

ШИШКОВ Кирилл Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ  
СНОВАЛЬНЫХ ВАЛОВ**

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» (ИГЭУ).

**Научный руководитель**            **Глазунов Виктор Федорович,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты**        **Кулида Николай Алексеевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет», первый проректор

**Хватов Олег Станиславович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта», заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта»

**Ведущая организация**            ФГБОУ ВПО «Костромской государственный технологический университет» (КГТУ), г. Кострома

Защита состоится 6 июня 2014 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ИГЭУ по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ауд. Б-237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.:(4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: [uch\\_sovet@ispu.ru](mailto:uch_sovet@ispu.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Диссертация размещена [http://ispu.ru/files/Shishkov\\_KS\\_05-02-2014.pdf](http://ispu.ru/files/Shishkov_KS_05-02-2014.pdf)

Автореферат диссертации размещён на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru).

Автореферат разослан

2014 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.064.02  
кандидат технических наук



Сидоров Сергей Георгиевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Партионный способ снования, как наиболее производительный, играет важную роль в подготовке основных нитей к ткачеству, во многом определяя эффективность последующих технологических операций. При этом важнейшей задачей процесса снования является формирование сновальных валов с заданными параметрами намотки, к которым относятся длина наматываемой основы, текущий и конечный радиусы намотки, а также ее плотность, позволяющими исключить угары пряжи в процессе шлихтования.

В основе технологии формирования сновальных валов традиционно используется операция перемотки нитей основы с бобин шпулярника с помощью регулируемого электропривода постоянного тока, обеспечивающего стабилизацию линейной скорости снования. Отсутствие возможности регулирования натяжения каждой нити в процессе работы в условиях действия на них сил трения, зависящих от скорости, затрудняет использовать натяжение нитей для управления плотностью намотки. Традиционно эту роль выполняет уплотняющий вал, усредняющий для всех нитей радиус намотки и обеспечивающий уменьшение ее бугристости.

Существенным недостатком используемых систем формирования сновальных валов является малая надежность и низкие эксплуатационные характеристики электропривода постоянного тока, а также невозможность формирования качественной намотки в условиях действия на нее нерегулируемого давления уплотняющего вала.

Значительная часть указанных недостатков может быть устранена совершенствованием электропривода механизмов формирования сновальных валов. Так альтернативой электроприводу постоянного тока механизма сновального вала может быть частотно-регулируемый асинхронный электропривод, позволяющий решить не только задачу энергетической оптимизации параметров электропривода, но и существенно улучшить его статические и динамические характеристики. При этом управление плотностью намотки возможно на базе регулируемого асинхронного электропривода механизма уплотняющего вала, координированного своим движением с электроприводом механизма сновального вала.

Решение указанных задач обуславливает необходимость разработки математической модели процесса наматывания сновальных валов, алгоритмов и устройств управления электроприводами механизмов сновального и уплотняющего валов, оценки действия на систему электропривода сновальной машины возмущающих факторов.

Таким образом задача совершенствования электропривода механизмов сновальной машины, представляющая значительный научный и практический интерес, является актуальной.

**Цель диссертации** заключается в разработке и исследовании асинхронного электропривода механизмов формирования сновальных валов.

**Задачи, решаемые в диссертации:**

1. Анализ механизмов сновального и уплотняющего валов, их взаимодействия в процессе намотки и требований к системе электропривода.
2. Исследование взаимного влияния деформаций нити и основы в процессе намотки.
3. Разработка математической модели процесса формирования сновального вала.
4. Разработка энергосберегающего алгоритма управления асинхронным электроприводом механизма сновального вала.
5. Анализ влияния уплотняющего вала на процесс намотки основы и электропривод механизма сновального вала.
6. Разработка алгоритма и устройств координированного управления электроприводами механизмов сновального и уплотняющего валов.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач в диссертации использован аппарат передаточных функций и структурных схем, основные положения теории электромеханического преобразования энергии, методы координатных преобразований, дифференциального и интегрального исчисления, математическое моделирование электромеханических систем. Экспериментальные исследования системы асинхронного электропривода выполнены на партионной сновальной машине типа СП-140, установленной на предприятии ООО “Каминский текстиль”.

**Научная новизна работы** представлена:

1. Математической моделью системы электропривода механизма сновального вала с учетом упругопластической деформации основы в зоне перемотки.
2. Математической моделью взаимодействия процессов деформации основы и нити в зоне перемотки.
3. Моделями чувствительности электропривода механизма сновального вала к вариациям параметров основы и намотки.
4. Алгоритмом координированного управления электроприводами механизмов сновального и уплотняющего валов.
5. Математической моделью энергосберегающего алгоритма управления асинхронным электроприводом механизма сновального вала.

**Практическую значимость** имеют:

1. Разработанные устройства и алгоритм координированного управления асинхронными электроприводами механизмов сновального и уплотняющего валов.

2. Разработанная математическая модель координированного управления асинхронными электроприводами механизмов сновальной машины, реализующая энерго-сберегающий алгоритм векторного управления.

Результаты диссертации могут быть использованы при проектировании и внедрении систем асинхронных электроприводов механизмов сновального и уплотняющего валов, позволяющих наматывать сновальные паковки с одинаковыми технологическими характеристиками намотки. Разработанные методики расчета и математические модели используются в учебном процессе кафедры ЭП и АПУ студентами направления 140400 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель взаимного влияния процессов деформации основы и нити в зонах перематывания в системе асинхронного электропривода механизма сновального вала.

2. Математическая модель асинхронного электропривода механизма сновального вала с энергосберегающим алгоритмом управления.

3. Математическая модель координированных в процессе намотки асинхронных электроприводов механизмов сновального и уплотняющего валов.

4. Результаты исследований, полученные на основе построенных математических моделей.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы:

**в части формулы специальности** – «... исследования по общим закономерностям преобразования, ... и использования электрической энергии, а также принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного, ... назначения. В рамках научной специальности объектами изучения являются ... электропривода, ... могут рассматриваться как самостоятельные технологические комплексы и должны обеспечивать эффективное и безопасное функционирование ...»;

**в части области исследования** – п. 1: «... изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п. 3: «Разработка ... электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления»; п. 4: «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

**Достоверность** полученных результатов работы определяется корректностью и обоснованностью принятых решений, адекватностью разработанных математических моделей исследуемых процессов, использованием современных информационно-технических средств для решения основных задач диссертации.

### **Личное участие автора**

Автором разработана математическая модель системы асинхронного электропривода механизма сновального вала с учетом упругопластической деформации основы в зоне перемотки, а также модель взаимного влияния процессов деформации основы и нити. Получены частотные модели чувствительности электропривода механизма сновального вала к вариациям параметров основы и намотки. На базе разработанной математической модели системы асинхронного электропривода механизма сновального вала с векторным управлением координат разработан энергосберегающий алгоритм координированного управления асинхронными электроприводами механизмов сновального и уплотняющего валов, а также программное обеспечение для контроллера DVP-SA2 и панели оператора DOP-B на базе программ Delta WPLSoft и Delta DOPSoft.

**Реализация результатов работы.** Система автоматизированного электропривода механизма формирования сновальных валов, построенная на базе асинхронного электродвигателя серии 5А с короткозамкнутым ротором и преобразователя частоты серии ЭПВ, разработанного НТЦ “Вектор” ИГЭУ и выпускаемого ООО “ЭЛПРИ” Чебоксарского электроаппаратного завода, внедрена на текстильном предприятии ООО “Каминский текстиль” (Каминский поселок, Родниковский р-н, Ивановская обл.) и установлена на партионной сновальной машине СП-140.

**Апробация работы.** Основные положения работы и её результаты докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции “Бенардосовские чтения” (XVI, 2011, ИГЭУ, Иваново); на XV, XVIII ежегодных международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов (2009, 2012, МЭИ, Москва); на межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов – “ПОИСК 2011” (2011, ИГТА, Иваново); на международной научно-технической конференции “Проблемы автоматизации и управления в технических системах” (2011, ПГУ, Пенза); на седьмой международной (восемнадцатой всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012 (2012, ИГЭУ, Иваново); на всероссийском конкурсе для победителей отборочного тура среди научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по различным междисциплинарным направлениям (2011, ЮРГТУ (НПИ), Новочеркасск), на VIII международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Энергия-2013” (2013, ИГЭУ, Иваново).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано шестнадцать печатных работ, из которых четыре научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК, три статьи в других изданиях, семь тезисов докладов на научно-технических конференциях, получено два патента Российской Федерации на изобретения.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Она содержит 162 страницы основного текста, включающего 51 рисунок, 2 таблицы, перечень литературы из 115 наименований и 10 приложений на 41 страницах, включающих 18 рисунков и 14 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** определены цели и задачи диссертации, обоснована актуальность темы, сформулированы новые научные результаты и их практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** на основе литературных источников выполнен анализ типового сновального оборудования и механизмов сновального, уплотняющего и мерильного валов, обоснованы основные задачи, связанные с разработкой электропривода механизма формирования сновальных валов. Показано, что несмотря на многочисленные исследования, проведенные в области технологии формирования сновальных валов известными учеными-технологами, здесь все еще ощущается существенный недостаток разработок, направленных на повышение эффективности процесса снования, и, прежде всего, исследований в области совершенствования электропривода сновальных машин. В качестве технологического объекта исследования выбрана безбарабанная высокоскоростная партионная сновальная машина СП-140.

Представленная в работе структура технологического процесса партионного снования, как многомерного объекта, позволила систематизировать векторы параметров, определяющие его состояние (рис. 1). Показано, что электропривод механизмов сновальной машины должен обеспечивать управление основными переменными, характеризующими условия протекания процесса партионного снования, к которым относятся линейная скорость наматывания, силовое воздействие уплотняющего вала и натяжение основы.

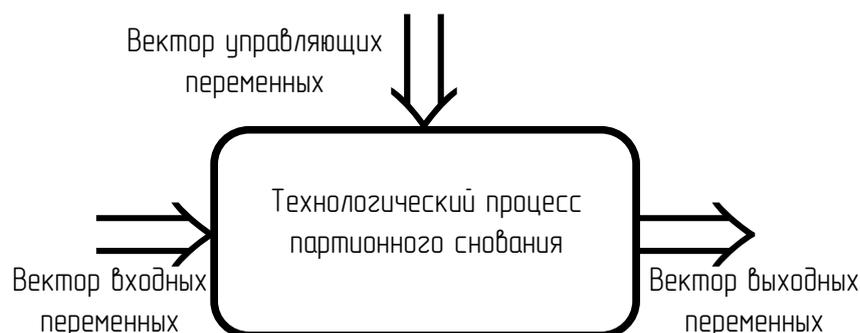


Рис. 1. Схема технологического процесса партионного снования

Рассмотрено влияние уплотняющего вала, линейной скорости снования и натяжения основы на процесс намотки. Установлено, что в процессе намотки система электропривода механизма сновального вала должна обеспечивать постоянную линейную скорость снования, существенно влияющую на натяжение основы и параметры намотки.

На основании литературных источников выполнен анализ конструкций ните-натяжных приборов и факторов, влияющих на натяжение нитей, включая трение о направляющие элементы в зонах деформации основы.

Рассмотрены устройства контроля и измерения длины основы, радиуса намотки и ее плотности, составляющих вектор выходных переменных технологического процесса снования. В результате показана целесообразность контроля радиуса намотки и длины основы в динамике на основе математической модели, а в статике с помощью датчиков. При этом плотность сновального вала целесообразно контролировать по результатам вычисленных значений длины основы и радиуса намотки, а стабилизировать ее регулированием давления уплотняющего вала на намотку.

Сформулированы требования к проектируемой системе электропривода механизмов формирования сновальных валов.

**Вторая глава** посвящена анализу систем электроприводов механизмов намотки сновальных валов и разработке математической модели процесса их формирования. Показано, что электропривод постоянного тока по сравнению с электроприводом переменного тока имеет ряд недостатков, ограничивающих его использование, главным из которых является его малая надежность. Его альтернативой является частотно-регулируемый электропривод с векторной системой управления, обеспечивающий лучшие динамические и статические показатели, меньшие эксплуатационные затраты и более высокую надежность.

Рассмотрено влияние измерителя линейной скорости снования на систему асинхронного электропривода механизма сновального вала и разработана математическая модель зоны деформации основы между мерильным и сновальным валами, учитывающая условия скольжения основы относительно поверхности мерильного вала. Структурная схема зоны деформации представлена на рис. 2.

Здесь:  $\omega_m, \omega_r$  – угловые скорости вращения мерильного вала и асинхронного двигателя механизма сновального вала, рад/с;  $J_m, \rho_m$  – момент инерции, кгм<sup>2</sup>, и радиус мерильного вала, м;  $T_c = Lk_v$  – постоянная времени натяжения основы, с;  $L$  – длина основы в зоне деформации, м;  $k_v^{-1} = v_c$ , с/м;  $F_1, F_2$  – натяжения основы до мерильного вала и в зоне деформации, Н;  $F_{cm}$  – сила трения в подшипниках мерильного вала, Н;

$v_M, v_C$  – линейные скорости мерильного и сновального валов, м/с;  $E$  – модуль упругости основы, отнесенный к ее ширине, Н;  $f_n, f_c$  – коэффициенты трения покоя и скольжения.

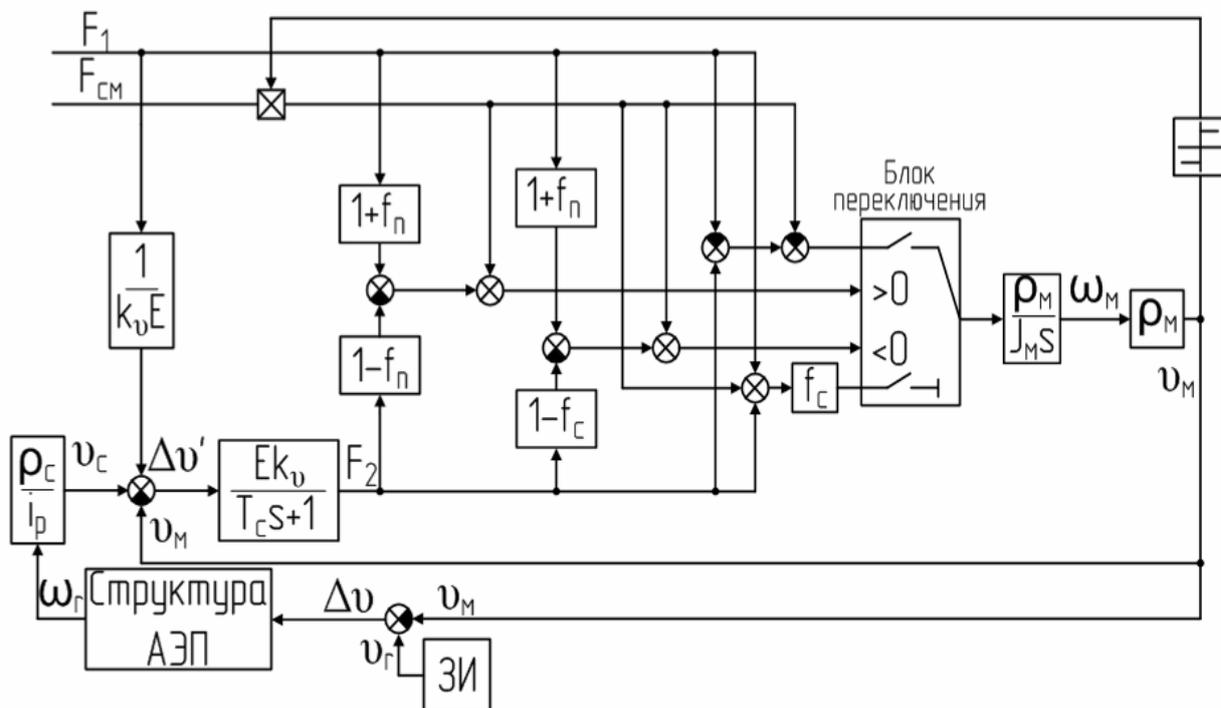


Рис. 2. Структурная схема зоны деформации основы между мерильным и сновальным валами

Показано, что использование в качестве датчика линейной скорости основы мерильного вала вносит в канал обратной связи упругое звено, представленное участком основы между мерильным и сновальным валами, а также фрикционную связь между основой и мерильным валом. При этом в переходных процессах наблюдается упруго-вязкое скольжение в зоне контакта основы и мерильного вала, что приводит к динамической ошибке, вносимой в систему управления скоростью движения основы.

Выполнен анализ влияния вариаций параметров намотки и основы на статические и динамические характеристики электропривода механизма сновального вала. Здесь вектор главных варьируемых переменных составляют момент инерции и модуль упругости намотки, постоянная времени натяжения основы и коэффициент обратной связи по линейной скорости. Поиск аналитических зависимостей функций чувствительности проведен на основе редуцированной с учетом полосы пропускания передаточной функции системы электропривода, а исследование влияния вариаций рассматриваемых переменных выполнено с помощью частотных функций чувствительности. Возможность понижения порядка системы показана на основе анализа частот амплитудно-частотных характеристик редуцированной и нередуцированной передаточных функций электропривода, для которых

- частоты пропускания:  $\omega_{\Pi}^{[p]} = 9,62$  рад/с;  $\omega_{\Pi} = 9,65$  рад/с;
- резонансные частоты:  $\omega_p^{[p]} = 7,32$  рад/с;  $\omega_p = 7,34$  рад/с;
- частоты среза:  $\omega_c^{[p]} = 8,95$  рад/с;  $\omega_c = 9$  рад/с.

Получены аналитические выражения частотных функций чувствительности системы к вариациям рассматриваемых параметров. Установлено, что наибольшее влияние на динамику электропривода оказывают вариации модуля упругости и постоянной времени натяжения основы, а также коэффициента передачи обратной связи по линейной скорости, а на статические характеристики вариации коэффициента передачи по линейной скорости, обусловленные упруговязким скольжением основы относительно поверхности мерильного вала.

На основе гармонического закона распределения нормальных и касательных напряжений в зоне контакта сновального и уплотняющего валов получено расчетное выражение для вычисления момента нагрузки электродвигателя сновального вала от действия уплотняющего вала в виде:

$$M_c = 0,12 \cdot \frac{\rho_c P}{i_p L_y} \sqrt{\frac{P(1 - \mu_n^2)}{L_y \rho_y E_n}}, \quad (1)$$

где  $\rho_c$ ,  $\rho_y$  – радиусы сновального и уплотняющего валов, м;  $L_y$  – длина уплотняющего вала, м;  $P$  – усилие прижима в зоне контакта сновального и уплотняющего валов, Н;  $\mu_n$  – коэффициент Пуассона для намотки сновального вала;  $E_n$  – модуль продольной упругости намотки сновального вала, Н/м.

Разработана математическая модель взаимного влияния процессов деформации основы и нити в системе асинхронного электропривода механизма сновального вала. При разработке приняты допущения, в соответствии с которыми процессы деформации нити рассматриваются в области ее положительных натяжений при отсутствии аэродинамического трения о воздух, а также известной зависимости силы трения от скорости движения нити в натяжном приборе без учета возможных ее поперечных и продольных колебаний.

На основе анализа существующих математических моделей процесса формирования сновальных валов показано, что достаточную точность расчета параметров намотки обеспечивает модель с непрерывной скоростью движения точки наматывания по спирали Архимеда.

Рассмотрены известные устройства управления процессом намотки, построенные на основе различных модификаций математических моделей спирали Архимеда, в ходе анализа которых установлено, что они не позволяют контролировать нагрузку от

действия уплотняющего вала на электропривод механизма сновального вала. С учетом этого разработано устройство управления взаимосвязанными электроприводами механизмов сновального и уплотняющего валов, построенное в функции рассогласования теоретического и фактического радиусов катушки под контролем тока нагрузки электродвигателя сновального вала, позволяющее исключить перегрев приводного электродвигателя механизма сновального вала.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы, связанные с исследованием энергетики асинхронного электропривода механизмов формирования сновальных валов.

Выполнен анализ оптимальных алгоритмов частотного и векторного управления асинхронным электроприводом. Показано, что с точки зрения энергетической оптимальности закон минимизации потерь мощности оказывается наиболее энергоэффективным, так как при его реализации оптимизируются также и магнитные потери, а оптимальные зависимости активного тока статора и потокосцепления ротора формируются на основе обмоточных параметров асинхронного электродвигателя и поэтому являются индивидуальными для каждого типа двигателя.

Построена структура системы векторного управления асинхронным электроприводом механизма сновального вала с ориентацией переменных по вектору потокосцепления ротора, позволяющая реализовать энергосберегающий алгоритм с помощью независимого управления по каналам потокосцепления ротора и электромагнитного момента асинхронного электродвигателя. Для минимизации потерь мощности в системе был использован коэффициент связи, определяемый отношением активной и реактивной компонент тока статора

$$k_{\text{опт}} = \left( \frac{I_q}{I_d} \right)_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{R_{\text{и}} + R_{\text{с}} + \frac{2}{3}R_{\text{д}} + \frac{2}{3}R_{\text{м}}(f, \Psi_r)L_{\text{м}}^2(\Psi_{\text{м}})}{R_{\text{и}} + R_{\text{с}} + \frac{2}{3}R_{\text{д}} + R_r \left( \frac{L_{\text{м}}(\Psi_{\text{м}})}{L_r} \right)^2}}, \quad (2)$$

оптимальное значение которого соответствует минимуму потерь мощности

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma}(k) &= \Delta P_{\text{и}}(k) + \Delta P_{\text{д}}(k) + \Delta P_{\text{с}}(k) + \Delta P_{\text{r}}(k) + \Delta P_{\text{с}}(k) + \Delta P_{\text{пост}} = \\ &= \frac{3Mk}{2m} \times \left( R_r \left( \frac{L_{\text{м}}(\Psi_{\text{м}})}{L_r} \right)^2 + \left( 1 + \frac{1}{k^2} \right) \left( R_{\text{с}} + R_{\text{и}} + \frac{2}{3}R_{\text{д}} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{2R_{\text{м}}(f, \Psi_r)L_{\text{м}}^2(\Psi_{\text{м}})}{3k^2} \right) + \Delta P_{\text{пост}}, \quad (3) \end{aligned}$$

где  $\Delta P_{\text{и}}(k)$  – потери в автономном инверторе напряжения, Вт;  $\Delta P_{\text{д}}(k)$  – добавочные потери в асинхронном электродвигателе, Вт;  $\Delta P_{\text{с}}(k)$  – магнитные потери в стали, совокупно учитывающие потери от вихревых токов и гистерезиса, Вт;  $\Delta P_{\text{с}}(k)$ ,  $\Delta P_{\text{r}}(k)$  –

электрические потери в обмотках статора и ротора, Вт;  $\Delta P_{\text{пост}}$  – механические потери мощности на валу электродвигателя, Вт;  $R_{\text{и}}$  – активное сопротивление ключей инвертора, Ом;  $R_{\text{м}}(f, \Psi_r)$  – коэффициент, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты и потокосцепления ротора;  $L_r, L_{\text{м}}(\Psi_{\text{м}})$  – индуктивности цепи ротора и цепи намагничивания, Гн;  $R_s, R_r$  – активные сопротивления обмоток статора и ротора, Ом;  $R_{\text{д}}$  – сопротивление добавочных потерь, Ом.

Установлено, что оптимальная величина коэффициента связи существенно зависит от обмоточных параметров асинхронного электродвигателя, индуктивности цепи намагничивания и эквивалентного сопротивления, совокупно учитывающего потери в стали от вихревых токов и гистерезиса. В меньшей степени коэффициент связи зависит от активных сопротивлений статорной и роторной обмоток электродвигателя. Для более точной оценки оптимальной величины коэффициента связи в процессе работы электропривода необходима идентификация системой управления изменяющихся обмоточных параметров асинхронного электродвигателя.

На основе уравнений асинхронного электродвигателя, соотношений инерционности электромагнитных и механических процессов в системе электропривода механизма сновального вала получены оптимальные зависимости активной и реактивной компонент вектора тока статора при работе по энергосберегающему алгоритму управления:

$$\begin{cases} I_{\text{sq}} = \sqrt{\frac{2L_r M}{3p_{\text{п}} L_{\text{м}}^2}} k_{\text{опт}} \text{sign}(M); \\ I_{\text{sd}} = \sqrt{\frac{2L_r M}{3p_{\text{п}} L_{\text{м}}^2 k_{\text{опт}}}}; \\ E_r = \hat{\omega}_{\Psi} \Psi_r = \hat{\omega}_{\Psi} \sqrt{\frac{2L_r M}{3p_{\text{п}} k_{\text{опт}}}}; \\ M_{\text{пор}} = \frac{3p_{\text{п}}}{2L_r} \Psi_{\text{п}}^2 k_{\text{опт}}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $M$  – электромагнитный момент, Нм;  $p_{\text{п}}$  – число пар полюсов АД;  $\Psi_r$  – потокосцепление ротора, Вб;  $m = (3p_{\text{п}} L_{\text{м}}^2) / (2L_r)$  – конструктивный коэффициент, Гн;  $E_r$  – величина ЭДС, В;  $\hat{\omega}_{\Psi}$  – вычисленное значение угловой скорости вращения вектора потокосцепления ротора, рад/с.

Разработанная структурная схема асинхронного электропривода механизма сновального вала с энергосберегающим алгоритмом управления приведена на рис. 3.

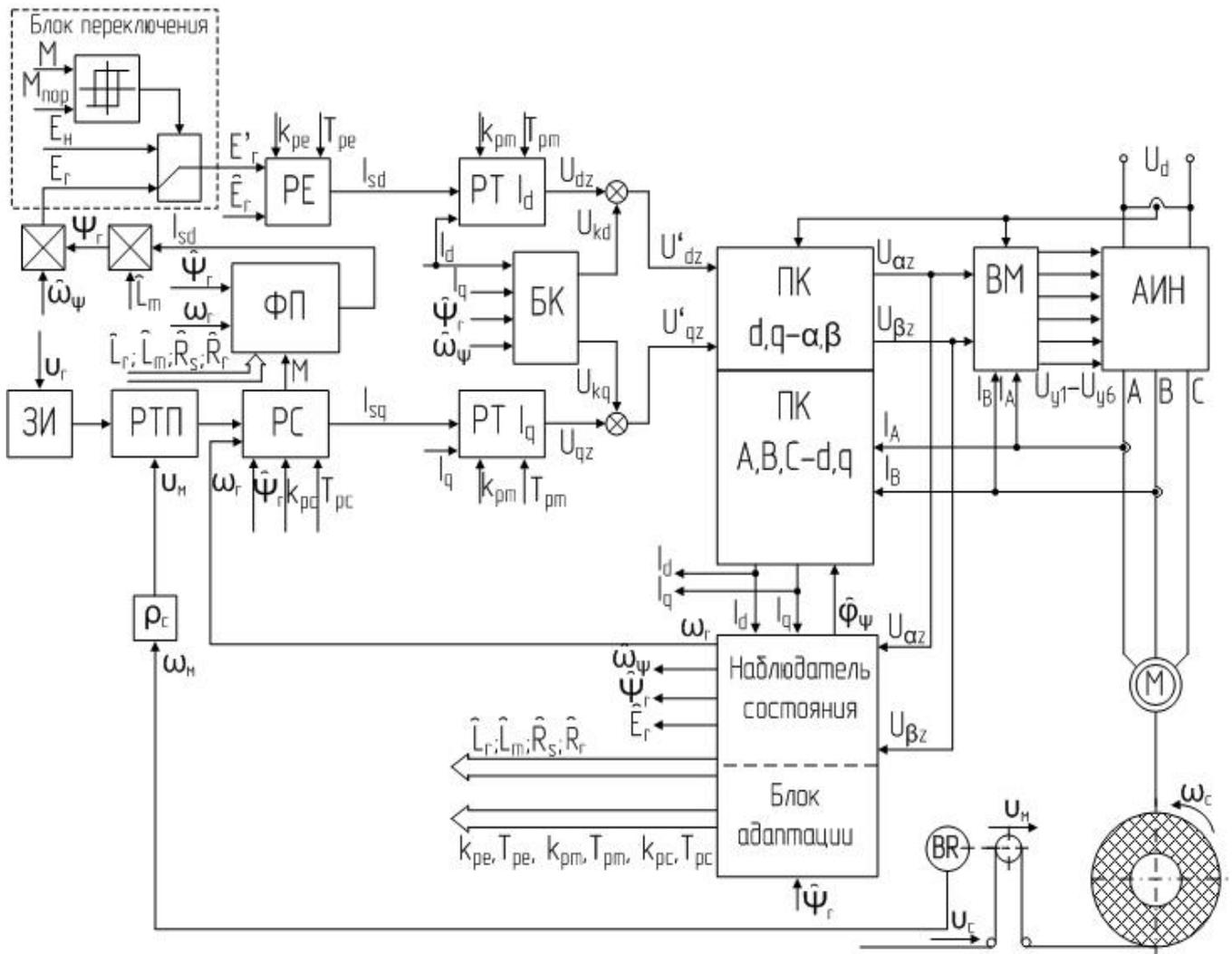


Рис. 3. Структурная схема асинхронного электропривода механизма сновального вала с энергосберегающим алгоритмом управления

Рассматриваемая структура электропривода включает задатчик интенсивности ЗИ, функциональный преобразователь ФП, блок переключения алгоритмов управления, наблюдатель состояния и блок адаптации, ПИ-регуляторы активной и реактивной компонент вектора тока статора, ПИ-регуляторы ЭДС, угловой скорости и ПИД-регулятор линейной скорости снования, координатные преобразователи векторов тока и напряжения, блок компенсации перекрестных связей.

При превышении номинального значения потокосцепления ротора и достижении электромагнитным моментом порогового значения в системе векторного управления электроприводом с помощью блока переключения осуществляется переход к традиционному закону управления асинхронным электродвигателем на основе постоянства потокосцепления ротора. Для исключения автоколебаний в рассматриваемой структуре асинхронного электропривода переключение между алгоритмами управления предусмотрено только в канале реактивной составляющей вектора тока статора.

Результаты моделирования разработанной системы векторного управления асинхронным электроприводом в динамических и статических режимах работы, ил-

люстрируемые на рис. 4,5 графиками переходных процессов, позволили сделать вывод о корректности использования предложенного энергосберегающего алгоритма.

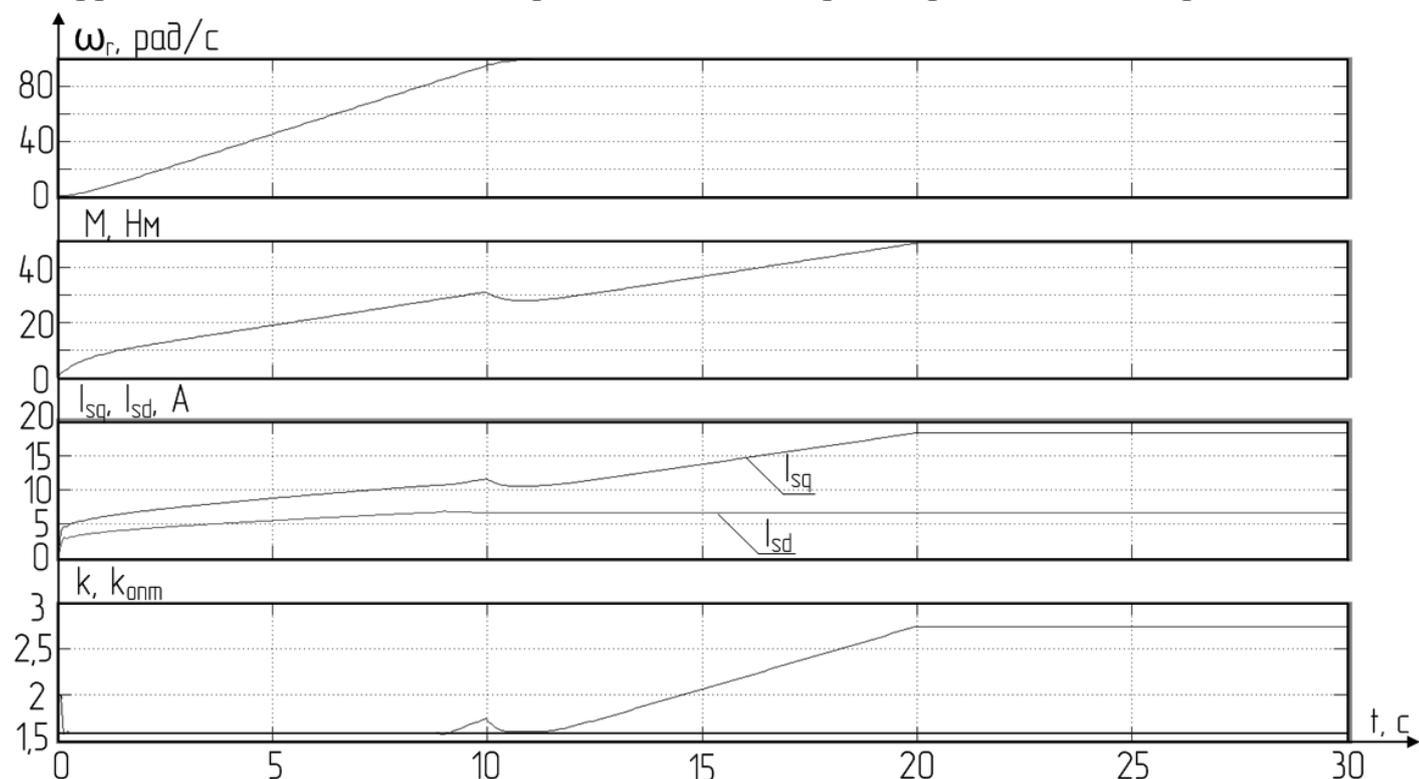


Рис. 4. Переходные процессы угловой скорости  $\omega_r$  и электромагнитного момента  $M$  асинхронного двигателя механизма сновального вала, активной  $I_{sq}$  и реактивной  $I_{sd}$  проекций вектора тока статора и коэффициента связи  $k$  при линейном изменении момента нагрузки и начальных параметрах обмотки

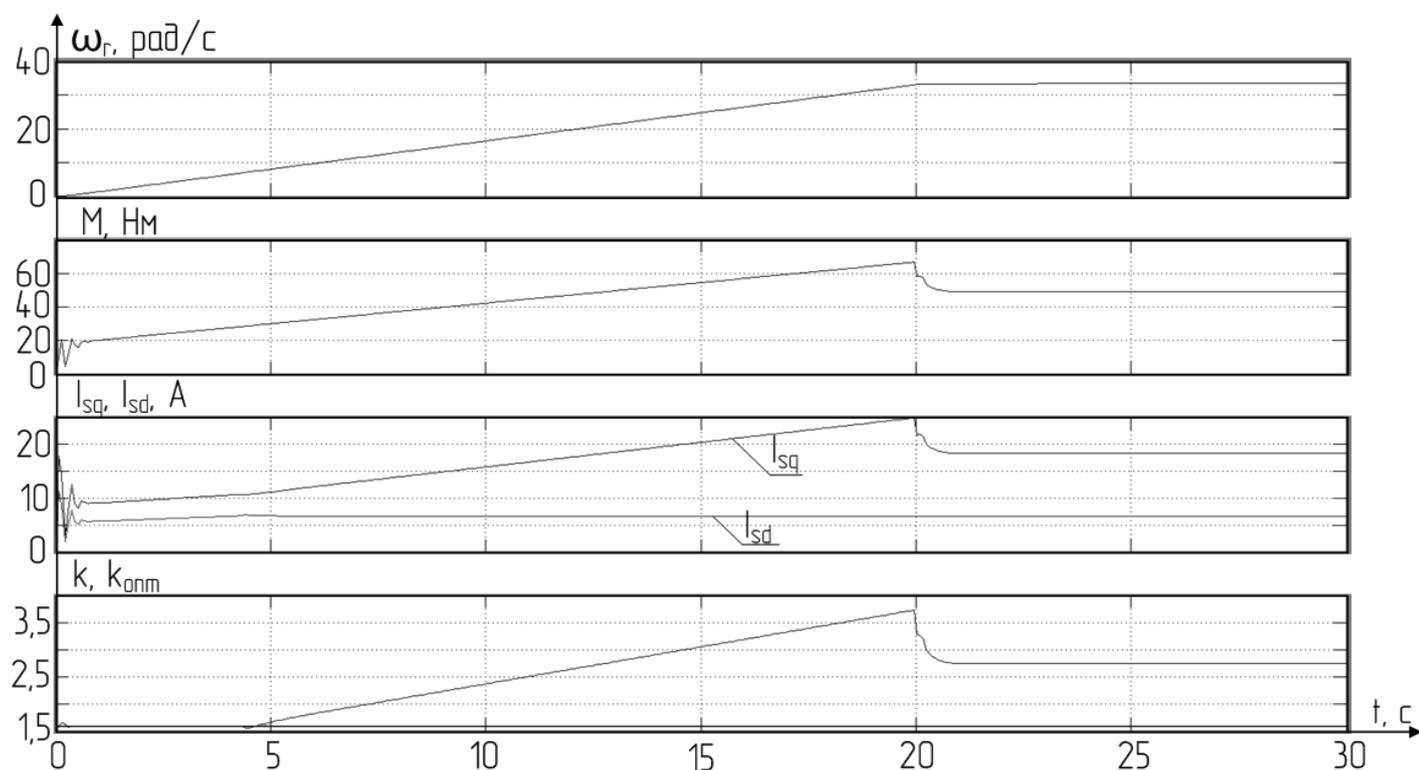


Рис. 5. Переходные процессы угловой скорости  $\omega_r$  и электромагнитного момента  $M$  асинхронного двигателя механизма сновального вала, активной  $I_{sq}$  и реактивной  $I_{sd}$  проекций вектора тока статора и коэффициента связи  $k$  при линейном изменении момента нагрузки и конечных параметрах обмотки

Из приведенных временных зависимостей видно, что система векторного управления асинхронным электроприводом механизма сновального вала отработывает энергосберегающий алгоритм при нагрузках, не превышающих порогового значения электромагнитного момента. При этом потери электроэнергии при переключении системы на закон стабилизации потокосцепления ротора увеличиваются до 14,5 % по отношению к суммарным потерям электропривода при его работе по энергосберегающему алгоритму.

**Четвертая глава** посвящена разработке функциональной схемы, алгоритма и программного обеспечения координированного управления асинхронными электроприводами механизмов сновального и уплотняющего валов.

При разработке функциональной схемы системы управления электроприводами механизмов сновального и уплотняющего валов (рис. 6) использован алгоритм управления, отработывающий рассогласование теоретического и фактического радиусов формируемых сновальных валов под контролем тока нагрузки приводного электродвигателя.

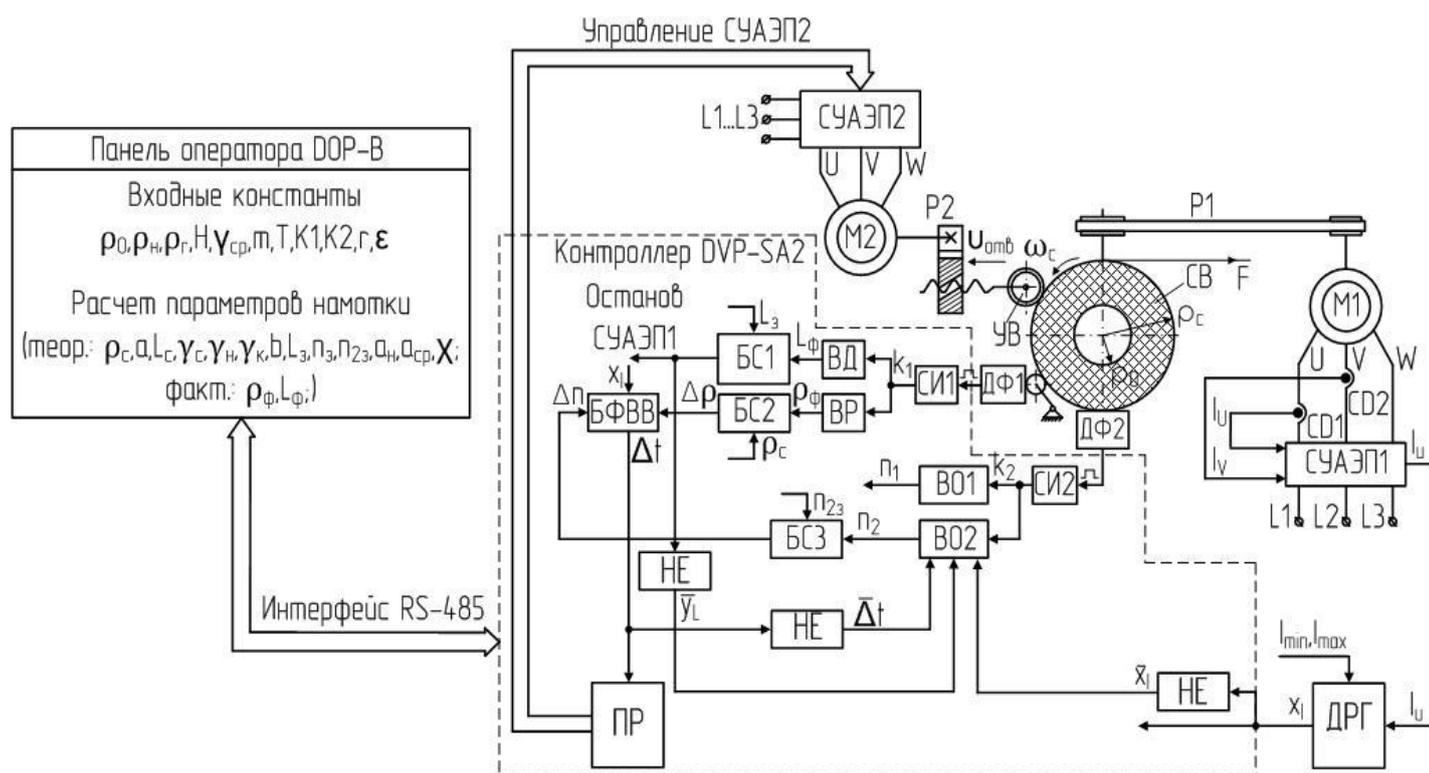


Рис. 6. Функциональная схема устройства управления процессом намотки и взаимосвязанными асинхронными электроприводами механизмов сновального и уплотняющего валов

Функциональная схема включает асинхронные электроприводы сновального СУАЭП1 и уплотняющего СУАЭП2 валов, их асинхронные двигатели M1, M2 и редукторы P1, P2; быстродействующая программируемая панель оператора DOP-B и логический контроллер DVP-SA2, реализующие математическую модель намотки и алгоритм управления электроприводами механизмов сновального и уплотняющего валов;

датчики тока CD1,CD2; энкодеры ДФ1,ДФ2, связанные с накладным роликовым датчиком радиуса намотки (длины основы) и пинолью сновальной машины; счетчики СИ1,СИ2 числа импульсов  $k_1, k_2$  с энкодеров ДФ1, ДФ2; вычислители длины основы  $L_\phi$  ВД и радиуса намотки  $\rho_\phi$  ВР; вычислители ВО1 текущего количества оборотов сновального вала  $n_1$  и ВО2 количества оборотов  $n_{23}$ , при котором вычисляется рассогласование между фактическим  $\rho_\phi$  и теоретическим  $\rho_c$  радиусами намотки; двухпозиционное реле с гистерезисом ДРГ; логические элементы “НЕ”; программируемое реле ПР; блоки сравнения БС1..БС3; блок формирования выдержки времени БФВВ замыкания ПР.

Для реализации математической модели в контроллер записываются входные параметры намотки, на основе которых в программе панели оператора вычисляются максимальная длина основы  $L_3$ , параметр  $a$  спирали Архимеда, плотности начального и конечного слоев намотки  $\gamma_n, \gamma_k$  начальное и среднее значения параметра спирали  $a_n, a_{cp}$ . После ввода в память контроллера всех параметров включается электропривод сновальной машины и начинается расчет теоретических и фактических значений радиуса сновального вала  $\rho_c, \rho_\phi$  и длины основы  $L_c, L_\phi$  на основе импульсов с энкодеров ДФ1, ДФ2. При этом в соответствии с математической моделью в процессе намотки рассчитываются теоретические значения радиуса намотки  $\rho_c$ , ее плотности  $\gamma_c$ , длины основы  $L_c$  и параметра спирали  $a$ .

Блок БС1 осуществляет сравнение фактической длины основы  $L_\phi$  с ее заданным значением  $L_3$  и выдает на свой выход логический сигнал  $y_L$ . Если выполняется условие  $L_\phi \geq L_3$ , тогда на выходе блока БС1 формируется сигнал  $y_L = 1$  на останов электропривода механизма сновального вала, а его инверсный сигнал  $\bar{y}_L = 0$  на выходе элемента НЕ обнуляет вычислитель ВО2.

На основе сигналов с датчиков тока CD1, CD2 в СУАЭП1 вычисляется величина действующего значения тока статора  $I_u$ , поступающая на вход ДРГ с границами переключения, соответствующими минимальной  $I_{min}$  и максимальной  $I_{max}$  уставкам тока статора двигателя механизма сновального вала. При возрастании радиуса намотки и неподвижном уплотняющем вале возрастает ток нагрузки  $I_u$ , а при выполнении условия  $I_u \geq I_{max}$  на выходе ДРГ формируется дискретный сигнал  $x_1 = 1$ , поступающий на вход БФВВ, где с учетом вычисленного рассогласования  $\Delta\rho$  формируется импульсный сигнал  $\Delta t = 1$  с периодом  $t$ , определяющим время включения ПР и отвода уплотняющего вала. При этом инверсный сигнал  $\bar{\Delta t} = 0$  на выходе второго элемента НЕ вы-

полняет функцию обнуления ВО2. Если в пяти циклах расчета подряд выполняется условие  $I_u \geq I_{\max}$ , тогда отвод привода уплотняющего вала происходит в функции тока  $I_u$  до минимальной токовой уставки  $I_{\min}$ . При уменьшении тока до минимального значения на выходе ДРГ формируется сигнал  $x_1 = 0$ , ПР размыкается, отключая электродвигатель М2. При формировании дискретного сигнала  $x_1 = 1$  на выходе ДРГ его инверсный сигнал  $\bar{x}_1 = 0$  на выходе третьего элемента НЕ автоматически обнуляет ВО2.

В блоке БС2 осуществляется сравнение и вычисление рассогласования фактического  $\rho_\phi$  и теоретического  $\rho_c$  радиусов намотки. В блоке БС3 сравнивается текущее число оборотов сновального вала  $n_2$  с заданным числом оборотов  $n_{23}$ . Если  $n_2 = n_{23}$  и  $I_u < I_{\max}$ , тогда в соответствии с рассогласованием радиусов намотки  $\Delta\rho$  на выходе БФВВ формируется импульсный сигнал  $\Delta t = 1$  с периодом  $t$ , определяющим время отвода электропривода уплотняющего вала. По истечении времени  $t$  ПР выключается и отвод уплотняющего вала прекращается, а дискретный сигнал  $\bar{\Delta t} = 1$  разрешает работу ВО2 и дальнейшее выполнение программы.

На базе построенного алгоритма управления процессом намотки и электроприводами механизмов сновальной машины разработано программное обеспечение для контроллера DVP-SA2 и панели оператора DOP-B в средах программирования WPL-Soft и DOP-Soft (разработаны компанией Дельта Электроникс). В панели оператора предусмотрен USB-выход для подключения внешних Flash-накопителей с целью копирования архивов массивов параметров уже сформированных сновальных валов, а процесс обмена данными между панелью оператора и контроллером осуществляется с помощью стандартного интерфейса RS-485.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты работы.

**В приложениях** приведены теоретический материал и результаты исследований, не вошедшие в основную часть работы; распечатки расчетных документов, реализующих работу имитационных математических моделей; материалы по внедрению; полученные патентные документы.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В результате выполненных исследований, направленных на совершенствование системы электропривода партионной сновальной машины, показана целесообразность координированного управления электроприводами механизмов уплотняющего и сновального валов, обеспечивающего оптимизацию как энергетических, так и технологических показателей процесса намотки.

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. На основе анализа известных устройств и способов контроля и измерения длины основы, радиуса намотки и ее плотности установлена целесообразность комбинированного контроля этих переменных с помощью датчиков и математической модели.

2. На основе разработанной математической модели деформации основы в зоне мерильного вала, учитывающей условия упруговязкого скольжения нитей по его поверхности, показано, что оно вносит в канал обратной связи системы управления электроприводом механизма намотки динамическую ошибку по линейной скорости основы.

3. На основе полученных частотных функций чувствительности системы электропривода к вариациям параметров намотки установлено, что наибольшее влияние на динамические характеристики оказывают вариации модуля упругости и постоянной времени натяжения основы, а также коэффициента передачи обратной связи по линейной скорости в начале намотки, а на статические характеристики вариации коэффициента передачи по линейной скорости.

4. На основе полученного комплексного математического описания процессов деформации основы и нити построена структурная схема, устанавливающая взаимную связь этих процессов в условиях действия возмущений.

5. Разработанный алгоритм минимизации энергопотребления в системе векторного управления асинхронным электроприводом механизма сновального вала позволяет уменьшить суммарные потери электроэнергии до 14,5 % по сравнению с алгоритмом стабилизации потокосцепления ротора.

6. Разработанный на основе линейной математической модели намотки в виде спирали Архимеда алгоритм координированного управления электроприводами механизмов сновального и уплотняющего валов позволяет исключить возможность перегрузки электродвигателя сновального вала и обеспечить необходимую точность параметров намотки формируемых сновальных валов.

7. Разработанный алгоритм управления взаимосвязанными электроприводами сновального и уплотняющего валов, реализованный на базе контроллера и разработанной математической модели намотки, позволяет обеспечить контроль процесса наматывания на основе мониторинга его текущих параметров.

## **Публикации по теме диссертации**

### ***Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК***

1. **Глазунов, В.Ф.** Асинхронный электропривод механизма формирования сновальных валов / В.Ф. Глазунов, А.Б. Виноградов, К.С. Шишков // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 83-87.
2. **Шишков, К.С.** Влияние вариации параметров намотки на электропривод механизма сновального вала / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012. – Вып. 1. – С. 111-115.
3. **Шишков, К.С.** Минимизация потерь мощности в асинхронном электроприводе механизма намотки сновальных валов / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012. – Вып. 2. – С. 129-133.
4. **Шишков, К.С.** Математическое моделирование процессов деформации основы и нити в системе электропривода механизма сновального вала / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013. – Вып. 6. – С. 143-147.

### ***Патенты Российской Федерации***

5. **Шишков, К.С.** Пат. 2423562 РФ, МПК D 02 H 13/28. Устройство управления формированием сновальных валов / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов А.Ю. Кутьин. (РФ). – № 2010125620/12; Заявлено 22.06.2010; Опубл. 10.07.2011, Бюл. № 19.
6. **Глазунов, В.Ф.** Пат. 2461672 РФ, МПК D 02 H 13/00. Устройство управления формированием сновальных валов / В.Ф. Глазунов, К.С. Шишков. (РФ). – № 2011117235/12; Заявлено 28.04.2011; Опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26.

### ***Публикации в других изданиях***

7. **Кутьин, А.Ю.** О центростремительной силе, действующей на элемент витка цилиндрической намотки / А.Ю. Кутьин, К.С. Шишков, М.М. Хаджар, Э.Г. Галиаскаров // ГОУ ВПО Ивановский государственный химико-технологический университет. – Иваново, 2009. – 5 с. – Деп. в ВИНТИ. – 26.03.2009.
8. **Кутьин, А.Ю.** Об особенностях проектирования систем управления для современного сновального и шлихтовального оборудования / А.Ю. Кутьин, Ю.К. Кутьин, К.С. Шишков // СПб: Наука и производство. – 2010. – Вып. 2. – С. 10-12.
9. **Шишков, К.С.** Энергосберегающий алгоритм управления электроприводом сновальной машины / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов // М.: Приводная техника. – 2011. – Вып. 6. – С. 9-14.
10. **Шишков, К.С.** Система управления процессом формирования сновальных валов / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XV междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: МЭИ, 2009. – Т. 2. – С. 144-145.
11. **Шишков, К.С.** О совершенствовании электропривода механизма намотки сновальных валов / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов // Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности (ПОИСК-2011): Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов. – Иваново: ИГТА, 2011. – Т. 2. – С. 65-67.

12. **Шишков, К.С.** Взаимосвязанный электропривод механизмов сновальной машины / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов // Тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. (XVI Бенардосовские чтения) / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – С. 59-61.

13. **Шишков, К.С.** Взаимосвязанные асинхронные электроприводы механизмов сновальной машины / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 9-11.

14. **Шишков, К.С.** Построение СУЭП механизма формирования сновальных валов для режима минимизации потерь мощности / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов // Сборник работ победителей отборочного тура Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по нескольким междисциплинарным направлениям / Мин. обр. и науки РФ, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: Лик, 2011. – С. 224-227.

15. **Шишков, К.С.** Оптимизация энергопотребления двухсвязного электропривода механизмов сновальной машины / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XVIII междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: МЭИ, 2012. – Т. 2. – С. 339.

16. **Шишков, К.С.** О построении системы управления наматыванием сновальных валов / К.С. Шишков, В.Ф. Глазунов // Тезисы докл. VII междунар. (XVIII всероссийская) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2012). – Иваново: ИГЭУ, 2012. – С. 503-506.

ШИШКОВ Кирилл Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ  
СНОВАЛЬНЫХ ВАЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 31 марта 2014 г. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

Печать плоская. Усл.печ.л.1.16.

Тираж 100 экз.

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

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34