

На правах рукописи

Ачитаев Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АВТОНОМНОЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Удалов Сергей Николаевич

Официальные оппоненты: **Соломин Евгений Викторович**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения».
Ядагаев Эркемен Геннадьевич
кандидат технических наук, Публичное акционерное общество «Межрегиональная распределительная сетевая компания Сибири» – «Горно-Алтайские электрические сети», г. Горно-Алтайск, начальник отдела перспективного развития.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита диссертации состоится «3» октября 2018 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан « » сентября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А. В. Прохоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Актуальность исследования связана с расширением использования ветроэнергетических установок с синхронными генераторами с постоянными магнитами совместно с другими источниками электрической энергии на территории России. В большей степени это вызвано значительной площадью не электрифицированных регионов страны и удорожанием привозного топлива. При построении автономных электроэнергетических систем с ветроэнергетическими установками возникает проблема обеспечения электро-механической совместимости при сильных возмущающих воздействиях со стороны турбины ВЭУ или нагрузки со стороны сети. Решением этой проблемы может стать стабилизация частоты вращения ротора генератора, либо стабилизация частоты генерируемого напряжения при переменной частоте вращения ветровой турбины. В настоящий момент для реализации первого пути используют накопители энергии разной природы. Они выполняют роль демпферов и парируют влияние возмущающих воздействий в автономных электроэнергетических системах. Однако существуют ограничения по использованию этих накопителей, обусловленные их низкой удельной энергоёмкостью и ограниченным жизненным циклом. Для стабилизации частоты генерируемого напряжения при переменной частоте вращения турбины в настоящее время применяют полупроводниковые преобразователи со вставкой постоянного тока. Реализация таких устройств затруднена в связи с тем, что при снижении напряжения в автономной электроэнергетической системе при коротком замыкании или при перегрузках происходит блокировка транзисторов. Это приводит к прекращению выдачи активной мощности в автономную электроэнергетическую систему.

Основным каналом управления скоростью ветроэнергетической турбины является изменение угла заклинивания лопастей (управление моментом). Недостатком такого способа управления является его большая инерционность, которая не позволяет обеспечить регулирование скорости вращения ротора генератора при быстроизменяющихся электро-механических переходных процессах в автономной системе. В связи с этим, перспективным направлением построения ветроэнергетических систем в настоящее время является применение электро-магнитных вариаторов в составе ветроэнергетических установок. Исследованию электроэнергетических систем с применением таких электромагнитных вариаторов и посвящена данная работа. Вариатор встраивается между ветровой турбиной и генератором, что позволяет осуществлять быстрое действующее изменение вращающего момента и удерживать частоту вращения генератора.

Идея работы состоит в применении электромагнитных вариаторов для ветроэнергетических установок в составе ветроэнергетической станции (ВЭС) при организации дополнительного канала управления частотой вращения генераторов путем регулирования добавочного вращающего момента на валу генератора при различных возмущениях в автономной энергетической системе (АЭС) для обеспечения электро-механической совместимости с другими генераторами этой системы.

Степень разработанности темы исследования

Исследованию по обеспечению устойчивой параллельной работы синхронных генераторов в составе автономных систем электроснабжения посвящено большое количество работ. Среди них можно выделить работы А.Г. Фишова, В.М. Чебана, Ю.Н. Кондрашовой, О.Н. Газизовой, В.А. Андреюка, Б.В. Лукутина, Б.Н. Абрамовича, А.С. Яндульского, А.Н. Беляева, В.В. Бушуева, Н.Н. Лизалека, Н.Л. Новикова, Симуса Д. Гарви и других. Их исследования посвящены разработке средств релейной защиты и автоматики (РЗА), не допускающих выхода из синхронизма параллельно работающих генераторов в составе автономной энергетической системы. Изучению же использования электромагнитного вариатора для ветроэнергетических установок посвящены работы отечественных и зарубежных ученых, среди которых А.А. Афанасьев, П.А. Курбатов, О.Н. Молоканов, Л.Б. Ганзбург, Я. П. Ахо, Л. Гордон, К. Аталлах, К. Бинхам, Л. Юлонг, Р. Монтегью, Сиу Лау Но и другие. Их исследования рассматривают работу одной ветроэнергетической установки с электромагнитным вариатором, не учитывая особенностей её присоединение к различным видам сетей. Однако ими не был проведён анализ электромеханических переходных процессов в составе АЭС, состоящей из нескольких ветроэнергетических установок, которые соединены между собой линиями электропередачи с учетом различных возмущающих воздействий со стороны ветровой турбины и нагрузки.

Целью диссертационной работы является исследование переходных режимов ветроэнергетических установок с электромагнитными вариаторами в АЭС. Также целью является разработка электромагнитного вариатора и способов управления им, обеспечивающих электромеханическую совместимость параллельной работы генераторов энергоблоков ВЭС в составе АЭС.

Для достижения сформулированной цели поставлены следующие **задачи**:

1. Исследование проблемы обеспечения электромеханической совместимости работы генераторов группы ветроэнергетических станций.
2. Исследование электромеханических переходных процессов в АЭС, оценка эффективности законов управления при различных возмущающих воздействиях в ВЭС на базе ветроэнергетических установок (ВЭУ) с электромагнитным вариатором.
3. Разработка технических решений по созданию электромагнитного вариатора и его динамической модели.
4. Разработка законов и алгоритмов управления электромагнитным вариатором в составе ВЭУ, обеспечивающих электромеханическую совместимость с АЭС.
5. Разработка законов и алгоритмов комплексного управления электромагнитным вариатором и механическим моментом турбины ВЭУ (на примере управления аэродинамикой лопастей).
6. Обоснование возможности и целесообразности использования электромагнитного вариатора в составе ВЭУ в целях реализации регулирования частоты в АЭС.
7. Верификация модели на экспериментальном стенде.

Научная новизна работы

В результате проведенной исследовательской работы были получены новые результаты:

1. Введено новое понятие эквивалентного угла ротора генератора, представляющего собой сумму углов ротора быстроходного звена электромагнитного вариатора и угла корректировки, возникающего за счет динамической связи ротора генератора и турбины. Данная корректировка состоит из разности угла быстроходного звена электромагнитного вариатора со стороны генератора, умноженного на число пар его полюсов и угла тихоходного звена вариатора, умноженного на число его ферромагнитных сегментов. Эту величину предложено называть приведенным углом дополнительного рассогласования.

2. Подтверждено экспериментально, что приведенный угол дополнительного рассогласования можно измерять косвенным способом, путем известных значений скоростей вращения турбины и генератора, а регулирование этого угла позволяет стабилизировать частоту вращения генератора изменением добавочного момента электромагнитным вариатором на его валу.

3. Сформулирована концепция комплексного управления скоростью вращения генератора на быстроходной стороне электромагнитного вариатора с использованием управления добавочным моментом электромагнитного вариатора и на тихоходной стороне турбины, путем изменения угла заклинивания турбины ВЭУ для обеспечения электромеханической совместимости с АЭС.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии построения систем управления ветроэнергетическими установками на базе электромагнитного вариатора и способов его управления, обеспечивающих электромеханическую совместимость генераторов ВЭС в составе АЭС.

Практическая значимость и реализация результатов

В ходе исследований были приведены результаты, обладающие практической значимостью:

- предложена компоновка ВЭУ с электромагнитным вариатором, позволяющая создать ВЭУ с повышенной регулировочной способностью;
- разработаны динамические модели электромагнитного вариатора в составе ВЭУ, позволяющие регулировать значение приведенного угла рассогласования роторов турбины и генератора;
- проведена верификация динамической модели электромагнитного вариатора на экспериментальном стенде, которая обеспечивает достоверность моделирования процессов управления приведенным углом дополнительного рассогласования роторов турбины и генератора;
- разработаны алгоритмы управления ветроэнергетической установкой с электромагнитным вариатором, обеспечивающие стабилизацию скорости вращения ротора генератора при сильных возмущениях в АЭС.

Разработанные в диссертации технические решения были использованы при проектировании серийного образца ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения на базе электромагнитного вариатора в компаниях ООО «ЭКОФАКЕЛ» (г. Новосибирск) и АО «Сибирские приборы и системы» (г. Омск).

Личный вклад автора

Соискателем совместно с научным руководителем были поставлены цель и задачи исследования. Соискателем в соавторстве были опубликованы статьи в российских и зарубежных изданиях. Было проанализировано текущее состояние исследований по обеспечению устойчивой параллельной работы электрических генераторов. Также разработаны алгоритмы стабилизации скорости вращения ротора генератора для реализации функции центрального регулятора частоты в АЭС и согласования фазы по ведущему генератору при параллельной работе разных видов источников с использованием электромагнитного вариатора при различных возмущающих воздействиях в АЭС.

Методология диссертационного исследования

Методологической и теоретической основой диссертационного исследования послужили научные работы отечественных и зарубежных ученых, касающиеся вопросов устойчивости АЭС, построения высокоэффективных электромеханических преобразователей, а также систем векторного управления ими.

Методы диссертационного исследования

Теория нелинейных дифференциальных уравнений, математическое моделирование, элементы теории автоматического управления и метод объектно-визуального моделирования в среде Matlab для анализа структурных схем и синтеза законов и алгоритмов регулирования. Методы исследования анализа векторного управления с использованием уравнений Парка-Горева. Структурный анализ уравнений электромагнитного вариатора для разработки их динамических моделей. Численное моделирование на базе метода конечных элементов и анализ переходных процессов синхронного генератора и электромагнитного вариатора в АЭС.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Для приведения электродинамической системы турбина-вариатор-генератор-линия-шины бесконечной мощности (ШБМ), при моделировании её устойчивости, к системе турбина-генератор-линия-ШБМ введено понятие эквивалентного угла ротора генератора, представляющего собой сумму углов ротора генератора и его корректировки за счет динамической связи ротора генератора и турбины. Данную корректировку предложено называть приведенным углом дополнительного рассогласования, который определяется разностью угла быстроходного звена, умноженного на число пар его полюсов со стороны генератора электромагнитного вариатора и угла тихоходного звена, умноженного на число ферромагнитных сегментов его вариатора со стороны турбины. Формирование угла рассогласования вызвано действием вариатора, формирующего добавочный момент на валу генератора. Экспериментально доказано, что приведенный угол рассогласования можно измерять косвенным способом, путем измерения скоростей вращения турбины и генератора, а регулирование этого угла позволяет стабилизировать частоту вращения генератора изменением добавочного момента на валу генератора.

2. Доказано, что необходимым условием обеспечения устойчивости автономной электроэнергетической системы является возможность управления

жесткостью магнитной связи, которая формируется с помощью изменения приведенного угла дополнительного рассогласования θ_e , при регулировании скорости вращения генератора.

3. Сформулирована концепция комплексного управления скоростью вращения генератора на быстроходной стороне электромагнитного вариатора и на тихоходной стороне турбины с использованием управления добавочным моментом электромагнитного вариатора и углом заклинения турбины ВЭУ. Это позволяет обеспечить высокое быстродействие регулирования скорости генератора при минимальной мощности управления электромагнитным вариатором.

4. Определено условие внутренней устойчивости электромагнитного вариатора, которое состоит в стабилизации угла дополнительного рассогласования между роторами генератора и турбины. Путем линеаризации механической характеристики электромагнитного вариатора определены допустимые диапазоны изменения механического момента и приведенного угла дополнительного рассогласования, обеспечивающих внутреннюю устойчивость вариатора.

Степень достоверности результатов

Достоверность разработанных динамических моделей была подтверждена экспериментальными исследованиями макетного образца, что дает основания считать достоверными сформулированные законы управления и результаты моделирования электромеханических переходных процессов в АЭС.

Апробация работы

Основные теоретические положения и результаты диссертационной работы докладывались на III и IV Международных технологических форумах «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2016 и 2017 гг); X Международной научно-технической конференции «Энергия - 2015» (Иваново, 2015г); XI Международном форуме по стратегическим технологиям IFOST-2016 (Новосибирск, 2016); XII Новосибирском инновационно-инвестиционном форуме «Инновационная энергетика» (Новосибирск, 2016); Всероссийской научной конференции с международным участием и на X молодежной школе «Возобновляемые источники энергии» (Москва, 2016); Международном военно-техническом форуме «Армия -2017» (Кубинка, 2017); Всероссийском конкурсе инновационных проектов и разработок в области электроэнергетики «Энергопрорыв - 2017» (Сколково, 2017); XI Международной IEEE научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2017), V международном технологическом форуме «Технопром - 2017» (Новосибирск, 2017).

По теме диссертационного исследования было опубликовано 25 работ, в том числе: 8 – статей в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 2 – патента РФ, 9 – статей, индексируемые в Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы, состоящий из 102 наименований и 4 приложений. Общий объем диссертации – 177 страниц, в том числе 155 страниц основного текста, включая 88 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена область исследования, актуальность темы, характеристика исследования, сформированы идея, цель, основные задачи и научная новизна работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, обоснована степень их достоверности.

В первой главе представлен литературный обзор средств по обеспечению устойчивости АЭС при переходных процессах в ней. В целях исследования электромеханической совместимости при параллельной работе генераторов в АЭС при сильных возмущающих воздействиях, предлагается применение электромагнитного вариатора в составе ВЭУ вместо механического редуктора. Электромагнитный вариатор представляет собой электромеханическую систему с изменяемым выходным вращающим моментом, который формирует добавочный момент для стабилизации скорости на валу генератора. Также, вариатор представляет собой двухмассовую электромеханическую систему, которая формируется за счет упругой магнитной связи между турбиной и генератором, образованной дополнительным приведенным углом рассогласования. Для иллюстрации приведенного угла дополнительного рассогласования между турбиной и генератором в электромагнитном вариаторе представлен рисунок 1, где изображены сравнительные механические характеристики между классической компоновкой (а) и компоновкой с электромагнитным вариатором (б). Классическая компоновка имеет одно колебательное звено, выраженное электрическим углом δ между векторами ЭДС генератора и напряжением ШБМ. Классическая компоновка имеет одно колебательное звено, выраженное электрическим углом δ между векторами ЭДС генератора и напряжением ШБМ.

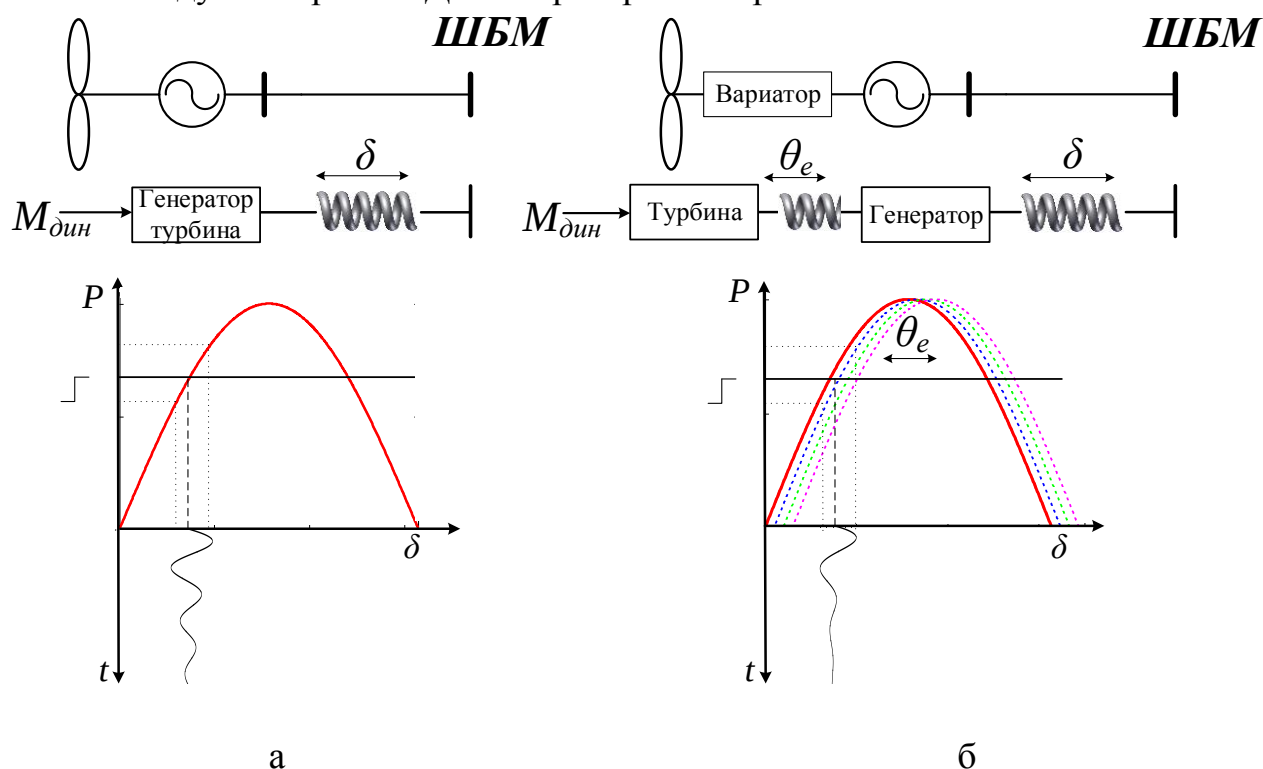


Рисунок 1 – Сравнительная механическая характеристика (а) - системы турбина-генератор-линия-ШБМ (б) - системы турбина-вариатор-генератор-линия-ШБМ

В компоновке с электромагнитным вариатором отражено два колебательных звена; таким образом, можно наблюдать влияние дополнительного приведенного угла рассогласования в двухмассовой системе, формирующее жесткость между турбиной и генератором. Вместе с тем, электромагнитный вариатор выполняет функцию демпфера колебаний угла δ в АЭС при переходных процессах в ней путём изменения приведенного угла θ_e . Различают три класса ВЭС в зависимости от доли мощности ВЭУ от полной мощности АЭС, в которую они включены. К первому классу, в основном, относятся отдельно стоящие одnogенераторные ветроэнергетические установки или системы, в которых мощность ВЭУ в 5 раз превышает мощность других генерирующих устройств. В таких системах проблема устойчивости не стоит. Ко второму классу относятся ветроэнергетические комплексы, подключенные к большой энергетической системе. Третий класс представляет собой автономную систему, состоящую из нескольких ВЭУ и дизельного электрогенератора. Параллельная работа генераторов, входящих в энергосистему, отличается от АЭС на одnogенераторной системе присутствием линии электропередачи, объединяющей электрические генераторы. Наличие сопротивления в линии электропередачи снижает синхронизирующую мощность генераторов, которая ухудшает условия параллельной работы. Более того, резкие возмущающие воздействия в АЭС, которые случаются при выключениях, коротких замыканиях, внезапном сбросе или при резком повышении мощности нагрузки потребителей, приводит к нарушению устойчивой параллельной работы. Это является наиболее тяжелой аварией, поэтому изучение проблемы устойчивости в автономных электроэнергетических системах переменного тока является актуальной задачей.

Проведено исследование электромеханических переходных процессов при резком изменении мощности нагрузки в АЭС, представлен анализ проблем, возникающих при реализации параллельной работы синхронных генераторов. Из осциллограмм следует, что после возмущающих воздействий в АЭС наблюдается выход из синхронизма генераторов вследствие различий в параметрах постоянных времени механической инерции роторов генераторов.

Одним из способов решения данной проблемы является использование ветроэнергетических установок с автобалластными системами регулирования режимов АЭС. В качестве балластной нагрузки применяют резисторы, которые выделяют тепло для нагревания воды. Балластные резистивные нагрузки подключаются через вентильный регулятор мощности на выходе синхронного генератора параллельно с нагрузкой электростанции. В литературе описывается способ сохранения устойчивости АЭС с использованием накопителей энергии. Например, реализация двух видов накопителей энергии с разными постоянными времени разряда является одним из условий повышения динамических характеристик, так как ограниченное применение накопителей обусловлено их низкой удельной энергоёмкостью и ограниченным жизненным циклом. Исследователями Ли Д, Уйанг П. и Сан К. в 2016 г. были проведены натурные испытания и исследования возможностей использования аккумуляторов на основе сверхпроводящих магнитных накопителей (СМН) энергии для стабилизации частоты в АЭС. Можно отметить, что исследование не отражает взаимное со-

гласование контуров управления, которое может повлечь появление автоколебаний частоты в АЭС. Проведен обзор существующих средств преодоления проблем параллельного подключения синхронных генераторов с постоянными магнитами, в том числе, с использованием вставки постоянного тока (ВПТ). При резких изменениях режима нагрузки или при коротком замыкании в нагрузке происходит резкое понижение напряжения, и, как следствие, напряжения в цепи управления. В отдельных случаях оно может снизиться до уровня ниже номинального, что приводит к блокировке транзисторов. Это создает условие невозможности выдачи активной мощности генератором в АЭС, которое приводит к перегрузке машины. Также одним из несовершенств ВПТ является высокая номинальная мощность, так как идёт двукратное преобразование энергии (выпрямление и преобразование) активной мощности, отдаваемой генератором. В данной диссертации рассматривается компоновка, в которой замещается полупроводниковый преобразователь частоты в силовой части сети на электромеханический преобразователь между генератором и турбиной, который реализует функцию поддержания скорости вращения генератора и обладает меньшей восприимчивостью к перегрузкам со стороны турбины и сети.

Среди отечественных исследователей в области поддержания параллельной работы различных источников электрической энергии в АЭС известны работы школы под руководством профессора Лукутина Бориса Владимировича из Томского политехнического университета. Эти исследования посвящены построению электроэнергетических систем на разных физических принципах преобразования энергии.

Якоб П. Ахо и Л. Гордон Крафт исследовали подход управления ветровой турбиной путем использования электромагнитного вариатора для устранения перегрузок, и, в качестве предположения, рассмотрели возможность использования его в средствах стабилизации скорости турбины. Они показали динамические характеристики электромагнитного вариатора, построили системы управления и произвели настройки регуляторов в целях улучшения характеристик при резких изменениях нагрузки ветровой турбины. В качестве недостатка их исследований можно отметить то, что ими не была затронута динамика накопителя энергии и его особенности, связанные со скоростью накопления электрической энергии и времени разряда. Также не было учтено влияние двухконтурного управления электромагнитным вариатором со стороны ветровой турбины в целях стабилизации скорости вращения ротора электрического генератора.

В первой главе проведен обзор существующих средств, обеспечивающих электромеханическую совместимость при параллельной работе с АЭС. Предложено использование электромагнитного вариатора для стабилизации скорости вращения генератора. Сформулированы задачи исследования.

Во второй главе приведены исследования электромагнитного вариатора ветроэнергетической установки в составе АЭС, состоящей из двух генераторов, линии электропередачи и нагрузки. Рассмотрен принцип построения комплексного управления скоростью вращения электромагнитного вариатора.

На рисунке 2 изображена АЭС, состоящая из двух ВЭУ с одинаковыми параметрами механической инерции генераторов, турбин и линий электропередачи, связывающих эти генераторы.

Математическое описание динамики роторов генераторов в энергетической системе, состоящей из двух машин, описывается системой уравнений:

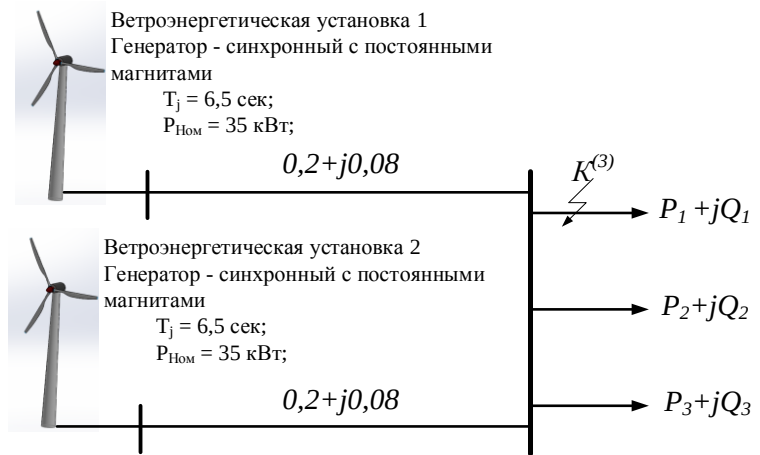


Рисунок 2 - Схема исследуемой автономной системы, состоящей из двух ВЭУ с одинаковыми параметрами генераторов, турбин и линий электропередачи

$$\begin{cases} T_{J1} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = \pm K_{EM1} - M_{EM1} - M_{12} \sin(\delta_{12}) \\ T_{J2} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = \pm K_{EM2} - M_{EM2} - M_{21} \sin(\delta_{21}), \end{cases} \quad (1)$$

где M_{EM1} , M_{EM2} – электромагнитные моменты первой и второй машины соответственно; M_{12} , M_{21} – взаимные моменты, вызванные параллельной работой первой машины по отношению ко второй и второй машины по отношению к первой соответственно; δ_{12} , δ_{21} – углы рассогласования ротора первой синхронной машины по отношению ко второй и второй машины по отношению к первой; δ_1 , δ_2 – углы положения роторов генераторов первой и второй машины; T_{J1} , T_{J2} – постоянные времени инерции роторов первого и второго генераторов соответственно, K_{EM1} , K_{EM2} – моменты упругости первой и второй машины.

Уравнение моментов со стороны турбин ВЭУ:

$$\begin{cases} T_{JT1} \frac{d^2 \delta'_1}{dt^2} = C_p \pi R_{blade}^2 \frac{\rho v^3}{2 \cdot \omega_{load}} \pm K_{EM1} \\ T_{JT2} \frac{d^2 \delta'_2}{dt^2} = C_p \pi R_{blade}^2 \frac{\rho v^3}{2 \cdot \omega_{load}} \pm K_{EM2} \end{cases}, \quad (2)$$

где v – скорость ветра, м/с; ω_{load} – скорость вращения турбины ВЭУ, рад/с; ρ – плотность воздуха; R_{blade} – радиус лопасти турбины ВЭУ, м; ω_{load} – скорость вращения турбины, рад/с; Z – быстроходность турбины; δ'_1 и δ'_2 – угловые положения роторов первой и второй турбины соответственно, град; T_{JT1} , T_{JT2} – постоянные времени механической инерции турбин первой и второй ВЭУ.

Коэффициент мощности турбины ВЭУ определяется по формуле:

$$C_p(Z_{turbine}, \beta) = 0,73(151 \cdot v / (Z_{turbine}) - 0,002\beta - 13,2)e^{-18,4v/(Z_{turbine})}, \quad (3)$$

где $Z_{turbine} = \omega_{load} R_{blade} / v$ – быстроходность ВЭУ; β – угол заклинивания лопастей турбины, град.

Принцип действия электромагнитного вариатора, как указывалось выше, эквивалентен управляемой упругости между турбиной и генератором. Уравне-

ние магнитной жесткостью может быть выражено через максимальный механический момент, передаваемый от тихоходного ротора к быстроходному, число ферромагнитных сегментов и приведенный угол дополнительного рассогласования:

$$\begin{cases} K_{EM1} = n_{S1} M_{\max1} \cos(\theta_{e1}) \\ K_{EM2} = n_{S2} M_{\max2} \cos(\theta_{e2}) \end{cases} \quad (4)$$

Приведенный угол дополнительного рассогласования θ_e электромагнитного вариатора определяется как угол между быстроходным и тихоходным роторами по следующему уравнению:

$$\theta_e = p_h \delta - n_s \delta', \quad (5)$$

где δ и δ' – угол положения быстроходного и тихоходного роторов; p_h – число пар полюсов быстроходного звена электромагнитного вариатора; n_s – число ферромагнитных сегментов электромагнитного вариатора.

На рисунке 3 изображена компоновка ветроэнергетической установки с электромагнитным вариатором. В настоящей работе предлагается заменить механический редуктор вариатором. Изменение вращающего момента электромагнитного вариатора в этом случае позволит стабилизировать частоту вращения генератора. Суть комплексного управления состоит во взаимодействии управления со стороны электромагнитного вариатора и аэродинамики лопастей турбины ВЭУ. Как известно, ветроэнергетическая установка имеет три основных зоны работы в зависимости от скорости ветра. В первой зоне ветровая турбина не работает (от 0 до 5 м/с), во второй зоне турбина работает не на полную мощность (от 5 до 13 м/с), в третьей зоне турбина работает в режиме ограничения мощности. Отметим, что достаточно продолжительное время ветроэнергетические установки работают во второй зоне. Более того, во второй зоне возможно изменение скорости вращения турбины исходя из принципа максимального отбора мощности.

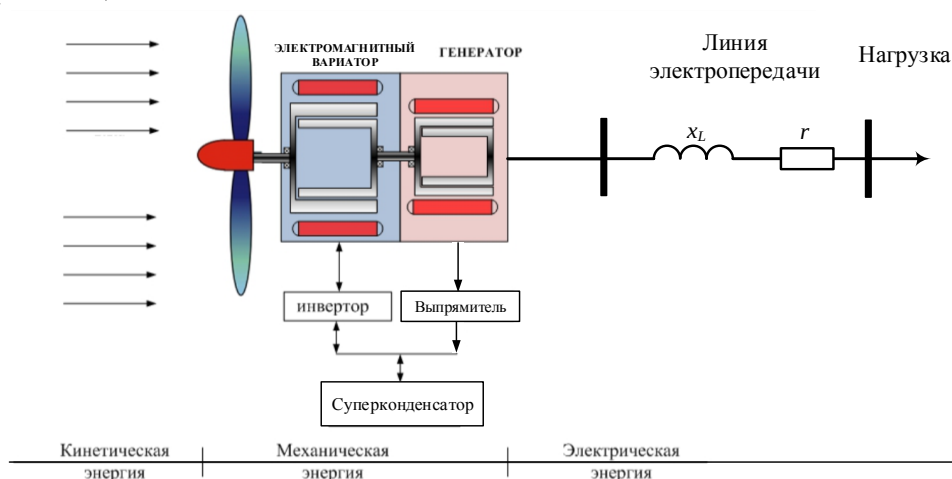


Рисунок 3 - Компоновка ВЭУ на базе электромагнитного вариатора и синхронного генератора

Традиционно угол заклинивания во второй зоне равен нулю и регулируется только в третьей зоне. Однако канал управления углом заклинивания можно использовать для управления моментом ветровой турбины. Но недостатком тако-

го регулирования является высокая постоянная времени, обусловленная медленным перемещением лопасти относительно её оси. С точки зрения энергетических показателей такой способ изменения момента наиболее привлекательный, так как он обеспечивает широкий диапазон изменения мощности без участия силовых преобразователей. «Быстрое» изменение момента можно сформировать путем интегрирования в ВЭУ электромагнитного вариатора, который получает питание от буферного суперконденсатора. При этом исследования, проведенные Якобом П. Ахо и Л. Гордоном Крафтом, показали, что мощность (момент), вносимая (ый) интегрированным двигателем электромагнитного вариатора, может составлять около 20% от полной мощности (вращающего момента) турбины. Достоинством такого построения является высокое быстродействие. Недостатком же является ограниченное время формирования дополнительного момента в связи с ограниченной ёмкостью накопителя. Устранить недостатки обоих способов формирования дополнительного момента можно, включив на параллельную работу контур изменения угла заклинения и контур формирования момента интегрированного двигателя. Однако при параллельной работе возникает конкуренция (конфликт) обоих контуров, который даже в статическом режиме может вызвать ненулевое значение компенсирующего момента и, соответственно, загрузку силового преобразователя с разрядом аккумуляторной батареи. Структура комплексного управления содержит двухконтурную систему формирования компенсирующего момента, при этом быстрый контур управления электромагнитного вариатора создает дополнительный момент, обеспечивающий стабилизацию скорости, либо слежение за фазой более мощного, ведущего генератора электрической энергии. Второй контур управления, изменяющий угол заклинения турбины, регулирует вращающий момент, чтобы снизить до нуля компенсирующий момент электромагнитного вариатора.

Во второй главе представлена математическая модель АЭС, состоящая из нескольких ВЭУ с электромагнитными вариаторами. Описан физический принцип работы электромагнитной трансмиссии. Описана целесообразность применения электромагнитного вариатора в составе ВЭУ. Определены рабочие диапазоны углов дополнительного рассогласования для обеспечения внутренней устойчивости электромагнитного вариатора.

В третьей главе представлены законы векторного управления параметрами электромагнитного вариатора при реализации комплексного регулирования скорости вращения ведущего генератора в АЭС.

Критерием для ведущего генератора ВЭУ с электромагнитным вариатором в автономной системе следует считать высокую установленную мощность генератора и ёмкость накопителя. Такая компоновка ВЭУ обеспечивает широкий динамический диапазон изменения вращающего момента электромагнитного вариатора, и, как следствие, генератора.

В целях регулирования скорости электромагнитного вариатора различают два контура управления: контур тока (или момента) и контур скорости. Закон управления электромагнитным вариатором по контуру тока описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \frac{\omega_e L_q i_q}{L_d} + \frac{u_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \frac{\omega_e L_d i_d}{L_q} + \frac{u_q - K_e \omega_h}{L_q} \end{cases} \quad (6)$$

где L_d и L_q – индуктивности звена управления в d и q осях; R – активное сопротивление звена управления вариатором; K_e – коэффициент противо-ЭДС; u_d и u_q – напряжения в d и q осях; ω_h – скорость быстроходного звена; $\omega_e = p_h \cdot \omega_h - n_s \cdot \omega_0$ – приведенная угловая скорость дополнительного рассогласования вариатора.

Зависимость вращения тихоходного и быстроходного валов, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} J_h \frac{d\omega_h}{dt} = M_{em} - \frac{M_{\max}}{G_r} \cdot [\sin(p_h \theta_h - n_s \theta_{Load})] - B_h \omega_h - \mu_{ap} (p_h \omega_h - n_s \omega_{Load}) \\ J \frac{d\omega_0}{dt} = M_{\max} \sin(p_h \theta_h - n_s \theta_{Load}) - M_{Turbine} - B_0 \omega_0 - \mu_{ap} G_r (p_h \omega_h - n_s \omega_{Load}), \end{cases} \quad (7)$$

где J_h , B_h – момент инерции генератора и коэффициент сопротивления на высокой стороне трансмиссии; ω_0 , J , B_0 – угловая скорость, суммарный момент инерции тихоходного вала, коэффициент трения; μ_{ap} – коэффициент затухания; n_s – число ферромагнитных сегментов электромагнитного вариатора; p_h – число пар полюсов быстроходного ротора электромагнитного вариатора; $G_r = n_s / p_h$ – передаточное отношение электромагнитного вариатора в номинальном режиме; $M_{Turbine}$ – момент турбины ВЭУ; $M_{\max}$ – максимальный момент, передаваемый электромагнитным вариатором.

Коэффициент затухания магнитной трансмиссии выражается уравнением Монтегью:

$$\mu_{ap} = \sigma M_{\max} \frac{2\chi\omega_e}{\omega_e^2 + \chi^2}, \quad (8)$$

где σ – доля от максимального момента, которую может передать электромагнитный вариатор; χ – относительная угловая скорость, при которой происходит затухание максимального момента.

Передаточная функция, выражающая отношение между моментом электромагнитного вариатора, скоростью вращения турбины и скоростью вращения генератора, выражена следующими уравнениями:

$$\frac{\omega_0(p)}{M_{EM}(p)} = \frac{p^2 + \omega_a^2}{J_h p^3 + J_h \omega_r^2 p} \quad (9)$$

$$\frac{\omega_h(p)}{M_{EM}(p)} = \frac{\omega_a^2}{J_h p^3 + J_h \omega_r^2 p} \quad (10)$$

Передаточная функция замкнутой системы управления электромагнитным вариатором равна отношению начальной скорости вращения турбины к заданной скорости турбины и определяется следующим выражением:

$$\frac{\omega_0(p)}{\omega_{ref}(p)} = \frac{K_I \omega_a^2}{J_h p^4 + K_p p^3 + (J_h \omega_0^2 (1+R) + K_I) p^2 + K_p \omega_a^2 p + K_I \omega_a^2}, \quad (11)$$

где $\omega_a = \sqrt{K_{em}/J}$ – антирезонансная частота; $R = J/J_h$ – соотношение моментов инерции роторов турбины и генератора; $\omega_r = \omega_0 \sqrt{(R+1)}$ – резонансная частота, K_I ,

K_P – коэффициенты *ПИ* регулятора, ω_0 – скорость турбины; ω_{ref} – заданная скорость вращения.

Передаточная функция, в свою очередь, равна отношению начальной скорости вращения замкнутой системы к заданной скорости ротора электрического генератора и определяется следующим выражением:

$$\frac{\omega_h(p)}{\omega_{ref}(p)} = \frac{(K_I p^2 + K_I K / J)}{J_h p^4 + K_P p^3 + (K_I + K(1 + J_h / K_L)) p^2 + K_P K / J_h \cdot p + K_I K / J_h}, \quad (12)$$

где K – линеаризованный коэффициент упругости магнитной связи.

На рисунке 4 отображен комплексный алгоритм стабилизации частоты вращения электрического генератора с использованием магнитного вариатора и аэродинамического конура с регулируемым углом заклинения.

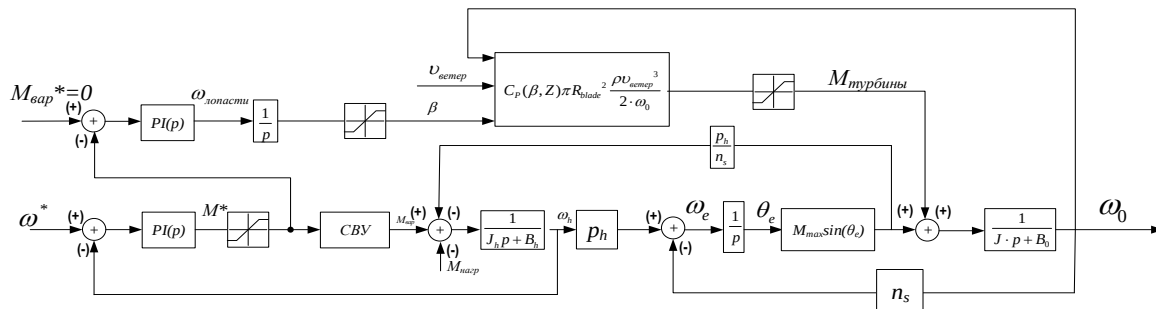


Рисунок 4 – Структура алгоритма стабилизации скорости вращения быстроходного ротора магнитного вариатора со стороны электрического генератора

На рисунке 5 представлены логарифмические амплитудно-частотные характеристики электромагнитного вариатора со стороны генератора и ветроэнергетической турбины.

В подавляющем большинстве случаев электроэнергетические системы являются смешанными, т.е. имеют в своем составе электростанции и турбины разных типов. Рассмотрим алгоритм стабилизации скорости вращения параллельно работающих электрических генераторов, имеющих разную постоянную времени механической инерции роторов. В АЭС, содержащей разные виды источников, для электромагнитного вариатора предусмотрен алгоритм управления с фазовой коррекцией по ведущему генератору.

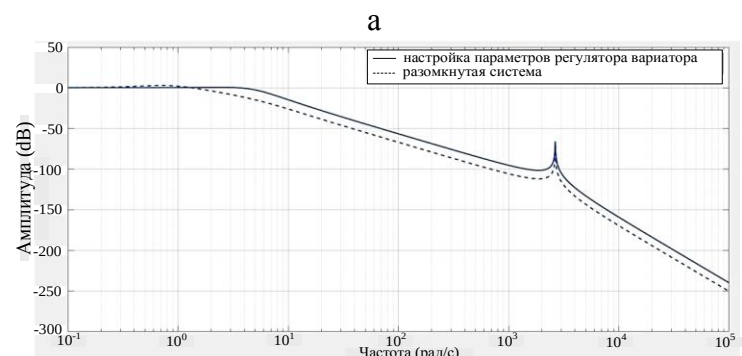
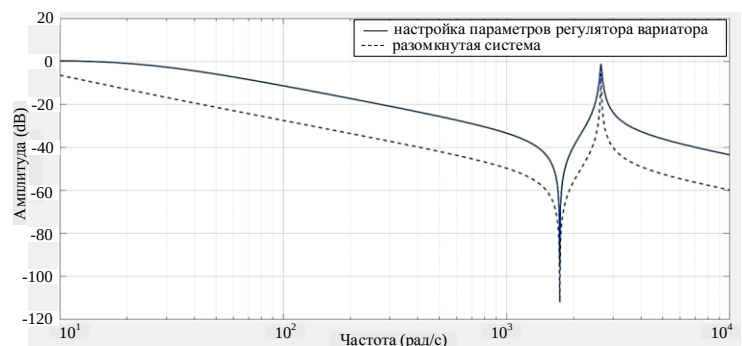


Рисунок 5 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы вариатора (а) – со стороны генератора (б) – со стороны ветроэнергетической турбины

Передаточная функция контура управления фазовой коррекцией электромагнитного вариатора ведомого генератора определяется отношением начального фазового положения ротора ведомого генератора к заданному углу положения ведущего генератора в АЭС и определяется следующим выражением:

где K_D, K_P – коэффициенты пропорционально-дифференциального регулятора.

[illegible]

На рисунке 7 представлена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика электромагнитного вариатора при реализации фазовой коррекции по ведущему генератору в АЭС.

16

комплексного управления частотой вращения электромагнитного вариатора. Определены показатели качества переходного процесса при работе электромагнитного вариатора в АЭС. Произведен синтез законов управления по методу Мейсена. Представлены экспериментальные исследования, доказывающие наличие и влияние на момент приведенного угла дополнительного рассогласования при формировании добавочного момента со стороны генератора.

В четвертой главе представлены исследования переходных процессов в автономной системе при различных возмущающих воздействиях. На рисунке 8 изображены осциллограммы напряжений при резком снижении мощности нагрузки на 15%. Представлены осциллограммы переходных процессов при использовании алгоритма стабилизации скорости вращения ротора генератора путем применения комплексного управления электромагнитным вариатором. Отметим, что при резком изменении мощности в автономной системе при использовании алгоритмов стабилизации скорости вращения электромагнитного вариатора со стороны генератора наблюдается стабилизация напряжения.

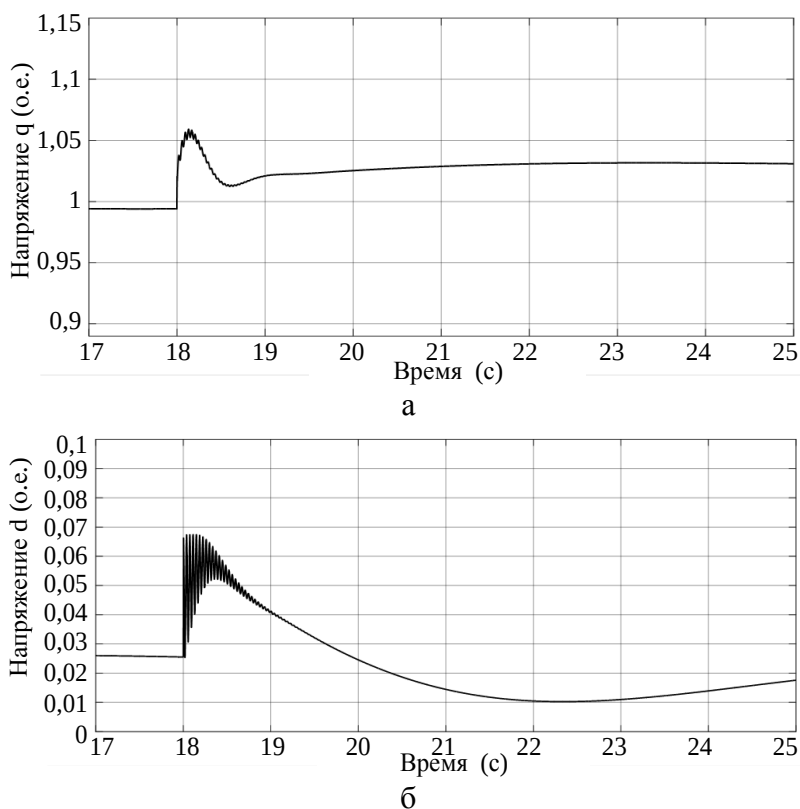


Рисунок 8 – Осциллограммы напряжения в автономной системе при резком снижении активной мощности нагрузки на 15% (а) - по оси q (б) - по оси d

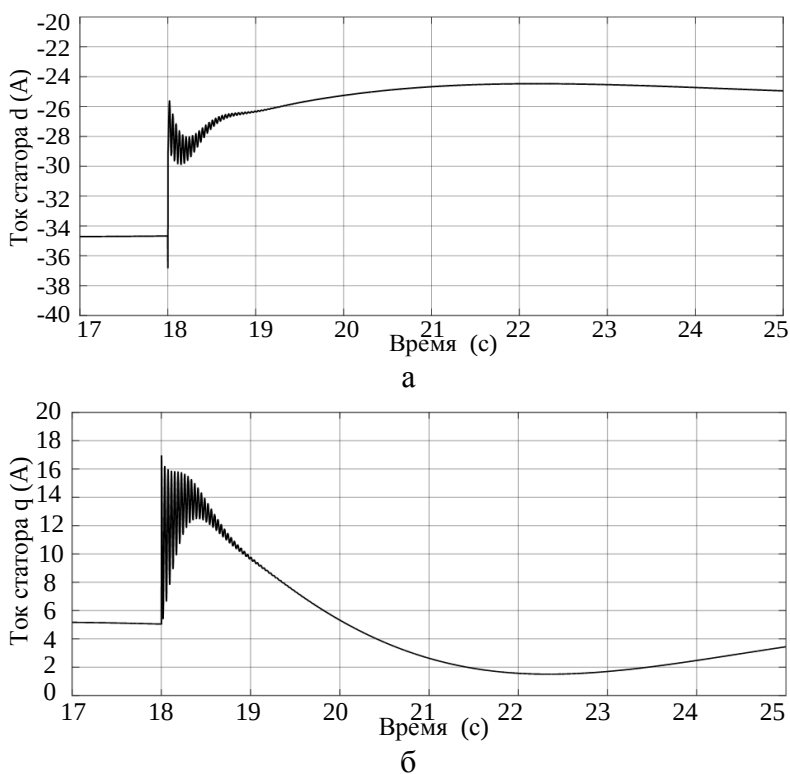


Рисунок 9 – Осциллограмма тока по оси d - q в автономной системе при резком сбросе нагрузки на 15% (а) - по оси d (б) - по оси q

На рисунке 9 изображена осциллограмма токов по осям d и q . Отметим, что анализ осциллограмм напряжения, изображенных на рисунке 8 и тока на рисунке 9, показывает, что соблюдается генераторный режим до и после переходного процесса.

На рисунке 10 отображена осциллограмма электрического угла положения ротора генератора в АЭС. В случае использования алгоритма поддержания синхронной скорости вращения ротора генератора с использованием электромагнитного вариатора с комплексной системой управления сохраняется синхронная работа генераторов.

Наиболее тяжелым режимом является трехфазное короткое замыкание (КЗ). В этот период наблюдается снижение напряжения. Электромагнитный вариатор предполагает участие в период стабилизации скорости вращения генераторов в АЭС после КЗ.

На рисунке 11 отображены осциллограммы напряжений по осям d и q . Из анализа осциллограмм следует, что время восстановления составляет около 2 сек.

Рисунок 12 отображает осциллограммы электрического угла положения ротора генератора в случае использования алгоритма стабилизации скорости вращения электромагнитным вариатором. При коротком замыкании наблюдается торможение ротора, которое приводит к выпадению его из синхронизма. Далее, при реализации алгоритма стабилизации скорости вращения ротора после короткого замыкания происходит три поворота с последующим восстановлением результирующей устойчивости в АЭС через 2 сек.

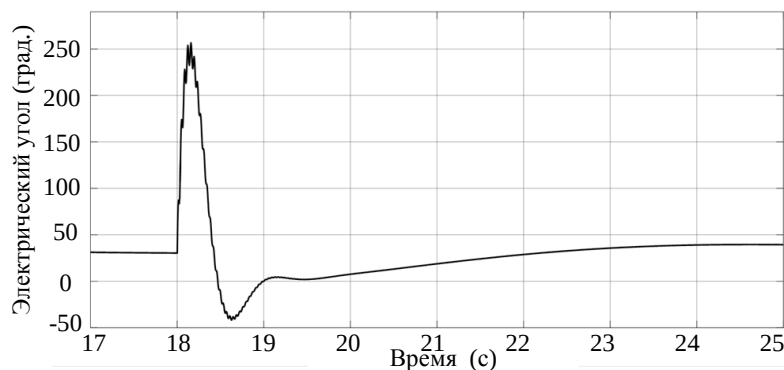


Рисунок 10 – Осциллограмма электрического угла положения ротора СГПМ

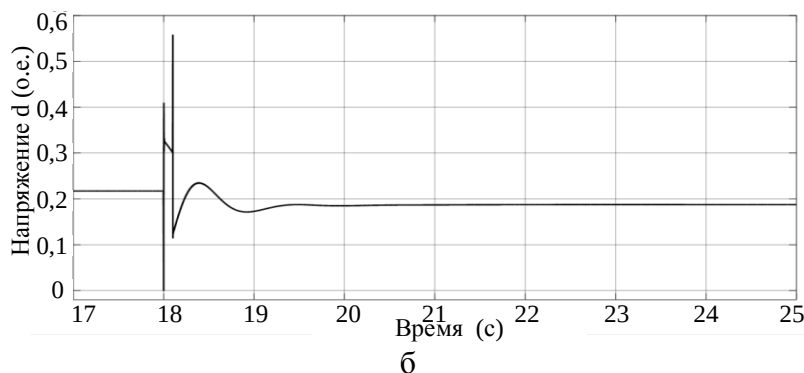
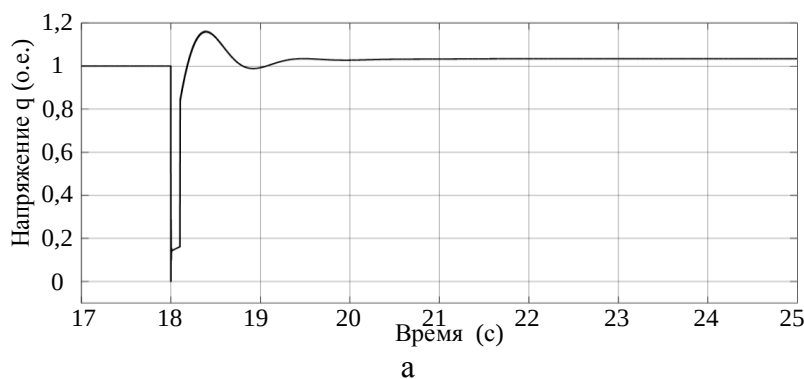


Рисунок 11 – Осциллограмма напряжений при удаленном коротком замыкании (а) - по оси q (б) - по оси d

На рисунке 13 изображена АЭС, состоящая из генераторов с разными параметрами постоянной времени механической инерции ротора. Были рассмотрены особенности построения алгоритма фазовой коррекции. Отмечено, что ведущей станцией является ВЭУ с большей постоянной времени механической инерции ротора.

На рисунке 14 изображена осциллограмма приведенного угла дополнительного рассогласования электромагнитного вариатора ВЭУ с алгоритмом фазовой коррекции при резком сбросе нагрузки в АЭС. Из анализа осциллограммы следует, что при возмущении в АЭС фаза ведомой ВЭУ с электромагнитным вариатором претерпевает отклонение до момента установления устойчивого положения.

На рисунке 15 изображена осциллограмма скорости вращения приведенного рассогласования быстроходного и тихоходного роторов электромагнитного вариатора. Как видно из осциллограммы, происходит кратковременное изменение скорости, которое впоследствии устраняется. Это изменение скорости формирует согласование фазы ведомого генератора ВЭУ с ведущим в АЭС.

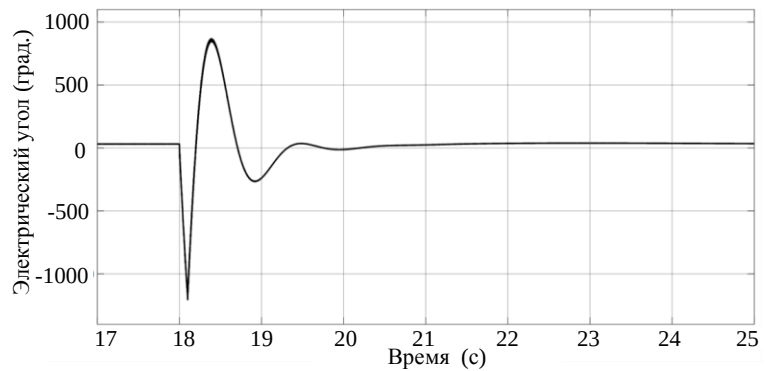


Рисунок 12 – Осциллограмма электрического угла положения ротора генераторов

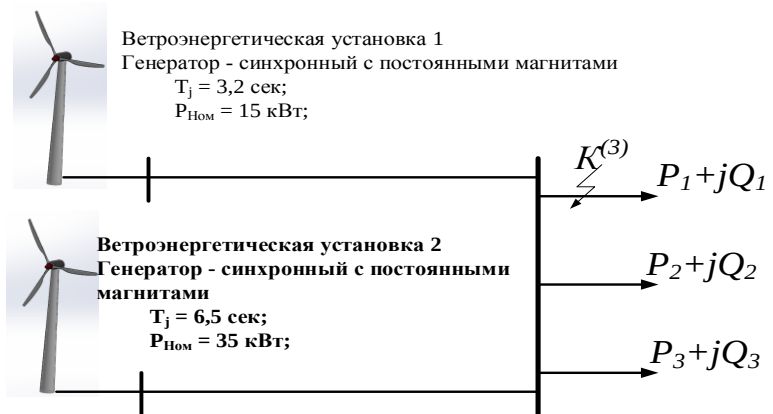


Рисунок 13 – Структурная схема исследуемой автономной энергосистемы состоящей из двух ВЭУ с разными параметрами T_{j1} и T_{j2}

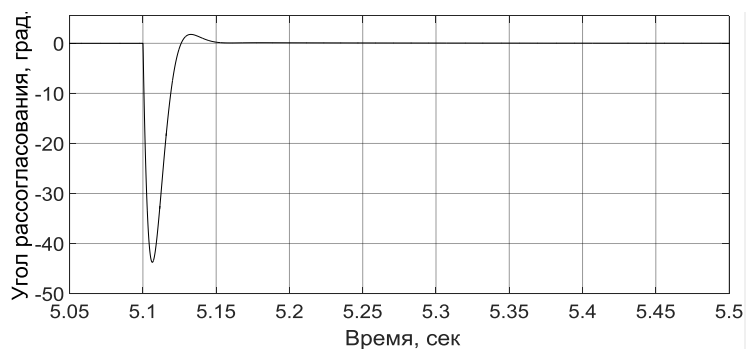


Рисунок 14 - Осциллограмма приведенного угла дополнительного рассогласования электромагнитного вариатора

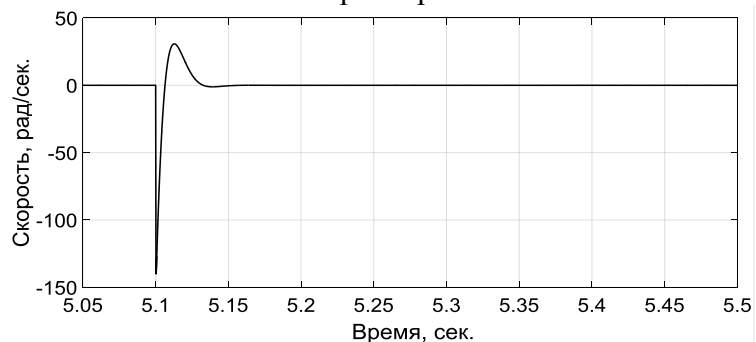


Рисунок 15 – Осциллограмма приведенного рассогласования скорости вращения быстроходного и тихоходного роторов электромагнитного вариатора

На рисунке 16 изображена осциллограмма дополнительного вращающего момента электромагнитного вариатора. Из неё следует, что в течение 200 мс после возмущения происходит резкое возрастание дополнительного вращающего момента электромагнитного вариатора, которое затем падает в два раза, и, после установления нового фазового положения, падает до нуля через 100 мс.

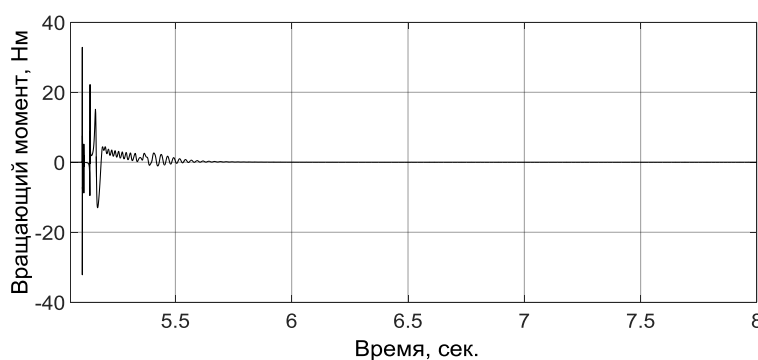


Рисунок 16 – Осциллограмма дополнительного вращающего момента электромагнитного вариатора при возникновении возмущающего воздействия в АЭС

В четвертой главе представлены результаты переходных процессов при различных видах возмущающих воздействий в АЭС. Рассмотрены варианты исполнения АЭС, состоящей из ВЭУ как с одинаковыми, так и с разными параметрами постоянных времени механической инерции генераторов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ переходных процессов в автономной электроэнергетической системе, состоящей из двух ветроэнергетических установок при сбросе мощности нагрузки и при коротком замыкании. Исследованы переходные процессы при сбросе и увеличении нагрузки на 15% при трехфазном КЗ на нагрузке при параллельной работе генераторов. Получены результаты математического моделирования параллельной работы генераторов в АЭС с использованием электромагнитного вариатора на каждой ВЭУ при изменениях скорости ветра.

2. Проведено исследование существующих средств, обеспечивающих электромеханическую совместимость параллельной работы ВЭУ в составе автономной системы. Представлен анализ технических средств, обеспечивающих стабилизацию частоты в автономной системе путем поддержания баланса активной мощности с использованием различных накопителей энергии.

3. Было получено математическое описание физического принципа работы электромагнитного вариатора и его динамической модели при переходных процессах в АЭС. Это позволило создать и сделать описание динамических моделей электромагнитного вариатора при различных возмущающих воздействиях со стороны нагрузки. Модернизировано уравнение параллельной работы электрических генераторов с учетом наличия упругой магнитной связи K_{em} между турбиной и генератором, вносимой электромагнитным вариатором. Доказано наличие приведенного угла дополнительного рассогласования в электромагнитном вариаторе при возникновении возмущений со стороны генератора.

4. Сформулирован алгоритм комплексного управления выходной скоростью вращения электромагнитного вариатора. Создан алгоритм стабилизации скорости вращения электромагнитного вариатора, а также алгоритм фазовой коррекции при различных возмущающих воздействиях в АЭС, содержащей источники электрической энергии разной природы происхождения.

5. Получены экспериментальные результаты, которые подтверждают наличие и влияние на скорость вращения генератора приведенного угла дополнительного рассогласования электромагнитного вариатора при формировании добавочного момента со стороны генератора.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Achitaev, A. A. Increasing the regulating ability of lift force in the power-limited mode of wind turbines based on plasma technology / A.A. Achitaev, S.N. Udalov, R.D. Tarbill // Wind Engineering. - 2017. - Vol. 41, iss. 1. - P. 91-100.
2. Ачитаев, А. А. Исследование режимов работы ветроэнергетической установки на базе электромагнитной трансмиссии в составе автономной системы электроснабжения / С.Н. Удалов, А.А. Ачитаев, М.С. Юманов // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. - 2015. - № 5. - С. 32-35.
3. Ачитаев, А. А. Исследование магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением в ветроэнергетической установке в целях повышения запаса динамической устойчивости / С.Н. Удалов, А.Г. Приступ, А.А. Ачитаев // Известия Томского политехнического университета. - 2015. - Т. 326, № 10. - С. 123-132.
4. Ачитаев, А. А. Повышение запаса динамической устойчивости автономной энергетической системы на базе ветроэнергетических установок при резких изменениях режима нагрузки / С.Н. Удалов, А.А. Ачитаев, А.Г. Приступ, Б.М. Боченков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2016. - Т. 327, № 8. - С. 89–98.
5. Achitaev, A. A. Powers adjusting wind turbine means investigation = Исследование средств повышения регулирования мощности ветровой турбины / S.N. Udalov, N.V. Zubova, A.A. Achitaev // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. - 2017. - Т. 10, № 5. - С. 664-681.
6. Ачитаев, А. А. Повышение регулировочной способности ветроэнергетической установки в составе локальной энергосистемы / А.А. Ачитаев, С.Н. Удалов, А.Г. Приступ, Б.М. Боченков // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2017. – №. 3. – С. 33-40.
7. Ачитаев, А. А. Повышение эффективности ветроэнергетической установки путем использования псевдопрямого привода / А.А. Ачитаев, С.Н. Удалов, А.Г. Приступ, Д.М. Топорков // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2017. - № 5. - С. 59-63.
8. Ачитаев, А. А. Технология повышения регулировочной способности подъёмной силы в режиме ограничения мощности ветровой турбины средствами плазменной технологии / Удалов С.Н., Манусов В.З., Ачитаев А.А.// Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – №. 4.

В прочих изданиях

9. Achitaev, A. A. Structural model of a magnetic coupling / Sapsalev, A.V., Achitaev, A.A., Bogdanov, V.V., Savin, N.P., Davydenko, O.B. // Micro / Nanotechnologies and Electron Devices, 2016 17th International Conference of Young Specialists on. – IEEE, 2016. – P. 555-558.
10. Achitaev, A. A. Improving dynamic stability of a wind turbine using a magnetic continuously variable transmission/ Udalov S.N., Achitaev A.A., Pristup A.G. // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, 2016. – IEEE, 2016. – P. 1-4.
11. Achitaev, A. A. Investigations of a magnetic gear for application in wind turbines / Udalov S.N., Achitaev A.A., Pristup A.G. // Strategic Technology (IFOST), 2016 11th International Forum on. – IEEE, 2016. – P. 166-171.
12. Achitaev, A. A. Structural model of a magnetic gearbox / Sapsalev, A.V., Achitaev, A.A., Pristup, A.G., Savin, N.P., Kharitonov, S.A. // Micro / Nanotechnologies and Electron Devices, 2017 18th International Conference of Young Specialists on. – IEEE, 2017. – P. 568-571.
13. Achitaev, A. A. Innovative Means of Increasing the Adjustment Ability of Wind Turbine / Zubova N.V., Udalov S.N., Achitaev A.A. // Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications, 2015. – T. 698. – P. 592-596.
14. Achitaev, A. A. Increase Adjustment Capacity Generators for Power Supply Systems with Distributed Generation / Udalov S.N., Achitaev A.A., Yumanov M.S. // Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications, 2015. – T. 792. – P. 62-66.
15. Achitaev, A. A. Using a magnetic continuously variable transmission for synchronization of wind turbine generators under a variable wind speed / A.A. Achitaev, S.N. Udalov, A.G. Pristup, B.M. Bochenkov, Y.V. Pankratz // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Omsk, 14–16 Nov. 2017.–IEEE, 2017. – P. 1-6.
16. Achitaev, A. A. Increasing the regulating ability of wind turbines based on jet drive / A.A. Achitaev, S.N. Udalov //12 International forum on strategic technology: proc., Korea, Ulsan, 31 May –2 June 2017. – Ulsan, 2017. – Vol. 1. – P. 273-276.

Патенты:

17. Пат. 145935U1 РФ: Электрический генератор для ветроэнергетической установки. Авторы: Ачитаев А.А., Пчелинцев А.С.
18. Пат. 2592641 РФ: Электромеханическая система. Авторы: Ачитаев А.А., Удалов С.Н., Юманов М.С., Пчелинцев А.С.
19. Пат. 168788 РФ: Устройство генерирования стабильного напряжения переменного тока. Авторы: Ачитаев А.А., Жарков М.А., Сапсалева А.В., Харитонов С.А.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60x84/16. Объем 1.0 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 521. Подписано в печать . 2018 г.