water desalination, reverse osmosis plant, resource saving

В настоящее время одним из наиболее перспективных и эффективных способов деминерализации воды на ТЭС является её обработка на установке обратного осмоса (УОО) [1, 2]. Водоподготовительная установка (ВПУ) на базе мембранных методов характеризуется компактностью и позволяет получить обессоленную воду высокого качества. При эксплуатации этой установки требуются небольшие расходы привозных химических реагентов, что ведёт к пониженным эксплуатационным за-

тратам. По экологическим показателям мембранные технологии водоподготовки имеют существенные преимущества перед ионным обменом (рис. 1), однако, требуют более тщательной предочистки воды. Одним из существенных недостатком УОО является повышенный расход воды на собственные нужды.

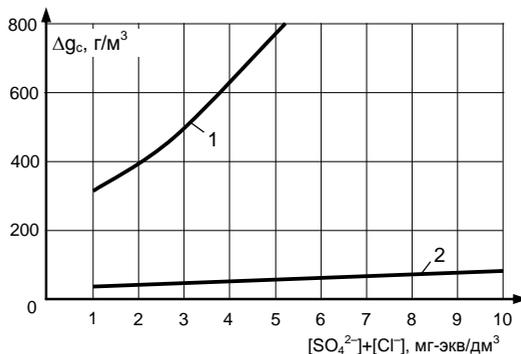


Рис. 1. Удельный сброс солей без учета сброса солей поступающей с исходной водой (Δg_c) в зависимости от метода обессоливания и минерализации исходной воды:

1 – химобессоливание на базе противоточных ионитных фильтров; 2 – обессоливание на базе обратного осмоса с дообессоливанием на ионитных фильтрах

Схемы ВПУ основанные на мембранных технологиях характеризуются повышенным, до 50 % от производительности установки, расходом сточных вод.

Большие резервы и перспективы по ресурсосбережению обладает УОО в направлении уменьшения потребности в исходной воде. Снижение расхода сбрасываемого концентрата значительно снижает потери тепловой энергии со сбросными водами. Уменьшение расхода исходной воды перед УОО снижает потребность в дозировании реагентов (коагулянта, гипохлорида натрия и метабисульфита натрия) на стадии предочистки.

Рекомендуемый съём пермеата с одного обратноосмотического элемента различных производителей обычно не превышает 15 %. При этом в соответствии с нормативными документами [3] рекомендуемый средний гидравлический КПД УОО должен составлять 75 %.

На основе литературных источников рассмотрены основные мероприятия по уменьшению расхода воды на собственные нужды для УОО [2]:

- использование нескольких элементов в одном обратноосмотическом модуле;
- многокаскадность УОО (рис. 2);
- подмес части концентрата к исходной воде УОО (рис. 3);
- подмес H-катионированного концентрата.

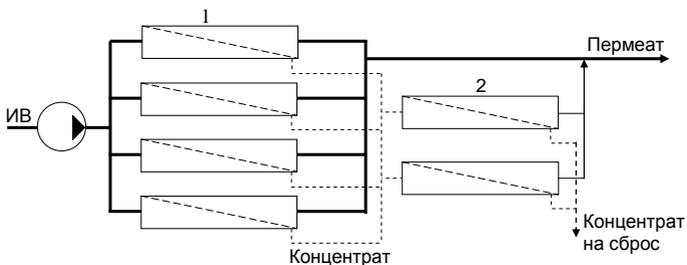


Рис. 2. Одноступенчатая двухкаскадная схема УОО:

1 – модули первого каскада; 2 – модули второго каскада; ИВ – исходная вода



Рис. 3. Схема с УОО с возвратом (подмесом) части концентрата

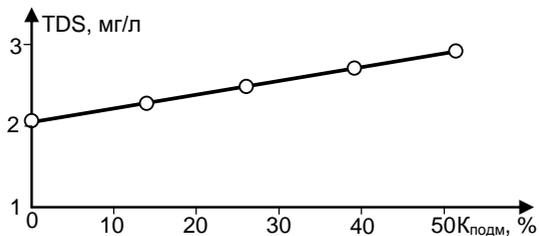


Рис. 4. Солеосодержание пермеата (TDS) в зависимости доли концентрата направляемого на подмес ($K_{\text{подм}}$)

Проведённое исследование показало, что использование указанных мероприятий позволяет существенно увеличить коэффициент выхода пермеата (гидравлический КПД) на УОО и довести его до значения 70–85 %. Однако, при этом происходит повышение солеосодержание получаемого пермеата (рис. 4), тем самым

увеличивается ионная нагрузка на ступень дообессоливания, а в результате возрастает количество сбрасываемых солей в водоём.

Литература

1. **Бушуев, Е.Н.** Технология обессоливания воды на ТЭС на основе мембранных методов: учеб. пособие / Е.Н. Бушуев, Н.В. Бушуева; ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина". –Иваново:, 2017. –144 с.
2. **Анализ** современных технологий водоподготовки на ТЭС / Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина, А.В. Жадан // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. Вып. 1. –С. 8–14.
3. **СТО 70238424.27.100.013-2009.** Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условия создания. Нормы и требования. –М.:, 2008. –86 с.

А.Ю. ФЕДОРОВА, аспирант,
Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,
153003, [г. Иваново, ул. Рабфаковская 34](#)
E-mail: abdvalenka@mail.ru

Выбор реагентов для химической очистки от отложений испарительных труб паровых котлов

Аннотация. Приведены результаты лабораторного исследования, позволившие определить скорости удаления бугорчатых и равномерных отложений, а также скорости коррозии металла испарительных труб от вида моющего раствора реагента, температуры и длительности очистки.

Ключевые слова: паровой котёл, химическая очистка, отложения, испарительные трубы, соляная кислота.

A.Yu. FEDOROVA, postgraduate,
E.N. BUSHUEV, Doctor of Engineering, Associate Professor

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

Selection of reagents for chemical cleaning from the deposits of evaporating tubes of steam boilers

Abstract. The results of laboratory tests enabled to determine the rate of removal of lumpy and uniform deposits, and the corrosion rate of metal evaporation tubes from the cleaning solution of the reagent, temperature and duration of cleaning.

Keywords: steam boiler, chemical cleaning, deposits, evaporation pipes, hydrochloric acid

Надёжность и экономичность работы паровых котлов существенно зависят от наличия отложений (накипи) на поверхностях нагрева [1]. Отложения создают дополнительное термическое сопротивление тепловому потоку от топочных газов к нагреваемой воде, так как их теплопроводность меньше теплопроводности металла. При определённой толщине отложений это приводит к перегреву металла труб выше допустимых пределов. Кроме того, оксидные отложения могут ускорять коррозию металла труб.

В зависимости от водно-химического режима (ВХР), температурных условий и конструктивных особенностей котла отложения могут образовываться на разных участках пароводяного тракта. Состав отложений и их количество так же зависят от этих условий и могут изменяться в значительных пределах [2].

Признанными и главными критериями оценки эффективности ВХР парового котла являются критерии состояния внутренних поверхностей его пароводяного тракта. Несмотря на усилия персонала ТЭС, специа-

листов отраслевых научно-исследовательских организаций, научно-исследовательских университетских центров приемлемое состояние этих поверхностей из-за неизбежности внутренних коррозии и образования отложений не может быть сохранено длительное время. Профилактические мероприятия, совершенствование технологии и эксплуатации систем ведения ВХР, использование новых реагентов при коррекционной обработке питательной и котловых вод приводят к положительному результату. И всё-таки во множестве случаев существует необходимость в эксплуатационных очистках внутренних поверхностей пароводяного тракта котла: очисток «на ходу», в режимах пуска и останова, остановленного котла. При этом особое внимание уделяется на химическую очистку труб поверхностей нагрева котла (ТПНК).

Основная цель проведённых лабораторных химических очисток – получение опытных данных о влиянии состава моющего раствора, температуры и длительности на техническую эффективность очисток моющими реагентами по критериям – скорость и полнота удаления бугорчатых и равномерных отложений, характеризуемая остаточной удельной загрязнённостью поверхности образца экранной трубы [2].

В ходе исследования применялся метод травления образцов испарительных труб паровых котлов в условиях нагрева и без него. Определение удельной загрязнённости и химического состава отложений проводились согласно требованиям СО 34.37.306-2001.

Без предварительной химической обработки трубных образцов, например, без щелочения, исследовалась эффективность применения следующих кислотных растворов: ингибированной соляной кислоты с добавкой тиомочевины, реагентов Антиржавин, Дескам, Auge Pro Ac, часто рассматриваемых при проведении эксплуатационных промывок котлов. Тиомочевина использована для предотвращения осаждения из моющего раствора металлической меди на очищаемых образцах. Композиционный реагент Auge Pro Ac 60 производится для очистки ТПНК от железооксидных отложений с увеличенной долей в них соединений меди. Реагенты Антиржавин и Дескам эффективны при очистке ТПНК от железооксидных отложений.

Для лабораторного исследования взяты образцы труб солевого отсека котла высокого давления, покрытых как равномерными, так и бугорчатыми отложениями.

На рис. 1 видно, что в самом начале очистки от равномерных отложений её скорость максимальна для Антиржавина ($113 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$). Наименьшее значение скорости очистки в это время определено для Дескама ($36 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$). В ходе очистки устанавливаются значения её скоростей, большие для реагентов Auge Pro Ac (около $20 - 30 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$). Скорости очистки для ингибированной соляной кислоты с добавлением тиомочевины, Auge Pro Ac 60 и 60 Н имеют приблизительно одинаковые значения [2].



Рис. 1. Зависимость скорости очистки в кислотных растворах от её длительности (условия химической очистки (ХО): очистка от равномерных отложений, без нагрева; ◇ – Дескам; □ – Auce Pro Ac 60; Δ – Auce Pro Ac 60H; × – Антиржавин)

Скорость очистки образцов труб от равномерных и бугорчатых эксплуатационных отложений в кислотных растворах реагентов больше, чем в растворе ингибированной соляной кислоты. Медистые отложения удаляются реагентами Auce Pro Ac. На начальном и среднем этапах очистки, когда моющему раствору доступны пористые, рыхлые отложения, ее скорость существенно зависит от текущего значения удельной загрязненности. В этих условиях увеличен вклад диспергирования в очистку и велика площадь контакта «частицы отложений – моющий раствор». На последующем этапе, когда пористый слой отложений удален и остались плотные отложения, скорость очистки образцов труб уменьшена. Эта скорость и необходимая общая длительность очистки практически не зависят от текущего значения остаточной удельной загрязненности и определяются температурой и кислотностью моющего раствора. При двухэтапной кислотной очистке рекомендуется на ее первом этапе использовать моющий раствор меньшей кислотности [2].

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при выборе технологии проведения кислотной очистки, для снижения её продолжительности с обеспечением наименьшей остаточной удельной загрязнённости поверхности металла в условиях, наиболее приемлемых для промышленных объектов.

Литература

1. МУ 34-70-113-85. Методические указания по предпусковой химической очистке теплоэнергетического оборудования. СПО ОРГРЭС, М., 1986.
2. Федорова А.Ю. Выбор реагентов и технологических условий химической очистки от отложений испарительных труб паровых котлов / А.Ю. Федорова, Е.Н. Бушуев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018 – №. 5. – С. 11–17.

УДК 621.311.22

Зарянкин А.Е., д.т.н., проф., Е.Ю. ГРИГОРЬЕВ к.т.н., доц.,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: rvs@tren.ispu.ru

Использование широкоугольных диффузорных выхлопных патрубков в газотурбинных установках

Аннотация

В докладе представлены результаты исследования применения широкоугольных диффузоров в выхлопных патрубках газотурбинных установках как стационарных, так и в составе блока парогазовой установки. Отличительная особенность новых предложенных патрубков их большая энергетическая эффективность по сравнению с традиционно используемыми.

Ключевые слова: газотурбинная установка, аэродинамика, выхлопной патрубок, диффузор, пульсации давления, виброндежность.

A.E. Zaryankin Doctor of Engineering Sciences
E.Yu. GRIGORIEV Candidate of Engineering, senior Teacher,

State Federal-Funded Educational Institution of Higher Professional Training
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: rvs@tren.ispu.ru

Use of wide-angle diffuser exhaust nozzles in gas-turbine installations

Abstract

The report presents the results of a study of the use of wide-angle diffusers in the exhaust manifolds of gas-turbine installations, both stationary and as part of a vapor-gas installation. A distinctive feature of the new proposed pipes is their high energy efficiency compared to the traditionally used ones.

Key words: gas turbine, aerodynamics, exhaust pipe, diffuser, pressure pulsations, vibration.

Основным отличием газовой турбин от паровых состоит в существенно меньшем располагаемом перепаде энтальпий на её проточную часть, т.к. за последней ступенью этой турбины давление выходящих газов оказывается близко к атмосферному и способы его снижения крайне ограничены, практически для его снижения используют диффузорный эффект, суть которого сводится к преобразованию кинетиче-

ской энергии потока, покидающего последнюю ступень турбины, в потенциальную энергию давления.

Для такого преобразования чаще всего используют геометрические диффузоры, представляющие собой каналы с непрерывно увеличивающейся площадью в направлении движения рабочего тела. В газовых турбинах наиболее часто используются развитые кольцевые диффузоры с достаточно высокой степенью расширения n ($n=F_2/F_1$, где F_1 - площадь входного сечения диффузора, а F_2 его выходная площадь).

Согласно опытным данным в кольцевом диффузоре при степени расширения $n=4$, равномерном поле скоростей в его входном сечении и безотрывном течении коэффициент восстановления энергии ξ может достигать $80 \div 83\%$. То есть, примерно 80% кинетической энергии потока, выходящего из газовой турбины, может быть преобразовано в потенциальную энергию. Для современных мощных высокотемпературных газовых турбин это означает возможность снизить давление за последней ступенью с $p_2=1,05$ бар до $p_2=0,92 \div 0,94$ бар, увеличить за счет снижения указанного давления мощность турбины на $6 \div 8\%$.

Реальный эффект от установки таких диффузоров за газовой турбиной оказывается существенно меньшим, т.к. за последней ступенью поток характеризуется значительной радиальной неравномерностью поля скоростей и направление этих скоростей может заметно отличаться от осевого направления. Кроме того, в проточной части таких диффузоров располагается мощные крепежные ребра, существенно увеличивающие аэродинамические сопротивления. В результате коэффициент восстановления энергии снижается до $45 \div 50 \%$ и реальный прирост мощности редко превышает $3 \div 4 \%$ при очень больших осевых габаритах рассматриваемых диффузоров.

Габариты диффузора могут заметно превышать осевые размеры собственно газовой турбины. При этом возникает серьезная проблема с обеспечением вибрационной надежности всего выхлопного тракта газовой турбины.

В ряде случаев уровень вибрации нагруженных стенок диффузоров достигает недопустимо высоких значений, вызывающих, в конечном счете, появление трещин на внешнем обводе диффузора и даже его разрушение.

В основе возникновения высоких динамических нагрузок на стенках диффузоров лежат чисто аэродинамические причины, обусловленные характером течения внутри проточной части диффузора.

Как показывают наши исследования [1] область наиболее интенсивной генерации пульсаций давления в движущихся жидких и газообразных средах, которые, в конечном счете, и определяют величину динамических нагрузок на стенки каналов, происходит в области изменения знака продольного градиента скорости. В диффузорах эта область располагается во входном сечении этих устройств, где конфузорное или безградиентное течение переходит в диффузорное течение.

Изменить существующую ситуацию можно либо путем прямого воздействия на характер течения рабочей среды, либо установкой

вблизи внутренней поверхности внешнего обвода кольцевого диффузора специального аэродинамического демпфера, обеспечивающего гашение пульсаций давления только в пристеночной области течения.

Весьма эффективным способом воздействия на течение внутри диффузора является продольное оребрение внутренней поверхности его внешнего обвода. Суть такого оребрения состоит в установке вдоль обтекаемой поверхности клиновидных ребер с расположением их вершин во входном сечении.

Результаты исследования (более подробно в [2]) диффузора с продольными клиновидными ребрами и углом $\alpha=7^\circ$ показали, что при установке ребер происходит интенсивное снижение амплитуд пульсаций давления по всей проточной части диффузора.

Еще больший эффект был получен при продольном оребрении диффузора с учетом раскрытия $\alpha=15^\circ$. В этом случае амплитуда пульсаций давления снизилась до уровня характерного для диффузора с углом раскрытия $\alpha=7^\circ$.

На заключительном этапе проведенных исследований рассматривалось влияние закрутки потока во входном сечении оребренного диффузора на его восстановительную способность. Здесь по сравнению с гладкими диффузорами при углах закрутки $\varphi=30^\circ$ коэффициент восстановления давления снизился всего на 5 – 6%.

Литература

1. **Зарянкин, А.Е.** О возможных путях повышения мощности, надежности и экономичности газотурбинных установок/ А.Е. Зарянкин, Е.Ю. Григорьев, Д.Е. Бузулуцкий, и др.// Вестник ИГЭУ, № 4. – 2014. – С.5 – 11.

2. **Зарянкин, А.Е.** Новый способ управления отрывом потока рабочих сред в широкоугольных диффузорах паровых и газовых турбин. А.Е. Зарянкин, А.Н. Парамонов, Е.Ю. Григорьев, и др.// Вестник ИГЭУ, № 5. – 2014. – С.5 – 10.

УДК 621.438

А.Л. Виноградов, к.т.н., доц., В.А. Буданов к.т.н., доц.,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: rvs@tren.ispu.ru

Особенности применения когенерационных энергетических установок для перевода котельных в мини-ТЭЦ

Аннотация

Представлены результаты технико-экономических расчетов перевода котельных в мини-ТЭЦ на базе когенерационных газопоршневых и газотурбинных установок малой мощности описание принципов создания тренажеров газотурбинных и парогазовых установок для тепловых электрических станций, опыт внедрения на предприятиях энергетического сектора.

Ключевые слова: отопительные котельные, когенерационные установки, газопоршневые установки, газотурбинные установки, малая энергетика

A.L. Vinogradov, V.A. Budanov

State Federal-Funded Educational Institution of Higher Professional Training

Ivanovo State Power Engineering University

153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: rvs@tren.ispu.ru

Features of the use of cogeneration power plants for the transfer of boilers to a mini - electric station

Abstract

The results of the technical and economic calculations of the transfer of boiler rooms to a mini-electric station on the basis of co-generation gas piston and gas turbine installations of low power are presented, a description of the principles of creating simulators of gas turbine and combined-cycle plants for thermal power plants, experience of implementation in the energy sector enterprises.

Key words:

heating boilers, co-generation plants, gas piston plants, gas turbine plants, small energy

В условиях дефицита электрических мощностей и роста цен на природный газ перспективным является перевод малых отопительных котельных в мини-ТЭЦ на основе различных когенерационных технологий (перевод котельной в мини-ТЭЦ путем надстройки (пристройки): газопоршневых когенерационных установок (ГПА); газотурбинных установок малой мощности (ГТУ); энергоустано-

вок на основе топливных элементов, паротурбинных контуров с низкикопьящими теплоносителями, тепловых насосов) [1,2].

Каждая котельная имеет особенности, которые ограничивают или полностью исключают возможность её перевода в мини-ТЭЦ. Тепловая мощность котельной оказывает влияние на выбор двигателя когенерационной установки. При тепловой мощности котельной менее 20 Гкал/ч резервное топливо не предусматривается. Поэтому могут применяться и ГПА, и ГТУ, работающие только на газе. Если тепловая мощность котельной более 20 Гкал/ч, то целесообразно применять ГПА, работающие на газе и топочном мазуте. В противном случае, так же как и при установке ГТУ, необходимо соорудить хранилища дизельного топлива. Необходимо учитывать давление природного газа, подведённого к котельной. Как правило, оно равно давлению газа в городской сети (0,3-1,2 МПа). Системы топливоподачи некоторых ГПА не оборудованы регулятором давления газа и это давление для них является высоким. В этом случае необходимо устанавливать ГРП. Для ГТУ, не оснащённых собственной системой повышения давления топлива перед камерой сгорания, данное давление является низким и необходима дожимная газокompрессорная станция (ГКС). При установке последней следует учитывать расположение котельной, так как минимально допустимое расстояние от ГКС до жилой застройки — 500 м. Из сказанного выше можно сделать вывод, что для установки в котельной наиболее подходят ГПА, работающие на газе с давлением 0,6 МПа, и ГТУ, имеющие собственную систему повышения давления газа перед камерой сгорания.

Принципиальная схема перевода котельной в мини-ТЭЦ установкой ГПА показана на рис. 1. При отсутствии возможности отпуска электроэнергии в сеть целесообразно на котельной устанавливать 2 ГПА (рабочий и резервный) каждой мощностью, равной максимальной мощности собственных нужд (СН) котельной. Тепловая мощность ГПА будет частично или полностью покрывать нагрузку горячего водоснабжения (ГВС). Значит ГПА в течение года будет работать с утилизацией всей теплоты.

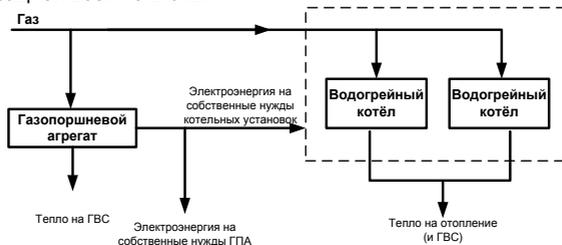


Рис. 1. Перевод водогрейной котельной в мини-ТЭЦ пристройкой ГПА

Однако в этом случае необходимо учитывать и характер изменения собственных нужд котельной, потому что глубина регулирования мощности ГПА находится, как правило, в пределах 50–100%. Если на низких тепловых нагрузках котельной мощность СН менее 50 % мощности ГПА, то необходимо не менее 2–3 ГПА с соответствующим подбором мощности [3].

По заказу АО «ГеоИнКом» Учебно-научным центром тренажёров в энергетике научно-исследовательского центра ИГЭУ было проведено сравнение удель-

ных расходов газа и годовой выработки электроэнергии для различных вариантов перевода водогрейной котельной г. Анапа в мини-ТЭЦ. Предметом исследования являлись пять схем: исходная схема котельной с двумя котлами КВГМ-20-150 и схемы, полученная пристройкой к котельной одного или нескольких газопоршневых когенераторов для полного покрытия потребностей ГВС и частичного покрытия отопительной нагрузки. Наилучшим оказался вариант, когда устанавливаем один ГПА, тепловой мощностью равной нагрузке ГВС. При таком варианте для данной котельной получалось, что номинальная мощность ГПА равна мощности СН котельной и отсутствует необходимость отпуска излишков электроэнергии в сеть. В режимах работы котельной, когда мощность СН меньше номинальной предлагалось использовать излишки электроэнергии для нагрева сетевой воды электродным котлом. В других вариантах, при увеличении количества ГПА годовая выработка возрастала, но уменьшалось число часов использования установленной мощности. Возникла проблема с отпуском электроэнергии в сеть из-за отсутствия потребителей электроэнергии в непосредственной близости к котельной.

Перевод котельных в мини-ТЭЦ с использованием ГТУ в большинстве случаев является невозможным из-за большого расхода выхлопных газов, которые не способны пропустить старая дымовая труба и водогрейные котлы.

Литература

1. Сеннова Е.В. Эффективность развития малых ТЭЦ на базе газотурбинных и дизельных установок при газификации регионов. Федяев А.В., Федяева О.Н. Теплоэнергетика.—№12, 2000 год, С. 35-39.
2. Длугосельский В.И. Надстройка водогрейных котельных газотурбинными установками. Зубков В.Я. Теплоэнергетика.— №1, 1999 год, С. 47-50.
3. Михайлов А. Комбинированные энергоустановки на базе ДВС для малой энергетики. Агафонов А, Сайданов В., Горланов А./ Новости электротехники, №1, 2008.

УДК 681.3:62-52.621.311.25

А.Л. Виноградов, к.т.н., доц., А.И. Киселев к.т.н., доц.,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: rvs@tren.ispu.ru

ТРЕНАЖЕРЫ ГАЗОТУРБИНЫХ И ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

Аннотация

Представлено описание принципов создания тренажеров газотурбинных и парогазовых установок для тепловых электрических станций, опыт внедрения на предприятиях энергетического сектора

Ключевые слова: компьютерный тренажер, газотурбинная установка, парогазовая установка, моделирование, тренировка

A.L. Vinogradov, A.I. Kiselev,

State Federal-Funded Educational Institution of Higher Professional Training
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: rvs@tren.ispu.ru

SIMULATORS OF GAS TURBINE AND STEAM GAS WETS

Abstract

The description of the principles of creating simulators of gas turbine and steam-gas installations for thermal power plants, the experience of introducing at the enterprises of the energy sector

Key words: computer simulator, gas turbine installation, steam-gas installation, simulation, training

В настоящее время серьезной проблемой электроэнергетики является отсутствие квалифицированных операторов, способных не только вести обычную нагрузку станции, но и грамотно реагировать в аварийных ситуациях. Подобная ситуация часто становится причиной аварий, простоев оборудования и, как следствие, убытков. Главной же причиной подобного положения дел, безусловно, является недостаточное обучение персонала станции, которое, в свою очередь, происходит из-за несовершенства средств обучения или вовсе отсутствия таковых.

Благодаря развитию компьютерных технологий, в настоящее время появилась возможность создания компьютерных тренажеров, предназначенных для повышения квалификации персонала станций и отработки профессиональных навыков. Преимущества такого тренажера очевидны – простота в использовании, компактность, практически безграничные возможности для моделирования различных внештатных ситуаций и программирования сбоев работы оборудования. Ещё одним обстоятельством, объясняющим тенденцию предприятий к использованию подобных систем, является то, что в настоящее время происходит активное внедрение таких передовых технологий, как, например, парогазовые установки, для которых остро стоит вопрос наличия высококвалифицированного персонала, для подготовки которого компьютерные тренажеры являются хорошо зарекомендовавшим себя средством.

Несмотря на то, что рассматриваемые системы присутствуют на рынке уже несколько лет, до сих пор не выработано определенного стандарта по их разработке и продукция различных организаций имеет сильные отличия, как по внутренней структуре, так и по функциональности. Однако, в той или иной степени, все они основаны на принципах математического моделирования. В данной статье мы рассмотрим некоторые моменты, использующиеся в модели, описывающей работу ГТУ-110, работающей в составе блока ПГУ-420 Рязанской ГРЭС.

Прежде чем приступить к моделированию любого оборудования, необходимо четко определить степень приближения, необходимую для реализации поставленной задачи, и на основании нее разбить построение модели на два или более этапов, каждый из которых будет уточнять предыдущий. Причина подобного деления проста – если поставить перед собой цель смоделировать всю установку сразу с максимальным приближением, то есть вероятность углубиться в ненужные детали или же столкнуться сразу с таким объёмом работы, который займёт много времени, но в итоге может оказаться избыточным. Любой из этих вариантов затягивает разработку продукта и увеличивает издержки, что неблагоприятно сказывается на всём проекте.

При разработке математической модели ГТУ-110 в первую очередь было принято решение разделить всю установку на несколько подмоделей, каждая из которых отражала бы работу соответствующей части, и осуществить взаимодействие между ними при помощи входных и выходных параметров. Деление модели ГТУ-110 на подмодели отражено на рис.1.

Из рисунка видно, что в качестве подмоделей выбраны основные элементы газотурбинной установки (осевой компрессор, камера сгорания, газовая турбина) и тракт топливоподачи. Каждая подмодель в общем случае принимает некоторые входные и выдает выходные параметры, тем самым осуществляя взаимодействие с остальными частями модели.

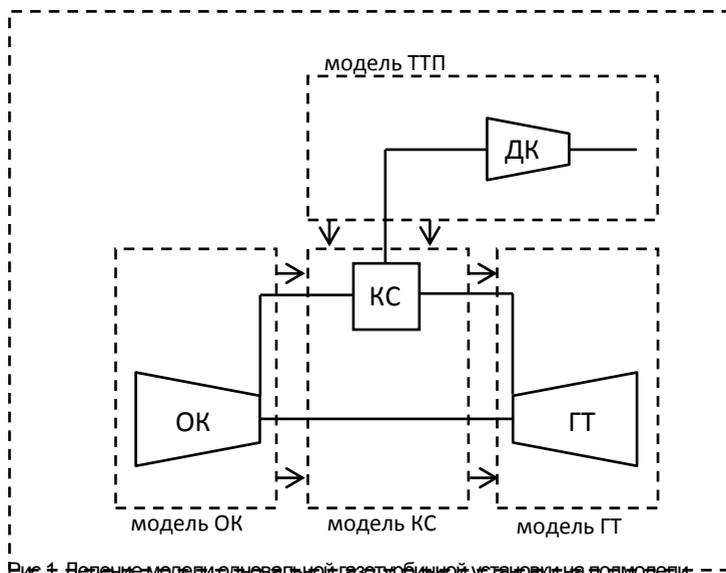


Рис.1. Деление модели однозальной газотурбинной установки на подмодели

На начальном этапе разработки в модель для большей наглядности и упрощения расчетов вводится определенное количество допущений. Так, например,

в рассматриваемой модели изначально были заложены неизменные температура и состав топливного газа (чистый метан). При необходимости, данные условия будут уточняться в ходе дальнейшей разработки.

Из рисунка видно, что в качестве подмоделей выбраны основные элементы газотурбинной установки (осевой компрессор, камера сгорания, газовая турбина) и тракт топливоподачи. Каждая подмодель в общем случае принимает некоторые входные и выдает выходные параметры, тем самым осуществляя взаимодействие с остальными частями модели.

На начальном этапе разработки в модель для большей наглядности и упрощения расчетов вводится определенное количество допущений. Так, например, в рассматриваемой модели изначально были заложены неизменные температура и состав топливного газа (чистый метан). При необходимости, данные условия будут уточняться в ходе дальнейшей разработки.

На начальном этапе разработки в модель для большей наглядности и упрощения расчетов вводится определенное количество допущений. Так, например, в рассматриваемой модели изначально были заложены неизменные температура и состав топливного газа (чистый метан). При необходимости, данные условия будут уточняться в ходе дальнейшей разработки.

Для того чтобы реализация математической модели удовлетворяла требованиям, предъявляемым к тренажеру, она, безусловно, должна быть динамической, т.е. параметры, выводимые на экран должны изменяться в режиме реального времени, причем, динамика изменений должна соответствовать реальному объекту. Для достижения такого эффекта при разработке необходимо использовать дифференциальные уравнения, отражающие взаимоотношение различных параметров. Однако, вновь аргументируя данное решение предварительным упрощением модели, на первом этапе разработки часть подмоделей использует динамические зависимости, часть – статические.

Дифференциальные уравнения используются, например, при моделировании тракта топливоподачи. Поскольку он представляет собой набор регулирующей арматуры, трубопроводов и фильтров очистки газа, а также дожимного компрессора, расположенных между газораспределительным пунктом станции и камерой сгорания ГТУ, то по пути движения газа его характеристики постоянно изменяются, причем данные изменения постоянно контролируются и передаются на щит управления. Для моделирования этого процесса использовалось уравнение неразрывности записанное в следующем виде:

$$V \beta_p \rho \frac{dp}{d\tau} = \sum G_i + F$$

где V – объем газа; β_p – коэффициент сжимаемости; ρ – плотность; G_i – расход газа на участке.

В данной зависимости под «участком» понимается набор регулирующей арматуры, расположенной между двумя узлами. Узлы, в свою очередь, представляет собой точки на тракте топливоподачи, выбранные таким образом, чтобы они совпадали с точками, в которых производится замер параметров газа на реальном объекте.

Данная схема расчета предоставляет возможность определять параметры топлива в интересующих точках тракта с точностью, удовлетворительной для

поставленной задачи. Стоит отметить, что при разбиении схемы на участки и узлы необходимо учитывать, что чрезмерно частое расположение последних может привести к излишней громоздкости и ненадежности всей модели. Поэтому при подготовке схемы к расчету следует тщательно продумывать расположение основных узлов, размещая их только там, где это действительно необходимо.

Помимо тракта топливоподачи, дифференциальные уравнения использовались при построении модели камеры сгорания. Несмотря на сложности при проработке данного момента, использование динамических зависимостей было необходимым и оправданным, поскольку модель камеры сгорания, помимо своего основного предназначения – формирование рабочего тела необходимых параметров – также использовалась в качестве связующего звена между всеми подмоделями системы.

В качестве параметра, определяющего взаимосвязь подмоделей, было использовано давление в камере сгорания, входящее в следующее уравнение неразрывности:

$$V_{кс} \cdot \rho_T \cdot \beta_p \frac{d\rho_{топки}}{d\tau} = G_B + G_T - G_T + V_{кс} \cdot \rho_T \cdot \beta_T \frac{dT_T}{d\tau}$$

, где $V_{кс}$ – объем камеры сгорания; ρ_T – плотность газов; β_p – коэффициент сжимаемости; G_B – расход воздуха в камеру сгорания; G_T – расход топлива; G_T – расход газов на выходе из камеры сгорания; β_T – коэффициент температурного расширения; dT_T – приращение температуры газов.

В остальных же подмоделях (осевой компрессор и газовая турбина) использовались статические уравнения и классический метод определения параметров рабочего тела. Несмотря на это, использование динамических зависимостей в модели камеры сгорания позволило в результате получить модель, динамику изменения параметров в которой можно считать наглядной и удовлетворительной для первого этапа разработки системы.

Дальнейший этап разработки модели ГТУ-110 будет заключаться в моделировании различных вспомогательных систем установки и уточнении уже созданных подмоделей с учетом данных, полученных в результате реальной эксплуатации объекта.

Литература

1. РД 34.12.104. Положение о непрерывном профессиональном и экономическом обучении рабочих кадров в системе Минэнерго СССР: Утв. Минэнерго СССР 10.10.88; Разраб. Отд. подготовки кадров Минэнерго СССР.- М.: Авангард, 1988.- 22 с.
2. РД 34.12.201-88. Правила проведения противоаварийных тренировок персонала электрических станций и сетей Минэнерго СССР: Утв. Гос. инспекцией по эксплуатации электростанций и сетей 12.08.88; Разраб. Южтехэнерго.- М.: СПО «Союзтехэнерго», 1989.-48 с. Изменение №1 к РД 34.12.201-88.- М.: СПО «Союзтехэнерго», 1990.- 1 с.
3. Дьяков А. Ф. Надежная работа персонала в энергетике.- М.: Изд-во МЭИ, 1991.- 224с.
4. Рабенко В. С. Тренажеры для подготовки операторов энергооборудования // Изв. вузов. Электромеханика. 2003.-№4.- С. 70-76.

Секция 2. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.3

И.Е. ИВАНОВ, ст. преп.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
Email: iivanov@mtu.edu

Разработка комплексного алгоритма, имитирующего функционирование устройства синхронизированных векторных измерений

Аннотация: осуществлено всестороннее исследование типовых методов цифровой обработки сигналов, используемых в устройствах синхронизированных векторных измерений, на основе чего разработан и успешно верифицирован оригинальный алгоритм, имитирующий функционирование устройства векторных измерений.

Ключевые слова: дискретное преобразование Фурье, синхронизированные векторные измерения, синхрофазор, скорость изменения частоты, цифровая обработка сигналов, частота.

Igor Ivanov, assistant professor
Ivanovo State Power Engineering University
34 Rabfakovskaya St., Ivanovo, 153003 Russian Federation
Email: iivanov@mtu.edu

Implementation of an integrated algorithm simulating the operation of a phasor measurement unit

Abstract: typical digital signal processing techniques used in phasor measurement units (widely known as PMUs) have been thoroughly analyzed, and a new algorithm simulating the PMU operation has been developed and tested successfully.

Key words: digital signal processing, discrete Fourier transform, frequency, rate of change of frequency, synchronized phasor measurements, synchrophasor.

Введение. Технология синхронизированных векторных измерений (СВИ) напряжений и токов развивается с 80-х гг. прошлого столетия [1]. В настоящее время количество устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ), устанавливаемых в электроэнергетических системах (ЭЭС), неуклонно увеличивается [2]. По состоянию на июнь 2015 г. в Российской Федерации внедрено около четырехсот подобных устройств [3], а в Северной Америке общее количество УСВИ в 2015 г. составляло около 2000 [4]. Наличие точно синхронизированных комплексных значений токов и напряжений – *синхрофазоров* – потенциально может использоваться для решения многих задач электроэнергетики, в частности, следующих [2, 5, 6]:

- визуализация режимных параметров;

- определение фактических параметров схем замещения элементов ЭЭС;
- оценка состояния режима электрической сети;
- выявление межзональных низкочастотных колебаний;
- послеаварийный анализ предшествующего режима ЭЭС.

Сетевые компании выражают заинтересованность в решении прикладных задач на базе СВИ [7], а мнение о том, что функция СВИ станет повсеместно интегрироваться в цифровые устройства релейной защиты, было высказано более десяти лет назад [8]. Очевидно, что возможность реализации приложений на основе СВИ во многом определяется качеством данных, предоставляемых УСВИ. При этом стандарт [9], посвященный векторным измерениям, практически не регламентирует, какие алгоритмы обработки мгновенных значений напряжений и токов должны применяться в УСВИ для получения необходимых выходных данных. Производители коммерческих УСВИ не раскрывают в полном объеме технических особенностей своих решений, что вполне объяснимо. В то же время точность ряда коммерческих УСВИ не удовлетворяет требованиям стандарта, что было выявлено в ходе сравнительного тестирования [10].

Отмеченные обстоятельства обуславливают **актуальность** изучения, сопоставления и модификации различных методик определения значений параметров, требуемых стандартом [9]: синхрофазоров, частоты и скорости изменения частоты. Таким образом, **основная цель работы** – исследование типовых методов цифровой обработки сигналов, применяемых в УСВИ, а также создание и тестирование комплексного алгоритма, имитирующего функционирование УСВИ.

Основными **методами исследования** являются математическое моделирование с применением «*MATLAB*» для реализации в программном коде и тестирования разрабатываемых алгоритмов, а также физико-математическое моделирование на испытательном стенде с использованием современного оборудования (такого как универсальный испытательный комплекс «*OMICRON CMC 356*») и специализированного программного обеспечения (в частности, «*Wireshark*» и «*PMU Connection Tester*»).

Практическая ценность работы существенно подкрепляется тем, что в ИГЭУ разрабатываются измерительные преобразователи напряжения и тока с цифровым интерфейсом. Учитывая, что стандарт *IEEE C37.118*, посвященный СВИ, становится одним из стандартов «де-факто» в электроэнергетике, целесообразной представляется реализация в этом цифровом интерфейсе функции СВИ.

Исследование и модификация алгоритмов вычисления синхрофазоров. Основной параметр, рассчитываемый УСВИ, – синхрофазор – может быть определен с помощью различных методов, например, нелинейной регрессии [1], однако наиболее распространенным вариантом можно считать различные версии **дискретного преобразо-**

вания Фурье (ДПФ). Одной из типовых форм записи ДПФ является следующая:

$$\underline{X} = \frac{\sqrt{2}}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}n}, \quad (1)$$

где \underline{X} – рассчитанное комплексное значение напряжения или тока, которое будем условно отождествлять с синхрофазором; N – количество дискретных отсчетов (выборок) сигнала за период промышленной частоты (50 Гц); x_n и n – численное значение и номер выборки соответственно.

ДПФ в форме (1) является *нецентрированным* и *нерекursивным*. Первое определение означает то, что фаза сигнала рассчитывается на начало (а не на центр) окна данных, содержащего дискретные отсчеты сигнала, а второе отражает тот факт, что каждый последующий синхрофазор вычисляется из нового окна данных.

В алгоритме *рекурсивного ДПФ* при вычислении каждого нового комплексного значения используется информация о соответствующем предыдущем значении [1]. Этот вариант ДПФ является более эффективным с вычислительной точки зрения, но имеет и существенный недостаток: погрешность расчета очередного синхрофазора отразится и на многих последующих вычислениях [1, 11].

Центрированное ДПФ, в отличие от рассмотренного выше нецентрированного, обеспечивает расчет фазы сигнала непосредственно на центр окна данных, содержащего оцифрованные мгновенные значения сигнала [12]:

$$\underline{X} = \frac{\sqrt{2}}{N} \cdot \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} x \left[\Delta t \left(k + \frac{1}{2} \right) \right] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N} \left(k + \frac{1}{2} \right)}, \quad (2)$$

где Δt – интервал дискретизации, а количество выборок N предполагается четным.

Центрированное ДПФ, как и нецентрированное, может быть *нерекursивным* или *рекурсивным*. Учитывая отмеченный выше недостаток рекурсивного ДПФ, в качестве основного варианта вычисления синхрофазоров было принято *нерекursивное центрированное ДПФ*. Фазовый угол по стандарту [9] должен определяться относительно соответствующего угла для сигнала на частоте 50 Гц, поэтому при использовании *нерекursивного* алгоритма, очевидно, должен осуществляться «поворот фазы назад» посредством домножения очередного синхрофазора с номером m на $e^{-j\Delta t \cdot \omega_0 \cdot m}$, где $\omega_0 = 2\pi f_0$ – номинальная угловая частота. Таким образом, **окончательное принятое нами выражение можно записать в следующем виде** (в предположении, что при $m=0$ временная метка центра окна данных совпадает с меткой времени GPS/ГЛОНАСС):

$$\underline{X}(m) = \frac{\sqrt{2}}{N} \cdot \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} x \left[\Delta t \left(k + \frac{1}{2} \right) \right] \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} \left(k + \frac{1}{2} \right)} \cdot e^{-j \Delta t \cdot \omega_0 \cdot m}. \quad (3)$$

Амплитуда и фаза синусоиды, рассчитанные по выражению (3), оказываются определенными без погрешностей только для сигнала на номинальной частоте (поскольку количество выборок на период и интервал дискретизации подстроены под пятидесятигерцовый сигнал). Это определяет необходимость восстановления корректных значений синхрофазоров на основе информации о реальной частоте сигнала. В ходе исследования **были выведены следующие аналитические соотношения, связывающие «эталонное» и рассчитанное значения синхрофазора:**

$$\hat{X} = A \cdot \underline{X}_{true} + B \cdot \underline{X}_{true}^* \cdot e^{-2j \cdot \omega_0 \cdot \Delta t \cdot m}; \quad (4)$$

$$A = \frac{\sin \left(\pi \cdot \left(\frac{f}{f_{nom}} - 1 \right) \right)}{N \cdot \sin \left(\frac{\pi}{N} \cdot \left(\frac{f}{f_{nom}} - 1 \right) \right)}; \quad (5)$$

$$B = \frac{\sin \left(\pi \cdot \left(\frac{f}{f_{nom}} - 1 \right) \right)}{N \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{N} + \frac{\pi}{N} \cdot \left(\frac{f}{f_{nom}} - 1 \right) \right)}, \quad (6)$$

где \hat{X} – рассчитанное значение синхрофазора; \underline{X}_{true} – искомое «истинное» значение синхрофазора; \underline{X}_{true}^* – комплексно-сопряженное значение по отношению к \underline{X}_{true} ; f и f_{nom} – значения реальной и номинальной частот соответственно.

Предположим, что нам известно актуальное значение частоты сигнала f . Тогда, разделив уравнение (4) на вещественную и мнимую части и решая систему из двух уравнений, можно легко восстановить «истинное» значение синхрофазора. **Предлагаемый оригинальный алгоритм восстановления корректных значений синхрофазоров был протестирован в «MATLAB» и показал стопроцентную работоспособность для синусоидальных сигналов на произвольной частоте, не равной 50 Гц.**

Информация о реальной текущей частоте f необходима не только для вычисления коэффициентов A и B в выражениях (5) и (6) с целью корректировки значений синхрофазоров, но также и для удовлетворения требования стандарта [9], согласно которому УСВИ обязано рассчитывать и передавать на верхний уровень иерархии значения синхрофазоров, частоты и скорости изменения частоты.

Исследование и модификация методов оценивания частоты и скорости изменения частоты. В настоящем исследовании были подробно изучены, запрограммированы на языке «MATLAB» и протестированы на типовых моделях сигналов четыре различных алгоритма (табл. 1). Отметим, что все рассмотренные алгоритмы, за исключением алгоритма по переходам сигнала через «нуль», предполагают одновременное оценивание как частоты, так и скорости ее изменения.

Таблица 1. Алгоритмы оценивания частоты и скорости изменения частоты сигнала, изученные в ходе исследования

Принцип функционирования алгоритма	Название алгоритма	Оценивается ли скорость изменения частоты?	Литературный источник
По мгновенным значениям (дискретным отсчетам) сигнала	По переходам сигнала через «нуль»	Нет	[13]
	Нелинейная регрессия	Да	[1]
По значениям фазовых углов синхрофазоров	Линейная регрессия	Да	[1]
	По производным фазового угла синхрофазора	Да	[14]

Результаты проведенных вычислительных экспериментов позволили сделать вывод о том, что **алгоритм линейной регрессии обеспечивает наилучшие результаты, поэтому он был выбран в качестве основного.** Идея алгоритма основана на аппроксимации изменения фазового угла синхрофазора полиномом второй степени $\varphi(t)$, коэффициенты которого a_0 , a_1 и a_2 содержат информацию о частоте сигнала и скорости ее изменения:

$$\varphi(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2; \quad (7)$$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + 2\pi \cdot (\Delta f_0 - f' \cdot t_0) \cdot t + \pi \cdot f' \cdot t^2, \quad (8)$$

где $\varphi_0 = \varphi(0)$; Δf_0 – отклонение частоты от номинальной в момент времени $t = t_0$; f' – скорость изменения частоты.

Для оценки неизвестных используется *линейный метод наименьших квадратов*. Размер окна данных (содержащего совокупность фазовых углов синхрофазоров) должен составлять несколько периодов изменения сигнала (но не более 5–6). В нашем случае используется окно размером в четыре периода (количество фазовых углов равно $4N+1$), центр которого соответствует моменту времени $t = t_0$.

Корректное функционирование алгоритма линейной регрессии предполагает монотонное изменение фазового угла в пределах рассматриваемого окна данных. В связи с этим необходимо, во-первых,

устранить скачкообразные изменения углов в районе $\pm 180^\circ$, а во-вторых, обеспечить максимальное сглаживание «колебаний» рассчитанных значений углов. Для решения этих задач были разработаны отдельные подпрограммы.

Разработка и тестирование комплексного алгоритма, имитирующего функционирование УСВИ. Совокупность разработанных и детально проанализированных методов и алгоритмов, часть из которых кратко описана в предыдущих разделах статьи, позволила *составить и реализовать в программном коде на языке «MATLAB» комплексный алгоритм, имитирующий функционирование УСВИ* (в части формирования выходных величин, определяемых стандартом [9]). Основная сложность заключалась в том, что в реальных условиях дискретные отсчеты сигнала доступны не одновременно, но «порциями», поэтому алгоритмизация итеративной обработки этих отсчетов требует тщательного предварительного анализа.

Часть дискретных отсчетов, необходимых для вычисления очередного синхрофазора, может оказаться недоступной (данные из «будущего»), что определяет необходимость организации буфера для хранения выборок, присоединяемых впоследствии к данным из «будущего». Оценивание частоты сигнала на основе метода линейной регрессии требует достаточно длинного (в несколько периодов основной гармоники) окна данных, образованного последовательно рассчитанными с помощью ДПФ фазовыми углами синхрофазоров. Недостаток «порции» синхрофазоров для формирования очередного окна данных является основанием для организации отдельного буфера синхрофазоров.

Отмеченные выше практические соображения, а также ряд других, были учтены при разработке комплексного алгоритма, имитирующего функционирование УСВИ. Таким образом, алгоритм, упрощенная блок-схема которого представлена на рис. 1, является не «статическим», а как бы имитирует этапы обработки очередной «порции» дискретных значений сигнала в «динамике». Алгоритм объединяет несколько файлов-подпрограмм и в настоящий момент состоит более чем из 2000 строк кода на языке «MATLAB».

В начале алгоритма в общем случае выполняется оцифровка сигнала с большой частотой, за которой следуют низкочастотная фильтрация и прореживание сигнала (рис. 1). Далее производится расчет синхрофазоров при помощи указанных выше методов (предпочтительные варианты выделены жирным шрифтом). На следующем шаге осуществляется оценивание частоты и скорости ее изменения, после чего производится корректировка значений синхрофазоров. Наконец, формируются выходные данные с требуемой дискретностью.



Рисунок 1. **Блок-схема комплексного алгоритма, имитирующего функционирование УСВИ**

С целью верификации разработанного комплексного алгоритма была осуществлена серия вычислительных экспериментов с различными моделями тестовых сигналов. На рис. 2 в качестве примера представлены результаты тестирования алгоритма на модели синусоидального сигнала с частотой 52 Гц и «шумом» со среднеквадратическим отклонением в 1 % амплитуды сигнала. Очевидно, что даже при наличии «шума» значения частоты сигнала и скорости ее изменения, рассчитанные алгоритмом, в целом практически не выходят за пределы, регламентированные стандартом [9] («Лимиты» на рис. 2), а величина *полной векторной погрешности* («total vector error», или «TVE») существенно ниже «порога» в 1 %, определенного для «стационарных» тестовых сигналов, описанных в [9].

Таким образом, можно заключить, что **предложенный комплексный алгоритм в целом справляется с возложенными на него задачами, в связи с чем перспективной представляется его доработка и реализация на аппаратной платформе.**

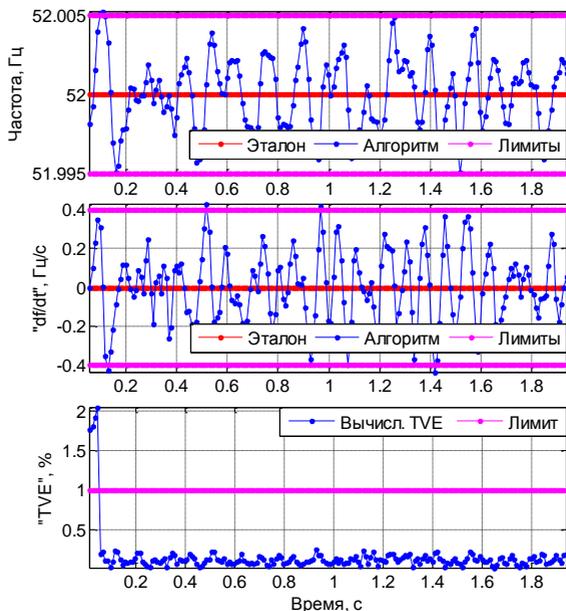


Рисунок 2. Некоторые результаты тестирования комплексного алгоритма на модели синусоидального сигнала с частотой 52 Гц и «шумом» в 1 %

Заключение. Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

- изучены типовые методы цифровой обработки сигналов, используемые в УСВИ для определения параметров, регламентируемых стандартом *IEEE C37.118.1-2011*, и выяснено, что использование стандартного ДПФ, настроенного на работу с пятидесятигерцевым сигналом, может приводить к значительным погрешностям расчета синхрофазоров;
- выведено аналитическое выражение, связывающее «эталонное» и расчетное значения синхрофазора при использовании централизованного ДПФ, а также разработан и протестирован алгоритм восстановления корректных значений синхрофазоров на основе информации о фактической частоте сигнала;
- протестировано несколько методик отслеживания частоты сигнала. В качестве предпочтительного варианта выбран алгоритм линейной регрессии, использующий информацию об изменении фазовых углов синхрофазоров;
- разработан, реализован в программном коде на языке «*MATLAB*» и успешно верифицирован комплексный алгоритм, имитирующий функционирование УСВИ в части формирования выходных величин, определяемых стандартом [9].

Дальнейшее направление исследований должно быть связано с разработкой, аппаратной реализацией и всесторонним тестированием созданного комплексного алгоритма, реализующего функцию СВИ.

Литература

1. **A.G. Phadke and J.S. Thorp**, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. Springer, 2008.
2. **S. Chakrabarti, E. Kyriakides, T. Bi, D. Cai, and V. Terzija**, "Measurements get together," IEEE Power and Energy Magazine, Jan.-Feb. 2009. Reprinted in Special Issue: Smart Grid-Putting it All Together, a 2010 reprint journal from PES, pp. 15-23.
3. **Жуков А.В., Сацук Е.И., Дубинин Д.М., Опалев О.Л., Уткин Д.Н.** Опыт разработки, внедрения и эксплуатации системы мониторинга переходных режимов в ЕЭС России // Сборник докладов 5-й Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Сочи, 2015.
4. **NASPI 2014 Survey of Synchrophasor System Networks – Results and Findings, NASPI Technical Report.** NASPI Data and Network Management Task Team, Network Systems Group, July 2015.
5. **Небера А.А.** Прикладные вопросы применения векторных измерений параметров электрического режима // Сборник докладов 3-й Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Санкт-Петербург, 2011.
6. **E.O. Schweitzer and D.E. Whitehead**, "Real-world synchrophasor solutions," in Proc. 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, March 30-April 2, 2009.
7. **Объединенный семинар исследовательских комитетов В5 и D2 РНК СИГРЕ /** Российский национальный комитет СИГРЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cigre.ru/news/industry/2149/>, свободный (20.12.2016).
8. **M. Adamiak and B. Kasztenny**, "Implementation and performance of synchrophasor function within microprocessor based relays," Protection and Control Journal, GE Multilin, pp. 35-45, December 2007.
9. **IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems**, IEEE Standard C37.118.1-2011.
10. **Балабин М.А., Лаврушенко Н.Б., Наумкин Р.И.** Современный тестовый стенд для испытания устройств синхронизированных векторных измерений // Сборник докладов 4-й Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Екатеринбург, 2013.
11. **D. Hou**, "Relay element performance during power system frequency excursions," in Proc. 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA, April 1-3, 2008.
12. **J. Sykes, K. Koellner, W. Premerlani, B. Kasztenny, and M. Adamiak**, "Synchrophasors: a primer and practical applications," in Proc. Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, Clemson, SC, USA, March 13-16, 2007.
13. **W. Rebizant, J. Szafran, and A. Wiszniewski**, Digital Signal Processing in Power System Protection and Control. Springer, 2011.
14. **IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems – Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements**, IEEE Std C37.118.1a-2014, March 2014.

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

ГОСТ Р 7.0.97-2016 Новые требования к оформлению организационно-распорядительных документов

Аннотация. Представлены основные требования к оформлению организационно-распорядительной документации. Приведены изменения в порядке оформления документов и рекомендации службам ДОУ организаций и учреждений.

Ключевые слова: требования, документация, рекомендации

E.A.Zalipaeva, Senior Lecturer

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

GOST R 7.0.97-2016 New requirements for registration organizational and administrative documents

Abstract. The basic requirements for the design of organizational and administrative documentation are presented. There are changes in the order of paperwork and recommendations for the services of preschool institutions of organizations and institutions.

Keywords: requirements, documentation, recommendations

Крупномасштабное обновление нормативно-методической базы в сфере документационного обеспечения управления привело к необходимости подготовки и введение в действие нового стандарта, устанавливающего современные требования к оформлению документов.

В 2014 году Всероссийский научно-исследовательский институт документообедения и архивного дела (ВНИИДАД) приступил к пересмотру ГОСТа Р 6.30-2003.

В результате вышел в свет новый ГОСТ Р 7.0.97-2016 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Организационно-распорядительная документация. Требования к оформлению документов», который вступил в действие с 1 июля 2018 года.

Правила применения стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29.06.2015 №162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».

Для государственных органов, компаний с государственным использованием данного стандарта является обязательным.

Проанализируем изменения, которые произошли в связи с вводом действия ГОСТ Р 7.0.97-2016.

1. Изменения реквизитов:

- код формы документа проставляется в правом верхнем углу рабочего поля документа и состоит из слов «Форма по» (наименование классификатора) и цифрового кода;

- дата документа не допускает запись в последовательности: год, месяц, день месяца;

- в реквизитах «Адресат» и «Текст документа» инициалы ставятся после фамилии;

- при согласовании документа коллегиальным органом, гриф согласования документа заполняется в последовательности: сведения об органе, согласовавшем документ, дате и номере протокола, в котором зафиксировано решение о согласовании;

- печать проставляется, не захватывая собственноручной подписи лица, подписавшего документ;

- отметка об исполнителе включает фамилию, имя и отчество исполнителя, номер его телефона;

- если копия документа предоставляется в другую организацию, то отметка о заверении копии дополняется надписью о месте хранения документа, с которого была изготовлена копия («Подлинник документа находится в (наименование организации) в деле № ... за ... год»), и заверяется печатью организации;

- отметка о направлении документа в дело дополнительно должна содержать год дела, в которое направляется документ, должность лица, оформившего отметку.

Отметим, что появились и новые реквизиты:

- наименование структурного подразделения автора документа;

- наименование должности лица – автора документа.

Был исключен реквизит «Идентификатор электронной копии документа».

Это логично в виду того, что большинство систем ДОУ поддерживают поиск по разным параметрам – по реквизитам документа и тексту, а значит, документам не нужен специфический идентификатор.

2. Общие требования к документам:

- документы длительных (свыше 10 лет) сроков хранения должны иметь левое поле не менее 30 мм;

- допускается создание документов на лицевой и оборотной сторонах листа, при котором ширина левого поля на лицевой стороне листа и правого поля на оборотной стороне листа должны быть равны.

3. Оформление абзацев, строк, шрифтов:

- предпочтительными гарнитурами и размерами шрифтов для реквизитов документа являются:

- Times New Roman № 13, 14;

- Arial № 12, 13;

- Verdana № 12, 13;

- Calibri № 14 и приближенные к ним;

- при составлении таблиц допускается использование шрифтов меньших размеров.
- абзацный отступ текста документа – 1,25 см;
- заголовки разделов и подразделов печатаются с абзацным отступом или центрируются по ширине текста;
- заголовок к тексту может не составляться, если текст документа не превышает 4-5 строк;
- многострочные реквизиты печатаются через один междустрочный интервал, составные части реквизитов отделяются дополнительным интервалом;
- текст документа печатается через 1-1,5 межстрочных интервала;
- если документ готовится для издания с уменьшением масштаба, текст печатается через два интервала;
- интервал между буквами в словах – обычный;
- интервал между словами – один пробел;
- текст документа выравнивается по ширине листа (по границам левого и правого полей документа);
- длина самой длинной строки реквизита при угловом расположении реквизитов не более 7,5 см;
- длина самой длинной строки реквизита при продольном расположении реквизитов не более 12 см.

4. Требования к бланкам:

- бланки на бумажном носителе и электронные шаблоны бланков должны быть идентичны по составу реквизитов, порядку их расположения, гарнитурам шрифта;
- бланки документов на бумажном носителе и электронные шаблоны бланков изготавливаются на основании макетов бланков, утверждаемых руководителем организации;
- электронные шаблоны бланков документов должны быть защищены от несанкционированных изменений;
- виды применяемых бланков и их разновидности устанавливаются нормативными правовыми актами.

5. Дополнительные изменения в оформлении документов Корпоративные и локальные стандарты

- Наряду с товарным знаком (знаком обслуживания) на бланках документов может указываться коммерческое обозначение юридического лица.
- Появился новый реквизит, отражающий наличие в документе информации, доступ к которой ограничен в соответствии с законодательством Российской Федерации.
- Код формы документа может проставляться не только в соответствии с ОКУД, но и в соответствии с локальным классификатором.
- Нормативными правовыми актами организации может быть предусмотрено выделение реквизитов «адресат», «заголовок к тексту» или «подпись», а также отдельных фрагментов текста полужирным шрифтом.

- Нормативные правовые акты организации, а также иные документы могут оформляться с титульным листом.

6. Электронные адреса и отправка электронных документов:

- Реквизит «Справочные данные об организации» указывается в бланках писем и включает реквизиты из ГОСТ Р 6.30-2003:

- 04 – код организации (ОКПО);

- 05 – основной государственный регистрационный номер (ОГРН) юридического лица;

- 06 – идентификационный номер налогоплательщика/код причины постановки на учет (ИНН/КПП);

- 09 – справочные данные об организации.

- Дополнительно может указываться адрес местонахождения юридического лица, если он не совпадает с почтовым адресом;

- При отправке письма по электронной почте или факсимильной связи (без досылки по почте) почтовый адрес не указывается;

- Отметка об исполнителе содержит фамилию, имя и отчество исполнителя;

- Дополнительно в отметке об исполнителе может содержаться наименование должности, структурное подразделение и электронный адрес исполнителя;

- Отметка об исполнителе может оформляться как нижний колонтитул и печататься шрифтом меньшего размера;

- Приложением может быть обособленный электронный носитель (компакт-диск, usb-флеш-накопитель и др

7. ЭДО и новый ГОСТ

ГОСТ Р 7.0.97-2016 допускает проведение согласования документов в системах электронного документооборота согласно ГОСТ Р ИСО 15489-1. Документ на бумажном и электронном носителях должны быть идентичны.

При визуализации электронного документа, подписанного электронной подписью, на бумажном документе помещается отметка об электронной подписи с соблюдением следующих требований:

- место размещения отметки об электронной подписи должно соответствовать месту размещения собственноручной подписи в аналогичном документе на бумажном носителе;

- элементы отметки об электронной подписи должны быть видимыми и читаемыми при отображении документа в натуральном размере;

- элементы отметки об электронной подписи не должны перекрываться или накладываться друг на друга;

- элементы отметки об электронной подписи не должны перекрывать элементы текста документа и другие отметки об электронной подписи (при наличии).

Подводя итог, организациям и учреждениям можно порекомендовать следующее:

1. Провести аудит локальных нормативных документов, регулирующих делопроизводство (инструкцию по делопроизводству) и внести изменения.

2. Разработать и утвердить новые бланки документов. Актуализировать электронные шаблоны.

3. Если в организации имеются документы только в электронной форме, подписанные электронной подписью, то необходимо обеспечить размещение информации об электронной подписи при печати такого документа.

Литература

1. **Бобылева М.П.** Эффективный документооборот: от традиционного к электронному. – М.: Издательство МЭИ, 2014.
2. **Янковая В.Ф.** Государственное регулирование ДОО: современное состояние и проблемы //Эффективный документооборот в управлении бизнесом: докл. и сообщ. на 8 Профессиональном форуме., 07-08 декабря 2010 г., г. Москва / Торгово-промышленная палата РФ.
3. **Янковая В.Ф.** Как изменится оформление документов по новому //Кадровая служба и управление персоналом предприятия: №7 2018 С.57.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская 34,
E-mail: Zalipaeva@it.ispu.ru

О СОСТОЯНИИ ПРОЦЕССА ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В СФЕРЕ ДОКУМЕНТАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. Приведено обоснование необходимости государственного регулирования процессов делопроизводства. Представлен перечень основных документов, включенных в нормативно-методическую базу документационного обеспечения управления.

Ключевые слова: обоснование, регулирование, делопроизводство, перечень, нормативно-методическая база, документация, управление

E.A.Zalipaeva, Senior Lecturer

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

ON THE STATE OF THE PROCESS OF STATE REGULATION IN THE FIELD OF DOCUMENTATION MANAGEMENT

Abstract. The rationale for the need for state regulation of clerical processes is given. A list of the main documents included in the regulatory and methodological base of documentation support of management is presented..

Keywords: substantiation, regulation, clerical work, list, regulatory and methodological base, documentation, management

В основе деятельности любого органа управления лежит процесс получения, обработки информации, принятия решения, доведения его до сведения исполнителей, организации исполнения, контроля и подведения итогов.

От оперативности, устойчивости и оптимальности информационных потоков во многом зависит качество управления, эффективность всех его звеньев [1].

Государственное регулирование документационного обеспечения управления (далее ДОУ) это – деятельность государственных органов, наделенных полномочиями в сфере ДОУ, по установлению норм и правил документирования, организации документооборота органов власти, организация и формирование их документального фонда.

Целью государственного регулирования ДОУ является повышение эффективности управления.

На федеральном уровне государственное регулирование ДОО осуществляется непосредственно Правительством Российской Федерации и, по его поручению, - Министерством культуры Российской Федерации и Федеральным архивным агентством.

В числе задач государственного регулирования ДОО выделяют следующие:

1. Издание документов, обладающих необходимой юридической силой.
2. Эффективное информационное обеспечение принимаемых управленческих решений.
3. Реализация законных прав и интересов граждан.
4. Взаимодействие государственных органов и организаций различных отраслей, а также контроль за их деятельностью.
5. Формирование качественного архивного фонда [2].

Создание системного единства информационного поля для всей системы органов исполнительной власти и каждого ее структурного подразделения, условий для постоянной связи по систематическому обмену информацией между ними, регулирование информационных потоков, регламентация периодичности поступления информации преодоление ее избыточности являются важными факторами жизнеспособности системы органов исполнительной власти в Российской Федерации.

Следует отметить, что к настоящему времени сложилась достаточно разветвленная система законодательных и нормативных актов, затрагивающих различные аспекты ДОО.

Основополагающий характер имеет Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», принятый 27.07.2006, №149-ФЗ, в п.2 ст.11 которого говорится следующее:

«В федеральных органах исполнительной власти документирование информации осуществляется в порядке, установленном Правительством Российской Федерации. Правила делопроизводства и документооборота, установленные иными государственными органами, органами местного самоуправления в пределах их компетенции, должны соответствовать требованиям, установленным Правительством Российской Федерации в части делопроизводства и документооборота для федеральных органов исполнительной власти» [3].

Из данного положения Закона следует, что «правила делопроизводства и документооборота», применяемые органами исполнительной власти, должны устанавливаться Правительством Российской Федерации. Во исполнение Федерального закона «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.07.2007 №1002-р был утвержден План подготовки проектов актов, необходимых для реализации данного Закона, п.14 которого была предусмотрена разработка постановления Правительства Российской Федерации «Об утверждении Правил ведения делопроизводства и документооборота в федеральных органах исполнительной власти» (так первоначально назывался документ).

Следует отметить, что постановлением Правительства Российской Федерации от 15.06.2009 №477 не только утверждены Правила, но и внесен ряд изменений в типовые регламенты, определяющие деятельность федеральных органов исполнительной власти.

Таким образом, ранее действовавшая Типовая инструкция по делопроизводству в федеральных органах исполнительной власти утратила свою силу и упразднена.

Факт принятия постановления Правительства РФ, утверждающего Правила делопроизводства, имеет важнейшее значение, так как в истории нашей страны еще никогда не принимались нормативные акты по делопроизводству столь высокого уровня.

Правила делопроизводства в федеральных органах исполнительной власти устанавливают единый порядок делопроизводства в федеральных органах исполнительной власти.

Под единым порядком делопроизводства понимаются принципы и правила делопроизводства, которые являются общими для всех федеральных органов исполнительной власти и которые должны соблюдаться во всех федеральных органах исполнительной власти независимо от типа, характера деятельности, структуры и других особенностей.

Таким образом, с принятием Правил делопроизводства в федеральных органах исполнительной власти у нас в стране выстроилась логически верная иерархия нормативных документов в области делопроизводства.

Следует также отметить, что принятый 27.07.2010 Федеральный закон №21-ФЗ «Об организации предоставления государственных и муниципальных услуг», вступивший в силу с 1 января 2011 г., предусматривает переход на предоставление государственных и муниципальных услуг в электронном виде. Закон регулирует отношения, возникающие в связи с предоставлением государственных и муниципальных услуг федеральными органами исполнительной власти, органами государственных внебюджетных фондов, исполнительными органами государственной власти субъектов Российской Федерации, а также местными администрациями и иными органами местного самоуправления. В соответствии с данным законом заявление, а также иные документы могут быть предоставлены в форме электронных документов, порядок оформления которых определяется Правительством Российской Федерации.

В связи с принятием Федерального закона от 27.07.2010 №210-ФЗ Федеральным законом от 27.07.2010 №227-ФЗ внесены изменения в 46 законодательных актов Российской Федерации, в том числе в федеральные законы: от 27.07.2006 №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», от 22.10.2004 №125-ФЗ «Об архивном деле в Российской Федерации», от 02.05.2006 №59-ФЗ «О порядке рассмотрения обращений граждан в Российской Федерации» и ряд других.

В 2010 году приказом Министерства культуры Российской Федерации от 25.08.2010 №558 утвержден Перечень типовых управленческих

архивных документов, образующихся в процессе деятельности государственных органов, органов местного самоуправления и организаций, с указанием сроков хранения (с изменениями на 16 февраля 2016 года). Данный Перечень включен в нормативную базу для реализации положений Федерального закона «Об архивном деле в Российской Федерации» и Правил делопроизводства в федеральных органах исполнительной власти.

Завершая обзор законодательных и нормативных актов федерального уровня, отметим, что в настоящее время существует достаточно развитая законодательная и нормативная база по вопросам документационного обеспечения управления, которая продолжает совершенствоваться и развиваться.

Но вместе с тем значительная часть вопросов организации и технологии работы с документами не регламентируется. Да и возможно не должна регламентироваться на государственном уровне.

Литература

4. **Иванова А.Ю.**, Шевцов В.И., Шувалова Н.Н. Документационное обеспечение государственной службы: Учебно-методическое пособие. - М.: «Статут», 2014.
5. **Бобылева М.П.** Эффективный документооборот: от традиционного к электронному. – М.: Издательство МЭИ, 2014.
6. **Янковая В.Ф.** Государственное регулирование ДОУ: современное состояние и проблемы //Эффективный документооборот в управлении бизнесом: докл. и сообщ. на 8 Профессиональном форуме., 07-08 декабря 2010 г., г. Москва / Торгово-промышленная палата РФ.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34,
E-mail: firestorm_01@rambler.ru, sgs@vvs.ispu.ru

Математические подходы к проблеме сведения производственного баланса

Аннотация. В работе приведено общее описание математического подхода к сведения материального баланса на производстве.

Ключевые слова: промышленность, сведение баланса, балансовая схема, материальные потоки, резервуары

A.S. Mochalov, Senior Lecturer,
S.G.Sidorov, associate professor, candidate of technical sciences,
head of the department,

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: firestorm_01@rambler.ru, sgs@vvs.ispu.ru

Mathematical approaches to the problem of the balance of production balance reconciliation

Abstract. This article provides a general description of methods of the material balance reconciliation.

Keywords: industry, material, balance, material scheme, material flows, tanks

Собираемые производственные данные, представляющие собой физические измерения, подвержены ошибкам, которые обычно подразделяют на случайные, систематические и грубые (**Gross Errors**). В процессе верификации данных стремятся повысить их качество путем устранения грубых ошибок, компенсации систематических ошибок и минимизации влияния случайных ошибок. Очищенные в процессе верификации данные используются для:

- формирования отчетности, в том числе и бухгалтерской
- мониторинга эффективности производственных процессов (удельное потребление сырья, основные производственные показатели (КПИ) и др.)
- поиска потерь и утечек
- моделирования и оптимизации
- усовершенствованного управления технологическими процессами (АРС)
- мониторинга и обслуживания парка измерительных приборов.

Если в измерительной системе мало приборов, и они неудачно расставлены, то измерения параметров технологического процесса не могут быть надежными. В таких системах также трудно заметить деградацию работы приборов, и поэтому они нуждаются в частой калибровке, сопряженной с демонтажем и дополнительными расходами.

Если измерительная система такова, что данные обладают **избыточностью** (т.е. если измерения конкурируют, одно измерение позволяет уточнить другое), то для верификации данных можно использовать процедуры **согласования данных**, опирающиеся на те или иные **математические модели** физических процессов. Эти модели накладывают определенные жесткие **ограничения**, определяющие какими должны быть соотношения между скорректированными данными.

Помимо избыточности измерений для согласования данных необходимо знать **погрешности** измерительных приборов. Эта информация позволяет определить, насколько позволительно откорректировать каждое из измерений. Если погрешность какого-либо измерения мала, то оно практически не будет уточняться другими измерениями, и, наоборот, плохо измеряемый (или совсем не измеряемый) поток будет в значительной степени откорректирован (рассчитан) по результатам других измерений.

Типичным примером является **балансовая модель потоков массы**, исходящая из закона сохранения массы. Согласование данных с использованием балансовых моделей или просто **сведение баланса**, привлекательно по причине своей простоты и фундаментальности, а также, не в последнюю очередь, потому что позволяет с помощью математически ясных и прозрачных методов обеспечить данные, удовлетворяющие самым строгим требованиям к качеству контроля движения материальных потоков.

Технологическая схема делится на блоки, называемые **узлами**, которые соединяются между собой **материальными потоками**. В каждый узел входит хотя бы один поток и из каждого узла выходит хотя бы один поток. Если схема используется для согласования данных с помощью сведения баланса, то она называется **балансовой схемой**.

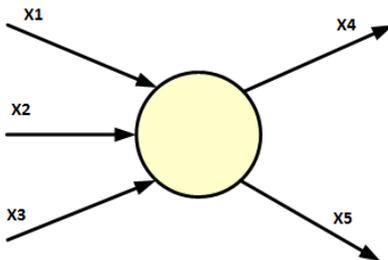


Рис. 1. Балансовая схема для отдельного узла и прилегающих потоков

Материальные потоки не нуждаются в каких-либо особых объяснениях. В общем случае это потоки однородного вещества или смесей различных компонентов, как правило, в одном агрегатном состоянии (газ, жидкость, твердое вещество). Но иногда имеют дело с многофазными потоками, например, со смесью водяного пара, конденсата и капелек воды.

Уравнение баланса для отдельного узла в общем случае имеет следующий вид:

$$\text{Вход. потоки} - \text{выход. потоки} + \text{генерация} - \text{потребление} - \text{накопление} = 0 \quad (1)$$

Если балансовая переменная подчиняется законам сохранения, например, суммарная масса или энергия, то генерация и потребление равны нулю. Если процесс стационарен, член, отвечающий за накопление также равен нулю. Таким образом, уравнение баланса для потоков массы или энергии примет в этом случае совсем простой вид:

$$\text{Входящие потоки} - \text{выходящие потоки} = 0. \quad (2)$$

Балансовые уравнения (1) или (2) выполняются как для мгновенных значений потоков, так и для их усредненных значений, а также для интегральных потоков (количеств массы) **за балансовые периоды** - час, смену, сутки, декаду, месяц и т.д. Причем чем длительнее период, тем относительный вклад "накопления" меньше в силу ограниченности объемов резервуаров.

Уравнения баланса для отдельного узла удобно записать по правилам скалярного произведения в виде:

$$a \cdot x = y \quad (3)$$

где a – вектор-строка связей, x – вектор-столбец потоков, y – член, отвечающий за накопление и генерацию/потребление балансовой переменной в узле. Например, для узла на рис. 1 $a = \{1, 1, 1, -1, -1\}$, $x^T = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$, $y = 0$ (верхний индекс "Т" обозначает операцию транспонирования). Как видим, вектор связей определяет, какие потоки являются входящими и, соответственно, берутся со знаком плюс, а какие исходящими и берутся со

знаком минус. Таким образом, для данного примера запись уравнения баланса в узле в компактном виде (3) эквивалентна очевидному условию баланса потоков в узле:

$$x_1 + x_2 + x_3 - x_4 - x_5 = y \quad (4)$$

В более общем случае, когда в схеме содержится m узлов и n потоков, возникает система балансовых уравнений, которую в матричном виде можно записать следующим образом:

$$A \cdot x = y \quad (5)$$

где A – **матрица связей** (в теории графов подобные матрицы называются **матрицами инцидентности**) с размерностью $m \times n$, а y – вектор-столбец, отвечающий за генерацию и накопление в узлах.

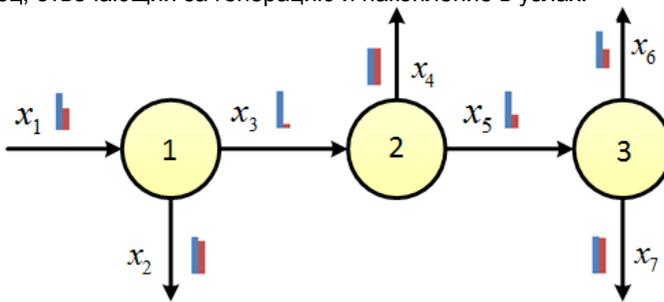


Рис.2. Балансовая схема потоков с несколькими узлами.

Каждая строка в матрице A отвечает потокам, прилегающим к узлу с номером, равным номеру строки. Столбцы матрицы связи отвечают потокам. В ячейку на пересечении i -ой строки и j -го столбца записывается «1» в случае, если поток входит в узел, «-1», если выходит, «0» - когда поток не прилегают к узлу. Например, для схемы на рис. 2 матрица связей и вектор потоков будут иметь вид:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$x^T = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\},$$

Нетрудно убедиться, что, в соответствии с правилами перемножения матриц, (каждая строка первой матрицы почленно перемножается со столбцами второй матрицы) что уравнение (5) для матрицы связей (6) приводит к системе балансовых уравнений:

$$x_1 - x_2 - x_3 = y_1,$$

$$x_3 - x_4 - x_5 = y_2,$$

$$x_5 - x_6 - x_7 = y_3.$$

Часто для удобства расчетов вводят фиктивные входящий и исходящий потоки (см. рис. 3), равные запасам в резервуарах на начало и на конец балансового периода. Кроме того, вводят фиктивные исходящие потоки, отвечающие за потребление продукта и за нормативные потери. В результате правая часть в (5), отвечающая за накопление в узлах, обнуляется, а в матрице A появляются дополнительные столбцы, отвечающие фиктивным потокам.

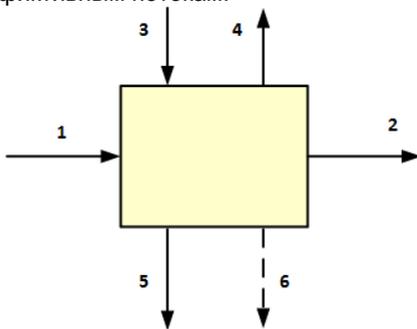


Рис. 3. Использование фиктивных потоков при построении балансовой схемы. 1 – входной поток, 2 – выходной поток, 3 – остаток на начало балансового периода, 4 – остаток на конец, 5 – потребление, 6 – нормативные потери

Любые измерения непрерывно меняющихся величин сопровождаются ошибками. Ошибки измерений имеют случайную составляющую, а

также могут испытывать смещение (bias), дрейф (drift), деградацию неопределенности (случайной составляющей погрешности). Кроме того, возможна просто поломка датчика. При отсутствии систематических ошибок, деградации и поломки датчиков в ошибке измерения остается лишь случайная составляющая, и вектор измерений $X^0 = \{x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0\}$ можно представить, как:

$$X^0 = X + \varepsilon, \tag{7}$$

где x – вектор **истинных значений** потоков, а $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n\}$ – вектор случайных ошибок. И та и другая величина неизвестны, но мы знаем, что среднее значение ε равно нулю, а вектор x подчиняется уравнению баланса (5).

Для того чтобы свести баланс нужно так скорректировать каждое измерение, чтобы для полученного скорректированного вектора x^* выполнялось балансовое уравнение

$$Ax^* = y. \tag{8}$$

При этом вектор y , отвечающий за накопление в узлах, считается постоянным и не подлежит корректированию. Если по каким-либо причинам желательно, чтобы члены, ответственные за накопление в узлах, тоже корректировались, необходимо вводить фиктивные потоки, как показано на рис. 3, и при этом обнулять правую часть (8). Обычно задача о коррекции потоков неоднозначна, так как, как правило, потоков в производственных системах больше чем узлов. В этом случае говорят, что система не доопределена и возникает задача выбора в каком-то смысле оптимального решения. Общепринятым методом решения данной задачи является использование метода неопределенных множителей Лагранжа при проведении оптимизации в условиях ограничений (8) (см, например, [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]). Именно, ищутся такие скорректированные значения измерений x^* , которые минимизировали бы целевую функцию, представляющую собой взвешенную сумму квадратов коррекций:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i^0 - x_i^*}{\Delta_i} \right)^2 \rightarrow \min_{x^*}. \tag{9}$$

В качестве нормировочных весов Δ_i обычно берутся либо **средне-квадратические отклонения** измерений σ_i («стандартная неопределенность» в терминологии, принятой у метрологов [Ошибка! Источник ссылки не найден.]), либо построенные на их основе **доверительные границы погрешности (расширенные неопределенности измерений)**, рассчитываемые путем умножения среднеквадратических отклонений на **коэффициент охвата**, определяемый желаемым **уровнем значимости**. Часто ограничиваются 95%-ым уровнем доверия (95% измерений попадают в выбранный доверительный интервал), которому для случая нормального распределения соответствует расширенная неопределенность $1.96 \cdot \sigma_i$ (для упрощения иногда используют коэффициент «2»).

Литература

7. **S.Narasimhan**, C.Jordache. Data Reconciliation and Gross Error Detection. An Intelligent Use of Process Data. Gulf Publishing Co., 2000.
8. **Руководство** по выражению неопределенности измерения. Перевод с английского под редакцией В.А. Слаева. - ВНИИМ. - С-Пб, 1999.
9. **V.V. Veverka**, F. Madron. Material and Energy Balancing in the Process Industries. From Microscopic Balances to Large Plants. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1997.

УДК 519.688

А. С. Мочалов, ст. преподаватель,
С.Г.Сидоров, доцент, к.т.н., зав.кафедрой

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34,
E-mail: firestorm_01@rambler.ru, sgs@vvs.ispu.ru

Математические подходы к проблеме сведения производственного баланса

Аннотация. В работе приведено общее описание математического подхода к сведения материального баланса на производстве.

Ключевые слова: промышленность, сведение баланса, балансовая схема, материальные потоки, резервуары

A.S. Mochalov, Senior Lecturer,
S.G.Sidorov, associate professor, candidate of technical sciences,
head of the department,

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: firestorm_01@rambler.ru, sgs@vvs.ispu.ru

Mathematical approaches to the problem of the balance of production balance reconciliation

Abstract. This article provides a general description of methods of the material balance reconciliation.

Keywords: industry, material, balance, material scheme, material flows, tanks

Собираемые производственные данные, представляющие собой физические измерения, подвержены ошибкам, которые обычно подразделяют на случайные, систематические и грубые (**Gross Errors**). В процессе верификации данных стремятся повысить их качество путем устранения грубых ошибок, компенсации систематических ошибок и минимизации влияния случайных ошибок. Очищенные в процессе верификации данные используются для:

- формирования отчетности, в том числе и бухгалтерской
- мониторинга эффективности производственных процессов (удельное потребление сырья, основные производственные показатели (KPI) и др.)
- поиска потерь и утечек
- моделирования и оптимизации
- усовершенствованного управления технологическими процессами (APC)

- мониторинга и обслуживания парка измерительных приборов.

Если в измерительной системе мало приборов, и они неудачно расставлены, то измерения параметров технологического процесса не могут быть надежными. В таких системах также трудно заметить деградацию работы приборов, и поэтому они нуждаются в частой калибровке, сопряженной с демонтажем и дополнительными расходами.

Если измерительная система такова, что данные обладают **избыточностью** (т.е. если измерения конкурируют, одно измерение позволяет уточнить другое), то для верификации данных можно использовать процедуры **согласования данных**, опирающиеся на те или иные **математические модели** физических процессов. Эти модели накладывают определенные жесткие **ограничения**, определяющие какими должны быть соотношения между скорректированными данными.

Помимо избыточности измерений для согласования данных необходимо знать **погрешности** измерительных приборов. Эта информация позволяет определить, насколько позволительно откорректировать каждое из измерений. Если погрешность какого-либо измерения мала, то оно практически не будет уточняться другими измерениями, и, наоборот, плохо измеряемый (или совсем не измеряемый) поток будет в значительной степени откорректирован (рассчитан) по результатам других измерений.

Типичным примером является **балансовая модель потоков массы**, исходящая из закона сохранения массы. Согласование данных с использованием балансовых моделей или просто **сведение баланса**, привлекательно по причине своей простоты и фундаментальности, а также, не в последнюю очередь, потому что позволяет с помощью математически ясных и прозрачных методов обеспечить данные, удовлетворяющие самым строгим требованиям к качеству контроля движения материальных потоков.

Технологическая схема делится на блоки, называемые **узлами**, которые соединяются между собой **материальными потоками**. В каждый узел входит хотя бы один поток и из каждого узла выходит хотя бы один поток. Если схема используется для согласования данных с помощью сведения баланса, то она называется **балансовой схемой**.

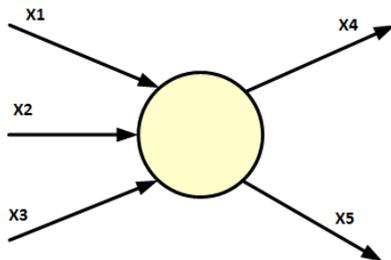


Рис. 4. Балансовая схема для отдельного узла и прилегающих потоков

Материальные потоки не нуждаются в каких-либо особых объяснениях. В общем случае это потоки однородного вещества или смесей

различных компонентов, как правило, в одном агрегатном состоянии (газ, жидкость, твердое вещество). Но иногда имеют дело с многофазными потоками, например, со смесью водяного пара, конденсата и капелек воды.

Уравнение баланса для отдельного узла в общем случае имеет следующий вид:

$$\text{Вход. потоки} - \text{выход. потоки} + \text{генерация} - \text{потребление} - \text{накопление} = 0 \quad (8)$$

Если балансовая переменная подчиняется законам сохранения, например, суммарная масса или энергия, то генерация и потребление равны нулю. Если процесс стационарен, член, отвечающий за накопление также равен нулю. Таким образом, уравнение баланса для потоков массы или энергии примет в этом случае совсем простой вид:

$$\text{Входящие потоки} - \text{выходящие потоки} = 0. \quad (9)$$

Балансовые уравнения (1) или (2) выполняются как для мгновенных значений потоков, так и для их усредненных значений, а также для интегральных потоков (количеств массы) **за балансовые периоды** - час, смену, сутки, декаду, месяц и т.д. Причем чем длительнее период, тем относительный вклад "накопления" меньше в силу ограниченности объемов резервуаров.

Уравнения баланса для отдельного узла удобно записать по правилам скалярного произведения в виде:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{x} = y \quad (10)$$

где \mathbf{a} – вектор-строка связей, \mathbf{x} – вектор-столбец потоков, y – член, отвечающий за накопление и генерацию/потребление балансовой переменной в узле. Например, для узла на рис. 1 $\mathbf{a} = \{1, 1, 1, -1, -1\}$, $\mathbf{x}^T = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$, $y = 0$ (верхний индекс "Т" обозначает операцию транспонирования). Как видим, вектор связей определяет, какие потоки являются входящими и, соответственно, берутся со знаком плюс, а какие исходящими и берутся со знаком минус. Таким образом, для данного примера запись уравнения баланса в узле в компактном виде (3) эквивалентна очевидному условию баланса потоков в узле:

$$x_1 + x_2 + x_3 - x_4 - x_5 = y \quad (11)$$

В более общем случае, когда в схеме содержится m узлов и n потоков, возникает система балансовых уравнений, которую в матричном виде можно записать следующим образом:

$$A \cdot x = y \quad (12)$$

где A – **матрица связей** (в теории графов подобные матрицы называются **матрицами инцидентности**) с размерностью $m \times n$, а y – вектор-столбец, отвечающий за генерацию и накопление в узлах.

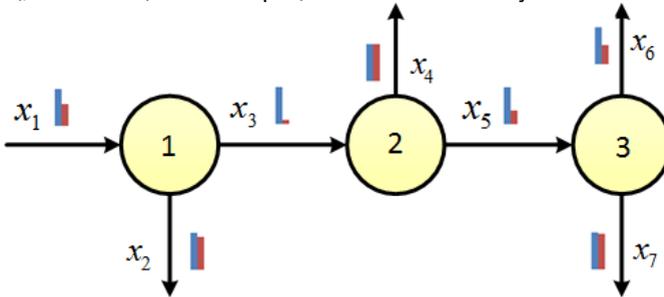


Рис.5. Балансовая схема потоков с несколькими узлами.

Каждая строка в матрице A отвечает потокам, прилегающим к узлу с номером, равным номеру строки. Столбцы матрицы связи отвечают потокам. В ячейку на пересечении i -ой строки и j -го столбца записывается «1» в случае, если поток входит в узел, «-1», если выходит, «0» - когда поток не прилегают к узлу. Например, для схемы на рис. 2 матрица связей и вектор потоков будут иметь вид:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$X^T = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7\},$$

Нетрудно убедиться, что, в соответствии с правилами перемножения матриц, (каждая строка первой матрицы почленно перемножается со столбцами второй матрицы) что уравнение (5) для матрицы связей (6) приводит к системе балансовых уравнений:

$$X_1 - X_2 - X_3 = Y_1,$$

$$X_3 - X_4 - X_5 = Y_2,$$

$$X_5 - X_6 - X_7 = Y_3.$$

Часто для удобства расчетов вводят фиктивные входящий и исходящий потоки (см. рис. 3), равные запасам в резервуарах на начало и на конец балансового периода. Кроме того, вводят фиктивные исходящие потоки, отвечающие за потребление продукта и за нормативные потери. В результате правая часть в (5), отвечающая за накопление в узлах, обнуляется, а в матрице A появляются дополнительные столбцы, отвечающие фиктивным потокам.

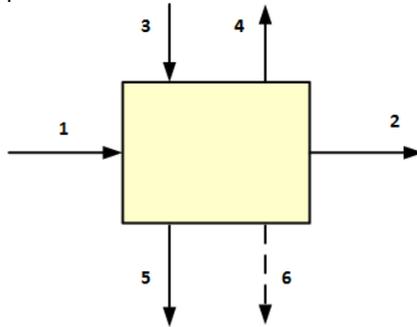


Рис. 6. Использование фиктивных потоков при построении балансовой схемы. 1 – входной поток, 2 – выходной поток, 3 – остаток на начало балансового периода, 4 – остаток на конец, 5 – потребление, 6 – нормативные потери

Любые измерения непрерывно меняющихся величин сопровождаются ошибками. Ошибки измерений имеют случайную составляющую, а также могут испытывать смещение (bias), дрейф (drift), деградацию неопределенности (случайной составляющей погрешности). Кроме того, возможна просто поломка датчика. При отсутствии систематических ошибок, деградации и поломок датчиков в ошибке измерения остается

лишь случайная составляющая, и вектор измерений $X^0 = \{X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0\}$ можно представить, как:

$$X^0 = X + \varepsilon, \quad (14)$$

где x – вектор **истинных значений** потоков, а $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n\}$ – вектор случайных ошибок. И та и другая величина неизвестны, но мы знаем, что среднее значение ε равно нулю, а вектор x подчиняется уравнению баланса (5).

Для того чтобы свести баланс нужно так скорректировать каждое измерение, чтобы для полученного скорректированного вектора x^* выполнялось балансовое уравнение

$$Ax^* = y. \quad (8)$$

При этом вектор y , отвечающий за накопление в узлах, считается постоянным и не подлежит корректированию. Если по каким-либо причинам желательно, чтобы члены, ответственные за накопление в узлах, тоже корректировались, необходимо вводить фиктивные потоки, как показано на рис. 3, и при этом обнулять правую часть (8). Обычно задача о коррекции потоков неоднозначна, так как, как правило, потоков в производственных системах больше чем узлов. В этом случае говорят, что система не доопределена и возникает задача выбора в каком-то смысле оптимального решения. Общепринятым методом решения данной задачи является использование метода неопределенных множителей Лагранжа при проведении оптимизации в условиях ограничений (8) (см, например, [Ошибка! Источник ссылки не найден.]). А именно, ищутся такие скорректированные значения измерений x^* , которые минимизировали бы целевую функцию, представляющую собой взвешенную сумму квадратов коррекций:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i^0 - X_i^*}{\Delta_i} \right)^2 \rightarrow \min_{x^*}. \quad (9)$$

В качестве нормировочных весов Δ_i обычно берутся либо **средне-квадратические отклонения** измерений σ_i («стандартная неопределенность» в терминологии, принятой у метрологов [Ошибка! Источник ссылки не найден.]), либо построенные на их основе **доверительные**

границы погрешности (расширенные неопределенности измерений), рассчитываемые путем умножения среднеквадратических отклонений на **коэффициент охвата**, определяемый желаемым **уровнем значимости**. Часто ограничиваются 95%-ым уровнем доверия (95% измерений попадают в выбранный доверительный интервал), которому для случая нормального распределения соответствует расширенная неопределенность $1.96 \cdot \sigma_i$ (для упрощения иногда используют коэффициент «2»).

Литература

10. **S.Narasimhan**, C.Jordache. Data Reconciliation and Gross Error Detection. An Intelligent Use of Process Data. Gulf Publishing Co., 2000.
11. **Руководство** по выражению неопределенности измерения. Перевод с английского под редакцией В.А. Слаева. - ВНИИМ. - С-Пб, 1999.
12. **V.V. Veverka**, F. Madron. Material and Energy Balancing in the Process Industries. From Microscopic Balances to Large Plants. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1997.

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

Использование гетерогенных вычислительных систем с двумя графическими платами

Аннотация. В гетерогенных системах используется сложный способ организации параллельной вычислительной системы, в них объединены многоядерные процессоры и графические платы. Важным вопросом является эффективное использование вычислительных систем с такой сложной архитектурой.

Ключевые слова: гетерогенные системы, эффективность вычислений, методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений больших размерностей

L.P. Chernysheva, Senior Lecturer

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

The use of heterogeneous computing systems with two graphics cards

Abstract. In heterogeneous systems, a complex method of organizing a parallel computing system is used, they combine multi-core processors and graphics cards. An important issue is the effective use of computing systems with such a complex architecture.

Keywords: heterogeneous systems, computation efficiency, methods for solving ordinary differential equations of large dimensions

Современные высокопроизводительные вычислительные системы (ВВС) являются гетерогенными. Они состоят из компонентов двух основных типов: многоядерного центрального процессора и массивно-параллельных ускорителей, например, графических процессоров (GPU) фирмы NVIDIA. Гибридные технологии используют самые мощные суперкомпьютеры в мире.

На данных системах стало возможным создавать высокопроизводительные приложения для такой требовательной к вычислительным ресурсам области, как математическое моделирование физических процессов в энергетике.

Важной характеристикой ВВС является ее производительность. Производительность любой вычислительной системы определяется

следующими факторами: составом, размером, временными характеристиками вычислительной компоненты и памяти данной системы, структурой и пропускной способностью коммуникационной среды, используемыми компилятором и операционной системой.

Была поставлена задача - исследовать производительность гетерогенной вычислительной системы Ивановского государственного энергетического университета, расположенного на кафедре высокопроизводительных вычислительных систем.

Анализ производительности проводился на решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений и с использованием специальной библиотеки программ для решения задач линейной алгебры BLAS. Данная библиотека используется в популярном пакете оценки производительности LINPACK, на основе которого формируется список самых мощных суперкомпьютеров в мире (Тор500) и в СНГ (Тор50).

Исследования проводились на гетерогенной вычислительной системе со следующими техническими характеристиками. Система состоит из восьми ядерный центрального процессора и двух графических процессора NVIDIA. Модель графического процессора – GeForce GTX 580. Тактовая частота графической подсистемы – 576 МГц. Тактовая частота процессора – 1,6 ГГц. Тактовая частота памяти – 1008 МГц. Интерфейс памяти – 446 бит. Доступная графическая память – 1610 ГБ. Выделенная видеопамять - 896 МБ. Разделяемая системная память – 2,815 ГБ. В системе количество ядер в блоке равно 1024. Это пятая версия аппаратной реализации CUDA (Compute Unified Device Architecture)

Для оценка производительности проведены исследования на системе большой размерности. Пусть дана система обыкновенных дифференциальных уравнений с линейными коэффициентами:

$$\frac{dx_i}{dt} = A_{i1}x_1 + A_{i2}x_2 + A_{i3}x_3 + \dots + A_{iN}x_N,$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N,$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ – параметры, определяющие состояние системы,

t – время,

$A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}, \dots, A_{iN}, i = 1, 2, 3, \dots, N, A_{ij} \in \mathbb{R}$ – линейные коэффициенты, входящие в правые части.

Дана задача Коши, то есть в начальный момент времени известны значения параметров:

$$x_i = 1.0, i = 1, 2, 3, \dots, N, t^0 = 0.0.$$

Необходимо найти значения параметров $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ для $\forall t > t^0$.

Для оценки производительности воспользуемся методом Эйлера первого порядка точности.

Пусть начальные значения параметров известны всем нитям. Вычисления могут быть распараллелены за счет вычисления на разных нитях новых значений параметров. Но для перехода к следующему моменту времени необходима синхронизация и видимость новых значений параметров всеми нитями. В данном случае синхронизация не будет приводить к потерям времени, так как вычисление правых частей потребует одинаковых затрат времени на каждой нити. Поэтому и была выбрана система обыкновенных дифференциальных уравнений с линейными коэффициентами, чтобы оценить производительность вычислительной системы, не теряя времени на несбалансированный алгоритм.

Значения коэффициентов системы $A_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, N, j = 1, 2, 3, \dots, N$, хранятся в файле и получены с помощью нахождения матрицы, у которой известны ее собственные числа. Количество параметров в системе обыкновенных уравнений выбирается произвольно и может быть достаточно большим числом.

Решим данную задачу с помощью технологии OpenMP. Гетерогенная вычислительная система имеет четыре ядра с общей памятью. Будем использовать четыре нити в параллельной секции. Организуем вычисления таким образом, чтобы равномерно загрузить все нити. Для этого разделим уравнения между нитями на приблизительно одинаковые части. Каждая нить будет вычислять новые значения для своей части параметров, и все нити работают одновременно, что должно дать ускорение вычислений.

При использовании технологии CUDA все вычисления будем проводить на устройстве (Device). Определим функцию, которая вычисляет правые части, причем каждая нить, обратившись к данной функции, будет вычислять только одну правую часть.

Функция запуска ядра выполняет векторные операции, в которых каждая нить вычисляет только одну координату вектора, и все нити работают одновременно. Это дает заметное ускорение вычислений. Для перехода к следующему шагу вычислений обязательно необходима синхронизация для того, чтобы вновь вычисленные значения были доступны все нитям.

Основная программа, которой первой передается управление при запуске программы, определяет переменные, используемые в программе, считывает из файла массив линейных коэффициентов. Для более удобной работе на Device этот массив из двумерного переписывается в одномерный массив. Выделяется память под массивы на Device. На ядре определяется основной цикл вычислений. Для определения ускорения вычисляется время выполнения расчетов. Для определения ускорения вычислений по закону Амдала вычислим время, потраченное на выполнение последовательной части параллельной программы.

Воспользуемся более точным методом второго порядка точности – методом Рунге-Кутты 2 (улучшенный метод Эйлера). Этот метод состоит из двух этапов. Пусть начальные значения параметров известны

всем нитям. Вычисления могут быть распараллелены за счет вычисления на разных нитях значений параметров в средней точке шага по времени, значений правых частей в средней точке шага по времени и вычисления новых значений параметров. Но на первом и втором этапах вычислений необходима синхронизация и видимость новых значений параметров всеми нитями. В данном случае синхронизация не будет приводить к потерям времени, так как вычисление правых частей потребует одинаковых затрат времени на каждой нити за счет специально подобранной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. По сравнению с выше приведенным методом Эйлера, в данном методе три раза необходимо проводить синхронизацию.

Для решения данной задачи воспользуемся технологией OpenMP. Будем использовать четыре нити в параллельной секции. Организуем вычисления таким образом, чтобы равномерно загрузить все нити. Для этого разделим уравнения между нитями на приблизительно одинаковые части. Каждая нить будет вычислять значения для своей части параметров, и все нити работают одновременно. Затем необходима синхронизация. После этого все нити одновременно вычисляют значения правых частей для своей части параметров. Опять проводим синхронизацию, и вычисляем новые значения параметров на четырех нитях, что даст ускорение вычислений.

При использовании технологии CUDA все вычисления будем проводить на устройстве (Device).

Функция запуска ядра Kernel() выполняет векторные операции, в которых каждая нить вычисляет только одну координату вектора значений параметров в средней точке шага по времени, и все нити работают одновременно. Для перехода к вычислению правых частей в средней точке шага по времени обязательно необходима синхронизация для того, чтобы вновь вычисленные значения были доступны все нитям. После этого вновь проводим синхронизацию и вычисляем на Device новые значения параметров. На ядре определяется основной цикл вычислений. Для определения ускорения вычисляется время выполнения расчетов и время выполнения последовательной части программы.

Проведен анализ результатов численных экспериментов. При использовании метода Эйлера были проведены расчеты при различном числе параметров в системе $N = 10, 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500$. При этом замерялось время вычислений в однопроцессорном варианте, при использовании системы параллельного программирования OpenMP и с помощью технологии CUDA. Результаты экспериментов представлены в таблице 1. Время вычислений указано в секундах.

Как видно из таблицы 1, по мере увеличения числа параметров N увеличивается время расчетов. При небольших размерностях лучшие результаты получены в однопроцессорном варианте расчета. При числе параметров меньших 450 ($N < 450$) программа на OpenMP показывает лучший результат, чем программа на CUDA. Как только число параметров N больше или равно 450 происходит качественный скачок: время

вычислений в однопроцессорном варианте и с использованием технологии OpenMP резко увеличивается, в то время как расчеты на CUDA стабильны.

Таблица 1. **Время вычислений методом Эйлера**

N	Однопроцессорный вариант	Программа на OpenMP	Программа на CUDA
10	0,047094	8,327547	8,784894
20	0,159673	8,196842	11,474345
50	0,833504	8,310476	27,116039
100	3,287302	8,861372	27,618175
150	7,304334	9,852252	24,870775
200	12,765929	11,479267	30,059693
250	20,468849	13,725429	26,028151
300	28,414301	15,936759	28,130957
350	38,636586	18,907467	28,130957
400	50,303642	22,365452	26,320322
450	685,751731	116,339088	25,283171
500	1657,96427	258,010311	31,155687

Отсутствие скачка по времени для CUDA при увеличении числа параметров N объясняется самой архитектурой графических плат, которая основана на концепции SIMD (Single Instruction stream – Multiple Data stream). На гетерогенной системе одна инструкция позволяет одновременно обрабатывать множество данных. Так как количество ядер исполнения на плате равно 240, то при выполнении программы на OpenMP на одной нити вычисляется 125 параметров при N равном 500, а на CUDA на одной нити вычисляются 2-3 параметра. На CUDA запускается одна инструкция для всех нитей, она одновременно выполняется на всех блоках системы.

При реализации на OpenMP каждая нить содержит как инструкцию, так и данные, с которыми работает. После выполнения инструкции каждая нить обращается к общей памяти, куда записывает вычисленные

значения. Очевидно, что при небольшом числе параметров можно проводить вычисления как на OpenMP, так и CUDA, причем CUDA будет выполняться дольше. Но как только переходим к большим размерностям, преимущества расчетов на CUDA очевидны.

Если учитывать результаты расчетов и в однопроцессорном варианте (рис. 1), то преимущества CUDA становятся еще более очевидными. На рис.1 время указано в миллисекундах. При выполнении вычислений на больших расчетных областях использование однопроцессорного варианта совершенно неэффективно. В случае проведения расчетов в режиме реального времени, когда необходимо быстро реагировать на изменение реальных условий, целесообразным является использование технологий OpenMP и CUDA при небольших размерностях и CUDA при больших размерностях расчетной области.

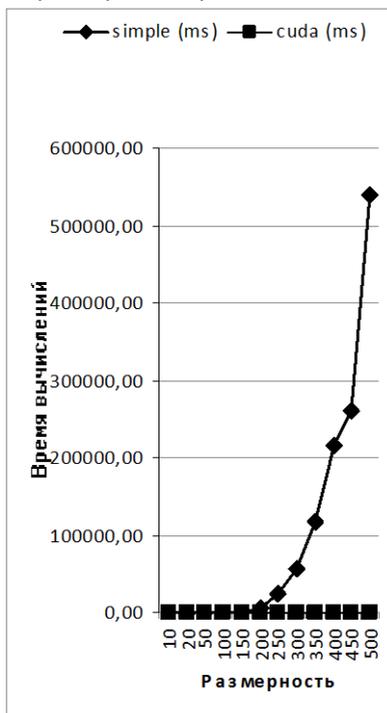


Рис. 1. Зависимость времени вычислений от размерности системы в однопроцессорном варианте и на CUDA.

Для вычисления ускорения воспользуется отношением времени вычислений при использовании одной нити к времени вычислений на нескольких нитях и законом Амдала.

Значения ускорения вычислений на OpenMP и CUDA в зависимости от размерности системы представлены в таблице 2.

Таблица 2. Ускорение вычислений

N	360	400	450	500
OpenMP	2,12358	2,24917	5,90494	6,44152
CUDA	1,42549	1,91099	27,12285	51,76969

При использовании метода Рунге-Кутты 2 были проведены расчеты при тех же значениях параметров в системе $N = 10, 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500$. При этом замерялось время вычислений в однопроцессорном варианте, при использовании системы параллельного программирования OpenMP и с помощью технологии CUDA. Результаты экспериментов представлены в таблице 3. Время вычислений указано в секундах.

Таблица 3. Время вычислений методом Рунге-Кутты 2

Номер опыта	N	Однопроцессорный вариант	Программа на OpenMP	Программа на CUDA
1	10	0,0869	10,7992	9,1374
2	20	0,2974	10,8086	14,0926
3	50	1,6095	11,0511	33,1983
4	100	6,5553	12,5667	32,8061
5	150	4,3347	14,5489	32,7685
6	200	25,2397	17,5807	27,3600
7	250	39,2823	21,6133	28,3385
8	300	56,4879	26,2712	26,3089
9	350	76,9093	31,8031	26,5860
10	400	99,9336	38,8574	26,3846

11	450	1373,073	227,1335	25,3642
12	500	—	511,0161	35,3607

Расчеты в однопроцессорном варианте при N равном 500 не проводились, так как расчеты при N = 450 уже заняли приблизительно 23 минуты. Как только число параметров N становится больше 400, время выполнения программы на OpenMP резко растет, в то время как программа на CUDA выполняется на 10 сек. дольше по сравнению с предыдущим опытом.

При сравнении времени выполнения программ на CUDA методами Эйлера и Рунге-Кутты видно, что временные затраты незначительно различаются не смотря на то, что в методе Рунге-Кутты 2 необходимо выполнять синхронизацию данных три раза. Так как время вычислений приблизительно одинаковое, то предпочтительно применять метод Рунге-Кутты 2 как метод с более высоким порядком точности.

Для оценки производительности гетерогенной вычислительной системы использован тест LINPACK. Для оценки производительности суперкомпьютеров существует набор тестов производительности HPC Challenge Benchmark. Входящие в него тесты предназначены для оценки нескольких атрибутов суперкомпьютеров, которые значительно влияют на производительность реальных высокопроизводительных задач. В этот набор входит тест HPL (Highly Parallel Linpack). Тест LINPACK оценивает производительность вычислений с плавающей запятой и оценивает коммуникацию между частями суперкомпьютера. В тесте LINPACK выполняется решение плотной СЛАУ методом LU-разложения. Он используется для составления списка Top500 суперкомпьютеров мира.

Тест состоит в решении системы линейных уравнений с помощью LU-факторизации. Основное время затрачивается на векторные операции типа FMA (умножение и сложение). Производительность определяется как количество «полезных» вычислительных операций над числами с плавающей точкой в расчете на 1 секунду.

Для выполнения вычислений используется библиотека BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms) – набор базовых операций линейной алгебры. Вычислительные ядра в библиотеке BLAS написаны на автокоде.

Для оценки производительности необходимо, чтобы все устройства гетерогенной системы работали с максимальной нагрузкой. В этом случае получим пиковую производительность. Конечно, при решении реальных задач трудно получить такую производительность гетерогенной вычислительной системы.

Для оценки производительности гетерогенной вычислительной системы воспользуемся функцией, выполняющей перемножение матриц и

умножение полученной матрицы на скаляр. Размер матриц N будем изменять от 300 до 6000 элементов.

Проведены вычисления для однопроцессорного варианта и с использованием технологии CUDA.

Проведем анализ результатов Пусть N – размер матриц принимает значения 300, 350, 400, 450, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 5000, 6000. Расчеты для N = 5000 и N = 6000 в однопроцессорном варианте не проведены, так как уже при N = 4000 расчеты занимают 9 минут. Полученные результаты представлены в таблице 3.

При размерностях меньших или равных 1000 элементов полученное время приблизительно одинаково как в однопроцессорном, так и в многопроцессорном вариантах. По мере увеличения размерности N различие становится все более очевидным. При N больших или равных 5000 элементов вычисления в однопроцессорном варианте дольше 10 минут, в то время как вычисления на CUDA выполнялись приблизительно за одну минуту.

Таблица 4. **Время выполнения теста LINPACK**

N	Однопроцессорный вариант (время в секундах)	Программа на CUDA (время в миллисекундах)
300	1,0	0,255168
350	1,1	0,356832
400	1,5	0,471136
450	1,6	0,679136
500	1,7	0,976736
1000	6,0	6,312384
1500	25,0	20,524288
2000	56,0	47,921024
2500	118,0	93,937347
3000	216,0	157,646179
3500	360,0	251,305191
4000	540,0	374,056915
5000	—	735,291565

6000	—	1254,519531
------	---	-------------

Можно сделать вывод, что матрицы размера 100x100 или 1000x1000 слишком малы для гетерогенной вычислительной системы. Только при размере 6000x6000 можно подойти к важным и интересным значениям оценки производительности. Только при решении задач такой и выше размерностей можно получить пиковую производительность.

Таким образом, проведено исследование производительности гетерогенной системы на системе обыкновенных дифференциальных уравнений с линейными правыми частями с помощью методов Эйлера и Рунге-Кутты 2. Представлены результаты для обоих методов. Результаты, полученные при использовании метода Рунге-Кутты 2, аналогичны результатам для метода Эйлера, но сам метод имеет второй порядок точности.

Так же проведено исследование с помощью программы cuBlas, входящей в общепринятый тест производительности суперкомпьютеров LINPACK.

Использование CUDA на гетерогенной системе дает наилучшие результаты при больших размерностях системы по сравнению с OpenMP.

Литература

1. **Воеводин В.В.**, Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ – Петербург, 2002. – 608с.
2. **Эндрюс Г.Р.** Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования.: Пер.с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 512с.
3. **Эхтер Ш.**, Робертс Дж. Многоядерное программирование. – СПб.: Питер,2010. – 316 с.
4. **Боресков А.В.**, Харламов А.А. Основы работы с технологией CUDA. – М.: ДМК Пресс, 2011, – 232с.
5. **Сандерс Дж.**, Кэндрот Э. Технологии CUDA в примерах: введение в программирование графических процессоров: Пер. с англ. – М.:ДМК Пресс, 2011. – 232 с.
6. **Миллер Р.**, Боксер Л. Последовательные и параллельные алгоритмы: Общий подход. Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 406 с.: ил.

И.Ф.Ясинский, к.т.н., Н.В.Харламова, д.м.н., Т. В.Чаша, д.м.н.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34,
Научно-исследовательский институт Материнства и детства им. В.Н.Городкова
153045 г. Иваново, ул. Победы 20,
E-mail: igor2266@yandex.ru

Компьютерная медицинская диагностика с применением интеллектуальных средств и высокопроизводительной вычислительной техники

Аннотация. Выполнен обзор существующих интеллектуальных систем медицинской диагностики. Приведен ряд высокопроизводительных решений. Создана обучаемая нейросетевая структура, которая на основе анализа вариабельности ритма сердца формирует оценку состояния сердечно-сосудистой системы новорожденных, а также выдает прогноз о динамике состояния.

Ключевые слова: нейронная сеть, параллельные вычисления, медицинские программные комплексы

I.F.Yasinsky, Ph.D., N.V.Kharlamova, MD, T.V.Chasha, D.Sc.

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34,
Research Institute of Maternity and Childhood. V.N.Gorodkova
153045 Ivanovo, st. Victory 20,
E-mail: igor2266@yandex.ru

Computer Medical Diagnostics using intelligent means and high-performance computing

Abstract. A review of the existing intellectual systems of medical diagnostics. A number of high-performance solutions. A trained neural network structure was created, which, based on the analysis of heart rate variability, forms an assessment of the state of the cardiovascular system of newborns, and also gives a forecast about the dynamics of the state.

Keywords: neural network, parallel computing, medical software systems

Известно, что мир науки пронизан взаимным влиянием различных ее сфер друг на друга. В связи с этим неизбежно появление в медицине компьютерных систем, использующих принципы параллельных вычислений и нейросетевых технологий. Очевидно, что развитие компьютерной техники происходит в направлениях ускорения вычислений и повышения ее интеллектуальности. Среди значимых с точки зрения практики тенденций можно упомянуть рост популярности многоядерной и

многопроцессорной техники. Компании NVIDIA и ATI, накопив опыт и поняв, что вычислительная мощность их видеокарт уже стала сравнима с суперкомпьютерами, выпустили графические ускорители со специальной архитектурой, позволяющей создавать на их основе высокопроизводительные параллельные приложения [1].

Диагностика рака молочной железы. За последние 20 лет возросло количество женщин страдающих раком молочной железы, интенсифицировались исследования, направленные на предотвращение и лечение этого заболевания.[2]Конечная цель состоит в том, чтобы диагностировать рак груди на ранней стадии и, следовательно, избежать побочных эффектов облучения и химиотерапии, неблагоприятных и летальных исходов. Поэтому прилагаются усилия для поиска быстрых и точных методов с минимальной инвазией для диагностики начальных симптомов рака молочной железы.

«Золотым стандартом» диагностики рака молочной железы является маммография [3]. Однако, у этого современного метода диагностики есть несколько ограничений. Необходимо получить два или более изображения, снимки должен интерпретировать квалифицированный врач, способный распознать потенциальную опухоль. Кроме того, частые рентгеновские снимки сопряжены с риском облучения пациентки. Ультразвуковые исследования безопаснее рентгеновских, поэтому чаще используются в комплексной диагностике заболевания[4]. Для диагностики патологии используются различные ультразвуковые программы и методики (Techni Scan Medical Systems, в т.ч.трехмерное изображение с использованием системы Svava) [5]. При этом специфичность метода – низкая (10-20%).

Исследователи из университета Дьюка обучили нейронную сеть распознавать маммограммы злокачественной ткани на основе восьми особенностей, с которыми обычно имеют дело радиологи [6]. Оказалось, что сеть способна решать поставленную задачу с чувствительностью около 100% и специфичностью 59%. В клинике Майо (Миннесота) нейросеть анализировала результаты ультразвукового исследования молочной железы и обеспечила специфичность 40%. Кроме того, последние исследования показали возможность использования нейросети для прогнозирования рецидивов заболевания (медицинский факультет Техасского университета [6].

Кардиодиагностика. Диагностика инфаркта миокарда. Нейросетевые технологии способны оказать содействие в диагностике инфаркта миокарда. По статистике врач правильно диагностирует инфаркт миокарда у 88% больных и ошибочно ставит этот диагноз в 29% случаев. Группа исследователей Калифорнийского университета в Сан-Диего использовала многослойный персептрон для распознавания инфаркта миокарда у пациентов, поступающих в приемный покой с острой болью в груди [7]. Целью было создание инструмента, предлагающего рекомендательную помощь врачам при анализе потока данных, характеризующих состояние поступившего больного и, соответственно, совершенствование диагностики этого заболевания. В качестве входных данных учитыва-

лись 20 параметров, среди которых были: возраст, пол, локализация боли, реакция на нитроглицерин, тошнота и рвота, потение, обмороки, частота дыхания, учащенность сердцебиения, предыдущие инфаркты, диабет, гипертония, вздутие шейной вены, ряд особенностей ЭКГ и наличие ишемических изменений. Сеть продемонстрировала точность 92% при обнаружении инфаркта миокарда и дала только 4% случаев сигналов ложной тревоги, ошибочно подтверждая направление пациентов без инфаркта в кардиологическое отделение.

Другим примером применения нейросетевых технологий служит пакет кардио диагностики, разработанный фирмой RES Informatica совместно с Центром кардиологических исследований в Милане [8]. Программа позволяет осуществлять неинвазивную кардио диагностику на основе распознавания спектров тахограмм. Тахограмма представляет собой гистограмму интервалов между последовательными сердцебиениями, и ее спектр отражает баланс активностей симпатической и парасимпатической нервной системы человека, специфично изменяющейся при различных заболеваниях. В данное время можно констатировать, что нейронные сети превращаются в инструмент кардио диагностики - ряд госпиталей Великобритании использует нейронные сети для предупреждения инфаркта миокарда. [7]

Артериальная гипертония. В Италии разработана экспертная система для диагностики и лечения артериальной гипертонии [9]. Система включает в себя три нейросетевых модуля, причем ответы одних являются входными данными для других. В начале исследования больному проводят измерение артериального давления каждые полчаса в течение суток. Данные за каждый час усредняются. Таким образом, образуется массив из 48 величин артериального давления (по 24 для систолического и диастолического). После этого первый нейросетевой модуль, на основании данных о поле и возрасте больного рассчитывает аналогичные "должные" величины и сравнивают их с реальными. Параллельно второй модуль на основании клинических данных (симптоматика, анамнез) рассчитывает возможные сочетания гипотензивных лекарственных средств, которые могут быть использованы для лечения данного больного. Таким образом, создается оптимальная для пациента схема лечения гипертонии с назначением суточного (почасового) графика приема больным лекарств.

В ФГБУ «Ивановский НИИ материнства и детства им. В.Н. Городкова» Минздрава России проводятся исследования в области применения инновационных информационных технологий, включая интеллектуальные системы и нейронные сети, для повышения эффективности диагностики заболеваний. Известен метод оценки состояния пациента при помощи анализа variability ритма сердца [10]. В рамках исследования был сформирован массив записей RR-интервалов для новорожденных детей с хронической внутриутробной гипоксией с постгипоксической кардиопатией. Каждая запись ведется на протяжении пяти минут и представляет собой последовательность численных значений временных промежутков между сердечными сокращениями, выражен-

ных в миллисекундах. Эти записи используются для обучения искусственных нейронных сетей [11] прогнозу исхода нарушений сердечно-сосудистой системы в виде выздоровления, сохранения нарушений на периоду году жизни и других вариантов.

Предполагается, что формирование для каждого пациента нескольких исследований ВРС, отражающих динамику его состояния в разные периоды (например, при рождении, через 1 неделю и через 2 недели) позволит использовать эти данные для более эффективного обучения нейронной сети, направленной на прогнозирование исхода заболевания и повысить точность работы системы. Использование программной диагностики заболеваний имеет ряд преимуществ. Качество работы компьютерной системы стабильно, при этом минимизируется влияние человеческого фактора. Кроме того, нейронные сети, являясь представителями интеллектуальных систем, способны применять законы, которые современной медицине пока малоизвестны. Таким образом, имеются основания предполагать, что в скором времени будут предложены новые актуальные методы диагностики и лечения заболеваний с использованием нейросетевых систем.

Литература

1. **Воеводин В.В.**, Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. - СПб.: БХВ-Петербург, 2002. - 608 с.:ил.
2. http://www.pror.ru/forms_big_mammary.shtml
3. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Маммография>
4. <http://kurortklinika.ru/mammografia/>
5. **Сандерс Дж.**, Кэндрот Э. Технология CUDA в примерах: введение в программирование графических процессоров: пер.сангл.Слинкина А.А.,науч.редактор Боресков А.В. - М.:ДМК Пресс, 2011. - 232 с.:ил.ISBN - 978-5-94074-504-4
6. **Золин А.Г.**, Силаева А.Ю. Применение нейронных сетей в медицине // Актуальные проблемы науки, экономики и образования XXI века : материалы II Международной научно-практической конференции, 5 марта - 26 сентября 2012 года : в 2-х ч. Ч. 2 / отв. ред. Е. Н. Шереметьева. - Самара: Самарский институт (фил.) РГТЭУ, 2012. - 392 с.
7. **Ежов А.**, Чечеткин В. Нейронные сети в медицине /Институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк// Открытые системы N4/97 стр. 34-37 - <http://www.icmm.ru/~masich/win/lexion/heyro/medicine.htm>
8. **Андрианова О.** Применение нейронных сетей в медицине// Компьютерный мониторинг и информационные технологии 2008 (<http://uran.donetsk.ua/~masters/2009/fvti/andrianova/library/neuro/default.htm>)
9. **Россиев Д.А.** Медицинская нейроинформатика. // Отдел медицинской нейроинформатики, КрасГМА - <http://www.gotai.net/documents/doc-art-003-08.aspx>
10. **Баевский Р.М.** Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем//Вестник аритмологии. - №24, 2001.
11. **Каллан, Р.** Основные концепции нейронных сетей / пер. с англ. / Каллан, Р.- М.:Издательский дом "Вильямс", 2001. - 283с. : ил.

И. Ф. ЯСИНСКИЙ, к.т.н., А. А. ГУДУХИНА, маг.
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: igor2266@yandex.ru

О реализации турбулентной гидродинамической модели на параллельных интерфейсах CUDA, OpenMP, C# Tasks

Аннотация: Одной из главных проблем при построении математических моделей турбулентных гидродинамических сред остается высокая вычислительная сложность компьютерных расчетов, поскольку требуется получить решение нестационарной задачи с сеткой такого пространственного шага, чтобы он соответствовал размерам самых малых вихревых структур. Получен устойчивый расчет модели динамики сплошной среды с вычислением турбулентной вязкости по модели Секундова на значительном временном отрезке. Построенные решения на различных интерфейсах позволяют достичь ускорения вычислений от 1,5 до 8 раз в зависимости от возможностей аппаратной части.

Ключевые слова: вычислительно сложные задачи, параллельные вычисления, гидродинамика, модели турбулентности

I.F.Yasinsky, Ph.D., A.A.Gudukhina, Master
Ivanovo State Energy University named after V. I. Lenin
153003, Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34
E-mail: igor2266@yandex.ru

On the implementation of a turbulent hydrodynamic model on parallel interfaces CUDA, OpenMP, C # Tasks

Abstract: One of the main problems in the construction of mathematical models of turbulent hydrodynamic media remains the high computational complexity of computer calculations, since it is necessary to obtain a solution to a non-stationary problem with a grid of such a spatial step that corresponds to the size of the smallest vortex structures. A stable calculation of the model of the dynamics of a continuous medium with the calculation of the turbulent viscosity according to the Secundov model for a significant time interval is obtained. Constructed solutions on various interfaces allow you to achieve computational acceleration from 1.5 to 8 times, depending on the capabilities of the hardware.

Keywords: computationally complex problems, parallel computing, hydrodynamics, turbulence models

Для современной науки представляют интерес природные и технологические процессы механики жидкости и газа, осложненные вихревыми турбулентными течениями. Турбулизация приводит к масштабному воздействию на все характеристики поля течения. Особые свойства таких течений находят применение в энергетическом,

теплообменном, технологическом оборудовании ядерной энергетики, аэрокосмической техники, нефтеперерабатывающей промышленности, промышленной теплоэнергетики [1].

Рейнольдсом установлено, что переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при достижении безразмерным комплексом Re , названным впоследствии числом Рейнольдса, некоторого предельного значения $Re_{кр}$. Обычно, с возрастанием Re типичные размеры вихревых образований в потоке становятся меньше. В этом случае требуется получить вычислительное решение нестационарной задачи с расчетной сеткой такого пространственного шага, чтобы он соответствовал размерам самых малых вихревых структур. Это условие переводит задачу в класс вычислительно сложных. В данной работе рассматривается метод ускорения гидродинамической задачи о течении вязкой несжимаемой жидкости с турбулентными процессами на базе платформ CUDA, OpenMP, C# Tasks.

Для оценки возможности ускорения работы была взята область с двумя боковыми впускными отверстиями $U_{вх1}$, $U_{вх2}$ и одним донным выходным $U_{вых}$.

Для описания как ламинарных, так и турбулентных течений применяется система уравнений Рейнольдса (1-3) [4]:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i}; \quad i = 1,2,3; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2)$$

$$S_{ij} = \nu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right). \quad (3)$$

здесь U_i – составляющие вектора скорости по осям x , y , z , ν_{eff} – эффективная кинематическая вязкость.

Эффективная кинематическая вязкость вычисляется суммой молекулярной вязкости ν_{mol} и турбулентной вязкости ν_{turb} .

Давление рассчитывается согласно методу слабой сжимаемости (11) [2]:

$$-c^2 \cdot \text{div} \vec{U} = \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (4)$$

где c – константа, влияющая на характеристики жидкости в системе.

Турбулентная вязкость определена по модели А. Н. Секундова (5)-(6) [3]:

$$\frac{\partial v_{\text{turb}}}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 U_j \frac{\partial v_{\text{turb}}}{\partial x_j} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v_{\text{mol}} + \kappa v_{\text{turb}}) \frac{\partial v_{\text{turb}}}{\partial x_j} \right) + v_{\text{turb}} f \left(\frac{v_{\text{turb}}}{8v_{\text{mol}}} \right) D - \gamma L_{\text{min}}^{-2} (v_{\text{mol}} + \beta v_{\text{turb}}) v_{\text{turb}}. \quad (5)$$

где $f()$ – функция:

$$f(z) = 0,2 \cdot \frac{z^2 + 1,47 \cdot z + 0,2}{z^2 - 1,47 \cdot z + 1}, \quad (6)$$

κ , β , γ – константы, подобранные эмпирическим путем ($\kappa = 2$; $\beta = 0,06$; $\gamma = 50$), D – величина, описывающая силу деформации среды.

Вычислительные эксперименты проводились на расчетной сетке размерностей 100x100, 200x200, ..., 1000x1000.

В процессе расчета модели, поле скоростей сплошной среды приняло теоретически ожидаемую форму, отображенную на рис.1. Можно наблюдать теоретически ожидаемые вихревые образования и турбулентные пульсации скорости в правом верхнем и нижнем левом углах расчетной области.

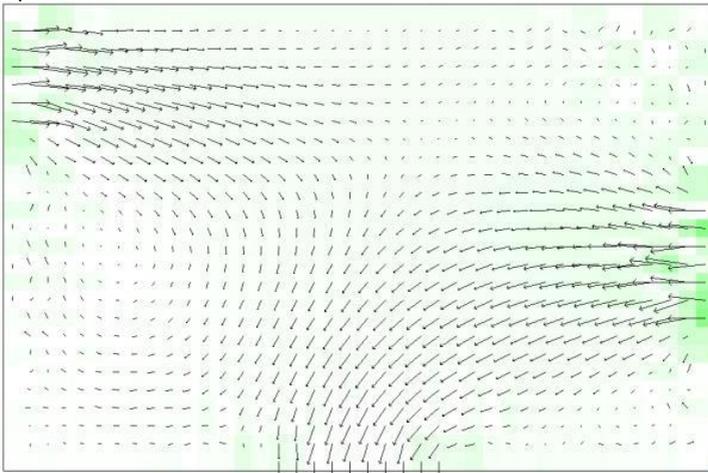
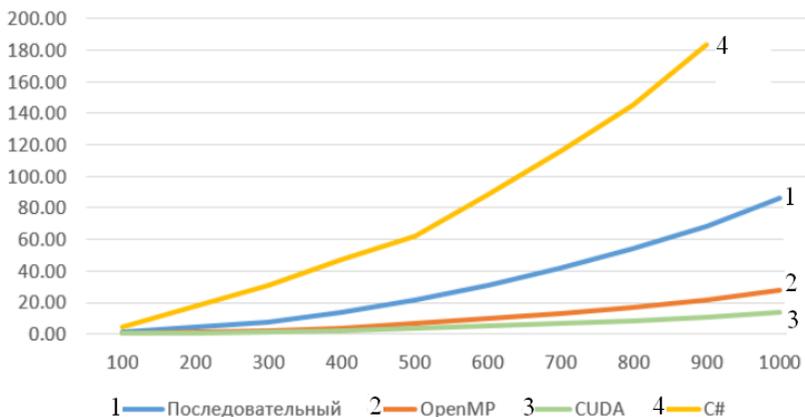


Рис. 1. Поле скоростей при расчете математической модели движения вязкой несжимаемой жидкости

Рис. 2 содержит результаты по затратам машинного времени для последовательного и параллельного алгоритмов с использованием технологий CUDA, OpenMP. Последовательная программа запускалась на одном ядре Intel Core i7 частотой 2,2 ГГц. Параллельные реализации на OpenMP и C# Tasks запускались на том же процессоре на 4-х ядрах. Параллельные блоки CUDA проводились на NVIDIA GTX 1050.



P

ис. 2. Сравнительный график затрат машинного времени

Параллельный алгоритм с использованием технологии CUDA ускорил вычисления в 7 раз на современной видеокарте NVIDIA GTX 1050 с computer capability 6.1. Использование параллельной технологии OpenMP языка C++ позволило ускорить вычисления в 3,5 раза. На языке C# использование встроенной многопоточности в данной задаче не эффективно.

Построено устойчивое высокопроизводительное решение вычислительно сложной задачи о моделировании вязкой несжимаемой жидкости с включением турбулентных образований. Исследование показало возможности значительного ускорения при расчете описанной математической модели от 3 до 7 раз по сравнению с последовательной реализацией в зависимости от интерфейса и производительности аппаратной конфигурации.

Литература

1. **Митрофанова О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 288 с.
2. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. — 7-е изд., испр. — М.: Дрофа, 2003. — 840 с, 311 ил., 22 табл. — (Классики отечественной науки).
3. **Ясинский Ф.Н.,** Математическое моделирование процессов вентиляции и отопления в больших производственных, культурных и спортивных помещениях // Ф.Н.Ясинский, А.С. Кокорин, Вестник ИГЭУ. – 2010. - №3. – С.90-92.

Ивановский государственный энергетический университет,
г. Иваново

E-mail: gvozdevs@inbox.ru

ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Аннотация: в работе представлены современные методы интеграции информационных ресурсов: сервис-ориентированный и событийно-ориентированный, а также сценарно-ориентированный метод организации реализации управленческих решений.

Ключевые слова: сервис-ориентированный подход, событийно-ориентированный подход, выполнение управленческих решений, организация информационных ресурсов.

T.V. GVOZDEVA, Candidate of Economics, Associate professor

INTEGRATION OF INFORMATIONAL RESOURCES BASED ON SERVICE-ORIENTED APPROACH

Ivanovo State Power University,
Ivanovo

E-mail: gvozdevs@inbox.ru

Annotation: this article deals with the most modern methods of integration of information resources: a service-oriented and event-driven, but also provides scenario-oriented method of organizing the implementation of management decisions.

Keywords: a service-oriented architecture, an event-driven architecture, the implementation of management decisions, the organization of information resources.

Корпоративная информационная система – это открытая, масштабируемая, автоматизированная система, включающая в себя совокупность разнородных распределенных информационных систем и направленная на информатизацию сотрудников предприятия, а также на автоматизацию бизнес-процессов – процессов принятия управленческих решений: $S_{КИС} = \{S_1 \dots S_n\}$, где n – количество распределенных разнородных информационных систем предприятия, которые являются подсистемами корпоративной информационной системы $S_{КИС}$.

Устойчивый рост количества распределенных информационных ресурсов, сложности структур, постоянное изменение условий функционирования систем, обусловили необходимость централизации информационных ресурсов путем интеграции компонентов КИС, а также необходимость организации процесса принятия и реализации управленческих решений, включая организацию информационного пространства предприятия. Данные проблемы определяют следующие принципы и задачи проектирования системы.

Принцип *проблемной ориентации* [1, с.44], согласно которому каждая возникающая проблема W_j на предприятии требует индивидуально-го подхода к решению с помощью создания технологии t_{ij}^0 решения проблемы, которая включает в себя последовательность действий f_{ij} , необходимых для решения W_j . Проблема в данном контексте является системообразующим фактором, а также необходимым и достаточным условием развития систем, что отражено формулой (1).

$$P = F(R) \rightarrow \Delta R \rightarrow U_j \rightarrow W_j \rightarrow \{t_{ij}^0 = ((f_{ij}|q_f), (r_{ij}|q_r), (p_{ij}|q_p), s_m)\}, \quad (1)$$

где q_p – качество продуктов, q_r – качество ресурсов, p – продукты.

Принцип *централизации информационных ресурсов* подразумевает обеспечение единого пользовательского унифицированного интерфейса для доступа к распределенным информационным ресурсам r_{ij} , предоставляемых независимыми источниками данных S_i , которые являются распределенными информационными системами в рамках S_{KMS} . Централизацию r_{ij} в данном случае можно добиться только путем интеграции S_i .

Принцип *сценарной организации принятия и реализации управленческих решений* определяет сценарий C_i основной информационной единицей, направленной на повышение организованности исполнителей управленческих решений, выраженных технологией t_{ij}^0 решения проблемы W_j , что формализовано представлено моделью (2).

$$C_i = \{\{F_i\}, \{P_i\}, \{R_i\}, \{E_i\}, \{G_{FRi}\}, \{G_{FPi}\}, \{L_i\}\}, \quad (2)$$

где F_i – предметно-ориентированное задание или действие, выполняемое над объектом R_i , в результате выполнения которых достигаются цели $Z_i \equiv P_i$; E_i – структурные элементы, которые переключают функции, т.е. передают управление от одной функции к другой; они могут быть также результатом выполнения функций; G_{FRi} – соответствие на множествах $\{F_i\}$ и $\{R_i\}$; G_{FPi} – соответствие на множествах $\{F_i\}$ и $\{P_i\}$; $\{L_i\}$ – связи на множестве $\{F_i\}$.

На основе вышеуказанных принципов сформулированы задачи системы.

Задача «Поддержка реализации информационных задач» направлена на обеспечение исполнителей управленческих решений и ответственного лица информацией о состоянии процесса решения проблемы W_j , в виде результатов выполнения информационных задач, составляющих информационные функции $\{f_1 \dots f_n\}$, а также набора сценариев принятия и реализации управленческих решений.

Задача «Обеспечение единого доступа к информационным ресурсам предприятия» направлена на обеспечение исполнителей управленческих решений необходимыми информационными ресурсами $\{r_1 \dots r_n\}$ для выполнения функций $\{f_1 \dots f_n\}$ в контексте проблемы W_j . В рамках корпоративной информационной системы ресурсы $\{r_1 \dots r_n\}$ являются распределенными, поэтому вектор данной задачи направлен, в том числе на организацию существующих информационных ресурсов в контексте W_j .

Основными принципами разработки являются: принцип проблемной ориентации, принцип централизации информационных ресурсов, принцип сценарной организации принятия и реализации управленческих решений.

Задача F_1 «Поддержка реализации информационных задач» предусматривает использование сценарно-ориентированный подхода. Анализ существующих методов функционального моделирования, в числе которых были исследованы семейство методов IDEF, DFD-метод, методология ARIS (нотация eEPC), позволил обосновать рациональность применения метода eEPC в силу его событийной ориентации на функциональное представление. События устанавливают порядок на множестве автоматизированных и не автоматизированных действий, направленных на решение проблемы, посредством идентификации результата предшествующей функций к требуемому действию.

Реализация задачи «Обеспечение единого доступа к информационным ресурсам предприятия» основывается на сервис-ориентированном подходе к интеграции распределенных информационных систем и ресурсов. Среди множества существующих методов были проанализированы: интеграция на уровне данных, интеграция с помощью файлового обмена, интеграция на уровне брокеров, сервис-ориентированный подход (SOA) и событийно-ориентированный подход (EDA). Сервис-ориентированный подход в построении программной архитектуры позволяет реализовать событийно-ориентированную модель управления решением проблемы, посредством возможности асинхронного выполнения информационных функций с помощью управляемой очереди событий, инициация которых происходит в процессе выполнения сценария C_i . Информационные системы предприятия могут быть представлены, как набор сервисов, которые используются в процессе реализации управленческих решений предприятия. Формализовано сервис можно представить моделью (3):

$$R_i = g_j (f_j(R_i)), \quad (3)$$

где R_i – результат работы сервиса (информация или данные); R_i – данные, необходимые для работы сервиса (ресурсы); f_j – информационный процесс, направленный на преобразование R_i в R_i ; g_j – информацион-

ный процесс, направленный на обработку запроса к сервису, получение необходимого множества данных R_i и инициация работы функции f_j .

EDA в отличие от SOA имеет возможность адаптироваться под изменяющиеся условия существования системы [2, с.3], благодаря событиям, которые выполняют функцию перевода сценария из одного состояния в другое, в зависимости от структуры C_i . Множественность вероятных исходов выполнения функций F_i , а также нарастающее число данных функций, приводит к необходимости моделирования бизнес-процесса в событийно-ориентированном представлении. Кроме того, EDA позволяет управлять множеством поступающих событий $\{E_i\}$, согласно алгоритму FIFO.

Программная реализация задач выполнена с использованием следующих Web-ориентированных технологий и программных средств: ASP.NETWebApi, AngularJS, EntityFramework, RaphaelJS.

Представленная разработка может быть использована при решении задач интеграции информационных систем, базирующихся на web-технологиях. Эффективность организации распределенных информационных систем посредством внедрения представленного программного инструментария определяется степенью рациональности организации как транзакционных, так и организационных решений в области профессиональной проблемы. Вместе с тем применение событийно-ориентированной организации процессов обеспечивает вариативность решения поставленных задач и проблем предприятия.

Литература

1. **Гвоздева Т.В.** Информационная технология организационного развития предприятия: монография / Т.В. Гвоздева, А.А. Белов; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 192 с.
2. **Волович К.И.** Методология создания веб-сервисного информационного взаимодействия в системе распределенных ситуационных центров / К.И. Волович, С.А. Денисов // Системы и средства информатики. – 2016, Т.26, вып. 4, С.51–59.

УДК 621.926

Д.А. ОСИПОВ, аспирант, В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор,

В.Е. МИЗОНОВ, д.т.н., профессор, А.В. МИТРОФАНОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Моделирование регенерации формовочной смеси в замкнутом цикле измельчения

Аннотация: Представлена математическая модель процессов измельчения и классификации разнородных компонентов смеси в замкнутом цикле измельчения. Для описания кинетики измельчения и классификации формовочной смеси предложены нелинейные модели, позволяющие учитывать влияние кинетики измельчения и классификации одного компонента на кинетику измельчения и классификации другого компонента смеси. Приведены результаты расчетного анализа регенерации формовочной смеси путем ее измельчения и классификации в замкнутом цикле измельчения со струйной мельницей кипящего слоя.

Ключевые слова: формовочная смесь, регенерация, разнородные компоненты, измельчение, классификация, замкнутый цикл, разделение компонентов.

D.A. OSIPOV, postgraduate student, V.P. ZHUKOV, doctor of Engineering, professor,

V.E. MIZONOV, doctor of Engineering, professor, A.V. MITROFANOV, Candidate of
Engineering, docent,

**Ivanovo State Power Engineering University, Rabfakovskaya 34,153003
Ivanovo**

Simulation of the molding mixture regeneration in a closed grinding circuit

Abstract: A mathematical model of grinding and classification of dissimilar components mixture in a closed grinding circuit is presented. In order to describe the kinetics of grinding and classification of the molding mixture, a nonlinear model has been proposed that allows taking into account the influence of the kinetics of grinding and classification of one component on the kinetics of grinding and classification of another component of the mixture. The results of computational analysis of the molding mixture regeneration by grinding and classification in a closed grinding circuit with a fluidized bed jet mill are presented.

Key words: molding mixture, regeneration, dissimilar components, grinding, classification, closed circuit, separation of components.

Для производства отливок разнообразных деталей и их элементов используются литейные формы, для изготовления которых применяются специальные смеси, представляющие собой сочетание высокоогнеупорных веществ с песчано-глинистыми составляющими (ПГС) [1]. В последние десятилетия в связи с постоянным ростом стоимости свежих песков и ростом тарифов на вывоз отработанных материалов, все острее встает вопрос повторного использования отработанных формовочных смесей, для чего требуется их регенерация [2]. В настоящее время для регенерации смесей широко используются системы механической регенерации, в которой для удаления с гранул песка посторонних включений предусматриваются операции оттирки, пылеудаления, просеивания и охлаждения зерен смеси [1]. Более перспективными в настоящее время считаются динамические системы регенерации, в которых для удаления из смеси посторонних включений используются многостадийные установки с мельницами и классификаторами. На основе анализа существующих систем регенерации предлагается более компактная установка со струйной мельницей кипящего слоя [3], в которой многостадийная очистка целевого компонента реализуется в одном аппарате за счет многократной циркуляции смеси.

Целью данного исследования является поиск путей повышения эффективности разделения компонентов формовочной смеси в установках со струйной мельницей кипящего слоя путем ее моделирования и расчетного анализа.

Теоретическая модель измельчения смеси разнородных компонентов описана с использованием дискретных моделей уравнения Больцмана, разработанных нами ранее [4]. На основе анализа конструкции струйной мельницы кипящего слоя предложена технологическая схема установки для регенерации формовочной смеси (рис. 1,а) и структура расчетного пространства для ее моделирования (рис. 1,б). Ячейки расчетного пространства, которые относятся к размольной камере, центробежному и выносному классификаторам, обособлены на этом рисунке с указанием стрелками связей между этими ячейками.

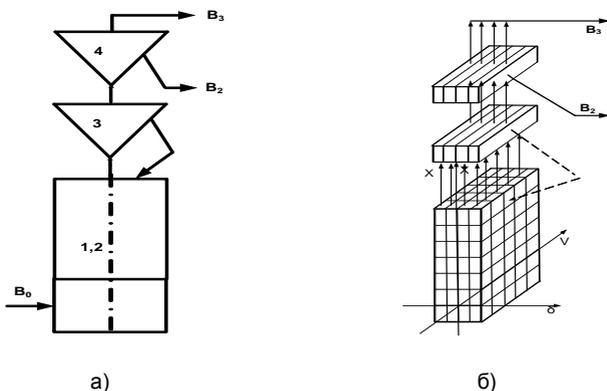


Рис. 2. Расчетная схема потоков (а) и расчетное пространство модели (б) установки для регенерации формовочной смеси со струйной мельнице кипящего слоя: 1 – размольная камера; 2 – гравитационная ступень классификации; 3 – центробежная ступень классификации; 4 – выносной классификатор; B_0 – подача исходного порошка, B_2 – выход крупного (готового) продукта, B_3 – выход мелкого продукта

В качестве определяющих координат в расчетном пространстве выбраны размер частиц δ , скорость движения частиц v и высота положения частиц в слое x . При построении модели измельчения для смеси разнородных компонентов искомая плотность распределения вещества по ячейкам расчетного пространства f определяется отдельно для каждого компонента. Между компонентами смеси в рамках модельного описания разрешается обмен энергией, но запрещается обмен веществом. При проведении вычислений многомерное расчетное пространство преобразуется в одномерную цепь ячеек [4], искомая плотность распределения вещества по ячейкам представляется одномерным вектором $f = \{f_i\}$, где индекс i показывает номер элемента в одномерной цепи. Указывая для каждой ячейки адреса ячеек, в которые возможен переход, и вероятности этих переходов p_{ij} , эволюция состояния системы во времени описывается выражением $f_i^{k+1} = \sum_j p_{ij} f_j^k$, где k – номер шага по времени. Для описания процесса классификации в рамках единой методологии используется модель в виде кривой разделения классификатора, которую в англоязычной литературе называют также кривой Тромпа [5].

Результаты расчетного анализа регенерации формовочной смеси в замкнутом цикле измельчения получены в виде зависимости массовой концентрации целевого компонента в готовом продукте и эффективность его выделения от времени процесса. Согласно технологическим требованиям содержание кварцевого песка в смеси должно составлять не менее 98%. Найденные в ходе расчетных исследований режимные параметры показывают, что массовая доля песка, выделенного при этом, составила $\varepsilon = 92,3\%$. Данные результаты позволяют оценивать экономическую эффективность предлагаемой системы регенерации и выбрать параметры, необходимые для эффективной организации процесса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00028А)

The reported study was funded by RFBR (project № 18-08-00028А)

ЛИТЕРАТУРА

1. Формовочные материалы и технология литейной формы: Справочник // Под общ. ред. С. С. Жуковского. М.: Машиностроение. 1993.
2. Бойченко А. С., Горфинкель В. М., Пышминцев Ю. П. Сухая механическая регенерация на заводах Минтяжмаша // Литейное производство. –1987. –№5. –С.12.
3. Otwinowski H., Zhukov V., Wyleciał T., Belyakov A., Górecka-Zbrońska A. Research and modeling of processes in the fluidized bed opposed jet mill //Technical Sciences. – 2014. –vol. 17. –N.4. –P. 381–390.
4. Жуков В.П., Беляков А.Н. Моделирование совмещенных гетерогенных процессов на основе дискретных моделей уравнения Больцмана // Теор. основы хим. технологии. – 2017. – том 51. – №1. – С.78–84.
5. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г., Барочкин Е.В. Аэродинамическая классификация порошков. –ПресСто, ИГЭУ. 2014.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет
им. В.И. Ленина»
E-mail: idr@ispu.ru

Информационная поддержка энергетического менеджмента на региональном уровне

Аннотация. В докладе приведены результаты организации информационно-аналитического сопровождения региональной энергетической политики в целях оценки эффективности принимаемых решений, направленных на повышение энергетической эффективности и энергосбережения.

Ключевые слова: региональная энергетическая политика, информационная поддержка принятия решений, оценка эффективности энергетического менеджмента

В целях повышения эффективности энергетического менеджмента должны быть определены показатели энергетических результатов и критерии их оценки (критерии эффективности региональной энергетической политики).

В качестве энергетической базовой линии предлагается использовать систему топливно-энергетических балансов региона (ТЭБ). Ретроспективный анализ показателей балансов является основой оценки энергетической результативности.

ТЭБ отражает полное количественное соответствие потоков одного (однородный баланс) или всех видов энергии и энергетических ресурсов (сводный баланс) между стадиями добычи, переработки, преобразования, транспорта, распределения, хранения, конечного использования. При этом сводный ТЭБ позволяет отразить всю полноту взаимосвязей разных систем энергоснабжения и энергопотребления.

В рамках настоящего исследования отработана технология формирования системы топливно-энергетических балансов на основе интеграции в рамках корпоративной информационно-аналитической системы (ИАС ТЭБ) данных мониторинга определенной совокупности поставщиков топливно-энергетических ресурсов, форм федерального статистического наблюдения, а также открытых сведений в сети Интернет.

Сервисы ИАС ТЭБ позволяют выполнять интеграцию и согласование информации различных источников с минимизацией статистических отклонений, а также интегрировать показатели балансов в специализированной аналитической витрине данных.

На основе разработанной методики выполняется оценка результативности энергетической политики. При этом выполняется оценка блоков первичного потребления сводного ТЭБ, преобразования энергии, а также конечного потребления. В качестве критериев оценки использу-

ются показатели энергетической безопасности региона, целевые показатели энергетической эффективности субъектов и объектов ТЭК, индексы, отражающие многофакторное воздействие на величину энергопотребления.

Ретроспективный анализ накопленной в ИАС ТЭБ информации позволяет с помощью методов интеллектуального анализа данных определить средние нормативы энергопотребления, используемые в процессе оценки. Следует заметить, что анализ изменения средних нормативов позволяет судить об эффективности выполненных мероприятий в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

В докладе рассматривается технология формирования системы топливно-энергетических балансов региона. При этом выполняется интеграция информации по следующим ресурсам: нефть, газ попутный нефтяной, нефтепродукты (газ нефтеперерабатывающих предприятий, газ сжиженный углеводородный, мазут, топливо дизельное, топливо печное бытовое, бензин, керосин, газотурбинное и прочее моторное топливо, прочие нефтепродукты), газ природный, газ сжиженный природный, уголь, кокс металлургический, газ горючий искусственный коксовый, дрова, торф, прочее твердое топливо, вторичные энергоресурсы (горючие, тепловые, механические), биогаз, атомная энергия, гидроэнергия и нетрадиционные возобновляемые источники энергии, тепловая энергия, электрическая энергия. Как уже было сказано, что качестве одного из источников информации используются данные мониторинга определенного круга поставщиков ТЭР. При этом анализируется ряд видов деятельности в сфере ТЭК, включая электроснабжение, теплоснабжение, газоснабжение, нефтедобыча и нефтепереработка, добыча угля, торфодобыча, лесозаготовки, торговля топливом. Используется подборка порядка шестидесяти видов экономической деятельности по Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности (ОКВЭД).

Рассматриваемая технология была апробирована совместно с органами исполнительной власти ряда регионов Российской Федерации, курирующими региональную энергетическую политику. Накопленный опыт позволяет судить об эффективности подхода к информационной поддержке энергетического менеджмента, обоснованности принятых программных решений.

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

Математическая модель пороупругого 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

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]:

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

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; Θ_1, Θ_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:

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

Выразим объемные деформации жидкой фазы, соответствующие двум системам пор, через парциальные давления и деформации твер-

дой фазы. Для этого перепишем определяющие соотношения (1) в виде системы двух уравнений относительно Θ_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:

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

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:

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

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 $\Theta_k = \boldsymbol{\varepsilon}_{jk} \cdot \mathbf{E} = \nabla \cdot \mathbf{u}_{jk}$, выражающих объемные деформации жидкой фазы (4), к кинематическим переменным пороупругой задачи $\zeta_k = -\nabla \cdot \phi_k (\mathbf{u}_{jk} - \mathbf{u}_s)$. С учетом известной формулы объемной деформации твердого тела и введенных обозначений (7) соотношения (4) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s - \phi_1^{-1} \zeta_1 &= \frac{1}{R_1^*} (-\phi_1 p_1 - \mathbf{Q}_1 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s) + \frac{1}{R_{12}^*} (-\phi_2 p_2 - \mathbf{Q}_2 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s), \\ \mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s - \phi_2^{-1} \zeta_2 &= \frac{1}{R_2^*} (-\phi_2 p_2 - \mathbf{Q}_2 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s) + \frac{1}{R_{12}^*} (-\phi_1 p_1 - \mathbf{Q}_1 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s). \end{aligned}$$

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

$$\zeta_1 = \mathbf{A}_1 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s + \frac{\phi_1^2}{R_1^*} p_1 + \frac{\phi_1 \phi_2}{R_{12}^*} p_2, \quad (11)$$

$$\zeta_2 = \mathbf{A}_2 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_s + \frac{\phi_2^2}{R_2^*} p_2 + \frac{\phi_1 \phi_2}{R_{12}^*} p_1.$$

Полученные формулы (9) и (11) могут рассматриваться как определяющие соотношения пороупругой 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.

**Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
e-mail: hm_ispu@mail.ru**

Модель гравитационного классификатора

Основной задачей описания процесса гравитационной классификации является нахождение кривой разделения, которую в идеале хотелось бы получить аналитическим путём, решая дисперсионное уравнение. Однако это возможно лишь при очень серьёзных ограничениях на параметры, что зачастую приводит к получению неадекватных результатов. Построение модели гравитационного классификатора на основе ячеечных моделей позволяет снять ряд серьёзных ограничений и получить адекватные результаты. Классификатор разбивается на n ячеек идеального смешения длиной Δx . Эволюция процесса рассматривается через малые конечные промежутки времени Δt , в течение которых материал может переместиться не далее соседней ячейки. Ячейки с последними номерами являются абсорберами, регистрирующими потоки мелкого и крупного продуктов через них в течение одного перехода. Исходный материал подают в ячейку с номером i . Через классификатор проходит газ со скоростью W , соответствующей потоку в пустом классификаторе. Крупность фракции исходного материала характеризуется ее скоростью витания v_s . Текущее состояние процесса было представлено вектором-столбцом \mathbf{S} , а основное эволюционное уравнение в виде

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P}(\mathbf{S}^k + \mathbf{S}_f^k), \quad (1)$$

где k – номер перехода, \mathbf{S}_f^k – вектор подачи исходного материала, \mathbf{P} – матрица классификации – матрица размером $n \times n$, в каждом столбце которой расположены вероятности для материала остаться, перейти в следующую ячейку или вернуться назад. Вероятности связаны с параметрами классификатора и самим процессом по следующим формулам:

$$c_{bi} = d \text{ при } v > 0 \text{ и } c_{bi} = d + v \text{ при } v < 0, \quad (2)$$

$$c_{fi} = d + v \text{ при } v > 0 \text{ и } c_{fi} = d \text{ при } v < 0, \quad (3)$$

$$c_{si} = 1 - v - 2d, \quad (4)$$

где индексы b, f, s относятся к вероятностям перейти назад, вперед и остаться, соответственно, $d = D\Delta t / \Delta x^2$ – безразмерный дисперсионный коэффициент (D – коэффициент макроdiffузии), характеризующий действие на частицы случайных факторов, а

$$v_j = (w_i - v_s) \Delta t / \Delta x \quad (5)$$

- безразмерная скорость движения фракции при реальной скорости потока в ячейке w_i .

На рис.1 показаны результаты расчета, выполненные по описанной модели.

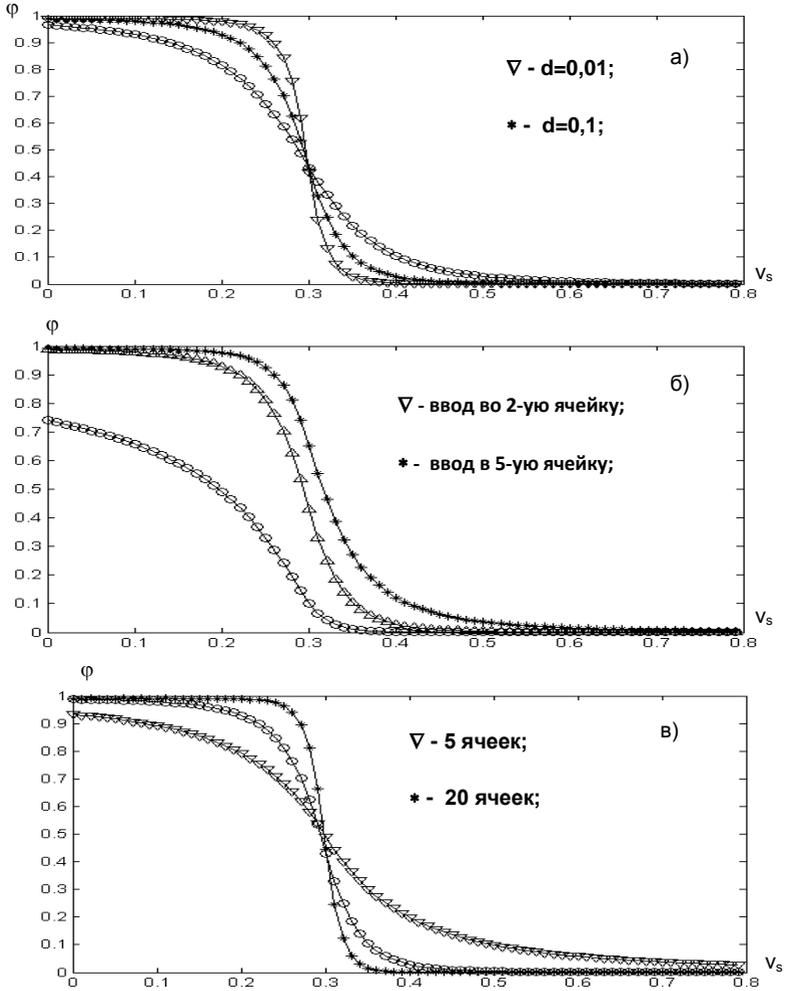


Рис.1. Влияние конструктивных и режимных факторов на эффективность классификации.

Рис.1а иллюстрирует влияние стохастической составляющей d на кривые разделения. С ее ростом резко снижается эффективность разделения. Так, при $d=0,01$ величина $\alpha \approx 0,95$, то есть процесс практически не отличается от идеального. Однако, при $d=0,2$ величина α значительно меньше, что свидетельствует о низкой эффективности процесса. Рис. 1б показывает влияние положения сечения ввода материала на эффективность процесса разделения. Рис. 1в показывает влияние длины зоны разделения, выраженной через число ячеек одинакового объема. С ростом длины эффективность разделения возрастает, причем при 20 ячейках мало отличается от идеальной.

Литература

1. **Баранцева Е.А., Мизонов В.Е.** Введение в теорию цепей Маркова и ее инженерные приложения: Учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2010. – 80 с.
2. **Мизонов В.Е., Ушаков С.Г.** Аэродинамическая классификация порошков. – М: Химия, 1989. 169с.

Секция 3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.7.06

В.А. Полетаев д.т.н.,
А.М. Власов ст. преподаватель,

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

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ЗАЗОРА МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ

Аннотация. В работе приведены результаты исследования рабочего зазора магнитожидкостных герметизаторов в зависимости от величин шероховатости и волнистости поверхностей полюсов и втулок.

Ключевые слова: шероховатость, волнистость, магнитное поле, ферромагнитная жидкость, температура.

V.A. Poletaev, Ph.D.,
A.M. Vlasov Senior Lecturer,

Ivanovo State Energy University named after V.I. Lenin
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

RESEARCH OF WORKING CLEARANCE OF MAGNETIC LIQUID SEALERS

Annotation. The paper presents the results of the study of the working gap of the magneto-liquid sealers, depending on the roughness and waviness of the surfaces of the poles and bushings.

Keywords: roughness, waviness, magnetic field, ferromagnetic fluid, temperature.

Момент трения является одним из важнейших параметров электро-механических устройств. В магнитожидкостных герметизаторах (МЖГ) стремятся к снижению момента трения, определяющего внутренние тепловыделения и разогрев устройства. 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 [1-2], как правило, просты по конструкции (рис.1.). Из-за различия в размерах вала и втулки между ними имеется радиальный зазор, заполненный ферромагнитной жидкостью:

$$\varepsilon = r_1 - R,$$

где Γ_1 – внутренний радиус втулки; R – радиус вала.

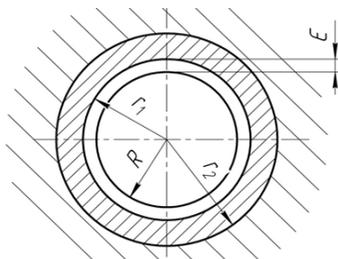


Рис. 1.Схема магнитожидкостного герметизатора при гидродинамической (жидкостной)смазке

Толщина слоя магнитной жидкости и зависит от угловой скорости и вязкости магнитной жидкости. Чем больше эти параметры, тем больше h . При установившемся режиме работы толщина h слоя магнитной жидкости должна быть больше суммы микрошероховатостей полюса R_{z1} и вала (втулки) R_{z2} , (рис.2.).

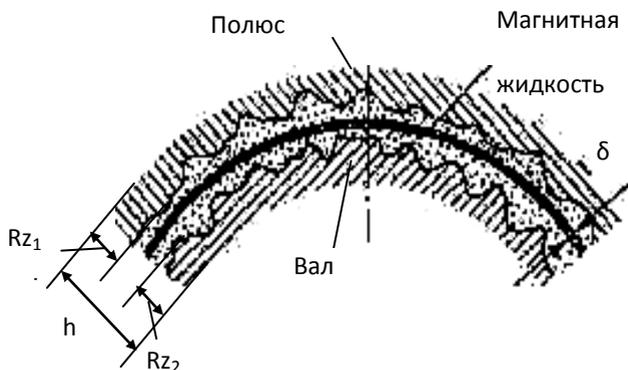


Рис. 2. Слой магнитной жидкости при установившемся режиме работы: δ – радиальный зазор; h –толщина слоя магнитной жидкости; R_{z1} – величина микрошероховатостей полюса; R_{z2} – величина микрошероховатостей вала (втулки)

Момент трения является одним из важнейших параметров магнито-жидкостных герметизаторов, оказывающий влияние на величины передаваемых моментов и мощности. На момент трения магнитожидкостных герметизаторов влияют 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 маг-

нитной жидкостью, а изнашивание контактирующих поверхностей здесь практически исключается.

Фактическая площадь контакта в рабочем зазоре магнитожидкостных герметизаторов определяется не только площадью соприкосновения прослойки магнитной жидкости с валом, а суммой площадей внутренней поверхности съемного полюса и наружной поверхности сменной втулки с прослойкой из ферромагнитной жидкости [3].

На рис. 3 показана разработанная модель рабочего зазора магнитожидкостного герметизатора, образованного поверхностями с разной величиной шероховатости [4].

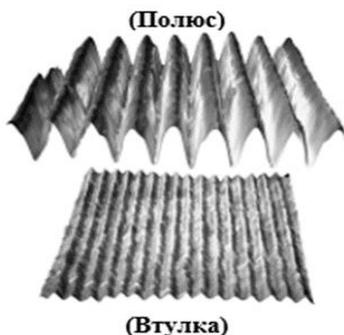


Рис. 3. Модель рабочего зазора, составленного из поверхностей втулки (сталь 40X13) с шероховатостью $Ra=0,945$ мкм ($Rz = 4,026$ мкм) и полюса (сталь 3) с шероховатостью $Ra=3,301$ мкм ($Rz = 14,333$ мкм)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Перминов С.М., Перминова А.С., Полетаев В.А** Патент № 22531070 РФ. Магнитожидкостное уплотнение вала с пониженным моментом трения; опубл. 20.10.2014, Бюлл. №29. 2с]
2. **Перминов С.М., Перминова А.С., Полетаев В.А** Патент № 2536863 РФ. Способ повышения ресурса и надежности устройств с нанодисперсной магнитной жидкостью; опубл. 20.12.2014, Бюлл., №36.2с
3. **Полетаев В.А., Власов А.М., Пахолкова Т.А** Расчет фактической площади контакта в подшипниках скольжения при гидродинамической (жидкостной) смазке. В.А Полетаев, А.М. Власов, Т.А. Пахолкова // Трение и смазка в машинах и механизмах: журнал. Москва: ОООНТИ "Машиностроение" 2014. №11. С.26–31
4. **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. Брянск: Брянская государственная инженерно-технологическая академия. 2014. №20. С.19–22.

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

Аннотация: одним из наиболее эффективных способов повышения эффективности алмазного выглаживания металлов является применение смазочно-охлаждающих технологических средств, позволяющее повысить стойкость инструментов, точность и качество обрабатываемых поверхностей.

Ключевые слова: шероховатость, смазочно-охлаждающее технологическое средство, состав, компоненты, поверхностный слой.

V.A. Poletaev, Ph.D.,
A.A. Golyas, graduate student,

Ivanovo State Energy University named after V.I. Lenin
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE DIAMOND SMOOTHING PROCESS

Annotation: one of the most effective ways to improve the efficiency of diamond smoothing of metals is the use of lubricating and cooling technological means, which allows to increase the durability of tools, accuracy and quality of the surfaces being processed.

Keywords: roughness, cooling lubricant technological composition, composition, components, surface layer.

Обработка алмазным выглаживанием является одним из наиболее простых и эффективных методов обработки деталей машин поверхностно-пластическим деформированием. Алмазное выглаживание повышает усталостную прочность, контактную выносливость и износостойкость деталей и тем самым увеличивает долговечность машин и оборудования. В результате поверхностного деформирования изменяются микроструктура и физико-механические свойства верхнего слоя металла: повышается его твердость и прочность, возникают благоприятные сжимающие остаточные напряжения. Шероховатость поверхности становится ниже. Отделочно-упрочняющая обработка алмазным выглаживанием в настоящее время получает всё более широкое рас-

пространение в машиностроении и промышленности. Формирование поверхностного слоя при алмазном выглаживании происходит вследствие пластической деформации обрабатываемой поверхности. Взаимодействие инструмента с обрабатываемой поверхностью при выглаживании заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом – выглаживателем [1-2]. При этом неровности поверхности, оставшиеся от предшествующей обработки, сглаживаются частично или полностью, поверхность приобретает зеркальный блеск, повышается твердость поверхностного слоя, в нем образуются сжимающие остаточные напряжения, изменяется микроструктура, и создается направленная текстура. После выглаживания поверхность остается чистой, не шаржированной осколками абразивных зерен, что обычно происходит при процессах абразивной обработки. Такое сочетание свойств выглаженной поверхности предопределяет ее высокие эксплуатационные износостойкость, сопротивление усталости и т.д.

Большое разнообразие механических и физико-химических свойств металлов и сплавов, а также специфика различных видов механической обработки позволяет говорить о том, что наиболее эффективными являются специальные СОТС для обработки конкретных металлов и сплавов на определенных. Однако условия современного машиностроительного производства не всегда позволяют применять такие СОТС.

Технология упрочнения алмазным выглаживанием включает следующие этапы:

– токарная обработка (точение) при режимах: $n = 800$ об/мин,

$S = 0,15$ мм/об;

– алмазное выглаживание при режимах: $n = 200$ об/мин, $S = 0,015$ мм/об, сила выглаживания – 200 Н.

На рис. 1. представлена фотография обработки деталей алмазным выглаживанием на токарном станке.

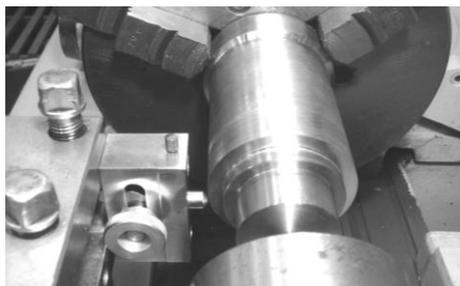


Рис. 1. Фотография обработки детали алмазным выглаживанием на токарном станке

На рис.2. показана гистограмма изменения шероховатости R_a после обработки алмазным выглаживанием деталей из стали 40X13 с приме-

нением разного состава СОТС: 1-индустриальное масло И-20; 2-разработанный состав СОТС в виде пасты.

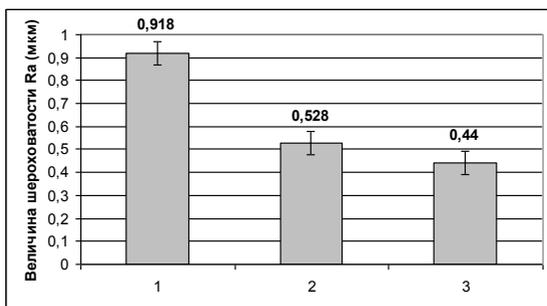


Рис. 2 Изменение шероховатости R_a после обработки алмазным выглаживанием деталей из стали 40X13 с применением разного состава СОТС.: 1 – точение; 2 – точение + алмазное выглаживание с применением СОТС (индустриальное масло И-20); 3 – точение + алмазное выглаживание с применением разработанного состава СОТС

Величина шероховатости R_a после обработки алмазным выглаживанием поверхностей деталей из сталей 40X13 с применением предлагаемого состава смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС) на 15– 20 % меньше, чем после обработки алмазным выглаживанием с использованием индустриального масла И-20. Это свидетельство того, что СОТС в виде пасты имеет улучшенные смазочные свойства и за счет этого активнее проникает в зону контакта инструмент – обрабатываемое изделие и удерживается там во время обработки.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Полетаев В.А., Пучков П.В.** Повышение качества поверхностей трения деталей электронасосов. /Полетаев В.А., Пучков П.В. // «Заводская лаборатория. Диагностика материалов». – 2015 –№ 9. – С. 74 -76.
- 2. Голяс А.А., Полетаев В.А.** Совершенствование процессов механической обработки в энергетическом машиностроении за счет внедрения процесса алмазного выглаживания / А.А. Голяс, В.А. Полетаев // Электромехатроника и управление "Энергия-2016": одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Иваново, 5-7 апреля 2016 года: материалы конференции.— Иваново: УИУНЛ ИГЭУ.— 2016.— Т.4. – С.122 – 124

Е.М. НОВОСЕЛОВ, ст. преп., Д.А. ПОЛКОШНИКОВ, ст. преп.,
А.С. СТРАХОВ, аспирант, А.А. СКОРОБОГАТОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: sstrakhov57@mail.ru

Исследование влияния повреждения обмотки ротора асинхронного двигателя на внешнее магнитное поле при пуске

Аннотация: показана возможность обнаружения в спектре внешнего магнитного поля высоковольтного асинхронного электродвигателя в режиме пуска гармоник, характерных для повреждения обмотки ротора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, спектральный анализ, внешнее магнитное поле, гармоники фиктивной обмотки ротора.

A.S. STRAKHOV¹, postgraduate student, E.M. NOVOSELOV,
S.N. LITVINOV, assistant lecturer, N.N. KONOVALOV, student,
A.A. SKOROBOGATOV², Candidate of technical sciences, Associate professor
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: sstrakhov57@mail.ru¹, aaskor20@yandex.ru²

Study of the impact of the rotor winding damage of an induction motor on the external magnetic field during start-up

Abstract: The possibility of detecting in the external magnetic field spectrum of a high-voltage asynchronous motor the harmonics, that are characteristic of damage to the rotor winding in the start-up mode is shown.

Keywords: Induction motor, spectral analysis, external magnetic field, harmonics of fictitious rotor winding.

Надежность работы электростанций во многом определяется надежностью работы механизмов технологической схемы, приводимых во вращение главным образом асинхронными электродвигателями (АД), не малая доля которых относится к высоковольтным асинхронным двигателям (ВАД) с тяжелыми затяжными пусками. Длительные пуски дают возможность проводить контроль состояния узлов ВАД методом спектрального анализа не только в установившихся, но и в пусковых режимах. При этом такой контроль имеет ряд значимых преимуществ, главным образом связанных с областью применения этих методов. Одним из малоизученных, но удобным для регистрации сигналов, несущим информацию о повреждении узлов АД, является внешнее магнитное поле (ВМП), существующее за корпусом машины. Таким образом, исследование возможности применения методов спектрального анализа составляющих ВМП (а работе рассматри-

вается радиальная составляющая) ВАД при их пуске является актуальной задачей и требует проведения исследований.

Для исследования пусковых режимов использована модель ВАД типа ДАМСО-15-12-8, разработанная в программном комплексе ANSYS на основе метода конечных элементов. Методика построения моделей аналогична той, что была прописана в [1] для низковольтных АД. Для проверки корректности разработанных моделей произведено сравнение параметров рабочих и пусковых режимов, полученных при моделировании, с паспортными данными ВАД, которое дало удовлетворительные результаты, что позволяет говорить о корректности моделей.

При наличии оборванных стержней обмотки ротора АД в спектре составляющих ВМП (в частности, радиальной составляющей) возникают характерные гармоники, называемые гармониками фиктивной обмотки ротора (ФОР), частоты которых определяются по выражению, приведенному в [1].

Поскольку гармонический состав спектра двигателя существенно изменяется в процессе пуска, то применение методов на основе быстрого преобразования Фурье невозможно. Одним из методов, который способен производить обработку нестационарных сигналов и строить их частотно-временные спектры, является оконное преобразование Фурье (ОПФ), которое и было применено.

Анализ формулы, приведенной в [1], определяющей величины частот гармоник ФОР при пуске АД, позволил предположить, что при разгоне АД значения нижних боковых частотах ФОР сначала уменьшаются до нуля, а потом вновь возрастают, то есть в спектрах они «отражаются» от оси скольжения, как видно из рис. 1, а) (в дальнейшем при изложении будем эти гармоники называться **отраженными**). В связи с этим сделан вывод, что появление в спектре выраженных **отраженных** гармонических составляющих ФОР позволяет судить о наличии повреждения обмотки ротора АД.

Для проверки сделанных выводов на разработанной математической модели высоковольтного АД типа ДАМСО-15-12-8 были построены частотно-временные спектры для исправного АД и для АД с одним оборванным стержнем (рис.1, б)). Их анализ позволил сделать следующие выводы: в спектре ВАД с исправной обмоткой ротора практически отсутствуют гармонические составляющие за исключением гармоники 50 Гц, а в спектре АД, имеющего обрыв стержней обмотки ротора, отчетливо проявляются **отраженные** гармоники ФОР на нижних боковых частотах.

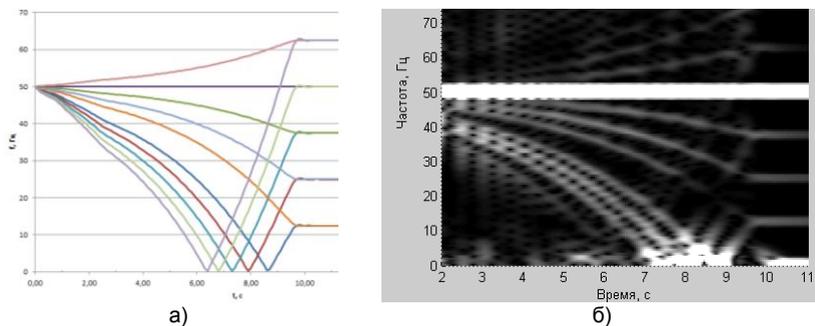


Рис. 1. Частотно-временной спектр сигнала радиальной составляющей ВМП полученные: а) расчётным путем по выражению, приведенному в [1]; б) на математической модели высоковольтного АД с 1 оборванным стержнем короткозамкнутой обмотки ротора

Вывод: в качестве диагностического признака наличия оборванных стержней обмотки ротора ВАД с продолжительным пуском может выступать появление в частотно-временном спектре ВМП четко выраженных отраженных гармоник ФОР на нижних боковых частотах.

Литература

1. Савельев В.А., Страхов А.С., Новоселов Е.М., Скоробогатов А.А., Сулынинков И.Н. Экспериментально-аналитическое определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного электродвигателя // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2018. – № 4. – С. 44-53.

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

Сравнительный анализ селективно-инвариантных электроμηχανических систем

Аннотация. Решается задача улучшения отработки гармонического возмущения момента нагрузки электродвигателя в широком диапазоне скоростей и обеспечения минимальной статической ошибки по скорости от действия постоянной составляющей момента нагрузки.

Ключевые слова: компенсация гармонических возмущений, селективная инвариантность, двухконтурная электроμηχανическая система.

Наиболее рациональным способом компенсации гармонических возмущений момента нагрузки является применение принципа селективной инвариантности систем автоматического управления (САУ), основанного на использовании внутренней модели возмущения (МВ) [1,2]. Согласно принципу селективной инвариантности, полином, формирующий математическую модель возмущения и вводимый в знаменатель передаточной функции (ПФ) регулятора, определяется в виде

$$G(s) = s \cdot (s^2 + \omega_1^2), \quad 1)$$

где s - комплексная переменная Лапласа, $\omega_1 = \Omega/i$, Ω - частота вращения электродвигателя (ЭД), i - передаточное отношение редуктора.

Однако в своих традиционных исполнениях селективно-инвариантные электроμηχανические системы (СИ ЭМС) имеют ряд существенных недостатков, к которым следует отнести: повышенную сложность управляющих устройств и чувствительность систем к вариациям внутренних параметров, пониженную помехоустойчивость, а также ограниченные возможности дальнейшего улучшения инвариантных

свойств и их дополнения другими показателями качества по желанию проектировщика.

Сочетание принципа внутренней МВ с принципами разделения темпов движения локальных подсистем управления, регулирования состояния по внутренним координатам и по выходу САУ, каскадного и подчиненного регулирования координат позволяет существенно повысить структурное разнообразие селективно-инвариантных электромеханических систем и расширить их функциональные возможности управления различными объектами [3].

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.

Дальнейшее расширение используемых принципов управления возможно за счет дополнительного разделения модели возмущения (РМВ) на интегральную и колебательную составляющие с перемещением одной из них в «быструю» внутреннюю подсистему объединенной ЭМС [4].

Перемещение интегральной составляющей МВ в «быстрый» внутренний контур управления ЭМС призвано обеспечить улучшение качества отработки постоянной составляющей момента нагрузки ЭД и снижение (в той или иной мере) порядка полиномиального регулятора внешнего контура, содержащего колебательную часть МВ. При этом соответственно упрощается передаточная функция внеконтурного префильтра, предназначенного для компенсации влияния нулей в ПФ системы, появляющихся при ее синтезе.

Перемещение колебательной составляющей МВ во внутренний («быстрый») контур управления ЭМС призвано обеспечить улучшение качества отработки переменной составляющей момента 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».

Результаты проведенных компьютерных исследований разработанных вариантов СИ ЭМС показали, что эффект компенсации гармониче-

ского возмущения достигается не только на частоте настройки его модели, но и в значительной мере сохраняется и на других частотах в скоростном диапазоне ЭМС, подтверждая робастные свойства синтезированных систем.

Введение интегральной составляющей в МВ позволяет полностью подавить действие гармоник нулевой частоты (постоянной составляющей момента нагрузки).

Высокое качество работы СИ ЭМС в широком скоростном диапазоне дает основание считать, что они будут эффективно обрабатывать не только синусоидальные возмущения по моменту нагрузки ЭД, но и сложные несинусоидальные периодические возмущения с широким спектром гармоник.

Литература

1. **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.
2. **Гудвин Г.К.** Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребен, М.Э. Сальгадо. – М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.
3. **Тарарыкин С.В.** Структурно-параметрический синтез и оптимизация регуляторов селективно-инвариантных электромеханических систем с гармоническим моментом нагрузки / Тарарыкин С.В., Копылова Л.Г., Тихомирова И.А. // Электротехника. – 2015. №5. – С. 62 – 70.
4. **Тарарыкин С.В.** Применение принципа разделения модели гармонического возмущения в структурно-параметрическом синтезе селективно-инвариантных электромеханических систем / Тарарыкин С.В., Тихомирова И.А., Копылова Л.Г. // Электротехника. – 2016. №12. – С. 51 – 60.

Особенности цифрового перепроектирования селективно-инвариантных систем управления электроприводами

Аннотация. Выполнен синтез цифровых селективно-инвариантных электро-механических систем методом цифрового перепроектирования с использованием как упрощенных, так и уточненных Z-форм, а также классических методов Z-преобразования. Проведен сравнительный анализ синтезированных цифровых систем. Выработаны рекомендации по выбору наиболее эффективных методов синтеза цифровых селективно-инвариантных управляющих устройств.

Ключевые слова: двухконтурная электромеханическая система, компенсация гармонических возмущений, разделение модели возмущения, селективная инвариантность, цифровое перепроектирование.

Характерной особенностью роторных электромеханических систем (ЭМС) являются гармонические возмущения момента нагрузки электродвигателя (ЭД) [1] с частотой, равной частоте вращения главного рабочего органа (РО), что приближенно можно выразить формулой [1]

$$M_H = M_0 + M_1 \sin(\omega_1 t), \quad (1)$$

где M_0 , M_1 , ω_1 - соответственно постоянная составляющая, амплитуда колебаний момента и скорость вращения РО.

Эффективным способом компенсации подобных воздействий является применение принципа селективной инвариантности, основанного на использовании внутренней модели возмущения (МВ) [2, 3]

$$G(s) = s \cdot (s^2 + \omega_1^2), \quad (2)$$

где s – комплексная переменная Лапласа, $\omega_1 = \Omega/i$, Ω – частота вращения ЭД, i – передаточное отношение редуктора.

Был проведен сравнительный анализ эффективности возможных методов цифрового перепроектирования селективно-инвариантной системы управления скоростью ЭМС, представленной на рис. 1, б, в классическом варианте построения структуры регулятора с применением внеконтурного формирователя [4]. Для конкретизации процедур синтеза были приняты следующие значения параметров объекта [4]: $K_{СП} = 22$, $T_{СП} = 0,001$ с, $R_a = 0,177$ Ом, $T_a = 0,02$ с, $C = 1,37$ Вб, $J = 0,2$ кг·м², $i = 10$. Рассматриваемая ЭМС состоит [4] из внешнего контура управления, настроенного на время переходного процесса 50 мс, с регулятором

$$\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,002s^3 + 1,16s^2 + 194,4s + 6996}{(s^2 + 1,57^2) \cdot (0,0005s + 1)}, \quad (3)$$

включающим модель гармонической составляющей модели возмущения, и из внутренней подсистемы с компромиссным быстродействием в 19 мс, построенной на основе регулятора

$$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{19,9s^2 + 5601,9s + 559479,3}{s \cdot (s + 1521,4)} \quad (4)$$

с астатической составляющей модели возмущения. Причем для повышения робастных свойств синтезируемых систем автоматического управления (исключения появления положительных обратных связей или неминимально-фазовых звеньев в составе регуляторов) в расчетах было выполнено пренебрежение относительно малой постоянной времени $T_{СП}$.

Варианты цифровой реализации системы управления были получены следующими способами: неявным методом Эйлера, явным методом Эйлера, методом трапеций (Тастина), методом Боксера-Таллера, Z-преобразованием с экстраполятором нулевого порядка и согласованным Z-преобразованием. Были определены критические значения периода квантования T_0 для границ устойчивости полученных вариантов системы (табл. 1).

Таблица 1

Способ преобразования	Явный метод Эйлера	Неявный метод Эйлера	Преобразование Тастина	Метод Боксера-Таллера	Z-преобразование	Согласованное Z-преобразование
Величина T_0 , мс	1,01	0,7	1,0	0,665	0,8	1,0

Максимальные критические значения такта квантования (табл. 1) обеспечивают три метода цифрового перепроектирования: явный метод Эйлера, метод трапеций и согласованное Z-преобразование. Следует отметить, что в методе прямоугольников с недостатком граница перехода между устойчивой и неустойчивой системами является крайне резкой. Несколько меньшие значения (примерно в полтора раза) граничного T_0 показывают метод прямоугольников с избытком, уточненные Z-формы (метод Боксера-Таллера) и Z-преобразование с экстраполятором нулевого порядка.

Было рассмотрено влияние вычислительного запаздывания в контуре управления на характеристики цифровой селективно-инвариантной системы управления в зависимости от величины периода квантования. Критические величины периода квантования для системы управления скоростью селективно-инвариантной ЭМС (рис. 1, а) с регуляторами (3) и (4) для рассмотренных ранее методов цифрового перепроектирования при значениях вычислительного запаздывания T_0 и $T_0/2$ приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Как показывает анализ приведенных в табл. 2 и 3 данных, запаздывание в контуре управления во всех случаях снижает допустимую величину периода квантования.

Таблица 2

Способ преобразования	Явный метод Эйлера	Неявный метод Эйлера	Преобразование Тастина	Метод Боксера-Таллера	Z – преобразование	Согласованное Z - преобразование
Величина T_0 , мс	0,5	0,3	0,34	0,33	0,36	0,34

Таблица 3

Способ преобразования	Явный метод Эйлера	Неявный метод Эйлера	Преобразование Тастина	Метод Боксера-Таллера	Z - преобразование	Согласованное Z - преобразование
Величина T_0 , мс	1,01	0,4	0,5	0,56	0,51	0,5

Наилучшие результаты среди рассмотренных методов цифрового перепроектирования показал явный метод Эйлера, который оказался нечувствительным к величине вычислительного запаздывания, равного

половине такта квантования (табл. 3). При увеличении вычислительно-го запаздывания в контуре управления до значения периода квантования указанный метод также сохранил свое преимущество (табл. 2). Более того, граница между устойчивой и неустойчивой системами стала не такой резкой, в отличие от систем без запаздывания, здесь наблюдается плавный переход от одной системы к другой.

Все остальные методы показали сравнимые значения критического такта квантования.

Полученные результаты приводят к выводу о том, что при организации цифрового управления в селективно-инвариантных системах реального времени методом цифрового перепроектирования повышение точности, быстродействия, достижение инвариантно-робастных свойств и других показателей качества следует обеспечивать с использованием возможностей современных, динамично развивающихся вычислительных и информационных средств, позволяющих реализовать эффективные алгоритмы цифрового управления ЭМС с малыми тактами квантования времени.

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. Тарарыкин С.В. Применение принципа разделения модели гармонического возмущения в структурно-параметрическом синтезе селективно-инвариантных электромеханических систем / С.В. Тарарыкин, И.А. Тихомирова, Л.Г. Копылова // Электротехника, 2016, № 12. Tararykin S.V. "Application of the Principle of Harmonic-Disturbance Model Separation for Structural-Parametric Construction of Selectively Invariant Electromechanical Systems" / S.V. Tararykin, I.A. Tikhomirova, L.G. Kopylova // Russian Electrical Engineering, vol. 87, no. 12, 2016.
5. Мита Ц. Введение в цифровое управление: пре. с яп. / Ц. Мита, С. Хара, Р. Кондо. – М.: Мир, 1994.

Синтез систем автоматического управления низкой параметрической чувствительности

Параметрической грубость (малая чувствительность к вариациям параметров) является одним из важнейших свойств, определяющих работоспособность САУ. Вопросам обеспечения параметрической грубости последние десятилетия уделяется большое внимание исследователей [1-9]. Одним из наиболее эффективных методов обеспечения параметрической грубости является «метод больших коэффициентов усиления» [7].

В [10] предложено использовать «метод больших коэффициентов усиления» применительно к системам модального управления с полиномиальными регуляторами. Однако его также можно применить и к системам модального управления с регуляторами состояния.

Рассмотрим процедуру синтеза системы модального управления с регулятором состояния на примере упругого двухмассового электромеханического объекта, структурная схема которого приведена на рис. 1.

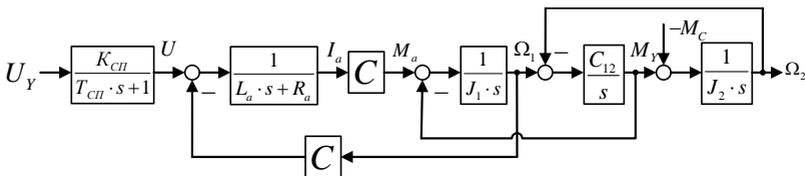


Рис. 1

Параметры объекта имеют следующие значения:

– постоянная времени и коэффициент усиления силового преобразователя $T_{СП} = 0.0033\text{с}$, $K_{СП} = 22$;

– конструктивная постоянная, индуктивность и сопротивление якорной цепи, момент инерции электродвигателя $C = 2.07\text{Вб}$, $L_{Я} = 0.026\text{Гн}$, $R_{Я} = 0.58\text{Ом}$, $J_1 = 0.06\text{кгм}^2$;

– коэффициент жесткости механической передачи и момент инерции рабочего органа $C_{12} = 20.5\text{Нм/рад}$, $J_2 = 0.162\text{кгм}^2$.

При синтезе пренебрежем малой постоянной времени $T_{СП}$. Описание объекта управления в пространстве состояний примет вид:

$$\mathbf{x}^T(s) = [I(s) \quad \Omega_1 \quad M_y \quad \Omega_2] \mathbf{s}\mathbf{x}(s) = \mathbf{A}\mathbf{x}(s) + \mathbf{B}\mathbf{u}(s), \quad \Omega_2(s) = \mathbf{C}\mathbf{x}(s)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -22.3 & -79.62 & 0 & 0 \\ 34.5 & 0 & -16.67 & 0 \\ 0 & 20.5 & 0 & -20.5 \\ 0 & 0 & 6.17 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 846.15 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Пусть необходимо обеспечить быстрдействие САУ не хуже 250 мс при апериодическом переходном процессе при возможном изменении момента инерции рабочего органа в два раза.

Исследовалась параметрическая грубость САУ, характеристические полиномы которых формировались по корням:

- вариант 1 – $s_{1-4} = -35$ (полином Ньютона),
- вариант 2 – $s_1 = -15$, $s_{2-4} = -100$,
- вариант 3 – $s_1 = -15$, $s_{2-4} = -200$.

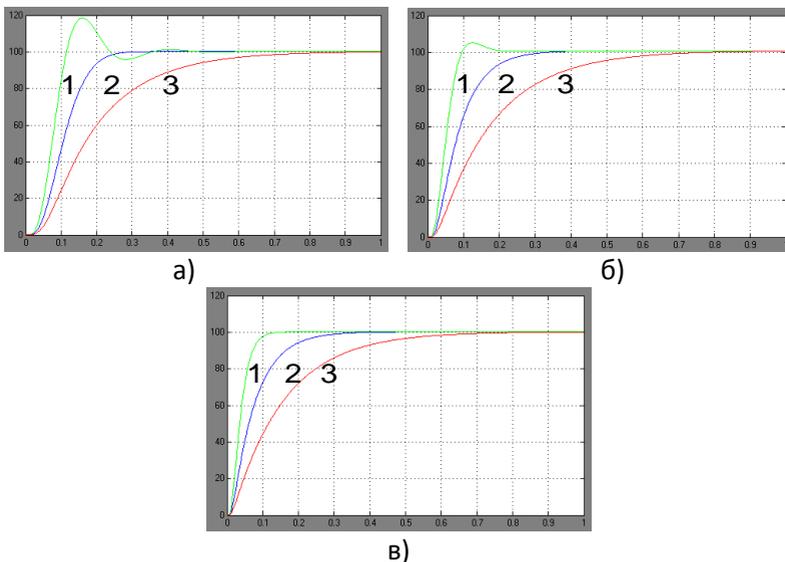
Соответствующие матрицы обратных связей, полученные в результате стандартной процедуры синтеза регулятора состояния [11] имели вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= [-0.17 \quad -0.224 \quad -0.2575 \quad -0.19], \\ \mathbf{K} &= [-0.346 \quad -1.0717 \quad -2.1272 \quad -2.9], \\ \mathbf{K} &= [-0.7 \quad -4.31 \quad -15.7 \quad -28.08]. \end{aligned}$$

Графики переходных процессов приведены на рис. 2 а, б, в соответственно:

- 1 – при уменьшении момента инерции в 2 раза;
- 2 – при номинальных параметрах объекта управления;
- 3 – при увеличении момента инерции в 2 раза.

Очевидно, что формирование характеристического полинома предложенным в [10] способом позволяет синтезировать регуляторы, обеспечивающие параметрическую грубость САУ. Более того, выбирая величину «быстрых» полюсов САУ, можно управлять степенью проявления этого свойства и обеспечивать рациональное соотношение между параметрической грубостью и величиной коэффициентов обратных связей.



в)
Рис. 2

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.,** Липиньш 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.
10. **Вершинин И. В., Тютиков В. В.** Синтез параметрически грубых систем модального управления // Материалы Международной конференции «Энергия», 2015.
11. **Тютиков В. В., Тарарыкин С. В.** Робастное модальное управление технологическими объектами / В.В. Тютиков, С.В. Тарарыкин ; – Иваново: ИГЭУ, 2006. – 256 с.

УДК 62-83:621.313.2.077

А.Р. КОЛГАНОВ, профессор, д.т.н., С.К. ЛЕБЕДЕВ, доцент, к.т.н.,
М.С. КУЛЕНКО, доцент, к.т.н.,
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
ул. Рабфаковская 34, г. Иваново, 153003
E-mail: klqn@drive.ispu.ru, lebedev@drive.ispu.ru, forestgummy@gmail.com

Параметрический синтез регуляторов положения электромехатронных модулей позиционирования

Рассмотрены вопросы синтеза регуляторов положения систем позиционирования электромехатронных модулей, призванные обеспечить заданные динамические характеристики и робастные свойства, при учете инерционности контура момента электропривода.

Ключевые слова: мехатроника, электропривод, синтез регуляторов, позиционирование, робастное управление.

Alexey Kolganov, Sergey Lebedev, Mikhail Kulenco
Ivanovo State Power Engineering University, Rabfakovskaya 34, Ivanovo, 153003
E-mail: klqn@drive.ispu.ru, lebedev@drive.ispu.ru, forestgummy@gmail.com

Electromechatronic Modules Position Regulators Parametric Synthesis

Abstract: The problems of position regulators synthesis in positioning systems to provide the specified dynamic characteristics and robust properties, taking into account the electric drive torque loop time response, are considered.

Key words: mechatronics, electric drive; control system synthesis, positioning, robust control.

Электромехатронные модули позиционирования (ЭММП) используют в различных мехатронных системах, чаще в промышленных манипуляторах [1], где определяют качество и производительность. Применение современной компонентной базы и векторного подхода к управлению электроприводом [2] позволяет для синтеза использовать упрощенную структуру системы управления, приведенную на рис. 1, где в качестве объекта управления выделена механическая часть электропривода с инерционным коэффициентом k_{jn} и эквивалентным звеном контура момента Q системы векторного управления (КМ).

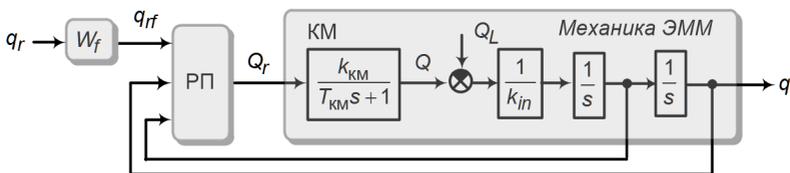


Рис. 1. Функциональная схема системы позиционирования ЭММ

Здесь ЭММП с системой позиционирования на основе регулятора положения (РП) обеспечивает реализацию задания q_r в условиях действия переменных механических нагрузок Q_L . На входе регулятора используем фильтр с передаточной функцией (ПФ) – W_f для компенсации нулей ПФ системы позиционирования. На рис. 2 показаны структуры модифицированных ПИД-регуляторов [3,4].

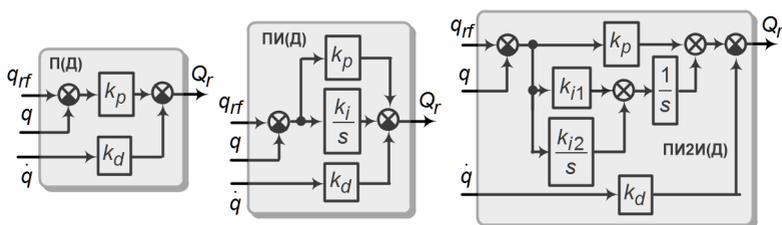


Рис. 2. Структуры РП

Для РП (рис. 2) в [3] предложена процедура синтеза и фиксированной настройка системы позиционирования на динамику Бесселя [5] с пренебрежением инерционности КМ.

Настоящая работа посвящена расчету параметров регуляторов положения с учетом конечного значения инерционности КМ. Кроме того предлагается фиксированная настройка РП, обеспечивающая робастность при вариации k_{in} , что особенно важно в робототехнике [1].

Синтез выполнен в пространстве состояния.

Результаты синтеза сведены в табл. 1, где для $k_{in}=1,0 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$, $T_{кМ}=0,001 \text{ с}$, $k_{кМ}=1$ определены значения полосы пропускания ЭММП, а каждый РП обеспечивает заданную степень астатизма [1,3].

Таблица 1. Параметры РП и полоса пропускания ЭММП

РП	$W_f(s)$	Параметры	$f_{пр}$, Гц
П(Д)	1	$k_p = 3,801\omega_{пр}^3 k_{ин} T_{км}$ $k_d = 6,007\omega_{пр}^2 k_{ин} T_{км}$; $\omega_{пр} = 0,2633 / T_{км}$	41,92
ПИ(Д)	$\frac{k_i}{k_p s + k_i}$	$k_p = 27,43\omega_{пр}^3 k_{ин} T_{км}$; $k_i = 17,53\omega_{пр}^4 k_{ин} T_{км}$ $k_d = 18,39\omega_{пр}^2 k_{ин} T_{км}$; $\omega_{пр} = 0,1564 / T_{км}$	24,9
ПИИ(Д)	$\frac{k_{i2}}{k_p s^2 + k_{i1} s + k_{i2}}$	$k_p = 106,91\omega_{пр}^3 k_{ин} T_{км}$; $k_{i1} = 152,45\omega_{пр}^4 k_{ин} T_{км}$; $k_{i2} = 96,62\omega_{пр}^5 k_{ин} T_{км}$; $k_d = 42,18\omega_{пр}^2 k_{ин} T_{км}$; $\omega_{пр} = 0,1051 / T_{км}$	16,74

Полученные значения полосы пропускания позволяют говорить об успешности синтеза с учетом инерционности контура момента, так как полученные результаты указывают соответствие процессов позиционирования динамике Бесселя с высоким быстродействием.

Фиксированная настройка на максимальное при вариации значение $k_{ин}$ обеспечивает приемлемые характеристики позиционирования при пятикратном изменении инерционности, как это показано на примере ЭММП с П(Д)-регулятором (рис. 3).

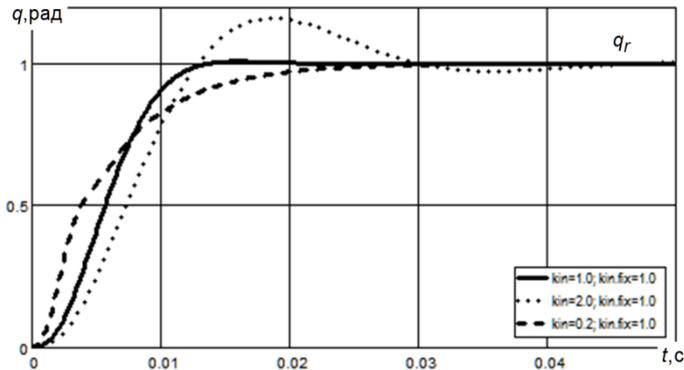


Рис. 3. Позиционирование с П(Д)-регулятором

Полученные результаты предполагается использовать в ЭММП с микроконтроллерами класса *motor control*, в том числе российской разработки – K1921BK01T (АО «НИИЭТ»).

Реализуемость систем позиционирования, синтезированных в непрерывном времени, обеспечивается благодаря исключению квантования по уровню при использовании *float*-формата в современных микроконтроллерах.

Литература

1. **Лебедев, С.К.** Управление движением промышленных манипуляторов: Учебник/С.К. Лебедев, А.Р. Колганов.–ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина».–Иваново,2018 .–340 с.
2. **Колганов А.Р.** Электромеханотронные системы. Современные методы управления, реализации и применения / А.Р. Колганов, С.К. Лебедев, Н.Е Гнездов – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 256 с.
3. **Лебедев, С.К.** Модификация и настройка ПИД-регуляторов систем позиционирования промышленных манипуляторов/С.К. Лебедев, А.Р. Колганов// Электроэнергетика и энергосбережения: теория и практика/ Сборник материалов III Всероссийской науч.-практ. конф.–Кемерово: ФГБОУВО КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2017.– С.311.1– 311.13.
4. **Денисенко, В.А.** ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации//Современные технологии автоматизации, №4, 2006, С.66-74.
5. **Мошиц, Г.** Проектирование активных фильтров/ Г. Мошиц, П. Хорн.–М.: Мир, 1984, 320 с.

М.В. ТАМЬЯРОВА, старший преподаватель; А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор
А.А. КАРЖЕВИН, аспирант; А.В. ПОДОБНЫЙ, аспирант
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: stprepod@mail.ru, aitispu@mail.ru

Методика оптимизации конструкции коллекторных машин на основе плоскопараллельных моделей стационарного магнитного поля

Аннотация. Рассмотрена система поиска оптимальной конструкции статора коллекторной машины. Поиск осуществляется с использованием генетических алгоритмов. Целевая функция строится на основе результатов расчета динамически формируемой конечно-элементной модели.

Ключевые слова: коллекторные машины, структурно-параметрическая оптимизация, полевые модели, генетические алгоритмы.

M.V. TAMYAROVA, senior teacher; A.I. TIKHONOV, Prof.
A.A. KARZHEVIN, graduate student; A.V. PODOBNYJ, graduate student
Ivanovo State Energy University named after V. I. Lenin
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya 34
E-mail: stprepod@mail.ru, aitispu@mail.ru

The design optimization technique of collector machines based on plane-parallel models of a stationary magnetic field

Annotation. The system of search for the optimal stator design of the collector machine is considered. Search is carried out using genetic algorithms. The objective function is based on the results of the calculation of a dynamically formed finite element model.

Keywords: collector machines, structural-parametric optimization, field models, genetic algorithms

Современное проектирование электрических машин предполагает наличие этапа оптимизации, в том числе с использованием полевых моделей. Параметрическая оптимизация не позволяет осуществить выход на новые технические решения, учитывающих особенности распределения неподвижного относительно статора магнитного поля коллекторных машин (КМ). Целью исследования является разработка методики структурно-параметрической оптимизации КМ, позволяющей находить новые варианты конструкции.

Для создания модели, позволяющей решать такие задачи, было разработано VBA-приложение в среде MSExcel – параметрический ге-

нератор конечно-элементной модели КМ (ПГ КЭМ МП КМ), способное по ограниченному набору исходных параметров автоматически генерировать и рассчитывать серии полевых моделей с изначально непредсказуемой конфигурацией расчетной области. Для этого была осуществлена декомпозиция расчетной области КМ (рис. 1)

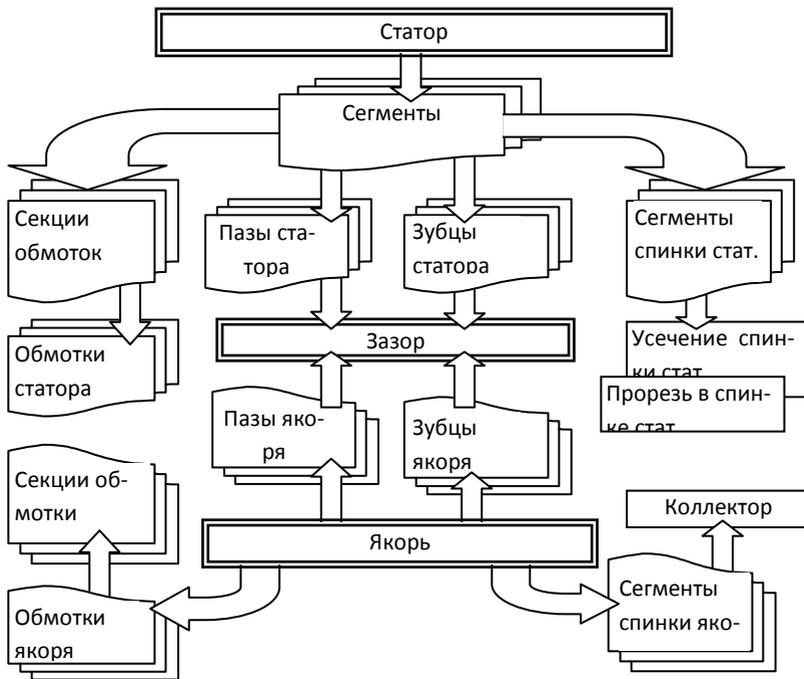


Рис. 1. Декомпозиция расчетной области КМ

Разработанный на основе данной декомпозиции ПГ КЭМ МП КМ позволяет формировать серии конечно-элементных моделей КМ как типовой, так и нетиповой конструкции (рис. 2).

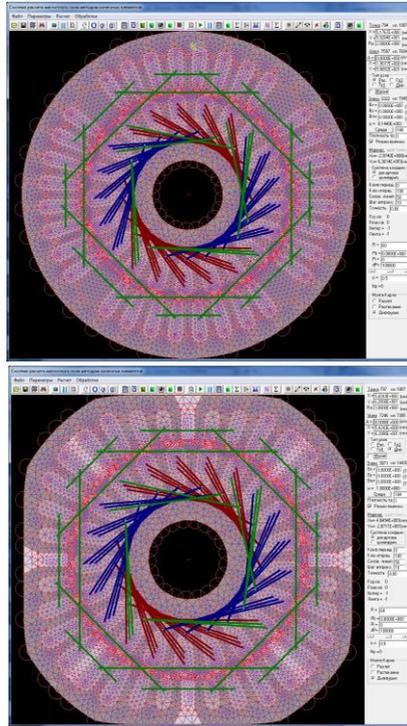


Рис. 2. Варианты конструкции коллекторной машины

Модель магнитного поля машины используется в качестве ядра, обеспечивающего расчет функции цели, обеспечивающей минимум расхода активных материалов, при оптимизации машины с использованием генетических алгоритмов. Это позволяет организовать процесс оптимизации так, чтобы появилась возможность выхода на произвольные варианты конструкции КМ, что переводит оптимизационную задачу в класс задач структурно-параметрического синтеза. Структурная схема модели, обеспечивающей структурно-параметрический синтез КМ, представлена на рис. 3.

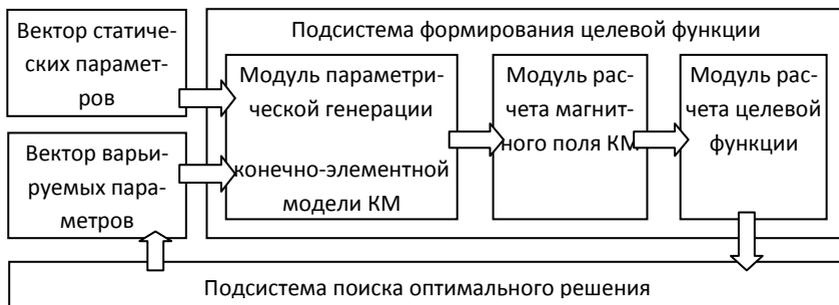


Рис. 3. Структура оптимизационной модели КМ

При решении задачи оптимизации статора КМ на каждом шаге поиска при текущих значениях варьируемых параметров с помощью параметрического генератора полностью перестраивалась конечно-элементная модель машины и осуществлялся ее расчет при значении тока ОЯ, характерного для номинального режима исходной машины. По результатам данного расчета вычислялись величины магнитного потока и индукции в зоне коммутации. Полученный в ходе оптимизации вариант конструкции КМ (рис. 4) позволил получить 39,4% экономии электротехнической стали (с учетом отходов при раскросе) и 34,9% экономии меди в обмотках статора (без учета обмотки якоря). При этом машина имеет удовлетворительную коммутацию как в номинальном режиме, так и при пуске, а также хорошие динамические характеристики, что подтверждается анализом процесса пуска машины на полевой динамической модели.

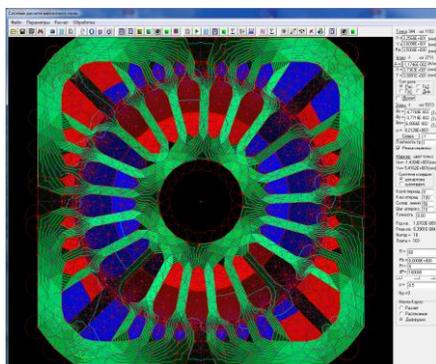


Рис. 4. Магнитное поле в номинальном режиме КМ, полученной в результате оптимизации