

*На правах рукописи*



Кудряшов Дмитрий Андреевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРИВОДА РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ  
ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Нижний Новгород  
2023 г.

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая и общая электротехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Научный руководитель: **Смирнов Александр Юрьевич**

доктор технических наук, доцент, ведущий инженер-конструктор АО «ОКБМ Африкантов» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: **Вавилов Вячеслав Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа)

**Коварский Михаил Ефимович** – кандидат технических наук, главный конструктор регулируемых электроприводов для ВМФ АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (г. Самара)

Защита состоится «02» ноября 2023 г. в 14 часов 00 минут в аудитории 1315 на заседании диссертационного совета 24.2.345.05 в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.345.05 по адресу: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» и на сайте:

<https://www.nntu.ru/structure/view/podrazdeleniya/fpsvk/obyavleniya-o-zashhitah>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.345.05, к. т. н.



Д.Ю. Титов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В связи со стремительным увеличением производства и потребления электроэнергии в мире, обусловленным появлением новых производств, климатическими изменениями на планете, растущими бытовыми потребностями населения, и другими факторами, особую значимость приобретает ядерная энергетика, как один из наиболее востребованных путей замены ископаемого топлива. Количество стран в мире, строящих и эксплуатирующих атомные электростанции, неуклонно возрастает.

Современные ядерные энергетические установки (ЯЭУ), составляющие материальную базу производства электрической и тепловой энергии на атомных электростанциях, включают в себя комплекс различных автоматических систем, которые выполняют функции регулирования, управления, защиты и обеспечения эксплуатационного цикла. К важнейшим из таких систем относятся системы управления и защиты (СУЗ) ядерных реакторов, представляющие собой исполнительные механизмы вертикального перемещения и позиционирования регулирующих органов (РО), управляющих скоростью цепной реакции деления ядерного топлива.

Многообразие конструктивной реализации механизмов указанной системы обусловило разработку электротехнических комплексов, основное назначение которых – силовое воздействие на регулирующие органы. Эти комплексы содержат следующие компоненты:

- регулирующие органы, перемещение которых обеспечивает выполнение системой автоматики заданных функций;

- преобразователи движения, которые преобразуют параметры движения привода – траекторию и характер движения, скорость, направление, ускорение, и т.д., в требуемые параметры движения регулирующего органа;

- электроприводы с одним или несколькими электромеханическими преобразователями, преобразующими подводимую электрическую энергию в энергию механического перемещения подвижных частей привода, характеризуемую заданным уровнем механической мощности и момента (силы);

- преобразователи электрической энергии, преобразующие энергию источника постоянного или переменного напряжения в электрическую энергию на зажимах электромеханического преобразователя с заданными параметрами: напряжением, частотой (частотным диапазоном), числом фаз;

- устройства контроля движения и обратной связи: первичные и вторичные датчики положения, скорости, тока, вспомогательные электромеханические преобразователи (ограничители скорости, электромагнитные и обгонные муфты).

При возникновении чрезвычайных ситуаций большинство моделей эксплуатации ядерных энергетических установок предусматривают ускоренное введение стержней-поглотителей внутрь активной зоны реактора с тем, чтобы остановить или замедлить реакцию деления ядер ядерного топлива. Для этих целей в приводах СУЗ ядерных реакторов используется аварийное опускание

РО под действием собственного веса. Таким способом реализуется концепция пассивной безопасности.

Повышение безотказности этих устройств, надёжности работы во всех режимах эксплуатации ядерных энергетических установок, продление их ресурса представляют собой приоритетную и весьма важную задачу, безусловно, необходимую для дальнейшего развития атомного энергетического машиностроения.

**Объект исследования** – электротехнические комплексы, предназначенные для перемещения регулирующих органов в составе систем автоматики ядерных энергетических установок.

**Предмет исследования** – электромеханические преобразователи в составе электропривода для перемещения регулирующих органов внутри активной зоны реактора в нормальных и аварийных режимах эксплуатации.

**Цель работы** состоит в совершенствовании характеристик и расширении области применения электромеханических устройств, предназначенных для силового воздействия на регулирующие органы, которые обеспечивают защиту и сопровождение эксплуатационного цикла ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

**Задачи исследования**, решение которых предполагает достижение поставленной цели:

- Провести анализ и выявить перспективные конструкции существующих электромеханических преобразователей в составе электропривода для перемещения регулирующих органов ядерных реакторов с целью определения возможных путей их совершенствования, а также обеспечения более широких возможностей по отработке заданного закона движения РО при обесточивании привода СУЗ в режиме аварийной защиты;

- Разработать методики проектирования перспективных электромеханических преобразователей, а также предложить математическое описание и специальное ПО, позволяющее выполнять проектирование, моделирование и численный анализ с использованием расширенных возможностей современной вычислительной техники и пакетов прикладных программ;

- Спроектировать, изготовить, провести численные и натурные исследования компонентов перспективной конструкции электромеханического преобразователя. На основании численных и натурных исследований подтвердить достоверность разработанных методик проектирования, а также численного анализа двигателя и генератора;

- Предложить технические решения, которые позволяют расширить область применения электромеханических преобразователей в приводах компенсирующей группы (КГ) и аварийной защиты (АЗ).

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

- 1) предложено для движения регулирующих органов по заданному закону в режиме аварийной защиты, использовать отдельный электромеханический преобразователь с постоянными магнитами на роторе, работающий на

третьей гармонике поля якоря. На данный электромеханический преобразователь получен патент на изобретение;

2) разработаны усовершенствованные методики проектирования и компьютерного моделирования электромеханических преобразователей индукторного типа и с постоянными магнитами на роторе, работающих на третьей гармонике поля якоря;

3) в программной среде ANSYS (APDL) создана компьютерная программа, которая предназначена для генерации сеточных моделей электромеханических преобразователей методом конечных элементов; расчёты по ней позволили проверить и подтвердить правильность разработанных методов проектирования и математического моделирования;

4) предложены и проанализированы дополнительные конструкции электромеханических преобразователей, использование которых обеспечивает расширенные возможности по достижению заданного закона движения РО.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в обосновании и разработке:

- устройств, позволяющих повысить быстродействие электропривода вертикального перемещения регулирующего органа при переходе в режим аварийной защиты путём отсоединения от источника электрической энергии;

- математических моделей для проведения численных исследований при проектировании устройств, применение которых повышает быстродействие работы привода вертикального перемещения РО в режиме аварийной защиты;

- математических моделей, позволяющих выполнять поверочные расчёты спроектированных двигателей методом конечных элементов;

- материала для опытно-конструкторских работ по исследованию перспективных типов электрических машин, обеспечивающих достижение заданного закона движения РО при обесточенном двигателе.

**Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.**

Результаты, представленные в диссертации, в части Направления исследований отвечают следующим пунктам паспорта специальности:

☑ п.1. ..., физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, *включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии ...*;

☑ п.2. Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов;

☑ п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов... ;

☑ п.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях ... .

**Методы исследования.** Использовались фундаментальные методы математической физики (метод конечных элементов и специальное программное

обеспечение, реализующее этот метод) и теории поля, теория электрических и магнитных цепей, теория электромеханического преобразования энергии, уравнение связи между электромагнитными нагрузками и главными размерами машины, результаты натуральных исследований и экспериментов.

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

1. Электропривод вертикального перемещения РО, состоящий из индукторного двигателя и магнитоэлектрического генератора, работающего на третьей гармонике поля якоря, которые установлены на общем валу;
2. Программы проектирования и математического моделирования индукторного двигателя и магнитоэлектрического генератора;
3. Результаты экспериментальных исследований опытного образца электропривода
4. Конструкции электромеханических преобразователей, обеспечивающие движение РО отключенного привода по заданному закону.

**Апробация работы.** Положения, результаты и выводы диссертационной работы были доложены на международных, всероссийских и отраслевых конференциях:

- НТК «Актуальные проблемы электроэнергетики» Н. Новгород в 2016-2021 г.г.;
- XXIV Сессия молодых ученых, секция «Энергетика», 2019 г.
- 18-я международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам, ОКБ «Гидропресс», 30-31 марта 2016 г.;
- Молодежная научно-техническая конференции «Взгляд в будущее-2018» АО «ЦКБ МТ «Рубин» г. Санкт-Петербург, 23-24.05.2018 г.;
- IX Международная (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 Пермь, 3–7 октября 2016 г.
- IV-я международная конференция «Пром-Инжиниринг», 2018 г.;
- X-я международная конференция по автоматизированному электроприводу «АЭП-2018», Новочеркасск, 3-6 окт. 2018 г.
- XX международная НТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, МЭИ, 14-15 марта 2019 г..

**Реализация результатов работы.** Основные положения и рекомендации диссертационной работы использованы:

- в АО «ОКБМ «Африкантов», при выполнении проектных и конструкторских работ, результаты которых использованы в реально изготовленных изделиях;
- научным руководителем при разработке учебных пособий по дисциплине «Электропривод»;

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 4 в журналах, реферируемых ВАК, и получено 2 патента на изобретения.

### **Личный вклад автора.**

1. Разработка конструкции части узлов электропривода, включающей двигатель и генератор;
2. Детализация методик и расчёты электромеханических преобразователей, включая определение размеров и электромагнитных параметров;
3. Исследование сеточных моделей для углублённого анализа работы двигателя и устройства контроля движения из состава электропривода для перемещения регулирующего органа;
4. Расчёты параметров привода;
5. Участие в проведении исследований и вычислительных экспериментов;
6. Компьютерное моделирование.

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и 4 приложений общим объёмом 161 страница, из которых 130 страниц основного текста. Список литературы содержит 107 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, показано научное и практическое значение проведенной работы. Обозначены методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, результаты апробации и структура работы.

**В первой главе** проведен анализ существующих электроприводов, которые обеспечивают позиционирование исполнительных механизмов регулирующих органов (РО) ядерных реакторов и схем управления ими, с целью определения возможных путей их совершенствования. Рассмотрены функции системы управления и защиты (СУЗ), влияющие на особенности конструкции и режимы работы электропривода РО (рис.1).

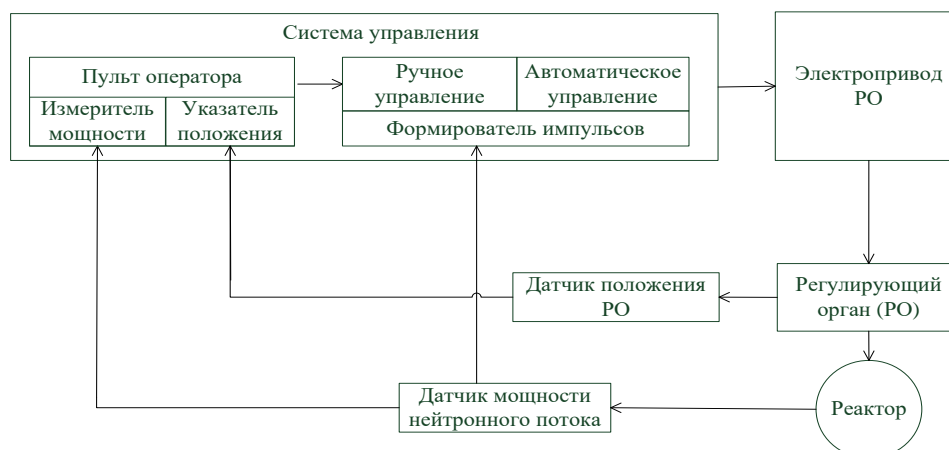
Отмечено, что значительными техническими преимуществами обладают исполнительные механизмы СУЗ на основе шаговых двигателей с вращательным движением ротора и преобразователем вращательного движения в поступательное. Данные системы обеспечивают требуемую динамику перемещения РО, а также позволяет снизить влияние автоколебаний.

Проектированием, исследованиями и созданием теории шаговых двигателей и приводов на их основе занимались следующие ученые: М.Г. Чиликин, Б.А. Ивоботенко, И.П. Копылов, В.П. Рубцов, Л.А. Садовский, Н.Ф. Ильинский, В.Е. Луценко, Б.А. Масленок, В.В. Воскобойников, Ф.М. Юферов, И.Я. Емельянов и другие советские и российские учёные.

Определен состав и основные характеристики электротехнического комплекса механизмов вертикального перемещения регулирующих органов ядерных реакторов. Сформулированы основные задачи расчетов и математического моделирования электропривода с шаговыми двигателями (ШД).

Одним из важных звеньев ЭТК механизмов вертикального перемещения регулирующих органов ядерных реакторов является устройство контроля движения (УКД), контролирующее скорость опускания РО при обесточива-

нии ШД, для реализации соответствия требованиям пассивной безопасной эксплуатации.



**Рис. 1 – Схема автоматического регулирования реактора**

Необходимость устройства контроля скорости опускания обусловлена неравномерностью изменения реактивности при перемещении РО вглубь ядерного реактора. С самого начала падения полностью выведенного из активной зоны РО его эффективность изменяется незначительно. Следовательно, на начальном участке опускания РО в режиме аварийной защиты ему должно быть сообщено максимальное ускорение. По мере погружения в активную зону эффективность РО возрастает, и его дальнейший разгон целесообразно ограничить, вплоть до перехода к равномерному движению в конце хода.

Таким образом, ускорение, а значит и закон изменения электромагнитного момента, развиваемого устройством контроля скорости опускания РО, должен соответствовать зависимости эффективности регулирующего стержня от глубины погружения в активную зону.

Проведенный анализ существующих решений реализации УКД показал, что обеспечить требуемый режим работы привода РО, позволяет конструкция электромеханического преобразователя на основе индукторной машины с общим статором и двухсекционным ротором. Ротор содержит, расположенные на одном валу зубчатый магнитопровод и пакет с постоянными магнитами. Обмотка статора подключается к системе управления и имеет выводы для подключения ёмкостной нагрузки.

Требуемый закон изменения электромагнитного момента обеспечивается переходом электромеханического преобразователя в генераторный режим, с торможением на емкостную нагрузку, подключенную к обмоткам статора. Это позволяет изменить частоту баланса между вращающим моментом и уравновешивающим его результирующим моментом нагрузки:

$$M_{дв} = - \left[ \sum M_{нагр} + M_{ген}(\omega) \right] \quad (1)$$

где  $M_{дв}$  – вращающий момент электродвигателя;  $\sum M_{нагр}$  – суммарный момент нагрузки;  $M_{ген}(\omega)$  – электромагнитный момент генератора.



Отмечено, что для увеличения надежности работы привода РО, целесообразно использовать многофазную подразделенную обмотку статора электромеханического преобразователя. Все катушки данной обмотки подразделены на две одинаковые секции с одинаковым количеством витков.

Нагрузочные конденсаторы при этом подключаются к одной группе фазных зажимов, а напряжение питания к другой, эквипотенциальной по отношению к точкам подключения конденсаторов (рис.2). Поэтому выход из строя конденсаторов, вплоть до их обрыва или короткого замыкания, не может привести к потере управляемости двигателя и механизма в целом. Из проведенного анализа конструктивных схем ИМ СУЗ и их компонентного состава можно сделать вывод, что одним из факторов, ограничивающих возможность целенаправленно влиять на характеристики привода СУЗ во всех режимах работы, является противоречие между повышением эксплуатационных качеств необходимых для двигательного режима и необходимых для работы, в генераторном режиме.

Сформулированы цели и задачи работы, позволяющие устранить эти противоречия в части реализации кратковременного форсирования момента, остановки вращающегося ротора после обесточивания, повышения надежности после воздействия больших токов управления.

**Во второй главе** проведены исследования, и предложены расчетные алгоритмы для проектирования основных узлов усовершенствованного электромеханического преобразователя для привода ИМ СУЗ, представляющего собой двухмашинную сборку из индукторного двигателя и магнитоэлектрического генератора, которые установлены в одном корпусе и соединены общим валом (рис. 3).

Разработанный преобразователь позволяет исключить недостатки прототипа в одномашинном исполнении, в части уменьшения длины обмотки статора и снижения потерь в ней, а также исключение влияния индуктивной нагрузки зубчатого магнитопровода ротора в генераторном режиме с увеличением момента генератора и расширением диапазона установившихся скоростей равномерного опускания РО.

При обесточивании обмотки основного магнитопровода 11 электромеханического преобразователя ее вал 2 раскручивается под действием силы веса регулирующего органа, приложенной к валу через барабан и редуктор (рис.3). При этом, постоянными магнитами 9, вращающимися вместе с валом, наводится ЭДС в обмотке дополнительного магнитопровода, состоя-

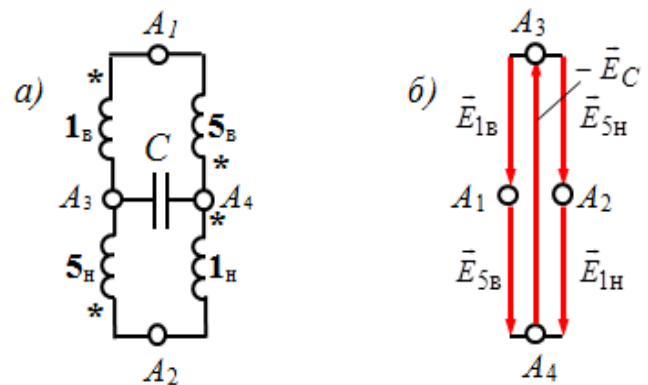
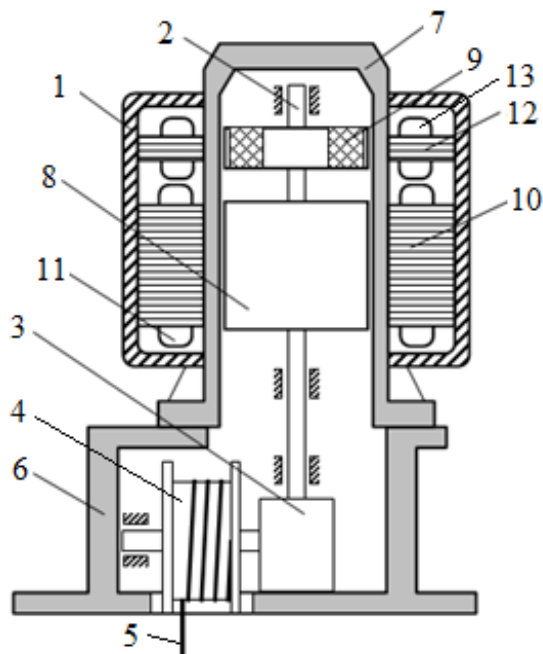


Рис. 2 – Подключение конденсаторов (а) и векторная диаграмма (б) ЭДС вращения в тормозном режиме работы электромеханического преобразователя с подразделённой обмоткой

щей из катушек 13, которая вызывает ток в цепи, замкнутой конденсаторами С (рис.2).



- 1 – общий корпус двигателя и генератора
- 2 – вал;
- 3 – редуктор;
- 4 – барабан;
- 5 – трос;
- 6 – фрагмент корпус реактора;
- 7 – герметизирующая труба;
- 8 – зубчатый магнитопровод ротора двигателя;
- 9 – постоянные магниты генератора;
- 10 – магнитопровод статора двигателя;
- 11 – катушки обмотки двигателя;
- 12 – магнитопровод статора генератора;
- 13 – катушки обмотки генератора

**Рис. 3 – Механическая часть электропривода**

Возникающий ток, первоначально небольшой, однако, при достижении ротором частоты вращения, соответствующей заданной скорости установившегося опускания регулирующего органа, он резко возрастает.

На установившейся частоте вращения происходит возникновение резонанса напряжений в контуре образованном обмотками дополнительного магнитопровода и конденсаторами. Тормозной электромагнитный момент от взаимодействия поля постоянных магнитов с обмоткой дополнительного магнитопровода уравнивает момент от веса РО, приложенный через барабан и редуктор к валу электромеханического преобразователя. Разгон РО прекращается, и он опускается равномерно, без чрезмерных ударных нагрузок в конце хода.

Экспериментально установлено, что для достижения устройством заданной установившейся скорости равномерного опускания, необходимо, чтобы частота ЭДС, наводимой в фазах обмотки дополнительного магнитопровода синхронной машины, была меньше величины, определяемой соотношением:

$$n_{уст} < \frac{30}{\pi \cdot p \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (2)$$

где  $p$  - число пар полюсов обмотки дополнительного магнитопровода,  $L$  и  $C$  - индуктивность одной фазы обмотки и емкость подключенных к ее зажимам конденсаторов.

В силу большей добротности резонансных контуров предлагаемое устройство обладает большим быстродействием и функциональной надежностью по сравнению с прототипом. Большая функциональная надежность обеспечивается за счет более интенсивного разгона на участке разгона регу-

лирующего органа, так как тормозной момент от действия тока обмотки дополнительного магнитопровода на начальном участке в предлагаемом устройстве меньше, чем у прототипа, а на участке ограничения скорости опускания РО, этот момент больше.

Особенностями устройства являются работа в шаговом приводе и общий диаметр расточки статора. Для середины допустимого диапазона соотношений момента инерции ротора двигателя и генератора с подвижными частями привода получено рекомендуемое значение общего диаметра расточки:

$$D = 3,2 \sqrt{\frac{J_{\text{пр}}}{\frac{1,5M_1\rho_1}{K_1B_{\delta 1}A_1} - \frac{M_2\rho_2}{K_2B_{\delta 2}A_2}}}, \quad (3)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – конструктивные коэффициенты двигателя и генератора, определяемые формой кривой индукции в зазоре, коэффициентом полюсного перекрытия и обмоточным коэффициентом каждой из машин,  $B_{\delta 1}$ ,  $A_1$  и  $B_{\delta 2}$ ,  $A_2$  – электромагнитные нагрузки каждой из машин: индукция в зазоре и линейная нагрузка,  $M_1$  и  $M_2$  – электромагнитный момент, двигательный и генераторный (тормозной), развиваемый каждой из них.

Совершенствование методики выполненного расчета индукторного двигателя с электромагнитным возбуждением является определение и учет параметров магнитной цепи, при вычислении развиваемого машиной момента, с учётом насыщения её ферромагнитных участков по слаборазветвлённой схеме замещения.

С целью уменьшения уровня пульсаций момента и мощности, а также плавного распределение магнитного потока в зазоре, спроектирована конструкция герметичного магнитоэлектрического генератора с преобразованием энергии магнитного поля в зазоре на одной из высших гармоник, в частности, третьей. При этом решении, схема обмотки генератора должна быть выполнена таким образом, чтобы обеспечить приемлемый обмоточный коэффициент для высшей гармоники.

Статор генератора с обмоткой (рис. 4, а) комплектуется шестиполосным магнитоэлектрическим ротором (рис. 4, в), обмотка рис. 4, б – двенадцатиполосным ротором (рис. 4, з). Данные обмотки имеют нечётный знаменатель дробности,  $q = \frac{2}{3}$  и  $q = \frac{1}{3}$ , и не содержат гармоник чётных по-

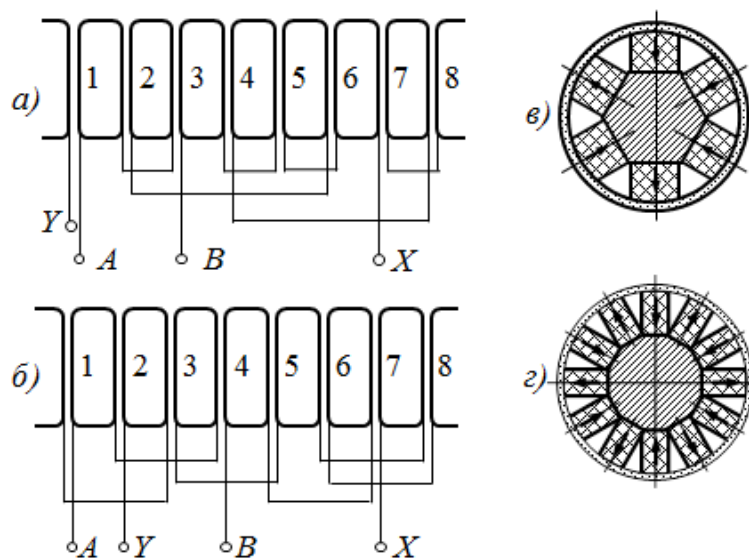


Рис. 4 – Схемы обмотки статора и конструкции ротора для работы на третьей гармонике поля статора

рядков. Для подавления гармоник высших порядков и реактивных моментов, обусловленных зубчатостью статора, воздушный зазор  $\delta$  следует выбирать не менее  $1/10$ –  $1/15$  зубцового деления статора  $t_z$ .

Отмечено преимущество использования данного магнитоэлектрического генератора в части сокращения длины вылета лобовых частей обмотки, путём размещения сосредоточенных катушек, стороны которых расположены в соседних пазах, без чрезмерного снижения обмоточного коэффициента.

В качестве математического аппарата для построения генераторных характеристик с использованием экспериментальных данных рассмотрено применение теории планирования эксперимента. Данная характеристика помимо частоты вращения, является функцией температуры и ёмкости подключенных конденсаторов. План эксперимента включает в себя все возможные сочетания минимального и максимального значений каждого фактора. Все они образуют  $n$  – мерное факторное пространство.

Учесть уменьшение генераторного момента под влиянием температуры можно посредством введения коэффициента теплового влияния

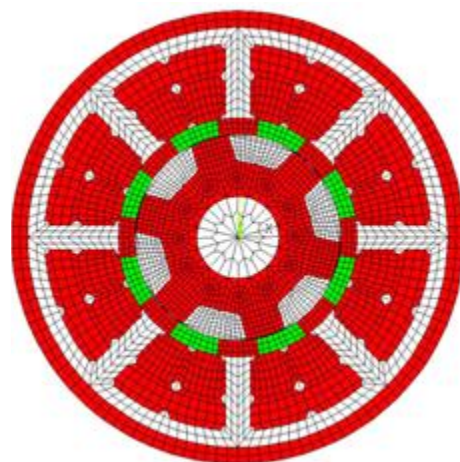
$$K_{ТВ} = \frac{P_{гор}}{P_{хол}} = \frac{M_{э\_гор}}{M_{э\_хол}}, \quad (4)$$

где  $P_{гор}$ ,  $M_{э\_гор}$ ,  $P_{хол}$ ,  $M_{э\_хол}$  - мощность и электромагнитный момент, развиваемые в генераторном режиме горячим и холодным двигателем соответственно, при каждом конкретном значении ёмкости нагрузочных конденсаторов и скорости вращения ротора. Экспериментальные значения коэффициента температурного влияния использованы из результатов испытаний машины в холодном и горячем состоянии, температура корпуса которой в процессе проведения испытаний достигала  $150^{\circ}\text{C}$ . Испытания проводились в соответствии с планом трёх-мерного факторного эксперимента  $2^3$ .

Отмечена хорошая сходимость расчётных, с использованием данного метода, и экспериментальных результатов.

**В третьей главе** исследованы режимы управления электромеханического преобразователя для электропривода РО, а также вопросы исключения неравномерности момента и колебаний скорости на низких оборотах.

Результаты проектировочного расчёта, в части развиваемого электромагнитного момента индукторного двигателя, были подтверждены с помощью сеточной модели двигателя в программе ANSYS. Модель представлена 2,9 тысячами элементов, что позволяет обеспечить приемлемую производительность выполнения циклически повторяющихся вычислений на современном персональном компьютере.



**Рис. 5 – Сеточная модель двигателя**

Сетка в областях статора состоит из восьмиузловых элементов (рис. 5). Сетка в областях ротора и воздушного зазора при расчёте динамики электропривода состоит из четырёхузловых элементов. С помощью модели выполнены расчётные исследования процесса пуска двигателя из неподвижного состояния на синхронную частоту вращения 195 об/мин в приводе испытательного стенда, который создаёт нагрузку типа «сухое трение». Отмечена универсальность алгоритма, обеспечивающего интегрирование уравнения движения электропривода на базе индукторного двигателя с импульсным управлением, поскольку все параметры конкретной электрической машины, учитываются её сеточной моделью.

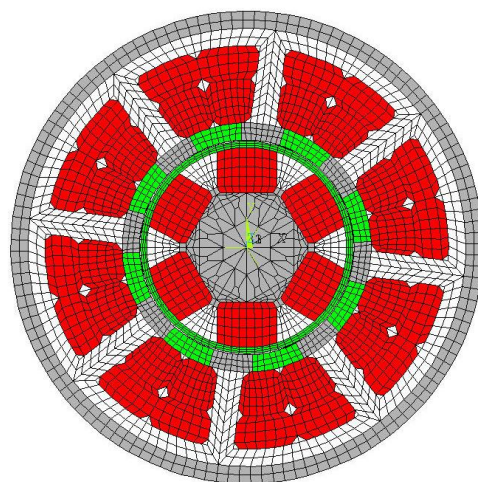


Рис. 6 – Сеточная модель генератора

Из полученной осциллограммы (рис.7) следует, что по окончании расчётного интервала ротор двигателя обрабатывает угол  $471,4^\circ$ , который оказывается в допустимых пределах. Поэтому сделан вывод, что его движение осуществляется без пропуска шагов, и двигатель обеспечивает работоспособность привода.

Сеточная модель генератора, обеспечивающего ограничение скорости опускания (торможение) РО, которая позволяет рассчитать электромагнитный момент, показана на рис. 6 (четырёхфазный шестиполусный вариант). Модель содержит элементы, относящиеся к областям магнитопровода и катушек обмотки статора, ротора с постоянными магнитами, воздушного зазора между ними. Она позволяет точно рассчитать момент по известным значениям токов фаз обмотки в виде семейства угловых характеристик, построенных при различных значениях действующего тока в фазах, при симметричном их распределении.

На сеточной модели (рис. 6) ротор находится в положении максимального потокоцепления с фазой *A*, паз 2 (рис. 4, а) с катушечными сторонами которой изображён в самом верхнем положении (каждая катушка модели состоит из двух половин:

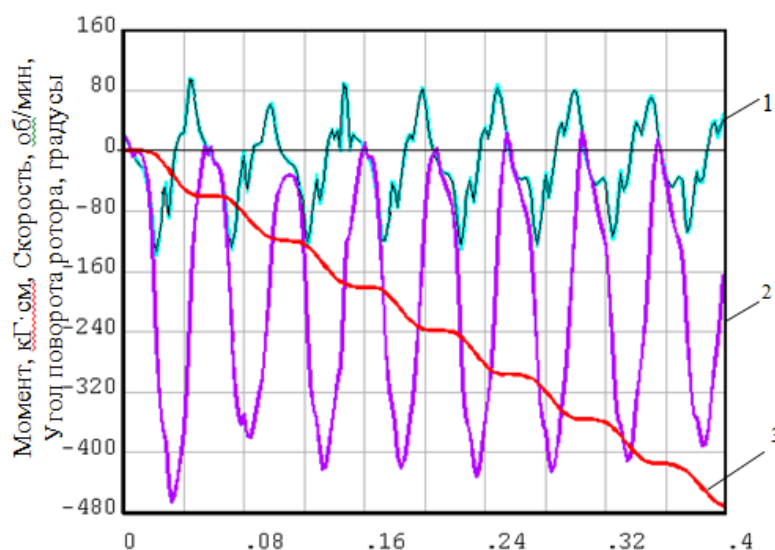


Рис. 7 – Осциллограммы момента (1), скорости (2) и угла (3) при пуске двигателя

верхней и нижней). По рассчитанной по сеточной модели в программе ANSYS амплитуде потокосцепления или потока взаимной индукции фазы генератора с полем постоянных магнитов, определяются ЭДС фазы, фазный ток, ток во внешней цепи, моментные и энергетические характеристики.

Выражение для амплитуды и действующего значения ЭДС фазы:

$$E_m = 2\pi w_k k_{обм} \Phi_{ам} f \quad (5)$$

где  $w_k$  – число витков фазы обмотки;  $k_{обм}$  – обмоточный коэффициент;  $\Phi_{ам}$  – амплитуда магнитного потока возбуждения,  $f$  – частота ЭДС.

Зная ЭДС, определяют амплитуду и фазу тока. В соответствии со схемой замещения состоящей из последовательно соединенных индуктивного сопротивления фазы  $X_l$ , ее активного сопротивления  $R$  и сопротивления нагрузки  $X_c$ , можно выразить амплитудное значение тока фазы  $I$ , а также угловой аргумент

$$I = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (X_1 - X_c)^2}} \quad (6)$$

коэффициента мощности  $\varphi$  и падения напряжения на активном и индуктивном сопротивлении фазы

$$\varphi = \arctg \frac{X_1 - X_c}{R} \quad (7)$$

Рассчитанный ток подставляется в уравнение электромагнитного момента

$$M = \frac{mRI^2}{\omega} \quad (8)$$

где  $m$  – число фаз обмотки генератора;  $\omega$  – частота вращения ротора

Частота максимума момента по генераторной характеристике (рис.8) определяется частотой резонанса напряжений:

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{L_\delta C}} \quad (9)$$

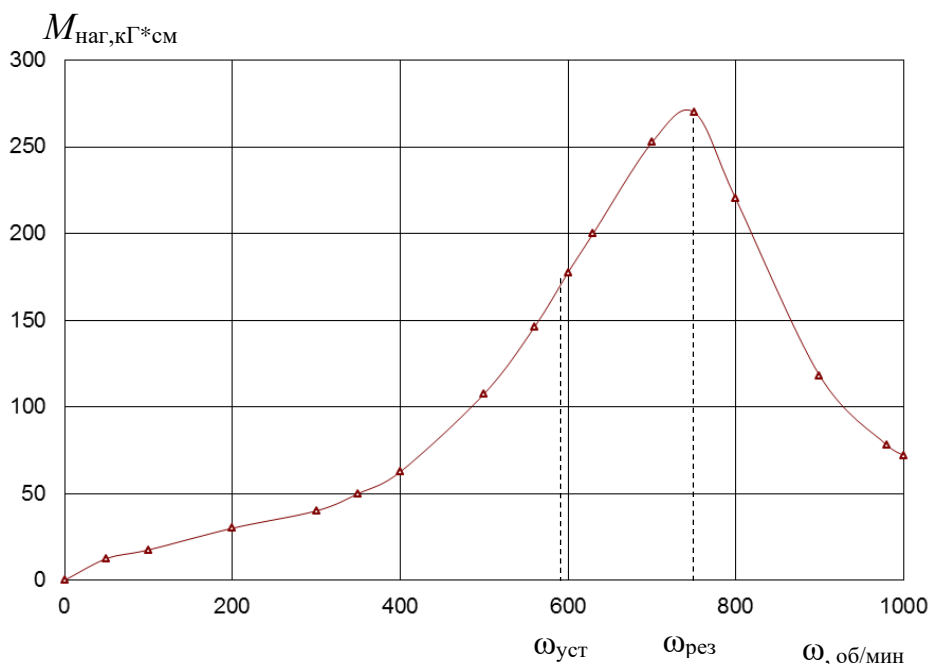
где  $L_\delta$  – индуктивность рассеяния фазы обмотки;  $\omega$  – частота вращения ротора;  $C$  – емкость подключенного к обмотке конденсатора.

В разработанном электромеханическом преобразователе амплитуда генераторного момента удалось получить выше, чем у прототипа на 30%.

В приводе с шаговыми двигателями переходные процессы отключения фаз обмотки происходят непрерывно. При этом важно обеспечить плавное движение ротора не только в области высоких частот вращения, где вынужденные колебания ротора поглощаются приводом, но и в области низких частот. На частотах, от нескольких единиц до нескольких десятков оборотов в минуту, неравномерность момента приводят к резким колебаниям скорости, вплоть до полной остановки ротора и движения его в обратном направлении. Сгладить этот процесс можно подбором формы импульсов тока, подаваемых в фазы обмотки статора шагового двигателя.

Для формирования тока каждая фаза обмотки подключается к источнику постоянного напряжения посредством ключа  $K1$  (рис. 9) в предварительном усилителе преобразователя частоты. Коммутация осуществляется по результатам сравнения мгновенного значения тока фазы  $i_j$ , измеренного датчиком

тока ДТ, с заданным его значением  $i_3$ . Периодическая функция заданных значений  $i_3$  передаётся в компаратор из внешнего устройства памяти. Сравнение значений тока  $i_j$ ,  $i_3$  осуществляется с тактовой частотой несколько кГц.



**Рис. 8 - Механическая характеристика генератора прототипа в одномашинном исполнении**

На каждом такте при  $i_j > i_3$  ключ К1 размыкается и ток фазы  $i_j$  спадает через разрядные цепи (на рис. 9 не показаны).

При  $i_j < i_3$  фаза вновь подключается к источнику напряжения  $U$ , обеспечивая ускоренное нарастание тока благодаря тому, что уровень напряжения источника значительно превышает величину, необходимую для обеспечения номинального фазного тока двигателя  $I_{ном}$

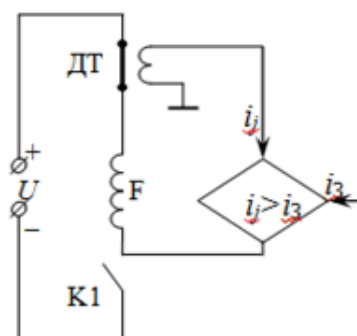
$$\frac{U}{R} \gg I_{ном}, \quad (10)$$

Ввиду принятого условия равномерности движения ротора,

$$\frac{d\theta}{dt} = \text{const} \quad (11)$$

уравнение движения будет представлять собой баланс электромагнитного момента двигателя и связанной с ним механической нагрузки  $M_{нагр}$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N i_j \frac{dL_{jk}}{d\theta} i_k + M_{нагр} = 0 \quad (12)$$

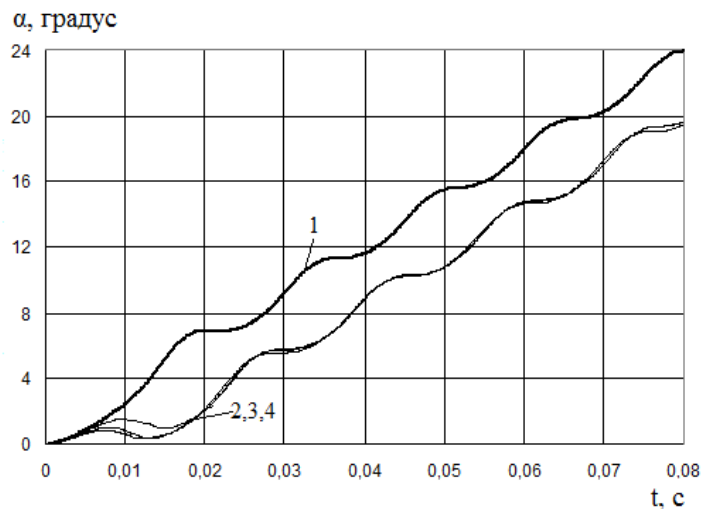


**Рис. 9 - Схема формирования тока в фазах ШД**

Для минимизации электрических потерь при определении токов принято условие их пропорциональности - производным изменения индуктивности соответствующих фаз обмотки статора по углу

$$i_1 : i_2 : i_3 : \dots : i_{m-1} : i_m = \frac{dL_{11}}{d\theta} : \frac{dL_{22}}{d\theta} : \frac{dL_{33}}{d\theta} : \dots : \frac{dL_{m-1,m-1}}{d\theta} : \frac{dL_{mm}}{d\theta} , \quad (13)$$

где основной составляющей собственных индуктивностей  $L_{11}, L_{22}, L_{33}, \dots, L_{mm}$  является доля, обусловленная потокосцеплением фаз с полем возбуждения.



**Рис. 10 – Осциллограммы пуска шагового электропривода на частоту при- ёмности при различной форме импульсов тока в фазах**

При формировании алгоритма определения токов с учётом условия (13), фазы с отрицательной производной индуктивности по углу отключаем, т.е. приравниваем их токи нулю. С учётом этого действия и условия (13) можно установить форму кривой тока в одной фазе, например в первой ( $j=1$ ). На одном полупериоде ток определяется в соответствии с одной из пропорций условия (13), а на другом принимает нулевое значение. Токи остальных повторяют найденную кривую с учётом пространственного смещения фазных зон.

При подаче импульсов формы «криволинейный треугольник» (рис.10, кривая 1) на первых тактах коммутации ротор успешно проходит положения неустойчивого равновесия, до поступления следующих импульсов тока, на отработку следующий шага. Поэтому выхода из синхронизма и пропуска шагов не происходит, в отличие от рассмотренных в работе, других форм импульсов (рис.10, кривые 2, 3, 4). Двигатель успешно втягивается в синхронизм без потери информации о положении ротора.

**В четвертой главе** предложены технические решения для дополнительных вариантов реализации электромеханических преобразователей в приводах КГ и АЗ, которые обеспечивают расширенные возможности по достижению заданного закона движения РО.

Благодаря отсутствию общих магнитных цепей и электрических соединений с катушками 11 (рис. 3) обмотки статора двигателя, по которым протекает силовой ток, предлагаемое устройство может быть использовано для целей индикации положения ротора, а с ним и положения регулирующего органа.

Преобразуя, сигнал ЭДС в фазах I и II с помощью аналогово-цифрового преобразователя, существует возможность реализовать дополнительный канал



индикации положения регулирующего органа. Подключение схемы обработки сигнала возможно как при наличии конденсаторов, подключенных к фазам обмотки генератора, так и при их отсутствии (рис.11).

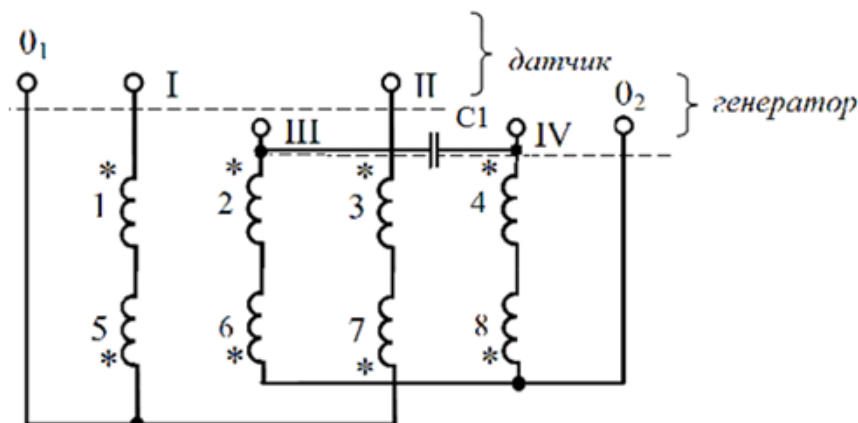


Рис. 11 - Схема включения обмоток генератора и датчика

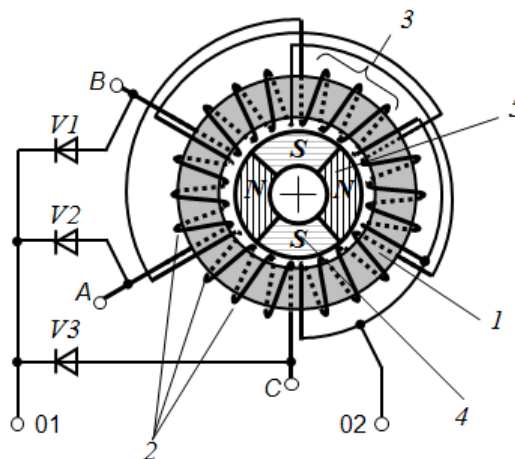
Введение дополнительного канала индикации положения рейки с регулирующим органом позволяет повысить надёжность работы привода.

С целью проверки альтернативного варианта привода, в том же внешнем диаметре, что и спроектированный, исследованный и изготовленный электромеханический преобразователь, был рассчитан аналог электропривода без механического преобразователя вращательного движения в поступательное, на базе линейного ШД.

При проведении проектировочных расчётов установлено, что при таком же, как и у вращающегося аналога, внешнем диаметре (рассмотрен вариант 102 мм) разместить катушки четырёхфазной обмотки в четырёх магнитопроводах и обеспечить при этом надёжное перемещение рейки и РО общей массой 50 кг не удаётся. Поэтому пришлось удвоить их количество, с соответствующим увеличением осевой длины машины.

Для воздействия на скорость опускания РО при работе ЯЭУ в режиме АЗ предложено использовать бесконтактную синхронную машину, поток возбуждения которой, созданный постоянными магнитами, регулируется путём подмагничивания магнитопровода статора (рис. 12) от автономного источника.

Для исключения отдельной обмотки подмагничивания, катушки обмотки статора соединены в катушечные



- 1 – кольцевой магнитопровод статора;
- 2 – катушки обмотки статора;
- 3 – катушечные группы;
- 4, 5 – постоянные магниты;
- 01, 02 – зажимы для источника постоянного напряжения.

Рис. 12 – Генератор с обмоткой статора, совмещённой с обмоткой подмагничивания (четырёхполюсный вариант с гладким статором)

группы из  $2q$  рядом расположенных катушек ( $q$  – число катушек на полюс и фазу), включенные в фазах согласно, собранные в звезду с выведенной нулевой точкой. При таком соединении катушек поток подмагничивания, созданный постоянным током, протекающим через основную и дополнительную (образованную диодами  $V1-V3$ ) нулевые точки обмотки статора, не пересекает зазор, а замыкается внутри статора.

При подключении нагрузки через зажимы фаз  $A, B, C$  ей будет передаваться электрическая мощность, пропорциональная напряжению на этих зажимах и потребляемому току.

Величину напряжения можно регулировать путём подмагничивания магнитопровода статора постоянным током от автономного источника через зажимы 01 и 02. Вследствие возрастания магнитного сопротивления кольцеобразного магнитопровода статора, величина ЭДС, наводимой постоянными магнитами 4 и 5 ротора при его вращении уменьшается, поэтому уменьшается и мощность, отдаваемая синхронной машиной нагрузке. Максимальная мощность будет генерироваться при нулевом токе подмагничивания, т.е. при отключенном автономном источнике.

**В заключении** изложены основные результаты работы.

**В приложениях** представлены результаты расчетов, программы расчетов характеристик узлов электромеханического преобразователя, копии патентов на изобретение, а также заключение со сведениями об использовании результатов диссертации.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В итоге проделанной работы, посвящённой совершенствованию устройств контроля движения регулирующих органов исполнительных механизмов СУЗ ядерных энергетических установок, решены следующие задачи:

1) Проведён анализ существующих конструкций электроприводов СУЗ, на его основании определён состав устройств электропривода с расширенными возможностями, позволяющими наиболее гибко осуществлять силовое воздействие на регулирующий орган с целью обеспечения его движения по заданному закону.

2) Выявлены перспективные конструкции электромеханических преобразователей, состав которых подтверждён патентами на изобретения, использование которых обеспечивает более широкие возможности по обеспечению заданного закона движения регулирующего органа при обесточивании привода СУЗ в режиме аварийной защиты; в частности, предложена концептуальная схема электромеханического преобразователя, состоящего из индукторного двигателя и магнитоэлектрического генератора, обеспечивающая лучшие энергетические показатели и обладающая более широкими возможностями при настройке режима торможения РО за счёт электромагнитного разделения функций двигателя и генератора в приводе ИМ СУЗ;

3) Для каждого из устройств: двигателя и генератора, обеспечивающих выполнение разделённых функций в приводах КГ и АЗ, разработаны методики проектирования и предложено математическое описание и специальное

ПО, позволяющее выполнять проектирование, моделирование и численный анализ с использованием расширенных возможностей современной вычислительной техники и пакетов прикладных программ;

4) Спроектированы, изготовлены и проведены численные и натурные исследования компонентов электромеханического преобразователя с разделением функций двигателя и генератора (тормоза) в одном приводе ИМ СУЗ;

5) На основании проведенных исследований подтверждена достоверность разработанных методик проектирования и численного анализа двигателя и генератора составляющих основу конструкции перспективного электромеханического преобразователя для привода ИМ СУЗ;

6) Предложены технические решения, в том числе одно из них на уровне изобретения, которые позволяют расширить область применения электромеханических преобразователей в приводах КГ и АЗ, упростить кинематическую схему этих приводов и обеспечить дополнительные возможности по настройке заданной скорости опускания РО в режиме АЗ.

После испытаний изготовленных образцов, компоненты электромеханического преобразователя вошли в комплект поставочных изделий для ИМ СУЗ промышленной ЯЭУ.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Смирнов, А.Ю. Совершенствование электромеханических устройств управления скоростью перемещения регулирующего органа исполнительных механизмов систем управления и защиты ядерных реакторов// А.Ю. Смирнов, **Д.А. Кудряшов** - Журнал «Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА 2016»; №5, (547), с.25-30.

2. Смирнов, А.Ю. Исследование характеристик торможения ротора в приводе с магнитоэлектрическим синхронным генератором// А.Ю. Смирнов, **Д.А. Кудряшов** - Журнал «Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА 2022»; №1, с.56-62.

3.Смирнов, А.Ю. Разработка подтормаживающего устройства для шагового привода исполнительных механизмов вертикального перемещения // А.Ю. Смирнов, **Д.А. Кудряшов** – Электричество, 2022, №5, с. 43-50.

4. Смирнов, А.Ю. Проектирование индукторного двигателя с самовозбуждением для шагового привода регулирующего органа//А.Ю. Смирнов, **Д.А. Кудряшов** Т.Н. Уснунц-Кригер - Интеллектуальная энергетика, 2022, №1(17), с.4.

*Статьи и переводы, опубликованные за рубежом*

5. Smirnov, A. Inductor Motors Characteristics Research At Dynamic Braking / A. Smirnov, A. Zimin, **D. Kudryashov** // Proceedings of 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems ICEPDS 2018 accepted for publication in IEEE – Novocherkassk, October 3-6, 2018.

6. Smirnov, A. Research on Waveform Pulses on Step Drive Running with Inductor Motor/ A. Smirnov, A. Zimin, D. Kudryashov // «2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)», 2018.

*Работы, опубликованные в других изданиях*

7. Смирнов, А.Ю. Электроприводы с шаговыми двигателями перспективных типов // А.Ю. Смирнов, **Д.А. Кудряшов** – Сборник трудов 18-й международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. Секция 2: Проектные разработки и совершенствование эксплуатации 30-31 марта 2016, г. Подольск Московской обл. 2016 г.

8. Смирнов, А.Ю. Магнитоэлектрические устройства контроля движения для электропривода исполнительных механизмов// Т.Н. Уснунц-Кригер, **Д.А. Кудряшов** – «Труды IX Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016», 2016 г., с.496-500.

9. **Кудряшов, Д.А.** Расширение функциональных возможностей устройств для вертикального перемещения регулирующих органов ядерных реакторов// Д.А. Кудряшов, А.Ю. Смирнов, - Сборник трудов XVI молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее-2018» АО «ЦКБ МТ «Рубин» г. Санкт-Петербург, 23-24.05.2018 г.

10. Смирнов, А.Ю. Расширение области применения электропривода регулирующих органов ядерных реакторов// А.Ю. Смирнов, **Д.А. Кудряшов** Журнал «Интеллектуальная электротехника», НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - Нижний Новгород, 2018. № 1 - с.28-33

11. Смирнов, А.Ю. Бесконтактный синхронный двигатель с внешним ротором и кольцевой обмоткой якоря// А.Ю. Смирнов, А.А. Кралин, **Д.А. Кудряшов**, Е.Н. Александрова – Сборник Актуальные проблемы электроэнергетики НГТУ им. Р.Е. Алексеева – Н. Новгород, 2018 г., с.135-140

12. Смирнов, А.Ю. Расчет момента генератора в приводе с ограничением частоты вращения// А.Ю. Смирнов, **Д.А. Кудряшов** - Тезисы доклада двадцать пятой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов радиоэлектроника, электротехника и энергетика 14-15 марта 2019г., г. Москва, с.347

13. **Кудряшов, Д.А.** Применение индуктивных датчиков для управления скоростью перемещения исполнительных механизмов в энергетическом машиностроении - Сборник тезисов докладов 24 Нижегородской сессии молодых ученых 2019 г.

*Авторские свидетельства и патенты*

14. Патент №2693935 на изобретение РФ. Электромеханический преобразователь для электропривода вертикального перемещения регулирующего органа/ А.Ю. Смирнов, В.В. Веллер, А.В. Кифоренко, **Д.А. Кудряшов**; опубл. 08.07.2019, Бюл.№19.

15. Патент №2759219 на изобретение РФ. Синхронная машина/ А.Ю. Смирнов, А.А. Кралин, **Д.А. Кудряшов**; опубл. 11.11.2021, Бюл.№32.