

*На правах рукописи*



**САЛМОВ Евгений Николаевич**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ  
ВЕНТИЛЬНО-ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В  
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ОРГАНИЗОВАННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ**

**Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пенза – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный технологический университет» на кафедре «Технология машиностроения».

- Научный руководитель – доктор технических наук, доцент  
**Прошин Иван Александрович.**
- Официальные оппоненты: **Ковальногов Владислав Николаевич,**  
доктор технических наук,  
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный  
технический университет», заведующий ка-  
федрой «Тепловая и топливная энергетика»;  
**Гарькина Ирина Александровна,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный  
университет архитектуры и строительства»,  
профессор кафедры «Математика и матема-  
тическое моделирование».
- Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина  
Ю.А.», г. Саратов.

Защита состоится 23 июня 2016 г., в 13 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.337.01 на базе ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет» по адресу: 440039, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, д.1а / 11, ПензГТУ, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» и на сайте [www.penzgtu.ru](http://www.penzgtu.ru).

Автореферат разослан 29 апреля 2016 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



**Чулков Валерий Александрович**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современные подходы и средства математического моделирования вентильно-электромеханических систем предоставляют широкие возможности исследования и совершенствования электроприводов технологического оборудования. Однако развитие систем многодвигательного электропривода в технических комплексах различного назначения, в том числе последовательно организованных, выдвигает на первый план создание инструментов комплексных исследований таких приводов как единых взаимосвязанных систем, прежде всего средств их математического моделирования на системном уровне и на уровне отдельных элементов.

Основой исследования многосекционных электромеханических систем являются методы математического моделирования многосвязных систем и теория обобщённого электромеханического преобразования энергии, созданные в работах Г. Крона, Г.Н. Петрова, К. Ковача, Е.Я. Казовского, И. Раца, И.Н. Постникова, И.П. Копылова и развитые в работах М.Г. Чиликина, В.И. Ключева, А.С. Сандлера, Л.П. Петрова, Г.Б. Онищенко, Ф. Блашке, И.А. Прошина и других учёных. Моделирование вентильных преобразователей основано на методах, разработанных Я.З. Цыпкиным, А.В. Поссе, Г.А. Ривкиным, Ю.Г. Толстовым, Т.Д. Такеути, И.И. Кантером, А.С. Васильевым, А.А. Булгаковым, Г.Г. Жемеровым, Б. Пелли, Л. Джуджи и другими учёными.

Несмотря на наличие множества методов математического моделирования электроприводов, они не обеспечивают в полной мере моделирования многосекционных управляемых вентильно-электромеханических систем, решение задачи требует преодоления ряда противоречий, связанных с ограниченными функциональными возможностями известных подходов. Современные средства ориентированы на моделирование компонентов электропривода как отдельных объектов исследования, в то время как исследование многосекционного электропривода предполагает подход к нему как к единому объекту. Кроме того, моделирование вентильных преобразователей требует задания множества возможных состояний каждого из переключающих элементов.

Все это обуславливает постановку и решение научной задачи совершенствования и разработки методов, численных алгоритмов и комплексов программ моделирования, обеспечивающих углубленное исследование многосвязных многодвигательных вентильно-электромеханических систем.

**Цель работы** – повышение результативности комплексного исследования и проектирования многосекционных вентильно-электромеханических систем в последовательно организованных технологических комплексах путем разработки методов, алгоритмов и комплекса программ их имитационного моделирования.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**.

1. Разработать метод математического моделирования многосекционных электроприводов в последовательно организованных технологических комплексах.
2. Разработать алгоритмы численного математического моделирования последовательных многодвигательных вентильно-электромеханических систем.
3. Обосновать критерий оценки и разработать алгоритм расчёта индикаторов эффективности последовательных многодвигательных комплексов по результатам моделирования.

4. Разработать методику математического моделирования вентиляльно-электромеханических систем, обеспечивающую их исследование и оценку эффективности многодвигательных электроприводов в составе последовательно организованных многосекционных технологических комплексов.

5. Разработать комплекс программ для моделирования последовательных многосвязных многосекционных вентиляльно-электромеханических систем.

**Объект исследования** – последовательно организованная многосвязная многосекционная вентиляльно-электромеханическая система.

**Предмет исследования** – методы математического моделирования последовательно организованных многосвязных многосекционных вентиляльно-электромеханических систем.

**Методы исследований:** фундаментальные положения теории электромеханического преобразования энергии, методы математического анализа элементов вентиляльно-электромеханических систем, методы математического и имитационного моделирования, численные методы решения дифференциальных уравнений.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

1. Разработан новый метод математического моделирования последовательных многосекционных многодвигательных комплексов, отличающийся способом формирования модели многосекционной системы из взаимосвязанных многомерных блоков, моделирующих однотипные компоненты секций, что обеспечивает моделирование таких систем на базе единой инвариантной к количеству секций структуры модели, повышающий эффективность моделирования и удобство анализа результатов.

2. Разработаны алгоритмы численного моделирования последовательных многодвигательных вентиляльно-электромеханических комплексов, отличающиеся процедурами формирования матриц системы и структуры модели по значениям переключающих функций амплитуды, обеспечивающие сокращение вычислительных затрат.

3. Разработаны комплексный критерий, компонентный портрет и алгоритм расчёта индикаторов эффективности, отличающиеся методом формирования оценок отклонений по скорости и моменту, обеспечивающие численную оценку и наглядное представление результатов математического моделирования многосекционных технологических комплексов.

4. Разработана методика математического моделирования вентиляльно-электромеханических систем, включающая этапы формирования модели многосекционной системы из взаимосвязанных многомерных блоков, расчёта критерия эффективности и построения многокомпонентных портретов, позволяющая сократить время и повысить эффективность моделирования последовательных многодвигательных технологических комплексов.

5. Создан комплекс программ моделирования последовательных многосвязных вентиляльно-электромеханических систем с визуализацией результатов моделирования в виде компонентных портретов, обеспечивающий повышение результативности исследования и улучшение характеристик проектируемых многосекционных комплексов.

**Практическая значимость.** Применение разработанных метода, алгоритмов и методики позволяет повысить эффективность исследования последова-

тельно организованных многосвязных вентильно-электромеханических систем и сократить затраты на их проектирование. Созданный комплекс программ обеспечивает математическое моделирование и исследование последовательных многосекционных электроприводов в реальных технологических комплексах и в учебном процессе в составе интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий. Разработанные рекомендации по практическому применению результатов проведенных исследований обеспечивают эффективное использование полученных решений для моделирования последовательных многодвигательных электроприводов, оценки качества функционирования систем в процессе их исследования и проектирования.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Материалы диссертационной работы внедрены в ОАО «Маяк» и в ООО «Норд-Пак», а также использованы в учебном процессе на кафедре «Технология машиностроения» Пензенского государственного технологического университета.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается корректным использованием численных методов и методов математического моделирования, апробацией на международных и всероссийских конференциях, экспериментальными исследованиями, внедрением на промышленных предприятиях.

**Личный вклад автора** состоит в получении основных научных результатов, приведенных в диссертации и сформулированных в положениях, выносимых на защиту. Научному руководителю принадлежат разработка концепции решаемой задачи и участие в анализе и обобщении результатов. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве состоит в следующем: [1, 9] – структура комплекса программ и результаты моделирования, [4, 5, 10, 17, 20] – метод, методика и результаты моделирования взаимосвязанной многодвигательной системы, [2, 11, 12, 14, 15] – анализ существующих подходов моделирования элементов вентильно-электромеханических систем и результаты математического моделирования, [13] – анализ и обоснование методов моделирования различных типов механических связей, [3, 6, 16, 18] – численные алгоритмы моделирования выходных напряжений вентильных преобразователей, [7, 19] – комплексный критерий оценки эффективности моделирования.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Область исследования соответствует паспорту специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по пунктам: п. 1 – разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; п. 4 – реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента; 5 – комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента; п. 8 – разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

#### **На защиту выносятся.**

1. Метод математического моделирования последовательных многодвигательных вентильно-электромеханических систем, состоящий в формировании матриц системы из многомерных блоков на базе обобщенной структуры.

2. Совокупность алгоритмов численного моделирования последовательной многосвязной многодвигательной вентильно-электрохимической системы, основанных на процедурах формирования матриц системы и структуры модели по значениям переключающих функций амплитуды.

3. Комплексный критерий оценки эффективности функционирования многосвязных многосекционных вентильно-электрохимических систем и алгоритм расчёта индикаторов эффективности в едином пространстве энергетических и технологических параметров с отображением результатов моделирования посредством компонентного портрета.

4. Методика математического моделирования многосекционных систем электроприводов в последовательно организованных технологических объектах, включающая анализ и комплексную оценку эффективности системы.

5. Комплекс программ моделирования, позволяющий проводить исследования и оценку работы последовательных многосвязных многосекционных вентильно-электрохимических систем при вариации мощности электродвигателей, способов управления и нагрузок.

6. Результаты математического моделирования, численная оценка результатов экспериментальных исследований и математического моделирования, подтверждающие адекватность и эффективность созданных метода, алгоритмов, методики и комплекса программ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: научно-технической конференции молодых специалистов «Системы обработки информации и управления» (Пенза, 2005 г.); XXIX международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2013 г.); международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы технических наук» (Уфа, 2014 г.); международной научно-практической конференции «Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития» (Тамбов, 2014 г.); XI международной научно-практической конференции «Теоретические и практические аспекты развития современной науки» (Москва, 2014 г.); V международной научно-практической конференции «Модернизация современного общества: проблемы, пути развития и перспективы» (Ставрополь, 2014 г.); второй международной научной конференции «European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences» (Вена, 2014 г.); четвёртой международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной науки в 21 веке» (Махачкала, 2014 г.); XLI международной научно-практической конференции «Инновации в науке» (Новосибирск, 2015 г.); III международной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований: от теории к практике» (Чебоксары, 2015 г.); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы технических наук» (Уфа, 2015 г.); международной научно-практической конференции «Инновационные процессы в научной среде» (Пермь, 2015 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 23 работы, в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка использованных источников, включающего 156 наименований, и приложения. Текст изложен на 169 страницах, содержит 104 рисунка и 16 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** отражена актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы его цель и основные задачи, научная новизна и практическая ценность, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** проведен анализ методов математического моделирования многодвигательного электропривода последовательно организованных технологических комплексов (ПОТК) как сложной многосвязной технической системы. Отдельная секция такого электропривода представляет собой управляемую вентильно-электромеханическую систему (ВЭМС), моделирование которой подразумевает рассмотрение её как единой совокупности элементов. Необходимость исследования последовательного многосекционного электропривода обуславливает актуальность разработки методов математического моделирования многосвязных многосекционных вентильно-электромеханических систем (ММВЭМС) с учётом способов управления, дискретности работы вентильного преобразователя (ВП), механизмов внутреннего преобразования энергии и особенностей взаимосвязей между секциями привода.

Рассмотрены методы математического моделирования вентильных и электромеханических преобразователей как составных частей ВЭМС. В результате анализа в качестве основы моделирования ВП выбран подход, основанный на представлении выходного напряжения непосредственного преобразователя электрической энергии (НПЭ) в виде гармонического колебания с дискретно управляемой начальной фазой. За основу при моделировании электромеханической части принят метод моделирования в связанной со статором асинхронного двигателя двухфазной системе координат  $\alpha$ ,  $\beta$ . В результате анализа установлено, что известные методы математического моделирования направлены на исследование компонентов многосвязных ВЭМС по отдельности, а методы моделирования последовательных электроприводов не обеспечивают анализ их как элементов целостной ММВЭМС.

Рассмотрение существующих комплексов программ математического моделирования показывает, что как универсальные, так и специализированные средства требуют задания множества параметров и составления множества моделей при исследовании многодвигательных систем. Оценка результатов моделирования наталкивается на трудности, связанные с разнородностью и большим числом анализируемых параметров. Это обуславливает необходимость разработки новых комплексов программ на базе усовершенствованных методов математического моделирования и численных алгоритмов.

На основе выполненного в первом разделе анализа структур последовательного многосекционного электропривода, методов и комплексов программ его математического моделирования обоснованы задачи, решаемые при создании системы компьютерно-имитационного моделирования ММВЭМС в последовательно организованных технологических комплексах.

**Второй раздел** направлен на исследование последовательно организованных электроприводов как системы взаимосвязанных элементов. Согласно принятой методологии, разработаны численные алгоритмы и методы математического моделирования элементов ВЭМС, являющиеся отдельными компонентами создаваемых методов и алгоритмов моделирования последовательных многосекционных ВЭМС. Показаны результаты моделирования.

Так как для последовательных многосекционных электроприводов основными являются установившиеся режимы с поддержанием скоростей и распределения моментов нагрузки, математическое моделирование может выполняться на рабочем участке характеристики без учёта дискретности работы ВП. Предложен метод моделирования обобщённой управляемой вентильно-электро-механической системы на рабочем участке характеристики, для которого структура включает регулятор (Р), ВП, электро-механический преобразователь (ЭМП) и рабочий орган (РО) (рисунок 1).

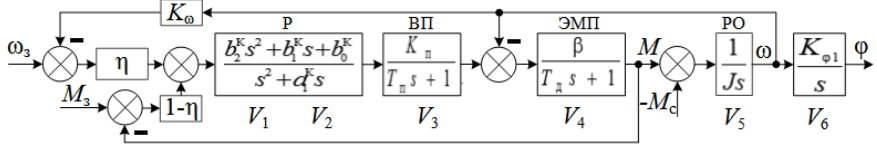


Рисунок 1 – Обобщённая структура управляемой вентильно-электро-механической системы на рабочем участке характеристики

На рисунке обозначены:  $\omega_3, \omega$  – скорости заданная и фактическая;  $\varphi$  – перемещение;  $M_3, M, M_c, J$  – моменты заданный, вращающийся, сопротивления, инерции;  $V_1-V_6$  – переменные состояния;  $\eta$  – коэффициент выбора режима управления;  $a^k, b^k$  – коэффициенты регулятора;  $s$  – комплексное число;  $K_\omega$  – коэффициент передачи датчика частоты вращения;  $T_n, T_d$  и  $K_n, \beta$  – постоянные времени и коэффициенты передачи ВП и ЭМП.

Для моделирования обобщённой ВЭМС запишем систему уравнений:

$$A = \begin{bmatrix} -a_1^k & 0 & 0 & -(1-\eta) & -\eta K_\omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(1-\eta) & -\eta K_\omega & 0 \\ \frac{K_{\Pi} C_1}{T_{\Pi}} & \frac{K_{\Pi} C_0}{T_{\Pi}} & -\frac{1}{T_{\Pi}} & -\frac{K_{\Pi} C_2}{T_{\Pi}} (1-\eta) & -\frac{K_{\Pi} C_2 K_\omega}{T_{\Pi}} \eta & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\beta}{T_d} & -\frac{1}{T_d} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1-\eta & \eta & 0 \\ 1-\eta & \eta & 0 \\ \frac{K_{\Pi} C_2}{T_{\Pi}} (1-\eta) & \frac{K_{\Pi} C_2}{T_{\Pi}} \eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\bar{V} = [V_1 \ V_2 \ V_3 \ V_4 \ V_5 \ V_6]^T; \bar{Y} = [M_3 \ \omega_3 \ M_c]^T; \quad (2)$$

$$\bar{V}^{(1)} = A \cdot \bar{V} + B \cdot \bar{Y}; \bar{V}^{(1)} = [V_1^{(1)} \ V_2^{(1)} \ V_3^{(1)} \ V_4^{(1)} \ V_5^{(1)} \ V_6^{(1)}]^T. \quad (3)$$

При математическом моделировании последовательно организованных многосекционных ВЭМС в переходных режимах исследование выполняется с учётом дискретности работы вентильных преобразователей. Для этого разработаны численные алгоритмы моделирования ВП, обоснованы методы моделирования систем на базе НПЭ и систем с векторным управлением. Моделирование всех режимов асинхронных электродвигателей при этом выполняется на базе



режимов симметричного трёхфазного и двухфазного включения, режима выега. Разработанный алгоритм отличается вычислением оператора поворота по значениям переключателей функций амплитуды.

Для обеспечения возможности исследования межсекционных механических связей ПОТК разработаны метод и численный алгоритм математического моделирования для произвольного числа приводных секций.

Основной результат второго раздела – разработанные численные алгоритмы и методы математического моделирования отдельных элементов вентиляльно-электромеханических систем, составляющие основу единого комплекса компьютерно-имитационного моделирования многодвигательных последовательно организованных электроприводов.

**Третий раздел** посвящён разработке численных алгоритмов и методов математического моделирования взаимосвязанных многодвигательных ВЭМС в ПОТК. Рассмотрено исследование основных режимов работы таких систем на рабочем участке характеристики, а также изучение механизма управления в зависимости от реальных характеристик ВП и нелинейности ЭМП. Разработан метод многосекционных компонент для моделирования многодвигательных ВЭМС (рисунок 2).

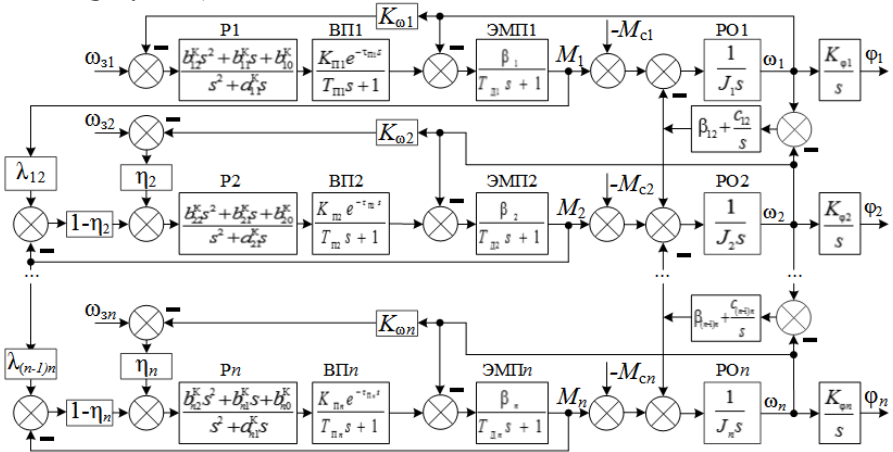


Рисунок 2 – Обобщённая структура  $n$  секционного электропривода

На рисунке 2 обозначены:  $\omega_{si}$  – задания по скорости,  $P_i$  – регуляторы; ВП*i* – вентиляльные преобразователи; ЭМП*i* – электромеханические преобразователи;  $\lambda_{(n-1)i}$  – коэффициенты распределения момента нагрузки;  $\eta_i$  – коэффициенты выбора режима управления.

Описание системы представим в матричной форме:

$$\bar{V}^{(1)} = A \cdot \bar{V} + B \cdot \bar{Y}; \quad \bar{V}^{(1)} = [\bar{V}_1^{(1)} \quad \bar{V}_2^{(1)} \quad \bar{V}_3^{(1)} \quad \bar{V}_4^{(1)} \quad \bar{V}_5^{(1)} \quad \bar{V}_6^{(1)}]^T; \quad (4)$$

$$\bar{V} = [\bar{V}_1 \quad \bar{V}_2 \quad \bar{V}_3 \quad \bar{V}_4 \quad \bar{V}_5 \quad \bar{V}_6]^T; \quad \bar{Y} = [\bar{Y}_1 \quad \bar{Y}_2]^T; \quad (5)$$

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \text{Регулятор и} \\
 \text{исполнительный} \\
 \text{механизм} \\
 \text{Обратная связь} \\
 \text{Электромеханическая система}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \\
 \begin{bmatrix}
 [A_{11}] & [0] & [0] & [A_{14}] & [A_{15}] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [A_{24}] & [A_{25}] & [0] \\
 [A_{31}] & [A_{32}] & [A_{33}] & [A_{34}] & [A_{35}] & [0] \\
 [0] & [0] & [A_{43}] & [A_{44}] & [A_{45}] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [A_{54}] & [A_{55}] & [A_{56}] \\
 [0] & [0] & [0] & [0] & [A_{65}] & [0]
 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \end{array}
 ;
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \text{Задание} \\
 \text{Возмущение} \\
 \text{Регулятор} \\
 \text{Исполнительный} \\
 \text{механизм} \\
 \text{Электромеханическая} \\
 \text{система}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 1 \quad 2 \\
 \begin{bmatrix}
 [B_{11}] & [0] \\
 [B_{21}] & [0] \\
 [B_{31}] & [0] \\
 [0] & [0] \\
 [0] & [B_{52}] \\
 [0] & [0]
 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \end{array}
 \end{array}
 \end{array}
 \quad (6)$$

Детализированное представление матриц регулятора и исполнительного механизма представим следующим образом:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \text{1} \\
 \text{2} \\
 \text{3}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{1} \\
 \text{2} \\
 \text{3}
 \end{array}
 \left[ \begin{array}{ccc|ccc|ccc}
 -a_{11}^k & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 0 & -a_{21}^k & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & \dots & -a_{n1}^k & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \hline
 \frac{K_{п1} C_{11}}{T_{п1}} & 0 & \dots & 0 & \frac{K_{п1} C_{10}}{T_{п1}} & 0 & \dots & 0 & -\frac{1}{T_{п1}} & 0 & \dots & 0 \\
 0 & \frac{K_{п2} C_{21}}{T_{п2}} & \dots & 0 & 0 & \frac{K_{п2} C_{20}}{T_{п2}} & \dots & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{п2}} & \dots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & \dots & \frac{K_{пn} C_{n1}}{T_{пn}} & 0 & 0 & \dots & \frac{K_{пn} C_{n0}}{T_{пn}} & 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{T_{пn}}
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Предлагаемый метод отличается тем, что матрицу системы формируют из взаимосвязанных многомерных блоков, моделирующих многосекционные однотипные компоненты, что обеспечивает расширение функциональных возможностей по анализу системы, сокращает время построения и работы с моделью, упрощает моделирование многосекционных систем электроприводов в последовательно организованных технологических объектах.

Созданы численные алгоритмы формирования блочной матрицы системы и решения системы уравнений (рисунок 3).

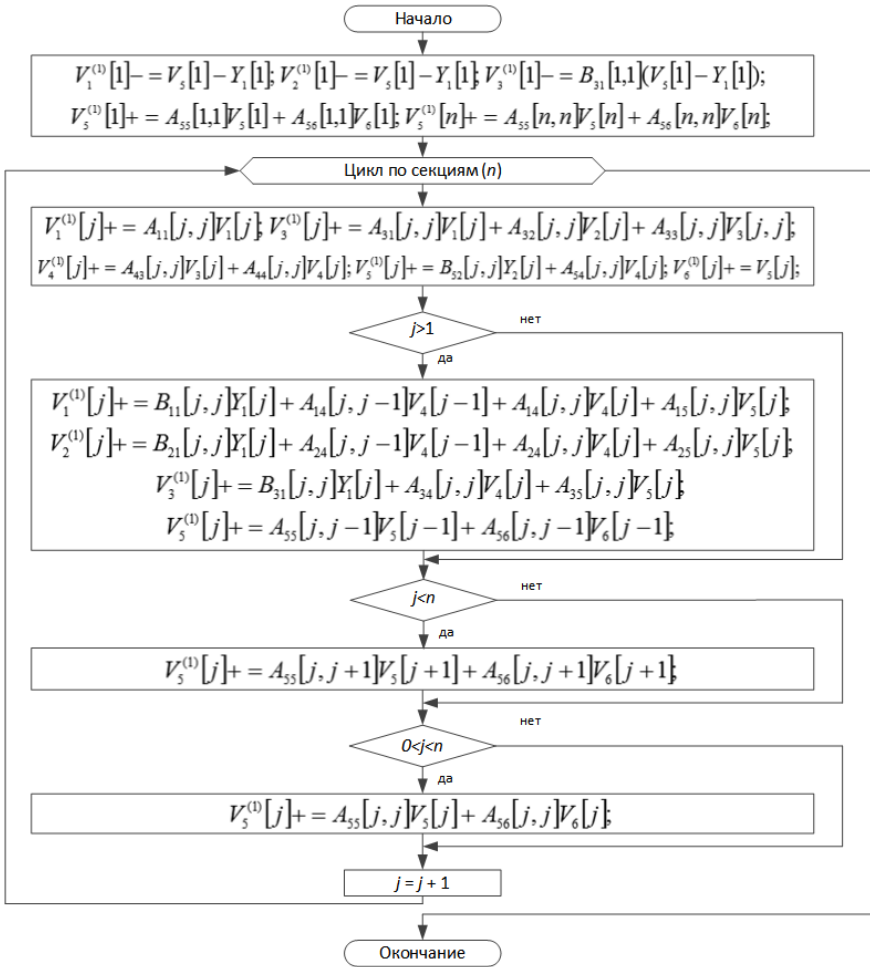


Рисунок 3 – Численный алгоритм решения системы уравнений на базе блочной матрицы

Матрицы А и В (4)–(6) предлагается формировать из отдельных многомерных блоков, каждый из которых представляет однотипные элементы системы для всех моделируемых секций. Матрицы А и В являются блочными, так как в их узлах находятся матрицы размером  $n \times n$ , где  $n$  – число приводных секций. В результате каждый блок формируется из одинаковых компонент подобных элементов ММВЭМС.

Моделирование однотипных компонент секций ВЭМС с использованием многомерных блоков, задаваемых диагональными матрицами, отражает разработанный метод моделирования и соответствует выражениям (1)–(3). Это поз-

воляет анализировать многодвигательный электропривод как единую многосвязную ВЭМС на основе структуры аналогичной одной секции (рисунок 1).

Проведён сравнительный анализ и обосновано преимущество созданных метода и алгоритма моделирования многодвигательного электропривода как единой системы однотипных многосекционных элементов на базе обобщённой структуры. В таблице 1 приведено сравнение числа вычислительных операций.

Таблица 1 – Затраты машинных ресурсов при моделировании ММВЭМС (число вычислительных операций на один шаг моделирования)

Подход	$n$ секций	2 секции	9 секций	25 секций
Стандартный	$96n^2-12n$	360	7668	59700
Как отдельные секции	$126n$	252	1134	3150
Многосекционные компоненты	$63n+15$	141	582	1590

В результате исследований установлено повышение наглядности и эффективности анализа с уменьшением затрат машинных ресурсов в 1,5 раза на каждую секцию при моделировании последовательных многодвигательных вентильно-электромеханических комплексов.

Разработаны алгоритмы моделирования последовательных многосекционных систем. Обоснована методика математического моделирования последовательных многосвязных многосекционных ВЭМС с учётом дискретности работы вентильных преобразователей с минимизацией количества состояний электро-механической системы на базе разработанного метода многосекционных компонент, алгоритмов моделирования многосекционных систем и оптимизированного алгоритма вычисления оператора поворота.

Главными результатами третьего раздела являются разработанные численные алгоритмы и метод многосекционных компонент для математического моделирования последовательно организованных многосвязных вентильно-электромеханических систем как единых комплексов.

**Четвертый раздел** направлен на разработку методики и комплекса программ моделирования многосекционного многосвязного электропривода, основанного на предложенных в диссертационной работе методах, методиках и алгоритмах математического моделирования.

Совокупность этапов разработанной методики моделирования показана на рисунке 4.

На базе созданной методики определены требования к комплексу программ имитационного моделирования многосвязных многосекционных ВЭМС, включающие требования моделирования всех режимов работы электродвигателей с использованием минимального количества состояний для различных типов ВП и вариации способов управления и момента нагрузки.

На рисунке 5 показана спроектированная структура комплекса программ.

1	Анализ последовательно организованной технологической установки с многодвигательным электроприводом как объекта моделирования
2	Формирование структуры многосекционной ВЭМС
3	Выбор типов и задание параметров ВП для секций
4	Выбор типов и задание параметров ЭМП для секций
5	Выбор типов и задание параметров механического взаимодействия между секциями
6	Задание диапазонов и законов формирования возмущающих воздействий
7	Моделирование динамических режимов
8	Моделирование статических режимов
9	Расчёт комплексного критерия эффективности функционирования ММВЭМС
10	Построение компонентных портретов показателей эффективности ММВЭМС
11	Анализ результатов моделирования
12	Выводы и практические рекомендации

Рисунок 4 – Методика моделирования последовательного многосекционного электропривода



Рисунок 5 – Структура комплекса программ моделирования последовательного многосекционного многосвязного электропривода

Разработанный комплекс программ моделирования реализует: представление переменных в моделях в относительных единицах; удобство графического представления результатов исследований; базу типов вентильных преобразователей и характеристик электродвигателей; сохранение результатов в базу; обмен данными со сторонним программным обеспечением и наращивание функциональных возможностей; выполнение дальнейшей обработки результатов.

Разработанные алгоритмы моделирования многосекционных многосвязных ВЭМС реализуют процедуры определения состояния вентильного преобразователя, вектора управления, оператора поворота, преобразования координат,

интегрирования систем дифференциальных уравнений, вычисления матриц входа, выхода, состояния и момента, расчёта параметров механического взаимодействия и индикаторов эффективности.

Многосекционность и многосвязность исследуемых систем затрудняют анализ результатов моделирования, в связи с чем введён комплексный критерий качества, отражающий степень совершенства многодвигательного электропривода как единой взаимосвязанной системы:

$$\zeta = (1 - \varepsilon_{v\%}) \cdot (1 - \varepsilon_v) \cdot (1 - \varepsilon_M) \cdot \eta, \quad (7)$$

где:  $\eta$  – общий коэффициент полезного действия ММВЭМС,  $\varepsilon_v$  – среднее значение отклонения уровня скорости от заданного,  $\varepsilon_{v\%}$  – среднее значение отклонения относительных скоростей от заданных,  $\varepsilon_M$  – среднее значение отклонения распределения нагрузки для секций с жёсткой и упругой механической связью, выраженные в относительных величинах.

Составляющие критерия (7) вычисляются по формулам:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}; \quad \varepsilon_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \varepsilon_{vi}^2}{m}}; \quad \varepsilon_{v\%} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m-1} \varepsilon_{v\%i}^2}{m-1}}; \quad \varepsilon_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \varepsilon_{Mi}^2}{k}}; \quad (8)$$

$$\varepsilon_{vi} = \frac{v_{\text{зад}i} - v_i}{\Delta_{v0i}} 100; \quad \varepsilon_{v\%i} = \frac{v_{\text{зад}i}^{\%} - v_i^{\%}}{\Delta_{v\%0i}} 100; \quad \varepsilon_{Mi} = \frac{k_{\text{PMЗад}i} - k_{\text{PM}i}}{\Delta_{M0i}} 100; \quad (9)$$

$$\delta_{vi} = 1 - |\varepsilon_{vi}|; \quad \delta_{v\%i} = 1 - |\varepsilon_{v\%i}|; \quad \delta_{Mi} = 1 - |\varepsilon_{Mi}|, \quad (10)$$

где:  $n$  – общее число секций;  $m$  – число секций, управляемых по скорости;  $k$  – число секций, управляемых по моменту;  $\delta_{vi}$ ,  $\delta_{v\%i}$ ,  $\delta_{Mi}$  – индикаторы эффективности;  $v_i$ ,  $v_{\text{зад}i}$  – фактическая и заданная скорости  $i$ -й приводной секции;  $v_i^{\%}$ ,  $v_{\text{зад}i}^{\%}$  – фактическая и заданная относительные скорости  $i$ -й секции;  $k_{\text{PM}i}$ ,  $k_{\text{PMЗад}i}$  – фактический и заданный коэффициенты распределения момента нагрузки  $i$ -й секции;  $\Delta_{v0i}$ ,  $\Delta_{v\%0i}$ ,  $\Delta_{M0i}$  – предельно допустимые значения отклонений уровня скорости, относительной скорости и коэффициента распределения нагрузки  $i$ -й секции;  $P_i$  и  $\eta_i$  – мощность и коэффициент полезного действия электродвигателя  $i$ -й приводной секции.

Индикаторы эффективности отражают степень совершенства ММВЭМС по анализируемым параметрам относительно заданных предельно допустимых отклонений. Отклонения параметров работы (8) и (9) в идеальном случае должны стремиться к 0, а индикаторы эффективности (10) в наилучшем случае равны 1. Отрицательные значения получаются при превышении отклонениями параметров предельно допустимых значений. Близость к 0 значений индикаторов показывает на необходимость повышения эффективности работы соответствующих секций. Разработан алгоритм расчёта индикаторов эффективности. Для большей наглядности оценки предлагается строить

компонентный портрет для составляющих критерия. При необходимости более детального анализа и выявления проблемных секций предусмотрено построение компонентных портретов индикаторов эффективности и отклонений для соответствующих секций.

Созданный комплекс программ подразумевает использование в учебных заведениях для освоения математического моделирования многодвигательного электропривода. Возможности системы в учебном процессе значительно расширяются при использовании в рамках интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ).

Создана экспериментальная установка, разработана программа моделирования и выполнены экспериментальные исследования многосвязной многодвигательной ВЭМС, являющейся электроприводом бумагоделательной машины, проведена оценка эффективности работы электропривода, получены результаты, подтверждающие адекватность предложенных подходов к математическому моделированию ММВЭМС. Результаты моделирования и данные эксперимента, полученные для многодвигательного электропривода, показаны на рисунке 6.

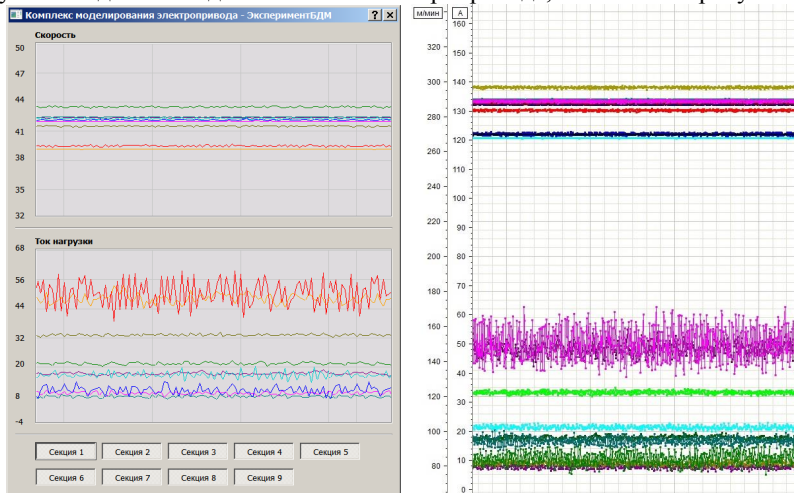


Рисунок 6 – Результаты: *а* – моделирования, *б* – эксперимента

Результаты моделирования (м) и данные эксперимента (э) представлены в таблицах 2 и 3.

Вычислены комплексный критерий и его составляющие (таблица 4), построены компонентные портреты (рисунок 7).

Таблица 2 – Отклонения и индикаторы по моменту

№	Секция	$M(м)$	$\delta_M(м)$	$M(э)$	$\delta_M(э)$
2	Сетководущий вал	0,10	0,61	0,11	0,56
4	Пресс Верхний вал	0,11	0,56	0,09	0,64
8	Каландр Верхний вал	0,20	0,21	0,21	0,16

Таблица 3 – Отклонения и индикаторы по скорости и по относительной скорости

№	Секция	$V(м)$	$\delta_V(м)$	$V^{\%}(м)$	$\delta_{V^{\%}}(м)$	$V(э)$	$\delta_V(э)$	$V^{\%}(э)$	$\delta_{V^{\%}}(э)$
1	Гауч	0,12	0,52	-	-	0,11	0,56	-	-
3	Пресс Нижний вал	0,13	0,48	0,03	0,88	0,14	0,44	0,04	0,84
5	Сушильная группа	0,09	0,64	0,04	0,84	0,12	0,52	0,05	0,81
6	Холодильный вал	0,15	0,41	0,01	0,96	0,10	0,61	0,02	0,92
7	Каландр Нижний вал	0,11	0,56	0,02	0,92	0,12	0,52	0,01	0,96
9	Накат	0,04	0,84	0,04	0,84	0,06	0,76	0,03	0,88

Таблица 4 – Комплексный критерий и его составляющие

Компонент	$\delta_V$	$\delta_{V^{\%}}$	$\delta_M$	$\zeta$
Моделирование	0,55	0,88	0,42	18,45
Эксперимент	0,56	0,87	0,41	18,18

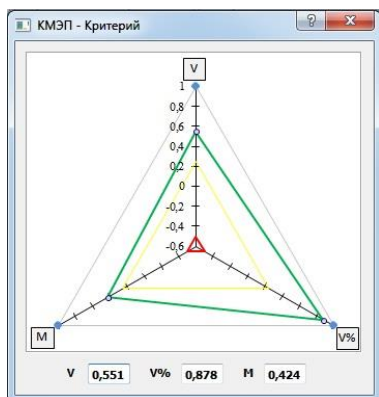


Рисунок 7 – Комплексный критерий оценки: *a* – моделирования, *б* – эксперимента

На основании проведённых экспериментальных исследований и анализа результатов сделан вывод об адекватности математического моделирования, разработаны практические рекомендации по применению результатов диссертационной работы для создания, настройки и изучения многосвязных ВЭМС. Успешная промышленная эксплуатация многосекционных электроприводов, созданных с использованием разработанных методов, численных алгоритмов и комплекса программ, подтверждает их высокую эффективность.

В **приложении** представлены акты внедрения результатов диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе представлены результаты решения задач по разработке методов математического моделирования, численных алгоритмов и созданию комплекса программ моделирования многосвязных многодвигательных вентильно-электромеханических систем в последовательно организованных технологических комплексах.

При решении поставленных задач получены следующие результаты.



1. Разработан метод математического моделирования последовательно организованного многодвигательного электропривода с произвольным числом секций как единой многосвязной вентильно-электромеханической системы на базе обобщённой инвариантной к количеству секций структуры. Метод заключается в формировании описания электропривода из взаимосвязанных многомерных блоков и позволяет повысить эффективность моделирования и удобство интерпретации его результатов.

2. Созданы алгоритмы численного моделирования последовательных многосвязных вентильно-электромеханических систем, основанные на способе формирования матриц системы из многомерных блоков, моделировании вентильных преобразователей как единственного гармонического колебания с дискретно управляемой начальной фазой, минимизации числа состояний электромеханической системы, оптимизации вычисления оператора поворота и матричного задания параметров. Использование созданных алгоритмов сокращает вычислительные затраты на каждую секцию в 1,5 раза по сравнению со стандартным подходом.

3. Обоснован комплексный критерий оценки работы многодвигательного электропривода по результатам моделирования и разработан алгоритм расчёта индикаторов эффективности в едином пространстве энергетических и технологических параметров с визуальным представлением в виде компонентного портрета, позволяющий свести разнородные показатели работы множества секций системы к единому показателю эффективности всей системы.

4. Создана основанная на предложенных методе и численных алгоритмах методика математического моделирования последовательных многодвигательных электроприводов при вариации способов управления, нагрузки и мощности двигателей.

5. Разработан комплекс программ для математического моделирования и оценки характеристик последовательно организованных многосвязных вентильно-электромеханических систем при изучении, проектировании и наладке многодвигательных электроприводов. Комплекс программ обеспечивает моделирование последовательных электроприводов эффективнее универсальных программных средств в 1,41 раза и специализированных – в 2,16 раза.

6. Выполнено математическое моделирование установок многодвигательного электропривода. Численная оценка результатов экспериментальных исследований и математического моделирования подтверждают адекватность и эффективность предложенных метода, численных алгоритмов и комплекса программ. Разработаны рекомендации по практическому применению результатов диссертационной работы. Показано, что отклонение результатов моделирования от экспериментальных данных не превышает 2%, а эффективность совокупности разработанных решений при меньшей универсальности на 28% выше существующих.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Салмов, Е.Н. Интегрированный комплекс компьютерно-имитационного моделирования электромеханических систем [Текст] / Р.Д. Прошина, Е.С. Прошина, Е.Н. Салмов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. –2013. – № 12 (16). – С. 95–101.
2. Салмов, Е.Н. Алгоритм комбинированного управления и метод математического моделирования асинхронного электропривода [Текст] / И.А. Прошин, М.И. Вольников, Е.Н. Салмов // Нива Поволжья. – 2014. – № 4 (33) – С. 102–109.
3. Салмов, Е.Н. Метод и алгоритм моделирования непосредственного преобразователя электрической энергии [Электронный ресурс] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Современные проблемы науки и образования (электронный журнал). – 2015. – № 1. Режим доступа: [www.science-education.ru/121-18543](http://www.science-education.ru/121-18543).
4. Салмов, Е.Н. Методика моделирования многосвязного многоосекционного электропривода для производства бумаги [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов, Д.В. Тимонин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. –2015. – № 05 (27). – С. 272–281.
5. Салмов, Е.Н. Математическое моделирование системы электропривода ролик-опор [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов, Д.А. Кузнецов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 05 (27). – С. 285–293.
6. Салмов, Е.Н. Численный метод моделирования выходного напряжения вентильного преобразователя с широтно-импульсной модуляцией [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Фундаментальные исследования. –2015. – № 9 (1). – С. 56–62.
7. Салмов, Е.Н. Комплексный критерий оценки при моделировании многодвигательного электропривода бумагоделательной машины [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Фундаментальные исследования. –2015. – № 12 (3). – С. 521–525.

### Публикации в других изданиях

8. Салмов, Е.Н. Система управления приводом в бумажном производстве [Текст] / Е.Н. Салмов // Системы обработки информации и управления: Сборник тезисов докладов научно-технической конференции молодых специалистов. – Пенза: Изд-во ОАО НПП «Рубин», 2005. – С. 19–20.
9. Салмов, Е.Н. Методика и комплекс программ моделирования многосвязного электропривода [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Технические науки – от теории к практике: Сборник статей по материалам XXIX международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд-во «СибАК», 2013. – № 12 (25). – С. 39–43.
10. Салмов, Е.Н. Математическое моделирование электропривода ролик-опор с двигателями постоянного тока [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Фундаментальные проблемы технических наук: Сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Уфа, 19 февраля 2014 г.). – Уфа: Изд-во РИЦ БашГУ, 2014. – С. 139–142.

11. Салмов, Е.Н. Метод математического моделирования асинхронного электропривода с вентильным преобразователем в цепях статора [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции (28 февраля 2014 г.): в 12 частях. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2014. – Ч. 1. – С. 118–121.
12. Салмов, Е.Н. Метод математического моделирования системы «Непосредственный преобразователь электрической энергии – машина постоянного тока» [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Теоретические и практические аспекты развития современной науки: Материалы XI международной научно-практической конференции. – Москва: Изд-во «Спецкнига», 2014. – С. 49–54.
13. Салмов, Е.Н. Математическое описание механических связей в многосекционном электроприводе бумагоделательной машины [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Модернизация современного общества: проблемы, пути развития и перспективы: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции. – Ставрополь: Логос, 2014. – С. 74–79.
14. Salmov, E.N. Mathematical modeling of the direct electrical energy converter [Текст] / I.A. Proshin, E.N. Salmov // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences. The 2nd International scientific conference proceedings (May 12, 2014). – Vienna: OR: «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2014. – P. 47–52.
15. Салмов, Е.Н. Метод математического моделирования непосредственного преобразователя электрической энергии [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Актуальные проблемы современной науки в 21 веке: Сборник материалов 4-й международной научно-практической конференции. (г. Махачкала, 30 апреля, 2014 г.). – Махачкала: ООО «Апробация», 2014. – Ч. 2. – С. 36–40.
16. Салмов, Е.Н. Алгоритм моделирования выходного напряжения непосредственного преобразователя электрической энергии [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Инновации в науке: Сборник статей по материалам XLI международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд-во «СибАК», 2015. – № 1 (38). – С. 64–71.
17. Салмов, Е.Н. Математическое моделирование электропривода каландра бумагоделательной машины [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Актуальные направления научных исследований: от теории к практике: Материалы III Международной научно-практической конференции (г. Чебоксары, 29 января 2015 г.). – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – С. 255–257.
18. Салмов, Е.Н. Алгоритм параллельного моделирования многосвязного электропривода [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Актуальные проблемы технических наук: Сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Уфа, 31 января 2015 г.). – Уфа: Аэтерна, 2015. – С. 51–54.
19. Салмов, Е.Н. Комплексный критерий оценки при моделировании многодвигательных вентильно-электромеханических систем [Текст] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов // Инновационные процессы в научной среде: Сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Пермь, 25 сентября 2015 г.). – Уфа: Аэтерна, 2015. – С. 72–78.

20. Салмов, Е.Н. Метод математического моделирования последовательно организованного многодвигательного электропривода [Электронный ресурс] / И.А. Прошин, Е.Н. Салмов, Д.В. Тимонин // Современные проблемы автоматизации и управления в энергетике и машиностроении: Сборник научных трудов международной научно-практической конференции. – Пенза: Изд-во ПензГТУ, 2015. – С. 22–31. Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25268719>.

#### **Свидетельства о государственной регистрации**

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614543. Программный комплекс моделирования многосвязного электропривода. Правообладатель: Салмов Е.Н. Авторы: Прошин И.А., Прошин Д.И., Салмов Е.Н. Заявка № 2015610651 от 10.02.2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20.04.2015 г.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614237. Программа моделирования управления многосекционным приводом бумагоделательной машины. Правообладатель: Салмов Е.Н. Авторы: Прошин И.А., Прошин Д.И., Салмов Е.Н., Байкин Н.В. Заявка № 2015610680 от 10.02.2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.04.2015 г.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614238. Программа моделирования управления многосекционным приводом картоноделательной линии. Правообладатель: Салмов Е.Н. Авторы: Прошин И.А., Прошин Д.И., Салмов Е.Н., Байкин Н.В. Заявка № 2015610681 от 10.02.2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.04.2015 г.

Подписано в печать 19.04.2016 г. Формат 60x84 1/16

Бумага ксероксная. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100. Заказ 19/04.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии ИП Соколова А.Ю.

440600, г. Пенза, ул. Кирова, 49, оф. 3,

тел.: (8412) 56-37-16.