

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ СИСТЕМНЫХ
ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ ИХ
УПРАВЛЕНИИ**

Специальность: 3340.01 — Электротехнические системы и
комплексы

Отрасль науки: Техника

Соискатель: **Гасанова Ляман Гасан гызы**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора наук

Баку – 2025

Диссертационная работа выполнена в Азербайджанском
Научно-Исследовательском и Проектно-Изыскательском
Институте Энергетики

Научный консультант: Доктор технических наук, проф.

Мустафаев Рауф Исмайл оглы

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, академик
Гашимов Ариф Мамед оглы

Доктор технических наук, чл.корр.
Алыгулиев Рамиз Магамед оглы

Доктор технических наук, доцент
Гурбанов Ельчин Джалал оглы

Доктор технических наук, проф.
Джалилов Мардан Фарадж оглы

Диссертационный совет ED 2.04 Высшей Аттестационной
Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики,
действующий на базе Азербайджанского Технического
Университета

Председатель
диссертационного совета: Доктор технических наук, проф.

Юсифбейли Нурали Адил оглы

Ученый секретарь
диссертационного совета: Кандидат технических наук, доцент

Фархадов Вахид Гара оглы

Председатель научного
семинара: Доктор технических наук, проф.

Саидов Расим Азим оглы

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень разработанности. Развитие научных методов анализа и исследования режимов работы современных ветроэлектрических установок, работающих в энергосистеме, началось практически вместе с выпуском и внедрением первых промышленных ветроустановок в конце 70-х и начале 80-х годов прошлого столетия. Хотя первые работы о принципах работы ветроэлектрических установок малых мощностей появились раньше в 50-60 годы, однако системные исследования отсутствовали.

Исследованию режимов работы ветроэлектрических установок, работающих на электрическую сеть, посвящено значительное количество работ, притом «география» этих работ обширна – этими вопросами интенсивно занимаются в Европе (Дания, Германия, Испания, Англия), в Америке (преимущественно в США), в Азии (Китай, Индия). Эти исследования посвящены обширному спектру рассматриваемых вопросов: исследование ветроэнергетических характеристик регионов, пригодных для системной ветроэнергетики¹; исследование характеристик и эффективности функционирования самих ветродвигателей²; исследование и оптимизация режимов работы электромеханических преобразователей, применяемых в системной ветроэнергетике³, и

¹ Региональные аспекты ветроэнергетики / Иванова, И. Ю., Карамов, Д. Н., Постников, И. В. [и др.]; отв. редакторы В. А. Стенников, В. Г. Курбацкий; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. – Новосибирск: СО РАН, – 2020. – 296 с.

² Дзензерского, В.А., Пивняка, Г.Г. Ветроэнергетика. Информационно-аналитический обзор по альтернативной энергетике: монография /С.В. Тарасов, Ф.П. Шкрабец, В.А. Задонцев, С.В. Отчич; под общ. ред. В.А. Дзензерского и Г.Г. Пивняка; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, – 2014.

³ Bellarbi, S. Electromechanical study the wind energy conversion system based DFIG and SCIG generators // International journal of mechanics. – 2021; Vol. 15, – p. 102-106.

наконец исследование вопросов совместной работы ветроэлектрических установок параллельно с энергосистемой⁴.

Каждая из вышеуказанных направлений является отдельной самостоятельной проблемой в общей проблематике глобальных вопросов разработки и функционирования промышленных системных ветроэлектрических установок крупных мощностей, работающих на электрическую сеть.

В настоящей диссертационной работе очерчен круг исследований только электромеханическими преобразователями (т.е. электрическими машинами) ветроэлектрических установках. На наш взгляд, этот узел ветроэлектрических установок является одним из наиболее важных и сложных, но самое главное, он является наиболее легко управляемым (в том числе по оптимальным законам) узлом ветроэлектрических установок, позволяющим повысить устойчивость и эффективность работы всей ветроэлектрических установок.

Так как в работе рассматриваются крупные ветроэлектрические установки мегаваттного класса, работающие на электрическую сеть, то естественно, сеть и потребители предъявляет повышенные требования в первую очередь к качеству вырабатываемой электроэнергии, при достижении экономической и технологической эффективности функционирования самих ветроэлектрических установок, которые обеспечивают соответствующая автоматика и системы управления.

Обработка и анализ многочисленных источников технической литературы⁵, показывает, что на сегодняшний день в системной ветроэнергетике мегаваттного класса получили распространение и продолжают успешно внедряться системы

⁴ Qazi, S. H., Mustafa, M. W. B. Technical issues on integration of wind farms with power grid-A review // International Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2014. Vol.3, No. 5, – p. 87-91.

⁵ Касьянов, С. Е., Москаленко, В. В., Рывлин, И. А. и др. Принципы моделирования ветроэнергетических установок для расчета токов короткого замыкания // Известия НТЦ единой энергетической системы. – 2017. № (1) 76, – с.21-26.

электрохимического преобразования ветровой энергии в электрическую, состоящие из «классических» синхронных и асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором, содержащих преобразователи частоты в цепях статора этих машин. Причем преобразователи частоты, применяемые в ветроэнергетике выполнены на полностью управляемых GTO – тиристорах, либо на IGBT силовых транзисторах.

Помимо вышеуказанных генераторов большое распространение в ветроэнергетике получили генераторы, выполненные на базе асинхронных машин двойного питания, управляемые преобразователями частоты со стороны ротора, а также частотно-управляемые синхронные генераторы с постоянными магнитами.

Применение вышеуказанных схем генерации электрической энергии определяются типом и мощностью ветродвигателя, ветровыми характеристиками региона, где устанавливается ветроэлектрические установки, условиями выдвигаемыми электрическими сетями в местах их присоединения характером нагрузки и т.п.

Для всех электрохимических преобразователей, применяемых в ветроэнергетике непреложным, является одно обстоятельство – энергоносителем в них является ветровой поток, скорость которого и определяет мощность, выдаваемую ветроэлектрической установкой в энергосистему.

Скорость ветра величина непостоянная, диапазон его изменений может достичь значительных величин, более того значительных величин может достичь и скорость изменения флуктуаций скорости ветра (т.е. ускорений).

Все это диктует необходимость знания, умения определять и управлять динамическими режимами работы частотно-управляемых электрохимических преобразователей, применяемых в современных ветроэлектрических установках.

Как было отмечено, помимо изучения динамических режимов и обеспечения устойчивости работы частотно-управляемых генераторов ветроэлектрических установок, важное значение имеет проблема повышения эффективности функционирования

ветроэлектрических установок в квазистационарных режимах работы, обеспечение качества выдаваемой в сеть электрической энергии.

Конечно, имеется множество источников технической литературы где вышеуказанные вопросы в той или иной степени получили свое разрешение. Однако обзор литературы показывает, что на сегодняшний день нет универсальных и относительно простых, доведенных до инженерного восприятия, методов моделирования и исследования динамических и статических режимов работы системных ветроэлектрических установок мегаваттного класса, электромеханические преобразователи которых снабжены частотными преобразователями, не в полной мере освещены вопросы управления и оптимизации режимов работы этих ветроэлектрических установок.

Все вышеотмеченное однозначно позволяет сделать вывод об актуальности темы диссертационной работы.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является машины переменного тока, применяемые ветроэлектрических установках. Предметом исследования является разработка универсальной структуры математической модели электрических машин переменного тока и исследование на этих моделях различных режимов работы данных машин.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей диссертационной работы является разработка универсальных, относительно просто реализуемых методов математического моделирования, частотно-управляемых синхронных и асинхронных генераторов различных видов, применяемых в системной ветроэнергетике, исследование на этих моделях динамических и квазиустановившихся режимов работы ветроэлектрических установок совместно с их управлением и оптимизацией.

Достижение этой цели позволит существенно повысить устойчивое и качественное преобразование ветровой энергии в электрическую.

В свою очередь указанная цель может быть достигнута при решении следующих **задач** сформулированной темы:

- разработка универсальной структуры математической модели практически всех типов электрических машин, применяемых в ветроэлектрических установках, базирующийся на уравнениях, записанных в осях, вращающихся со скоростью ротора машины. Структура модели позволяет учесть все возможные виды управления машин переменного тока: частотное регулирования как со стороны их статора, так и со стороны ротора;

- разработка трехкоординатной математической модели частотно-управляемых трехфазных асинхронных машин ветроэлектрических установок как с короткозамкнутым ротором, так и с фазным ротором;

- разработка математической модели частотно-управляемого синхронного генератора ветроэлектрических установках с постоянными магнитами и с электромагнитным возбуждением;

- исследование динамических и квазистатических режимов работы всех видов частотно-управляемых генераторов ветроэлектрических установок, на разработанных математических моделях с выдачей рекомендаций по управлению и оптимизации указанных режимов.

Совокупность этих задач и их решение достаточна для достижения поставленной в диссертационной работе цели, а это позволит повысить качество проектирования крупных ветроэлектрических установок, а также эффективность их функционирования.

Методы исследования. Используемые в данной работе методы исследования электрических машин базируются на трех законах электромеханики:

- электромеханическое преобразование энергии не может быть осуществимо с К.П.Д., равным 100%, т.е. $\eta < 100\%$;

- все электрические машины обратимы, т.е. одна и та же электрическая машина может работать как в качестве генератора, так и в качестве двигателя;

– электромеханическое преобразование энергии осуществляется электромагнитными полями неподвижными относительно друг друга. То есть результирующее поле в машине создается полями статора и ротора при этом в установившемся режиме эти поля неподвижны относительно друг друга.

Основным методом исследования в данной диссертационной работе является метод математического моделирования электрических машин переменного тока, применяемых в системной ветроэнергетике. Оригинальность предложенных методов моделирования электромеханических преобразователей заключается в том, что они являются во-первых универсальными, т.е. в одной структуре позволяют исследовать разные виды и типы машин, а во вторых они позволяют относительно просто воспроизводить все способы управления этих машин, естественно, что для машин переменного тока основным способом управления является частотное как для синхронных так и для асинхронных машин, а также управления возбуждением синхронных машин и амплитудой напряжения для асинхронных машин.

Помимо этого, основного метода, для решения частных задач в работе нашли дополнительное применение метод оптимального управления Понтрягина, методы преобразования с помощью рядов Фурье, а также методы теории автоматического управления и регулирования.

Таким образом, для решения поставленных задач и достижения цели диссертации применен следующий математический аппарат:

- теория линейных и нелинейных дифференциальных уравнений;
- теория автоматического регулирования и управления;
- элементы теории оптимального управления.

Причем, необходимо отметить, что все разработанные и примененные для исследования методы моделирования в полной мере должны удовлетворять, представленным выше трем законам электромеханики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Унифицированная структура математической модели всех основных частотно-управляемых электрических машин, применяемых в ветроэнергетике, позволяющая значительно облегчить процедуру моделирования и исследования и легко сопоставить и оценить результаты исследований различных типов генераторов ветроэлектрических установок.

2. Трехкоординатная модель частотно-управляемый асинхронной машины двойного питания, которая особенно важна для исследований несимметричных и неполнофазных режимов работы.

3. Математическая модель синхронного генератора с постоянными магнитами ветроэлектрических установках, суть которой заключается в учете влияния постоянного магнита в уравнениях генератора, а также в способе регулирования амплитуды и частоты статорного напряжения генератора.

4. Исследование статических и динамических характеристик ветроэлектрических установок, содержащих синхронные генераторы с постоянными магнитами, способы повышения устойчивости и демпфирования колебаний роторов этих генераторов.

5. Имитационная модель системы, «ветер–ветродвигатель–электромеханический преобразователь–электрическая сеть».

6. Метод учета влияния высших гармонических напряжения на режимные параметры регулируемых электрических машин ветроэлектрических установок.

7. Анализа эффективности работы асинхронных машин при скалярном управлении.

8. Сопоставительный анализ режимов частотного пуска асинхронных генераторов ветроэлектрических установках.

9. Способ перевода асинхронной машины двойного питания в режим синхронного генератора при технологической необходимости и его математическая модель.

10. Метод моделирования угла поворота лопастей ветродвигателей ветроэлектрических установок.

11. Методы компенсации реактивной мощности для асинхронных генераторов различных исполнений.

12. Учет влияния параметров внешней сети и местной нагрузки на режим работы ветроэлектрических установок с асинхронной машиной двойного питания.

13. Моделирование и исследование режимов работы ветроэлектрических установок с асинхронной машиной двойного питания параллельно с источником ограниченной мощности.

Научная новизна работы заключается в дальнейшем развитии научного направления в ветроэнергетике, которое включает в себя разработку новых положений методологии моделирования, исследования, в том числе и с элементами оптимизации переходных и квазистационарных процессов во всех видах электромеханических преобразователях ветроэлектрических установок, работающих на электрическую сеть.

Научная новизна включает в себя:

- разработку унифицированной структуры математической модели частотно-управляемых электрических машин переменного тока ветроэлектрических установках;

- разработку трехкоординатной математической модели асинхронных машин ветроэлектрических установок;

- разработку метода моделирования синхронного генератора ветроэлектрических установок с постоянными магнитами управляемого преобразователем частоты со стороны статора;

- исследование и анализ различных законов регулирования в квазистационарных режимах как для синхронных машин ветроэлектрических установках с постоянными магнитами, так и с электромагнитным возбуждением при частотном управлении;

- моделирование и исследование динамических режимов ветроэлектрических установок, оснащенных частотно-управляемыми синхронными генераторами с постоянными магнитами;

- демпфирование колебаний роторов частотно-управляемых синхронных машин с постоянными магнитами с применением элементов теории оптимального управления Понтрягина;

- моделирование и исследование влияния высших гармонических напряжения преобразователя частоты на

режимные параметры синхронного генератора с постоянными магнитами и параметры асинхронных машин двойного питания ветроэлектрических установках;

- влияние изменения сетевого напряжения на режим работы ветроэлектрических установок с машиной двойного питания и пути повышения динамической устойчивости системы;

- оценка результатов расчета режимов работы ветроэлектрических установок с асинхронной машиной двойного питания по полным и упрощенным уравнениям математической модели;

- анализ эффективности функционирования частотно-управляемых асинхронных машин с короткозамкнутым ротором при скалярном управлении и обеспечении минимума потерь мощности в самой машине, а также постоянства значений перегрузочной способности и магнитного потока.

- сопоставительный анализ режимов частотного пуска ветроэлектрических установок с асинхронными генераторами с короткозамкнутым ротором и асинхронными машинами двойного питания;

- техническое решение по использованию асинхронных машин двойного питания ветроэлектрических установках в синхронном режиме работы, его моделирование и исследование;

- метод моделирования регулирования угла поворота лопастей ветроэлектрических установках;

- методы компенсации реактивной мощности для асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором и асинхронных машин двойного питания;

- моделирование и исследование влияния параметров внешней сети и местной нагрузки на режимы работы ветроэлектрических установок с машиной двойного питания, работающей на сеть бесконечной мощности;

- исследование режимов работы ветроэлектрических установок с асинхронной машиной двойного питания при работе параллельно с источником ограниченной мощности;

– имитационное моделирование режимов работы ветроэлектрических установок с различными электромеханическими преобразователями.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Предложенные методы моделирования, алгоритмы расчета, а также многочисленные флюктограммы, полученные на различных моделях, доведены до инженерного восприятия и могут быть использованы как на стадии проектирования ветропарка, состоящего из нескольких десятков ветроэлектрических установок, так и на стадии его эксплуатации.

Полученные результаты исследования и технические решения позволяет существенно повысить устойчивость и эффективность, в том числе экономическую, функционирования ветроэлектрических установок с различными электромеханическими преобразователями, в том числе и в ветровых условиях Азербайджана.

Результаты в виде практических рекомендаций на протяжении ряда лет систематически передавались (внедрялись) в соответствующие службы ОАО «Азерэнерджи». Часть рекомендаций передана также для практического использования в Государственном агентстве по альтернативным и возобновляемым источникам энергии Азербайджана.

Апробация работы и реализация результатов. Основные результаты и научные положения диссертационной работы докладывались на международных конференциях:

– «Энергетические связи России и Восточной Азии: стратегия развития в XXI веке. Объединенный симпозиум. Иркутск. Россия, 30 август – 10 сентябрь, 2010;

– 6-я Международная конференция «Технические и физические проблемы электротехники» (ICTPE–2010), Тебриз, Иран. 14 – 16 сентября, 2010;

– 3-я Международная конференция по управлению и оптимизации в промышленности, (COIA 2011), Анкара, Турция. 22–24 августа, 2011;

– 8-я международная конференция «Технические и физические проблемы энергетики». Университетский колледж

Эстфолла, (ICTPE–2012), Фредрикстад, Норвегия. 5–7 сентября, 2012;

- «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» Международный научный семинар им. Ю.Н.Руденко. Проблемы надежности систем энергетики в рыночных условиях. Баку, Азербайджан. 17–21 сентября, 2012;

- «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». Международный научный семинар им. Ю.И. Руденко «Надежность либерализованных систем энергетики», С-Петербург, Россия. 30 июня – 4 июля, 2015;

- Международная конференция «Современные электроэнергетические системы» (MEPS'15), Вроцлав, Польша. 6- 9 июля, 2015;

- 12-я Международная конференция «Технические и физические проблемы электротехники» (ICTE–2016), Бильбао, Испания. 7–9 сентябрь, 2016;

- 18-я конференция IFAC по технологиям, культуре и международной стабильности (TECIS 2018), Баку, Азербайджан. 13–15 сентября 2018;

- 1-я Международная конференция «Энергетика будущего: вызовы и возможности» (ICEFCO–2018). Баку, Азербайджан. 10–13 сентября, 2018;

- 14-я Международная конференция «Технические и физические проблемы электротехники». Нахичеванский Государственный Университет, (ICTPE-2018), Нахичевань, Азербайджан. 15–17 октября, 2018;

- 15-я Международная конференция «Технические и физические проблемы электротехники» (ICTPE-2019), Стамбул, Турция, 13–15 октября, 2019.

Помимо этого, результаты докладывались на семинарах Азербайджанского Научно-Исследовательского и Проектно-Изыскательского Института Энергетики и в соответствующих службах ОАО «Азэрэнержи».

Название организации, где выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в Азербайджанском

Научно-Исследовательском и Проектно-Изыскательском Институте Энергетики.

Степень публикации исследования. Основные результаты диссертационной работы изложены в 60 научных публикациях, включая 46 научных статей, 12 материалов и тезисов международных научных конференций, а также 1 монографию и 1 патент. Из общего числа публикаций 34 работы опубликованы за рубежом. Двенадцать статей размещены в периодических изданиях, индексируемых в международных базах данных: Web of Science (3 статьи) и Scopus (9 статей). Шесть научных статей выполнены автором самостоятельно, без соавторов.

Общий объем диссертации в знаках с указанием объема её структурных разделов в отдельности. Содержание диссертационной работы изложено на 354 страницах вместе с 14 таблицами, 70 рисунками и со списком технической литературы, насчитывающая 267 наименований 22 из которых Интернет-ресурсы. Общий объём диссертационной работы (без учета пробелов, таблиц, графиков и списка используемой литературы) составил 343808 знаков: Введение – 26 страниц (41296 знаков), четыре главы (Глава I – 51 страница, (51980 знаков); Глава II – 72 страницы (78886 знаков); Глава III – 109 страниц (111604 знаков); Глава IV – 44 страницы (37987 знаков)), Выводы – 11 страниц (18257 знаков). ы

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении анализируется динамика роста ветроэнергетических мощностей во всем мире^{6,7}, а также оценивается состояние и пути развития ветроэнергетики в Азербайджане^{8,9}.

⁶ Renewable Energy Statistics 2022: [Electronic resource] / International Renewable Energy Agency (IRENA). – July 18, 2022. URL: <https://www.irena.org/Statistics>

⁷ IEA Wind TCP Annual Report – 2020, – p. 56.

⁸ Насибов В.Х. Развитие ВИЭ и энергоэффективности в Азербайджане за последние годы: [Elektron resurs] / UNECE – October 11, 2021. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-11/10-Valeh-Nasibov-Azerbaijan.pdf>

⁹ Отчет GWEC: [Elektron resurs] / – 2021. URL: <https://www.gwec.net/>

Производится обоснование и постановка задач, подлежащих исследованию. Определяется актуальность темы диссертационной работы, формируются цели исследования, приводятся методы исследования с их обоснованием.

Здесь же характеризуется научная новизна решенных в диссертации задач, основные положения, выносимые на защиту, практическая ценность работы, а также апробация работы, список публикаций и структура диссертации.

В первой главе освещаются вопросы анализа видов и типов электромеханических преобразователей¹⁰, применяемых в современных ветроэлектрических установках мегаваттного класса, работающих на электрическую сеть¹¹. Отмечается, что наиболее эффективным и перспективным методом исследования переходных и квазиустановившихся режимов работы электрических машин ветроэлектрических установок является метод математического моделирования^{12,13}.

В связи с этим разработана новая структура универсальной математической модели частотно-управляемых электрических машин ветроэлектрических установок. Она позволяет в одной структуре уравнений описывать и исследовать все виды электрических машин, применяемых в ветроэнергетике. Ниже представляется структура универсальной математической модели частотно-управляемых электрических машин ветроэлектрических установках.

¹⁰ Котов, А. А. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности / А. А. Котов, Н. И. Неустров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017; – Т. 17, № 4. – с. 80-89.

¹¹ Yaramasu, V. High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies / V. Yaramasu, B. Wu, P.C. Sen [et al.] // Proc. IEEE – 2015.103, – p. 740-788.

¹² Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для ВУЗов / под ред. И.П.Копылова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, – 2001. – 327 с.

¹³ Соколова, Н.И. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах / Н.И.Соколова, И.А.Груздев, К.П.Кадомская, [и др.] – Москва-Ленинград: Энергия, – 1964. – 408 с.

За базу математической модели частотно-управляемых электрических машин переменного тока принимаются хорошо известные уравнения Парка-Горева¹⁴, которые записываются в осях вращающихся со скоростью ротора ω_r , причем машина снабжена двумя статорными и четырьмя роторными обмотками. В отличие от уравнений Парка-Горева в представленных уравнениях в качестве основного параметра выступает не угол мощности θ между осью ротора, вращающегося со скоростью ротора ω_r и синхронной осью, вращающейся с синхронной скоростью ω_s , а угол между осью ротора и неподвижной осью, который обозначается углом α . Таким образом, скорость ротора равна $\omega_r = p\alpha = \frac{d\alpha}{d\tau}$, где p – символ дифференцирования, τ – синхронное время равно $\tau = \omega_s \cdot t = 314 \cdot t$, t – время в секундах.

В этом случае уравнения управляемых электрических машин переменного тока можно записывать в клеточно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} p\Psi_s \\ p\Psi_f \\ p\Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{s1} & A_{s2} & A_{s3} \\ B_{f1} & B_{f2} & B_{f3} \\ C_{r1} & C_{r2} & C_{r3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_f \\ \Psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_s \\ U_f \\ U_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

Матрицы-столбцы – это суть вектора с проекциями на оси d, q : –производных потокосцеплений обмоток статора, возбуждения и ротора:

$$p\Psi_s = \begin{bmatrix} p\Psi_{ds} \\ p\Psi_{qs} \end{bmatrix}; \quad p\Psi_f = \begin{bmatrix} p\Psi_{df} \\ p\Psi_{qf} \end{bmatrix}; \quad p\Psi_r = \begin{bmatrix} p\Psi_{dr} \\ p\Psi_{qr} \end{bmatrix}; \quad \Psi_s = \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \end{bmatrix};$$

$$\Psi_f = \begin{bmatrix} \Psi_{df} \\ \Psi_{qf} \end{bmatrix}; \quad \Psi_r = \begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \text{ и } U_s = \begin{bmatrix} U_{ds} \\ U_{qs} \end{bmatrix}; \quad U_f = \begin{bmatrix} U_{df} \\ U_{qf} \end{bmatrix}; \quad U_r = \begin{bmatrix} U_{dr} \\ U_{qr} \end{bmatrix}.$$

Остальные матрицы равны:

¹⁴ Воропай, Н.И. Электромеханические переходные процессы: учеб. пособие / Н.И. Воропай. – Благовещенск: АмГУ, – 2013. – с. 151.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}_{s1} &= \begin{bmatrix} -r_s \cdot k_{ds} & -\omega_r \\ \omega_r & -r_s \cdot k_{qs} \end{bmatrix}; & \mathbf{A}_{s2} &= \begin{bmatrix} -r_s \cdot k_{dsf} & 0 \\ 0 & -r_s \cdot k_{qsf} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{A}_{s3} &= \begin{bmatrix} -r_s \cdot k_{dsr} & 0 \\ 0 & -r_s \cdot k_{qsr} \end{bmatrix}; & \mathbf{B}_{f1} &= \begin{bmatrix} -r_{df} \cdot k_{dsf} & 0 \\ 0 & -r_{qf} \cdot k_{qsf} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{B}_{f2} &= \begin{bmatrix} -r_{df} \cdot k_{df} & 0 \\ 0 & -r_{qf} \cdot k_{qf} \end{bmatrix}; & \mathbf{B}_{f3} &= \begin{bmatrix} -r_{df} \cdot k_{dfr} & 0 \\ 0 & -r_{qf} \cdot k_{qfr} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{C}_{r1} &= \begin{bmatrix} -r_{dr} \cdot k_{dsr} & 0 \\ 0 & -r_{qr} \cdot k_{qsr} \end{bmatrix}; & \mathbf{C}_{r2} &= \begin{bmatrix} -r_{dr} \cdot k_{dfr} & 0 \\ 0 & -r_{qr} \cdot k_{qfr} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{C}_{r3} &= \begin{bmatrix} -r_{dr} \cdot k_{dr} & 0 \\ 0 & -r_{qr} \cdot k_{qr} \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\}$$

где $r_s, r_{df}, r_{qf}, r_{dr}, r_{qr}$ – соответственно активные сопротивления статорных, обмоток возбуждения и обмоток ротора по осям d, q ; коэффициенты $k_{ds}, k_{dsf}, k_{qs}, k_{qsf}, k_{qsr}, k_{df}, k_{dfr}, k_{qf}, k_{qfr}, k_{dr}$ и k_{qr} связывают величины токов статора i_{ds}, i_{qs} обмоток возбуждения i_{df}, i_{qf} и обмоток ротора i_{dr}, i_{qr} с соответствующими потокоцеплениями. Они легко определяются из равенства нижеследующих матриц:

$$\begin{bmatrix} k_{ds} & 0 & k_{dsf} & 0 & k_{dsr} & 0 \\ 0 & k_{qs} & 0 & k_{qsf} & 0 & k_{qsr} \\ k_{dsf} & 0 & k_{df} & 0 & k_{dfr} & 0 \\ 0 & k_{qsf} & 0 & k_{qf} & 0 & k_{qfr} \\ k_{dsr} & 0 & k_{dfr} & 0 & k_{dr} & 0 \\ 0 & k_{qsr} & 0 & k_{qfr} & 0 & k_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ds} & 0 & x_{ad} & 0 & x_{ad} & 0 \\ 0 & x_{qs} & 0 & x_{aq} & 0 & x_{aq} \\ x_{ad} & 0 & x_{df} & 0 & x_{ad} & 0 \\ 0 & x_{aq} & 0 & x_{qf} & 0 & x_{aq} \\ x_{ad} & 0 & x_{ad} & 0 & x_{dr} & 0 \\ 0 & x_{aq} & 0 & x_{aq} & 0 & x_{qr} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

где $x_{ds}, x_{qs}, x_{df}, x_{qf}, x_{dr}, x_{qr}$ – полные индуктивные сопротивления машин переменного тока соответственно статорных обмоток, обмоток возбуждения и роторных контуров по осям d, q ; x_{ad}, x_{aq} – сопротивления взаимоиндукции по осям d, q . Кроме уравнений (1) и (2) необходимо иметь в виду уравнения движения электрической машины с движущим (тормозным) моментом m_T и электромагнитного момента $m_{эм}$:

$$\left. \begin{aligned} T_j \cdot p\omega_r &= m_T - m_{эм} \\ m_{эм} &= (k_{qs} - k_{ds}) \cdot \Psi_{ds} \cdot \Psi_{qs} + k_{qsf} \cdot \Psi_{ds} \cdot \Psi_{qf} + k_{qsr} \cdot \Psi_{ds} \cdot \Psi_{qr} - k_{dsf} \cdot \Psi_{qs} \cdot \Psi_{df} - k_{dsr} \cdot \Psi_{qs} \cdot \Psi_{dr} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где T_j – инерционная постоянная движущихся частей системы «электрическая машина» приводной (тормозной) механизм в [радиан].

При такой записи уравнений в качестве управляющих параметров в универсальной структуре модели машин переменного тока могут быть использованы: U_{ds} и U_{qs} – составляющие напряжения статорной обмотки амплитуда и частота которой могут регулироваться; U_{df} и U_{qf} – величины постоянного напряжения, подаваемые на обмотки возбуждения по продольной и поперечной осям d, q ; U_{dr} , U_{qr} – составляющие напряжения, питающего роторную обмотку машины, которая также может регулироваться по амплитуде и частоте.

Так как структура универсальной математической модели машин переменного тока базируется на форме записи уравнений в осях d, q вращающихся со скоростью ротора машины ω_r , то моделирование напряжений U_{df} и U_{qf} не представляют труда, так как они подаются с выхода регуляторов возбуждения, точно также легко моделируются составляющие напряжения роторной обмотки U_{dr} и U_{qr} в таком же виде в каком они получаются на выходе преобразователя частоты, питающую роторную обмотку электрических машин.

Для статорной обмотки необходимо, чтобы составляющие напряжения статора U_{ds} и U_{qs} были представлены в таком виде, чтобы они отражали изменение (регулирование) амплитуды и частоты напряжения питающего статорную обмотку машин.

Из диаграммы расположения координатных осей машин переменного тока путем соответствующих геометрических преобразований получены выражения для составляющих статорного напряжения в которые входят регулирующие параметры k_{us} и k_{fs} :

$$\begin{aligned} U_{ds} &= 0,707 \cdot k_{us} \cdot [\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) - \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha)] \\ U_{qs} &= 0,707 \cdot k_{us} \cdot [\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) + \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)] \end{aligned} \quad (4)$$

где $k_{us} = U_s / U_{s0}$; $k_{fs} = f_s / f_{s0}$, причем U_s и f_s – текущие значения модуля и частоты напряжения статора, U_{s0} и f_{s0} – их базовые значения $U_{s0} = f_{s0} = 1$.

Для роторной обмотки:

$$\left. \begin{aligned} U_{dr} &= k_{ur} \cdot \sin(k_{fr} \cdot \tau) \\ U_{qr} &= k_{ur} \cdot \cos(k_{fr} \cdot \tau) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $k_{ur}=U_{rr}/U_{r0}$, $k_{fr}=f_{rr}/f_{r0}$, $U_{r0}=f_{r0}=U_{s0}=f_{s0}=1$.

Таким образом, универсальная структура математической модели электрических машин переменного тока позволяет учесть все возможные виды управления этих машин – частотное управление как со стороны ротора, так и со стороны статора, а также регулирование возбуждения (для синхронных машин) как для продольной, так и для поперечной обмоток.

На разработанной структуре могут быть исследованы практически все виды машин переменного тока, в том числе встречающихся в ветроэлектрических установках – частотно-управляемые синхронные и асинхронные машины, синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов, асинхронная машина с продольно-поперечным возбуждением, асинхронные машины с частотным управлением, как со стороны статора, так и со стороны ротора.

Приведены примеры расчетов некоторых машин переменного тока ветроэлектрических установок на разработанной универсальной структуре математической модели при частотном управлении как со стороны статора, так и со стороны ротора, а также сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, приведенными в технической литературе, подтвердили адекватность, достоверность и эффективность универсальной структуры математической модели.

На рисунке 1 представлены флюктограммы изменения режимных параметров асинхронной машины двойного питания при частотном управлении, как со стороны статора, так и со стороны ротора. Со стороны статора амплитуда и частота напряжения, подаваемого на статорную обмотку были установлена на величинах $k_{us}=k_{fs}=0,7$. После пуска частота вращения ротора устанавливается на значении $\omega_r=0,709$ (величина ω_r больше синхронной $\omega_{r0}=0,7$ указывает на генераторный режим) рисунок 1, а. При этом роторная обмотка закорочена в диапазоне от 0 до 1000 радиан. Электромагнитный момент равен движущему моменту $m_{эм}=-0,3$ (рисунок 1, б).

Соответственно этому величины активной и реактивной мощностей на зажимах машин равны $p_{об} = -0,21$ (знак минус указывает на выдачу активной мощности в сеть) (рисунок 1, в) и $q_{об} = 0,17$ (реактивная мощность потребляется из сети) (рисунок 1, з).

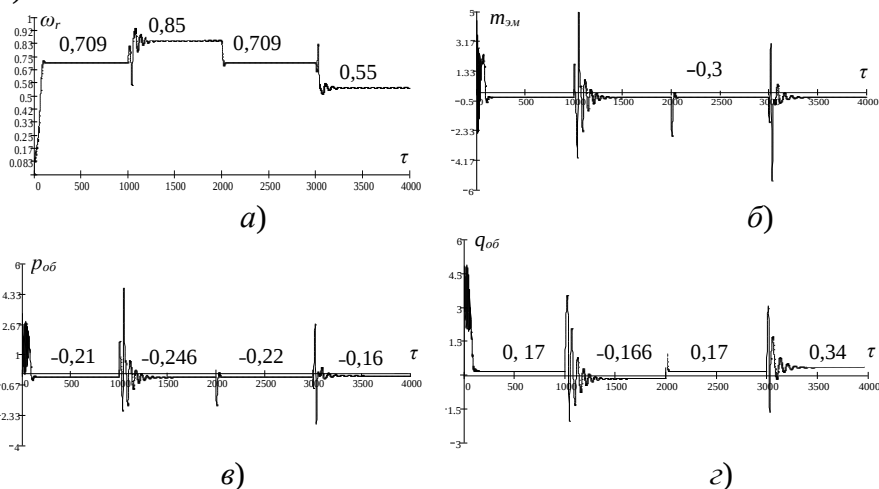


Рисунок 1. Флуктограммы изменения режимных параметров асинхронной машины двойного питания при регулировании напряжения и частоты как со стороны статора, так и со стороны ротора $k_{us} = k_{fs} = 0,7$ и $k_{us} = k_{fs} = \pm 0,15$

В диапазоне от 1000 радиан до 2000 радиан на роторные обмотки подается напряжение с амплитудой и частотой равной $k_{ur} = k_{fr} = -0,15$ (знак минус указывает на регулирование вверх от синхронной частоты вращения). Соответственно частота вращения становится равной $\omega_r = 0,85$, активная мощность на зажимах машины $p_{об} = -0,246$, а реактивная мощность $q_{об} = -0,166$ (рисунок 1, з), т.е. она при этой частоте вращения не потребляется из сети, а выдаются в сеть. В диапазоне от 2000 радиан до 3000 радиан машина возвращается в исходный режим, значения параметров такие же как при работе после пуска, в диапазоне от 0 до 1000 радиан. И наконец, в диапазоне от 3000 радиан до 4000 радиан на обмотку ротора асинхронной машины двойного питания подается напряжения с амплитудой и частотой равной

$\omega_r=0,55$, активная и реактивная мощности соответственно равны $p_{об}=-0,16$ $q_{об} =0,34$. Указанные флюктограммы убедительно подтверждают достоверность и правомерность использования разработанной универсальной структуры математической модели частотно-управляемых электрических машин переменного тока.

Предложена методика моделирования частотно-управляемой асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в трехкоординатной системе $\alpha_s, \beta_s, \gamma_s$ неподвижной в пространстве, что позволяет, относительно просто воспроизводить на модели изменение (регулирование) управляемых параметров – амплитуды и частоты фазных напряжений статора электрических машин, которые затруднительно или невозможно воспроизвести на двухкоординатных моделях.

Впервые предложены уравнения и на их базе составлена трехкоординатная математическая модель частотно-управляемой асинхронной машины с фазным ротором и преобразователем частоты в цепи ротора, уравнения которой записаны в осях $\alpha_r, \beta_r, \gamma_r$, вращающихся со скоростью ротора ω_r .

В развернутом виде уравнения состояния машины двойного питания:

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_{sa} &= U_{sa} \cdot \sin\theta + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_r (\psi_{s\beta} - \psi_{s\gamma}) - r_s \cdot i_{sa} \\ p\Psi_{s\beta} &= U_{s\beta} \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \omega_r (\psi_{s\gamma} - \psi_{sa}) - r_s \cdot i_{s\beta} \\ p\Psi_{s\gamma} &= U_{s\gamma} \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \omega_r (\psi_{sa} - \psi_{s\beta}) - r_s \cdot i_{s\gamma} \\ p\Psi_{ra} &= k_{us} \cdot \sin(k_{fr} \cdot \tau) - r_r \cdot i_{ra} \\ p\Psi_{r\beta} &= k_{us} \cdot \sin\left(k_{fr} \cdot \tau - \frac{2\pi}{3}\right) - r_r \cdot i_{r\beta} \\ p\Psi_{r\gamma} &= k_{us} \cdot \sin\left(k_{fr} \cdot \tau + \frac{2\pi}{3}\right) - r_r \cdot i_{r\gamma} \\ p\theta &= 1 - \omega_r \\ p\omega_r &= \frac{p_m}{J} \cdot (m_{эм} - m_B) \\ m_{эм} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot p_m \cdot x_m [(i_{sa} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\beta} \cdot i_{r\alpha} + i_{s\gamma} \cdot i_{r\beta}) - (i_{sa} \cdot i_{r\beta} + i_{s\beta} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\gamma} \cdot i_{r\alpha})] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Связь между токами и потокосцеплениями представляется в виде:

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{s\beta} \\ i_{s\gamma} \\ i_{ra} \\ i_{r\beta} \\ i_{r\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{sa} & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & x_{s\beta} & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & -0,5x_m & x_{s\gamma} & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m \\ x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_{ra} & -0,5x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_{r\beta} & -0,5x_m \\ -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_{r\gamma} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{s\gamma} \\ \psi_{ra} \\ \psi_{r\beta} \\ \psi_{r\gamma} \end{bmatrix} \quad (7)$$

В развернутой виде:

$$\left. \begin{aligned} i_{sa} &= k_{sa1} \cdot \psi_{sa} + k_{sa2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{sa3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{sa4} \cdot \psi_{ra} + k_{sa5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{sa6} \cdot \psi_{r\gamma} \\ i_{s\beta} &= k_{s\beta1} \cdot \psi_{sa} + k_{s\beta2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{s\beta3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{s\beta4} \cdot \psi_{ra} + k_{s\beta5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{s\beta6} \cdot \psi_{r\gamma} \\ i_{s\gamma} &= k_{s\gamma1} \cdot \psi_{sa} + k_{s\gamma2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{s\gamma3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{s\gamma4} \cdot \psi_{ra} + k_{s\gamma5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{s\gamma6} \cdot \psi_{r\gamma} \\ i_{ra} &= k_{ra1} \cdot \psi_{sa} + k_{ra2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{ra3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{ra4} \cdot \psi_{ra} + k_{ra5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{ra6} \cdot \psi_{r\gamma} \\ i_{r\beta} &= k_{r\beta1} \cdot \psi_{sa} + k_{r\beta2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{r\beta3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{r\beta4} \cdot \psi_{ra} + k_{r\beta5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{r\beta6} \cdot \psi_{r\gamma} \\ i_{r\gamma} &= k_{r\gamma1} \cdot \psi_{sa} + k_{r\gamma2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{r\gamma3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{r\gamma4} \cdot \psi_{ra} + k_{r\gamma5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{r\gamma6} \cdot \psi_{r\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Естественно коэффициенты $k_{sa1} \div k_{r\gamma6}$ определяется из обратной матрицы (7), составленной из параметров машины.

Таким образом, системы уравнений (6) и (8) составляют трехкоординатную математическую модель частотно-управляемой асинхронной машины двойного питания^{2,3}, записанных в осях α_r , β_r , γ_r , вращающихся со скоростью ротора машины.

На примере расчета продемонстрируем работоспособность и достоверность полученных результатов. Выбранный режим исследования – обрыв в одной из фазных обмоток ротора (либо отсутствие питания). На рисунке 2 представлены флюктограммы изменения режимных параметров машины двойного питания математическая модель, которой построена на трехкоординатной системы α_r , β_r , γ_r , вращающейся со скоростью ротора машины ω_r .

На рисунке 2 (а, б, в, г, д, е, ж, з) представлены соответственно частота вращения машины ω_r (рисунок 2, а), электромагнитный

момент машины $m_{эм}$ (рисунок 2, б), фазные токи статора $I_{sα}$, $I_{sβ}$, $I_{sγ}$ (рисунок 2, в, г, д) и токи ротора $I_{rα}$, $I_{rβ}$, $I_{rγ}$ (рисунок 2, е, ж, з).

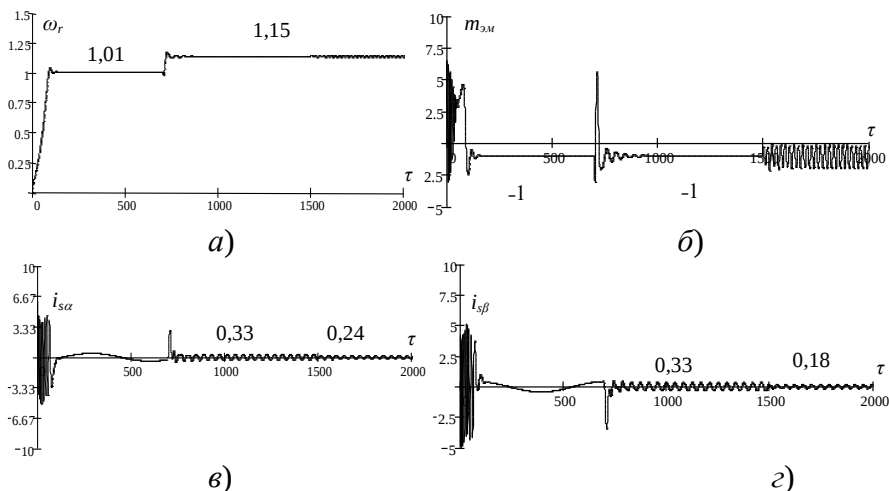
В диапазоне времени от 0 до 700 радиан, осуществляется прямое подключение электрической машины с движущим моментом на валу равным $m_T = -1$ при замыкании обмоток ротора накоротко.

На 700-м радиане подается напряжение в трехфазную обмотку ротора от преобразователя частоты с равными для всех трех фаз значениями амплитуды и частоты $k_{ur} = k_{fr} = -0,15$.

При этом частота вращения ротора поднимается до значения $\omega_r = 1,15$, токи статора и ротора соответственно симметричны и равны $I_{sα} = I_{sβ} = I_{sγ} = 0,33$ и $I_{rα} = I_{rβ} = I_{rγ} = 0,45$, величина электромагнитного момента $m_{эм} = m_T = -1$ (машина работает в генераторном режиме).

На 1500 радиане имитируется режим обрыва фазы β ротора генератора. При этом в машине устанавливается несимметричный режим работы с высокочастотными колебаниями в кривых частоты вращения ротора ω_r и момента $m_{эм}$.

Токи статора становятся несимметричными $I_{sα} = 0,24$, $I_{sβ} = 0,18$, $I_{sγ} = 0,88$. Несимметричными также токи ротора $I_{rα} = 0,82$, $I_{rβ} \approx 0$ (обрыв имитирован именно в этой фазе), $I_{rγ} = 0,7$.



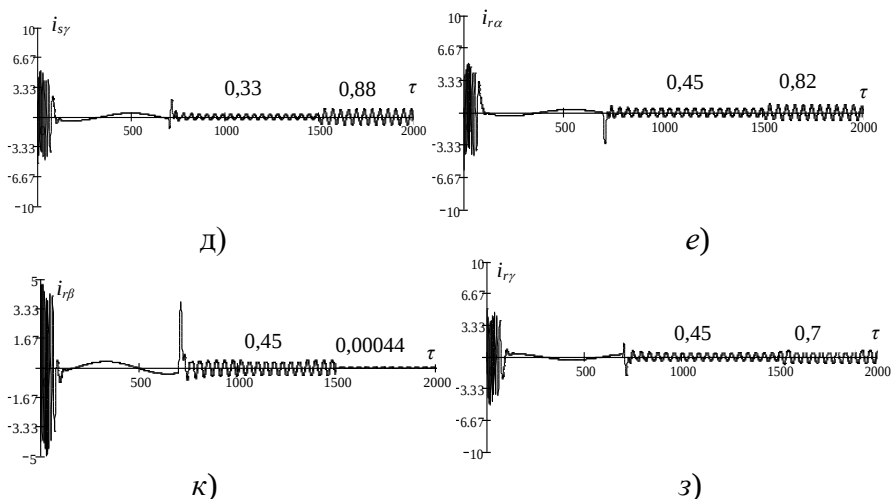


Рисунок 2. Флуктограммы изменения режимных параметров асинхронной машины двойного питания, полученные на трехкоординатной математической модели при управлении со стороны ротора $k_{ur}=k_{fr}=-0,15$

Во второй главе приведен разработанный метод моделирования частотно-управляемых синхронных машин как с электромагнитным возбуждением, так и с постоянными магнитами, причем последние находят все более широкое применение в ветроэнергетике¹⁵.

При выводе уравнений частотно-управляемой синхронной машины с постоянными магнитами за основу приняты хорошо известные и апробированные уравнения Парка-Горева. При этом уравнения, записываются относительно производных потокоосцеплений и контролируемых токов как функций от самих потокоосцеплений и этих токов. Для трансформации этих уравнений в уравнения синхронных машин с постоянными магнитами необходимо и, естественно, приравнять нулю

¹⁵ Heng, T. Y., Ding, T. J., Chang, C. C. W., et al. Permanent Magnet Synchronous generator design optimization for wind energy conversion system: A review // Energy Reports. – 2022. Vol. 8, Sup. 16, – p. 277-282.

производную потокосцепления обмотки возбуждения $p\Psi_{df}=0$, тогда из уравнения баланса напряжения ток в обмотке возбуждения предстанет в виде:

$$i_{df} = \frac{U_{df}^*}{x_{ad}} \quad (9)$$

Подставляя значения этого тока в остальные уравнения машины и исключая уравнение для i_{df} , связывающего его значения с потокосцеплениями, получим уравнения синхронной машины с постоянными магнитами. Но в новых уравнениях напряжение U_{df}^* необходимо трактовать не как напряжение возбуждения, а как энергию магнита, отнесенную к единице его объёма, или при малых значениях остаточной индукции как коэрцитивную силу магнита, (далее оно обозначается символом M_f). Например, за $U_{df}^*=1$ необходимо принимать такое значение энергии магнита, которое способно при холостом ходе генератора обеспечить величину э.д.с. на его зажимах равное $e_{xx}=1$ ^{16,17}.

Кроме того, так как речь идет о частотно-управляемых синхронных машинах, необходимо так адаптировать уравнения Парка-Горева, чтобы они отражали изменение как амплитуды, так и частоты на зажимах синхронного генератора ветроэлектрической установки.

Обратимся к диаграмме рисунка 3. Здесь α_0, β_0 – неподвижные в пространстве оси координат; α_s, β_s – синхронно вращающиеся оси с угловой частотой, соответствующей частоте тока на выходе преобразователя частоты; d, q – координатные оси, вращающиеся со скоростью ротора ω_r ; $\alpha_s = \omega_s \cdot \tau$ – угол между осями α_s, β_s и α_0, β_0 ; угол между осями d, q и неподвижными осями α_0, β_0 равен $\alpha = \omega_r \cdot \tau$ и, наконец, θ – угол между осями d, q и осями α_s, β_s .

Из диаграммы имеем:

¹⁶ Иванов, П. А., Смирнов, В. Л. Исследование характеристик синхронных машин с постоянными магнитами в ветроэнергетике. – Москва: Энергия, – 2015. – 220 с.

¹⁷ Gajewski, P., Pienkowski, K. Analysis of sliding mode control of variable speed wind turbine system with PMSG // In 2017 International Symposium on Electrical Machines (SME), – 2017, – p. 1-6.

$$\theta = \alpha + \alpha_s = \omega_r \cdot \tau + \omega_s \cdot \tau \quad (10)$$

где $\tau = \omega_{\delta a z} \cdot t = 314 \cdot t$ – синхронное время в [радианах], t – время в [секундах].

Если расположить вектор напряжения U_s в начальном (исходном) режиме под углом в 45° к осям α_s, β_s , то его проекции на эти оси, будут одинаковыми и равными $U_{s\alpha_0} = U_{s\beta_0} = 0,707 \cdot U_s$ (при $U_s=1$).

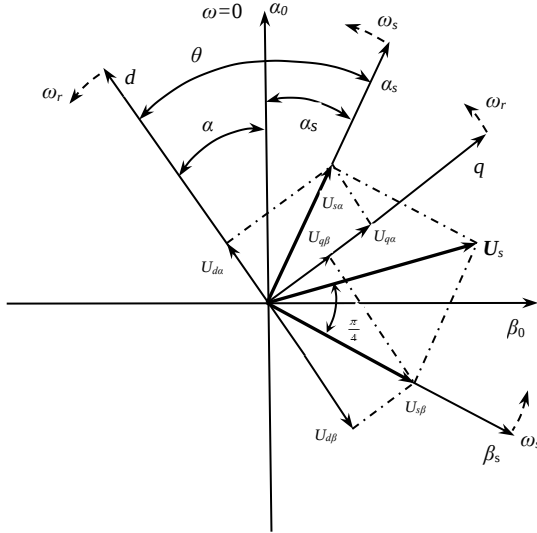


Рисунок 3. Диаграмма расположения координатных осей машин переменного тока

При проектировании этих проекций на оси d, q будет иметь:

$$\left. \begin{aligned} U_{d\alpha} &= U_{s\alpha} \cdot \cos \theta = U_{s\alpha} \cdot \cos(\alpha + \omega_s \cdot \tau) \\ U_{q\alpha} &= U_{s\alpha} \cdot \sin \theta = U_{s\alpha} \cdot \sin(\alpha + \omega_s \cdot \tau) \\ U_{d\beta} &= U_{s\beta} \cdot \sin \theta = U_{s\beta} \cdot \sin(\alpha + \omega_s \cdot \tau) \\ U_{q\beta} &= U_{s\beta} \cdot \cos \theta = U_{s\beta} \cdot \cos(\alpha + \omega_s \cdot \tau) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Общие проекции этих векторов на оси d, q равны:

$$\left. \begin{aligned} U_{ds} &= U_{d\alpha} - U_{d\beta} \\ U_{qs} &= U_{q\alpha} + U_{q\beta} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Имея в виду, что $k_{us} = \frac{U_s}{U_{s0}}$ и $k_{fs} = \frac{\omega_s}{\omega_{s0}}$, где в относительных

единицах $U_{s0}=1$ получим:

$$\begin{aligned} U_{ds} &= 0,707 \cdot k_{us} \left[\cos(\alpha + k_{fs} \cdot \tau) - \sin(\alpha + k_{fs} \cdot \tau) \right] \\ U_{qs} &= 0,707 \cdot k_{us} \left[\sin(\alpha + k_{fs} \cdot \tau) + \cos(\alpha + k_{fs} \cdot \tau) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

И наконец, путем тривиальных преобразований можно получить:

$$\begin{aligned} U_{ds} &= 0,707 \cdot k_{us} \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) - \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) \right] \\ U_{qs} &= 0,707 \cdot k_{us} \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) + \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, цифровая модель синхронного генератора ветроэлектрической установки с постоянными магнитами предстанет в виде:

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_{ds} &= U_{sd} - \omega_r \cdot \Psi_{qs} - r_s \cdot i_{ds} \\ p\Psi_{qs} &= U_{sq} + \omega_r \cdot \Psi_{ds} - r_s \cdot i_{qs} \\ p\Psi_{dr} &= -\frac{r_{dr}}{x_{dr}} \cdot \Psi_{dr} + \frac{r_{dr} \cdot x_{ad}}{x_{dr}} \cdot i_{ds} + \frac{r_{dr}}{x_{dr}} \cdot M_f^* \\ p\Psi_{qr} &= -\frac{r_{qr}}{x_{qr}} \cdot \Psi_{qr} + \frac{r_{qr} \cdot x_{aq}}{x_{qr}} \cdot i_{qs} \\ p\omega_r &= \frac{1}{T_j} \cdot m_{вд} - \frac{1}{T_j} \cdot m_{эм} \\ p\alpha &= \omega_r \\ m_{эм} &= \Psi_{ds} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{ds} \\ i_{ds} &= \frac{x_{dr}}{\Delta d} \cdot \Psi_{ds} - \frac{x_{dr} - x_{ad}}{\Delta d} \cdot M_f^* - \frac{x_{ad}}{\Delta d} \cdot \Psi_{dr} \\ i_{qs} &= \frac{x_{qr}}{\Delta q} \cdot \Psi_{qs} - \frac{x_{aq}}{\Delta q} \cdot \Psi_{qr} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где M_f – энергия магнита, отнесенная к единице его объёма (при малых значениях остаточной индукции – коэрцитивная сила магнитов); $\Delta d = x_{ds} \cdot x_{dr} - x_{ad}^2$, $\Delta q = x_{qs} \cdot x_{qr} - x_{aq}^2$.

К уравнению (15) необходимо добавить уравнения для активной и реактивной мощностей ветроэлектрической установки, которых представляются в виде:

$$\begin{aligned} p &= U_{ds} \cdot i_{ds} + U_{qs} \cdot i_{qs} \\ q &= U_{qs} \cdot i_{ds} - U_{ds} \cdot i_{qs} \end{aligned} \quad (16)$$

На указанной модели были исследованы режимы работы генератора с постоянными магнитами $P_n=1500$ кВт ветроустановки типа «Vensys 77»¹⁸. При этом расчетная скорость ветра равна 13 м/с, начальная скорость ветра 3 м/с и максимальная допустимая скорость – 22 м/с. Диапазон регулирования частоты вращения ветроколеса 9 – 17,3 об/мин., т.е. почти 1:2. Исследования проводились в предположении, что $M_{df}=1,2=const$, движущий момент ветродвигателя определяется выражением:

$$m_{вд} = k_m \cdot \omega_r^2 \quad (17)$$

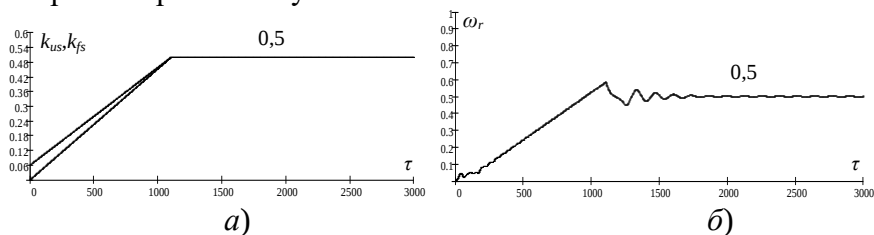
Необходимо отметить, что это выражение "работает" только в диапазоне регулирования частоты вращения. В установившемся режиме в этом диапазоне было проведено исследование при 3-х способах управления: а) управлении при равенстве коэффициентов изменения амплитуды и частоты напряжения, подводимого к статорной обмотке генератора, т.е. $k_{us}=k_{fs}$; б) управление на постоянство выдачи реактивной мощности; в) управление на постоянство коэффициента мощности $\cos\varphi\approx 1$. Результаты отражены ниже:

а) Управление при $k_u=k_f$						
$k_u=k_f$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
m	-0,150	-0,215	-0,296	-0,389	-0,486	-0,598
p	-0,074	-0,128	-0,205	-0,304	-0,435	-0,596
q	-0,137	-0,158	-0,175	-0,180	-0,177	-0,155
i_{ds}	-0,200	-0,200	-0,210	-0,220	-0,234	-0,257
i_{qs}	-0,136	-0,197	-0,265	-0,346	-0,441	-0,543
б) Регулирование на постоянство выдачи реактивной мощности $q=const$						
k_f	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
k_u	0,484	0,592	0,698	0,799	0,899	0,991
q	-0,179	-0,180	-0,180	-0,181	-0,180	-0,179
i_{ds}	-0,270	-0,232	-0,216	-0,217	-0,237	-0,257
в) Регулирование на постоянство коэффициента мощности $\cos\varphi\approx 1$						
k_f	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
k_u	0,545	0,650	0,758	0,860	0,960	1,055
q	-0,0017	-0,0017	-0,00173	-0,0017	-0,0018	-0,0017
i_{ds}	-0,01	-0,0187	-0,033	-0,055	-0,089	-0,137

¹⁸ Windenergie 2006. BWE – Service GmbH. – 2006.

Из анализа этих данных видно, что момент, который пропорционален квадрату частоты вращения ω_r , для всех случаев управления определяется частотой тока сети и при изменении частоты k_{fs} от 0,5 до 1, он меняется от $-0,15$ до $-0,6$. Этому моменту соответствует активная мощность p , которая также меняется от $-0,074$ до $-0,6$ и активный ток i_{qs} , диапазон изменения которого от $-0,136$ до $-0,543$. Эти величины для всех режимов одинаковы. Интересно отметить, что в диапазоне изменения частоты от 0,65 до 0,9 при регулировании по закону $k_{us}=k_{fs}$ и на постоянство выдачи реактивной мощности $q=const$ значения параметров незначительно отличаются друг от друга.

Представляет интерес исследование режима частотного пуска синхронного генератора ветроэлектрической установки с постоянными магнитами, флюктограмма которого представлена на рисунке 4. Пуск осуществляется при наличии движущего момента на валу генератора равного $m_{вт}=-0,15$, что соответствует начальной скорости ветра $V_{нач.}=4,5$ м/с. Амплитуда напряжения и частота тока статора меняются по линейному закону, при этом $k_{us}=f(\tau)$ в начале разгона несколько опережает $k_{fs}=f(\tau)$ с целью выборки "мертвой зоны" для $\omega_r=f(\tau)$. Процесс втягивания в синхронизм заканчивается на 2000-м радиане. Время выхода амплитуды и частоты на установившейся режим ($k_{us}=k_{fs}=1$) составляет 1100 радиан (3,5 секунд). Размах электромагнитного момента $m_{эм}$ не превышает 2-х кратного значения, хотя его средняя величина в процессе разгона равна $m_{эср}=0,5$. Амплитуды токов i_{ds} и i_{qs} , а также значений реактивной и активной мощностей q и p не превышают 2-х кратных значений. Все это подтверждает высокую эффективность применения синхронного генератора ветроэлектрической установки с постоянными магнитами.



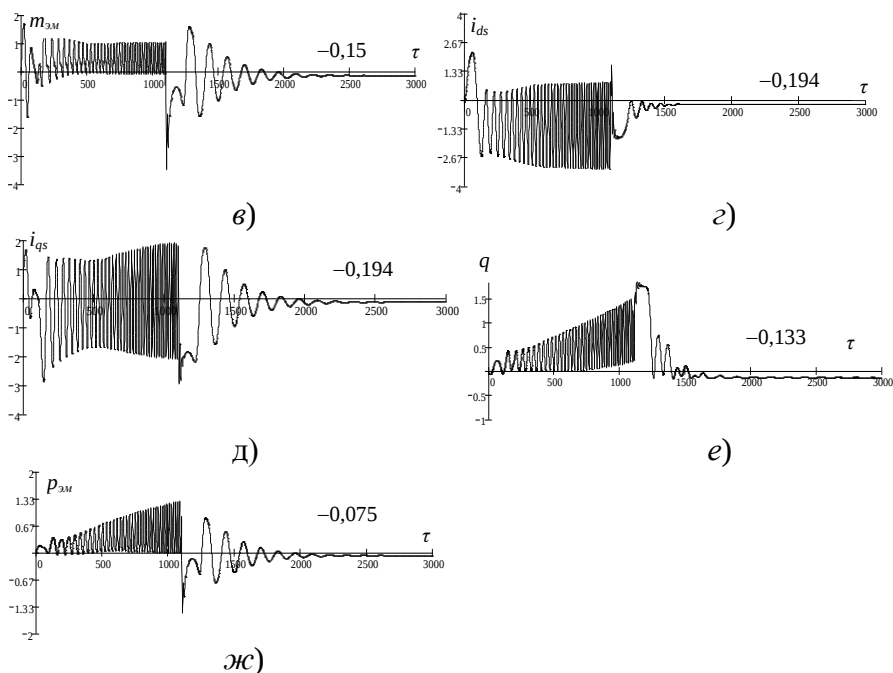


Рисунок 4. Флуктограммы изменения режимных параметров синхронного генератора с постоянными магнитами ветроэлектрической установки при частотном пуске

Проведен также сравнительный анализ регулировочных свойств синхронного генератора ветроэлектрической установки с электромагнитным возбуждением и синхронных генераторов ветроэлектрических установок с постоянными магнитами.

Сопоставляя законы регулирования на постоянство выдачи реактивной мощности $q = \text{const}$ и на постоянство коэффициента мощности $\cos\varphi \approx 1$ синхронных генераторов ветроэлектрической установки с электромагнитным возбуждением и с постоянными магнитами можно констатировать следующее:

- для синхронного генератора с электромагнитным возбуждением, а диапазоне изменения частоты тока статора k_{fs} от 0,5 до 1 ($k_{us} = k_{fs}$) для обеспечения $\cos\varphi \approx 1$ необходимо практически линейно изменить напряжение возбуждения в функции от изменения частоты тока статора. При реализации другого закона

– сохранения постоянства выдачи реактивной мощности $q=\text{const}$ регулируемая функция $q=f(k_{fs})$ существенно нелинейная.

– для синхронного генератора ветроэлектрической установки с постоянными магнитами в том же диапазоне изменения частоты тока статора для обеспечения $\cos\varphi\approx 1$ необходимо с незначительной крутизной в области низких частот практически линейно регулировать амплитуду напряжения преобразователя частоты, питающего статорную обмотку генератора, в функции от изменения частоты. При реализации закона регулирования на $q=\text{const}$ вид кривой сохраняется таким же как при регулировании на $\cos\varphi\approx 1$, только кривая располагается выше. То есть обе кривые сохраняют конгруэнтность.

При исследовании динамики синхронного генератора ветроэлектрической установки с постоянными магнитами представляет интерес определение влияния маховых масс (инерционной постоянной T_j) системы на характер процесса, так как используется редукторные и безредукторные (так называемые Ringgenerator) ветроэлектрические установки с указанными электромеханическими преобразователями. Помимо этого, создается возможность исследовать влияние величины магнитной энергии магнита на переходные процессы. Это особенно важно для проектирования синхронных генераторов ветроэлектрической установки с постоянными магнитами для работы в различных регионах, характеризующихся ветроэнергетическим потенциалом при значительных порывах скоростей ветра.

При исследовании динамики были проведены исследования с идеализированной моделью скачкообразного изменения скоростей ветра¹⁹ (в теории автоматического управления указанное изменения возмущающего воздействия является типовым), также предложенном нами ранее трапецидальной формы изменения скорости ветра в динамике, синтезированной

¹⁹ Андрианов, В.Н. Ветроэлектрические станции / В.Н. Андрианов, Д.Н.Быстрицкий, К.П.Вашкевич и др. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, – 1960. – 319 с.

на базе полученных реальных флюктограмм изменения скорости ветра в Абшеронском регионе республики²⁰.

На флюктограммах рисунка 5, а отображены изменения режимных параметров генератора, с постоянными магнитами, имитирующего работу ВЭУ типа "GE Energy"²¹ при исходных данных $T_f \approx 1$ секунде (333,3 радиан) и энергии магнитов $M_f = 1,8$, что соответствует опережающему значению $\cos \varphi = 0,8$ ($\operatorname{tg} \varphi = 0,75$).

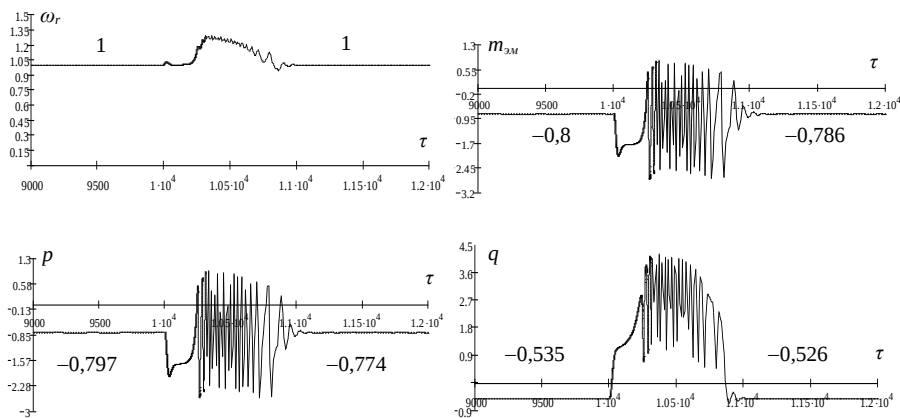


Рисунок 5, а. Флюктограммы параметров переходного процесса модельного синхронного генератора ветроэлектрической установки, моделирующего систему типа «GE Energy»

Моделируется режим наброса приблизительно двухкратного значения движущего момента ветродвигателя, то есть на 10000 радиане движущий момент с величины $m_{вд} = -0,8$ (номинальное значение) скачком увеличивается до значения $m_{вд} = -1,75$. Это соответствует порыву ветра, скорость которого с $V_{рас} = 13$ м/с

²⁰ Гасанова, Л.Г. Моделирование и исследование режимов работы системных ветроэлектрических установок с асинхронными генераторами при частотном управлении: / Диссертация на соискания ученой степени кандидата технических наук. / – Баку, – 2008. – 159 с.

²¹ GE Renewable Energy. [Electronic resource] / A challenge—and an opportunity. Ready for tomorrow. – 2020. / URL: www.ge.com/renewableenergy/wind-energy

резко изменяется до $V_{\max}=19$ м/с при этом продолжительность порыва равна 1 секунде (314 радиан). Из анализа флюктограммы можно сделать вывод, что система динамически устойчива, хотя колебания по частоте и амплитуде достигают значительных величин ($q_{\max}=3,5$). Необходимо также отметить тот факт, что при значении наброса момента $>1,75$ генератор выходит из синхронизма.

На рисунке 5, б представлены флюктограммы изменения режимных параметров, когда значительно увеличена инерционная постоянная вращающихся частей ветроэлектрической установки, которая равна $T_j=5$ секундам, что в какой-то степени имитирует работу безредукторной ветроэлектрической установки, с соответствующими генераторами с постоянными магнитами. Флюктограммы показывают, что в этом случае значительно уменьшаются максимальные значения режимных параметров, так, например, $q_{\max} \approx 1$ и частоты их колебаний. Практически нет колебания в кривой частоте вращения ω_r .

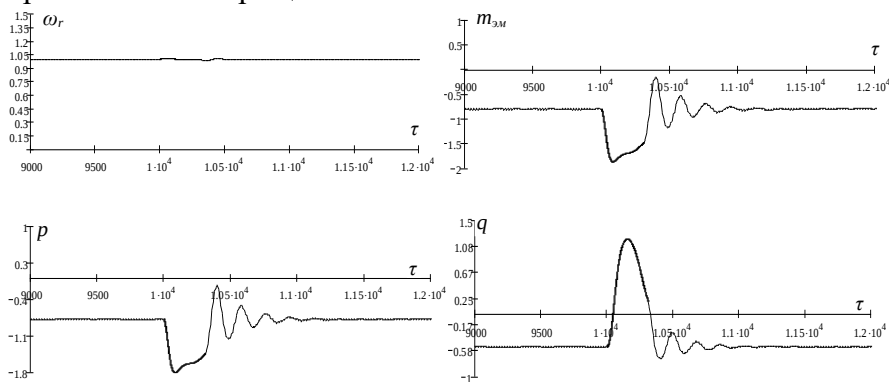


Рисунок 5. б. Флюктограммы изменения режимных параметров синхронного генератора с постоянными магнитами ветроэлектрической установки

При исследовании влияния магнитной энергии постоянных магнитов генератора на его динамические характеристики выявлено, что чем больше величина M_f , тем более устойчивее машина к изменению возмущающих воздействий. Так, при

$M_f=1,62$, что соответствует $\cos\varphi=0,9$ (опережает), то при величине маховых масс, соответствующих $T_j\approx 1$ секунде генератор выходит из синхронизма уже при $m_{вд}=-1,65$, а при значительных маховых массах ($T_j\approx 5$ секунд) машина переходит в асинхронный режим при $m_{вд}=-1,6$. Еще более это становится заметным, при случае если машина спроектирована на $\cos\varphi=1$ (чему соответствует $M_f=1,3$). Здесь при $m_{вд}=-1,3$ и $T_j\approx 5$ секундам генератор переходит в асинхронный режим, а при $T_j\approx 1$ секунде он выходит из синхронизма при $m_{вд}=-1,45$, что соответствует скорости ветра равной $V_{\max}=17,5$ м/с. Это обстоятельство указывает на тот факт, что усиление электромагнитной связи между статорными и роторными контурами синхронного генератора ветроэлектрической установки благоприятно сказывается (т.е. повышает) на его динамической устойчивости.

Известно, что воздух имеет массовую плотность, которая не может изменяться скачком, поэтому наиболее адекватным отображением динамики изменения скорости ветра является трапецеидальная форма представления порывов ветра. При таком представлении порывов ветра исследовании показали, что на устойчивости влияют как скорость нарастания ветра как на возрастающей, так и на ниспадающей ветвях трапеции. Выявлена одна особенность при этих исследованиях. Так, например, если до порыва ветра синхронная машина ветроэлектрической установки работала при частоте вращения $\omega_r=0,7$ (при этом $m_{вд}=-0,5$), а затем в течении $t=0,5$ секунд скорость ветра увеличилась (чему соответствует увеличение движущего момента ветродвигателя от $m_{вд}=-0,5$ до $m_{вд}=-1,7$), и потом в течении $\Delta t=1$ секунды остается неизменной, далее в течении 0,5 секунд линейно уменьшается до значения $m_{кон}=-0,5$ (т.е. возвращается к исходному значению), то генератор ветроэлектрической установки с $T_j=5$ секундам остается в синхронизме. Однако, при попытке увеличения момента после ниспадающей ветви трапеции до $m_{кон}=-0,8$ машина выходит из синхронизма. Таким образом, устойчивость зависит не только скоростей нарастания и спадания скоростей ветра и его

максимального значения, но и на значении установившейся скорости ветра после порыва ветра.

Для повышения динамической устойчивости синхронного генератора ветроэлектрической установки с постоянными магнитами имеется два канала управления, которые в той или иной степени могут повлиять на характер переходных процессов. Это регулирование угла поворота лопастей ветродвигателя и регулирование частоты тока статора генератора при помощи преобразователя частоты, подключенного к его статорной обмотке. Когда порывы ветра длятся 1–2 секунды регулирование мощности путем изменения угла поворота лопастей ветродвигателя приводит к незначительному эффекту, так как постоянная времени указанного канала регулирования для подавляющего большинства системных ветроэлектрических установок довольно значительна. Поэтому единственным каналом управления в динамике остается регулирование частоты тока статора генератора с помощью преобразователя частоты синхронных генераторов ветроэлектрических установок с постоянными магнитами, коэрцитивная сила которых равна $M_f=1,8$ (что соответствует $\cos\varphi=0,8$ опережает) и $T_f\approx 5$ секундам, при работе на номинальной нагрузке был подвержен порыву ветра равному $V_{\text{пор.}}=21$ м/с (чему соответствует $m_{\text{вд}}=-2,1$) время порыва равно $\Delta t_{\text{пор.}}=1$ секунде (314 радиан). Через полсекунды после начала порыва начался процесс регулирования частоты тока статора, которая снизилась с величины $k_{fs}=1$ до значения $k_{fs}=0,8$ (соответственно этому снизилась и частота вращения ротора генератора с $\omega_r=1$ до $\omega_r=0,8$). После определенного времени частота тока статора была восстановлена до исходного значения $k_{fs}=1$. Такое регулирование (снижение) частоты тока статора позволило синхронной машине остаться в синхронизме. Многочисленные флюктограммы этого режима позволили выявить, что есть предел снижения частоты тока статора, при котором машина остается устойчивой (или ресинхронизируется). Например, если частота k_{fs} уменьшать до значения $k_{fs}=0,95$ или $k_{fs}=0,9$ машина не ресинхронизируется, только при $k_{fs}=0,8$ и ниже синхронный режим восстанавливается. Помимо этого,

необходимо определенное время после окончания порыва ветра и возврата его в исходное состояние, чтобы регулирующий параметр (частота тока статора k_{fs}) был восстановлен до значения исходного режима (т.е. до $k_{fs}=1$).

Следующий важный вопрос – это демпфирование колебаний роторов частотно-управляемых синхронных машин ветроэлектрических установок с постоянными магнитами. Для демпфирования колебаний в диссертации использовано управление, основанное на принципе максимума Понтрягина^{22,23}. В качестве управляющих параметров исследуемой системы выбраны амплитуда k_{us} и частота k_{fs} подводимого к статорной обмотке напряжения. Напомним, что для перевода фазовых координат системы из одного произвольного состояния в другое, допустимое управление сначала за определенное время должно «разгонять» (либо "тормозить") движение системы, а затем в следующий промежуток времени «тормозить» (либо "разгонять") ее. Таким образом, при выборе в качестве управляющих координат $k_{us}=k_{fs}$ и из технических соображений ограничив их диапазон изменения 10-тью процентами, получим, что в процессе управления они могут изменяться на величину $\Delta k_{us}=\Delta k_{fs}=\pm 0,1$ (при номинальных значениях $k_{us}=k_{fs}=1$). На рисунке 6 изображены флюктограммы изменения электромагнитного момента $m_{эм}$ (рисунок 6, а) при его сбросе и набросе. На рисунке 6 (б) представлена флюктограмма изменения внутреннего угла синхронной машины θ без управления, т.е. при постоянных значениях $k_{us}=k_{fs}=1$. На 8000 радиане момент сбрасывается от величины $m_{вд}=-0,8$ до $m_{вд}=0$. При этом угол после колебаний устанавливается на $\theta \approx 0$, причем максимальный вылет угла составляет 65%, такая же картина наблюдается и при повторном набросе нагрузки.

²² Соколов, М.М. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов, Л.П. Петров, Л.В. Масандилов [и др.] – Москва: Энергия, – 1967. – 201 с.

²³ Петров, Ю.П. Использование «принципа максимума» для нахождения оптимального закона регулирования синхронных машин // – Москва: Электричество, – 1964. №10, – с. 45-48.

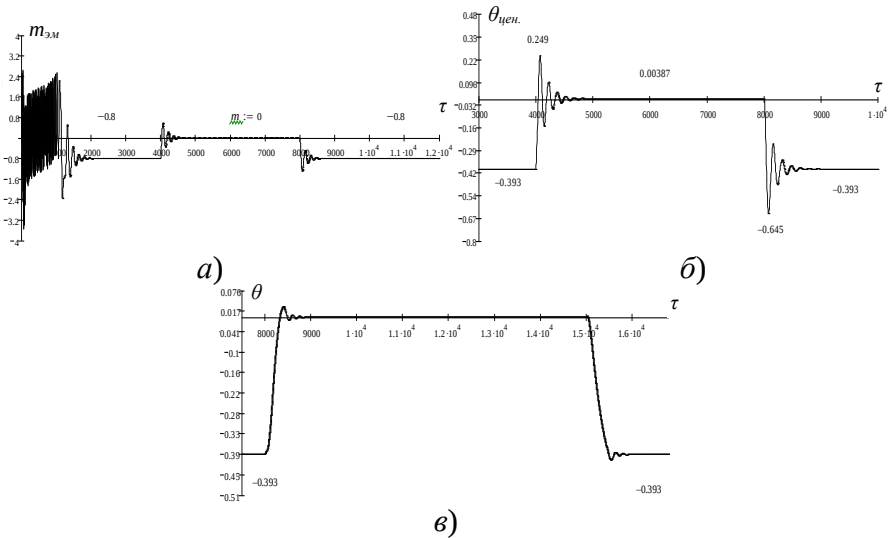


Рисунок 6. Демпфирование колебаний при сбросе и набросе движущего момента ветроэлектрической установки с управлением на базе принципа Понтрягина

На рисунке 6 (в) представлена флюктограмма изменения угла θ при управлении в соответствии с принципом максимума Понтрягина. При сбросе момента на 8000 радиане одновременно регулируются скачком $k_{us}=k_{fs}$ до значения $k_{us}=k_{fs}=0,9$ (т.е. к исходному значению $k_{us}=k_{fs}=1$ прибавляется $\Delta k_{us}=\Delta k_{fs}=-0,1$) действие $k_{us}=k_{fs}=0,9$ продолжается с 8000 радиан до 8150 радиан (т.е. $\Delta\tau=150$ радиан). Далее в соответствии с принципом Понтрягина $\Delta k_{us}=\Delta k_{fs}$ меняют свои знаки и становится равным $\Delta k_{us}=\Delta k_{fs}=+0,1$ (т.е. $k_{us}=k_{fs}$ становится равным $k_{us}=k_{fs}=1,1$). Действие $k_{us}=k_{fs}=1,1$ длится с 8150 радиан до 8450 радиан после которого восстанавливается исходный режим $k_{us}=k_{fs}=1$. С 8450 радиан до 15000 радиан генератор работает без нагрузки $m_{эм}=0$. На 15000 радиане моделируется режим наброса нагрузки от нуля до $m_{вд}=-0,8$. При этом вступает в действие регулятор и воспроизводится значение; время действия которого 150 радиан, т.е. с 15000 радиан до 15150 радиан, а с $\tau=15150$ радиан до $\tau=15450$ радиан $k_{us}=k_{fs}$ скачком устанавливается до значений

$k_{us}=k_{fs}=0,9$ (т.е. $\Delta k_{us}=\Delta k_{fs}=-0,1$). Далее с 15450 радиан восстанавливается значение $k_{us}=k_{fs}=1$.

Как видно из рисунка 6, в при оптимальном управлении, осуществленном на базе принципа максимума Понтрягина, колебательный переходной процесс практически сводится к апериодическому с максимальным вылетом угла равным всего 5% от установившегося.

Разработана методика моделирования высших гармонических напряжения в статорной цепи синхронного генератора ветроэлектрической установки, питающая от преобразователя частоты²⁴. Сущность методики заключается в представлении составляющих статорного напряжения с учетом высших гармонических составляющих в виде:

$$\left. \begin{aligned} U_{ds} &= A_{11} \cdot (\cos\alpha - \sin\alpha) - A_{12} \cdot (\cos\alpha + \sin\alpha) \\ U_{qs} &= A_{11} \cdot (\cos\alpha + \sin\alpha) + A_{12} \cdot (\cos\alpha - \sin\alpha) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= 0,707 \cdot k_{us} (0,9 \cdot \cos(k_{fs} \cdot \tau) - 0,035 \cdot \cos(8 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + 0,15 \cdot \cos(10 \cdot k_{fs} \cdot \tau) - \\ &- 0,125 \cdot \cos(11 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + 0,125 \cdot \cos(13 \cdot k_{fs} \cdot \tau) - 0,15 \cdot \cos(14 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + \\ &+ 0,035 \cdot \cos(16 \cdot k_{fs} \cdot \tau)) \\ A_{12} &= 0,707 \cdot k_{us} (0,9 \cdot \sin(k_{fs} \cdot \tau) - 0,035 \cdot \sin(8 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + 0,15 \cdot \sin(10 \cdot k_{fs} \cdot \tau) - \\ &- 0,125 \cdot \sin(11 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + 0,125 \cdot \sin(13 \cdot k_{fs} \cdot \tau) - 0,15 \cdot \sin(14 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + \\ &+ 0,035 \cdot \sin(16 \cdot k_{fs} \cdot \tau)) \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, в выражениях (18) кривой напряжения учтены 8-ая, 10-ая, 11-ая, 13-ая, 14-ая и 16-ая гармонические составляющие. Указанная методика позволяет проанализировать влияние каждой из гармоник на режимные параметры генератора и при необходимости скорректировать параметры фильтра.

В заключение главы предложена имитационная математическая модель системы «ветер – ветродвигатель – электромеханический преобразователь (синхронный генератор) ветроэлектрическая установка – электрическая сеть». Она

²⁴ Vargas, U., Ramirez, A. Extended harmonic domain model of a wind turbine generator for harmonic transient analysis // IEEE Trans. Power Del., – 2016. Vol. 31, No. 3, – p. 1360-1368.

позволяет воспроизвести конкретные режимы работы ветроэлектрической установки в зависимости от реальных значений скоростей ветра характерных для исследуемого региона; характеристик вращающего момента ветродвигателя для каждого из диапазона изменения скоростей ветра; и математическая модель состояния электромеханических преобразователей ветроэлектрических установок (в данном случае синхронного генератора с постоянными магнитами).

В третьей главе рассматриваются вопросы моделирования и регулирования режимным параметров асинхронных машин двойного питания ветроэлектрических установках^{25,26}, работающей на электрическую сеть. Приведены уравнения частотно-управляемых машин двойного питания, с учетом разработанной универсальной структуры частотно-управляемых электрических машин переменного тока. Необходимо отметить, что эти уравнения позволяют при необходимости осуществить частотное управление этих машин, как со стороны ротора, так и со стороны статора. Причем представленные уравнения записаны в осях d , q , вращающихся со скоростью ротора ω_r , т.е. они записаны в форме уравнений Парка–Горева для синхронных машин. Поэтому, целесообразно, по аналогии с синхронными машинами, упростить уравнения асинхронных машин двойного питания путем пренебрежения в статорных контурах э.д.с. скольжения и трансформаторных э.д.с., а также активным сопротивлением статорной обмотки асинхронной машины двойного питания и естественно, оценить принятые допущения. После тривиальных преобразований упрощенные уравнения асинхронной машины двойного питания предстанут в виде:

²⁵ Amine, B. B. M. E., Ahmed, A., Houari, M.B., Mouloud, D. Modeling, simulation and control of a doubly fed induction generator for wind energy conversion systems // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), – 2020, Vol.11, No.3, – p. 1197–1210.

²⁶ Соколов, А. И., Климов, Ю. П. Алгоритмы управления асинхронными машинами двойного питания в ветроустановках // – Москва: Научный центр "Энергия и технологии", – 2021. – 205 с.

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_{dr} &= U_{dr} - r_r(k_r \cdot \Psi_{dr} + k_m \cdot U_s \cdot \cos\theta) \\ p\Psi_{qr} &= U_{qr} - r_r(k_r \cdot \Psi_{qr} + k_m \cdot U_s \cdot \sin\theta) \\ p_s &= \frac{1}{T_j} \cdot m_{вд} - \frac{1}{T_j} k_m \cdot U_s (\Psi_{dr} \cdot \sin\theta - \Psi_{qr} \cdot \cos\theta) \\ p\theta &= s \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где $k_r = \frac{x_s}{x_s \cdot x_r - x_m^2}$; $k_m = \frac{x_m}{x_s \cdot x_r - x_m^2}$; $U_{dr} = -U_s \cdot k_{ur} \cdot \sin(k_{fr} \cdot \tau)$;

$U_{qr} = U_s \cdot k_{ur} \cdot \cos(k_{fr} \cdot \tau)$.

Таким образом, полная система уравнений, имеющая 6-ой порядок в результате упрощений и преобразований приведена к уравнениям 4-ого порядка. При оценке погрешностей от этих упрощений выявлено, что установившиеся значения режимных параметров разнятся в диапазоне 0–7%, что вполне приемлемо для инженерных расчетов. Динамические составляющие режимных параметров при скачкообразном изменении управляющих координат машин (k_{us} и k_{fs}) в первом качании могут по амплитуде значительно разниться друг от друга, но время переходного процесса и число качаний практически совпадают. Эти же составляющие при скачкообразном изменении внешних возмущающих воздействий по амплитуде и числу качаний незначительно отличаются друг от друга.

При исследовании влияния сетевого напряжения в месте подключения ветроэлектрической установки с асинхронной машиной двойного питания к электрической сети²⁷, выявлено, что при снижении значения сетевого напряжения до $U_s \leq 0,85$ при номинальной нагрузке ветроэлектрической установки для сохранения устойчивости необходимо уменьшить величину вращающего момента ветродвигателя при помощи регулирования угла поворота лопастей ветродвигателя. При малой нагрузке ветроэлектрической установки устойчивость

²⁷ Ибрагим, А. и др. Влияние резкого снижения напряжения на асинхронную машину двойного питания в системе генерации ветроэнергетической установки // Известия НТЦ Единой Энергетической Системы. –2019. 1(80), – с. 122-131.

можно сохранить путем отдельного регулирования в сторону увеличения амплитуды напряжения, питающего роторную обмотку асинхронной машины двойного питания всего на 5% (например, с $k_{ur}=0,22$ до $k_{ur}=0,23$).

Далее представлена методика исследования влияния высших гармонических напряжений преобразователя частоты асинхронной машины двойного питания ветроэлектрической установки. Преобразователи частоты для ветроэлектрической установки выполняются на базе силовых IGBT – транзисторов или на полностью управляемых GTO – тиристорах с широтно-импульсной модуляцией управлением. Гармонический состав выходного напряжения инвертора с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией при работе его на активно-индуктивную нагрузку представляет собой зависимость амплитуд гармонических составляющих выходного напряжения от величины коэффициента модуляции для различных гармоник при определенных значениях отношений несущей частоты к частоте модуляций²⁸. При двухполярной модуляции и отношения несущей частоты к частоте модуляции равной $\varepsilon=12$, в кривой выходного напряжения будет присутствовать 8-ая, 10-ая, 11-ая, 13-ая, 14-ая и 16-ая гармоники. То есть, напряжения на роторных контурах будет выглядеть следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U'_{dr} &= -U_s \cdot k_{ur} (0,9 \cdot \sin(k_{fr} \cdot \tau) - 0,035 \cdot \sin(8 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + 0,15 \cdot \sin(10 \cdot k_{fr} \cdot \tau) - \\ &\quad - 0,125 \cdot \sin(11 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + 0,125 \cdot \sin(13 \cdot k_{fr} \cdot \tau) - 0,15 \cdot \sin(14 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + \\ &\quad + 0,035 \cdot \sin(16 \cdot k_{fr} \cdot \tau)) \\ U'_{qr} &= U_s \cdot k_{ur} (0,9 \cdot \cos(k_{fr} \cdot \tau) - 0,035 \cdot \cos(8 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + 0,15 \cdot \cos(10 \cdot k_{fr} \cdot \tau) - \\ &\quad - 0,125 \cdot \cos(11 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + 0,125 \cdot \cos(13 \cdot k_{fr} \cdot \tau) - 0,15 \cdot \cos(14 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + \\ &\quad + 0,035 \cdot \cos(16 \cdot k_{fr} \cdot \tau)) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

На рисунке 7 приведены флюктограммы изменения соответствующего статорного тока i_d асинхронной машины двойного питания ветроэлектрической установки с учетом

²⁸ Garcia, H., Segundo, J., Rodriguez-Hernandez, et al. Harmonic modelling of the wind turbine induction generator for dynamic analysis of power quality // Energies, – 2018, Vol. 11, No. 1, – p. 104.

моделирования всех гармонических составляющих (рисунок 7, а), и при фильтрации высших гармоник начиная с 11-ой (рисунок 7, б). Как видно из сопоставления кривых, после фильтрации форма тока несколько приближается к синусоидальной.

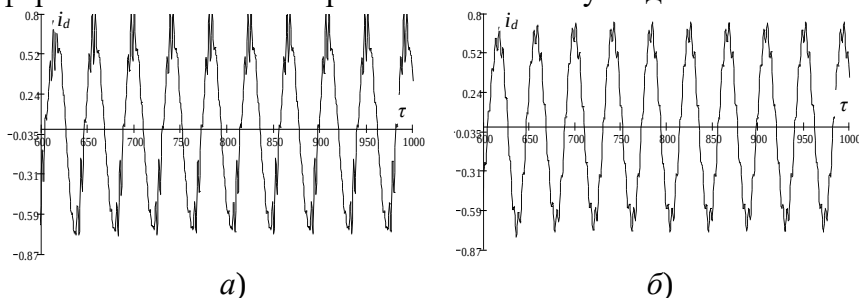


Рисунок 7. Флуктограммы изменения статорного тока i_d асинхронной машины двойного питания с учетом всех гармонических составляющих (а), после фильтрации высших гармоник, начиная с 11-ой (б)

В следующем разделе проведен сопоставительный анализ различных законов изменения напряжения на зажимах асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в функции от частоты тока статора, при которых обеспечивается – минимум потерь активной мощности в самой машине; сохранение постоянства ее перегрузочной способности (закон М.П. Костенко)^{29,30,31} и сохранения неизменным значение магнитного потока в машине.

$$k_{us} = k_{fs} \cdot \sqrt{m_{дв}} \cdot \sqrt[4]{\frac{k_{\Delta}}{(0,61 + 0,39 \cdot k_{fs}) \cdot k_{fs}}}$$

$$k_{us} = k_{fs} \cdot \sqrt{m_{дв}}$$

$$k_{us} = k_{fs}$$

²⁹ Костенко, М.П. Электрические машины, специальная часть // – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, – 1949. – 712 с.

³⁰ Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А.А.Булгаков. – Москва: Наука, – 1966. – с. 216.

³¹ Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями/Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, – 2006, – 94 с.

Для анализа эффективности режимов работы частотно-управляемых асинхронных машин с короткозамкнутыми роторами при скалярном управлении целесообразно использовать данные расчетов, полученные на предложенной математической модели, вкупе с данными аналитических расчетов других, не учтенных на модели видов потерь мощности.

При выборе закона управления амплитудой напряжения статора машины необходимо учитывать не только обеспечение минимума потери мощности в самой асинхронной машине, но обязательно минимум потребляемой реактивной мощности, так как эта мощность определяет дополнительные потери энергии в сетях, к которым подключены эти машины.

$$\begin{aligned}
 p\Psi_{ds} &= U_{ds} - \omega_r \cdot \Psi_{qs} - r_s \cdot i_{ds} \\
 p\Psi_{qs} &= U_{qs} + \omega_r \cdot \Psi_{ds} - r_s \cdot i_{qs} \\
 p\Psi_{dr} &= -r_r \cdot i_{dr} \\
 p\Psi_{qr} &= -r_r \cdot i_{qr} \\
 Tr\omega_r &= m_{дв} - m_{эм} \\
 m_{эм} &= \Psi_{ds} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{ds} \\
 U_{ds} &= 0,707 \cdot k_{us} \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) - \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) \right] \\
 U_{qs} &= 0,707 \cdot k_{us} \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) + \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) \right]
 \end{aligned} \tag{21}$$

По вышеуказанным критериям наиболее целесообразно применение двух законов управления – регулирование на постоянство перегрузочной способности и регулирование на постоянство магнитного потока. По простоте исполнения предпочтителен последний закон управления, но при вентиляторном характере изменения момента более эффективен закон регулирования на постоянстве перегрузочной способности, который определяется по выражению $k_{us} = k'_n \cdot k_{fs} \cdot \omega_r$.

По разработанным трехкоординатным математическим моделям асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором и асинхронной машины двойного питания проведены исследования и сопоставительный анализ режимов их частотного пуска. Этот вопрос особенно актуален в тех случаях, когда ветроэлектрическая установка и ветровые парки, содержащие

несколько десятков ветроэлектрических установок, подключены к сетям достаточно удаленных от центров питания и слабо компенсированных реактивными мощностями. В этих случаях режимы подключения ветроэлектрических установок с асинхронными генераторами могут привести к значительной посадке напряжения в период пуска. Исследования показали, что с точки зрения воздействия на электрические сети в период пуска, наиболее предпочтительными оказались частотно-управляемые асинхронные генераторы ветроэлектрических установок с короткозамкнутым ротором. У них при частотном пуске пусковой ток в 2 раза меньше пускового тока асинхронной машины двойного питания ветроэлектрической установки, а, что важно, энергия, затрачиваемая на процессе пуска также на 55% ниже, так как общее время пуска для ветроэлектрической установки с асинхронным генератором с короткозамкнутым ротором составляет для исследуемого примера примерно 400 радиан, а для ветроэлектрических установок с асинхронной машиной двойного питания – около 600 радиан.

При использовании в ветроэлектрических установках с асинхронной машиной двойного питания предлагается, в том случае, когда диапазон изменения скоростей ветра совсем незначителен (практически постоянен), т.е. когда нет необходимости в регулировании частоты вращения ветроэлектрических установок, перевести его в синхронный режим работы³². Для этого, роторную обмотку асинхронной машины двойного питания после соответствующих пересоединений, подключить к источнику постоянного тока, для этого достаточно отключить его от выхода преобразователя частоты (инвертора) и подключить к выходу выпрямителя, как это изображение на рисунке 8. Оригинальность этой схемы заключается в том, что обмотка ротора получает питание от звена постоянного тока преобразователя частоты. При этом две фазы

³² Ferre, A. J., Bellmuntriol, G., Sumper, A. Modeling and control of the doubly fed induction generator wind turbine // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2010. Vol. 18, Issue 9, – p. 1365-1381.

обмотки ротора соединены параллельно между собой и последовательно с третьей фазой³³.

На рисунке 9 представлены флюктограммы изменения параметров перевода асинхронной машины двойного питания при переводе ее в синхронный режим работы. В диапазоне времени от 0 до 1000 радиан осуществлен прямой пуск асинхронной машины двойного питания с закороченными обмотками ротора, при этом вращающий момент равен нулю (рисунок 9, а), частота вращения ротора $\omega_r=0,999$ (рисунок 9, б), активная мощность статора также практически равна нулю $p_s=0,01$ (рисунок 9, в), а реактивная мощность равна $q_s=0,228$ (знак плюс указывает на то что она потребляется из электрической сети (рисунок 9, г)).

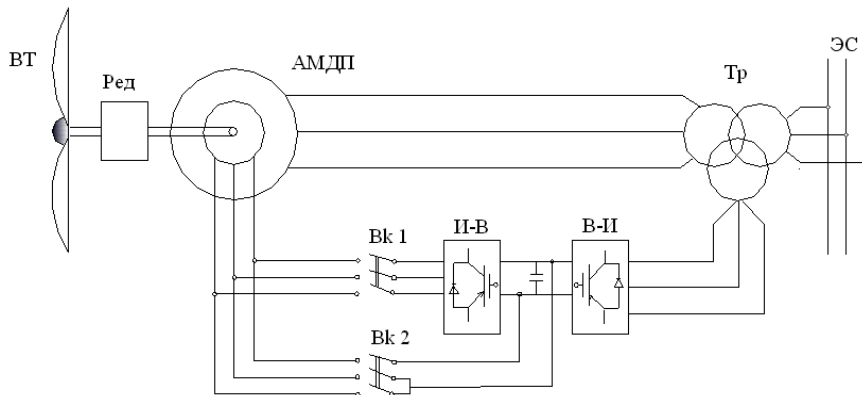


Рисунок 8. Электрическая схема перевода асинхронной машины двойного питания, с преобразователем частоты в цепи ротора, в синхронный режим работы

В диапазоне времени от 1000 до 2000 радиан, появляется ветер, создающий движущий момент на валу ветроэлектрической установки равный $m_{вд}=-0,5$, машина переходит в генераторный режим, частота вращения становится равной $\omega_r=1,015$ (рисунок

³³ Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Using control double fed machine into synchronous operation mode // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2019. Т. 86, № 5. – p. 258-263.

9, б), значения активной и реактивной мощности становятся равными соответственно $p_s = -0,496$ (активная мощность выдается в сеть) и $q_s = 0,276$ (реактивная мощность потребляется из сети (рисунок 9, з) с 2000 радиан асинхронная машина двойного питания переводится в синхронный режим работы, в этом режиме реактивная мощность со значения $q_s = 0,276$ изменяется до значения $q_s = -0,512$ (выдается в сеть). При этом постоянный ток в обмотке ротора асинхронной машины двойного питания становится равным $i_f = -0,889$, и напряжение ротора $U_f = -0,04$. Таким образом, результаты моделирования подтвердили работоспособность и эффективность предложенного способа перевода асинхронной машины двойного питания ветроэлектрической установки в синхронный режим работы.

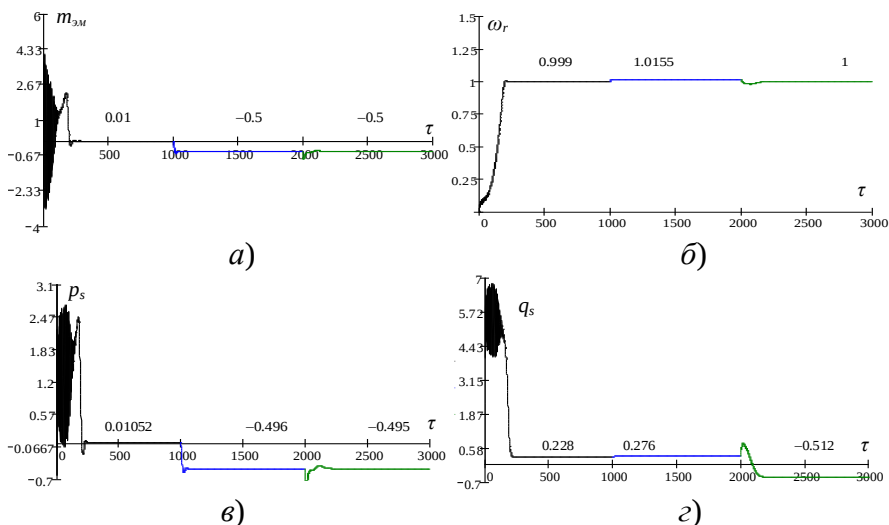


Рисунок 9. Флюктограммы изменения режимных параметров асинхронной машины двойного питания ветроэлектрической установки при переводе ее в асинхронный режим работы

В заключении этого раздела математическая модель системы регулирования угла поворота лопастей ветродвигателя при работе ветроэлектрической установки с асинхронным

генератором двойного питания³⁴. Известно, что регулирование угла поворота лопастей ветродвигателя осуществляется в зоне изменения скоростей ветра от расчетного значения $V_{рас}$, при котором выдается номинальная мощность ветроэлектрической установки, до максимальной рабочей скорости ветра V_{max} , после которой ветроэлектрическая установка переводится во флюгерное положение и останавливается³⁵.

Сущность предлагаемой методики заключается в том, что, используя каталожные данные конкретных типов ветроэлектрической установки, а, именно, изменение (уменьшение) коэффициента использования энергии ветра C_p в функции от скорости ветра в указанном выше диапазоне изменения скоростей ветра, можно синтезировать зависимость вращающего момента ветродвигателя в функции угла поворота его лопастей. На примере конкретной ветроэлектрической установки типа Nordex N80³⁶, мощностью $P_{ном}=2500$ кВт выведено выражение для вращающего момента ветродвигателя, приведенного к валу генератора в виде:

$$m_{БЭУ} = V^3 [A \cdot \beta^2 + B \cdot \beta + C] \quad (22)$$

где $A = \frac{a_2 \cdot k_\beta^2}{C_{pn} \cdot V_{расч}^3}$; $B = \frac{a_1 \cdot k_\beta}{C_{pn} \cdot V_{расч}^3} + \frac{2 \cdot a_2 \cdot k_\beta}{C_{pn} \cdot V_{расч}^2}$;

$$C = \frac{a_0}{C_{pn} \cdot V_{расч}^3} + \frac{a_1}{C_{pn} \cdot V_{расч}^2} + \frac{a_2}{C_{pn} \cdot V_{расч}}; \quad V - \text{текущее значение}$$

скорости ветра; a_0, a_1, a_2 – коэффициенты аппроксимации выражения C_p полиномом второй степени, C_{pn} – значение коэффициента использования энергии ветра, при котором выдается номинальная мощность, $V_{расч}$ – расчетная скорость

³⁴ Smida, B. M., Sakly, A. Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines. - Journal of Renewable Energy and Sustainable Development (RESO), – 2015. Vol. 1, No. 1, – p. 81-88.

³⁵ Цгоев, Р. С. Повышение эффективности ветроэнергетического агрегата регулированием угла установки лопастей ветроколеса/ Р.С. Цгоев, Г.А. Яковенко// Электричество. – 2014. – № 3. – с. 25-30.

³⁶ Nordex Company. Products & Servic. [Electronic resource] / URL: <https://www.nordex-online.com/en/product/product-main-page>

ветра [м/с], при которой ветроэлектрическая установка выдает номинальную мощность, k_β – коэффициент пропорциональности между углом поворота лопастей β и скоростью ветра. Для ветроэлектрической установки типа Nordex N80 эти коэффициенты равны $A=2,58 \cdot 10^{-8}$; $B=-0,44 \cdot 10^{-5}$; $C=-0,265 \cdot 10^{-4}$.

Алгоритм «работы» уравнения (22) следующий: при достижении скорости ветра любой величины V_1 , находящейся в диапазоне $V_{\text{расч}} \div V_{\text{max}}$ с соответствующей постоянной времени всего тракта регулирования угла поворота лопастей ветродвигателя, устанавливается такое значение для β_1 , которое обращает уравнение (21) в единицу $m_{\text{вд}}=1$, т.е. после действия регулятора установившееся значения движущего момента ветроэлектрической установки остается постоянным равным номинальному значению. Система регулирования угла поворота лопастей ВЭУ Nordex N80 с асинхронной машиной двойного питания была исследована на математической модели с системой автоматического регулирования, базирующейся на двух принципах управления – управление "по возмущению" и управление "по отклонению". В качестве возмущающего воздействия была принята скорость ветра, а второе управление базируется на регулировании по отклонению активной мощности асинхронной машины двойного питания от номинального значения. Сравнительный анализ результатов расчета выявил, что при прочих равных условиях длительность переходного процесса при воспроизведении принципа управления "по отклонению" (при статизме 3–4%) более, чем на порядок меньше длительности переходного процесса при реализации принципа управления "по возмущению".

Кроме того, изучены вопросы компенсации реактивной мощности в установках применяемых ветроэлектрических станциях. Выявлено, что максимальное количество реактивной мощности потребляется в асинхронных генераторах при их подключении к энергосистеме. Показаны пути уменьшения

потребления реактивной мощности в асинхронных генераторах эти установок³⁷.

Многочисленные исследования реактивных мощностей при пуске и работе асинхронных генераторов ветроэлектрических установок позволяют в зависимости от требований электрической сети рассчитать требуемые величины компенсации реактивной мощностей, т.е. выбрать тип и параметры компенсируемых конденсаторов.

В четвертой главе исследуются вопросы моделирования режимов работы ветроэлектрической установки с асинхронной машиной двойного питания на сеть бесконечной мощности с учетом параметров внешней сети^{38,39}. Метод моделирования основывается на том факте, что уравнения внешней сети от зажимов генератора и $\dot{U}_c$ до шин бесконечной мощности $\dot{U}_c$ записываются в предположении, что оси комплексной плоскости совмещаются с осями d_0 , q_0 , вращающимися с постоянной угловой синхронной скоростью ω_s , с условием, что ось q_0 совпадает с осью действительных чисел. Далее эти уравнения внешней сети, разложенные по осям d_0 , q_0 совместно решаются. Затем осуществляется переход составляющих напряжения и токов, записанных в осях d_0 и q_0 , к составляющим, записанным в осях d , q асинхронной машины двойного питания. Таким образом, синтезируются составляющие напряжения U_d , U_q и токов i_d , i_q асинхронной машины двойного питания. На рисунке 10 (а, б) представлены электрическая схема системы и ее схема

³⁷ Apata, O., Oyedokun, D. Novel reactive power compensation technique for fixed speed wind turbine generators // Proc. of the IEEE PES/IAS Power Africa, – 2018, – p. 628-633.

³⁸ Сидоров, Л. П., Орлов, В. С. Анализ электромеханических процессов в АМДП при подключении к энергосетям // Энергия будущего, – 2022. 4(23), – с. 28-36.

³⁹ Jiao, J., Yu, Y., Zou, J. Coordinated Frequency Control of Doubly-fed Induction Generator Based on Interconnected Grid // In Proceedings of the 2020 4th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), – Xiamen, China, – 2020, – p. 124-129.

замещения. $\dot{U}_z$, $\dot{U}_c$, $\dot{U}_y$ – напряжения в комплексной форме соответственно на выходе генератора (асинхронная машина двойного питания), в узле нагрузки и на шинах приемной системы.

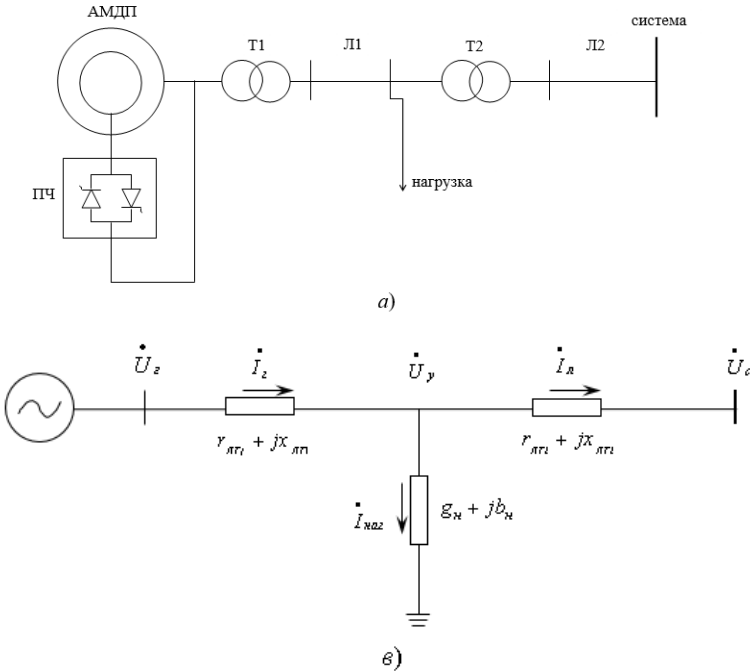


Рисунок 10. Схема электропередачи ВЭС, содержащая генератор, выполненный на базе асинхронной машины двойного питания, трансформаторы Т1 и Т2, линии электропередач Л1 и Л2, нагрузку, и приемную систему шин бесконечной мощности:
а) – электрическая схема; б) – схема замещения

После соответствующих подстановок и преобразований, получим выражения для составляющих напряжения генератора, представленных в осях, вращающихся со скоростью ротора машины ω_r , U_{rd} , U_{rq} которые предстанут в виде:

$$\left. \begin{aligned} U_{rq} &= (k_1 \cdot U_{cd0} - k_2 \cdot U_{cq0}) \cdot \sin\theta + (k_1 \cdot U_{cq0} + k_2 \cdot U_{cd0}) \cdot \cos\theta + k_3 \cdot i_{zq} - k_4 \cdot i_{rd} \\ U_{rd} &= (k_1 \cdot U_{cd0} - k_2 \cdot U_{cq0}) \cdot \cos\theta + (k_1 \cdot U_{cq0} + k_2 \cdot U_{cd0}) \cdot \sin\theta + k_4 \cdot i_{zq} - k_3 \cdot i_{rd} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где U_{cd_0} U_{cd_0} – составляющие напряжения приемной системы U_c , в синхронно вращающихся осях d_0, q_0 ; i_{rd}, i_{rq} – составляющие токов генератора (машина двойного питания) в осях d, q на выходе генератора с учетом выражений $i_{rd}=i_{ds}+k_{ur}\cdot i_{dr}$ и $i_{rq}=i_{qs}+k_{ur}\cdot i_{qr}$; k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты зависящие от активных и индуктивных сопротивлений трансформаторов T_1 и T_2 , линий L_1 и L_2 , а также нагрузки. θ – угол нагрузки асинхронной машины двойного питания.

С учетом уравнения баланса напряжения уравнения асинхронной машины двойного питания запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_{sd} &= U_{rd} - \omega_r \cdot \Psi_{qs} - r_s \cdot i_{sd} \\ p\Psi_{sq} &= U_{rq} + \omega_r \cdot \Psi_{ds} - r_s \cdot i_{sq} \\ p\Psi_{rd} &= -U_r \cdot k_{ur} \cdot \sin(k_{fr} \cdot \tau) - r_r \cdot i_{rd} \\ p\Psi_{rq} &= \pm U_r \cdot k_{ur} \cdot \cos(k_{fr} \cdot \tau) - r_r \cdot i_{rq} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где $U_r = \sqrt{U_{rd}^2 + U_{rq}^2}$.

По результатам моделирования вышеописанной системы выявлены режимы работы генератора ветроэлектрической установки, выполненного на базе асинхронной машины двойного питания, при которых меняются величины и направления активных и реактивных мощностей (токов), протекающих в местную нагрузку как от асинхронной машины двойного питания ветроэлектрических установок, так и со стороны энергосистемы. Это положение особенно необходимо знать при расчетах режимов потребления, выдачи и управления потоками активных и реактивных мощностей в исследуемом узле системы, так как мощность, выдаваемая ветроэлектрической установкой, является изменяющейся величиной, зависящей от значений скоростей ветра.

Представляет интерес работа ветроэлектрических станций в локальной системе переменного тока ограниченной мощности, например, совместно с дизель-электрической, либо газотурбинной установками в регионах, где нет электрической

связи с энергосистемой⁴⁰. Режимы работы таких систем можно исследовать на базе электрической схемы, представленной на рисунке 11.

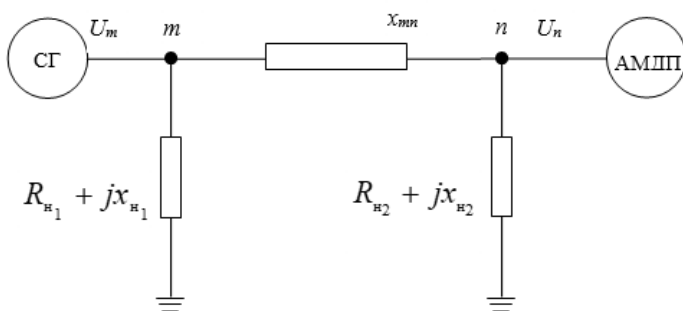


Рисунок 11. Схема подключения асинхронной машины двойного питания ветроэлектрической установки к системе ограниченной мощности

Здесь синхронный генератор СГ дизель-электрической установки подключен к узлу m от которой питается нагрузка $r_{n1} + jx_{n1}$, линия электропередач (ЛЭП) с индуктивным сопротивлением x_{mn} (активное сопротивление для простоты анализа не учитывается), которая соединяет два узла m и n . К узлу n , подключен асинхронный генератор (асинхронная машина двойного питания) ветроэлектрической установки и нагрузка $r_{n2} + jx_{n2}$. Напряжения узлов соответственно равны U_m и U_n .

Для решения используется метод баланса активной и реактивной мощностей в узловых точках. При этом методе каждая электрическая машина, уравнения которой могут описываться в любой системе координат, так как используются только величины их активных и реактивных мощностей, которые являются скалярными величинами. При этом для каждой из машин мощности определяются с использованием напряжения узла, к которому она подключена.

⁴⁰ Arnaltes, S., Rodriguez-Amenedo, J.L., Montilla-DJesus, M.E. Control of variable speed wind turbines with doubly fed asynchronous generators for stand-alone applications // Energies, – 2018, Vol. 11, – p. 26-32.

Решение уравнения линии электропередачи между узлами m и n определяются из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} P_m &= \frac{U_m \cdot U_n}{x_{mn}} \sin \theta_{mn} \\ Q_m &= \frac{U_m^2}{x_{mn}} - \frac{U_m \cdot U_n}{x_{mn}} \cos \theta_{mn} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Причем для узлов m и n должны выполняться условия

$$\left. \begin{aligned} P_m &= P_{CT} - P_{n1} & \text{и} & & P_n &= P_{AT} - P_{n2} \\ Q_m &= Q_{CT} - Q_{n1} & & & Q_n &= Q_{AT} - Q_{n2} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Таким образом, известными считаются, поступающие в начало участка активные и реактивные мощности P_m и Q_m , а также напряжение на начале участка U_m , а неизвестными, которые необходимо определить – это напряжение, активные и реактивные мощности и угол сдвига векторов напряжения θ_{mn} на конце участка.

После тривиальных преобразований, определяются:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{mn} &= \arctg \frac{P_m \cdot x_{mn}}{U_m^2 - Q_m \cdot x_{mn}} \\ U_n &= \sqrt{\frac{P_m^2 \cdot x_m^2 + (U_m^2 - Q_m \cdot x_{mn})^2}{U_m^2}} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Из уравнения (27) видно, что задаваясь значениями U_m , P_m и Q_m , можно однозначно получить выражения для θ_{mn} и U_n , которые следуют использовать в конце участка линии – они являются входными параметрами для асинхронной машины двойного питания ветроэлектрических установках.

Составлены математические модели синхронного генератора и асинхронной машины двойного питания ветроэлектрических установках определены их мощности с учетом выражений (27). При исследовании варьировались параметры нагрузок, мощности асинхронной машины двойного питания ветроэлектрических установок, которые зависят от ветрового режима, при этом определялись значения перетоков мощностей, напряжений в узлах нагрузок. Исследованы также динамические режимы системы при резких изменениях значений сопротивлений

нагрузок и вращающего момента на валу асинхронной машины двойного питания ветроэлектрических установок.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты настоящей диссертационной работы следующие.

1. Разработана универсальная структура математической модели основных электрических машин ветроэлектрических установок; эта структура позволяет реализовать все возможные виды управления этих машин – частотное со стороны статора как для асинхронных машин с короткозамкнутым ротором, так и для синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов и с электромагнитным возбуждением, частотное со стороны ротора для асинхронных машин с фазным ротором (асинхронная машина двойного питания).

2. Предложена методика моделирования частотно-управляемой асинхронной машины ветроэлектрической установки с короткозамкнутым ротором в трехкоординатной системе $\alpha_s, \beta_s, \gamma_s$, неподвижных в пространстве. Внесенные коррективы в составляющие статорного напряжения позволяют просто и эффективно учесть в них изменение регулирующих параметров – амплитуды и частоты фазных напряжений машины.

Разработана новая трехкоординатная математическая модель частотно-управляемой асинхронной машины с фазным ротором с преобразователем частоты в цепи ротора. При этом уравнения записаны в осях $\alpha_s, \beta_s, \gamma_s$, вращающихся со скоростью ротора.

3. На базе универсальной математической модели электрических машин переменного тока ветроэлектрических установок предложена математическая модель частотно-управляемой синхронной машины с постоянными магнитами. В уравнениях этой машины введен параметр, который отображает магнитную энергию постоянного магнита, отнесенную к единице его объема (если остаточная индукция мала, то можно считать, что он моделирует коэрцитивную силу постоянного магнита).

4. При исследовании на математической модели динамической устойчивости ветроэлектрических установок с синхронным генератором с постоянными магнитами выявлено, что помимо величины порыва ветра и его продолжительности на динамическую устойчивость влияет величина установившегося значения скорости ветра после порыва скорости ветра – чем ниже значение скорости ветра, тем выше динамическая устойчивость. Выявлено, что при увеличении величины магнитной энергии на единицу объема динамическая устойчивость увеличивается. В качестве рекомендации по повышению динамической устойчивости предлагается кратковременное уменьшение частоты тока в статорной обмотке генератора в процессе порыва ветра до определенного предельного значения.

5. Предлагается для эффективного демпфирования колебаний роторов синхронных генераторов ветроэлектрических установок с постоянными магнитами, используя принцип максимума Понтрягина, при резких возмущениях либо со стороны вала генератора, либо со стороны энергосистемы сначала на 10% (от номинала) увеличить одновременно амплитуду и частоту статорного напряжения генератора и через определенное время их на 10% уменьшить при набросе нагрузки. При сбросе нагрузки эту процедуру необходимо выполнить в обратном порядке (т.е. сперва на 10% уменьшить, а затем на столько же увеличить).

6. Представленная форма записи уравнений синхронного генератора ветроэлектрических установок с постоянными магнитами позволяет просто и эффективно воспроизвести все гармонические составляющие, находящиеся в кривых напряжения питающей статорную обмотку генератора. Это дает возможность оценить влияние каждой из гармоник на режимные параметры генератора, а в случае необходимости реализовать и скорректировать параметры фильтра.

7. Предложено усовершенствование ранее разработанной нами математической модели асинхронной машины двойного питания ветроэлектрической установки. Уточнение заключается в выводе формул для раздельного определения активных и

реактивных мощностей обмоток статора и ротора асинхронной машины двойного питания при его частотном управлении, а общие активная и реактивная мощности машины определяются путем их алгебраического сложения. Рассмотрены вопросы приемлемости упрощения уравнений асинхронной машины двойного питания. При упрощении путем одновременного пренебрежения в статорном контуре машины трансформаторных э.д.с., э.д.с. скольжения и активных сопротивлений статорных обмоток, параметры установившегося режима по сравнению с параметрами, вычисленными по полным уравнениям разнятся на 0–7%, что позволяет рекомендовать такое упрощение для исследования квазиустановившихся и статических режимов.

8. Выявлено, что снижение сетевого напряжения в месте подключения ветроэлектрической установки с асинхронной машиной двойного питания к электрической сети до значения $U_s=0,85$ и ниже в режиме работы ветроэлектрической установки с номинальной нагрузкой для сохранения устойчивости необходимо уменьшить величину вращающего момента ветродвигателя при помощи регулирования угла поворота лопастей ветродвигателя. При малой загрузке ветроэлектрической установки (50% и ниже) устойчивость системы можно обеспечить путем увеличения в пределах 5–7% величины амплитуды напряжения, питающего роторную обмотку машины, т.е. на выходе преобразователя частоты.

9. Приведена методика анализа эффективности функционирования частотно-управляемой асинхронной машины с короткозамкнутых роторов при скалярном управлении и обеспечении минимума потерь мощности в самой машине, а также постоянства значений перегрузочной способности и магнитного потока. Выявлено, что с учетом значений суммарных потерь мощности и потребляемой реактивной мощности, наиболее целесообразным является регулирование на постоянства перегрузочной способности и магнитного потока при неизменном значении момента на валу машины. При вентиляторном характере изменения момента на валу машины по совокупности потерь мощности и потребляемой реактивной

мощности более эффективно применение закона на постоянства перегрузочной способности машины.

10. По разработанным полным трехкоординатным математическим моделям частотно-управляемого асинхронного генератора двойного питания и асинхронного генератора ветроэлектрической установки с короткозамкнутым ротором проведен сопоставительный анализ режимов частотного пуска. Выявлено, что наиболее целесообразным с точки зрения минимального воздействия на электрические сети в местах подключения к ним ветроэлектрической установки, является применение частотно-управляемых асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором, потому что у них пусковой ток почти в 2 раза ниже пускового тока асинхронной машины двойного питания ветроэлектрической установки, и энергия, затрачиваемая на процесс пуска также на 55% ниже.

11. Предложен новый способ перевода асинхронной машины двойного питания ветроэлектрической установки в синхронный режим работы. Этот режим работы, например, может быть осуществлен в ветроустановках, когда в определенный длительный период времени отпадает необходимость в регулировании частоты их вращения. Оригинальность способа и соответственно разработанной математической модели, заключается в том, что для перевода асинхронной машины двойного питания в синхронный режим используется только выпрямительная часть преобразователя частоты асинхронной машины двойного питания. Результаты моделирования подтвердили работоспособность и эффективность предложенного способа.

12. Разработана методика моделирования регулирования угла поворота лопастей ветродвигателя современных ветроэлектрических установок. Синтезированы уравнения и проведено моделирование системы автоматики, работающей совместно с системой регулирования угла поворота лопастей ветродвигателя в ветроэлектрических установках, оснащенной частотно-управляемой асинхронной машиной двойного питания, в результате которого выявлено, что при прочих равных

условиях, если в системе автоматики заложен принцип управления по «отклонению» длительность переходного процесса (при статизме 3–4%) более чем на порядок меньше длительности переходного процесса при реализации в системе автоматического регулирования принципа управления по «возмущению».

13. Предложена методика моделирования и исследования ветроэлектрической установки с асинхронной машиной двойного питания при работе на сеть «бесконечной мощности» с учетом местной нагрузки ветроэлектрической установки и параметров внешней сети до системы «бесконечной мощности». Сущность предложенной методики заключается в «согласовании» уравнений асинхронных машин двойного питания, записанных в осях, вращающихся со скоростью ротора машины с уравнениями внешней сети и нагрузки, записанных в синхронно вращающейся системе координат. По результатам моделирования выявлены режимы работы, при которых меняются величины и направления активных и реактивных токов (мощностей), протекающих в местную нагрузку как от асинхронного генератора ветроэлектрических установок, так и со стороны энергосистемы (шин бесконечной мощности). Это особенно важно знать при расчетах режимов потребления, выдачи и управления потоками мощностей в исследуемом узле системы.

14. Предложена математическая модель системы «асинхронная машина двойного питания ветроэлектрических установках – синхронный генератор ограниченной мощности», т.е. работа асинхронной машины двойного питания ветроэлектрических установках на сеть ограниченной мощности. При этом каждый из генераторов имеет местную нагрузку. Эта модель построена на принципе «баланса мощностей» и поэтому не требует приведения уравнений генераторов и нагрузок к единой системе координат. Исследованы все возможные режимы работы как синхронного генератора, так и асинхронного генератора ветроэлектрических установок при различных значениях отбора мощности как на зажимах синхронного

генератора, так и на зажимах асинхронной машины двойного питания ветроэлектрических установок.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК

1. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Моделирование и исследование квазистационарных режимов работы ветроэлектрических установок с асинхронными генераторами при частотном управлении // – Москва: Электричество, – 2009, №6, – с. 36-42.

2. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Моментно-мощностные характеристики современных ветроэлектрических установок // – Москва: Электротехника, – 2009. №7, – с. 53-58.

3. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Бабаев, М.А., Исламов, Ф.Х., Аббасов, Р.М. Моделирование и исследование режимов работы авиационных синхронных генераторов с постоянными магнитами // Milli Aviasiya Akademiyasının elmi əsərləri, Bakı: –2010, №3, – с. 170-178.

4. Mustafayev, R.I., Saidov, R.A., Hasanova, L.H. The comparative analysis of wind power plants (WPP) using efficiency in Absheron peninsula conditions of the republic of Azerbaijan // TPE-Journal International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering IJTPE, 2010 Issue 3, No. 2, Vol.2, p. 18-21.

5. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Моделирование и исследование режимов работы синхронных генераторов ветроэлектрических установок при частотном управлении // – Москва: Электричество, – 2010. №7, – с.34-40.

6. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Зейналов Р.Б. Частотный пуск и управление ветроэлектрических установок с синхронным генератором с постоянными магнитами // – Bakı: Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunun elmi əsərlər toplusu, – 2010. – s. 89-98.

7. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Development of world wind-

power engineering preliminary feasibility study of 50 MW wind power farm in Azerbaijan // ELECTROScientific – Industrial Journal, Baku: – 2010. v.1, No. 1, – p.25-36.

8. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Development and research mathematical models, modes of wind power plants' electromechanical converters // – San Diego: Reliability: theory & applications. Journal is registered in the library of the U.S. congress, – 2011. Vol.2, No.2 (21), – p. 52-66.

9. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Моделирование угла поворота лопастей ветродвигателя ветроэлектрической установки, работающей на электрическую сеть // – Москва: Электротехника, – 2011. №12, – с.22-27.

10. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Зейналов, Р.Б. Исследование статических и динамических режимов в ветроэлектрических установках, содержащих асинхронные машины двойного питания // – Bakı: Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunun elmi əsərlər toplusu, – 2011. – s.44-59.

11. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Parallel Operation of Wind Power Farm with Double Fed Induction Generators with Electric Power System // ELECTRO Scientific – Industrial Journal, – Baku: – 2011. Vol.2, No. 1, – p.13-22.

12. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Модель для исследования режимов работы ветроэлектрических установок с асинхронными машинами двойного питания в энергосистеме // – Минск: Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, – 2012, №3, – с.27-39.

13. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Зейналов, Р.Б. Исследование влияния сетевого напряжения на режимы работы ветроэлектрических установок с асинхронной машиной двойного питания // – Bakı: Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunun elmi əsərlər toplusu, Azərbaycan, –2012, – s.27-41.

14. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H., Musayev, M.M. Modelling starting regim work of the induction generators of wind turbine and small hydroplaning // International Journal of Recent Development in

Engineering, – 2013. Vol.1, No. 3, – p. 16-23.

15. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H., Musayev, M.M. Some subjects of compensation of the induction generators reactive power in wind-power and small hydroelectric power plants // – San Diego: Reliability: theory & applications. Journal is registered in the library of the U.S. congress, – 2013. Vol.8, No.4 (31), – p. 2-13.

16. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Влияние значения сетевого напряжения на режим работы ветроэлектрической установки с асинхронной машиной двойного питания // – Москва: Электротехника, – 2013. №4, – с. 43-49.

17. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Режимы работы ветроэлектрических установок с АМДП в автономной электрической системе // – Bakı: Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunun elmi əsərlər toplusu, – 2013. – s.36-56.

18. Мустафаев, Р.И., Саидов, Р.А., Гасанова, Л.Г. Исследование установившихся режимов работы частотно-управляемого асинхронного генератора ветроэлектрических установок // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, Минск: – 2014. №3, – с. 43-48.

19. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Некоторые вопросы регулирования возбуждения синхронных генераторов малых ГЭС // – Баку: Проблемы Энергетики, – 2014. №2, – с. 3-7.

20. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H., Musayev, M.M., Aliyev Q.M. The excitation control and stability of small hydroelectric power stations synchronous generators when operation in power system // – San Diego: Reliability: theory & applications. Journal is registered in the library of the U.S. congress, – 2014. Vol.9, No.4 (35), – p. 29-36.

21. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Универсальная структура математической модели управляемых электрических машин переменного тока // – Москва: Электричество, – 2015. №2, – с. 40-48.

22. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Исследование динамики ветроэлектрических установок, оснащенных синхронными генераторами с постоянными магнитами // – Москва: Электротехника, – 2015. №4, – с. 23-29.

23. Мустафаев, Р.И. Гасанова, Л.Г., Мусаев, М.М, Мамедов Э.М., Набиев Х.И. Некоторые аспекты применения асинхронных машин двойного питания в качестве генератора малых ГЭС // – Баку: Проблемы Энергетики, – 2015. №1, – с. 3-13.

24. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Математическое моделирование управляемых трехфазных асинхронных машин // – Москва: Электричество, – 2016. №5, – с. 59-65.

25. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Study of Starting Duty of Wind Power Plant with Asynchronous Generators // – San Diego: Reliability: theory & applications. Journal is registered in the library of the U.S. congress, – 2016. Vol. 11, No. 4 (43), – p. 38-48.

26. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Мусаев, М.М. Исследование статических и динамических характеристик гидроагрегатов малых ГЭС // – Москва: Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, – 2016. №4, – с. 17-21.

27. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Мусаев, М.М. Моделирование и исследование гидроагрегатов малых ГЭС с частотно-управляемыми синхронными генераторами с постоянными магнитами // – Минск: Энергетика. Известия ВУЗ и энергетических объединений СНГ, – 2016. Т. 59, №2, – с. 106-121.

28. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Использование регулируемой асинхронной машины двойного питания в синхронном режиме // – Москва: Электричество, – 2017. №10, – с. 60-68.

29. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Simplification of Mathematical Model of Double Fed Asynchronous Machine // European Journal of Electrical and Computer Engineering, – 2017. Vol. 1, No. 3, – p. 16-22.

30. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Методика исследования влияния высших гармонических напряжения на режимные параметры синхронного генератора с постоянными магнитами // – Мурманск: Вестник МГТУ, – 2017. Т. 20, № 4, – с. 705-713.

31. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Мусаев, М.М. Применение регулируемых электрических машин в гидроагрегатах малых ГЭС, работающих на энергосистему // –

Москва: Электротехника, – 2018. №5, – с.38-44.

32. Гасанова, Л.Г. Вопросы пуска синхронных машин с постоянными магнитами // – Баку: Проблемы Энергетики, – 2019. №3, – с. 31-38.

33. Гасанова, Л.Г., Мустафаев, Р.И. Анализ эффективности работы асинхронной машины с короткозамкнутым ротором при скалярном частотном управлении // – Москва: Электричество, – 2019. №3, – с. 46-54.

34. Гасанова, Л.Г. Фильтрация гармоник частотно-управляемых асинхронных машин двойного питания // – Мурманск: Вестник Мурманского государственного технического университета, – 2019. Т. 22, № 4, – с. 508-512.

35. Гасанова, Л.Г. Обоснование методов исследования режимов работы электрических машин в ветроэлектрических установках // – Баку: Проблемы Энергетики, – 2020. №1, с. 78-83.

Статьи, опубликованные в зарубежных изданиях, входящих в Web of Science и Scopus

36. Mustafaev, R.I., Gasanova, L.G. Torque-power characteristics of modern wind-power facilities // Russian Electrical Engineering. – 2009. Vol. 80, № 7, – p. 406-411.

37. Mustafaev, R.I., Gasanova, L.G. Modeling of turning angle of the windmill blades of a working on the power network // Russian Electrical Engineering, – 2011. Т. 82, № 12, – p. 659-664.

38. Mustafaev, R.I., Gasanova, L.G. The influence of supply voltage on the operating regime of a wind-power station working on the power network // Russian Electrical Engineering, – 2013. Vol. 84, № 4, – p. 216-220.

39. Мустафаев, Р.И. Гасанова, Л.Г., Мусаев, М.М, Мамедов, Э.М., Набиев, Х.И. Моделирование и исследование режимов работы гидроагрегатов малых ГЭС с машинами двойного питания // – Новочеркасск: Изв. ВУЗов Электромеханика, – 2015. №6, – с. 59-66.

40. Mustafaev, R.I., Gasanova, L.G. An investigation of the dynamics of a wind power unit equipped with synchronous generators with permanent magnets // Russian Electrical Engineering. – 2015. Т.86, № 5, – p. 258-263.

41. Hasanova, L.H. Compensation of Reactive Power of Squirrel-Cage Asynchronous Generators, Used in Wind Power Plants and Small Hydroelectric Power Stations // IFAC (International Federation of Automatic Control) Hosting by Elsevier Ltd. All rights reserved. Peer review under responsibility of International Federation of Automatic Control. – 2018. – p. 462-467.

42. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H., Musayev, M.M. Using regulated electrical machines in small hydropower plants operating in a power network // Russian Electrical Engineering. – 2018. Т. 89, № 5, p. 322-327.

43. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Моделирование и исследование асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором при скалярном методе частотного управления // – Новочеркасск: Изв. ВУЗов Электромеханика, – 2019. Т. 62, № 5, – с. 37-43.

44. Hasanova, L.H. Method of conversion of double fed machine into synchronous operation mode and its simulation // – San Diego: Reliability: theory & applications. Journal is Registered in The Library of The U.S. Congress USA, – 2019, Vol.14 No.3 (54), – p. 18-24.

45. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Using control double fed machine into synchronous operation mode // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2019. Т. 86. № 5. – p. 258-263.

46. Mustafayev, R., Yusifbayli, N., Hasanova, L. Matrix structure of unified mathematical model of electric AC machines at control // E3S Web of Conferences, ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management, – 2020. Vol. 209, No. 02023, – p. 1-6.

47. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Simulation of wind power plant with double-fed machine when operating in autonomous system in parallel with synchronous commensurable power generator // E3S Web of Conferences, High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), – 2020. Vol. 178, No. 01034, – p. 1-5.

Статьи, опубликованные в других изданиях

48. Mustafayev, R.I., Saidov, R.A., Hasanova, L.H. Modeling and Study of Wind Power Plant's Asynchronous Generator with Saturation

Accounting / ICTPE Conference 6th International Conference on "Technical and Physical Problems of Electrical Engineering" – Tebriz: –2010, September 14-16, p. 97-99.

49. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Развитие мировой ветроэнергетики и предварительное технико-экономическое обоснование ВЭС мощностью 50 МВт в Азербайджане // Энергетические связи между России и Восточной Азией: стратегии развития в XXI веке. Объединенный симпозиум, – Иркутск: – 2010. Выпуск 60, – с. 343-349.

50. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Mathematical Models of Wind Power Plants' Electromechanical Converters // COIA 2011 Registration form 3rd international conference on control and optimization with industrial. Bilkent University, – Ankara: – 2011. – p. 111-112.

51. Yusifbəyli, N.A., Mustafayev, R.İ., Həsənova, L.H., Zeynalov, R.B. Azərbaycanın küləklərin izodinamik xəritəsi. Əsərin Qeydiyyatı Haqqında Şəhadətnamə, – Bakı: 2011, № 6956.

52. Yusifbayli, N.A., Mustafayev, R.İ., Hasanova, L.H., The modeling mode of operation of wind power farm with double fed asynchronous generators consideration the parameters of the electrical network / ICTPE Conference 8th International Conference on "Technical and Physical Problems of Power Engineering". Ostfold University College, – Fredrikstad: –2012, 5-7 September.

53. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Имитационное моделирование режимов работы ветроэлектрической установки, оснащенной синхронным генератором с постоянными магнитами / Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Международный научный семинар им. Ю.Н.Руденко. Баку, Азербайджан. Проблемы надежности систем энергетики в рыночных условиях, – Баку: – 2013. – с. 486-496.

54. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Сопоставление результатов расчета режимов работы частотно управляемого асинхронного генератора ветроэлектрических установок // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Международный научный семинар им. Ю.Н.Руденко. Надежность либерализованных систем энергетики, – Иркутск: – 2015. – с. 343-

349.

55. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H., Musayev, M.M., Mamadov, E.M., Nabiyeu, Kh.I. Modeling and Study of Operating Modes of Small Hydro Power Plants with Double Fed Induction Generators // International Conference MEPS'15 Modern Electric Power Systems. – Wroclaw: – 2015. July 6-9, – p.206-211.

56. Mustafayev, R.I., Saidov, R.A., Hasanova, L.H., Musayev, M.M. Study of operating modes of small HPSS' hydroelectric units equipped with synchronous generator / 12th International Conference on “Technical and Physical Problems of Electrical Engineering” University of the Basque Country, – Bilbao: 2016. September, 7-9, – p.78-83.

57. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Трехфазная математическая модель асинхронной машины двойного питания / – Baku: 1st International Conference on energy of Future: Challenges and Opportunities (ICEFCO), – Baku. – 2018. – с. 28-29.

58. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Method of conversion of double fed machine into synchronous operation mode and its simulation // 14th International Conference on “Technical and Physical Problems of Electrical Engineering” Nakhchivan State University, – Nakhchivan: – 2018. October 15-17, No. 14, – p. 1-6.

59. Hasanova, L.H. Three-coordinated mathematical model of double fed asynchronous machine with frequency control // 15th International Conference on “Technical and Physical Problems of Electrical Engineering” Istanbul Rumeli University – Istanbul, Turkey: –2019. October 14-15, – p. 27-32.

60. Гасанова, Л.Г. Мусаев, М.М. Моделирование и исследование электрических машин в гидроагрегатах малых гидроэлектростанций: Монография, – Баку: Элм, –2024, – с.170.

Личный вклад автора

Работы [32, 34, 35, 41, 44, 59], приведенные в списке научных трудов по докторской диссертации, написаны лично автором. В работах [1-31, 33, 36-40, 42-43, 45-58, 60], написанных в соавторстве, постановка научной проблемы, пути и методы ее решения принадлежат автору.

Защита диссертации состоится 30 мая 2025 года в 15:00 на заседании Диссертационного совета ЕД 2.04 действующего на базе Азербайджанского Технического Университета.

Адрес: AZ1173, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азербайджанского Технического Университета.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Азербайджанского Технического Университета.

Автореферат разослан по соответствующим адресам 29 апреля 2025 года.

Подписано в печать:
Формат бумаги: А5
Объём: 76841 знаков
Тираж: 70 экз.