

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи

Ачитаев Андрей Александрович

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

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук  
доцент С.Н. Удалов

Новосибирск – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЗОР СРЕДСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ ГЕНЕРАТОРОВ С АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ.....	13
1.1 Постановка задачи.....	13
1.2 Тенденции развития электрической генерации с переменной скоростью вращения .....	14
1.3 Классификация ветроэнергетических систем .....	16
1.4 Проблема электромеханической совместимости параллельной работы генераторов .....	22
1.5 Обзор технических средств, обеспечивающих электромеханическую совместимость в энергосистеме .....	25
1.6 Анализ исследований в области обеспечения электромеханической совместимости на базе электромеханических преобразовательных устройств с постоянными магнитами .....	31
1.7 Выводы.....	39
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВАРИАТОРЕ В СОСТАВЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ РАБОТЕ В АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ .....	41
2.1 Постановка задачи .....	41
2.2 Уравнение электромеханических переходных процессов в энергосистеме..	42
2.3 Целесообразность применения электромагнитного вариатора в ветроэнергетической установке.....	46
2.4 Описание физического принципа функционирования электромагнитного вариатора.....	54

2.5 Математическая модель физического принципа работы электромагнитной трансмиссии .....	57
2.6 Исследования режимов магнитной трансмиссии с использованием метода конечных элементов .....	61
2.7 Динамические модели электромагнитного вариатора .....	65
2.8 Аэродинамические способы управления моментом ветровой турбины .....	77
2.9 Выводы .....	84
<b>3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ .....</b>	<b>86</b>
3.1 Постановка задачи .....	86
3.2 Динамическая модель электромагнитного вариатора.....	86
3.3 Построение системы комплексного управления ветроэнергетической установки с электромагнитным вариатором в составе автономной электроэнергетической системы .....	93
3.4 Моделирование синхронного генератора с постоянными магнитами .....	96
3.5 Экспериментальные исследования электромагнитного вариатора при различных углах приведенного рассогласования.....	107
3.6 Выводы.....	113
<b>4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВАРИАТОРА .....</b>	<b>114</b>
4.1 Постановка задачи .....	114
4.2 Электромеханические переходные процессы в автономной электроэнергетической системе на базе генераторов с использованием электромагнитного вариатора при резком снижении и увеличении нагрузки..	114

4.3	Переходные процессы в автономной электроэнергетической системе при коротком замыкании в ней с использованием электромагнитного вариатора..	124
4.4	Переходные процессы системы электроснабжения при разнородном составе источников электрической энергии с использованием электромагнитного вариатора.....	128
4.5	Согласование скорости вращения роторов генераторов ветроэнергетических установок, имеющие разные постоянные времени механической инерции.....	133
4.6	Использование электромагнитного вариатора при поддержании синхронной скорости вращения генераторов ветроэнергетических установок при резких изменениях скорости ветра .....	137
4.7	Выводы .....	141
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....		143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		145
ПРИЛОЖЕНИЯ .....		156
Приложение А .....		157
Приложение Б .....		158
Приложение В.....		173
Приложение Г .....		176

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы**

Актуальность исследования связана с расширением использования ветроэнергетических установок с синхронными генераторами с постоянными магнитами на территории России. В большей степени это вызвано значительной площадью не электрифицированных регионов страны и удорожанием привозного топлива. При построении автономных систем с ветроэнергетическими установками, возникает проблема обеспечения электромеханической совместимости при сильных возмущающих воздействиях со стороны турбины ВЭУ или нагрузки потребителя. Решение этой проблемы может быть реализовано путём стабилизации частоты вращения генератора, либо путем стабилизации 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. Ограниченное применение этих накопителей обусловлено их низкой удельной энергоёмкостью и ограниченным жизненным циклом [1]. Для стабилизации частоты генерируемого напряжения при переменной частоте вращения турбины, в настоящее время, применяют полупроводниковые преобразователи со вставкой постоянного тока [8-21]. Реализация таких устройств затруднена в связи с тем, что при снижении напряжения в автономной электроэнергетической системе при коротком замыкании, происходит блокировка транзисторов. Это приводит к прекращению выдачи активной мощности в автономную энергетическую систему [8-10].

Основным каналом управления скоростью ветроэнергетической турбины является изменение угла заклинения лопастей (управление моментом) [12]. Недостатком этого канала управления является его большая инерционность, которая не позволяет обеспечить регулирование скорости вращения ротора генератора при быстроизменяющихся электромеханических переходных

процессах в автономной системе. Перспективным направлением построения ветроэнергетических систем в настоящее время является применение электромагнитных вариаторов в составе ветроэнергетических установок. Исследованию электроэнергетических систем с применением электромагнитных вариаторов посвящена данная работа. Вариатор встраивается между ветровой турбиной и генератором [42]. Быстродействующее изменение вращающего момента электромагнитного вариатора позволяет 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 при различных возмущениях в автономной энергетической системе (АЭС).

#### **Степень разработанности темы исследования**

Исследование по обеспечению устойчивой параллельной работы синхронных генераторов в составе автономных систем электроснабжения посвящено большое количество работ. Среди них можно выделить 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 [2-39]. Их исследования посвящены разработке средств релейной защиты и автоматики (РЗА), не допускающих выхода из синхронизма параллельно работающим генераторов в составе автономной энергетической системы. Работы по использованию электромагнитного вариатора для ветроэнергетических установок было посвящено ряд отечественных и зарубежных работ А.А. Афанасьева, П.А Курбатова, О.Н. Молоканова, Л.Б. Ганзбурга, Якоба П. Ахо, Л. Гордона Крафта, Каиса Аталлаха, Р. Г. Монтегю, К. Бинхама, Юлонга Лю, Райана Монтегю, Сиу Лау Но и других [41-65]. Их исследования рассматривают только работу одной ветроэнергетической установки с электромагнитным вариатором, не учитывая её присоединения к сети. Поэтому ими не был проведён анализ электромеханических переходных процессов

в составе автономной электроэнергетической системы, состоящей из нескольких ветроэнергетических установок, которые соединены линиями электропередачи между собой с учетом различных возмущающих воздействий со стороны ветровой турбины и нагрузки.

**Цель работы:**

Исследование переходных режимов ветроэнергетических установок с электромагнитными вариаторами в автономной электроэнергетической системе. А также, разработка электромагнитного вариатора и способов управления им, обеспечивающего электромеханическую совместимость параллельной работы генераторов энергоблоков ветроэнергетической станции в составе автономной электроэнергетической системы.

**Задачи:**

- исследование проблемы обеспечения электромеханической совместимости работы генераторов группы ветроэнергетических станций;
- исследование электромеханических переходных процессов в АЭС, оценка эффективности законов управления при различных возмущающих воздействиях в ВЭС на базе ветроэнергетических установок (ВЭУ) с электромагнитным вариатором;
- разработка технических решений по созданию электромагнитного вариатора и его динамической модели;
- разработка законов и алгоритмов управления электромагнитным вариатором в составе ВЭУ, обеспечивающих электромеханическую совместимость с АЭС;
- разработка законов и алгоритмов комплексного управления электромагнитным вариатором и механическим моментом турбины ВЭУ (на примере управления аэродинамикой лопастей);
- обоснование возможности и целесообразности использования электромагнитного вариатора в составе ВЭУ в целях реализации регулирования частоты в АЭС;
- верификация модели на экспериментальном стенде.

**Научная новизна:**

– введено новое понятие эквивалентного угла ротора генератора, представляющая собой сумму углов ротора быстроходного звена электромагнитного вариатора и угла корректировки за счет динамической связи ротора генератора и турбины. Данную корректировку предложено называть приведенным углом дополнительного рассогласования, и его определение возможно в разности угла быстроходного звена электромагнитного вариатора со стороны генератора, умноженного на его число пар полюсов и угла тихоходного звена вариатора, умноженное на число его ферромагнитных сегментов;

– 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 на валу генератора электромагнитным вариатором;

– 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 заклинения 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 работы:**

– 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 ротора турбины и генератора;

– проведена верификация динамической модели электромагнитного вариатора на экспериментальном образце обеспечивает достоверность моделирования процессов приведенного 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 компании ООО «ЭКОФАКЕЛ» (г. Новосибирск) и АО «Сибирские приборы и системы» (г. Омск).

### **Личный вклад автора**

Соискателем, совместно с научным руководителем, была поставлена 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 автономной системе 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 касающихся вопросов устойчивости автономных ветроэнергетических систем, построение 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 автономной энергетической системе.

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

– для приведения электродинамической системы турбина-вариатор-генератор-линия-ШБМ при моделировании её устойчивости к системе турбина-генератор-линия-ШБМ введено понятие эквивалентного угла ротора генератора, представляющая собой сумму углов ротора генератора и его корректировки за счет динамической связи ротора генератора и турбины. Данную корректировку предложено называть приведенным углом дополнительного рассогласования, и его определение возможно в разности угла быстроходного звена, умноженного на его число пар полюсов со стороны генератора электромагнитного вариатора и угла тихоходного звена, умноженного на число его ферромагнитных сегментов 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;

– доказано, что необходимым условием обеспечения электромеханической совместимости ВЭУ на базе электромагнитного вариатора с АЭС является возможность управления жесткостью магнитной связи, которая формируется с

помощью изменения приведенного угла рассогласования  $\theta_e$ , путем управления скоростью вращения;

– сформулирована концепция комплексного управления скоростью вращения генератора на быстроходной стороне электромагнитного вариатора и на тихоходной стороны 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 электромагнитного вариатора для обеспечения электромеханической совместимости с АЭС;

– определены условия внутренней устойчивости электромагнитного вариатора, которое состоит в стабилизации угла дополнительного рассогласования между ротором генератора и турбины. Путем линеаризации механической характеристики электромагнитного вариатора определены допустимые диапазоны изменения механического момента и приведенного угла рассогласования, обеспечивающие 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 автономной энергетической системе.

### **Апробация результатов**

Основные теоретические положения и результаты диссертационной работы были доложены на III и IV Международных технологических форумах «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2016 и 2017гг); 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 (Москва, 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); Международной выставке 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, индексируемых в Scopus и Web of Science.

### **Структура и объем работы**

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

# 1 ОБЗОР СРЕДСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ ГЕНЕРАТОРОВ С АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

## 1.1 Постановка задачи

В настоящее время происходит активное развитие малой генерации в составе автономных электроэнергетических систем, и они становятся все более сложными динамическими объектами, которые насыщаются разнообразными средствами управления [24]. Их динамические свойства требуют постоянного изучения и совершенствования. В автономных электроэнергетических системах существует проблема электромеханической совместимости генерирующих устройств, работающих параллельно с другими генераторами. Дело в том, что источники малой генерации выполняются на базе относительно маломощных синхронных генераторов на постоянных магнитах (СПМ). Особенностью данных источников энергии является их сравнительно небольшая инерционность ротора и, соответственно, малый запас динамической устойчивости при работе в АЭС с учетом возможных сильных изменениях режима, или при коротких замыканиях, а также при резком изменении мощности нагрузки [25]. С этой целью необходим анализ существующих технических средств, обеспечивающих поддержание заданных параметров частоты и напряжения в автономной электроэнергетической системе.

В современных автономных энергетических системах широко применяется ветроэнергетические установки, мини-ГЭС, газотурбинные установки, поэтому, появилась необходимость анализа тенденции развития этих установок в России и в мире. Особый интерес представляет новые технологии в ветроэнергетике, обеспечивающие повышение энергетической эффективности и электромеханической совместимости ветроэнергетических установок. Произвести анализ научных работ, которые выполнены в области обеспечения электромеханической совместимости ВЭУ с АЭС.

## 1.2 Тенденции развития электрической генерации с переменной скоростью вращения

В качестве определения электромеханической совместимости при параллельной работе СГПМ может служить возможность обеспечения устойчивой параллельной работы в АЭС при различных возмущающих воздействиях с использованием полупроводниковых или электромеханических преобразователей частоты [36]. Следует отметить, что наибольшие проблемы возникают с устройствами, которые преобразуют не регулируемый ресурс, такой как ветер и солнце. В настоящее время ветроэнергетика является сложившимся направлением в возобновляемой энергетике, и она формируется значительными темпами [69]. Ежегодно номинальная мощность ВЭУ возрастает в среднем на 25 %. Согласно Всемирной ассоциации энергии ветра, установленная мощность общей мировой индустрии ветряных электростанций (ВЭС) в 2015 году впервые в истории показала большее значение чем общая мощности действующих атомных электростанций: общая мощность мировых ВЭС превзошла 400 ГВт, тогда как суммарная мощность работающих атомных электростанций составляет 382,3 ГВт, включая остановленные энергоблоки атомных электростанции в Японии (более 40 ГВт) [1]. Современное развитие ветроэнергетики идет по двум независимым направлениям. С одной стороны - это масштабирование с целью увеличения единичной мощности. С другой стороны - это улучшение энергетической эффективности и массогабаритных показателей. Оптимальные размеры ВЭУ продолжительное время являются объектом обсуждения и исследования на конференциях и на научных форумах [69]. Машины большой мощности по конструктивным особенностям и характеристикам функционирования имеют важнейшие преимущества, но уступают малым установкам по технико-экономическим показателям. Большие машины имеют более высокую эффективность, но на их возведение требуется более дорогая инфраструктура и на их обслуживание требуется меньше затрат. Немаловажным фактором для

повышения мощности ВЭУ, а, следовательно, для роста высоты ветроколеса над уровнем земли, является возрастание скорости ветра при увеличении высоты [2].

Достоинством небольших ветровых турбин является их меньшая масса, гибкость при формировании ветроэнергетических станций (ВЭС) из большого числа ветроэнергетических установок (ВЭУ), и, следовательно, высокая надежность ВЭС. Но, в любом случае имеет место быть явно выраженная тенденция к разработкам ВЭУ с возможностью подключения к сети с использованием турбин большей мощности. В 1996 г. средняя мощность турбин ВЭУ была на уровне 500 – 750 кВт. В настоящий период ВЭС создаются преимущественно из одиночных ветроэнергетических установок мощностью 1-2 МВт. Следует отметить, что запущено промышленное производство ВЭУ мощностью 4 – 6 МВт практически всеми крупными компаниями по всему миру и разрабатываются ВЭУ единичной мощности до 10 МВт [1].

Результативность применения ВЭУ определяется ресурсами, располагаемые в данном регионе. В России они распределены неравномерно. На рисунке 1.1 представлена карта, сформированная Объединённым институтом высоких температур РАН при взаимодействии с географическим факультетом МГУ [1]. По этим данным заметно, что максимальные ресурсы ветровой энергии по территории страны сконцентрированы на северных и восточных побережьях и на юге европейской части. В средней полосе России интенсивность ветров низкая.

В настоящее время мощность потребления изолированных территорий от централизованного электроснабжения составляет 6 ГВт. В течение 15-20 лет большая часть данных территорий может быть замещена энергокомплексами на основе совместного использования возобновляемых и традиционных источников энергии. Таким образом, полное энергоснабжение в России в отдаленных районах может быть обеспечено комбинацией всех возобновляемых технологий [1].

Учитывая богатые ветровые ресурсы, особенно в условиях Крайнего Севера, ветроэнергетика, безусловно, играет ключевую роль, хотя и во многих регионах может широко использоваться и солнечная энергия вместе с малыми ГЭС, биоэнергетическими или геотермальными установками. Такая замена позволит

экономить десятки миллиардов рублей в год за счет экономии дизельного топлива. В зависимости от совершенствования нормативно-правовой базы, суммарная мощность ветровых турбин в отдельных регионах может достигать от 1 до 5 ГВт к 2030 году и даже 10 ГВт в долгосрочной перспективе [1].

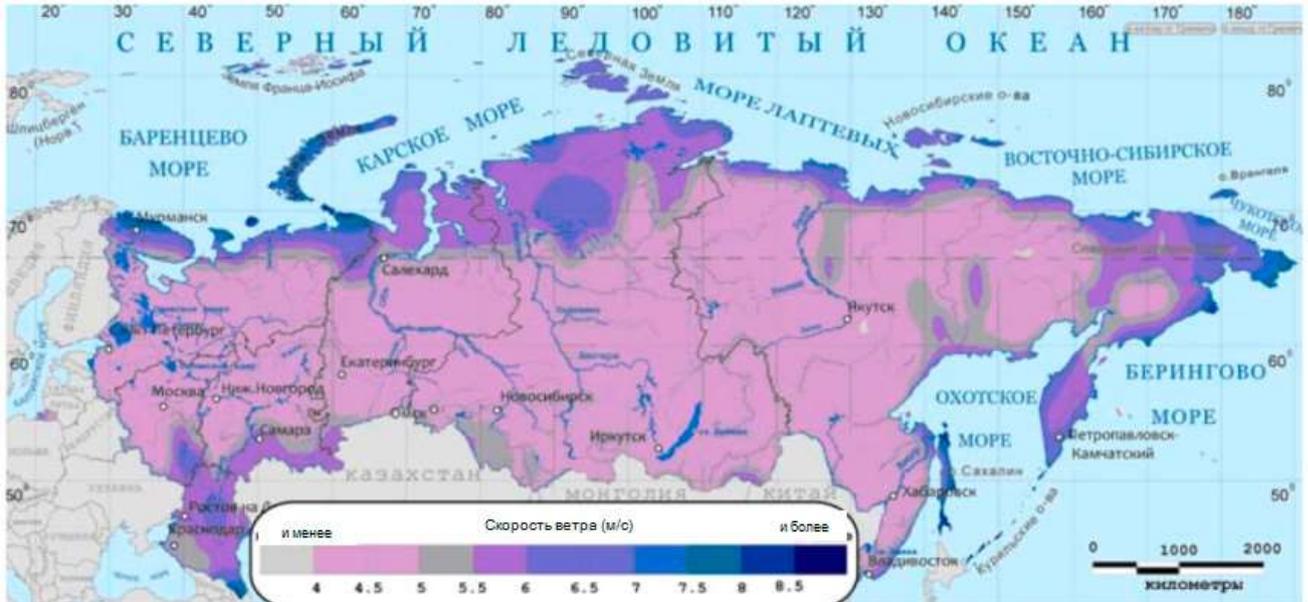


Рисунок 1.1 – Значений среднегодовых скоростей ветра на высоте 10 м на территории России [1]

Особенностью микрогенерации является использование СГПМ, у которых не всегда предусмотрена возможность воздействия на напряжение электрического генератора в случае сильных возмущающих воздействиях при переходных процессах в АЭС, то есть отсутствие автоматического регулирования возбуждения (АРВ) [69].

### 1.3 Классификация ветроэнергетических систем

Различают три основных класса ВЭС исходя из долевого участия суммарной мощности ВЭУ к полной мощности энергосистемы. К первому классу, в основном, относятся системы, в которых мощность ВЭУ в 5 раз превышает мощность других генерирующих устройств или отдельно установленный генератор ВЭУ, который не

подключен к какой-либо энергосистеме. Мощность таких установок, предназначенных в основном для труднодоступных регионов в целях освещения или снабжения средств связи не превышает 5 кВт. Эффективность работы ВЭУ и её экономическая эффективность зависит от адекватной системы управления генератором. Минимальный уровень управления генератором позволяет обеспечить номинальное напряжение на его выходе и такие системы принято использовать для нагрева или выпрямительных установках [66-69].

Для решения проблемы стабилизации напряжения в таких системах используют два способа. Первый способ управления скоростью вращения генератором является механическое управление углом заклинения лопасти. В этом случае угол заклинения ветроколеса при изменении скорости ветра или состава нагрузки изменяется так, что частота его вращения остается постоянной. Недостатком данного способа являются большие потери энергии ветрового потока и сложность управления. Второй способ управления обеспечивает постоянство частоты вращения ветроколеса и генератора путем изменения электрической нагрузки. Данный способ регулирования частоты является более энергоэффективнее, чем первый, так как лопасти турбины ВЭУ работают в оптимальном режиме.

Ко второму классу относятся ВЭУ, подключенные к энергосистеме, которая значительно более мощная, чем мощность, генерируемая ВЭС. В мире это наиболее распространенный случай работы ВЭУ. Энергия ветра используется непосредственно, за исключением излишков, которые либо утилизируются, либо продаются. Отметим, что при низкой скорости ветра, потребители снабжаются через энергосистему, так как при слабом ветре возможен переход ВЭУ в двигательный режим. Существует необходимость поддержания частоты при прямом включении ВЭУ к сети. Это не позволяет обеспечить постоянную быстроходность, и, тем самым, высокий КПД, так как приходится изменять угол заклинения ветровой турбины. Используются несколько вариантов по обеспечению стабилизации скорости вращения, а именно [54]:

- увеличение числа пар полюсов генератора за счет изменения состояния коммутации обмоток с учетом уменьшения частоты вращения ветроколеса;
- выпрямление переменного тока на выходе генератора ВЭУ с последующим преобразованием его в переменный ток с постоянной частотой;
- увеличение допустимого отклонения частоты вращения ветроколеса от номинальной за счет подключения активной нагрузки.

К третьему классу относятся ВЭС с ветроэнергетическими установками одного порядка с мощностью других генераторов системы. Чаще всего другим генератором является дизельная станция.

Процессы в АЭС характеризуются разнотемповностью, т.е. различной скоростью протекания процессов (с временами развития от микросекунд до десятков минут) и высокой размерности соответствующих математических моделей. При больших возмущениях, исследование поведения АЭС требует решения систем нелинейных дифференциальных уравнений [11].

В задаче анализа электромеханических колебательных процессов в АЭС, простейшая модель синхронной машины (элементный осциллятор) должна сохранять описание основных физических факторов, определяющих колебательный характер движения [23].

Надежность функционирования АЭС складывается из ее схемной и режимной надежности. Если первая из них в основном связана со структурой системы, то вторая является сложной функцией структуры, динамических параметров и диапазона осуществляемых режимов. В целях повышения динамической устойчивости параллельно работающим генераторов в АЭС применяют кинетические накопители энергии (КНЭ). Его принцип основан на преобразовании кинетической энергии в электрическую и обратно [23]. При нерациональном построении системы, стремлении поднять уровень режимной надежности и живучести за счет массивного привлечения средств противоаварийного управления, приводящая к передозировке управляющих воздействий и необоснованному ограничению потребления при аварийных ситуациях.

Использование кинетических накопителей в случае применения их внутри гондолы ВЭУ не имеет смысла, более того, при этом ухудшаются массогабаритные показатели, и, поскольку кинетический накопитель должен находиться в вакууме, его применение снижает надежность и требует значительных затрат на обслуживание [67, 70-81]. Аккумуляторные батареи имеют высокую эффективность, обеспечивают баланс мощности в изолированной энергетической системе. Было проведено ряд исследований по использованию аккумуляторных батарей в децентрализованной энергетической системе с целью компенсации пиковой мощности и накопление излишек энергии, а также для улучшения качества электрической энергии, регулирование частоты [71]. Однако ограниченный срок службы являются главными недостатками, которое ограничивает использование аккумуляторных батарей. В настоящее время существует довольно большой ассортимент накопителей и поэтому получает развитие исследований по разработке новых типов накопителей электрической энергии для регулирования графиков выработки и потребления электроэнергии энергоустановками различных видов и назначения в сетевой и автономной электроэнергетике, в том числе базирующейся на ВИЭ, является актуальной научно-технической проблемой [10, 14].

При развитии АЭС с целью повышения их режимной надежности и управляемости, а также коррекции их динамических характеристик в широком диапазоне, ресурс управления с помощью традиционных средств (АРВ, АРС, АРЧМ) уже недостаточен [23]. Накопители энергии как промежуточное звено между системами потребления и генерирования становятся жизненно необходимыми. Уникальная возможность использования сверхпроводимости в энергетике, обладающих очевидными преимуществами перед другими способами накопления энергии: высокий КПД и быстроедействие, относительной компактностью, точностью соединения с энергосистемой. Использование накопителей крайне востребовано в автономной энергетике. Ключевая роль накопителей энергии в энергетических установках на ВЭС выделяется нестабильностью генерации. Подключение в АЭС накопителей обеспечит

снижение технических проблем подключения энергоустановок на базе ВЭУ к сетям, а также усовершенствовать технико-экономические показатели при гарантированном электроснабжении автономных потребителей. В последнее время в отрасли развития накопителей энергии достигнуты успехи как в количественном отношении, так и в качественном: идет усовершенствование самих накопителей, прежде всего благодаря использованию новых материалов и технологий [2]. На рисунке 1.2 изображена схема АЭС, которая состоит из ВЭУ, дизельной станции и нагрузки. Для поддержания устойчивости АЭС применяют накопители, обладающие разной постоянной времени и различной величиной емкости. Эта особенность построения АЭС связана с необходимостью обеспечения быстродействия при сильных возмущающих воздействиях.

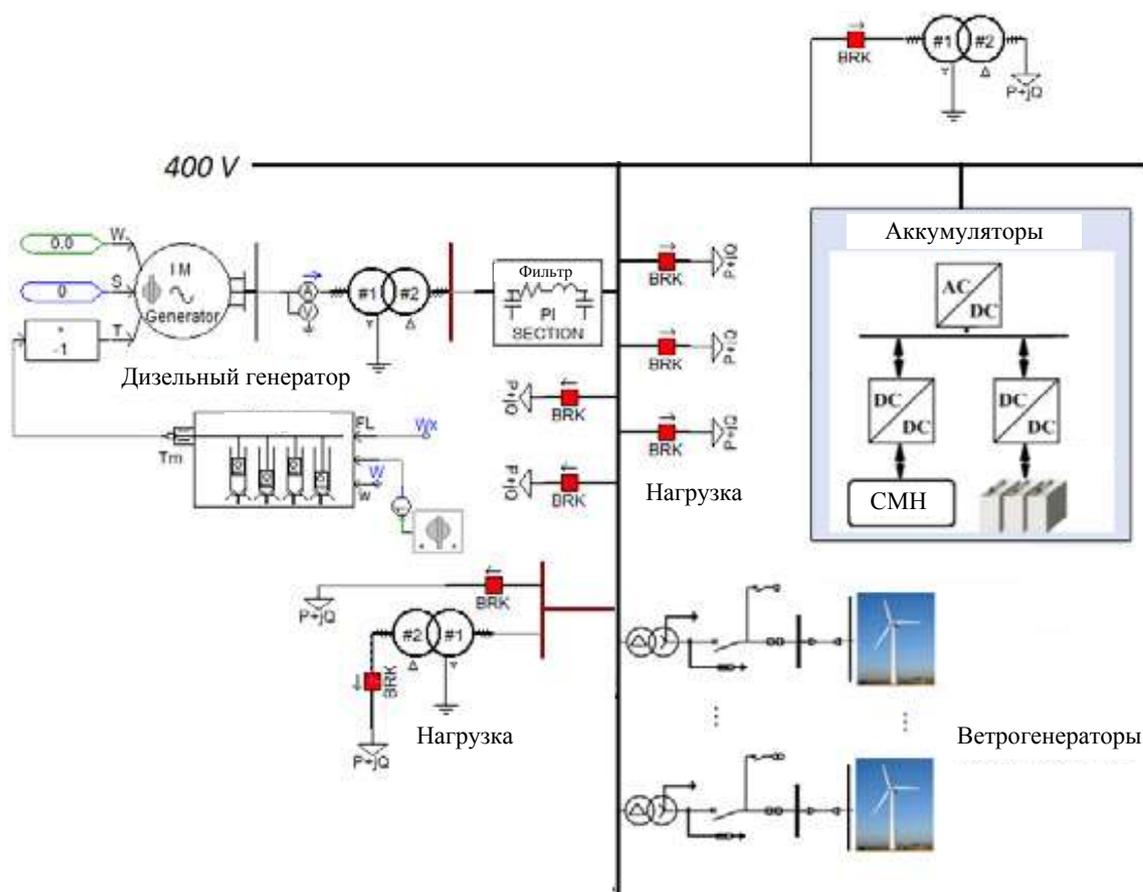


Рисунок 1.2 – Регулирование частоты в автономной электроэнергетической системе

На рисунке 1.3 изображена схема организации управления по обеспечению электромеханической совместимости АЭС, состоящей из нескольких генераторов. Быстрые динамические процессы, возникающие при изменении нагрузки, обеспечивает первичный регулятор частоты, который представляет собой накопитель электрической энергии. Сверхпроводящий индукционный накопитель (СПИН) имеют сравнительно малую постоянную времени. Этот метод согласования частоты был реализован Джуанвей Ли и его коллегами [14]. При использовании СПИН для целей аварийного управления существует вероятность потери управляемости. Одной из основных причин этого является снижение (вплоть до нуля) напряжения в точке подключения. СПИН к энергосистеме во время переходного процесса, что приводит к нарушению нормального функционирования преобразователя и к прекращению обмена энергии между энергосистемой и СПИН. Однако следует отметить, что сверхпроводящие магнитные накопители энергии имеют недостатки по причине необходимости поддержания криогенных температур. Более того, не учтено взаимное влияние различных видов источников энергии на стабилизацию скорости вращения генераторов. Это может привести к несогласованному действию регуляторов на стабилизацию скорости вращения.

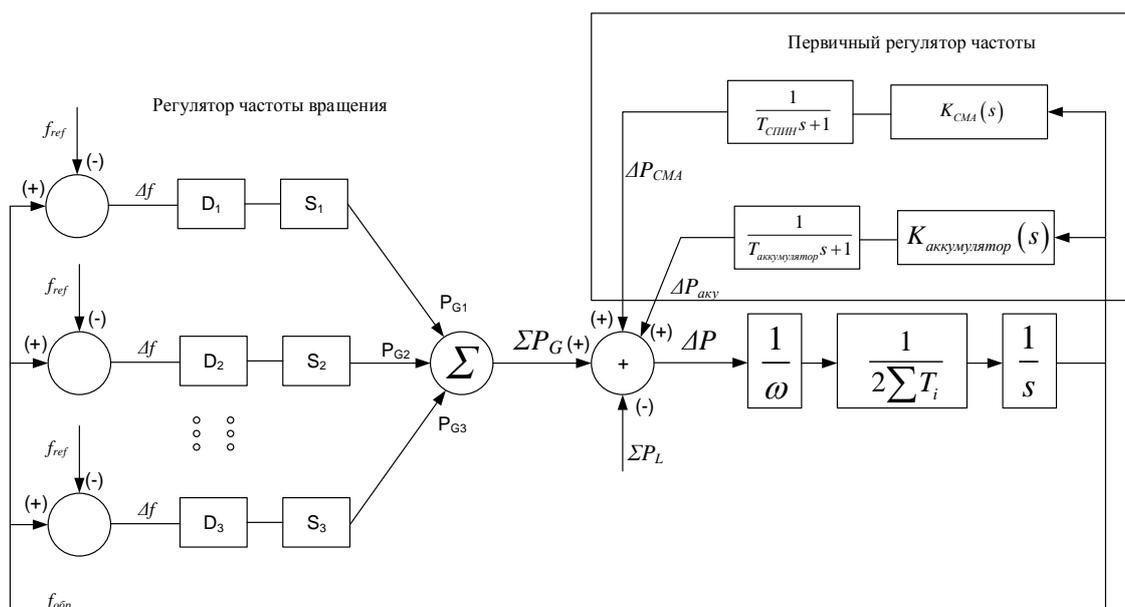


Рисунок 1.3 – Структурная схема организации регулирования частоты в автономной электроэнергетической системе

## 1.4 Проблема электромеханической совместимости параллельной работы генераторов

Небаланс между генерацией и потреблением энергии может привести в результате к колебанию частоты, которая вызвана изменением скорости роторов генераторов по причине малой постоянной времени механической инерции роторов. Поэтому, повышение регулировочной способности источников электрической энергии является неотъемлемой частью развития микро- и малой генерации [14].

На рисунке 1.4 отображена структура системы, которая включает синхронные генераторы ветроэнергетических установок, работающие в АЭС. Упрощенная модель генератора представляет ЭДС  $E_k$  с фазой  $\varphi_k$ , подключенной к линии с активным сопротивлением  $R_k$  и реактивным сопротивлением  $\omega L_k$ ,  $k$  – номер генератора. Узел сети имеет подключение комплексной нагрузки  $P_{НС} + jQ_{НС}$  при ступенчатом изменении мощности [3].

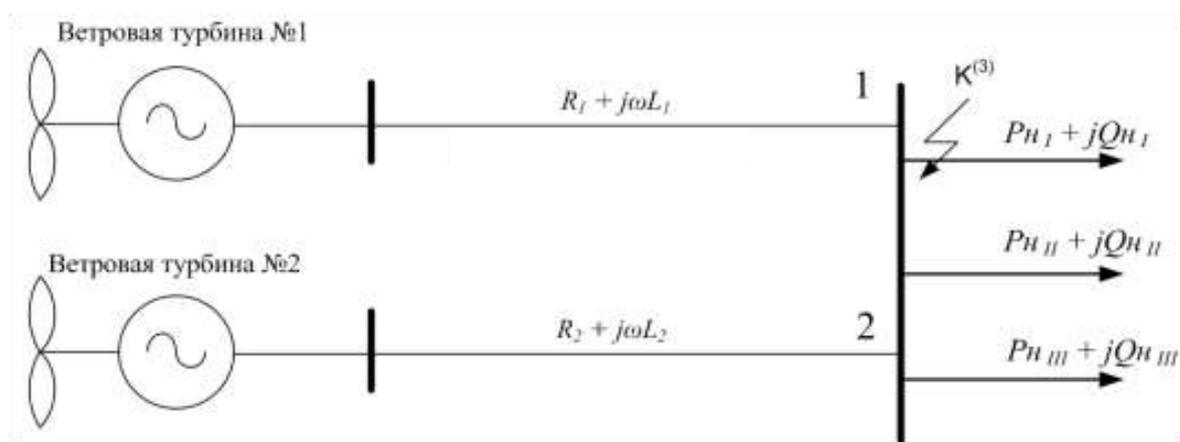


Рисунок 1.4 – Однолинейная схема исследуемой автономной энергосистемы

Рисунок 1.5 отображает модель данной АЭС, состоящей из двух генераторов, системы синхронизации, в котором заложен алгоритм точной синхронизации (см. Приложение А). Проведен анализ переходного процесса при резком изменении мощности в энергетической системе при резком изменении состава нагрузки. Отметим, что в системе не предусмотрено регулирование скорости.

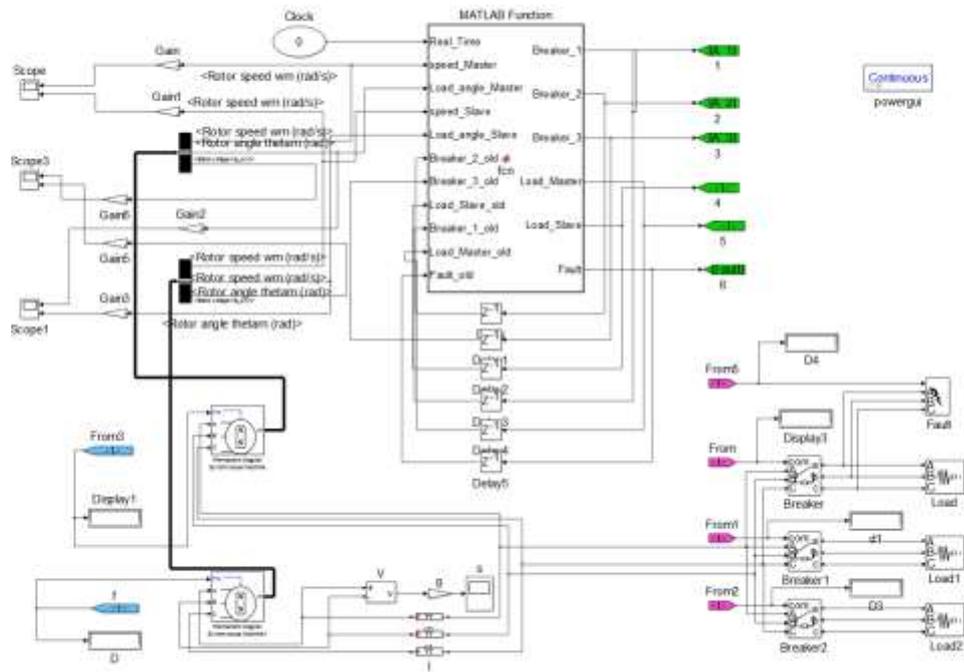


Рисунок 1.5 – Модель автономной электроэнергетической системы, состоящей из двух генераторов и нагрузок

На рисунке 1.6 изображена осциллограмма скоростей роторов электрических генераторов, для случая, когда машины имеют разные постоянные механической инерцией  $T_j$ , состоящей из двух ветроэнергетических установок. На 8-ой секунде произошло резкое уменьшение нагрузки в энергетической системе. Результаты моделирования показывают возникновение асинхронного режима при параллельной работе генераторов.

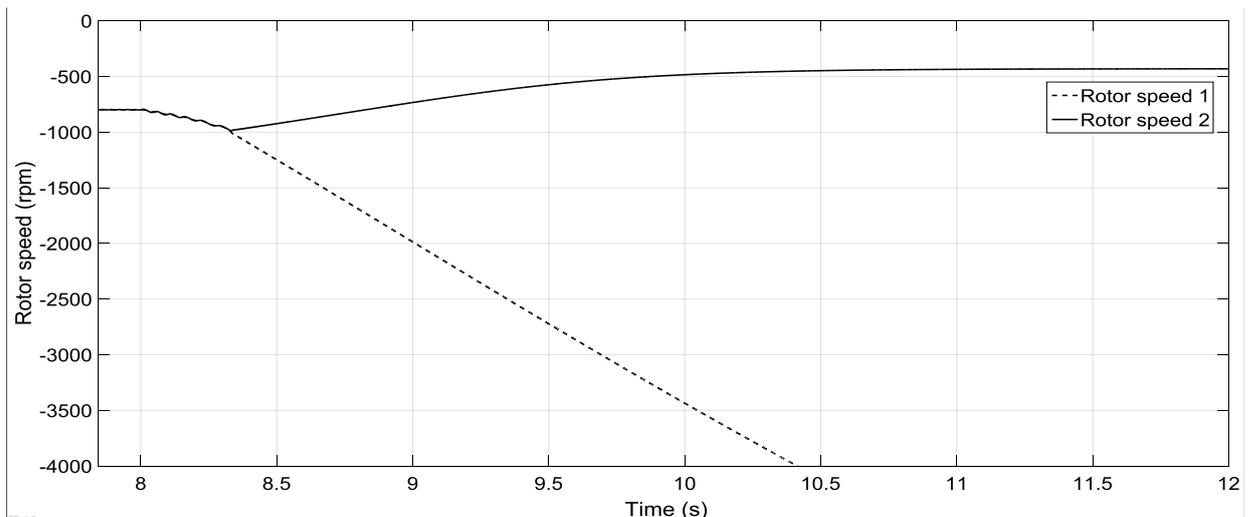


Рисунок 1.6 – Осциллограмма скорости роторов электрических генераторов без использования регулирования скорости

Также, на рисунке 1.7 представлена осциллограмма фазового положения роторов электрических генераторов с разной постоянной механической инерцией  $T_j$ , где наблюдается рассогласование положений роторов электрических генераторов, созданное резким уменьшением нагрузки. Из осциллограммы видно, что на 8,7 секунде угол рассогласования составляет более 300 градусов.

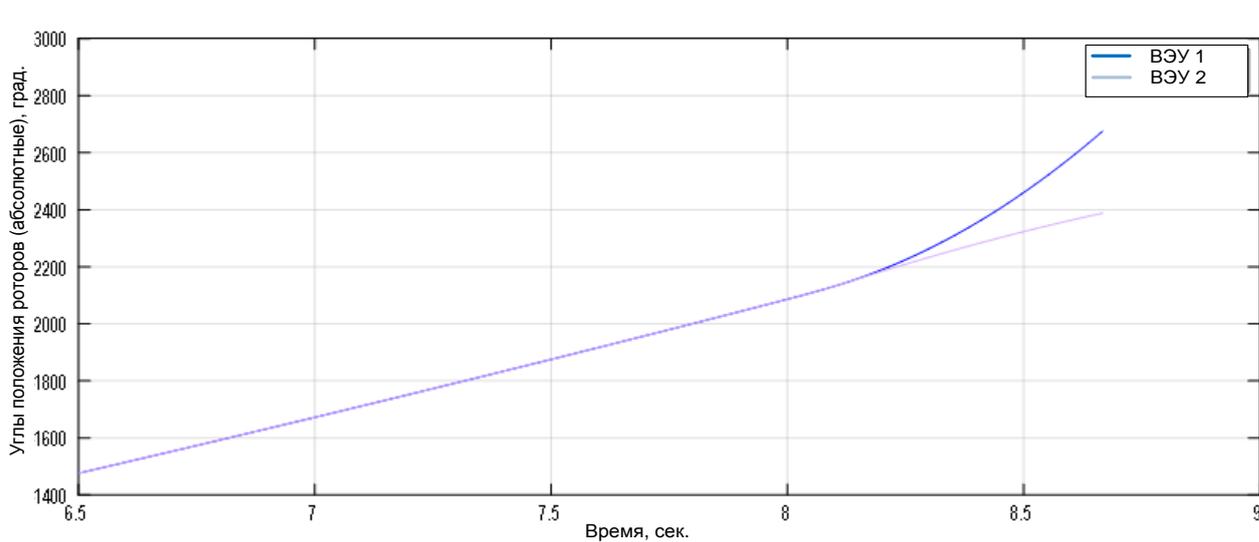
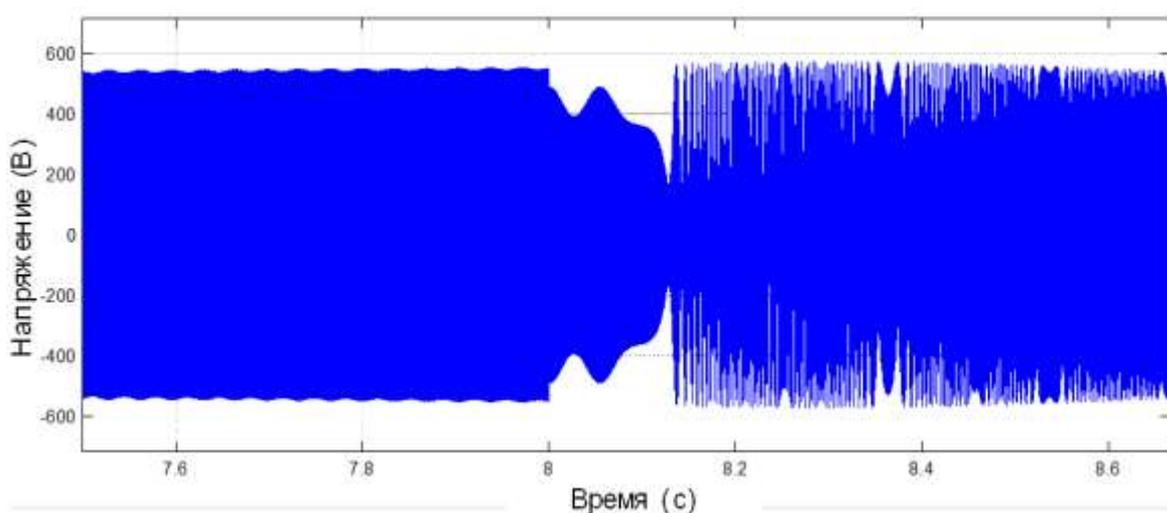
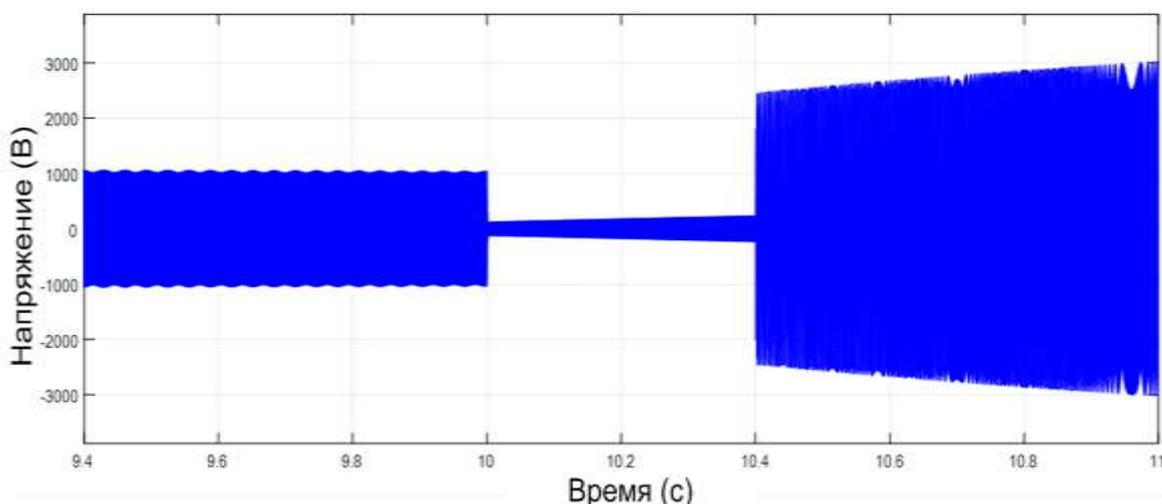


Рисунок 1.7 – Рассогласование углов положения роторов при резком уменьшении нагрузки

На рисунке 1.8 изображены осциллограммы переходных электромеханических процессов двух параллельно работающих генераторов, имеющие разную мощность (5 и 15 кВт). Из анализа данных осциллограмм следует, что после реализации возмущения в обоих случаях происходит выход на асинхронный режим. В случае трехфазного КЗ и последующего отключения поврежденной нагрузки наблюдается резкое увеличение амплитуды напряжения в сети. В режиме короткого замыкания по причине того, что СГПМ не имеет внутренних средств регулирования выходного напряжения генератора, после уменьшения нагрузки, происходит увеличение скорости вращения ротора СГПМ и, как следствие резкое увеличение амплитуды напряжения, которое сопровождается асинхронным режимом в АЭС.



а



б

Рисунок 1.8 – Осциллограммы переходного процесса:

- а – осциллограмма напряжения при резком уменьшении нагрузки;
- б – осциллограмма напряжения при коротком замыкании и последующим отключением нагрузки

### 1.5 Обзор технических средств, обеспечивающих электромеханическую совместимость в энергосистеме

В России имеются несколько исследований, посвященных проблеме потери запаса динамической устойчивости АЭС в условиях работы [2-7]. Б.Н. Абрамович [4, 5] предлагает метод поддержания запаса динамической устойчивости, с оценкой

допустимого снижения напряжения. А.С. Яндульский предлагает использовать динамические характеристики многомашинных электроэнергетических систем на базе данных системы мониторинга переходных режимов и его последующей идентификации [2]. К сожалению, эти подходы не позволяют учитывать ситуацию при развитии АЭС в перспективе без внедрения дорогостоящих резервов активной мощности. А.Н. Беляев анализирует использование электромагнитного тормоза для повышения запаса динамической устойчивости АЭС [3]. Тем не менее высокая постоянная времени контура управления (от 1 до 5 с) не обеспечивает высокое быстродействие турбины, так как время изменения угла нагрузки в случае внешних или внутренних возмущений между вектором ЭДС генератора и напряжения АЭС может составлять десятые доли секунды. За этот период происходит рассогласование угла нагрузки.

Гарантированное электроснабжение потребителей в отдаленных районах может быть обеспечено ветродизельными энергетическими установками. В целях обеспечения стабилизации частоты и напряжения в системе используют аккумуляторные батареи и накопители электрической энергии [14]. Децентрализованные сети определяются как энергетические системы низкого класса напряжения 0,4 кВ которые имеют группу нагрузок и генераторов, которые обеспечивают электрической энергией локальную область. Распределенная генерация с использованием возобновляемых источников энергии может быть интегрирована в сеть. Однако, с учетом естественного изменения нагрузки и выработки энергии возобновляемыми источниками в энергетической системе, может возникнуть небаланс между потреблением и генерации.

На рисунке 1.9 изображена диаграмма распределения количества публикаций исследований стабилизации частоты в энергетической системе [40].



Рисунок 1.9 – Количество публикаций по годам по теме исследований стабилизации частоты в АЭС

Многие предыдущие работы были посвящены различным применениям накопителей электрической энергии в целях повышения общей эффективности системы в составе ВЭУ [67-73]. В настоящее время начинает получать распространение исследования, которые связаны с использованием аккумулятора, с помощью которых обеспечивается баланс активной мощности в АЭС [10 – 19]. Сейчас ведутся исследования по улучшению срока службы аккумуляторных батарей и разработки новых накопителей на основе сверхпроводящих материалов [28]. Исследователями Ли Д, Уйанг П. и Сан К. в 2016г в этой области были проведены натурные испытания и исследования возможностей использования таких аккумуляторов для стабилизации частоты. Особенностью таких накопителей является сравнительно малая постоянная времени. К таким системам можно отнести суперконденсаторы (СК), СПИН, литий железо фосфатные аккумуляторы. Но, в данных работах не было учтено взаимное влияние различных видов накопителей энергии на регулирование скорости вращения генераторов.

В исследованиях Ли и его коллег, [14] представлено уравнение, которое отображает управление частотой при различных возмущениях в энергосистеме с помощью накопителей из СПИН:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f}{2\sum T_i} \sum P_{G_i} + \frac{f}{2T_{СМН}} \Delta P_{СМН} + \frac{f}{2T_{аккумулятор}} \Delta P_{аккумулятор} - \frac{f}{2\sum T_i} \sum P_{L_i} \quad (1.1)$$

где  $T_i$  – постоянная инерции для  $i$ -го генератора,  $P_{G_i}$  – мощность  $i$ -го генератора,  $\Delta P_{аккумулятор}$  – мощность, используемая для поддержания частоты аккумулятора,  $\Delta P_{СМН}$  – мощность, накопленная в сверхпроводящем магнитном накопителе,  $P_{L_i}$  – мощность нагрузки.

Для согласования электромеханической совместимости требуются преобразователи частоты для передачи электроэнергии в сеть [11-13, 18-21]. На рисунке 1.10 отображена одна из разновидностей вставки постоянного тока (ВПТ). Отметим, что высокий уровень мощности требует наличие преобразователей частоты для передачи энергии в сеть. В АЭС, состоящей из нескольких источников электрической энергии, однофазное замыкание в сетях до 1 кВ наблюдается в 70 % случаев. Отметим, что в случае короткого замыкания и последующее снижение напряжения в сети приводит к блокировке преобразователей частоты вследствие снижения напряжения в АЭС. Поэтому, реализация таких устройств затруднена в связи с тем, что при снижении напряжения в АЭС при коротком замыкании, происходит блокировка транзисторов. Это приводит к прекращению выдачи активной мощности в автономную энергетическую систему. Также, в случае резкого увеличения нагрузки сопровождается снижением напряжения. Также, одним из основных недостатков ВПТ является высокая номинальная мощность полупроводниковых преобразователей и средств по обеспечению регулирования параметров, так как формируется двухступенчатое преобразование энергии (выпрямление и инвертирование) при полной мощности, отдаваемой генератором [8-12].

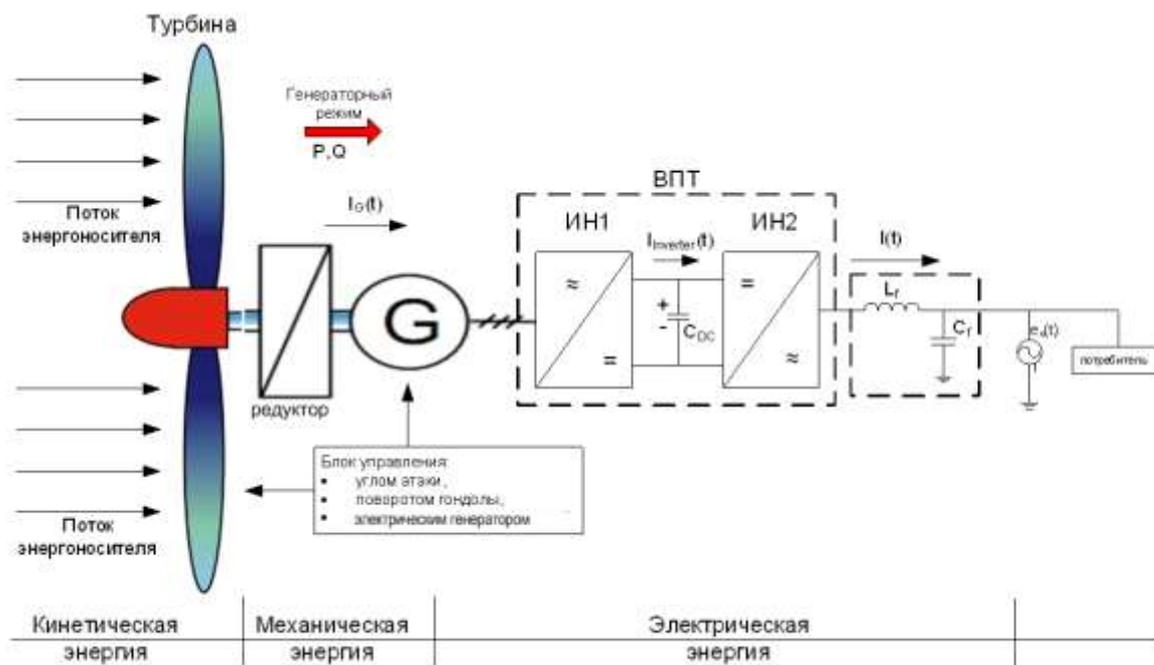


Рисунок 1.10 – Обобщенная структурная схема редукторной ветроэнергетической установки

Среди отечественных исследователей поддержания параллельной работы различных источников электрической энергии в АЭС, известны работы школы под руководством профессора Лукутина Бориса Владимировича из Томского политехнического университета [28-30]. Исследования посвящены построению электроэнергетических систем на разных физических принципах преобразования энергии. Генерирующая часть гибридной системы состоит как из традиционных источников, так и нетрадиционных (возобновляемых) источников энергии. Исследованы модульные принципы построения энергетической системы, позволяющий её масштабировать как по составу, так и по установленной мощности основного энергетического оборудования. Был исследован алгоритм управления потоками энергии в замкнутой энергетической системе, обеспечивающий максимально полезное использование первичных энергоносителей. Также, разработан оригинальный двухкомпонентный накопитель энергии с улучшенными динамическими характеристиками. Были проведены теоретические и экспериментальные исследования, разработана структурная и функциональная

система буферного накопления энергии, изготовлен экспериментальный образец. В качестве замечания можно отметить о необходимости исследований переходных процессов в автономной электроэнергетической системе с учетом наличия полупроводниковых вставок постоянного тока.

В исследования Андреюка Владилена Антоновича из ОАО «Научно-исследовательского института по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения» сформулирован подход к проблеме управления мощностью турбоагрегатов с применением режимного параметра, как абсолютный угол векторов ЭДС эквивалентных генераторов, и описана возможность применения этого принципа управления для конкретной энергосистемы на примере связи генераторов Сургутской ГРЭС с энергосистемой ОЭС Урала [31, 32].

Известны исследовательские работы, в которых разработан метод по обеспечению устойчивости параллельно работающих генераторов в автономной электроэнергетической системе, проводимые профессором А.Г. Фишовым [33, 34]. Этот метод заключается в идентификации параметров и режимов работы и определении максимальной допустимой мощности нагрузки в целях сохранения устойчивой работы генераторов. Совместно с компанией «Модульные Системы Торнадо» были разработаны комплексы для реализации автоматического управления генерирующим оборудованием и сети в автономной электроэнергетической системе с использованием вышеупомянутой методики. Известны работы профессора В.М. Чебана по устойчивости путем использования генератора двойного вращения, который сообщает вращение статору электрического генератора для синхронизации векторов ЭДС генератора и вектора ЭДС энергетической системы [35, 36]. Безусловно, развитие автономных энергосистем играет важную роль, но, к сожалению, дополнительные подключения к АЭС нагрузок вызывают возмущения в работе СГПМ.

В диссертации рассматривается компоновка, в которой замещается полупроводниковый преобразователь частоты в силовой части сети на электромеханический преобразователь с возможностью сопряжения при его параллельной работе с другими генераторами различного вида.

## **1.6 Анализ исследований в области обеспечения электромеханической совместимости на базе электромеханических преобразовательных устройств с постоянными магнитами**

В 2013 году, доктор Хенк Полиндер опубликовал исследование, которое охватывает анализ технологий и будущего развития ветроэнергетики, которое обеспечивают повышение энергетической эффективности ВЭУ [43]. Среди которых он выдели следующие: вспомогательные аэродинамические средства, обеспечивающие повышение подъемной силы, электромагнитный вариатор с возможностью замещения частотного преобразователя в сети.

К числу отдельных систем можно отнести магнитный редуктор и на его основе электромагнитный вариатор. Сопоставляя электромагнитную трансмиссию и механический планетарный редуктор можно отметить для электромагнитной трансмиссии высокую плотность выходного момента, которая может составлять до  $100 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$  с использованием постоянных магнитов на базе редкоземельных металлов [44-64]. По причине отсутствия механического контакта между вращающимися звеньями, у электромагнитной трансмиссии может быть достигнут высокий КПД [49, 50]. Идея электромагнитной трансмиссии не нова, она возникла еще в начале 20 века и имеет в настоящий момент довольно сильную популярность в научной литературе. Примером первого патента может служить патент США в 1913 г., который описывает электромагнитную трансмиссию, состоящую из двух вращающихся звеньев со стальными явновыраженными полюсами [52]. Два вала совмещены благодаря взаимодействию постоянных магнитов с разным числом полюсов. Такая схема предусматривает полное отсутствие шума и высокий КПД. К сожалению, тогда она не нашла коммерческого применения. Их активное изучение отечественными учеными началось в 1960-х гг научной группой под руководством Л.Б. Ганзбурга. Значительный вклад в развитие теории расчета этих устройств в то время внесли Е.Д. Рейфе и В.Л. Вейц. В настоящий момент вследствие снижения стоимости редкоземельных металлов и усиливающегося

спроса к системам на основе редукторов, существующие типы приводов предъявляют все большее и большее требования. И, зачастую выходит, что механические приводы не выполняют заданных требований. Работы в области применения магнитных редукторов и вариаторов начали получать в последнее десятилетие очень широкое освещение в мировых технических публикациях. Это обусловлено тем, что магнитные редукторы и вариаторы обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с механическими редукторами. Следует отметить более высокие показатели надежности и КПД, сокращение эксплуатационных затрат [74]. Этот показатель снижает массогабаритные показатели магнитных редукторов по сравнению с аналогичными планетарными редукторами. Развитием данной технологии занимаются несколько научных групп.

В Великобритании наиболее ярко можно отметить направление, возглавляемого профессором Каиса Аталлах и его коллег Р. Г. Монтегю и К. Бинхам из Университета Шеффилда, которые разработали магнитный редуктор, вариатор и псевдо-прямой привод [45-57]. Их разработки были связаны со значительным интересом машиностроительных компаний в технологиях магнитной редукции скорости. Также, следует отметить реализованные проекты в области морских движителей, которые были установлены на существующие корабли Британского флота в 2016 году совместно с компанией Роллс-Ройс. В 2004 году в г. Шеффилд (Великобритания) была основана компания, которая успешно развивает направление магнитных редукторов и вариаторов компании Магноматикс. Наиболее заметные современные ученые, занимающиеся вопросами теории расчета и проектирования магнитных редукторов: П. Расмуссен из университета г. Ольборга, Р. Ванг из университета г. Стелленбоса, Н. Франк из университета Техаса, А.А. Аванасьев из Чувашского Государственного университета [58-60]. Известны также публикации Юлонг Лю, Сиу Лау Но из Гонконга, которые проводили исследования и сравнения магнитных редукторов с существующими механическими редукторами [53]. Согласно их исследованиям, было отмечено значительное снижение массогабаритных показателей магнитных редукторов. В 2014 году в Японии инженерами компании Hitachi были

представлены патенты Юджи Эномото, Норихиса Ивасаки и Масаси Китамура [56]. Их коллектив разработал магнитный редуктор со сниженными вихревыми токами, возникающими на проводящей поверхности постоянных магнитов NdFeB.

Технологии магнитной редукции активно развиваются и возникают новые горизонты их потенциального использования в различных отраслях. Существенным препятствием, ограничивающее распространение магнитных редукторов является цена постоянных магнитов. В публикациях исследований не отображены построения динамической модели магнитного редуктора при различных углах рассогласования. В диссертации была поставлена данная задача разработки законов и алгоритмов управления электромагнитным вариатором в составе ВЭУ, обеспечивающих электромеханическую совместимость с АЭС.

Электромеханические переходные процессы в электрической системе – это, прежде всего, механическое движение роторов генераторов, исследование которого имеет две стороны. Во-первых, это изучение собственного движения роторов, во-вторых – изучение электромеханических сил, под действием которых совершается механическое движение генераторов системы. Таким образом, АЭС с точки зрения исследования электромеханических процессов должна рассматриваться как система механическая, включающая в себя несколько инерционных масс роторов генераторов, движущихся взаимосвязано, так как электромагнитные силы, действующие на каждую массу, определяется положением всех остальных масс системы [23]. Электрическая схема АЭС выполняет при этом функцию связи, передавая преобразованные механические усилия с вала одного генератора на валы других синхронных машин. Когда в системе происходят низкочастотные возмущения, все генераторы движутся как единое целое. В целях исследования электромеханической совместимости при параллельной работе генераторов в АЭС при сильных возмущающих воздействиях предлагается электромагнитный вариатор 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.

Электромагнитный вариатор представляет собой двухмассовую электромеханическую систему, которая складывается за счет упругой магнитной связи между турбиной и генератором. Вместе с тем, электромагнитный вариатор выполняет функцию демпфера в АЭС при переходных процессах в ней.

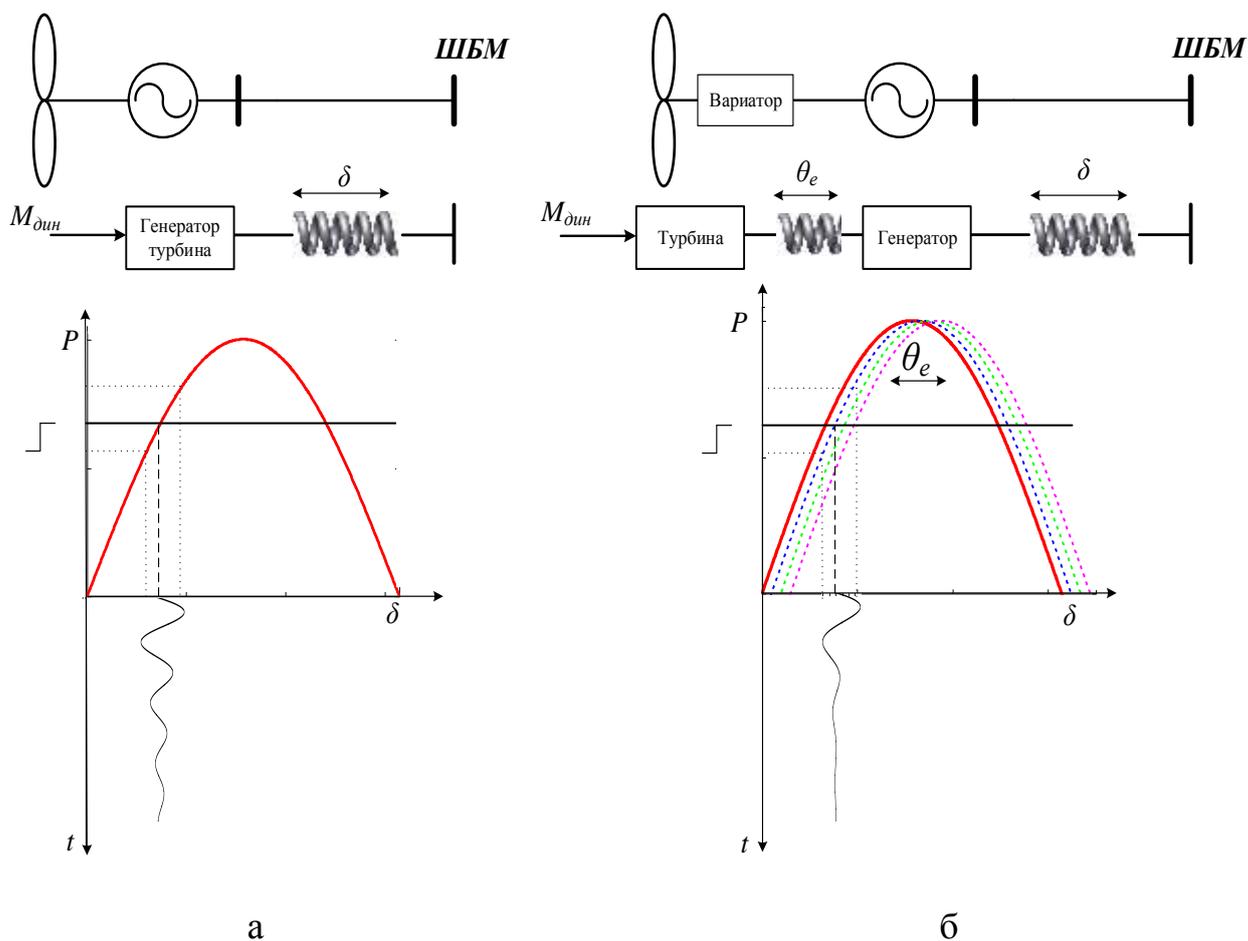


Рисунок 1.11 – Сравнительная механическая характеристика:

а – системы турбина-генератор-линия-ШБМ; б – системы турбина-вариатор-генератор-линия-ШБМ

Для иллюстрации дополнительного приведенного угла рассогласования между турбиной и генератором в электромагнитном вариаторе представлен рисунок 1.11, где изображены сравнительные механические характеристики между классической компоновкой (а) и компоновкой с электромагнитным вариатором (б). Классическая компоновка имеет одно колебательное звено, выраженное электрическим углом  $\delta$  между векторами ЭДС генератора и напряжением ШБМ. В

компоновке с электромагнитным вариатором отражено два колебательных звена, в которой можно наблюдать влияние дополнительного приведенного угла рассогласования в двухмассовой системе, формирующее жесткость между турбиной и генератором. Была поставлена задача по исследованию электромеханических переходных процессов в АЭС, оценка эффективности законов управления при различных возмущающих воздействиях в ВЭС на базе ветроэнергетических установок (ВЭУ) с электромагнитным вариатором.

Якоб П. Ахо и Л. Гордон Крафт в начале 2011г на 49 международной конференции AIAA по аэрокосмическим наукам во Флориде в своем исследовании об управлении ветровой турбиной путем использования магнитного вариатора для устранения перегрузок, и, в качестве предположения, рассмотрели возможность использования его в средствах стабилизации скорости без использования ВПТ [42]. Они показали динамические характеристики магнитных вариаторов. Построили системы управления и сделали настройки регуляторов в целях улучшения характеристик при резких изменениях нагрузки ветровой турбины. Отметим следующее, их исследование не затрагивают влияние накопителя энергии и его особенности, связанного со скоростью накоплением электрической энергии и времени разряда. Также, не было учтено влияния двухконтурного управления магнитным вариатором со стороны ветровой турбины в целях стабилизации скорости вращения ротора генератора. В диссертации была поставлена задача разработки законов и алгоритмов комплексного управления электромагнитным вариатором и механическим моментом турбины ВЭУ (на примере управления аэродинамикой лопастей).

Отсутствие механического взаимодействия исключает трение и нагрев, что значительно снижает вибрации и шумы, позволяет отказаться от использования смазочных материалов. Импульс к развитию магнитных редукторов придает совершенствование технологии производства постоянных магнитов, что существенным образом сказывается на их характеристиках и стоимости. Поэтому, магнитные редукторы имеют значительный потенциал применения в различных

отраслях, таких как оборудование авиационной промышленности, энергетике, добычи нефтепродуктов.

В настоящий момент наблюдается тенденция повышения спроса на использование высокоэнергетических постоянных магнитов на основе NdFeB, что привело к существенному сокращению их стоимости. Результатом стало активное патентование технологий магнитной редукции крупными компаниями Японии, Южной Кореи и Китая.

Рисунок 1.12 отображена тенденция развития мировой публикационной активности технологии на базе магнитной редукции скорости. Отметим, что в настоящий момент прослеживается активный тренд к использованию магнитных редукторов и вариаторов в ветроэнергетической установке. Хенк Полиндер и его коллеги в своем исследовании указали на одно из актуальных тенденций развития мировой ветроэнергетики и отдельно отметили о преимуществах так называемых псевдопрямых приводов в составе ветроэнергетической установки [43].

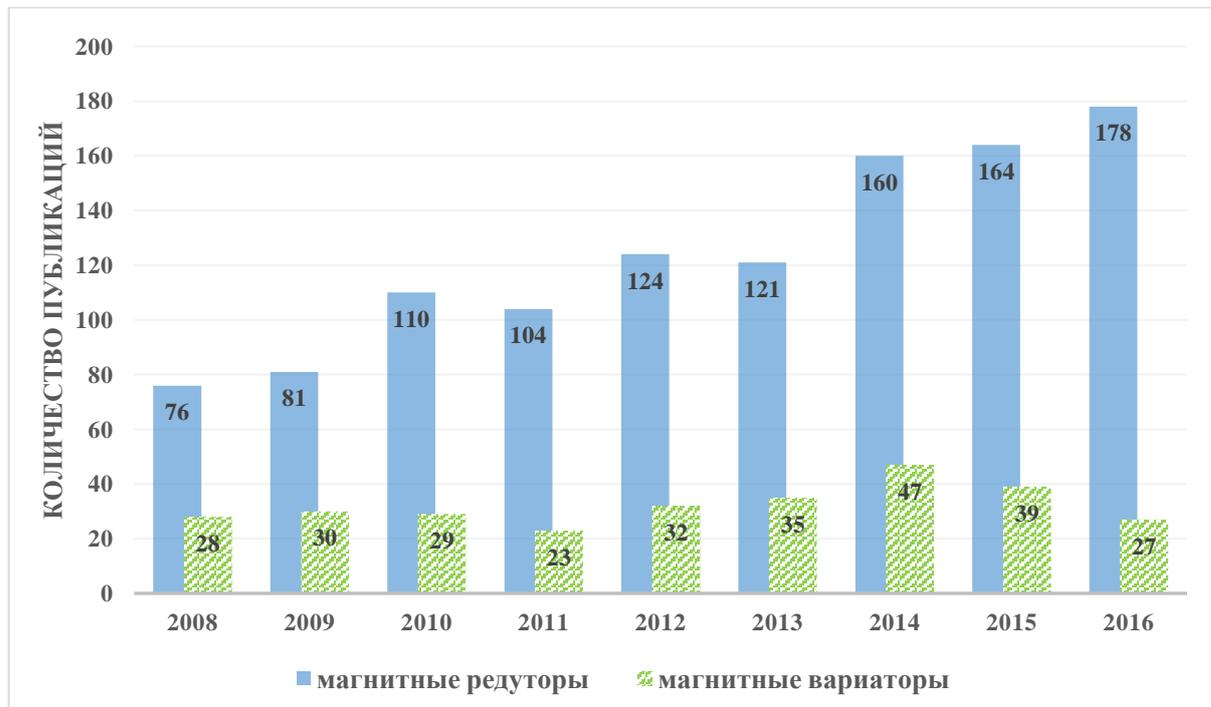


Рисунок 1.12 – Количество публикаций в мире по тематике исследований магнитного редуктора и вариатора

Среди отечественных авторских коллективов можно выделить исследования Афанасьева А. А. Они исследовали совмещенный электромеханический комплекс, обладающего свойствами синхронной машины, подключенной к преобразователю частоты, и магнитного редуктора с переменным коэффициентом редукции [59]. Школа профессора Курбатова П.А. из университета МЭИ активно занимается разработкой методологии проектирования бесконтактных магнитных редукторов. Была представлена диссертация Молоканова О.Н. по разработке методов расчета магнитных редукторов и его численного моделирования, подтвержденная созданием экспериментального образца [62-65]. В рамках их исследований была поставлена задача создания методологии проектирования комплексных электротехнических систем на базе магнитного редуктора. Более того, в исследовании приведен анализ магнитного вариатора в составе ветроэнергетической установки. Но, они не исследовали их при параллельной работе в составе автономной электроэнергетической системы, где существуют проблемы электромеханической совместимости. Была поставлена задача по разработке технических решений по созданию электромагнитного вариатора и его динамической модели. Следует отдельно отметить диссертацию PhD Райан Монтегю из университета Шеффилда, которая была защищена в 2014 г. по теме исследований построения системы управления приводом магнитного вариатора [75]. Он показал и возможности использования и формирования базовых систем построения автоматической системы регулирования электромагнитного вариатора в составе ВЭУ. Создал математическую модель и разработал систему двухконтурного автоматического управления за скоростью.

Проведенные исследования использовали преобразования управляемого энергоресурса, в случае ветроэнергетических установок ресурс переменный и неуправляемый, поэтому в этом случае необходимо обеспечить электромеханическую совместимость. Использование магнитного вариатора вызывает интерес так, как находящиеся на одном присоединении с нагрузкой и формирует двухмассовую систему с механическим разделением через упругое магнитное взаимодействие. В настоящий момент начинает получать

распространение использование магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением. Наряду с электромеханическим способом стабилизации скорости или углового положения роторов генераторов существует также и аэродинамический способ стабилизации с использованием как традиционного управления при изменении угла заклинения, так с использованием вспомогательных средств аэродинамического регулирования. Отметим следующее, электромеханический способ стабилизации скорости имеет довольно низкую постоянную времени в отличие от аэродинамического способа управления. И эта возможность может послужить к созданию взаимодействующих средств управления, обеспечивающих стабилизацию частоты в автономной электроэнергетической системе с помощью комплексного его формирования.

В силу особенности развития российской ветроэнергетики, где имеется зарождающаяся производственная сеть по выпуску автономных ВЭУ малой мощности: от 0,04 до 30 кВт, с возможностью применения технологии магнитной редукции скорости [2]. Использование автономных ВЭУ уже в настоящее время экономически оправдано в районах децентрализованного электроснабжения, в том числе на севере, в горных и других удаленных районах с высокой стоимостью завозимого топлива. Отметим, что более 2/3 территории России находится вне систем централизованного электроснабжения. Удовлетворение энергетических потребностей за счет привозного топлива и использования дизельных и бензогенераторов становится все более и более затратным. В некоторых районах страны себестоимость электрической энергии от дизель-генераторов мощностью до 100 кВт достигает 100 руб/(кВт·ч) или 1,5 – 2,0 долл (США)/(кВт·ч), что существенно выше, чем могли бы обеспечивать ветроустановки. По оценкам Международного энергетического агентства, почти 60% ввода новых мощностей в секторе электроэнергетики до 2040 года будут обеспечены за счет ВИЭ [1]. Согласно прогнозам экспертов, к 2025 году ВИЭ-генерация должна приблизиться к окупаемости станций, работающих на традиционных энергоносителях. И хотя в энергодефицитных регионах такое равенство уже достигнуто, пока себестоимость электроэнергии, полученной за счет солнца и ветра, в два раза выше, чем в случае

с газом. Россия включается в общемировую гонку по развитию генерации из возобновляемых источников энергии. При этом уже сейчас себестоимость ВИЭ-генерации зачастую ниже, чем производство электроэнергии традиционными способами. Тем не менее, единственной возможностью не отстать от развитых стран является применение новых технологий, которые позволят сформировать конкурентные преимущества на рынке ветроэнергетики.

В качестве заключения отметим, что в настоящий момент в России эксплуатируется несколько ВЭС, подключенных к электрической сети в Калининградской, Ростовской и Воркутинской областях, на острове Беринга, в Башкирии, Калмыкии и на Чукотке. Суммарная мощность ветроустановок составляет всего несколько десятков мегаватт. На большинстве ветростанций используется ветроэнергетическое оборудование в основном зарубежного производства [2].

## 1.7 Выводы

В ходе проведения анализа литературных источников и исследований, проведённые авторскими коллективами, были 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 целесообразность использования электромагнитного вариатора в составе ВЭУ в целях реализации регулирования частоты в АЭС.

7. Верификация модели на экспериментальном стенде.

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВАРИАТОРЕ В СОСТАВЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ РАБОТЕ В АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

### 2.1 Постановка задачи

В данной главе ставится задача, рассмотреть существующие компоновки и провести сравнительный анализ их энергетической эффективности, а также исследовать динамическую модель электромагнитного вариатора при различных углах рассогласования. Эта модель должна быть выполнена с учетом линеаризации угла дополнительного рассогласования двухмассовой электромеханической вариатора на быстроходном роторе со стороны генератора и тихоходном роторе со стороны турбины при их малых и больших приведенных углов рассогласования. Эти исследования позволят разработать систему регулирования по поддержанию выходной скорости вращения электромагнитного вариатора. Так как, действие вариатора ограничивается малой постоянной времени и малым резервом активной мощности, необходимо предусмотреть вспомогательный контур, содержащий контур управления моментов ветроколеса ВЭУ. Это позволяет обеспечить компенсацию вращающего момента на звене управления электромагнитного вариатора, и, тем самым, сформировав необходимое воздействие для решения проблемы введения резервов активной мощности для стабилизации частоты в АЭС.

Взаимодействие контуров управления моментом лопастей ВЭУ с использованием электромагнитного вариатора позволяет, учитывая постоянную времени каждого из контуров, воздействовать на переходной процесс с целью формирования управления на быстроходный и тихоходный ротор электромагнитного вариатора и восстановления устойчивости при различных возмущениях в АЭС.

## 2.2 Уравнение электромеханических переходных процессов в энергосистеме

В целях анализа электромеханических переходных процессов, необходимо разработать математическую модель работы генератора на сеть.

Ускорение представляет собой вторую производную от угла по времени [98]:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P_{\max} \sin(\delta); \quad (2.1)$$

где  $P_0$  – мощность турбины;  $P_{\max}$  – максимальное значение мощности аварийного режима.

Постоянная времени механической инерции ротора генератора  $T_j$  определяется следующим образом:

$$T_j = J \cdot \frac{\omega_0^2}{S_{\text{ном}}}; \quad (2.2)$$

где  $J = GD^2/4$  – момент инерции ротора синхронной машины,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $GD^2$  – маховый момент,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $\omega_0 = 2\pi f$  – номинальная угловая скорость вращения ротора,  $\text{рад}/\text{с}$ ;  $S_{\text{ном}}$  – номинальная полная мощность генератора,  $\text{Вт} = \text{Дж}/\text{с} = \text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ .

С помощью метода последовательных интервалов, угол положения ротора вычисляется следующим образом:

$$\delta = \delta_0 + \frac{360 f \Delta t^2}{T_j} \frac{P_0 - P_{\max} \sin(\delta)}{2}. \quad (2.3)$$

Постоянная времени механической инерции генератора в практических расчетах определяется следующим образом:

$$T_j = \frac{2,74 GD^2 n^2}{1000 S_{\text{ном}}}; \quad (2.4)$$

где  $GD^2$  – маховый момент,  $\text{т} \cdot \text{м}^2$ ;  $n$  – скорость вращения,  $\text{об}/\text{мин}$ ;  $S_{\text{ном}}$  – номинальная мощность генератора,  $\text{кВА}$ .

Исследуем электромеханическую совместимость при переходных процессах параллельной работы двух ВЭУ с СГПМ в автономной электроэнергетической системе.

На рисунке 2.1 изображена АЭС, состоящей из двух ВЭУ с одинаковыми параметрами механической инерции генераторов, турбин и линий электропередачи, связывающие эти генераторы.

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

$$\begin{cases} T_{J1} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = \pm K_{EM1} - M_{EM1} - M_{12} \sin(\delta_{12}) \\ T_{J2} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = \pm K_{EM2} - M_{EM2} - M_{21} \sin(\delta_{21}), \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $M_{EM1}$ ,  $M_{EM2}$  – электромагнитный момент первой и второй машины соответственно;  $M_{12}$ ,  $M_{21}$  – взаимный момент, вызванный параллельной работой машин первой машины по отношению ко второй и второй машины по отношению к первой соответственно;  $\delta_{12}$ ,  $\delta_{21}$  – угол рассогласования ротора первой синхронной машины по отношению ко второй и второй машины по отношению к первой;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – углы положения роторов генератора первой и второй машины;  $T_{J1}$ ,  $T_{J2}$  – постоянные времени инерции роторов первого и второго генератора соответственно,  $K_{EM1}$ ,  $K_{EM2}$  – момент упругости первой и второй ВЭУ с электромагнитными вариаторами.

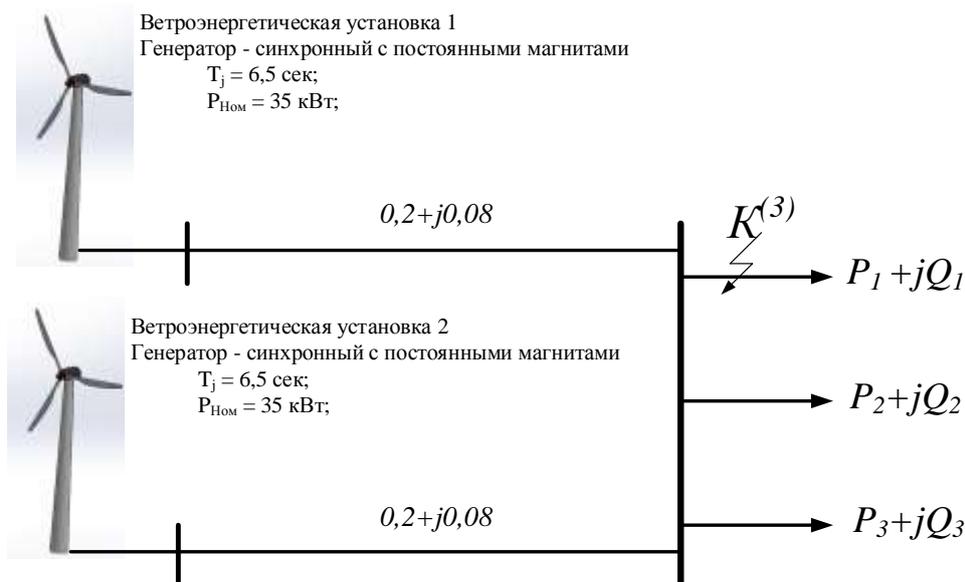


Рисунок 2.1 - Схема исследуемой автономной системы, состоящей из двух ВЭУ с одинаковыми параметрами генераторов, турбин и линий электропередачи

Уравнение моментов со стороны турбин ВЭУ:

$$\begin{cases} T_{JT1} \frac{d^2 \delta'_1}{dt^2} = C_p \pi R_{blade}^2 \frac{\rho v^3}{2 \cdot \omega_{load}} \pm K_{EM1} \\ T_{JT2} \frac{d^2 \delta'_2}{dt^2} = C_p \pi R_{blade}^2 \frac{\rho v^3}{2 \cdot \omega_{load}} \pm K_{EM2} \end{cases}, \quad (2.6)$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с;  $\omega_{load}$  – скорость турбины, рад/с;  $\rho$  – плотность воздуха, равная 1,221 кг/м<sup>3</sup>;  $R_{blade}$  – радиус лопасти, м;  $\omega_{load}$  – скорость вращения турбины, рад/с;  $Z$  – быстроходность турбины;  $\delta'_1$  и  $\delta'_2$  – 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 [66. 69]:

$$C_p(Z_{turbine}, \beta) = 0,73(151 \cdot v / (Z_{turbine}) - 0,002\beta - 13,2) e^{-18,4 \cdot v / (Z_{turbine})}, \quad (2.7)$$

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

Уравнение магнитной жесткости, которое выражается через максимальный электромагнитный момент, передаваемый от тихоходного ротора к быстроходному, чисел ферромагнитных стержней и угла нагрузки:

$$\begin{cases} K_{EM1} = n_{S1} M_{\max1} \cos(\theta_{e1}) \\ K_{EM2} = n_{S2} M_{\max2} \cos(\theta_{e2}) \end{cases} \quad (2.8)$$

Приведенный угол дополнительного рассогласования  $\theta_e$  магнитной трансмиссии определяется как угол между быстроходным и тихоходным ротором:

$$\theta_e = p_h \delta - n_s \delta', \quad (2.9)$$

где  $\delta$  и  $\delta'$  – угловое положение быстроходного и тихоходного роторов соответственно;  $p_h$  – число пар полюсов быстроходного звена магнитной трансмиссии;  $n_s$  – число ферромагнитных сегментов магнитной трансмиссии.

На рисунке 2.2 изображена компоновка ветроэнергетической установки с электромагнитным вариатором. Предлагается механический редуктор заменить на вариатор. Изменение вращающего момента электромагнитного вариатора позволяет 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 основные зоны работы. 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. Отметим, традиционно угол заклинения во второй зоне равен нулю, и регулируется только третьей зоне. Однако, канал управления углом заклинения можно использовать для управления моментом ветровой турбины.

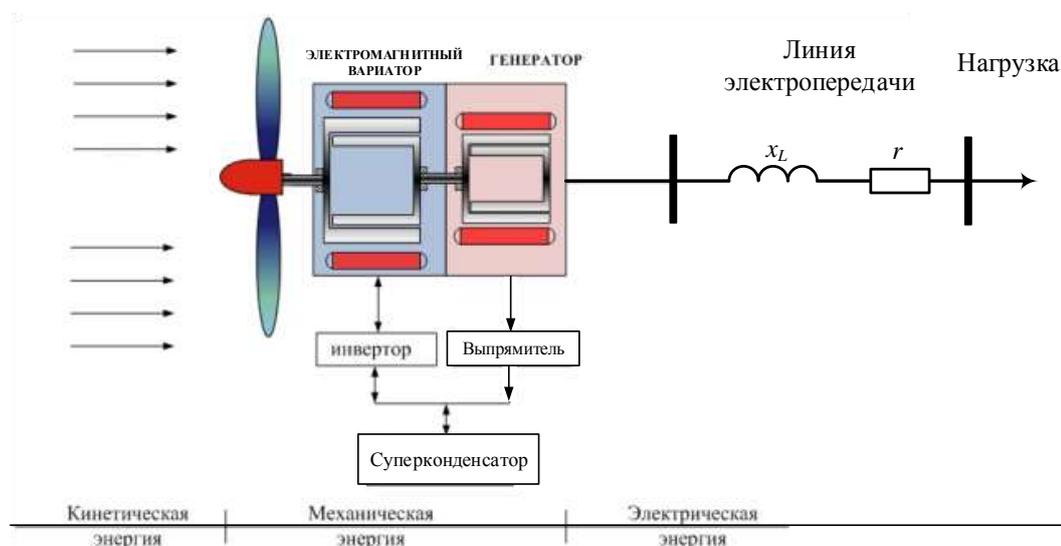


Рисунок 2.2 - Компоновка ВЭУ с использованием электромагнитного вариатора

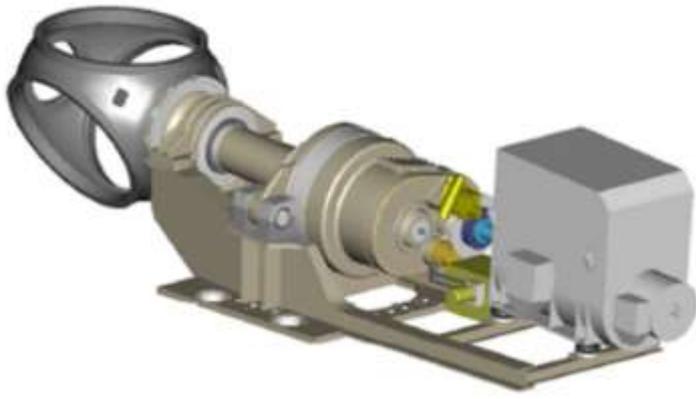
Но, недостатком такого регулирования является высокая постоянная времени, обусловленная медленным перемещением лопасти относительно её оси. Хотя, с точки зрения энергетических показателей, такой способ изменения момента наиболее привлекательный, т.к., он обеспечивает широкий диапазон изменения мощности 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 Якоб П. Ахо и Л. Гордон Крафт, показали, что мощность (момент), вносимый интегрированным двигателем электромагнитного вариатора, может составлять около 20% от полной мощности (вращающего момента) турбины. Достоинством такого построения является высокое быстродействие. Недостатком является малое 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 может вызвать даже в статическом режиме ненулевое значение компенсирующего момента и, соответственно, загрузку силового преобразователя и разряд 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 ведущего более мощного генератора электрической энергии. А второй контур управления, изменяющий угол заклинения турбины регулирует вращающий момент, чтобы снизить до нуля компенсирующий момент электромагнитного вариатора.

### **2.3 Целесообразность применения электромагнитного вариатора в ветроэнергетической установке**

Ветроэнергетика в настоящий момент является одной из наиболее динамично развивающихся направлений альтернативной энергетики в мире. Современное развитие ветроэнергетики идет по двум независимым направлениям. С одной стороны - это масштабирование с целью увеличения единичной мощности в ущерб энергетической эффективности. С другой стороны - это улучшение энергетической

эффективности и массогабаритных показателей. Последнее, как показывает практика эксплуатации ВЭС, являются приоритетным развитием компоновок гондолы существующих ВЭУ [81]. Отметим также, что расширенные габаритные размеры ВЭУ влекут за собой небольшие скорости вращения турбины. Электрический генератор и его трансмиссия являются сердцем ВЭС. Имеются две основные идеи построения ветровых турбин. Первая, отображенная на рисунке 2.3, представляет собой классическую редукторную систему на базе асинхронного генератора двойного питания или СГПМ. В данном случае отметим, существенный износ и повреждение механических мультипликаторов сопряжено со значительными эксплуатационными расходами на обслуживание. Вторая концепция, отображенная на рисунке 2.4 представляет прямой привод на базе синхронной многополюсной машины с постоянными магнитами. Рисунок 2.5 отражает состав основных затрат в классических ВЭУ на базе СГПМ и асинхронного генератора двойного питания [82]. Следует отметить, что к достоинствам редукторной идеологии относится сравнительно невысокая стоимость, а к несовершенствам – потери механической энергии. Исследования, проведенные при выявлении механических повреждений в ВЭУ показала значительный износ при механических перегрузках [97, 101-102]. Также, существенной проблемой связано обслуживание ВЭУ при наличие смазочных материалов внутри мультипликатора. К преимуществам концепции прямого привода можно отнести высокую энергетическую эффективность и отсутствие редуктора с маслосодержащими веществами. К сожалению, большие габариты и масса делают данную компоновку дорогой [101].

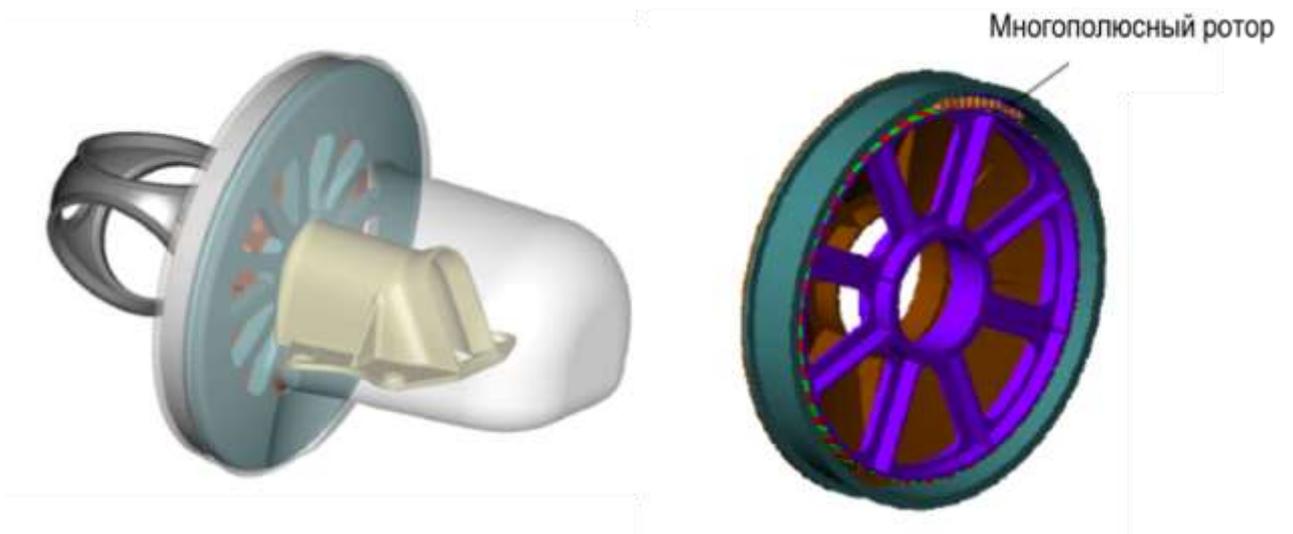


а



б

Рисунок 2.3 – Компоновка ВЭУ на базе редуктора [98]:  
а – компоновка в гондоле; б – трехступенчатый редуктор



а

б

Рисунок 2.4 – Компоновка ВЭУ на базе прямого привода:  
а – компоновка в гондоле; б – многополюсный генератор

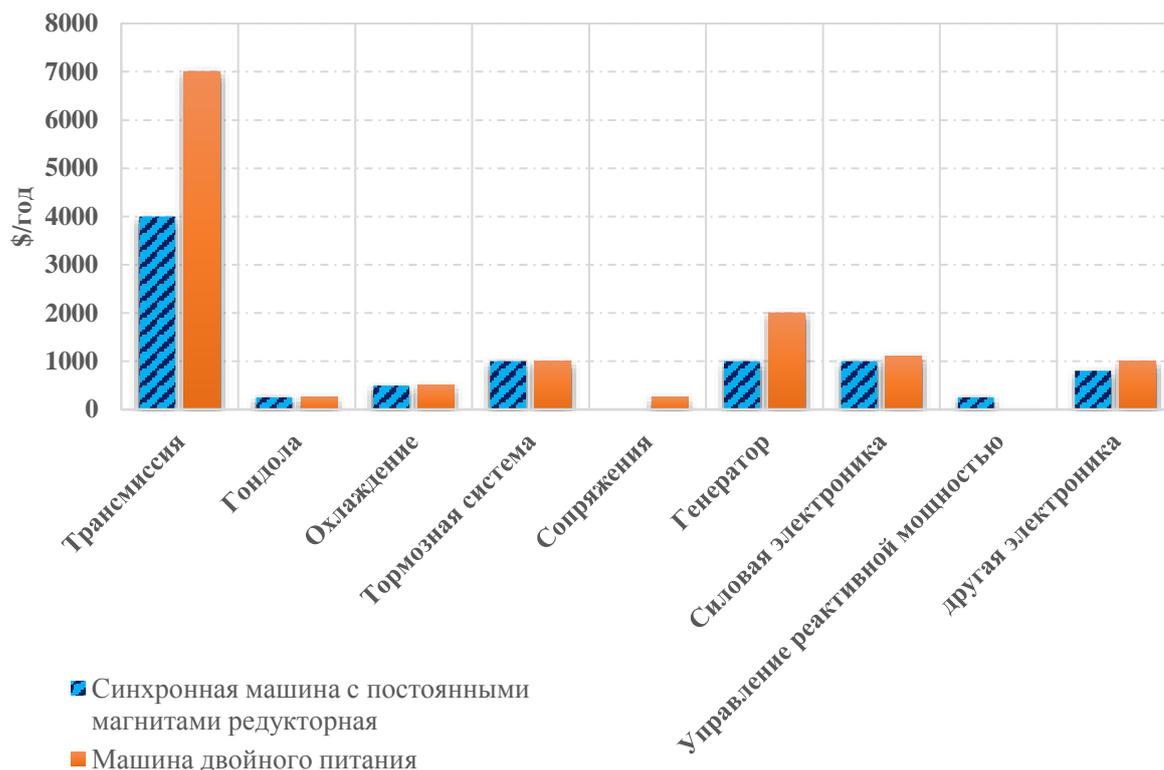


Рисунок 2.5 – Сравнительный анализ эксплуатационных расходов на отдельных элементах компоновки ВЭУ на основе машины двойного питания и ВЭУ на базе СГПМ [99]

Рисунок 2.6 отображает распределение основных потерь энергии в классической ВЭУ. Следует обратить внимание, что в вставке постоянного тока теряется около 3% от полной мощности [101].

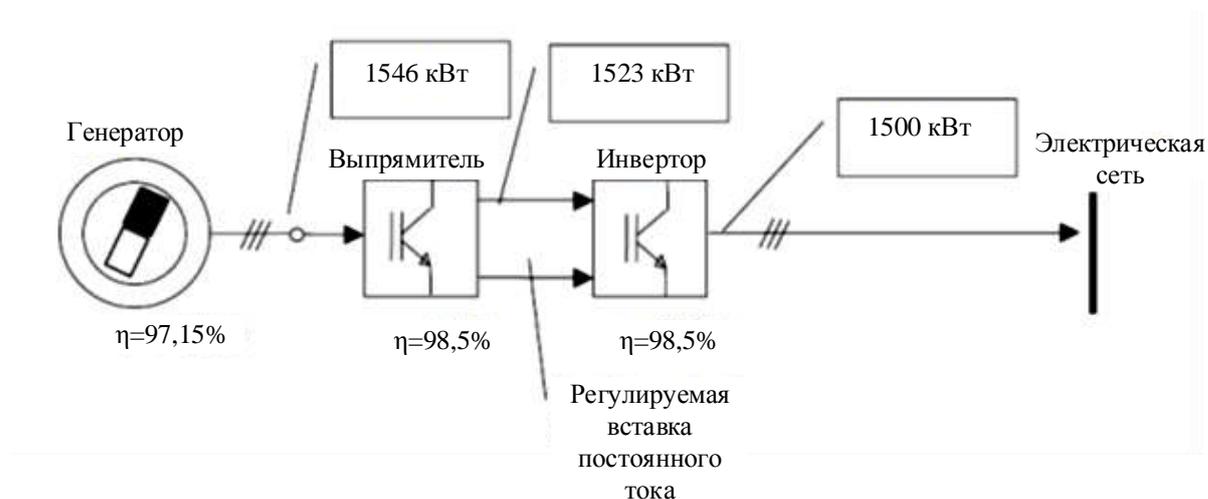


Рисунок 2.6 – Распределение основных потерь электрической энергии в ВЭУ

Для определения целесообразности применения электромагнитного вариатора исследуем его потери в магнитопроводе. Так как в силу того, что в магнитной трансмиссии необходимо обеспечивать широкие диапазоны изменения вращения магнитной трансмиссии необходимо провести расчет потерь в магнитопроводе. Минимальные потери в ферромагнитных сегментах и во вращающихся звеньях являются важным критерием энергетической эффективности трансмиссии в целом. Для анализа потерь в электротехнической стали применим метод конечных элементов. Для этого необходимо получить кривые изменения магнитной индукции в воздушных зазорах и затем производится разложение в ряд Фурье. Потери в магнитопроводе представляет собой сумму потерь вихревых токов  $P_e$  и потерь на гистерезис  $P_h$ , и выражается следующим образом [86]:

$$\begin{cases} P_e = \oint \sum_n \rho K_e (nf)^2 (B_{nr}^2 + B_{nt}^2) dV \\ P_h = \oint \sum_n \rho K_h (nf)^2 (B_{nr}^2 + B_{nt}^2) dV \end{cases} \quad (2.10)$$

где  $\rho$  – плотность стали;  $n$  – порядок гармоники;  $f$  – частота перемагничивания;  $V$  – объем сердечника;  $B_{nr}$  и  $B_{nt}$  – радиальная и тангенциальная компонента  $n$ -ой гармоники и  $K_e$ ,  $K_h$  – коэффициенты потерь в электротехнической стали сердечника.

В таблице 2.1 представлены основные параметры постоянных магнитов и электротехнической стали.

Из данных расчетов вытекает, что в ферромагнитных элементах в данном варианте геометрии электромагнитной трансмиссии потери в электротехнической стали равны 12 кВт, что не превосходит 1-2 % от полной мощности машины, равной 1,2 МВт. В таблице 2.2 представлен исследуемая система в конструкции которой отсутствуют короткозамкнутые цепи, имеющие место при формировании вихревых токов и, как следствие, создают нагрев.

Геометрия электромагнитной трансмиссии изображена на рисунке 2.7 и в таблице 2.2. Представлены основные геометрические параметры и свойства материалов.

На рисунке 2.8, 2.9 представлены графики разложения Фурье по радиальной и тангенциальной составляющим гармоник индукции магнитного поля в воздушном зазоре между наружным ротором и ферромагнитными сегментами и внутренним быстроходным звеном и ферромагнитными сегментами.

Таблица 2.1 – Параметры постоянных магнитов и электротехнической стали

Параметр	Значение
Относительная магнитная проницаемость магнитов	1,0998
Объемная проводимость постоянных магнитов	625000 см/м
Плотность постоянных магнитов	7400 кг/м <sup>3</sup>
Плотность электротехнической стали	7820 кг/м <sup>3</sup>
Коэффициент заполнения магнитопровода	0,95
$K_e$	0,91
$K_h$	366
Материал постоянных магнитов	NbFeB-35

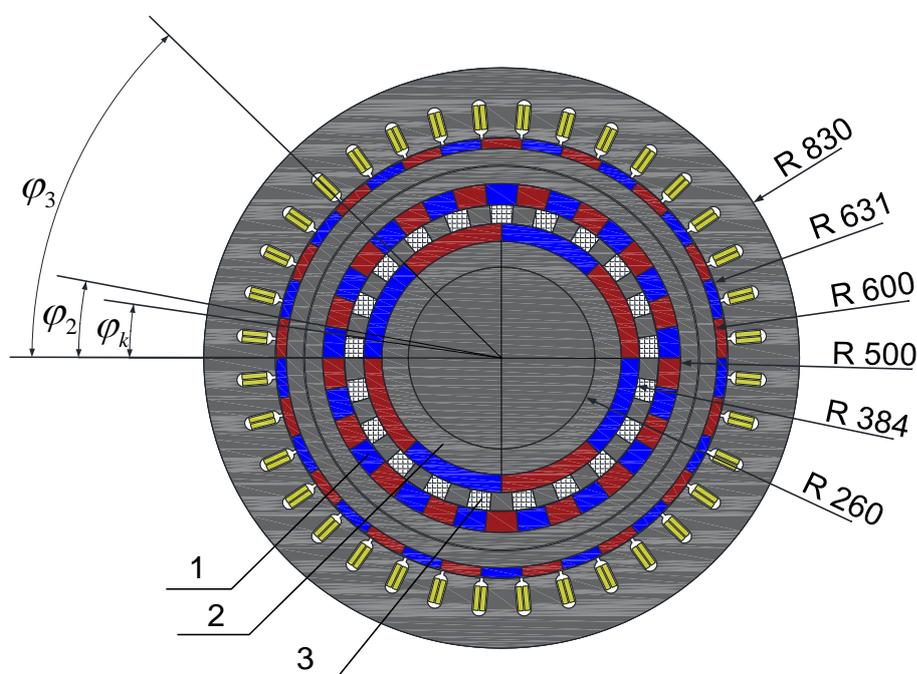
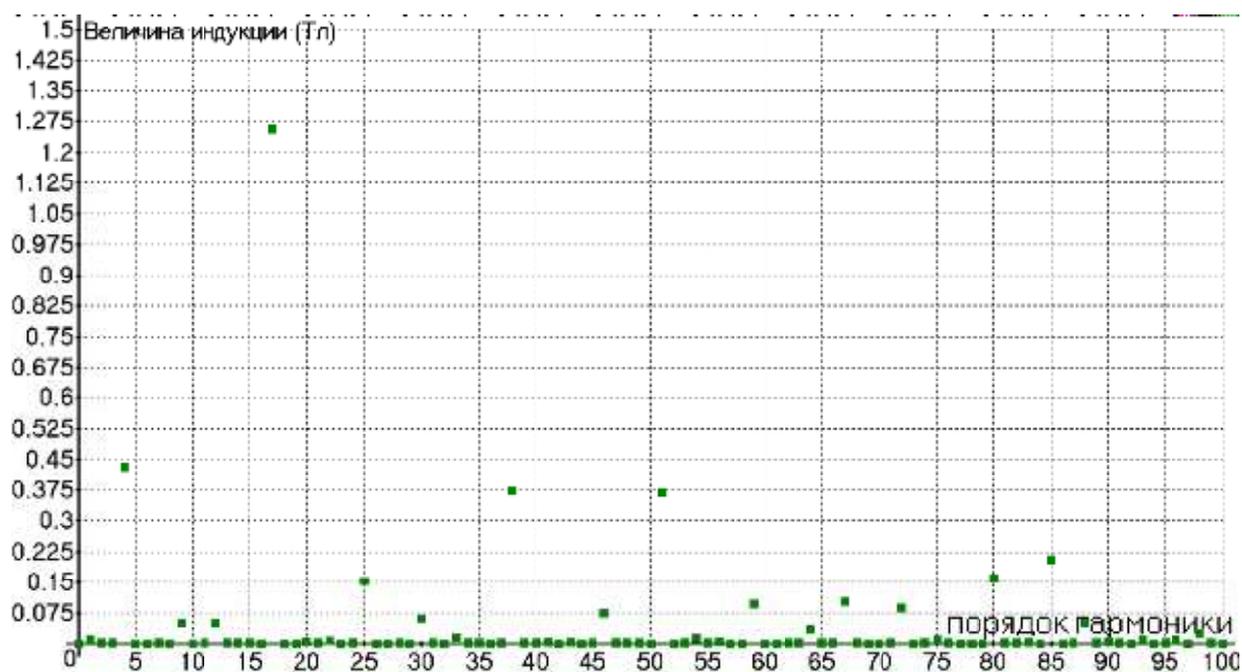


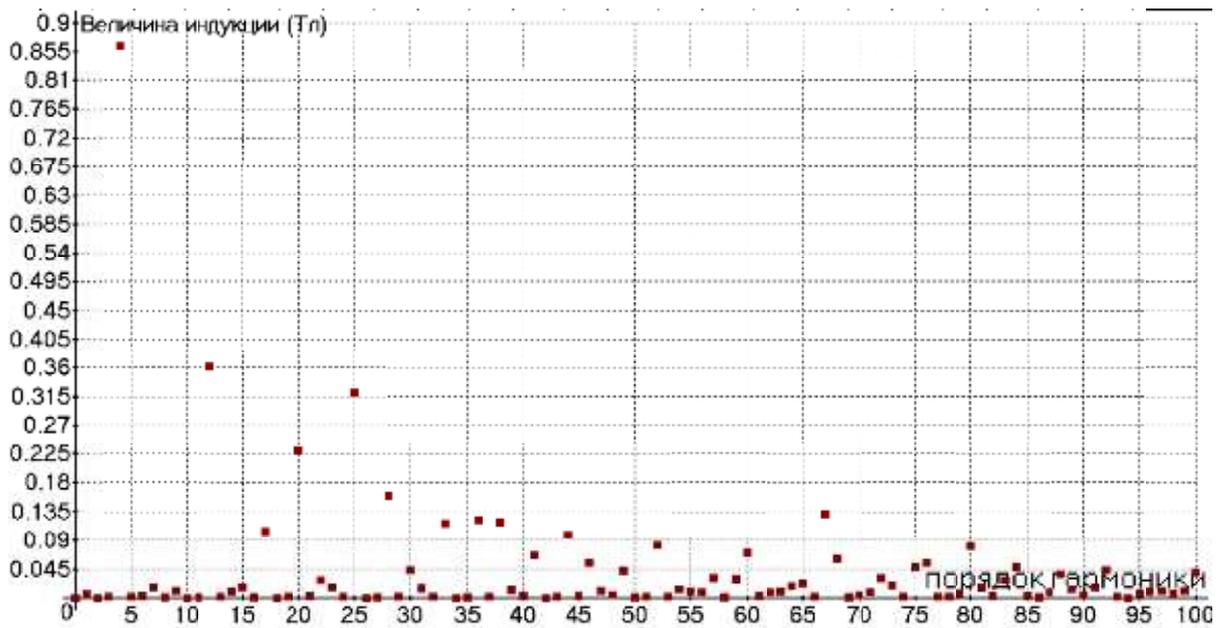
Рисунок 2.7 – Основная компоновка геометрии магнитной трансмиссии:  
1 – ротор управления; 2 – быстроходное звено; 3 – модулирующее кольцо

Таблица 2.2 – Параметры предлагаемой магнитной трансмиссии

Параметр	Значение	
Осевая длина	800	мм
Радиус статора звена управления	830	
Внутренний радиус статора звена управления	631	
Внешний радиус ротора управления	600	
Высота постоянных магнитов	60	
Внешний диаметр быстроходного звена	384	
Номинальная скорость быстроходного звена	750	об/мин
Номинальная скорость тихоходного звена	170	

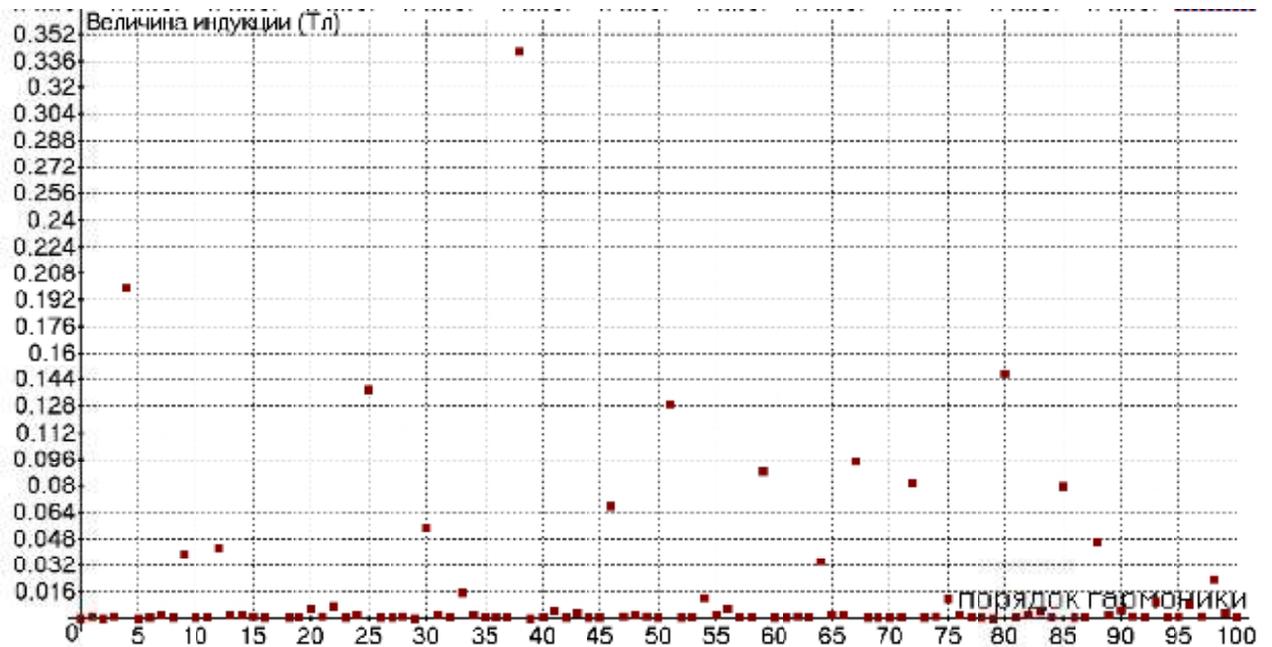


а



б

Рисунок 2.8 – Распределение радиальных гармоник магнитной индукции вдоль воздушного зазора между модулирующими элементами и:  
 а – верхним ротором управления; б – быстроходным ротором



а

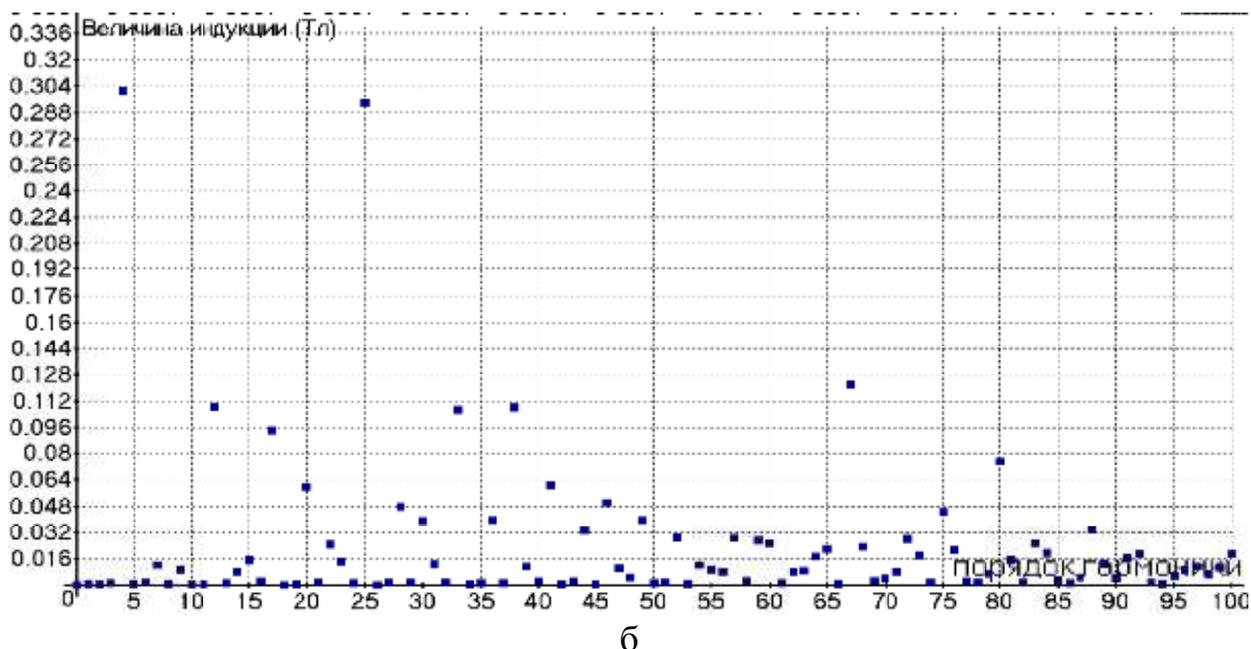


Рисунок 2.9 – Распределение тангенциальных гармоник индукции магнитного поля в воздушных зазорах между модулирующими сегментами и:  
 а – верхним ротором управления; б – быстроходным ротором

## 2.4 Описание физического принципа функционирования электромагнитного вариатора

В данном разделе представлено исследование физического принципа функционирования электромагнитного вариатора по обеспечению электромагнитной совместимости с АЭС. Исследования также приведены в публикациях [85–89]. Идея заключается в замене планетарной механической трансмиссии на электромагнитный вариатор с переменным передаточным отношением. Это устройство является средством для преобразования момента между турбиной и генератором и имеет различное число постоянных магнитов через модулирующие ферромагнитные сегменты на тихоходном валу трансформирует момент.

Изменение переменного отношения реализуется путем воздействия тока в обмотке управления, которая обеспечивает изменение скорости вращения ротора управления меняя при этом передаточное отношение и, влияя на скорость тихоходного и быстроходного валов, изменяя скорость вращения генератора.

Отметим, что в силовой схеме отсутствует вставка постоянного тока, и генератор может быть подключен к автономной энергосистеме непосредственно. Отсутствие преобразователя исключает генерацию высших гармоник в сеть. Для реализации управления применяются вставка постоянного тока, рассчитанный на значительно меньшую мощность, которая может составлять 10-15% от номинальной проходной мощности, чем инвертор между генератором и энергосистемой в варианте прямого привода [42]. Дополнительное питание звена управления возможно напрямую от энергосистемы. Выпрямитель обеспечивает преобразование частоты для заряда суперконденсатора из сети, а питание обмотки управления трансмиссии реализуется через двунаправленный преобразователь частоты. В этом случае применение буферного накопителя играет важную роль, обеспечивающий повышение устойчивости параллельной работы генераторов ВЭС, а также, компоновка не воспринимает снижение напряжения в системе при аварийных режимах. Следует отметить, что постоянная времени воздействия контуров управления электромагнитного вариатора по сравнению с контуром аэродинамического регулирования значительно ниже, на первоначальном этапе переходного процесса происходит стабилизация скорости путем использования накопителя в цепи вариатора. К сожалению, при близком коротком замыкании в сети, ограниченная ёмкость аккумуляторной батареи не полностью позволяют обеспечить необходимую длительность поддержания номинальной выходной скорости трансмиссии и ВЭУ отключается. Одним из средств уменьшения расчетной мощности регулирующего оборудования является использование электромагнитной трансмиссии в составе компоновки ВЭУ, которая включает в себя магнитный редуктор с ферромагнитными сегментами, необходимый для обеспечения фиксированного передаточного отношения, и интегрированный с редуктором дополнительный двигатель. Рисунки 2.10 и 2.11 отображено схематично предложенную электромагнитную трансмиссию с изменчивым передаточным отношением. При этом возможны два варианта построения трансмиссий. Один из вариантов предполагается в формировании дополнительного вращающего момента, который сокращает возмущающий момент, при этом,

реализуется стабилизация скорости (см. Рисунок 2.11). Во втором варианте формируется дополнительная скорость через вращение звена управления трансмиссии при неизменном вращающем моменте на ее выходе, и в результате суммирования скоростей изменяется передаточное отношение (см. Рисунок 2.10). При этом по сравнению с классической системой (см. Рисунок 2.10) планетарный механической редуктор замещается на магнитную трансмиссию с традиционным векторным управлением. На рисунке 2.11 а) представлен эскиз электромагнитного вариатора, включающий в себя магнитный редуктор с фиксированным передаточным отношением и интегрированный с ней электродвигатель с постоянными магнитами. Он создает дополнительный момент на быстроходном роторе, компенсирующий или формируется добавочный момент, обеспечивающий стабилизацию скорости. Магнитный редуктор является устройством для преобразования скорости турбины в синхронную скорость электрического генератора. Трансформация момента и скорости осуществляется через ферромагнитные сегменты ротора трансмиссии низкой скорости, которые помещены между быстроходным ротором и ротором управления с разным числом пар полюсов [89].

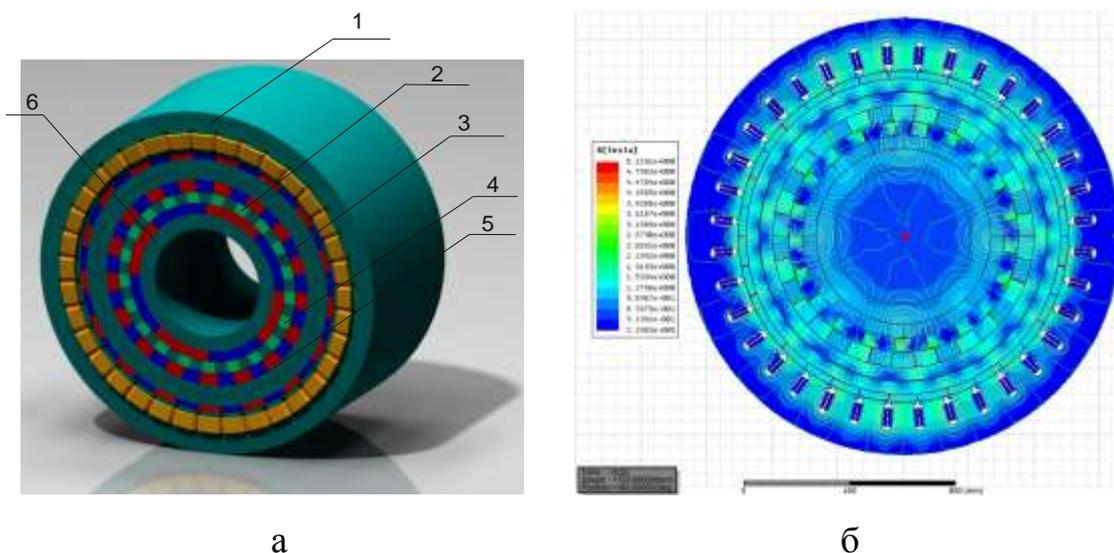


Рисунок 2.10 – Электромагнитная трансмиссия:

а – эскиз: 1 – звено управления; 2 – немагнитная вставка; 3 – модулятор из ферромагнитных сегментов; 4 – тихоходное звено; 5 – ротор управления с

постоянными магнитами; 6 – быстроходное звено; б – распределение магнитного поля в машине при номинальной нагрузке

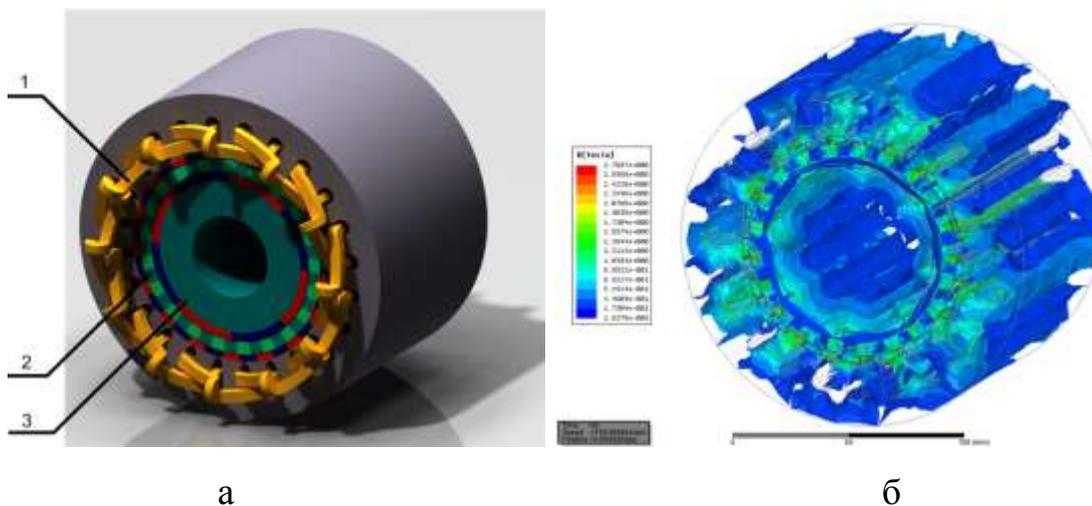


Рисунок 2.11 – Электромагнитный вариатор:

- а – эскиз: 1 – звено управления;  
 2 – тихоходный ротор с ферромагнитными сегментами; 3 – быстроходный ротор;  
 б – расчет распределения магнитного поля при номинальной нагрузке

## 2.5 Математическая модель физического принципа работы электромагнитной трансмиссии

Сегменты на основе ферромагнитного материала на тихоходном звене генерирует гармоники магнитного поля в воздушном зазоре кратные количеству пар полюсов внутреннего быстроходного ротора с постоянными магнитами и внешнего ротора управления, это соотношение обеспечивает постоянное передаточное отношение. При отсутствии звена управления, значение передаточного отношения равна отношению числа ферромагнитных сегментов к числу пар полюсов быстроходного ротора [88, 89].

Введем обозначение:  $p_1$  – число пар полюсов обмотки управления внешней системы магнитов управляемого ротора;  $p_2$  – число пар полюсов внутренней системы магнитов управляемого ротора;  $p_k$  – число ферромагнитных полюсов модулирующего звена, являющегося тихоходным звеном трансмиссии;  $p_3$  – число пар полюсов быстроходного ротора.

Магнитодвижущая сила (МДС) внутренней магнитной системы наружного ротора управления, которая выражается уравнением (2.11) вращается со скоростью  $\omega_2$  и содержит постоянные магниты с числом пар полюсов  $p_2$ :

$$F_2 = F_{2m} \cos(p_2\theta - p_2\omega_2 t + p_2\varphi_2); \quad (2.11)$$

где  $F_{2m}$  – амплитуда первой гармоники МДС;  $\theta$  – угловая положения ротора;  $\varphi_2$  – начальное угловое положение (рисунок 2.6).

С другой стороны, формируемая МДС, вращающаяся со скоростью  $\omega_3$  и имеющая число пар полюсов  $p_3$  на быстроходном звене [89]:

$$F_3 = F_{3m} \cos(p_3\theta - p_3\omega_3 t + p_3\varphi_3);$$

где  $F_{3m}$  – амплитуда первой гармоники МДС;  $\varphi_3$  – начальное угловое положение ротора генератора.

Учитывая постоянную составляющую и основную гармонику, можно внести магнитную проводимость в зависимость вращающегося модулирующего звена с числом пар полюсов  $p_k$  следующим выражением:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_{1m} \cos(p_k\theta - p_k\omega_k t + p_k\varphi_k);$$

где  $\lambda_0$  и  $\lambda_{1m}$  – неизменная компонента и амплитуда основной гармоники магнитной проводимости  $\lambda$ ,  $\varphi_k$  – начальное угловое положение ротора турбины ВЭУ.

Плотность магнитного поля, создаваемая  $F_2$ :

$$B_2 = \lambda \cdot F_2 = B_{21} + B_{22} + B_{23};$$

где

$$B_{21} = \lambda_0 \cdot F_{2m} \cdot \cos(p_2\theta - p_2\omega_2 t + p_2\varphi_2); \quad (2.12)$$

$$B_{22} = \frac{1}{2} \lambda_{1m} F_{2m} \cos[(p_k - p_2)\theta + p_2\omega_2 t - p_k\omega_k t + p_k\varphi_k - p_2\varphi_2]; \quad (2.13)$$

$$B_{23} = \frac{1}{2} \lambda_{1m} F_{2m} \cos[(p_k + p_2)\theta - p_2\omega_2 t - p_k\omega_k t + p_k\varphi_k + p_2\varphi_2].$$

Магнитная индукция, генерируемая МДС  $F_3$ :

$$B_3 = \lambda \cdot F_3 = B_{31} + B_{32} + B_{33};$$

где

$$B_{31} = \lambda_0 \cdot F_{3m} \cdot \cos(p_3\theta - p_3\omega_3 t + p_3\varphi_3), \quad (2.14)$$

$$B_{32} = \frac{1}{2} \lambda_{1m} F_{3m} \cos[(p_k - p_3)\theta + p_k\omega_k t + p_3\omega_3 t + p_k\varphi_k - p_3\varphi_3]; \quad (2.15)$$

$$B_{33} = \frac{1}{2} \lambda_{1m} F_{3m} \cos[(p_k + p_3)\theta - p_k\omega_k t - p_3\omega_3 t + p_k\varphi_k + p_3\varphi_3].$$

Для магнитного редуктора, работающего по принципу формирования гармоник магнитного поля в воздушных зазорах, т.е. модуляции кривой индукции в зазоре должно быть выполнено следующее соотношение [50]:

$$p_2 + p_3 = p_k, \quad (2.16)$$

Из уравнений (2.12) и (2.15) с учетом (2.16) следует, что составляющая  $B_{21}$  магнитного поля, генерируемая внешним ротором управления, и компонента  $B_{32}$  магнитного поля, производимая внутренним быстроходным ротором генератора ВЭУ, будет иметь равное число пар полюсов, равное  $p_2$ , и будет вращаться с одинаковой угловой частотой. Аналогично из уравнений (2.13) и (2.14) следует, что составляющая  $B_{22}$  магнитного поля, производимая внешним ротором управления, и составляющая  $B_{31}$ , создаваемая ротором управления, также будут иметь совпадающее число пар полюсов  $p_3$  и будут вращаться с одинаковой угловой скоростью. Таким образом, указанные компоненты магнитного поля будут создавать постоянный электромагнитный момент между двумя роторами.

Постоянные магниты электромагнитного вариатора на внутренней поверхности звена управления может быть представлена как токовый элемент, распределенный по поверхности вариатора:

$$J_2 = \frac{dF_2}{d\theta} = -p_2 F_{2m} \sin(p_2\theta - p_2\omega_2 t + p_2\varphi_2). \quad (2.17)$$

Вращающий момент внешнего ротора управления является результатом взаимодействия магнитного потока на тихоходном роторе и эквивалентного поверхностного тока на внешнем роторе управления и может быть записан следующим выражением [51]:

$$M_2 = \int_0^{2\pi} [J_2 \times B_{32}] l_a R d\theta, \quad (2.18)$$

где  $R$  – радиус;  $l_a$  – длина магнитной трансмиссии. После подстановки (2.17) и (2.15) в (2.18) и интегрирования получаем:

$$M_2 = -p_2 M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3),$$

где  $p_2$  – число пар полюсов внешнего ротора управления;  $p_k$  – число ферромагнитных сегментов на тихоходном звене;  $p_3$  – число пар полюсов быстроходного ротора;  $M_m$  – амплитудное значение момента, которое выражается соотношением:

$$M_m = \frac{\pi}{2} \lambda_{1m} F_{2m} F_{3m} l_a R l_a.$$

Из анализа данного уравнения следует, что  $M_m$  зависит от геометрических размеров вариатора и соответствующих роторов трансмиссии и свойств магнитов и ферромагнитных сегментов.

Аналогичным образом получается соотношение для момента, действующего на быстроходный ротор с числом пар полюсов  $p_3$ :

$$M_3 = -p_3 M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3).$$

В стационарном состоянии приведенный угол дополнительного рассогласования  $\varphi_e = p_2 \varphi_2 - p_k \varphi_k + p_3 \varphi_3$  должен быть постоянным:

$$\frac{d(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3)}{dt} = 0 \text{ или } (p_k \omega_k - p_2 \omega_2 - p_3 \omega_3) = 0,$$

где  $\omega_2$ ,  $\omega_k$ ,  $\omega_3$  – механические угловые скорости звена управления, тихоходного и быстроходного валов соответственно.

Поэтому, передаточное отношение между входным и выходным валами получается следующей линейной зависимостью [50]:

$$G(\omega_2) = \frac{\omega_k}{\omega_3} = \frac{p_3}{p_k} + \frac{p_2}{p_k} \frac{\omega_2}{\omega_3}. \quad (2.19)$$

Следовательно, изменяя скорость внешнего ротора (ротора управления)  $\omega_2$  в соотношении к входной скорости ротора  $\omega_3$ , передаточное отношение между входным и выходным ротором может регулироваться. Моменты  $M_2$ ,  $M_k$  и  $M_3$ , действующие на роторы соответственно, могут быть получены при условии пренебрежения потерей. Тогда можно записать:

$$M_2 + M_k + M_3 = 0; \quad (2.20)$$

$$\omega_2 M_2 + \omega_k M_k + \omega_3 M_3 = 0.$$

На основании этого получается момент на быстроходном валу:

$$M_k = p_k M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3).$$

Примем в качестве допущения в уравнениях (2.21) отсутствие потерь в магнитной системе и потерь на трение. Если создать момент в роторе управления  $M_{\text{упр}}$ , тогда быстроходный  $M_{\text{быстр}}$  и тихоходный вал  $M_{\text{тих}}$  соответственно, система уравнений динамики электромеханического преобразователя будет иметь вид [89]:

$$\begin{cases} J_{\text{упр}} \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} = M_{\text{упр}} - p_2 M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3) \\ J_{\text{быстр}} \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} = M_{\text{быстр}} - p_3 M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3) \\ J_{\text{тих}} \frac{d^2 \varphi_k}{dt^2} = M_{\text{тих}} + p_k T_{\text{мах}} \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3), \end{cases} \quad (2.21)$$

где  $J_{\text{тих}}$ ,  $J_{\text{быстр}}$ ,  $J_{\text{упр}}$  – момент инерции роторов низкой, быстрой и ротора управления соответственно.

## 2.6 Исследования режимов магнитной трансмиссии с использованием метода конечных элементов

Для определения параметров электромагнитной трансмиссии применен метод конечных элементов. С помощью программного комплекса *Maxwell* рассчитана характеристика механического момента от приведенного угла дополнительного рассогласования и положения быстроходного звена в двухмерной постановке. На рисунке 2.12 изображены результаты расчета механической угловой характеристики и отображен регулировочный диапазон области возможного изменения передаточного отношения электромагнитной трансмиссии. Были проведены серии расчетов по изменению положения ротора быстроходного звена относительно тихоходного ротора турбины ВЭУ. Рисунок 2.13 демонстрирует распределение магнитной индукции при фиксированном

положении ротора управления. На рисунке 2.14 показано распределение магнитной индукции при вращении ротора управления и быстроходного звена.

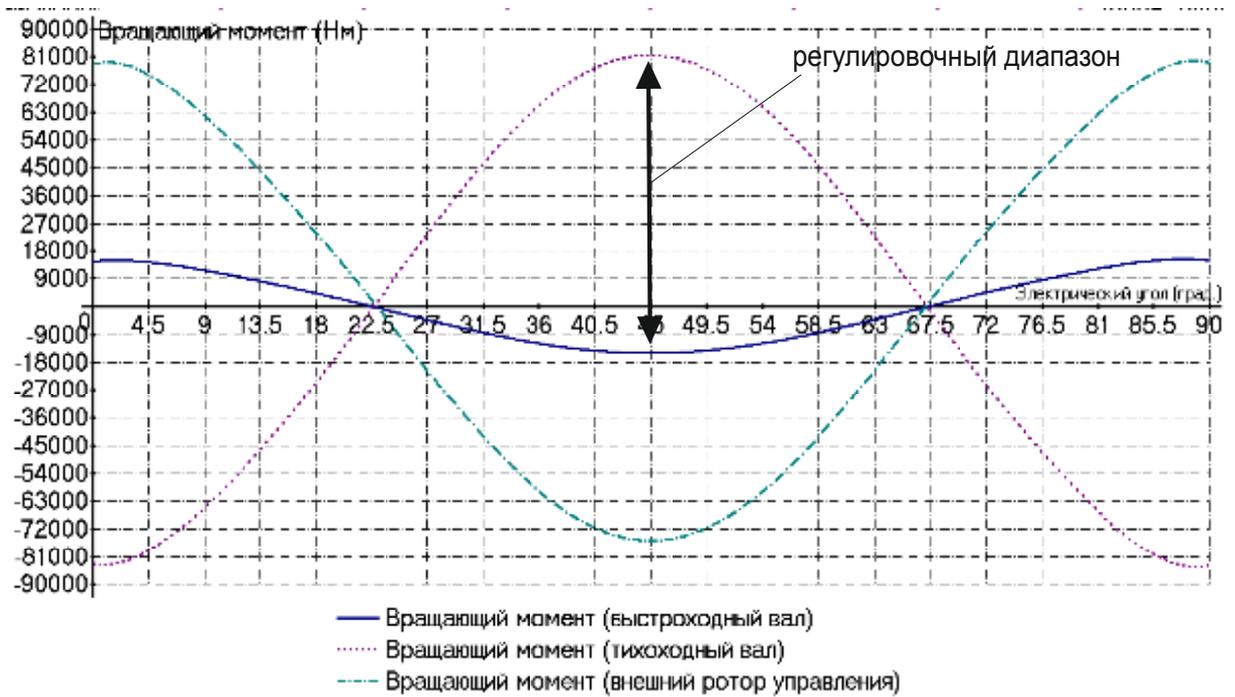


Рисунок 2.12 – Угловая механическая характеристика электромагнитной трансмиссии

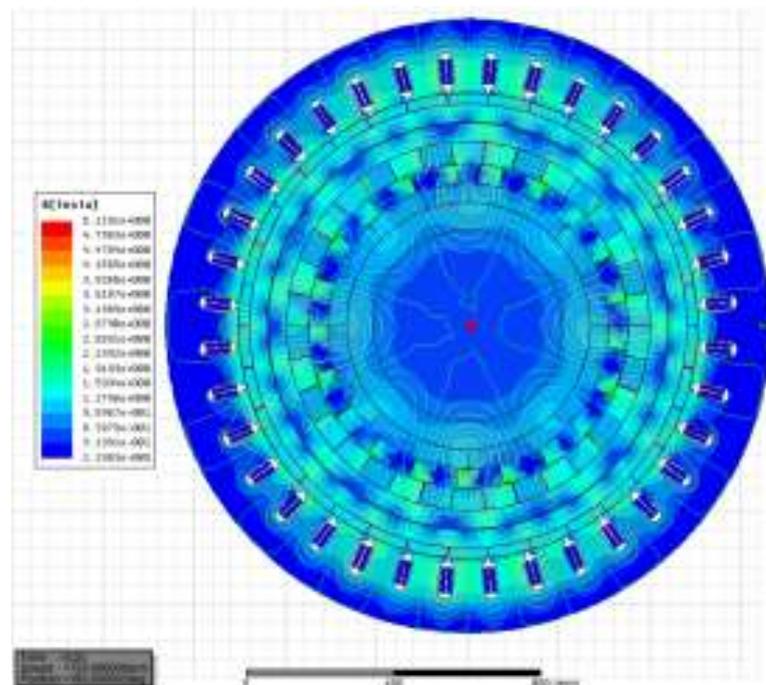


Рисунок 2.13 – Анализ магнитной индукции в ядре электромагнитной трансмиссии комплекса при фиксированном положении внешнего ротора управления

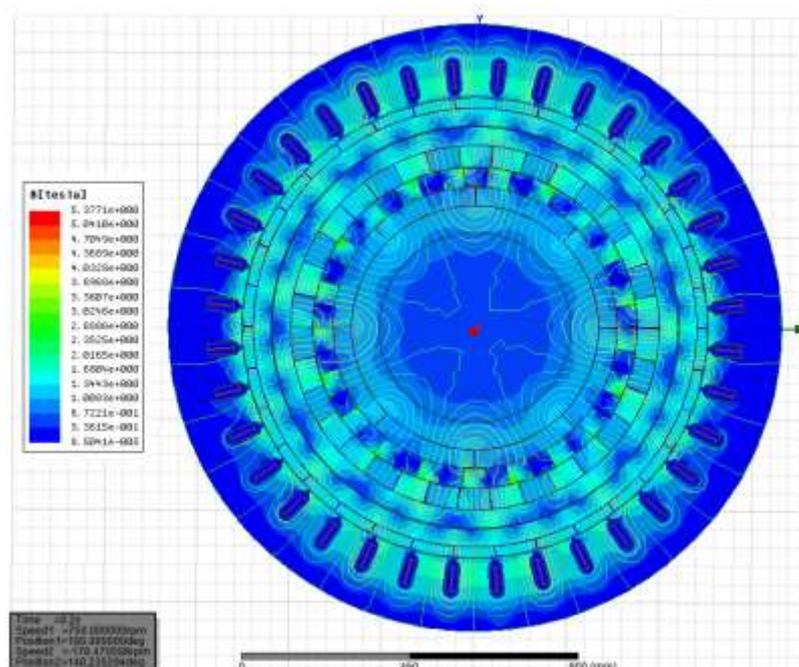


Рисунок 2.14 – Распределение магнитного поля при условии вращения с ненулевой скоростью внешнего ротора управления и быстроходного вала

Из выражения (2.19) вытекает линейная зависимость значения передаточного отношения и угловой скорости вращения ротора управления [50]. Рисунок 2.15 воспроизводит графическую зависимость передаточного отношения от угловой скорости вращения ротора управления с учетом неизменной скорости вращения быстроходного звена, равной 750 об/мин. Передаточное отношение становится меньшим, когда угловая скорость вращения ротора управления уменьшается и, наоборот, становится больше при увеличении угловой скорости вращения ротора управления. Для того, чтобы обеспечивают диапазон регулирования передаточного отношения, необходимо осуществлять постоянное питание обмотки управления от накопителей энергии. Например, в случае если необходимо обеспечивать передаточное отношение равно 1, все три ротора вращаются с некоторой скоростью и выходная механическая мощность равна нулю. Когда передаточное отношение не равно 1, обмотка управления будет питать аккумулятор или наоборот потреблять энергию из аккумулятора. Это зависит от передаточного отношения, которое может быть большим или меньшим чем номинальное его значение и направления передачи мощности между входным и

выходным роторами. Можно сказать, что передаточное отношение равно номинальному значению, это является номинальным статическим режимом трансформации скорости тихоходного и быстроходного валов. Рисунок 2.16 представляет расчеты моментов при условии вращения тихоходного вала и быстроходного вала с их номинальными скоростями и реализации номинального передаточного отношения электромагнитной трансмиссии. По величине знаков следует, что направление вращения происходит в разные стороны, что подтверждается уравнением (2.21) и балансом моментов (2.20).

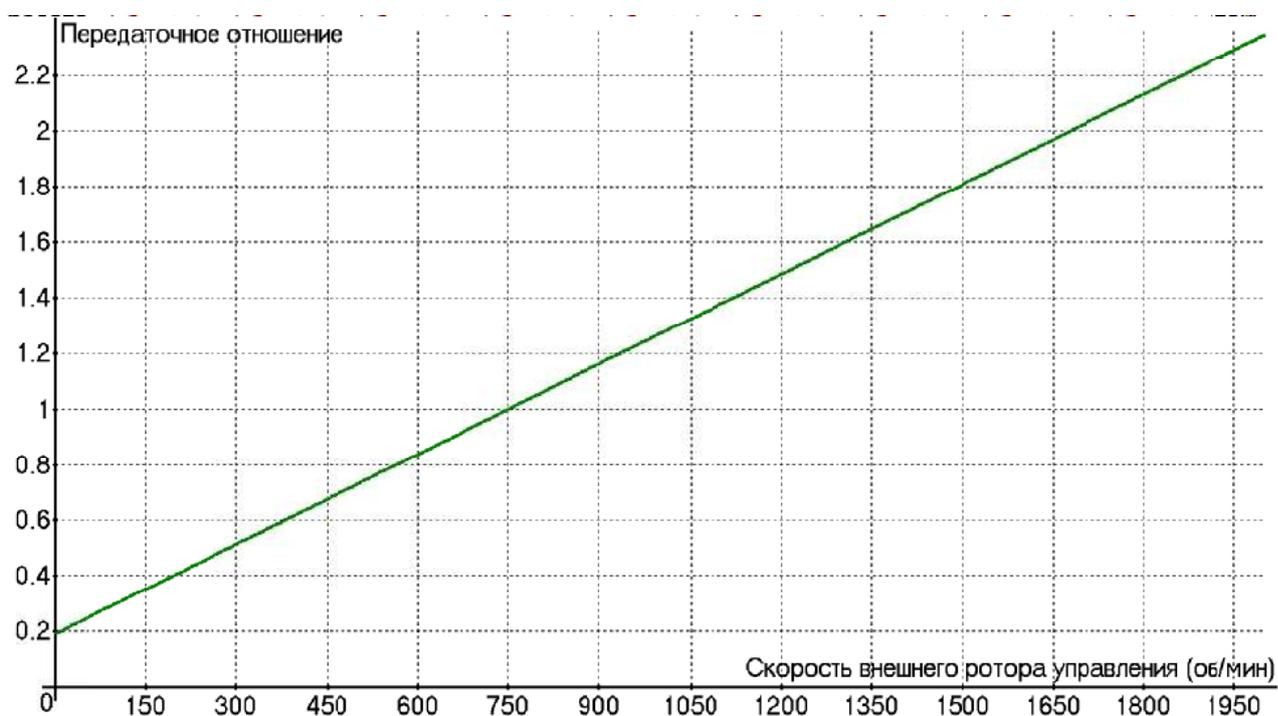


Рисунок 2.15 – Зависимость передаточного отношения от скорости вращения внешнего ротора управления

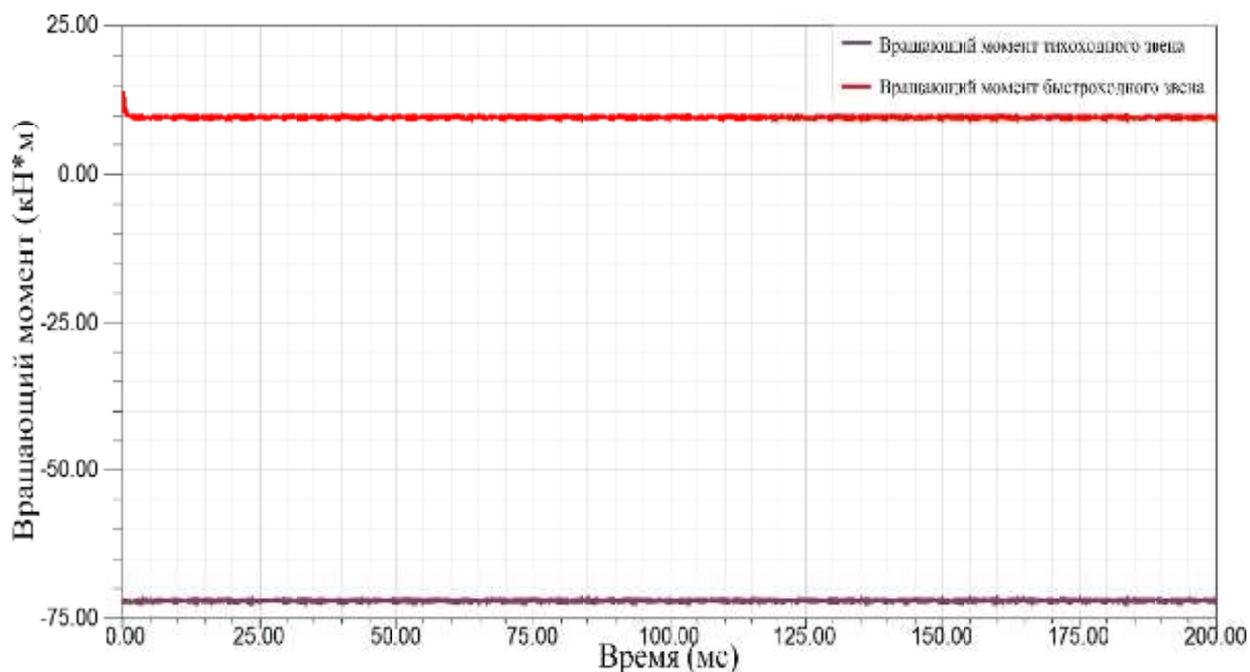


Рисунок 2.16 – Результаты расчета момента электромагнитной трансмиссии при условии вращения внешнего ротора управления с номинальной скоростью

## 2.7 Динамические модели электромагнитного вариатора

В этом разделе рассмотрено построение динамических моделей электромагнитного вариатора в целях определения условий его внутренней устойчивости. Определение этих диапазонов формируются путем линеаризации механической характеристики электромагнитного вариатора, которые учитывают диапазоны изменения механического момента и приведенного угла дополнительного рассогласования, определяющее условие внутренней устойчивости вариатора. Для этого проводился учет приведенного угла дополнительного рассогласования, при этом следует отметить, что учет данного угла связана с его стабилизацией между ротором генератора и его турбиной для учета диапазонов углов и построения соответствующей данному диапазону углов динамической модели.

В настоящий момент прогресс в производстве термостабильных высокоэнергетических магнитов на основе сплавов редкоземельных металлов, обладающих большой коэрцитивной силой (самарий-кобальт (*Sm-Co*) и неодим-

железо-бор ( $Nd-Fe-B$ )), позволил значительно расширить область применения электромеханических преобразователей частоты [74].

Применение этих устройств в компоновке ВЭУ для передачи энергии движения от турбины к генератору связано с такими известными недостатками механических редукторов, как люфты, нелинейности, снижение производительности оборудования и сроков межремонтного обслуживания. Использование в конструкциях электромагнитных вариаторов на основе высокоэнергетических магнитов позволяет значительно улучшить их массогабаритные показатели и получить более высокий вращающий момент передачи в том же габарите [75].

Электромагнитные вариаторы и на их основе магнитные редукторы являются удобным и эффективным средством создания герметичных электромеханических передач энергии, отличающихся простотой, повышенной надёжностью и высокой экономичностью в эксплуатации [83]. Более того, магнитный редуктор позволяет осуществлять плавный пуск механизмов турбины ВЭУ, которая обладает повышенными пусковыми моментами, безударные динамические режимы взаимосвязанных механизмов с резкими ускорениями и торможениями. Реализуется защита приводов от механических перегрузок при аварийных режимах нагрузочного устройства (например, заклинивании). На рисунке 2.17 представлен эскиз электромеханического преобразователя с постоянными магнитами.

Перспективы использования электромагнитного вариатора и систем на его основе при передаче с магнитными связями могут быть существенно расширены. Так как магнитные системы представляют собой электромеханические преобразователи, обладающие важными преимуществами: отсутствие смазочного материала, возможность работы при низкой температуре, отсутствие шумов и вибраций, возможность реализации модульного исполнения, а также, можно отнести способность передачи механической энергии через герметичную оболочку без его механического разделения, низкий люфт [74].

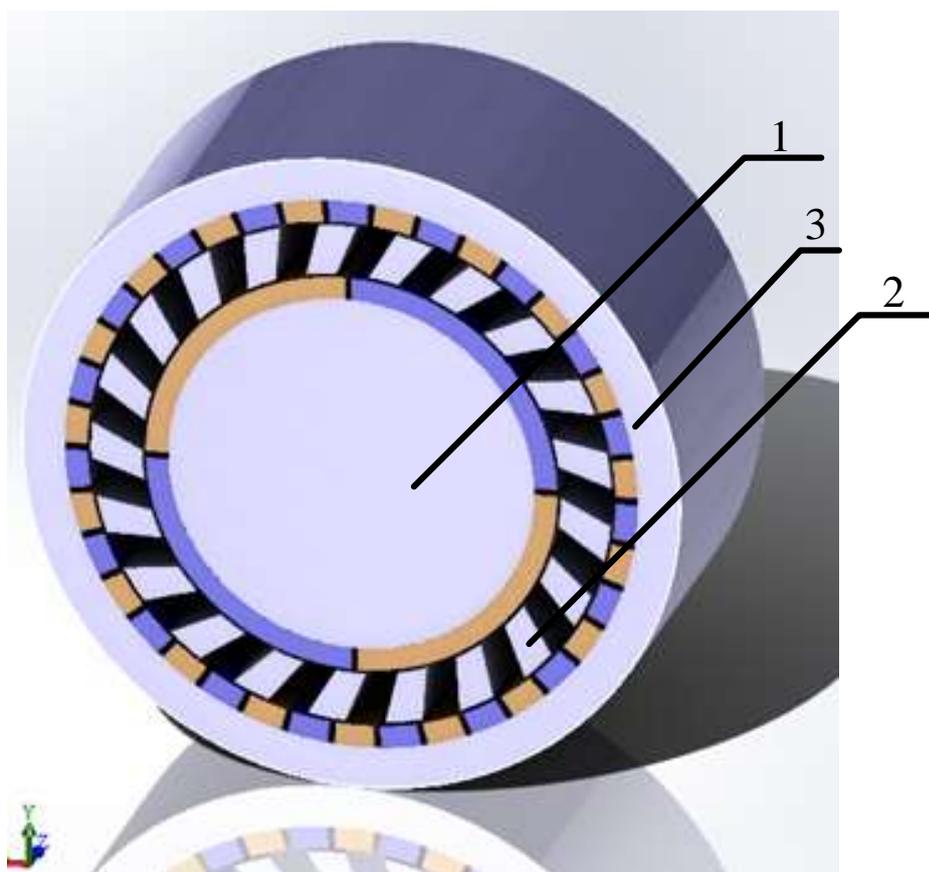


Рисунок 2.17 – Конструктивная схема магнитного редуктора с передаточным отношением 1:10: 1) быстроходный ротор; 2) тихоходное звено – модулятор; 3) внешний ротор с постоянными магнитами

Конструктивно магнитная передача (рисунок 2.16) состоит из быстроходного звена 1, внешнего звена 3 с постоянными магнитами. Между полюсами быстроходного ротора и статора расположен тихоходный ротор, представляющий собой модулирующее звено 2 из ферромагнитных сегментов. Работа магнитного редуктора основана на принципах электромагнитной редукции частоты вращения. Через ферромагнитные сегменты тихоходного звена замыкаются потки каждого из двух колец постоянных магнитов статора и быстроходного ротора. В результате в зазорах между полюсами постоянных магнитов и моделирующим ферромагнитным кольцом формируются магнитные поля с различным гармоническим составом. Путем подбора числа пар полюсов можно изменять частоту основных гармоник, и тем самым, изменять соотношение скоростей вращения тихоходного и быстроходного валов передачи.

Преобразование механического момента и скорости осуществляются без механического контакта между тихоходным и быстроходным валами. В сочетании с высокоэнергетическими магнитами обеспечивается [74]:

1. Высокая плотность вращающего момента на тихоходном валу (свыше  $100 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ ).
2. Снижение массогабаритных показателей.
3. Снижение эксплуатационных расходов ввиду отсутствия трансмиссионного масла и необходимости за его контролем.
4. Высокий КПД до 98%.
5. Физическая изоляция между осями, что открывает возможность создания эффективных герметичных передач энергии в вакуумных, агрессивных и взрывоопасных средах.
6. Пожаробезопасность в связи с отсутствием горюче-смазочных материалов в трансмиссии.
7. Очень низкий уровень шумов и вибрации; защита приводов от механических перегрузок при аварийных режимах нагрузочного устройства (например, заклинивании).

Был реализован макетный образец магнитного редуктора. На рисунке 2.18 представлен чертеж магнитного редуктора с передаточным отношением 1:10.

На рисунке 2.19 показана кинематическая схема соединения ветровой турбины с магнитным редуктором и генератором ВЭУ.

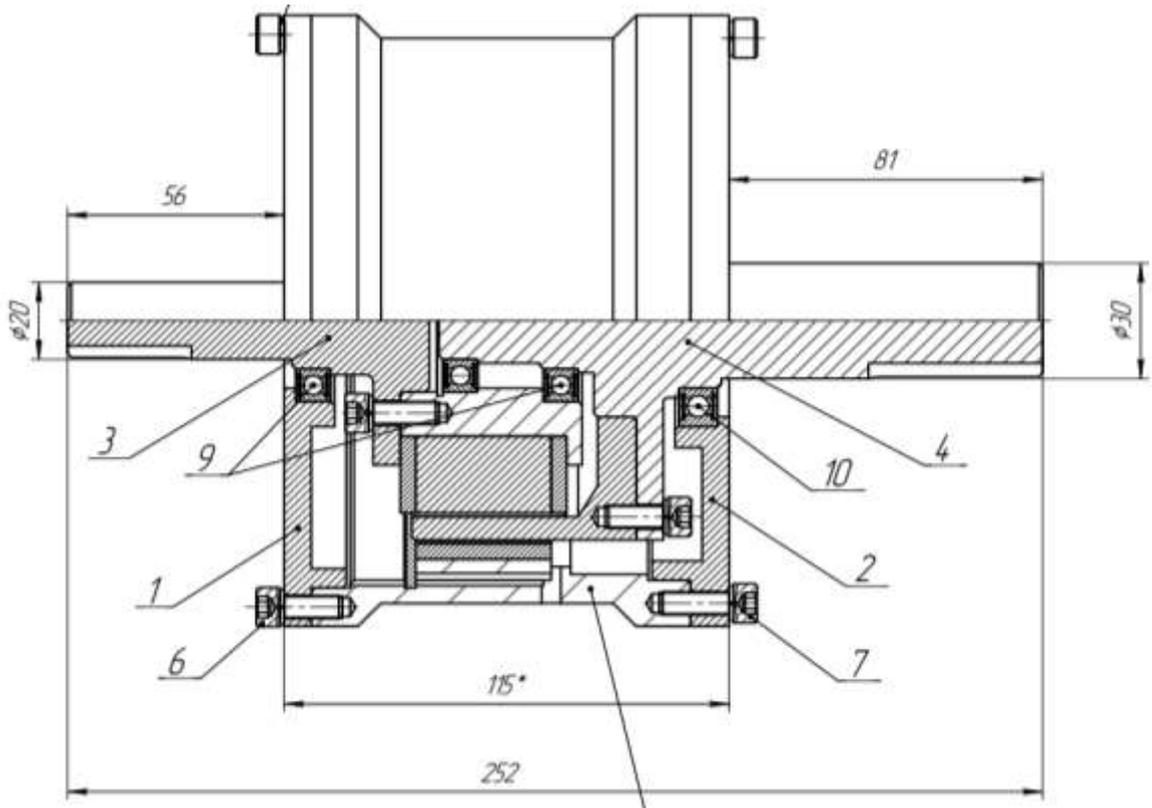


Рисунок 2.18 – Сборочный чертеж магнитного редуктора

Перспективность разработки таких редукторов обуславливается также возможностью автоматического регулирования его коэффициента редукции скорости.

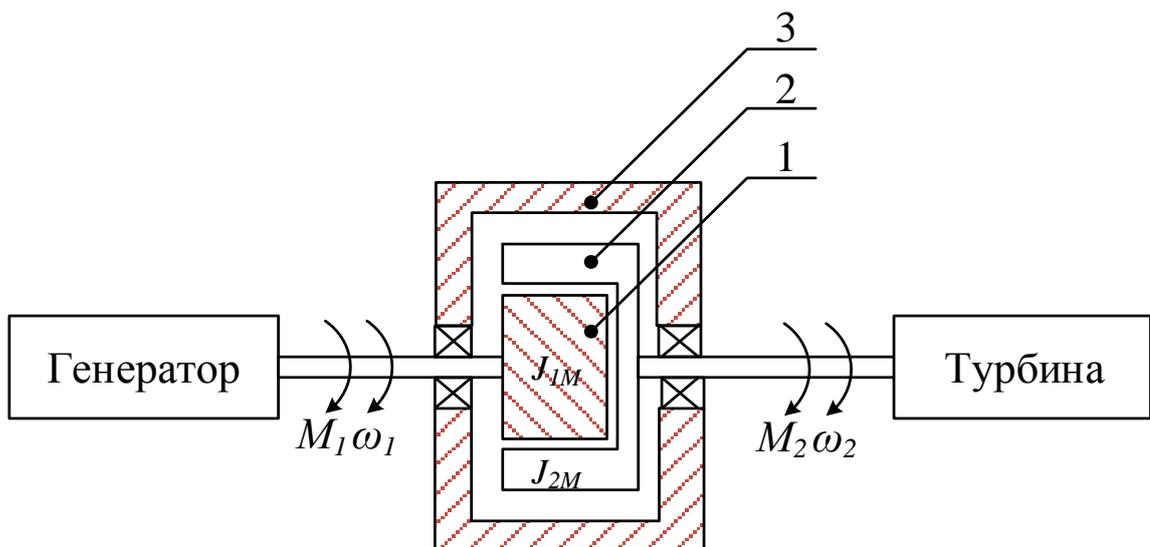


Рисунок 2.19 – Кинематическая компоновка магнитного редуктора

Если пренебречь упругостью входного и выходного валов передачи, то эквивалентную модель магнитного редуктора можно представить, как двухмассовую электромеханическую систему, представленную на рисунке 2.19. Тихоходное и быстроходное звенья в этой модели сцеплены посредством упругой магнитной связи с некоторой жесткостью  $c_m$ .

Для построения расчетной схемы двухмассовой электромеханической системы на основании рисунка 2.20 примем обозначим  $J_1$  - суммарный приведенный момент инерции элементов, жестко связанных с первичным двигателем,  $J_1 = J_{ген} + J_{1M}$ .

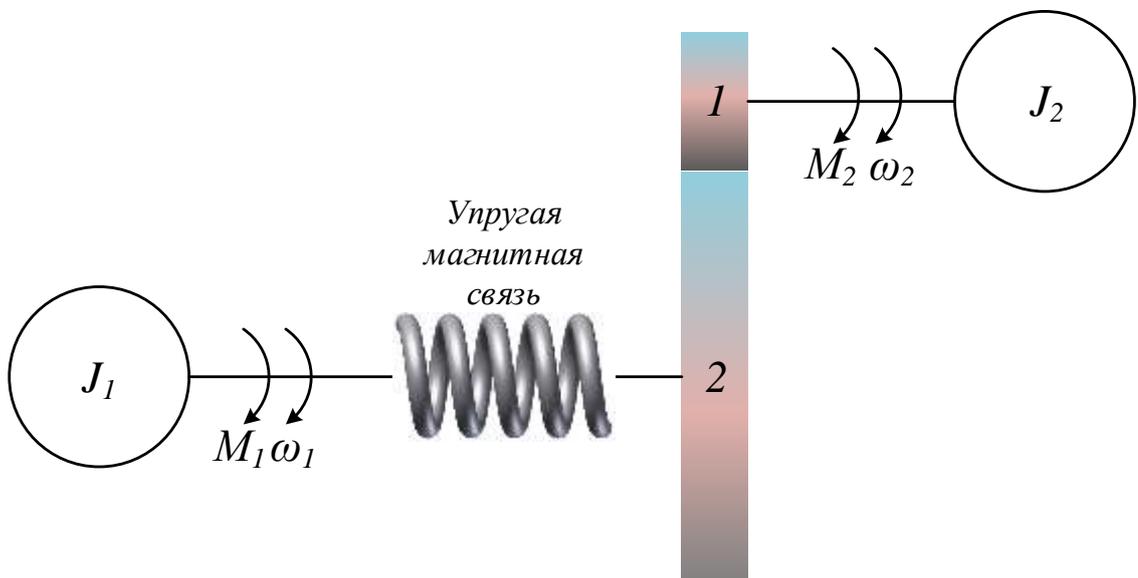
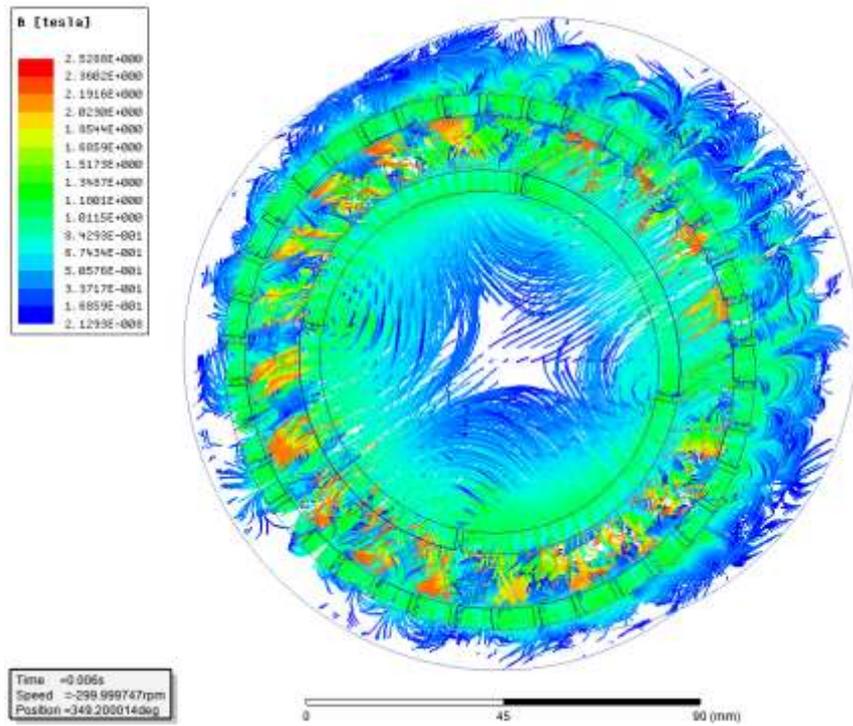


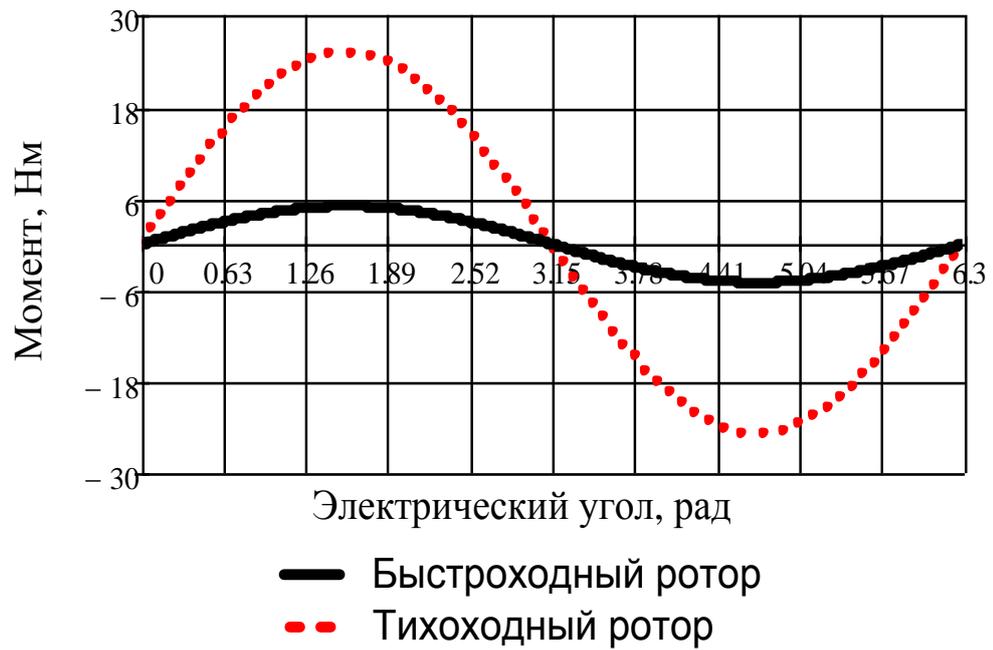
Рисунок 2.20 – Схема двухмассовой электромеханической системы

Суммарный приведенный момент инерции элементов, жестко связанных с рабочим органом механизма, обозначим  $J_2$ , он будет равен  $J_2 = J_{турб} + J_{2M}$ . На первую массу с моментом инерции  $J_1$  действует приложенный к ней движущий момент двигателя  $M_1 = M_d$ , которому противодействует момент упругого закручивания, обусловленный упругостью магнитного поля в воздушном зазоре.

Для определения параметров магнитного редуктора методом конечных элементов с помощью программного комплекса *ANSYS Maxwell* рассчитана характеристика вращающего момента от угла положения быстроходного звена [84, 85]. На рисунке 2.21 представлены результаты расчета магнитного поля редуктора и угловые характеристики тихоходного и быстроходного роторов.



а



б

Рисунок 2.21 – Расчеты магнитного редуктора:

а – распределений магнитного поля;

б – механическая характеристика

Характеристики показывают, что изменения электромагнитного момента, который передается к тихоходному ротору через эквивалентную магнитную пружину, близок к синусоидальному. Механический момент магнитного редуктора можно определить выражением [74, 83]:

$$M = M_m \cdot \sin \theta_e, \quad (2.22)$$

где  $M_m$  - амплитудное значение момента, зависящее от геометрических параметров редуктора и свойств магнитов и ферромагнитных материалов [8], а угол  $\theta$  определяется угловым рассогласованием между ротором высокой скорости и ротором низкой скорости [83].

$$\theta_e = \varphi_1 - \varphi_2 = p_h \theta_h - p_2 \theta = \int (p_h \omega_h - p_2 \omega) dt \quad (2.23)$$

$p_2$  и  $\theta_2$  – число ферромагнитных сегментов и угловое положение ротора низкой скорости,  $p_h$  и  $\theta_h$  – число пар полюсов и угловое положение ротора высокой скорости.

Двухмассовая электромеханическая система представляет собой наиболее удобную модель для изучения влияния упругих механических связей. На первую массу с моментом инерции  $J_1$  действует приложенный к ней движущий момент турбины  $M_1 = M_{турб}$ , которому противодействует момент упругого закручивания  $M_2$  между первой и второй массами, который обусловлен упругостью магнитного поля в воздушном зазоре магнитного редуктора. Движущим моментом, действующим на вторую массу, является момент упругого закручивания, а момент сопротивления определяется как приведенный к ведомому валу редуктора момент сопротивления движению, создаваемый рабочим механизмом –  $M_C$ . В результате можно представить следующее математическое описание движения рассматриваемой двухмассовой механической системы электропривода:

$$\begin{cases} M_1 - M_3 = J_1 \frac{d\omega_h}{dt}, & M_2 - M_C = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \\ M_3 = M_2 / G, & M_2 = f(\theta) = M_m \sin \theta, \\ \theta_e = \varphi_h - \varphi_2 = \int (p_h \omega_h - p_2 \omega_2) dt, \end{cases} \quad (2.24)$$

где  $G=p_1/p_2$  – передаточный коэффициент.

На рисунке 2.22 представлена структурная схема, соответствующая системе уравнений (2.24). Она представляет возможность моделировать динамические процессы магнитного редуктора при различных углах рассогласования, так как в ней учтено тригонометрическая связь между входным и выходным моментами.

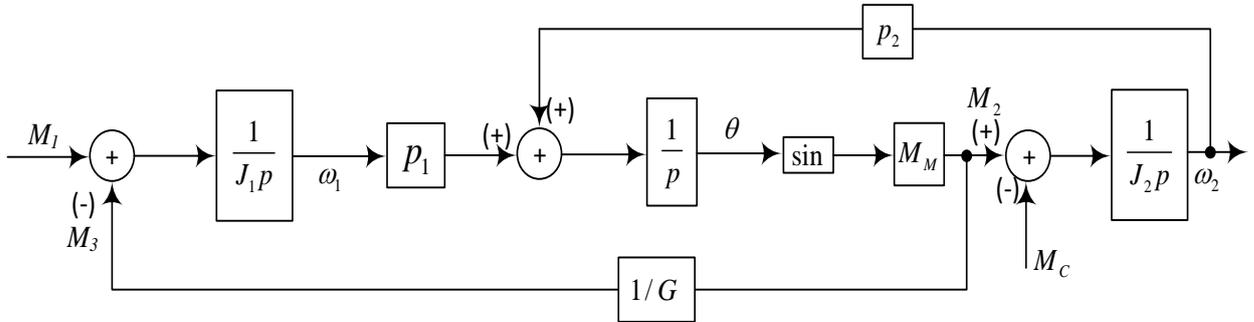


Рисунок 2.22 – Структурная модель магнитного редуктора

Структурная схема, приведенная на рисунке 2.22, содержит нелинейное звено. Для анализа таких схем можно использовать аппаратный метод детализированных структурных схем, получающий в последнее время все более широкое распространение. Его использование позволяет выделять линейные и нелинейные области модели, преобразовывать линейную часть по известным правилам [74], формировать каналы вычисления мгновенных значений мощности и электромагнитных усилий, наращивать дополнительными элементами в соответствии с расширением реальной электромеханической системы.

Как показано в [83], что метод является универсальным и позволяет изменять модели отдельных элементов без изменения структуры модели системы в целом.

Но для синтеза систем автоматического регулирования более предпочтителен аппарат передаточных функций, который применим для линейных структурных схем. При относительно небольших углах рассогласования (до 30 градусов) можно положить, что:

$$\sin \theta_e \approx \theta_e . \quad (2.25)$$

Это позволяет аппроксимировать механическую характеристику редуктора в диапазоне углов рассогласования, не превышающих 30 градусов, прямой линией с погрешностью, менее 5 %. При такой аппроксимации:

$$M_2 = M_m \cdot \theta_e. \quad (2.26)$$

В этом случае можно построить линеаризованную структурную схему магнитного редуктора, которая приведена на рисунке 2.23.

При величинах момента нагрузки  $M_c$ , близких к максимальному моменту тихоходного звена, возможно возникновения внутренней неустойчивости, т.е. режима проскальзывания. Естественно, что линейная модель не позволит проанализировать этот режим.

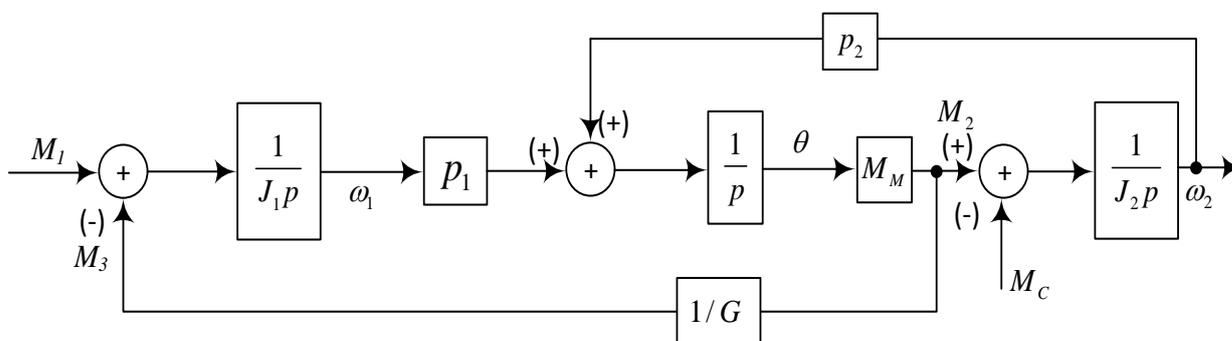


Рисунок 2.23 – Структурная модель магнитного редуктора при малых углах рассогласования

Известна аналитическая зависимость электромагнитного момента редуктора от угла рассогласования, связанная коэффициентом жесткости магнитной связи:

$$c_m = \frac{dM_2}{d\theta_e} = M_m \cos \theta_e. \quad (2.27)$$

То есть зависимость коэффициента жесткости от угла рассогласования также нелинейная. При углах рассогласования:

$$\pi/6 \leq \theta_e \leq 4\pi/3 \quad (2.28)$$

зависимость  $c_m(\theta_e)$  можно аппроксимировать прямой линией с погрешностью, не превышающей 5 %. Уравнение этой линии определяется уравнением касательной к характеристике  $c_m(\theta_e)$ , которое имеет вид:

$$c_m(\theta_e) = c_m(\theta_{e0}) + c'_m(\theta_{e0})(\theta_e - \theta_{e0}). \quad (2.29)$$

При такой аппроксимации коэффициента жесткости, выходной момент магнитного редуктора определяется из выражения:

$$M = \int c_m(\theta_e) d\theta_e = -M_m \left[ \int (\theta_e - \pi/2) d\theta_e + C \right], \quad (2.30)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования.

В результате формула для расчета момента примет вид при указанных диапазонах углов рассогласований [83]:

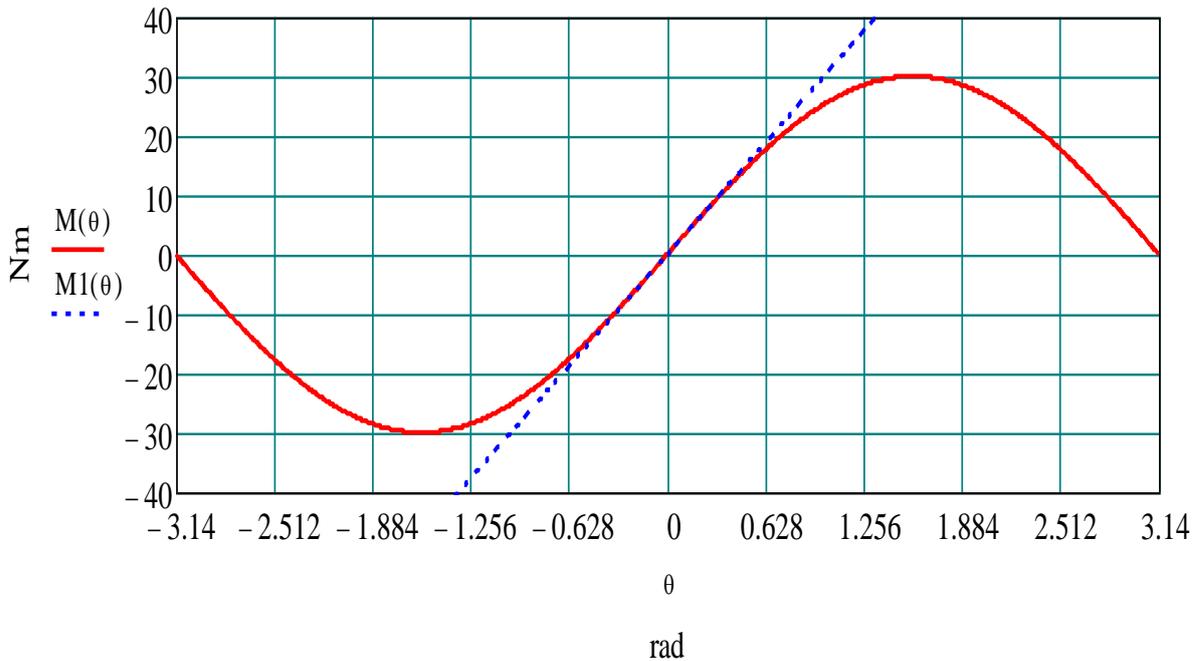
$$M = -M_m \left( \frac{1}{2} \theta_e^2 - \frac{\pi}{2} \theta_e + C \right). \quad (2.31)$$

На рисунке 2.24 представлен результат моделирования упругости магнитного редуктора и линеаризации при малом диапазоне углов.

В итоге аппроксимированное выражение момента [83]:

$$M = M_m \left( \frac{\pi}{2} \theta_e - \frac{1}{2} \theta_e^2 - 0,234 \right) = \frac{M_m}{2} (\pi \theta_e - \theta_e^2 - 0,117). \quad (2.32)$$

Механическая характеристика магнитного редуктора, сформированная на основе уравнений (2.27) и (2.32), приведена на рисунок 2.24.



сплошная линия – механическая характеристика магнитного редуктора МР01;

пунктирная линия – линейризация характеристики магнитного редуктора;

Рисунок 2.24 – Линейризация статического момента магнитного редуктора

Данный раздел был посвящен определению условия внутренней устойчивости электромагнитного вариатора, которое состоит в стабилизации угла дополнительного рассогласования между ротором генератора и турбины. Путем линейризации механической характеристики магнитного редуктора и определены допустимые диапазоны изменения механического момента и приведенного угла рассогласования, обеспечивающие внутреннюю устойчивость вариатора.

В следующем разделе представлено описание аэродинамического управления моментами турбины ВЭУ. Суть комплексного управления состоит в обеспечении управления моментом электромагнитного вариатора и его реализацией за счет управления углом заклинивания лопастей турбины. Емкость накопителя формируется из расчета времени, необходимого для реализации контроля момента вариатора и осуществления стабилизации частоты вращения генераторов в АЭС при различных видах возмущающих воздействий в ней.

## 2.8 Аэродинамические способы управления моментом ветровой турбины

Существуют различные способы аэродинамического регулирования момента ветроколеса ВЭУ. Но, прежде чем перейти к анализу режимов работы и способов управления ВЭУ, необходимо определить зоны работы ВЭУ, компоновки которых были рассмотрены выше. ВЭУ имеют 4 основные зоны работы (рисунок 2.25). Первая и четвертая зоны не активные, вторая и третья рабочая [66].

Зона 1 представляет собой сплошная кривая, размещенная левее скорости ветра 5 м/с и содержит промежутки бездействия установки и её запуска. Стратегией управления в данной зоне формулируется в наблюдении за текущей скоростью ветра и определяется область нахождения её в пределах, нормируемых при начальной работе энергоустановки, и, если это соблюдается, тогда формируется операция, запуска ВЭУ. Поэтому, эта зона в современных системах регулирования не используется.

Зона 2 выражается рабочей областью энергетической характеристикой, в котором необходимо использовать энергию ветрового потока столько, сколько это возможно. Существующие потери энергии ветрового потока, препятствующие установке достичь её максимально возможной доли энергии из ветрового потока, называемой пределом Бетца ( $c_p=0,59$ ). Целью является приближение к этому пределу Бетца так близко, как это возможно. В данной области энергетической характеристики возможны два способа управления работой ВЭУ: регулирование угла поворота гондолы в горизонтальной плоскости, регулирование вращающего момента генератора.

В зоне 3 проходит при скоростях ветра, выше расчетной, то есть при скорости ветра, при которой вырабатывается наибольшее количество энергии. ВЭУ должна иметь ограничение при использовании энергии ветрового потока так, чтобы не выйти за диапазоны электрических и механических нагрузок генератора. В этой зоне ВЭУ, работает с переменной скоростью вращения, поддерживающая неизменную скорость и постоянную мощность, но изменяя тем самым угол поворота лопастей таким образом, чтобы добиться сброса избыточной энергии. В

этой области применяются три выше указанных способа поддержания номинальной мощности ВЭУ.

Работа в зоне 4 не происходит по причине ограничения работы ВЭУ при данных скоростях ветра.

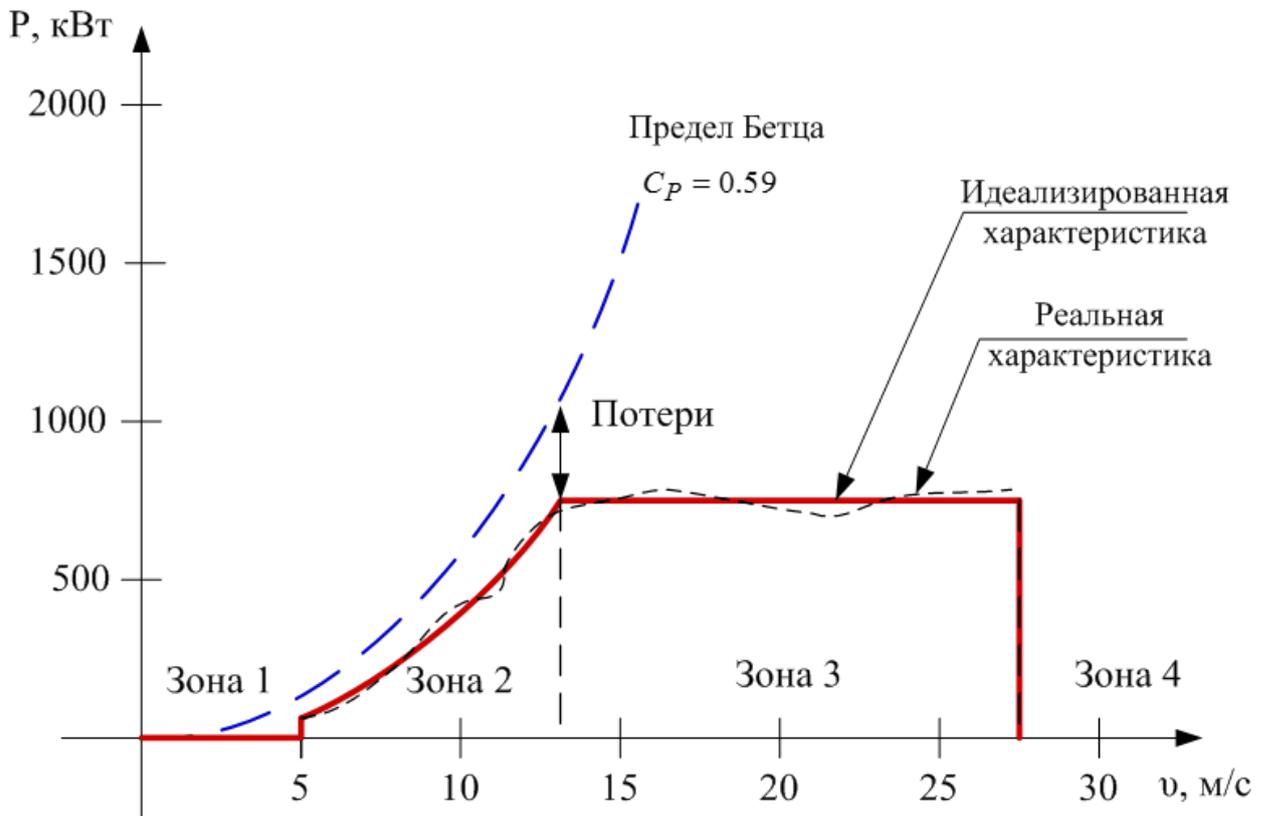


Рисунок 2.25 – Энергетическая характеристика ВЭУ

Как отмечалось ранее, коэффициент мощности  $C_p$  имеет зависимость от соотношения линейной скорости конца лопасти турбины ВЭУ к скорости набегающего ветрового потока, и он называется быстроходностью. На рисунке 2.26 изображена характеристика коэффициента мощности от быстроходности турбины ВЭУ. Из нее можно отметить, что она  $C_p$  имеет максимум при определенном значении  $Z$ . Тем самым, режим турбины с постоянной скоростью вращения коэффициент мощности  $C_p$  имеет максимальное значение и в случае одной единственной скорости ветра. Чтобы величина вырабатываемой мощности была максимальной, необходимо поддерживать  $C_p$  на предельно возможном уровне самостоятельно от значений скорости ветра. Для обеспечения наибольшей величины коэффициента мощности  $C_p$  скорость ветровой турбины должна

меняться со значением скорости ветра. Для того, чтобы это условие выполнялось, необходимо в состав ВЭУ внести контроллер скорости для увеличения скорости ветровой турбины при усиленном ветре и снижении её при слабом [66].

На рисунке 2.27 представлена характеристика мощности турбины ВЭУ на валу ветроколеса от скорости вращения ветроколеса при различных скоростях ветра  $u_1$ ,  $u_2$  и  $u_3$ .

Для получения максимально возможной энергии в течение года ВЭУ должна работать в точке максимума мощности при любых скоростях ветра. На рисунке эти точки обозначены  $P_1 - P_3$  для скоростей  $u_1 - u_3$  соответственно. Общим для всех точек максимума является высокое значение  $C_p$  – около 0,45 [68].

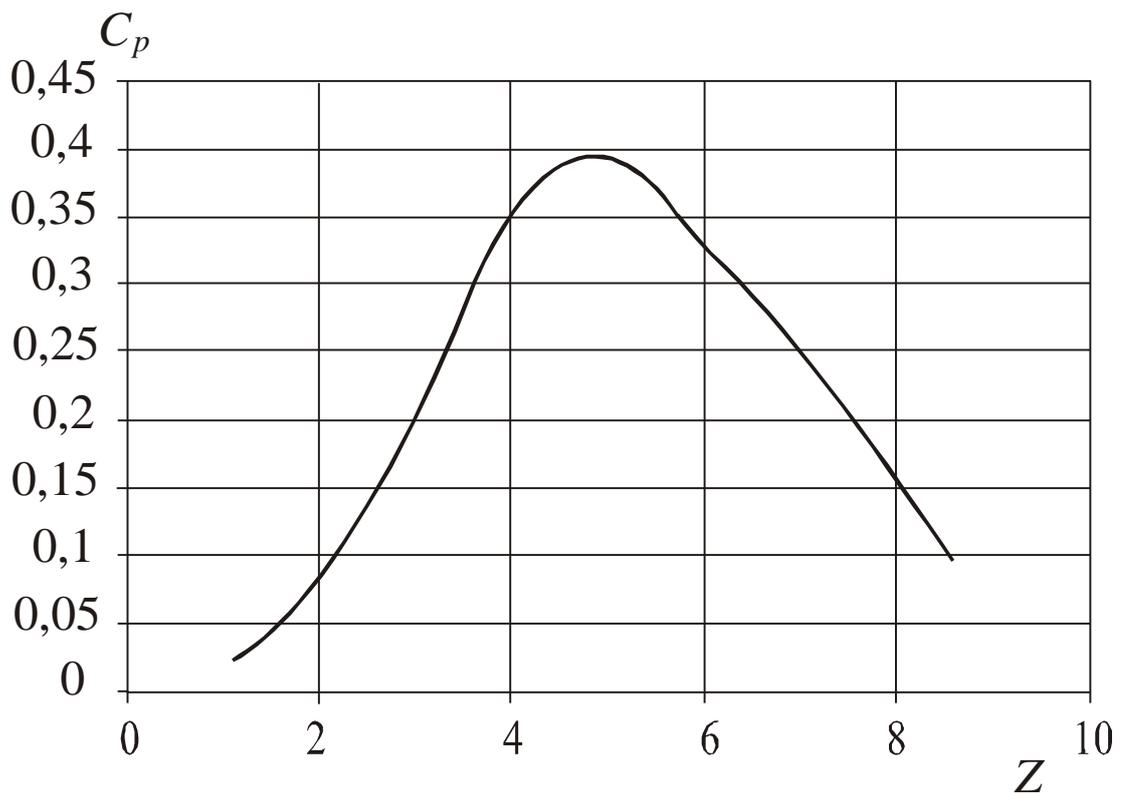


Рисунок 2.26 – Зависимость коэффициента мощности от коэффициента быстроходности

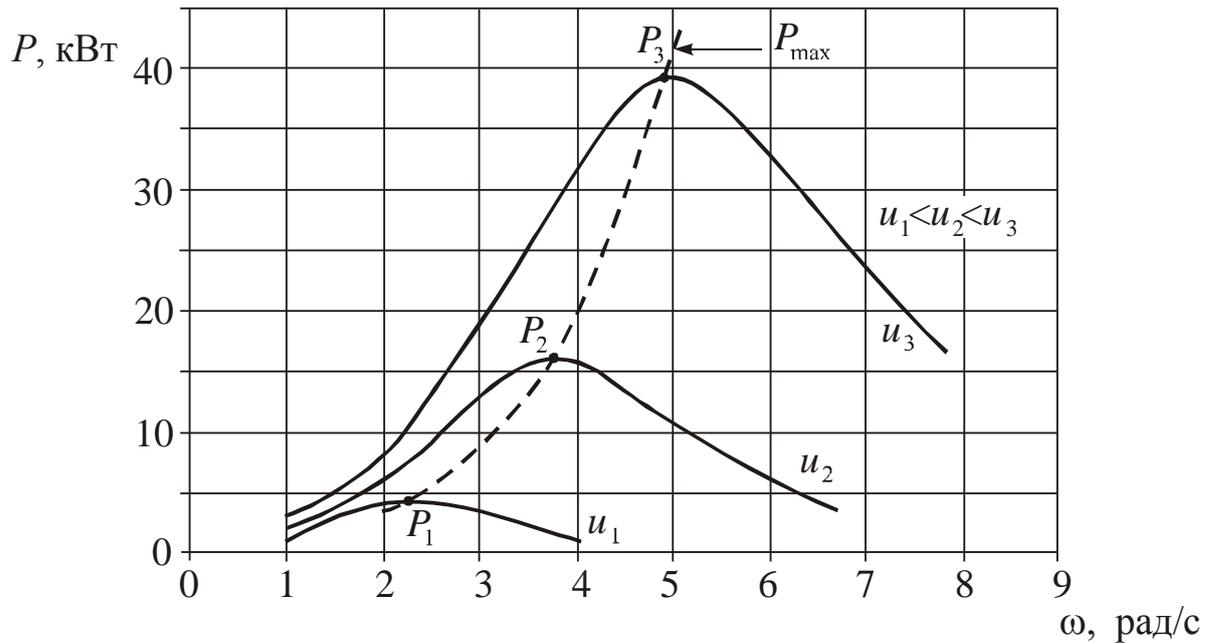


Рисунок 2.27 – Характеристика зависимости мощности ВЭУ от скорости вращения ветроколеса при различных скоростях ветра

Регулирование скорости и мощности ВЭУ построено на трех областях (рисунок 2.28) [66]:

- область оптимального и постоянного коэффициента мощности  $C_p$ ;
- область ограничения скорости;
- область ограничения мощности.

В основном ВЭУ стартует при скоростях ветра 4...5 м/с и останавливается при 25...30 м/с. При скоростях ветра между этими значениями ВЭУ работает в одной из трех вышеупомянутых областей. На интервале 7-10 м/с ВЭУ работает в течение 70 – 80 % времени.

Область максимального коэффициента мощности – это зона нормальной работы, в которой контроллер скорости управляет турбиной таким образом, чтобы поддерживать постоянное оптимальное значение  $C_p$ , сохраненное в системном компьютере в качестве уставки.

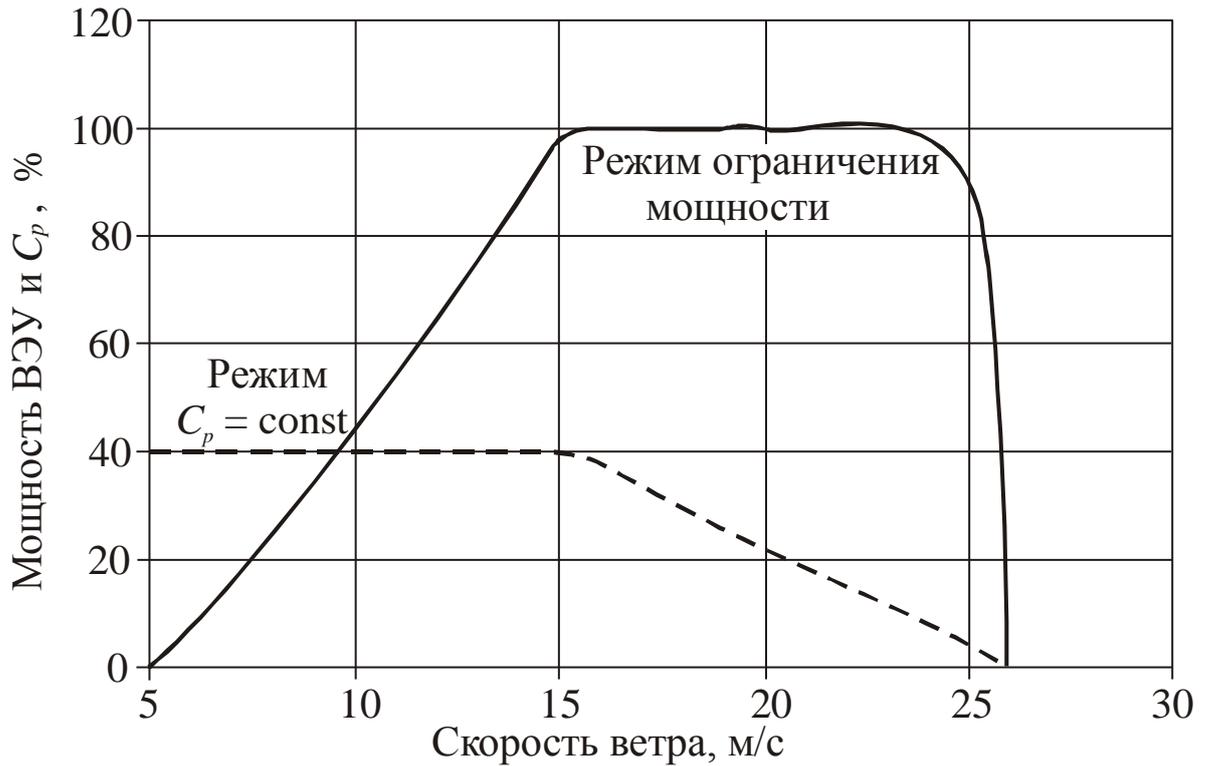


Рисунок 2.28 – Три области контроля скорости ветроколеса

При любом способе контроля скорости практически получаемая зависимость выходной мощности от скорости ветра не такая гладкая. Теоретические соображения дают лишь приближенное представление о мгновенной мощности. Например, ВЭУ может производить различную мощность при одинаковой скорости ветра в зависимости от того, увеличивается скорость ветра или снижается в данный момент. Количество механической мощности, производимое горизонтально-осевой турбиной в установившемся режиме, можно определить по формуле [69]:

$$P_m = \frac{1}{8} \rho \pi D^2 u_0^3 C_p(\beta, Z_i), \quad (2.33)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $D$  – диаметр площади, ометаемой ветроколесом;  $u_0$  – скорость ветра,  $C_p$  – коэффициент мощности, который вычисляется следующим образом:

$$C_p(\beta, Z_i) = 0,73 \left( \frac{151}{Z_i} - 0,002\beta - 13,2 \right) e^{-\frac{18,4}{Z_i}}, \quad (2.34)$$

где  $Z_i = \frac{1}{\frac{1}{(Z+0,08\beta)} - \frac{0,035}{(\beta^3+1)}}$  – быстроходность,  $\beta$  – угол заклинения лопасти ротора

в градусах [30]. Коэффициент мощности, как функция от  $Z$  при разных углах атаки лопасти, изображен на рисунке 2.29.

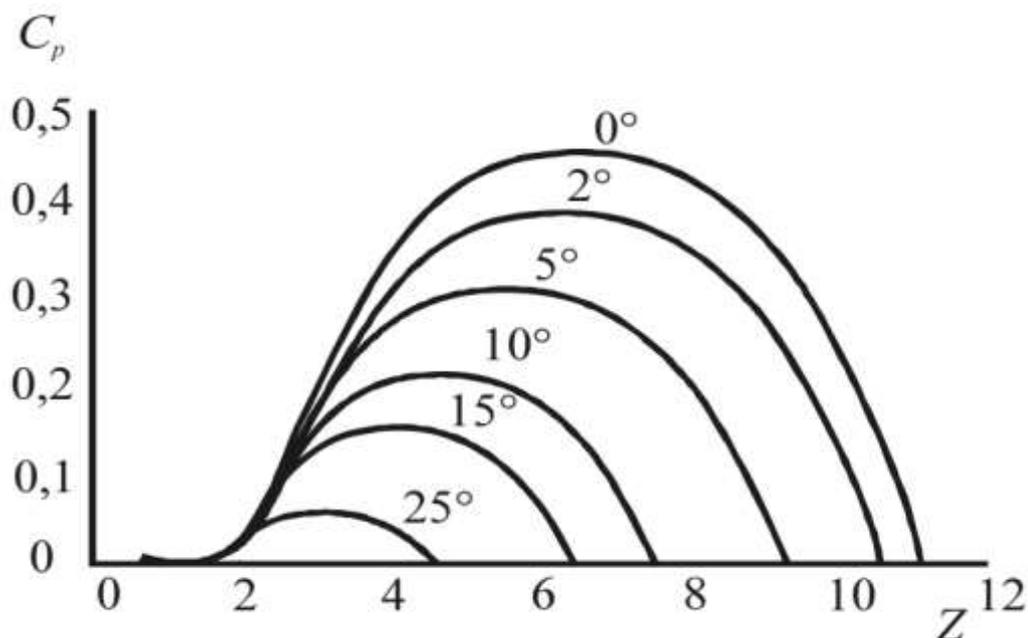


Рисунок 2.29 – Зависимость коэффициента мощности от быстроходности при различных углах заклинения лопасти в воздушном потоке

В условиях малых значений скоростей ветра, угол заклинения лопастей турбины ВЭУ может поддерживаться равным нулю, а значение, при максимальном коэффициенте мощности достигается при этом угле.

Максимальный коэффициент мощности можно рассчитать [69]:

$$C_P(0, Z_i)_{\max} = 110,23 \left( \frac{1}{Z} - 0,11976 \right) e^{-18,4 \left( \frac{1}{Z} - 0,003 \right)}. \quad (2.35)$$

Максимальная мощность, которая может быть получена отдельной турбиной от ветра, есть кубическая функция от оптимальной скорости турбины:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{P\max}}{Z_{opt}^3} [\omega_{rot}^{opt}]^3, \quad (2.36)$$

где  $\omega_{rot}^{opt}$  - оптимальная скорость вращения ветроколеса, при которой достигается максимальное значение коэффициента мощности.

В настоящее время в конструкции ВЭУ используются два основных метода управления работой турбины: аэродинамический способ и регулирование скорости ротора с помощью изменения момента генератора.

Управление избыточным аэродинамическим моментом может быть достигнуто двумя путями: изменением геометрии ротора (например, изменение угла атаки лопасти или её длины) или изменением скорости вращения ротора, так как ротор работает с оптимальным коэффициентом быстроходности.

Первый метод – изменение угла заклинения лопасти, как указывалось выше, применяют в зоне 3 работы ВЭУ (рисунок 2.30). Для поддержания постоянной мощности генератора в зоне 3 используется аэродинамическое регулирование моментом.

Второй метод регулирования - изменение скорости вращения ротора, используется для максимизации захватываемой энергии в зоне 2. Для достижения максимального захвата энергии ветровые турбины должны работать с оптимальным коэффициентом быстроходности, в этом случае поддерживается  $C_{pmax}$ .

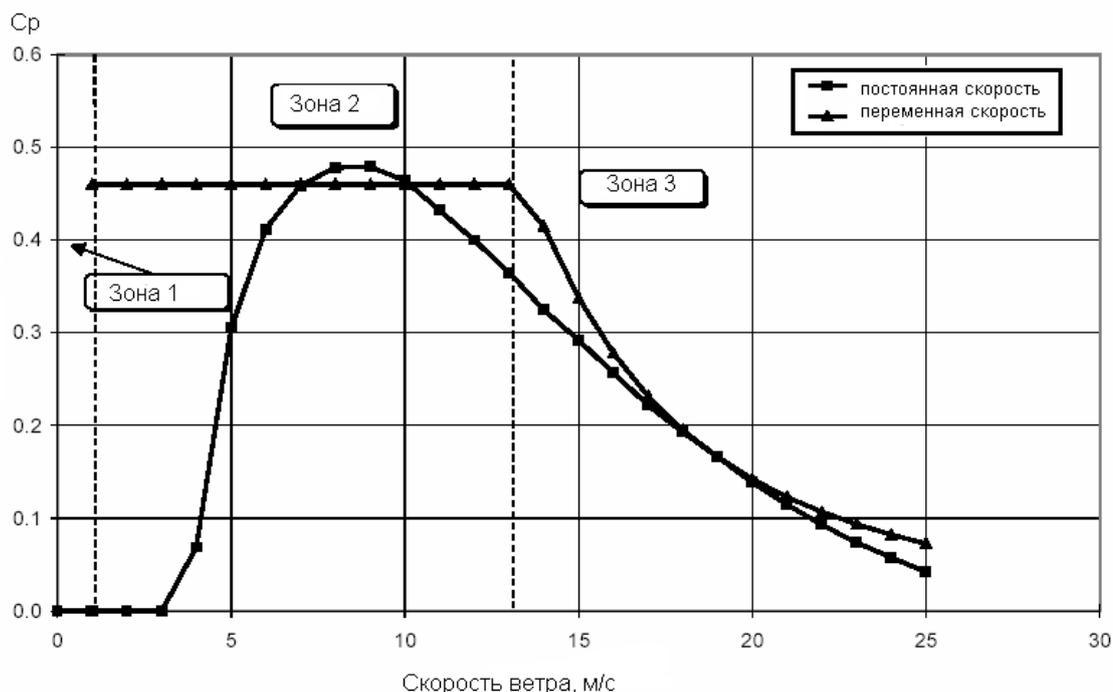


Рисунок 2.30 – Зависимость коэффициента мощности от скорости ветра в различных скоростных режимах ВК

На сегодняшний день существует много различных конфигураций средств аэродинамического регулирования, которые позволяют реализовать повышение запаса регулировочной способности турбины ВЭУ. Некоторые конфигурации будут кратко рассмотрены, чтобы создать концептуальное понимание динамики плазменного привода (см. Приложение Б).

Существуют различные варианты этих устройств:

- 1) поверхностный коронный разряд постоянного тока;
- 5) струйный привод форсуночного действия.

Характеристики этих устройств более детально описаны в [89].

## 2.9 Выводы

1. Сформировано математическое описание физического принципа работы электромагнитной трансмиссии с созданием его динамической модели.

Методом численного моделирования были получены основные характеристики магнитной трансмиссии;

2. Определены диапазоны устойчивости дополнительного угла рассогласования электромагнитного вариатора с применением линейных аппроксимирующих моделей;

3. Обоснована возможность и целесообразность использования электромагнитного вариатора в составе ВЭУ в целях реализации регулирования частоты в АЭС;

4. Сформулирована концепция комплексного управления за скоростью вращения генератора на быстроходной стороне электромагнитного вариатора с использованием управления добавочным моментом электромагнитного вариатора и на тихоходной стороне турбины путем изменения углом заклинения турбины ВЭУ. Полученные результаты математического описания физического принципа работы электромагнитного вариатора легли в основу формирования основных ограничений при разработке его законов и построения алгоритмов комплексного управления электромагнитным вариатором.

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

#### 3.1 Постановка задачи

В данной главе ставится задача разработки алгоритма работы электромагнитного вариатора в целях стабилизации скорости вращения быстроходного ротора со стороны СГПМ при их параллельной работе на АЭС, состоящая из двух ВЭУ с одинаковыми постоянными параметрами времени механической инерции. Рассмотреть режим резкого изменения мощности нагрузки и режим трехфазного короткого замыкания. Разработать алгоритм фазового согласования при параллельной работе СГПМ с разными параметрами времени механической инерции.

#### 3.2 Динамическая модель электромагнитного вариатора

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 [47]:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \frac{\omega_e L_q i_q}{L_d} + \frac{u_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \frac{\omega_e L_d i_d}{L_q} + \frac{u_q - K_e \omega_h}{L_q} \end{cases} \quad (3.1)$$

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

Скорости вращения тихоходного и быстроходного валов, описываются следующей системой уравнений [48]:

$$\begin{cases} J_h \frac{d\omega_h}{dt} = M_{em} - \frac{M_{\max}}{G_r} \cdot [\sin(p_h \theta_h - n_s \theta_{Load})] - B_h \omega_h - \mu_{ap} (p_h \omega_h - n_s \omega_{Load}) \\ J \frac{d\omega_0}{dt} = M_{\max} \sin(p_h \theta_h - n_s \theta_{Load}) - M_{Turbine} - B_0 \omega_0 - \mu_{ap} (p_h \omega_h - n_s \omega_{Load}), \end{cases} \quad (3.2)$$

где  $J_h, B_h$  – момент инерции и вязкое затухание ротора высокой скорости;  $\omega_0, J, B_0$  – угловая скорость, суммарный момент инерции тихоходного вала, коэффициент вязкого трения;  $\mu_{ap}$  – коэффициент затухания;  $n_s$  – число ферромагнитных модуляторов;  $p_h$  – число пар полюсов быстроходного ротора;  $G_r = n_s/p_h$  – передаточное отношение магнитной трансмиссии;  $M_{Turbine}$  – момент турбины ВЭУ.

Коэффициент затухания магнитной трансмиссии выражается уравнением Монтегью [84]:

$$\mu_{ap} = \sigma M_{\max} \frac{2\chi\omega_e}{\omega_e^2 + \chi^2}, \quad (3.3)$$

где  $\sigma$  – доля от максимального момента, которую может передать электромагнитный вариатор;  $\chi$  – относительная угловая скорость, при которой происходит затухание максимального момента.

На рисунке 3.1 представлена структурная схема магнитного вариатора, которая представляет аналогию структуры магнитной муфты, описанного в исследованиях [46–52].

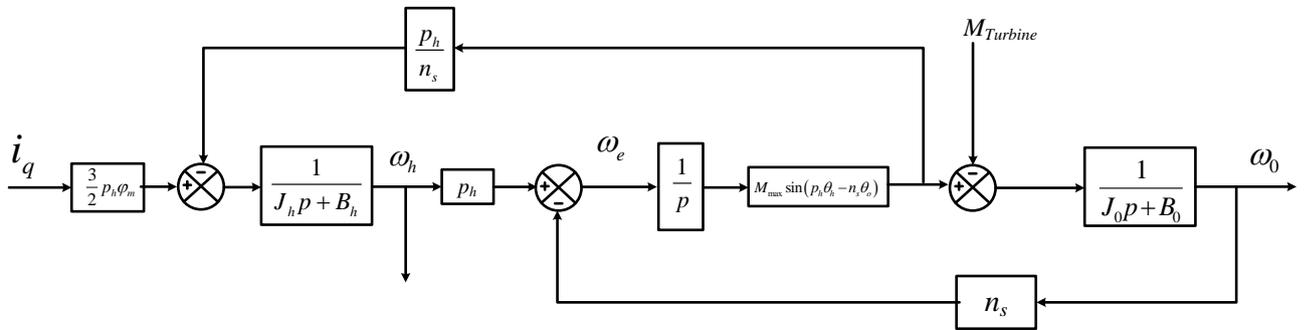


Рисунок 3.1 – Структурная блок-схема магнитного вариатора

Уравнение электромагнитного момента будет определяться коэрцитивной силой постоянных магнитов ротора и током статора по оси  $q$ :

$$M_e = \frac{3}{2} p_h \varphi_m i_q, \quad (3.4)$$

где  $\varphi_m$  – поток рассеяния статора.

Уравнение магнитной жесткости, который выражается через максимальный электромагнитный момент, передаваемый от тихоходного ротора к быстроходному, чисел ферромагнитных стержней и угла нагрузки:

$$K_{em} = n_s M_{\max} \cos(\theta_e). \quad (3.5)$$

Угол нагрузки  $\theta_e$  магнитной трансмиссии определяется как угол расположения между быстроходным ротором и тихоходным:

$$\theta_e = p_h \theta_h - n_s \theta_o, \quad (3.6)$$

где  $\theta_h$  и  $\theta_o$  – угловое положение быстроходного и тихоходного роторов соответственно.

Уравнение момента ВЭУ представлено следующим выражением:

$$M_{Turbine} = C_P(\beta, Z) \pi R_{blade}^2 \frac{\rho v^3}{2 \cdot \omega_{load}}, \quad (3.7)$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с;  $\omega_{load}$  – скорость турбины, рад/с;  $\rho$  – плотность воздуха, равная 1,221 кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр ветровой турбины, м;  $R_{blade}$  – радиус лопасти, м;  $\omega_{load}$  – скорость вращения турбины, рад/с,  $Z$  – быстроходность турбины.

Коэффициент мощности, как указывалось ранее, определяется по формуле:

$$C_P(Z_{turbine}, \beta) = 0,73 \left( 151 \cdot v / (Z_{turbine}) - 0,002 \beta - 13,2 \right) e^{-18,4 v / (Z_{turbine})}, \quad (3.8)$$

где  $Z_{turbine} = \omega_{load} R_{blade} / v$  – быстроходность ВЭУ;  $\beta$  – угол заклинения лопасти турбины, град.

Преобразуя выражение (3.2) с учетом (3.6) получим [84]:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_h = \frac{M_{em}}{J_h} - \frac{M_{max}}{J_h \cdot G} \left[ \sin(p_h \theta_h - n_s \theta_{Load}) \right] - \frac{B_h \omega_h}{J_h} - \frac{\sigma M_{max}}{J_h} \cdot \frac{2\chi \omega_e}{\omega_e^2 + \beta^2} (p_h \omega_h - n_s \omega_{Load}) \\ \dot{\omega}_0 = \frac{M_{max}}{J} \sin(p_h \theta_h - n_s \theta_{Load}) - \frac{M_{Turbine}}{J} - \frac{B_0 \omega_0}{J} - \frac{\sigma M_{max}}{J} \frac{2\chi \omega_e}{\omega_e^2 + \beta^2} (p_h \omega_h - n_s \omega_{Load}), \end{cases} \quad (3.9)$$

Приведенный угол дополнительного рассогласования выражается через следующее дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_e = p_h \dot{\omega}_h - n_s \dot{\omega}_0 = & \frac{p_h M_{em}}{J_h} + \frac{n_s M_{Turbine}}{J} - M_{max} \sin(p_h \theta_h - n_s \theta_{Load}) \left[ \frac{p_h}{J_h \cdot G} - \frac{n_s}{J} \right] - \frac{p_h B_h \omega_h}{J_h} + \frac{n_s B_0 \omega_0}{J} - \\ & - \frac{2\sigma M_{max} \chi \omega_e}{\omega_e^2 + \beta^2} (p_h \omega_h - n_s \omega_{Load}) \left[ \frac{p_h}{J_h} + \frac{n_s}{J} \right]. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Уравнение СГПМ магнитами на базе уравнений Парка–Горева [69]:

$$\begin{cases} U_d = \frac{d\Psi_d}{dt} + R_s I_d - \Psi_q \omega \\ U_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + R_s I_q - \Psi_d \omega, \\ \Psi_d = L_{d\_gen} I_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_{q\_gen} I_q \end{cases} \quad (3.11)$$

где  $U_d$ ,  $U_q$ ,  $I_d$  и  $I_q$  – напряжение и ток статора генератора по  $d$  и  $q$  осям;  $L_{d\_gen}$ ,  $L_{q\_gen}$  – индуктивности статора;  $R_s$  – сопротивление обмотки статора;  $\Psi_d$ ,  $\Psi_q$  – потокосцепление статора;  $\Psi_f$  – потокосцепление постоянных магнитов.

Электромагнитный момент электрической машины определяется следующим уравнением:

$$M_{gen} = \frac{3}{2} Z_p (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d), \quad (3.12)$$

где  $Z_p$  – коэффициент, связывающий электрическую частоту вращения ротора с его механической частотой вращения.

На рисунке 3.2 отображена структурная модель двух ВЭУ, в которых не представлен контур угла заклинивания турбины ВЭУ. Схема управления электромагнитным вариатором представляет собой схему двухконтурного управления. Внутренний контур тока – для стабилизации вращающего момента,

внешний контур скорости – для поддержания постоянной частоты вращения генератора. Два генератора подключены к АЭС, состоящей из ступенчатой нагрузки и линий электропередач. Система управления электромагнитным вариатором выполнена системой векторного управления. В таблице 3.1 представлены параметры схемы замещения и коэффициенты настройки пропорционально-интегрального регулятора тока и интегрального регулятора скорости, выбранные исходя из предварительных значений коэффициента усиления, которые были синтезированы методом нулей и полюсов передаточной функции [87].

Таблица 3.1 – Параметры схемы замещения и значений параметров регуляторов тока и скорости электромагнитного вариатора

Параметр	Значение	
$L_q=L_d$	40	мГн
$R$	2	Ом
$J_h$	4	кг·м <sup>2</sup>
$J_0$	2,5	
$B_h$	$1 \cdot 10^{-4}$	Нм·с/рад
$B_0$	$2 \cdot 10^{-4}$	
$\Phi_m$	0,6	Вб
$\omega_H \text{ speed}$	314	рад/с
$\omega_0 \text{ speed}$	30	
$U_{dc}$	440	В
$i_q$	9 А	А
$\lambda_{ap}$	$0.5 \cdot 10^{-4}$	Нм·с/рад
$K_i$	12	А/рад
$K_s$	1	Ом
$K_p$	0.1	1/с
$i_d$	1	А
$K_{em}$	15	В·с/рад

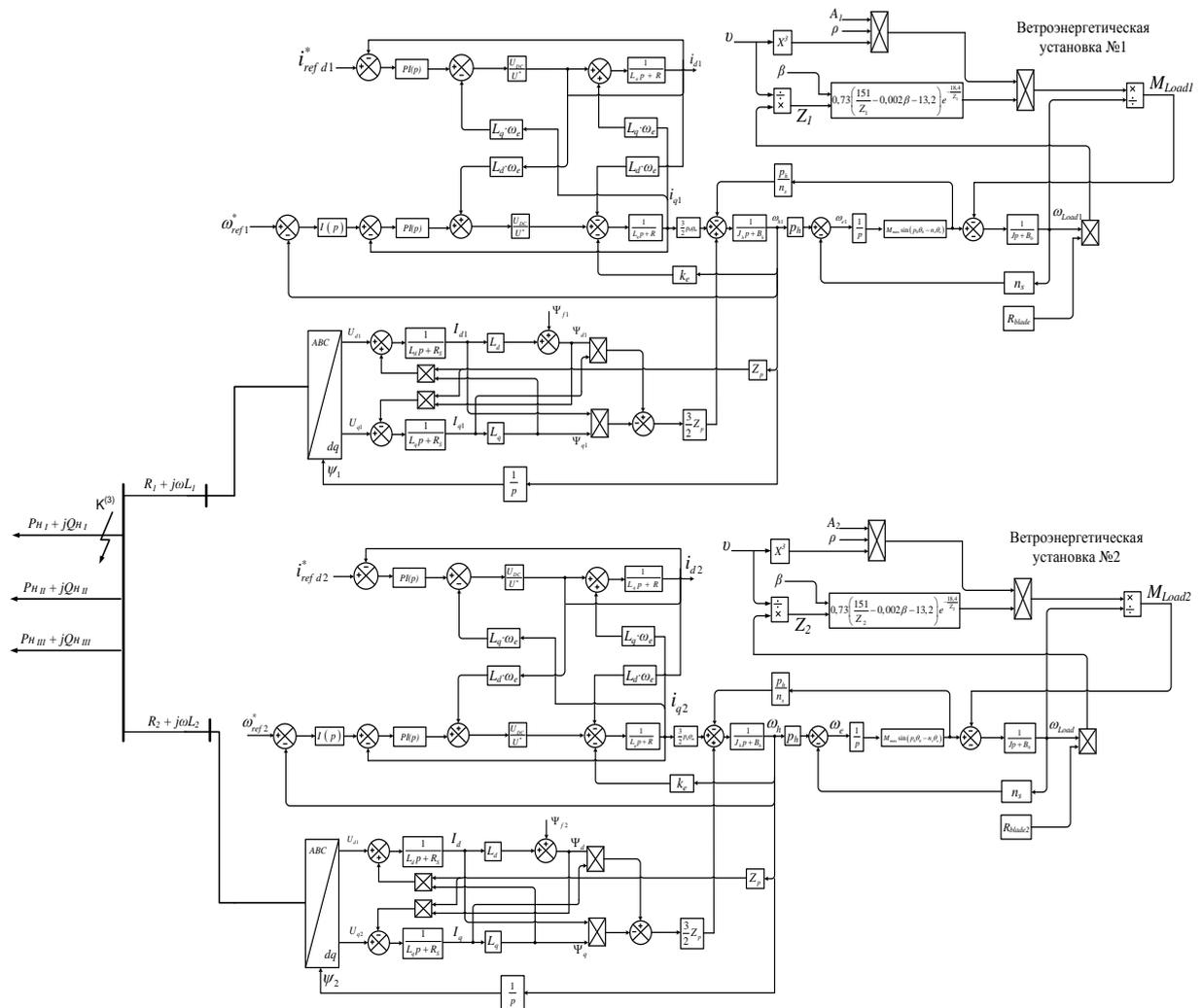
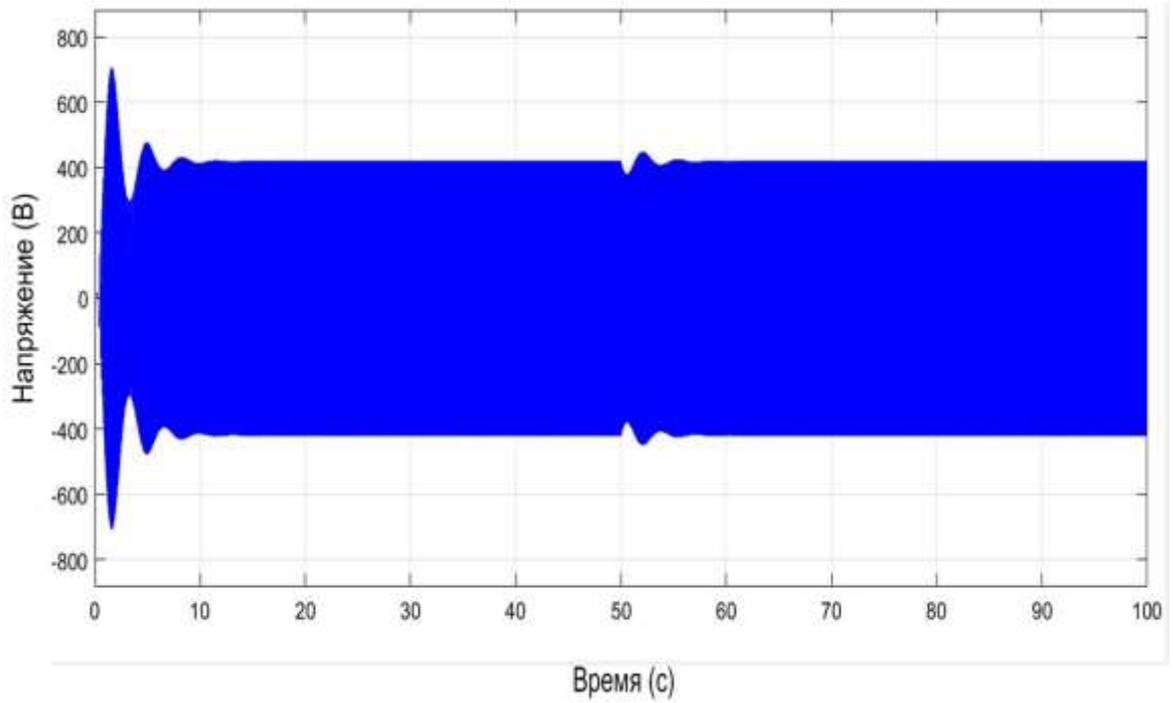
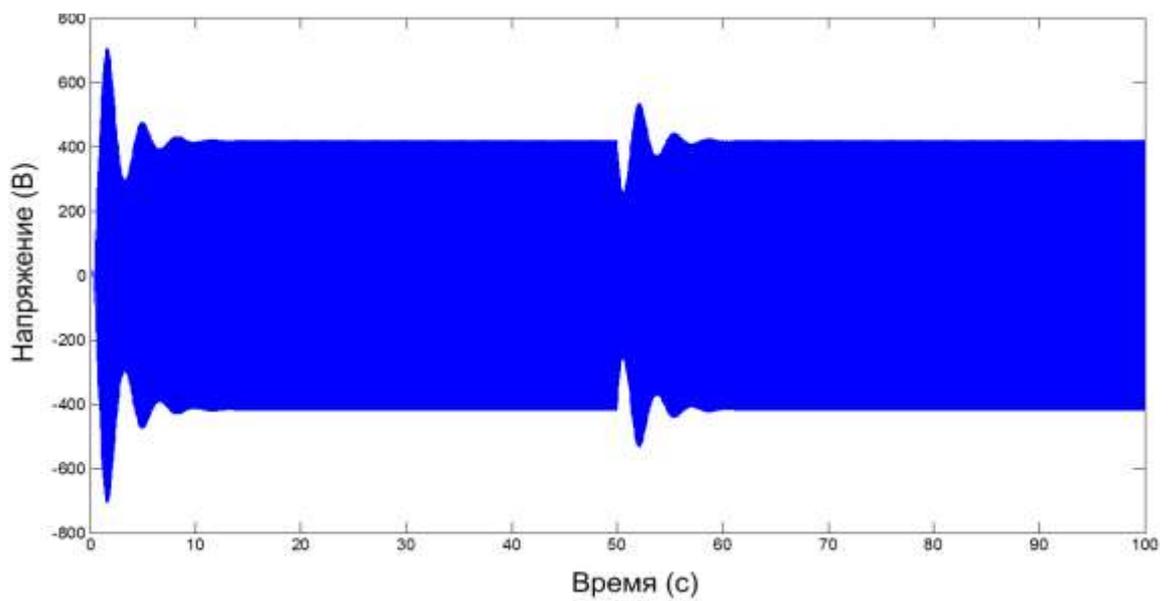


Рисунок 3.2 – Интегрированная модель ВЭУ с электромагнитным вариатором со схемой двухконтурного управления с подключением к автономной электроэнергетической системе

На рисунке 3.3 представлены осциллограммы стабилизации напряжения при резком изменении мощности в автономной энергетической системе. Времена восстановления напряжения составляет 7 и 10 с при резком снижении мощности в энергосистеме на 15 % и 30% соответственно.



а



б

Рисунок 3.3 – Осциллограмма напряжения при поддержании синхронной скорости параллельно работающих генераторов:

а – при сбросе нагрузки на 15%; б – при сбросе нагрузки на 30%

### **3.3 Построение системы комплексного управления ветроэнергетической установки с электромагнитным вариатором в составе автономной электроэнергетической системы**

Как было упомянуто во второй главе, ВЭУ имеет четыре основные зоны работы. 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 (до 25 м/с), в четвертой зоне ВЭУ не работает. Отметим, что достаточно продолжительное время ВЭУ работают во второй зоне. Более того, во второй зоне возможно изменение скорости вращения турбины исходя из принципа максимального отбора мощности. Отметим, традиционно угол атаки во второй зоне равен нулю, и регулируется только третьей зоне. Однако, канал управления углом атаки можно использовать для управления моментом ветровой турбины и, соответственно, для повышения динамической устойчивости. Но, недостатком такого регулирования является высокая постоянная времени, обусловленная медленным перемещением лопасти относительно её оси. Хотя, с точки зрения энергетических показателей, такой способ изменения момента наиболее привлекательный, т.к., он обеспечивает широкий диапазон изменения мощности без участия силовых преобразователей. «Быстрое» изменение момента можно организовать путем интегрирования в магнитный редуктор электрической машины, получающий питание от буферного аккумулятора. При этом, исследования, проведенные Айхо Дж. и Крафтом Л.Д., показали [42], что мощность (момент), вносимый интегрированным двигателем магнитного вариатора может составлять около 20% от полной мощности (вращающего момента) турбины. Достоинством такого построения является высокое быстродействие, а недостатком является ограниченное время формирования дополнительного момента в связи с ограниченной емкостью аккумуляторной батареи. 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 может вызвать даже в статическом режиме ненулевое значение компенсирующего момента и, соответственно, загрузку силового преобразователя и разряд аккумуляторной батареи. В данной работе предлагается и анализируется двухконтурная система формирования компенсирующего момента, при этом, быстрый контур путем создания дополнительного момента обеспечивает либо стабилизацию скорости или напряжения, либо слежение за фазой ведущего более мощного источника электрической энергии. При возмущениях в энергосистеме, начинает действие контур управления магнитного вариатора и появляется вторичное аэродинамическое средство регулирования, который создает дополнительный момент и на эту же величину снижается компенсирующий момент вариатора. А второй контур, путем изменения угла заклинения турбины, регулирует вращающий момент, чтобы снизить до нуля компенсирующий момент дополнительного двигателя.

Большая часть ветровых турбин работает в режиме переменной скорости вращения. Но, регулирование скорости вращения ветровой турбины при работе во второй зоне характеристики ВЭУ в случае дефицита мощности в энергетической системе невозможен по причине того, что во второй зоне ветровая турбина вырабатывает максимальную мощность при нулевом угле атаки. Существуют способы, повышающие регулировочные возможности турбины, которые позволяют повышать подъемную силу турбины, и, в случае второй зоны энергетической характеристики, повышать выработку энергии даже при нулевом угле атаки. К таким средствам можно отнести плазменный привод [80] (см. Приложение Б). В свою очередь, это позволяет реализовать концепцию комплексного управления построения регулятора со стороны ветровой турбины, которая может состоять из плазменного привода и магнитного вариатора. Данное исследование нацелено на разработку комплексного построения привода магнитного вариатора с аэродинамическим управлением путем изменения угла заклинения лопасти (УЗЛ) турбины. Магнитный вариатор с использованием

алгоритма стабилизации заданной скорости вращения позволит использовать возможность изменения положения рабочей точки на энергетической кривой.

На рисунке 3.4 представлена характеристика ветровой турбины с переменной скоростью вращения, работающей во второй зоне энергетической характеристики. При согласованном изменении скорости вращения через магнитные вариаторы на ВЭУ, объединенных в общую сеть, возможно управление режимом ветровой турбины, и, тем самым, регулировать выходную мощность и повышать энергетическую эффективность турбины. Следует отметить, что использование магнитного вариатора позволяет в перспективе исключить применение частотного преобразователя (ЧП).

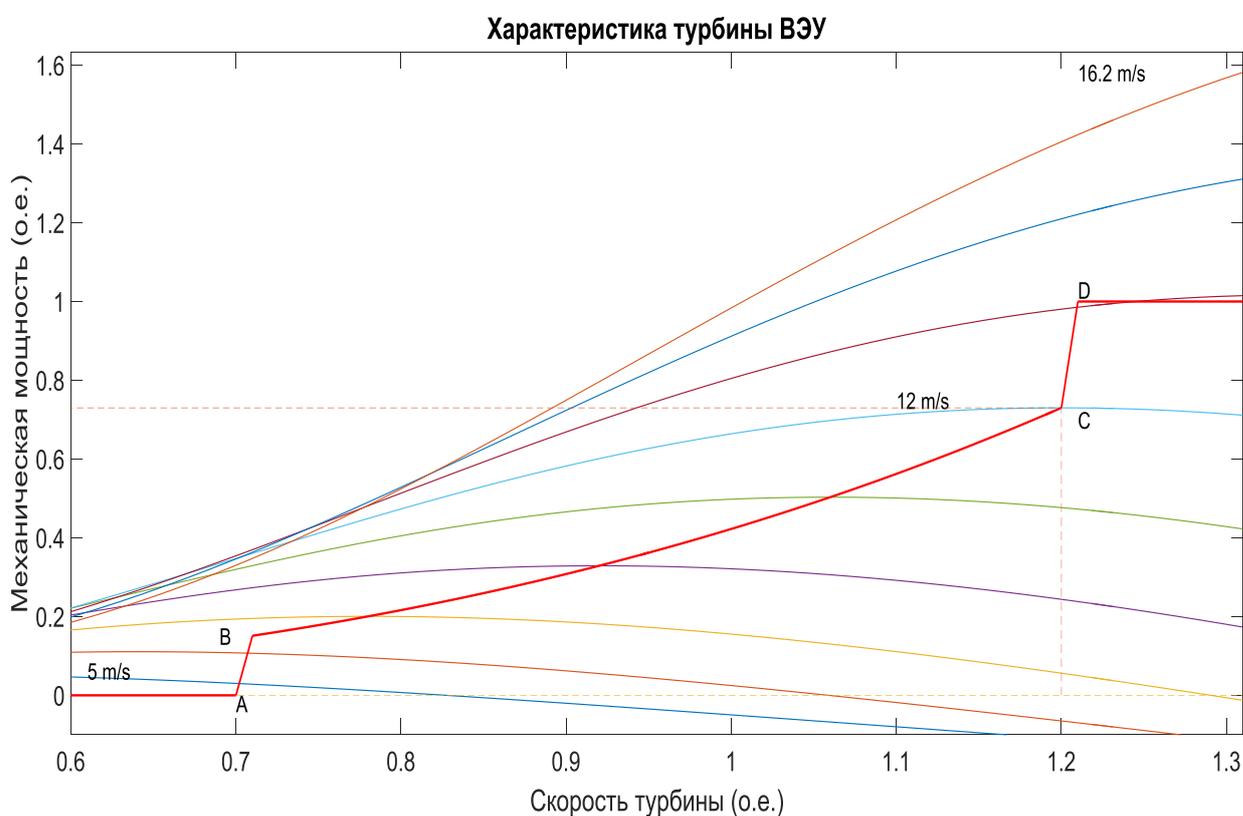


Рисунок 3.4 – Характеристика ВК во второй зоне турбины с переменной скоростью вращения при нулевом угле заклинения лопасти

### 3.4 Моделирование синхронного генератора с постоянными магнитами

Известно, что СГПМ описывается следующей системой уравнений [89]:

$$\begin{cases} U_d = r i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q i_q \frac{d\delta_s}{dt}, \\ U_q = r i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + (L_d i_d + k_0 W p_n \Phi_f) \frac{d\delta_s}{dt}, \\ J \frac{d^2 \delta_s}{dt^2} = \frac{3}{2} [(L_d - L_q) i_q i_d + k_0 W p_n \Phi_f i_q] - M_c, \end{cases} \quad (3.13)$$

где  $U_d$ ,  $U_q$ ,  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $L_d$ ,  $L_q$  – составляющие напряжения тока и индуктивности по продольной и поперечной оси соответственно,  $\delta_s$  – электрический угол, характеризующий положение ротора,  $r$  – активное сопротивление статора,  $\Phi_f$  – магнитный поток на полюс,  $p_n$  – число пар полюсов,  $W$  – число витков,  $k_0$  – обмоточный коэффициент,  $J$  – момент инерции, приведенный к валу,  $M_c$  – момент сопротивления.

Структурная схема, соответствующая этой системе уравнений представлена на рисунке 3.5.

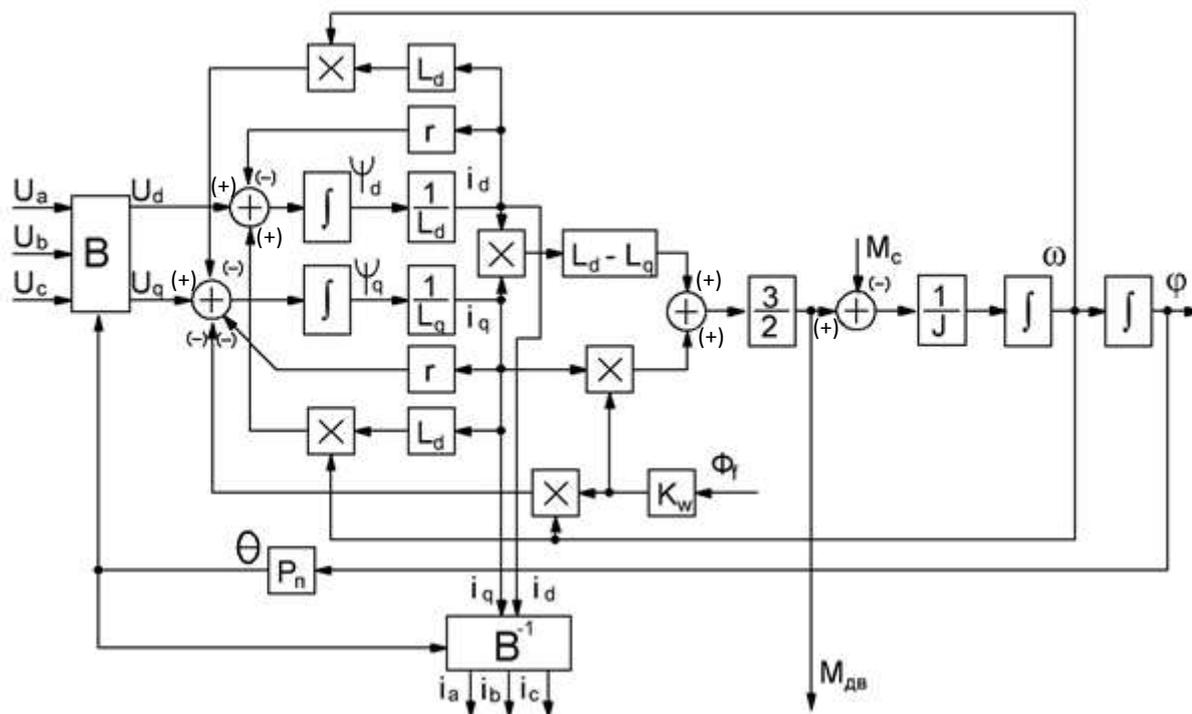


Рисунок 3.5 – Структурная схема СГПМ

С учетом упругости магнитного редуктора уравнения механического равновесия запишутся как уравнение 3.14.

Магнитный вариатор можно представить в виде магнитного редуктора и интегрированный с ним синхронного двигателя, с помощью которого формируется дополнительный вращающий момент, который компенсирует приращение момента нагрузки, чтобы обеспечить стабилизацию скорости вращения или слежение за фазой ведущего генератора.

Эффективное управление синхронного двигателя с постоянными магнитами осуществляется с помощью системы векторного управления. Один из вариантов построения такой системы приведен на рисунке 3.6.

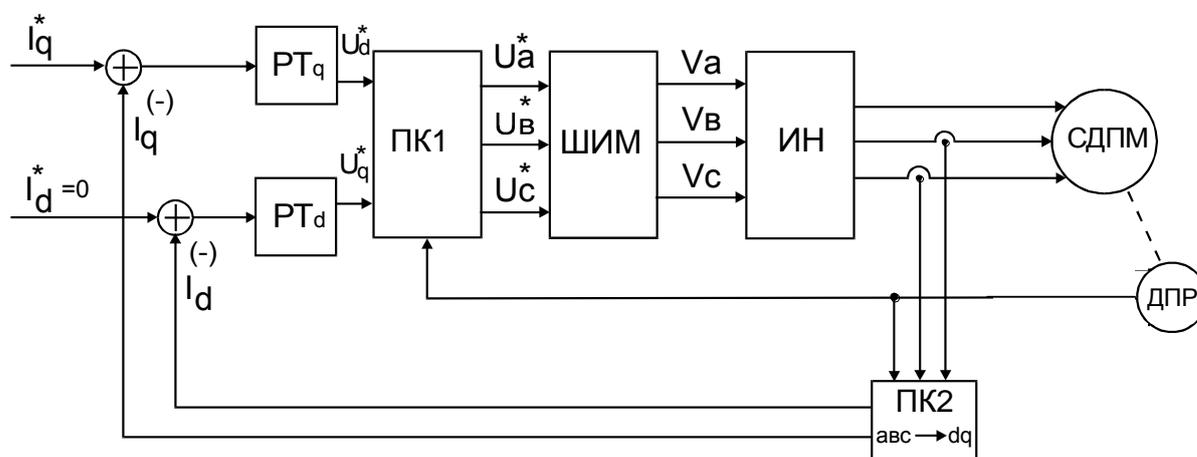


Рисунок 3.6 – Функциональная схема системы управления электромагнитным вариатором с пофазной модуляцией и с регулированием токов в системе координат  $d$  и  $q$ :

ПК1, ПК2 – преобразователи координат, ШИМ – широтно-импульсный модулятор, ИН – инвертор напряжения, ДПР – датчик положения ротора,  $PT_d$ ,  $PT_q$  – регулятор тока по оси  $d$  и  $q$  соответственно, СДПМ – интегрированный синхронный двигатель управления с постоянными магнитами

При управлении синхронным двигателем с помощью системы векторного управления (СВУ) достигается настолько высокое быстродействие при формировании момента, что инерционными свойствами этой системы можно пренебречь.

В таблице 3.4 представлены параметры схемы замещения электромагнитного вариатора.

Таблица 3.4 – Параметры схемы замещения звена управления электромагнитного вариатора

Параметр	Значение	
$L_q=L_d$	40	мГн
R	2	Ом
$J_h$	0,03	кг·м <sup>2</sup>
$J_0$	0,1	
$B_h$	$18 \cdot 10^{-3}$	Нм·с/рад
$B_0$	$18 \cdot 10^{-3}$	
$\varphi_m$	0,6	Вб
$U_{dc}$	440	В
$i_q$	9 А	А
$\lambda_{ap}$	$0.5 \cdot 10^{-4}$	Нм·с/рад
$i_d$	1	А
$K_{em}$	15	В·с/рад

При синтезе законов управления электромагнитного вариатора использована наиболее простая модель АЭС, содержащей два генератора, соединенная линией с целью выявления структуры и параметров регулятора и подтверждением применимости идей, заложенных в основу синтеза.

Представление системы векторного управления безынерционным звеном существенно упрощает рассматриваемую систему, структурная схема которой приведена на рисунке 3.7. Особенностью магнитного вариатора является наличие упругой связи между ветровой турбины и генератором, который приводит к ярко выраженному двухмассовому характеру исследуемой системы, что усложняет синтез регуляторов, обеспечивающих оптимальные переходные процессы.



Синтез каждого контура в системе подчиненного регулирования базируется на идее компенсации основной инерционности объекта управления этого контура последовательным корректирующим звеном с помощью его обратной модели, а для ограничения полосы пропускания в каждом контуре вводится малая некомпенсированная инерционность. Такое построение регулятора всей системы обеспечивает совпадение теоретических и практических результатов только при отработке задающих воздействий при нулевых начальных условиях. В случае наличия ненулевых начальных условий и действия возмущений в объекте процессы во всей системе будут существенно отличаться от оптимальных рассчитанных.

Передаточная функция, выражающее отношение между моментом электромагнитного вариатора, скоростью вращения турбины, и скоростью вращения генератора выражены следующими уравнениями [84]:

$$\frac{\omega_0(p)}{M_{EM}(p)} = \frac{p^2 + \omega_a^2}{J_h p^3 + J_h \omega_r^2 p} \quad (3.14)$$

$$\frac{\omega_h(p)}{M_{EM}(p)} = \frac{\omega_a^2}{J_h p^3 + J_h \omega_r^2 p} \quad (3.15)$$

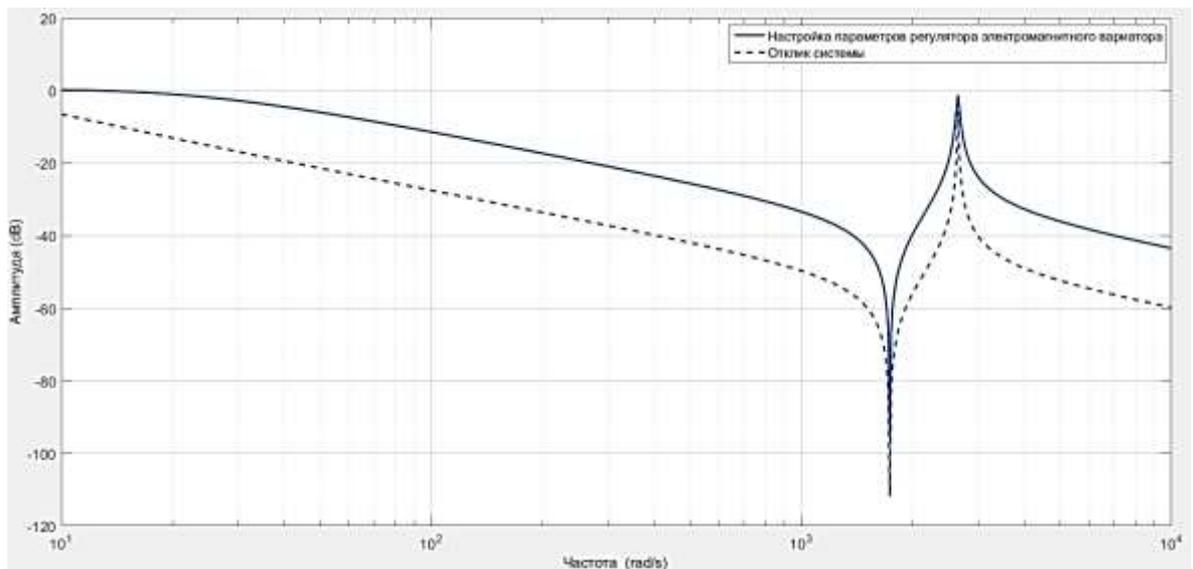
Передаточная функция замкнутой системы управления электромагнитного вариатора равна отношению начальной скорости вращения турбины к заданной скорости турбины и определяется следующим выражением для:

$$\frac{\omega_0(p)}{\omega_{ref}(p)} = \frac{K_I \omega_a^2}{J_h p^4 + K_P p^3 + (J_h \omega_0^2 (1+R) + K_I) p^2 + K_P \omega_a^2 p + K_I \omega_a^2}, \quad (3.16)$$

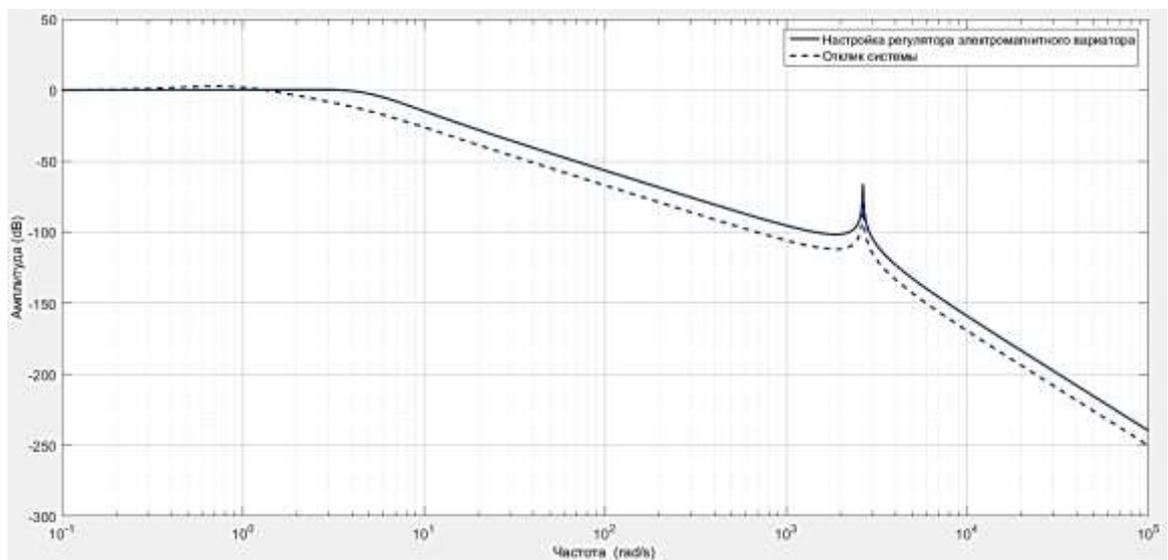
где  $\omega_a = \sqrt{K_{em}/J}$  - антирезонансная частота;  $R = J/J_h$  - соотношение моментов инерции роторов турбины и генератора;  $\omega_r = \omega_0 \sqrt{(R+1)}$  - резонансная частота,  $K_I$ ,  $K_P$  – коэффициенты *ПИ* регулятора,  $\omega_0$  – скорость турбины;  $\omega_{ref}$  – заданная скорость вращения.

И, соответственно, передаточная функция равна отношением начальной скорости вращения замкнутой системы к заданной скорости ротора электрического генератора и определяется следующим выражением:





а



б

Рисунок 3.9 – Расчетная логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разомкнутой двухмассовой системы модели:

а – электромагнитного вариатора; б – со стороны ветроэнергетической турбины

Значения коэффициента усиления и параметры фильтров зависят от выбранного способа коррекции быстрых движений. Согласно общей методики постоянная времени подсистемы быстрых движений должна быть примерно на порядок меньше постоянной времени медленных движений. Вопросы синтеза системы управления магнитного вариатора с учётом нелинейной упругой связи,

вносимой магнитным вариатором, рассмотрены в работах [51, 75, 94], в которых система оптимизируется по критерию интегральной ошибки по времени.

Сравнительный анализ показателей качества переходного процесса в контуре скорости вращения генератора в АЭС электромагнитного вариатора отображены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Сравнительный анализ показателей качества переходного процесса

Параметры	Настройка параметров	Разомкнутая система
Время нарастания	0,0714 сек.	1,12 сек.
Время стабилизации	2,94 сек.	15,2 сек.
Перерегулирование	13%	22,5%
Пиковое значение	1,13	1,23
Коэффициент усиления	-34,8 дБ	-14,2 дБ
Запас по фазе	60 град.	108 град.
Пропорциональный коэффициент	1,26	-
Интегральный коэффициент	26,9	-

Отметим, как было сказано выше, использование аэродинамического управления путём изменения угла заклинения лопасти, которая дает возможность обеспечить компенсацию вращающего момента, и, тем самым, снизить нагрузку на накопитель энергии быстродействующего контура электромагнитного вариатора. Таким образом, возможно построение тандемного способа поддержания скорости вращения генератора ВЭУ, которое заключается в использовании быстродействующего контура управления через магнитный вариатор, и затем, действие контура регулирования угла заклинения лопастей позволяет обеспечить стабилизацию скорости вращения синхронных генераторов с постоянными магнитами и соответственно напряжения. Необходимо провести математическое описание магнитного вариатора и его динамическую модель для дальнейшего

синтеза регуляторов, входящих в систему поддержания заданной скорости вращения или фазы положения ротора генератора. В таблице 3.6 представлен анализ качества переходного процесса управления моментом ветровой турбины.

Таблица 3.6 – Анализ качества переходного процесса управления моментом турбины

Параметры	Настройка параметров
Время нарастания	0,427 сек.
Время стабилизации	3,94 сек.
Перерегулирование	18,4%
Пиковое значение	1,18
Коэффициент усиления	-36 дБ
Запас по фазе	60 град.
Пропорциональный коэффициент	240,56
Интегральный коэффициент	125,87

На рисунке 3.10 представлена осциллограмма переходных процессов в звене управления магнитным вариатором при формировании дополнительного момента при последовательном скачкообразном увеличении нагрузки на 20%. Сплошной график показывает работу системы без использования контура регулирования угла заклинения и момент образуется только действием магнитного вариатора. Пунктирный график отображает систему с учетом использования контура регулирования угла заклинения, и контура регулирования момента магнитным вариатором.

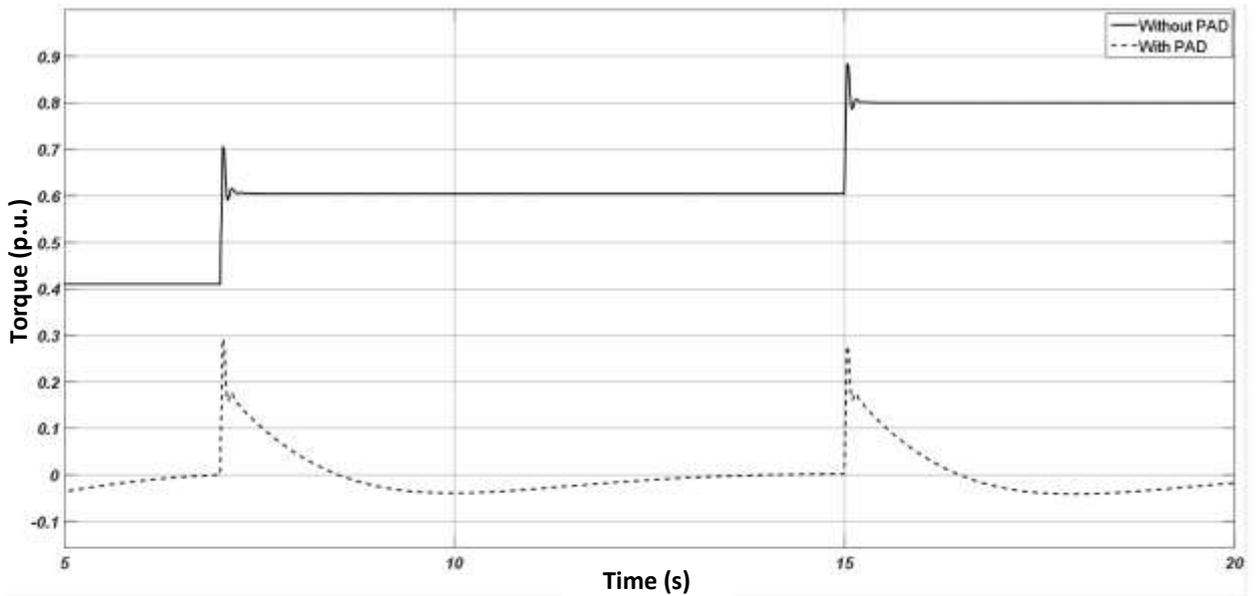


Рисунок 3.10 – Осциллограмма момент на магнитном вариаторе с учетом комплексного управления и без него

В подавляющем большинстве случаев энергосистемы 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. На рисунке 3.11 изображена структура алгоритма компенсации угла нагрузки магнитным вариатором по ведущему генератору в системе в целях исключения асинхронного хода. Она представляет собой использование дополнительного контура фазовой стабилизации, которая дополняет алгоритм стабилизации скорости регулятором фазового положения СГПМ ВЭУ. Регулирование фазового положения ротора СГ осуществляется с помощью магнитного вариатора со стороны электрического генератора.

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:

$$\frac{\theta_{angle}(p)}{\theta_{ref}(p)} = \frac{K_P(p^2 + \omega_a^2)}{J_h p^4 + K_D p^3 + (J_h \omega_a^2(1+R) + K_P)p^2 + K_D \omega_a^2 p + K_P \omega_a^2}, \quad (3.18)$$



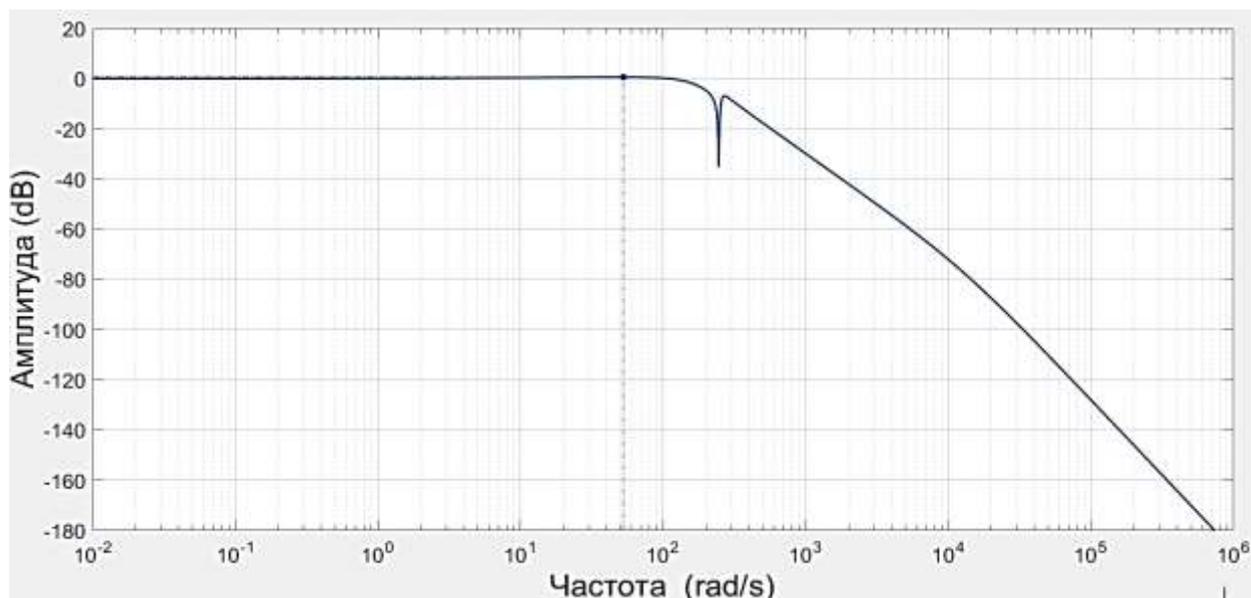
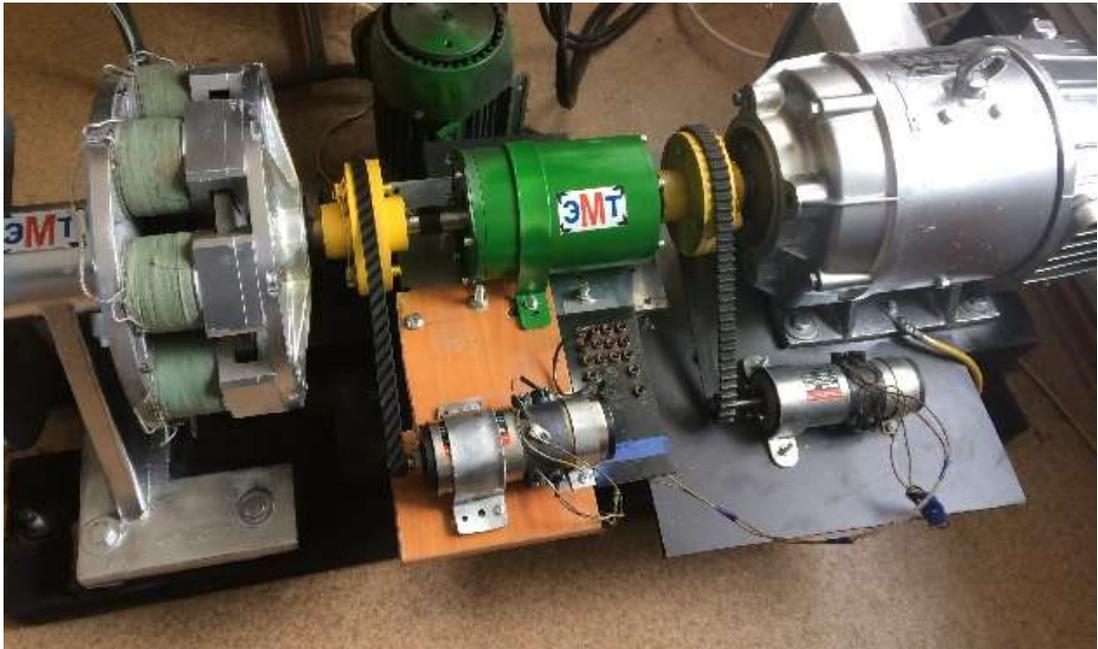


Рисунок 3.12 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы модели электромагнитного вариатора со стороны генератора

### 3.5 Экспериментальные исследования электромагнитного вариатора при различных углах приведенного рассогласования

Для проверки принципов работы электромагнитного вариатора, был разработан макетный образец. Все возмущающие воздействия были зафиксированы с помощью осциллографов, настроенные на выходное напряжение тахогенераторов, измеряющие скорость вращения каждого ротора вариатора. На высокой стороне был установлен двигатель постоянного тока, имитировавший ветровую турбину, на низкой стороне был размещен динамический тормоз, имитирующий управление электромагнитного вариатора с изменяемой нагрузкой. Также, с помощью его было реализовано возмущающее воздействие. На рисунке 3.13 представлен макет образца магнитного редуктора с шихтованным магнитопроводом.



а



б

Рисунок. 3.13 – Макетные образцы:

а – макетный образец электромагнитного вариатора; б – магнитный редуктор

На рисунке 3.14 представлена осциллограмма пуска магнитного редуктора в режиме холостого хода. Время разгона магнитного редуктора зависит от инерции тихоходного вала турбины.

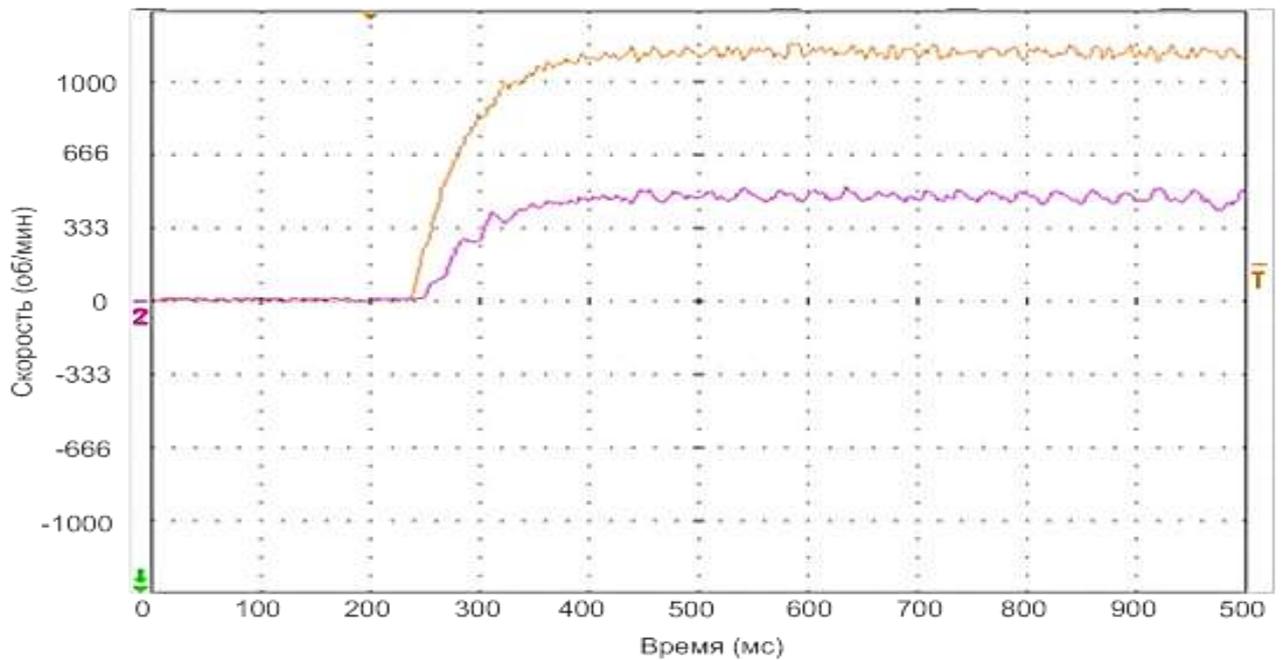


Рисунок 3.14 – Осциллограмма пуска магнитного редуктора в режиме холостого хода

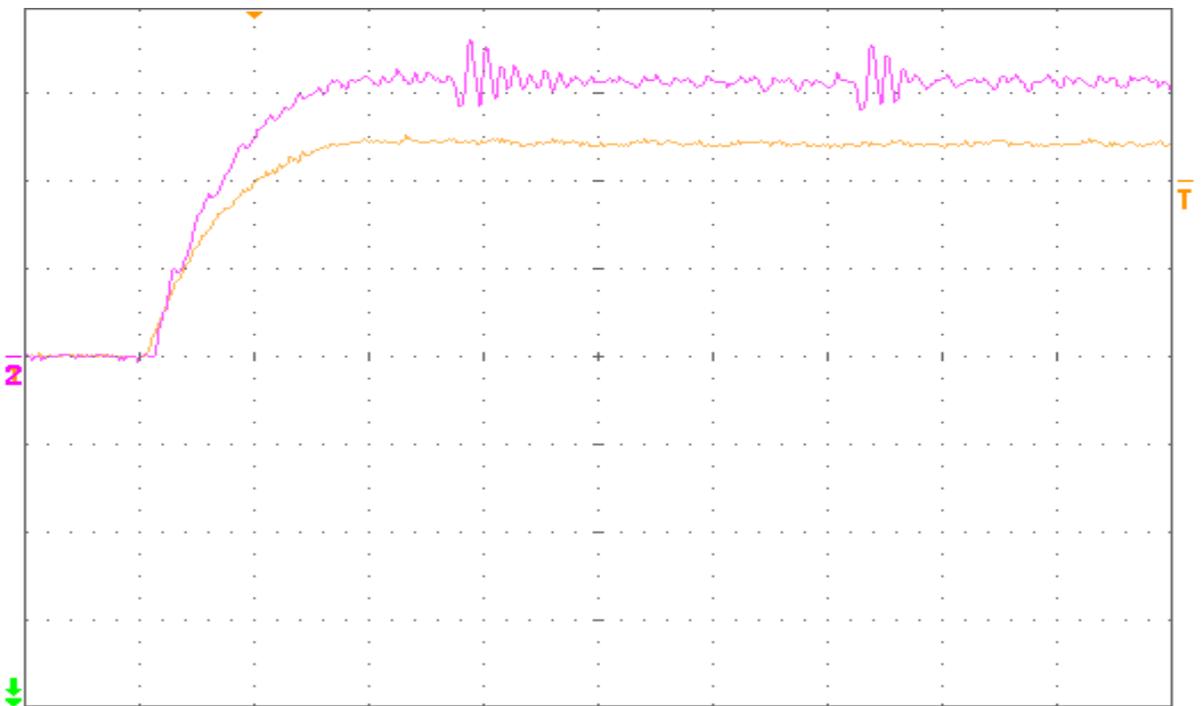
На рисунке 3.15 представлена осциллограмма переходного процесса при реализации возмущающего воздействия со стороны высокоскоростного ротора вариатора. Возмущающие воздействия были реализованы с помощью динамического тормоза. Данная осциллограмма демонстрирует влияние упругого магнитного взаимодействия, которое позволяет сделать вывод о возможности реализации принципа магнитного вариатора при формировании управляющего воздействия со стороны быстроходного ротора. Компенсация вращающего момента вариатора возможна при помощи контура управления тихоходного ротора турбины. Таким образом 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 добавочным моментом на валу генератора электромагнитным вариатором.

Можно заметить, что скорость вращения быстроходного ротора составила  $n_{\text{бв}} = 396.5 \text{ об/мин}$ , а тихоходного ротора составляет  $n_{\text{тв}} = 76.8 \text{ об/мин}$  на рисунке 3.15 а и б. На рисунке 3.15 в скорость быстроходного ротора  $n_{\text{бв}} = 637.0 \text{ об/мин}$ , и

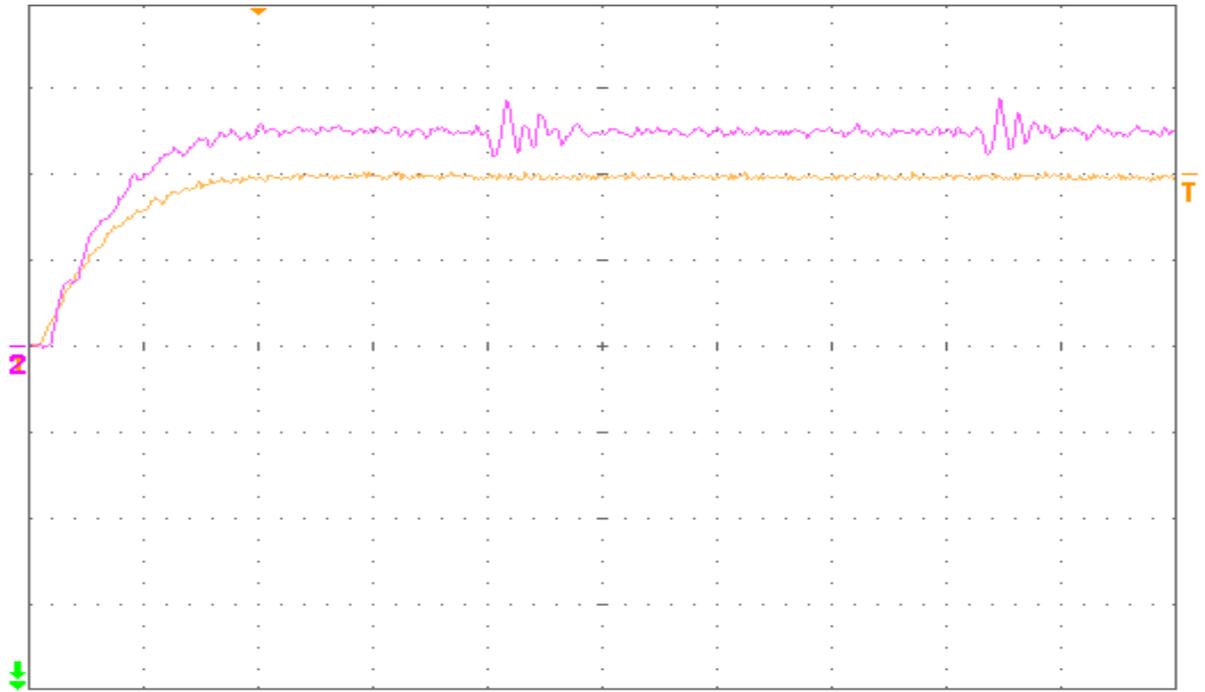
тихоходного ротора  $MP01$   $n_{me} = 127.0$  об/мин. И наконец, на рисунке 3.15  $\varepsilon$   $n_{be} = 778.0$  об/мин,  $n_{me} = 150.9$  об/мин.



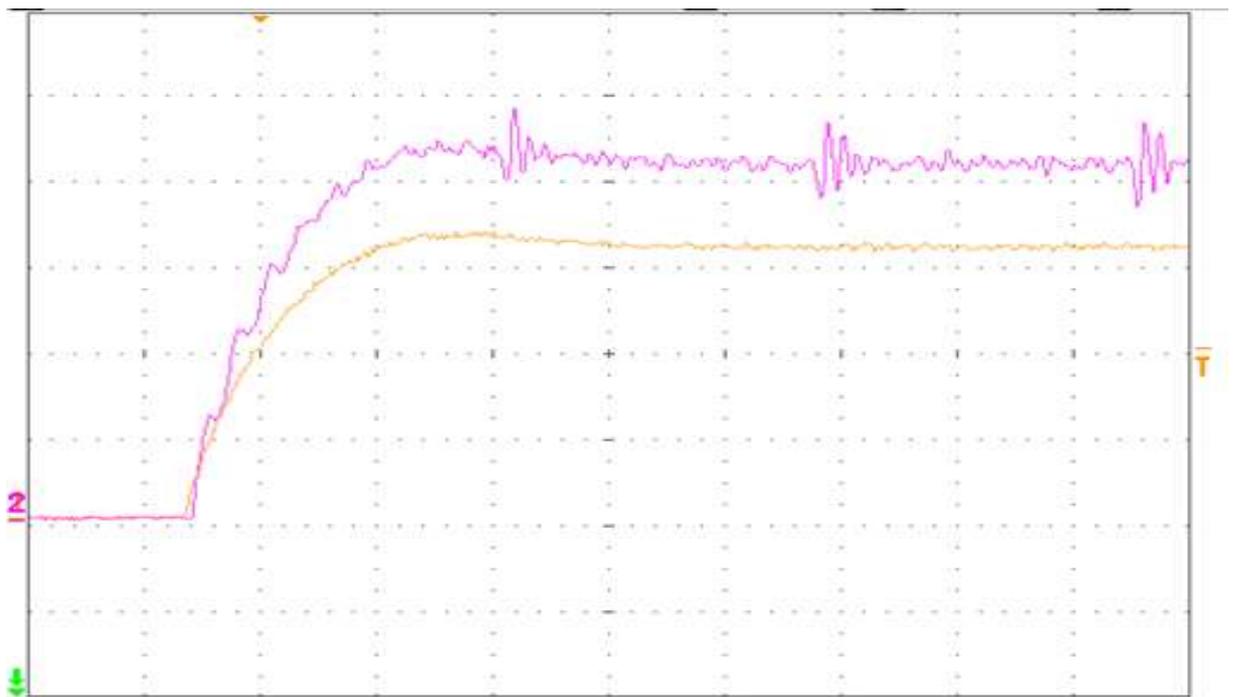
а



б



B



Г

Рисунок 3.15 – Осциллограммы экспериментальных исследований электромагнитного вариатора при реализации различных управляющих воздействий со стороны нагрузки

На рисунке 3.16 представлена снятая механическая характеристика вращающего момента в зависимости от скорости вращения приводного двигателя. Результаты теоретических исследований полностью коррелируют с результатами экспериментальных исследований.

В качестве заключения можно сказать, что в данном разделе отражено построение динамических моделей магнитных редукторов при углах рассогласования и приведены экспериментальные исследования при различных воздействиях быстроходного ротора магнитного редуктора относительно тихоходного. При малых углах рассогласования, возможно анализировать статические режимы работы магнитного редуктора, которые связаны с ограниченным углом рассогласования.

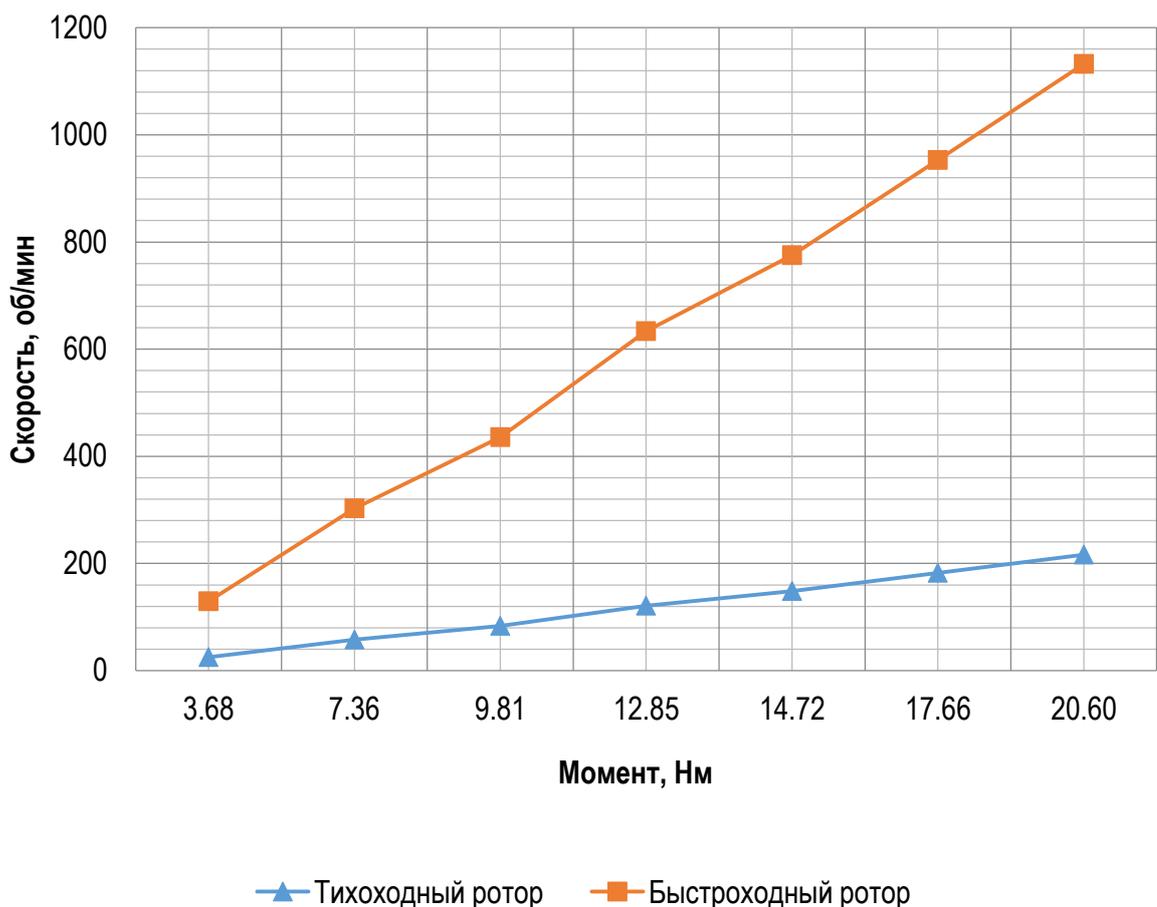


Рисунок 3.16 – Механическая характеристика редуктора, полученная экспериментально

### 3.6 Выводы

1. Разработаны законы и алгоритмы управления электромагнитным вариатором в составе ВЭУ, обеспечивающих электромеханическую совместимость с АЭС;
2. Разработка законов и алгоритмов комплексного управления электромагнитным вариатором и механическим моментом турбины ВЭУ (на примере управления аэродинамикой лопастей);
3. Получено экспериментально зависимость момента от приведенного угла дополнительного рассогласования;
4. Разработана математическая модель магнитного вариатора с применением принципа КУ построения системы стабилизации скорости вращения ротора СГ при одинаковой постоянной времени механической инерции;
5. Разработан алгоритм стабилизации фазового рассогласования углового положений роторов генераторов при их параллельной работе, имеющие разную постоянную времени механической инерции;
6. Проведен синтез регулятора скорости методом Мэйсона (метод нулей и полюсов) с приведением к желаемой передаточной характеристики скорости замкнутой системы.

## 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВАРИАТОРА

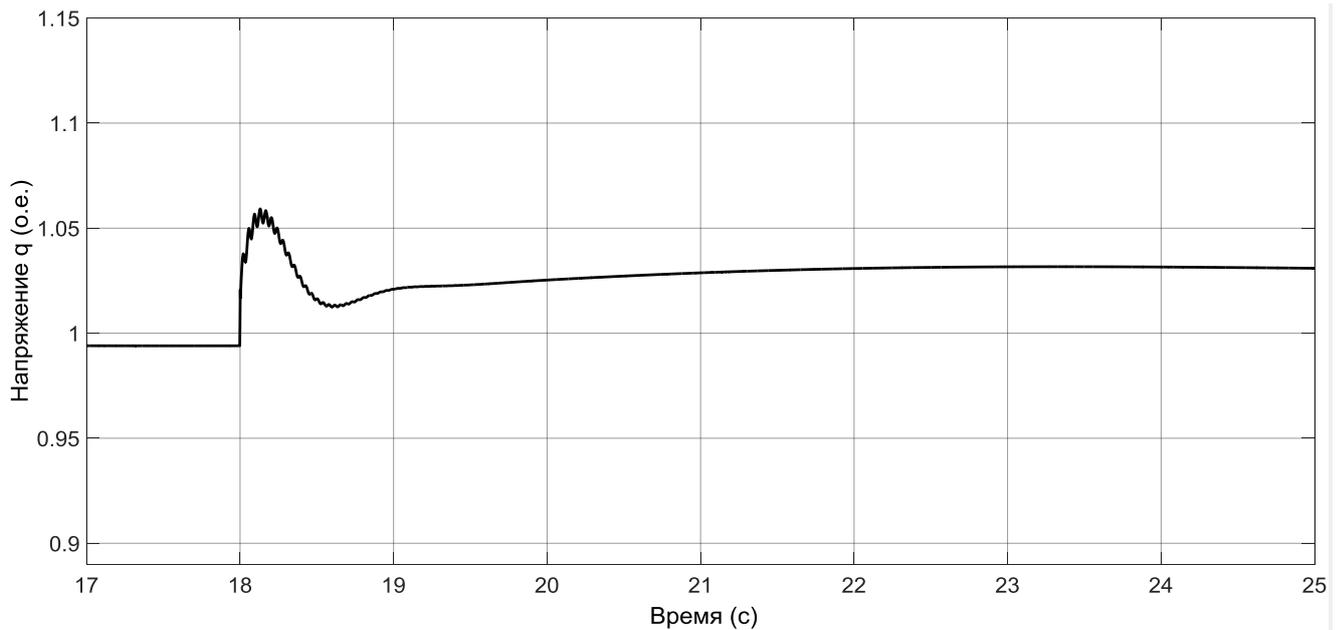
### 4.1 Постановка задачи

Поставлена задача по исследованию переходных процессов, возникающих в АЭС, состоящей из двух ВЭУ. Исследовать переходные процессы при параллельной работе двух синхронных генераторов с использованием электромагнитного вариатора. Исследовать переходные процессы при согласовании скоростей вращения роторов генераторов в автономной электроэнергетической системе электромагнитным вариатором, состоящей из ВЭУ однородного по типу и составу генерирующего оборудования, имеющие одинаковую постоянную времени механической инерции. Исследовать переходные процессы с учетом реализации алгоритма стабилизации фазового согласования углов положений роторов при разнородном по составу генерирующего оборудования, имеющие разные постоянные времени механической инерции. Проанализировать принцип согласования фазы по ведущей станции при использовании гибридной системы электроснабжения, состоящей из ВЭУ и дизельной станции на базе синхронного генератора с постоянными магнитами. Провести исследования параметров электрической сети при переходных процессах в АЭС при резких изменениях режимов нагрузки, КЗ в АЭС, резких изменениях скоростей ветра.

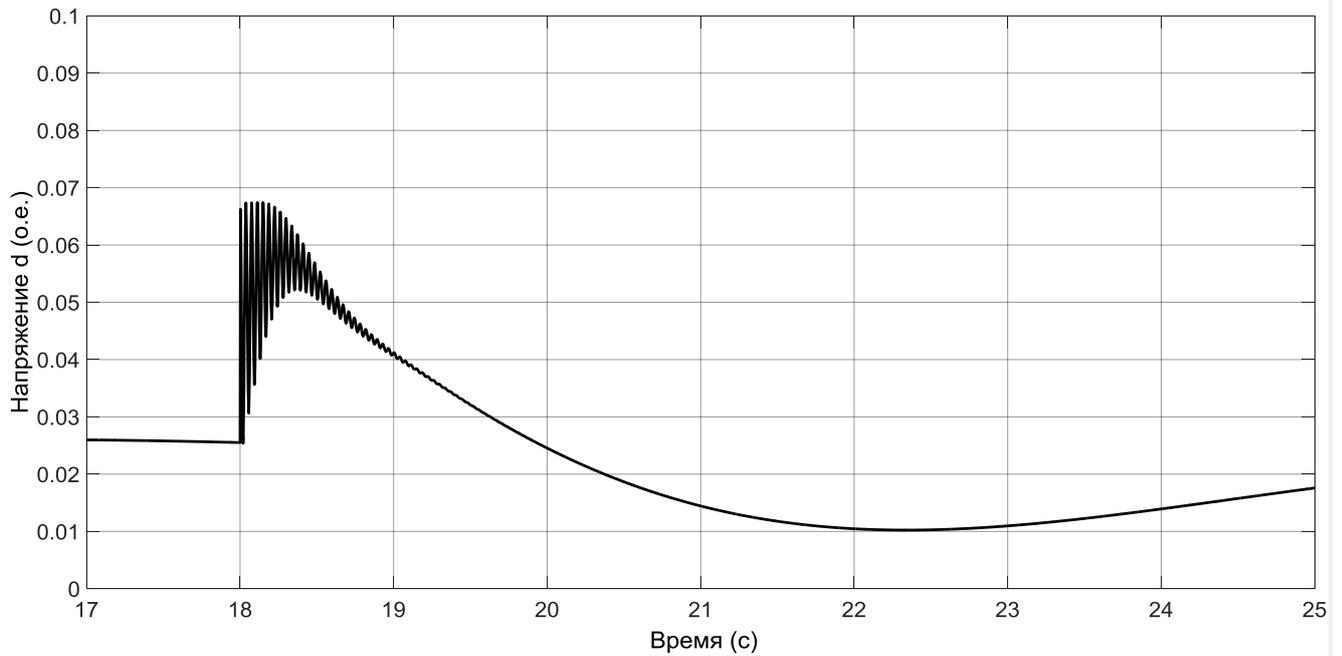
### 4.2 Электромеханические переходные процессы в автономной электроэнергетической системе на базе генераторов с использованием электромагнитного вариатора при резком снижении и увеличении нагрузки

На рисунках 4.1 изображены осциллограмма напряжений при резком снижении мощности на 15%. Представленная осциллограмма

электромеханического переходного процесса при использовании алгоритма стабилизации скорости вращения ротора электрического генератора путем применения комплексного управлением электромагнитным вариатором. Отметим, что при резком изменении мощности в АЭС при использовании алгоритмов стабилизация скорости вращения магнитного вариатора со стороны генератора наблюдается стабилизация напряжения. Выбор параметров регулятора скорости магнитного вариатора сводилось к тому, что решение дифференциального уравнения параллельной работы СГПМ представляет собой аperiodический вид без возникновения колебательных процессов. При анализе осциллограмм наблюдается восстановление напряжения после переходного процесса до значения, равное 3% от номинального [95].



а

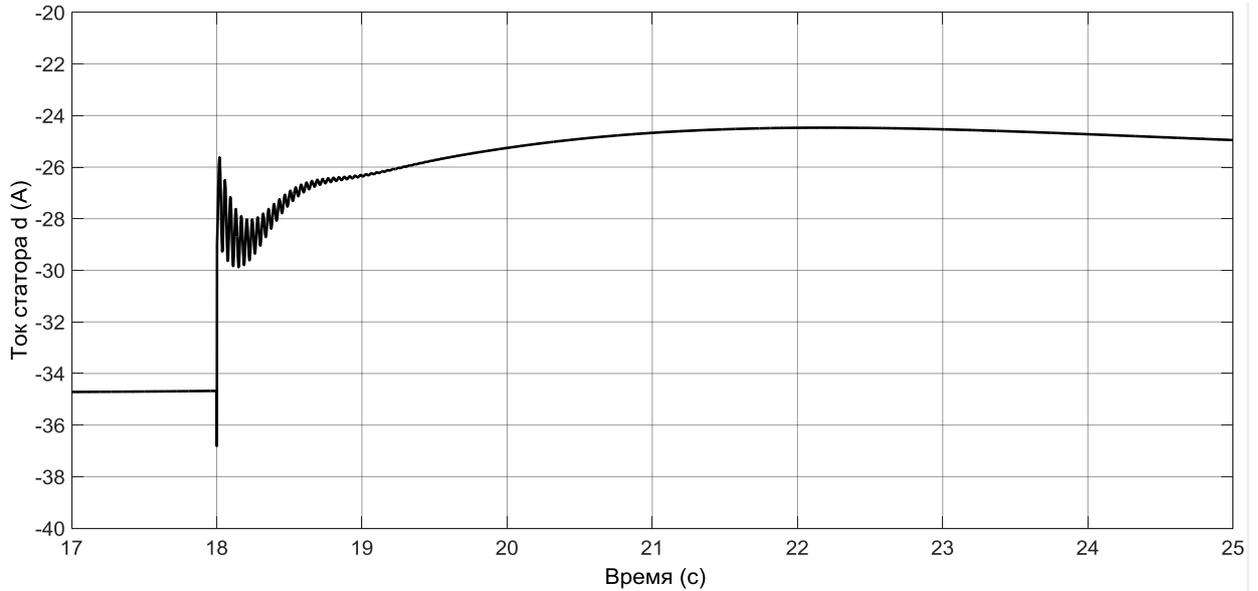


б

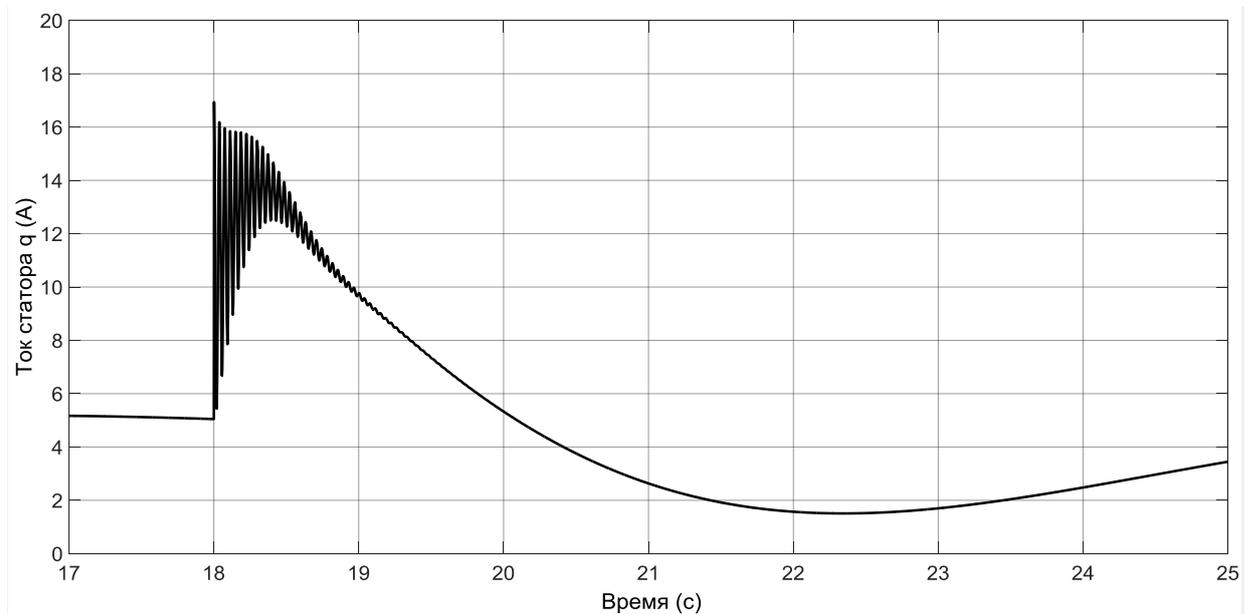
Рисунок 4.1 – Осциллограмма напряжения в АЭС при резком сбросе нагрузки на 15% с учетом действия регулятора скорости магнитного вариатора:

а – по оси  $q$ ; б – по оси  $d$

На рисунках 4.2 изображена осциллограмма токов по осям  $d$  и  $q$ . Отметим, анализ осциллограмм напряжения, изображенных на рисунке 4.3 и тока на рисунке 4.2, показывают, что соблюдается режим генератора до и после переходного процесса. Благодаря действию алгоритма стабилизации скорости сохраняется синхронная работа параллельно работающих генераторов.



а



б

Рисунок 4.2 – Осциллограмма тока в АЭС при резком сбросе нагрузки на 15% с учетом действия регулятора скорости магнитного вариатора и без него:

а – по оси  $q$ ; б – по оси  $d$

Рисунок 4.3 отображает осциллограмму скорости вращения ротора генератора при его стабилизации скорости. В случае отсутствия регулятора скорости при сбросе мощности нагрузки на 15 % наблюдается увеличение скорости, которое может привести к повреждению генераторов. Алгоритм

стабилизации скорости реализует возможность обеспечения синхронной работы генераторов и не вызывает значительных механических перегрузок.

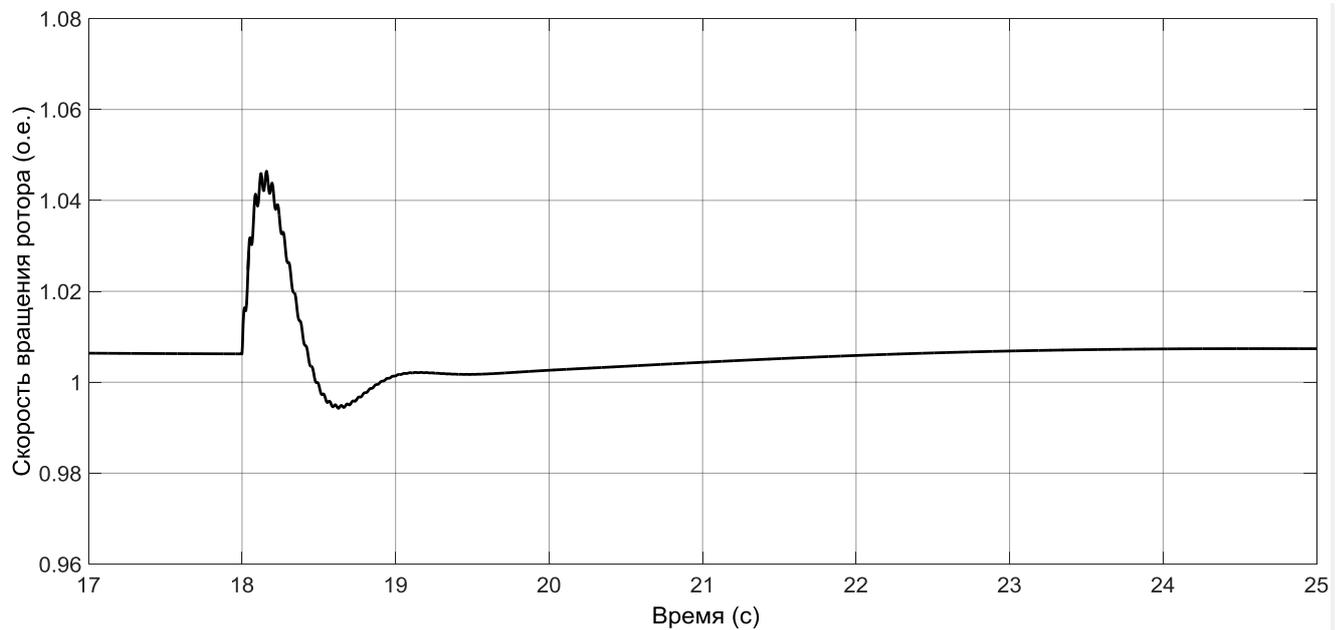


Рисунок 4.3 – Осциллограммы скорости вращения ротора генератора при использовании алгоритма стабилизации скорости магнитного вариатора при резком снижении мощности на 15%

На рисунке 4.4 отображена осциллограмма фазового положения ротора электрического генератора в автономной энергетической системе. В случае использования алгоритма поддержания синхронной скорости вращения ротора генератора с использованием магнитного вариатора с комплексной системой управления сохраняется синхронная работа генераторов.

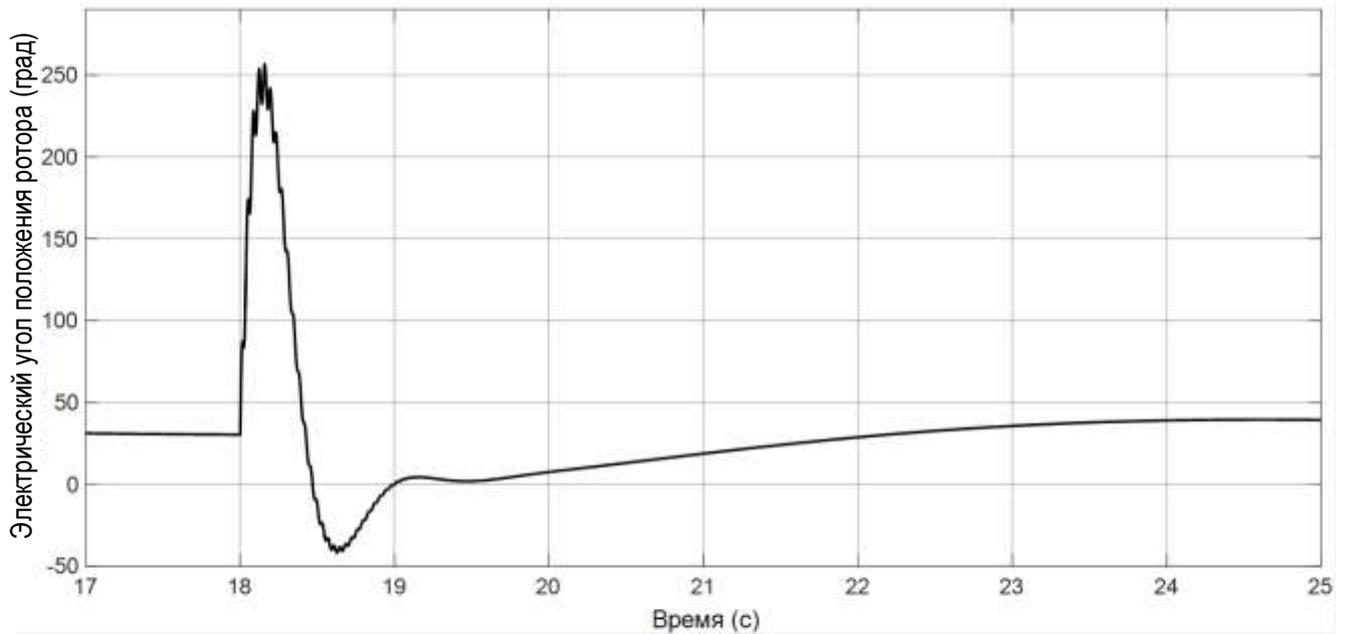


Рисунок 4.4 – Осциллограмма угла генератора при действии алгоритма комплексной стабилизации скорости вращения магнитным вариатором

Рисунок 4.5 отображает осциллограмму мощности, потребляемой нагрузкой. Анализ осциллограммы показывает, что при реализации алгоритма стабилизации скорости в режиме резкого сброса нагрузки на 15%, мощность энергопотребления после переходного процесса снижена в соответствии с уровнем изменения мощности со стороны нагрузки. Увеличение дисбаланса мощности в энергетической системе связано со снижением нагрузки при увеличении скорости вращения синхронных генераторов с постоянными магнитами, которое вызывает увеличение напряжения и, как следствие, момента.

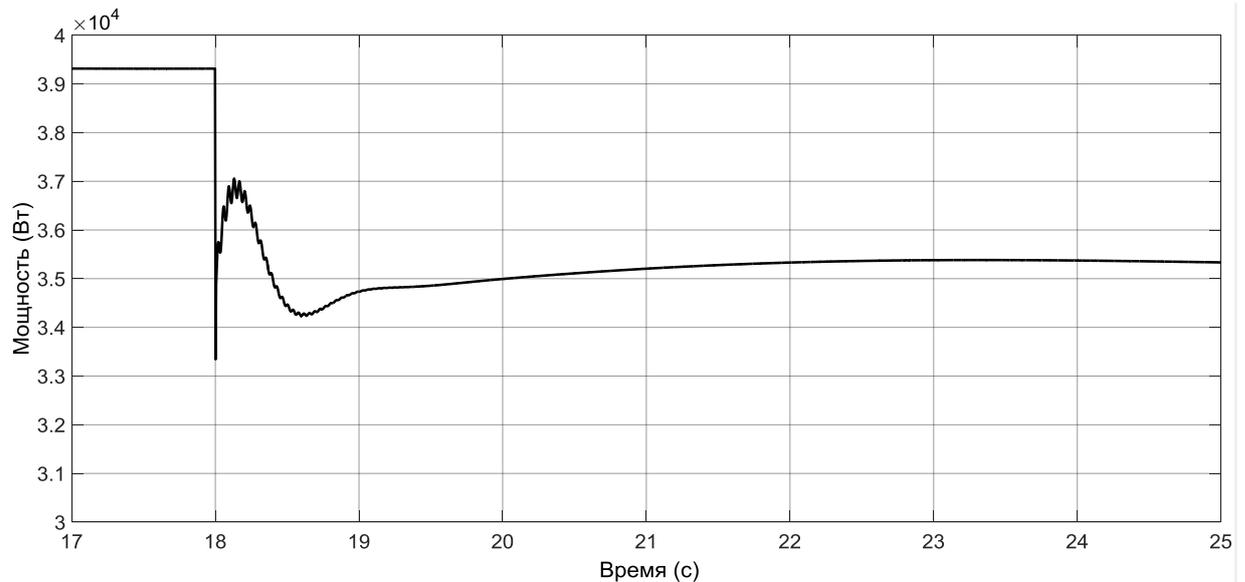
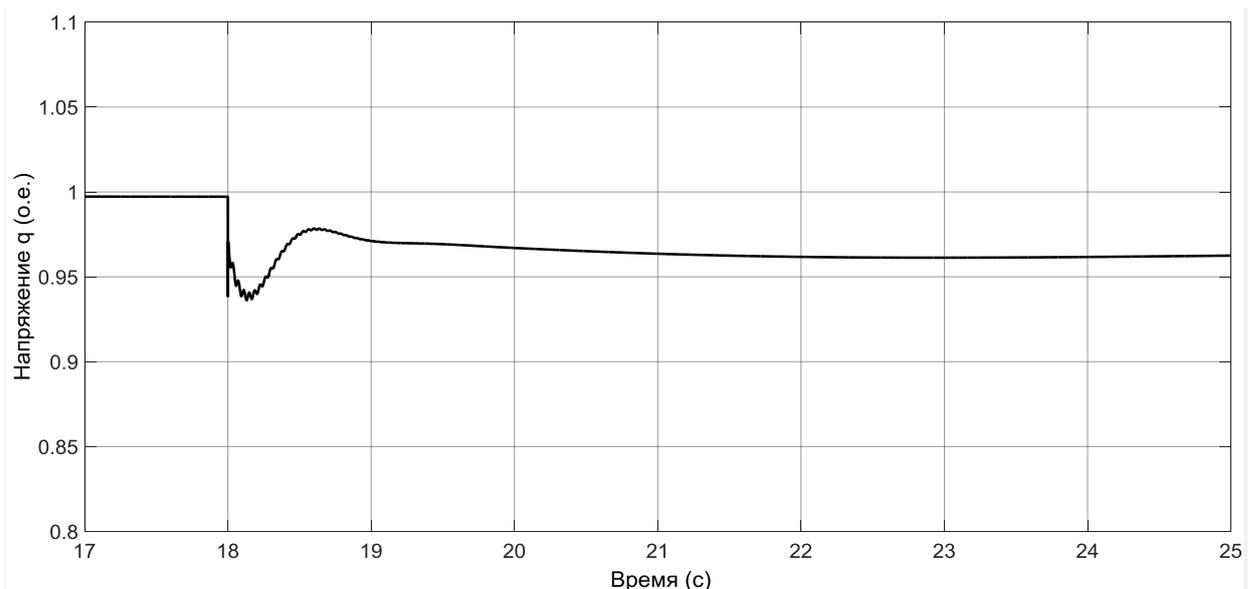
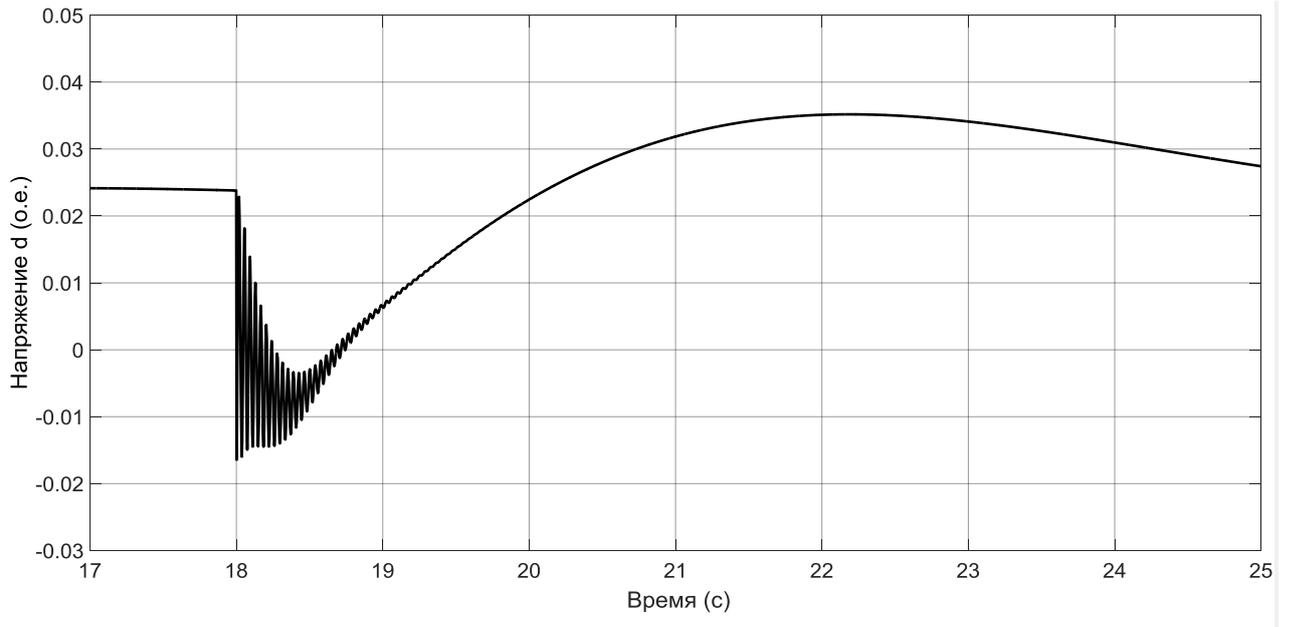


Рисунок 4.5 – Осциллограмма потребляемой мощности нагрузкой в АЭС

Рассмотрим режим резкого увеличения потребления мощности нагрузкой. В АЭС существует автоматика, которая сравнивает выработку и потребление и реализует баланс, ограничивающая резкое увеличение мощности нагрузкой. Существует прямой метод согласования нагрузкой в АЭС. На рисунке 4.6 изображена осциллограмма переходного процесса при резком увеличении нагрузкой на 15%. Регулирование скорости магнитным вариатором обеспечивает синхронизацию за одну секунду с последующим восстановлением напряжения.



а



б

Рисунок. 4.6 – Осциллограмма напряжения при резком увеличении нагрузки:

а – по оси  $q$ ; б – по оси  $d$

На рисунке 4.7 представлена осциллограмма переходного процесса при резком увеличении нагрузки на 15%. За одну секунду происходит восстановление синхронной скорости вращения генератора ВЭС на быстроходной стороне электромагнитного вариатора.

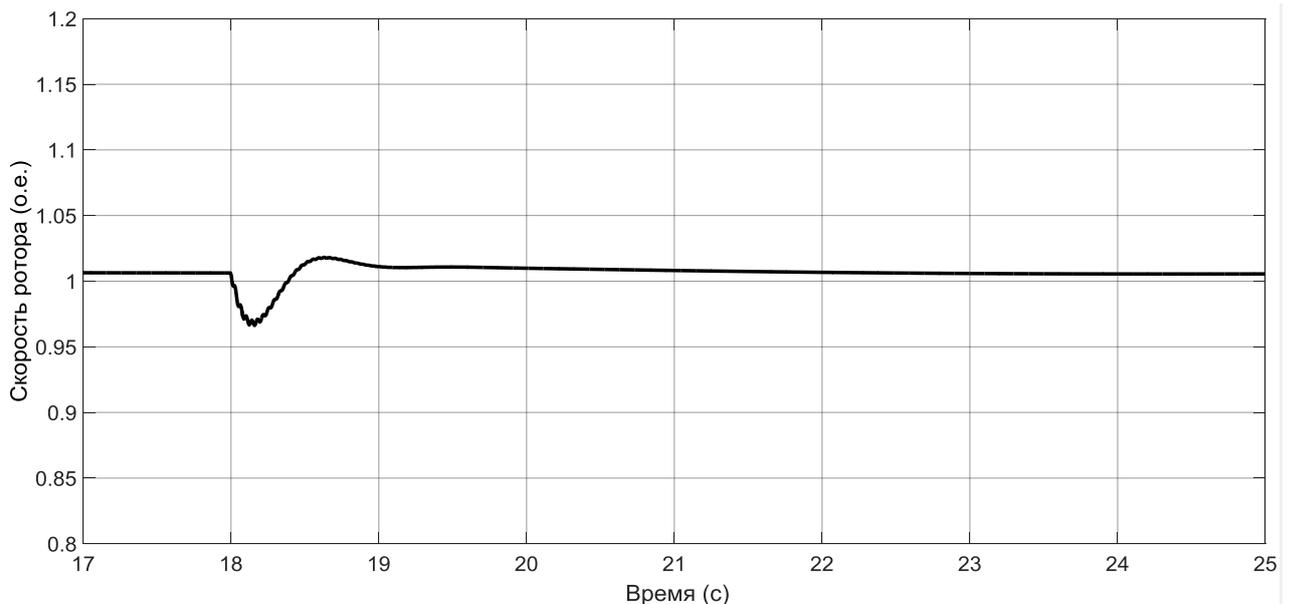
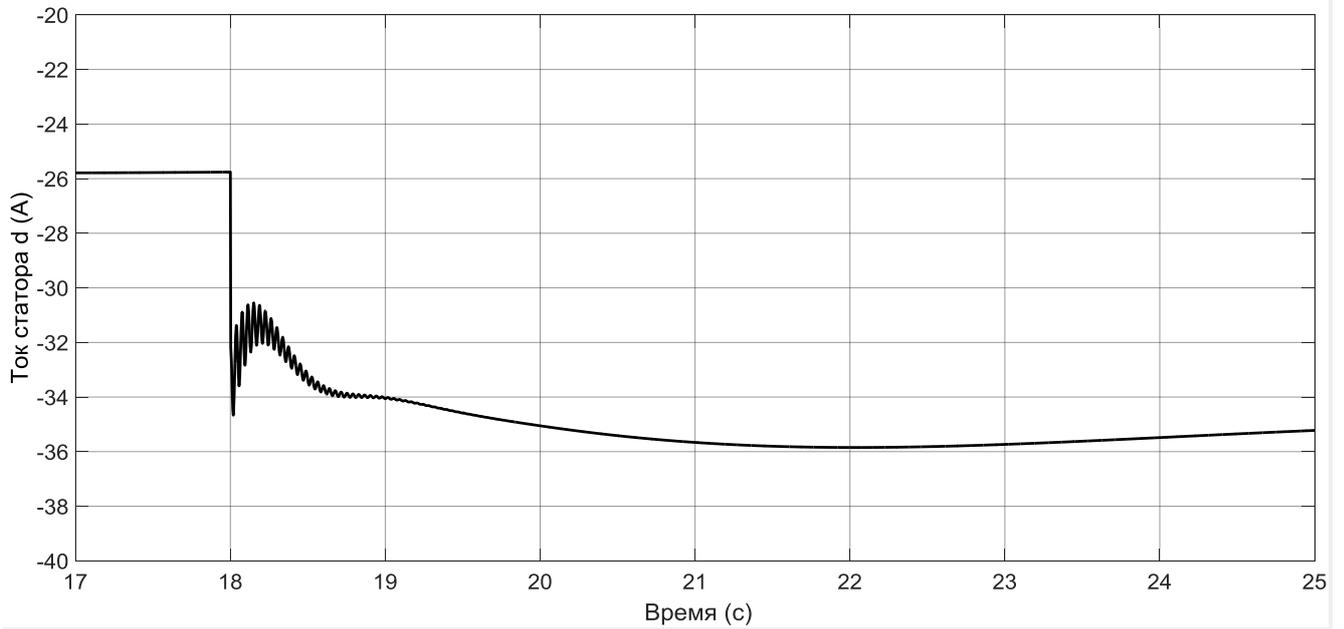
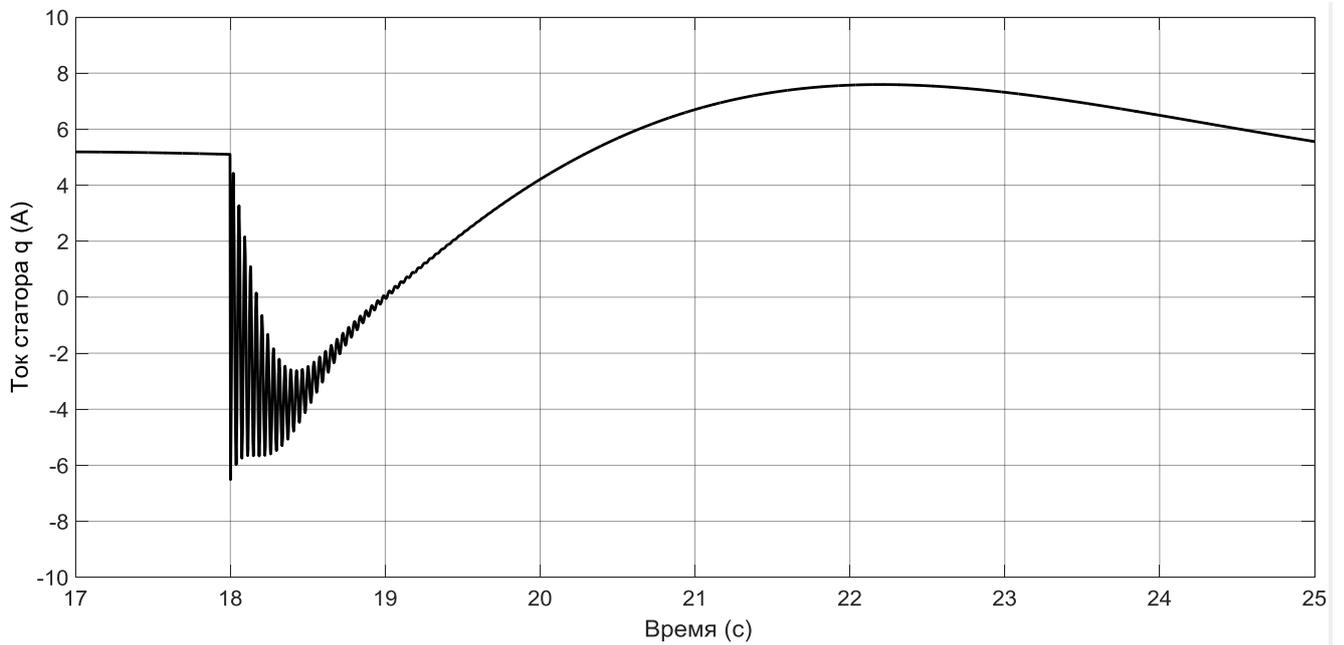


Рисунок 4.7 – Осциллограмма скорости при резком увеличении нагрузки

На рисунке 4.8 представлены осциллограммы тока по осям  $d$  и  $q$ . Из анализа осциллограмм можно увидеть, что возникает увеличение тока по оси  $d$ .



а



б

Рисунок 4.8 – Осциллограмма тока при резком увеличении нагрузки:

а – по оси  $d$ ; б – по оси  $q$

На рисунке 4.9 представлена осциллограмма угла положения ротора СГПМ. При переходном процессе происходит колебание положения ротора, которое впоследствии восстанавливается около установившегося положения 28 градуса.

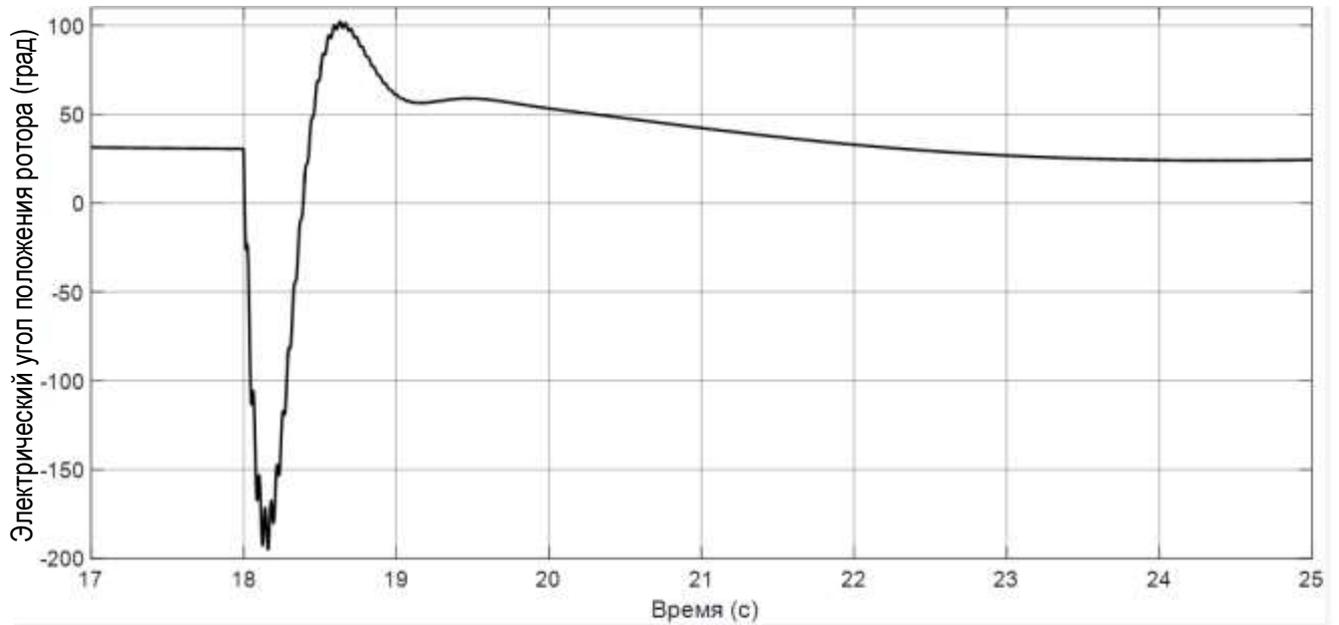


Рисунок 4.9 – Осциллограмма изменения ЭУПР СГ при резком увеличении нагрузки

На рисунке 4.10 изображена осциллограмма, показывающая увеличение мощности в АЭС.

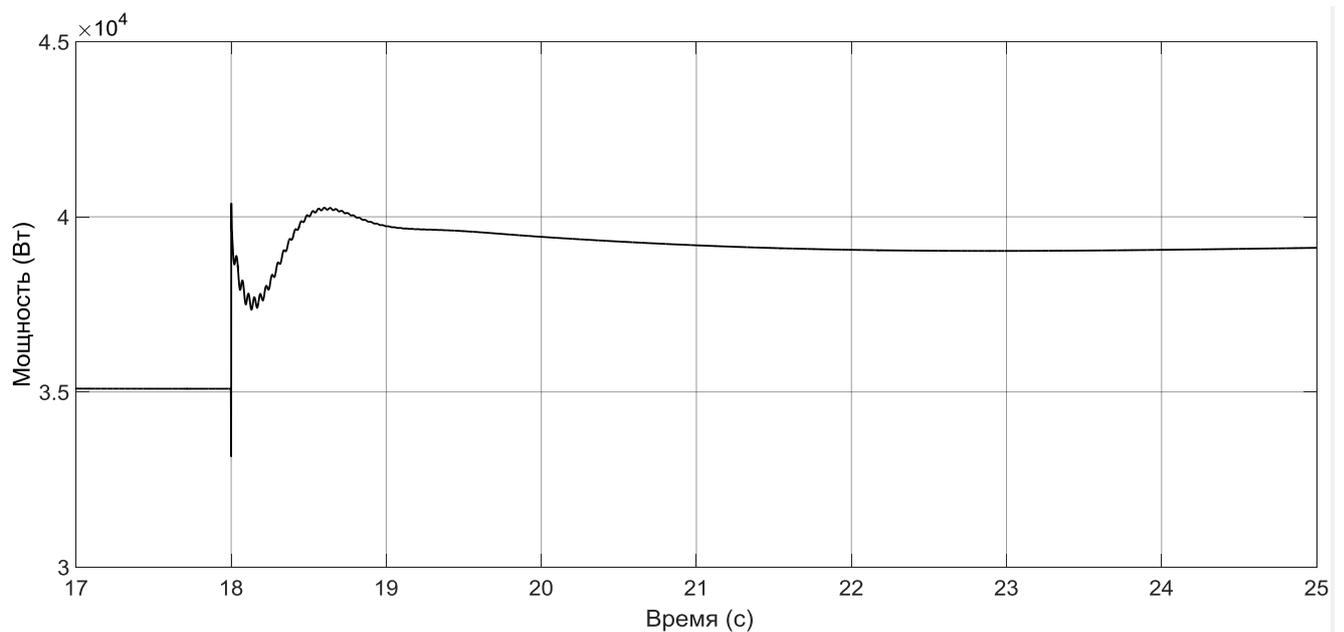
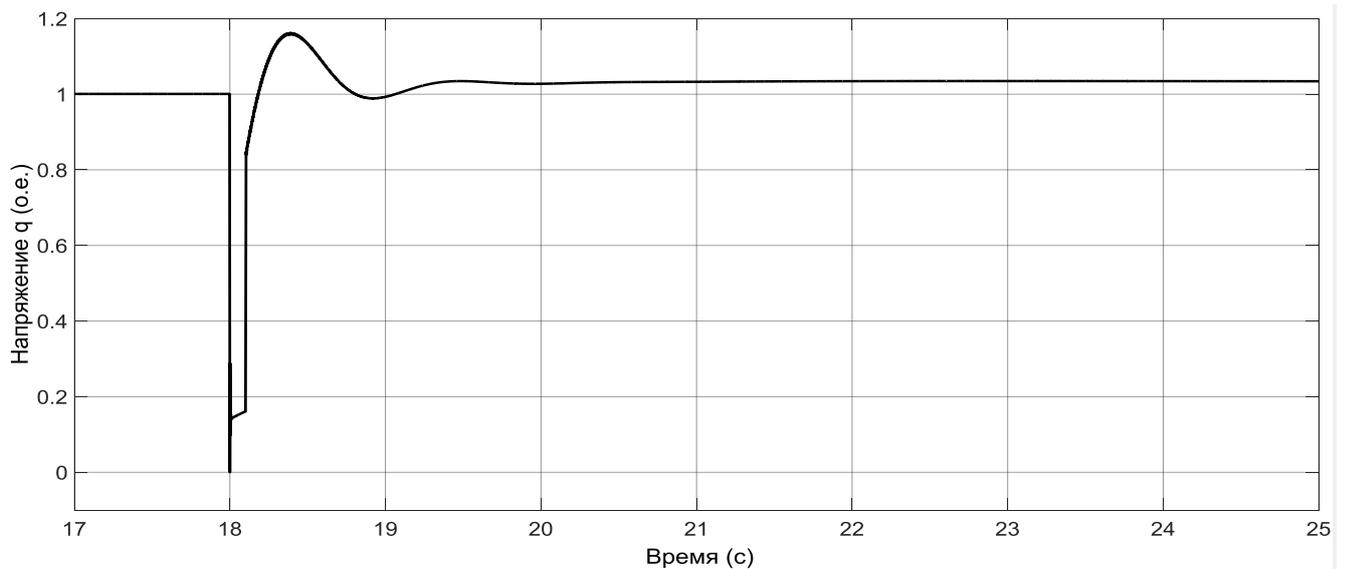


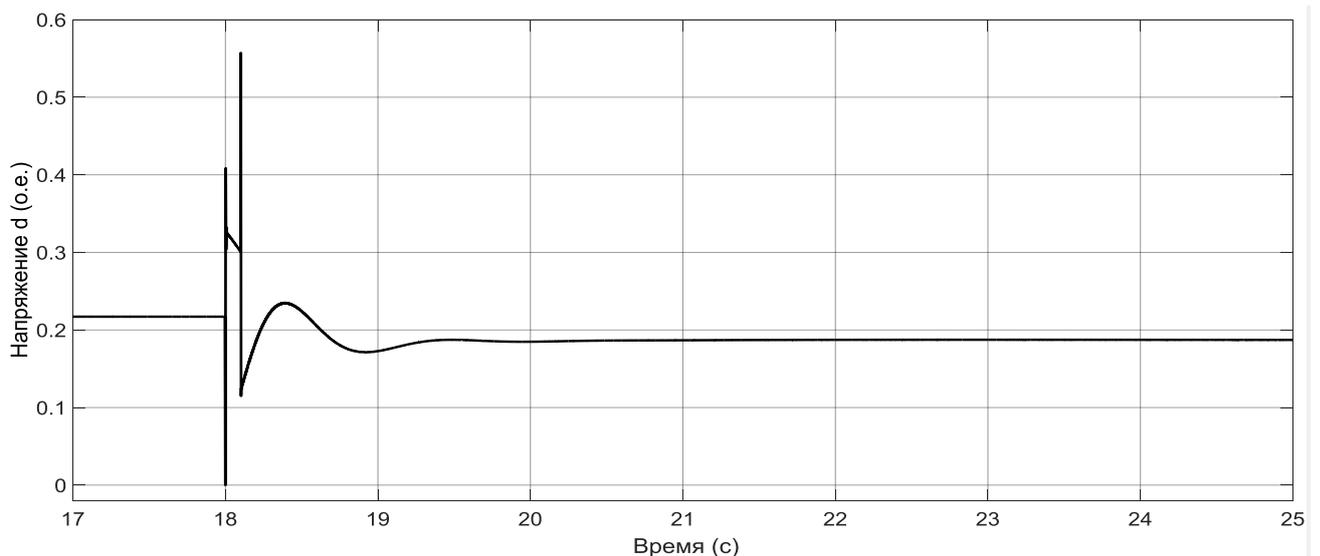
Рисунок 4.10 – Осциллограмма мощности в АЭС

### 4.3 Переходные процессы в автономной электроэнергетической системе при коротком замыкании в ней с использованием электромагнитного вариатора

Наиболее тяжелым режимом считается трехфазное КЗ. В период КЗ наблюдаются снижение напряжения. Возможности магнитного вариатора, также предполагает использование алгоритма стабилизации скорости в режиме КЗ [88]. На рисунке 4.11 отображены осциллограммы напряжений по осям  $d$  и  $q$ .



а



б

Рисунок 4.11 – Осциллограмма напряжений при удаленном коротком замыкании:

а – по оси  $q$ ; б – по оси  $d$

На рисунке 4.12 представлена осциллограмма скорости при удалённом трехфазном КЗ.

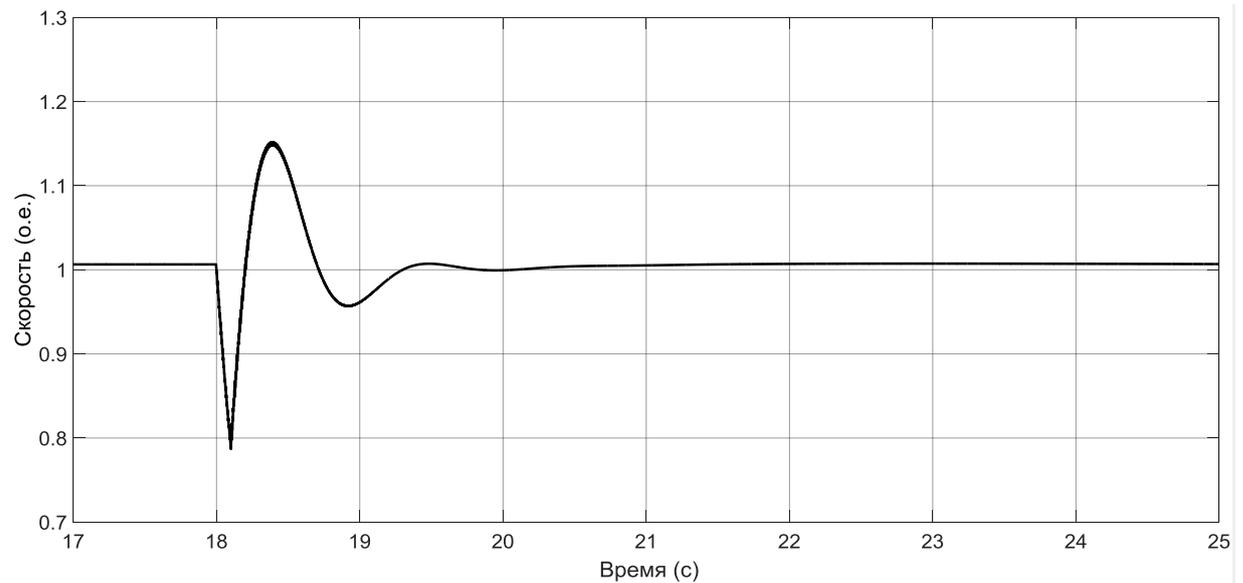
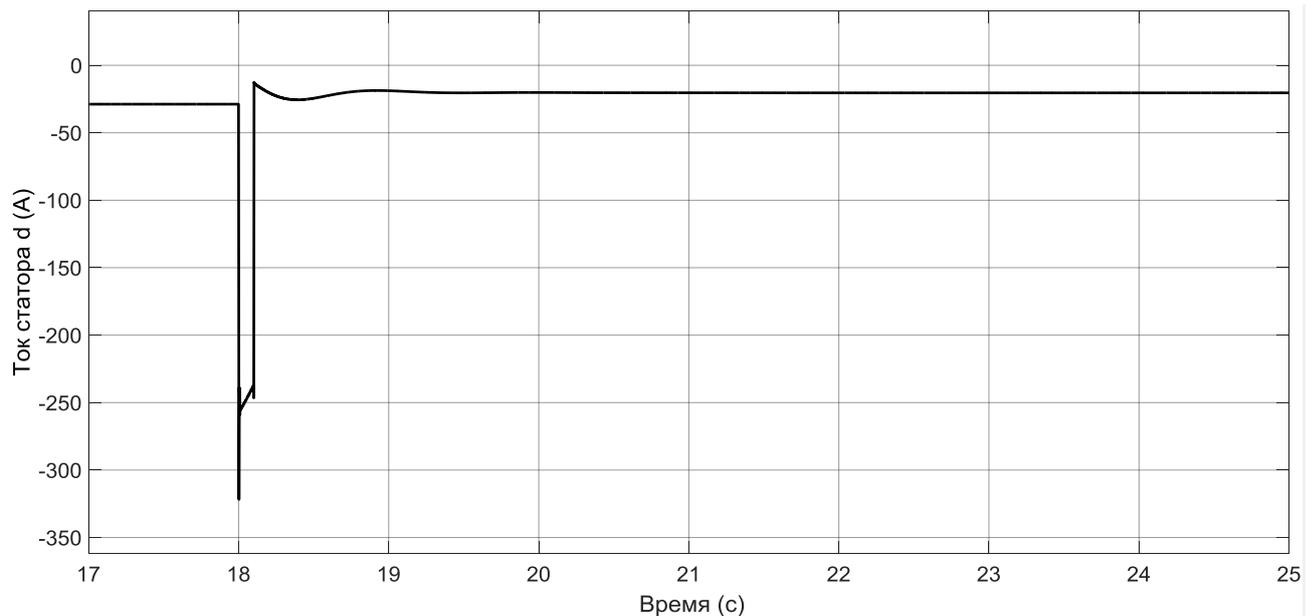
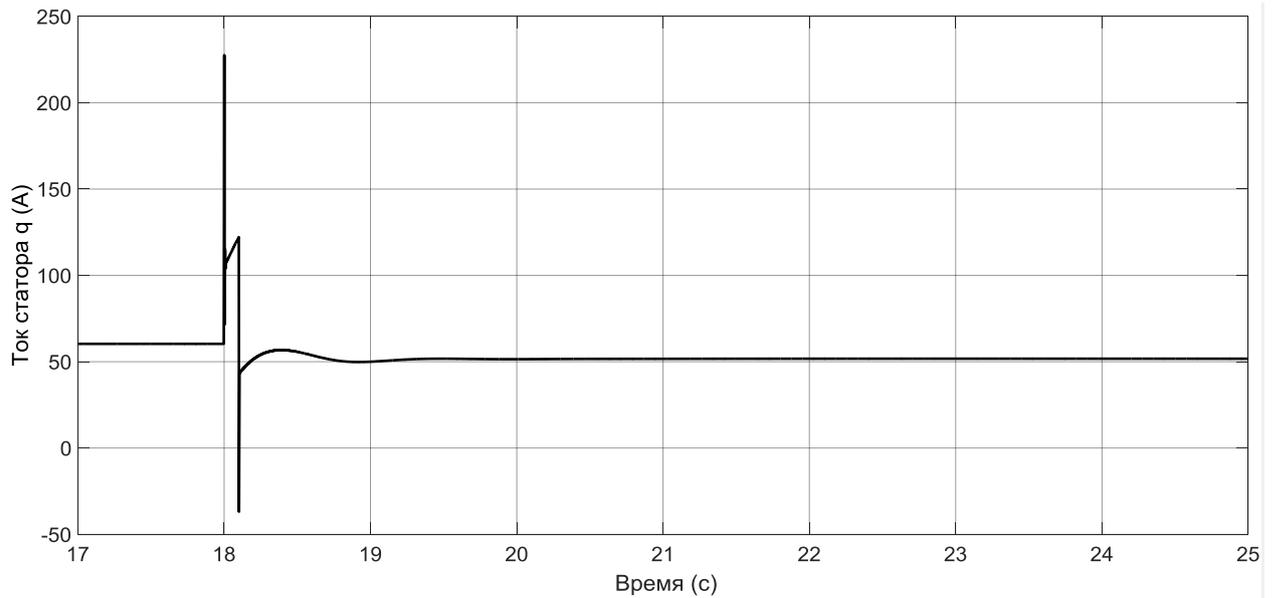


Рисунок 4.12 – Осциллограмма скорости вращения ротора генератора при удалённом трехфазном КЗ

На рисунках 4.13 отображены осциллограммы тока при КЗ в осях  $d$  и  $q$ . Отмечается увеличение амплитуды тока при КЗ. После ликвидации КЗ алгоритм стабилизации скорости формирует управляющее воздействие, обеспечивающее возвращение синхронной скорости вращения после аварий.





б

Рисунок 4.13 – Сравнительная осциллограмма тока:

а – по оси  $d$ ; б – по оси  $q$ 

Рисунок 4.14 отображает осциллограммы фазного положения ротора генератора в случае использования алгоритма стабилизации скорости вращения магнитным вариатором. При коротком замыкании наблюдается торможение ротора, которое приводит к возникновению трех проворотов ротора генератора. В случае использования алгоритма стабилизации скорости вращения ротора в момент короткого замыкания, происходит три поворота.

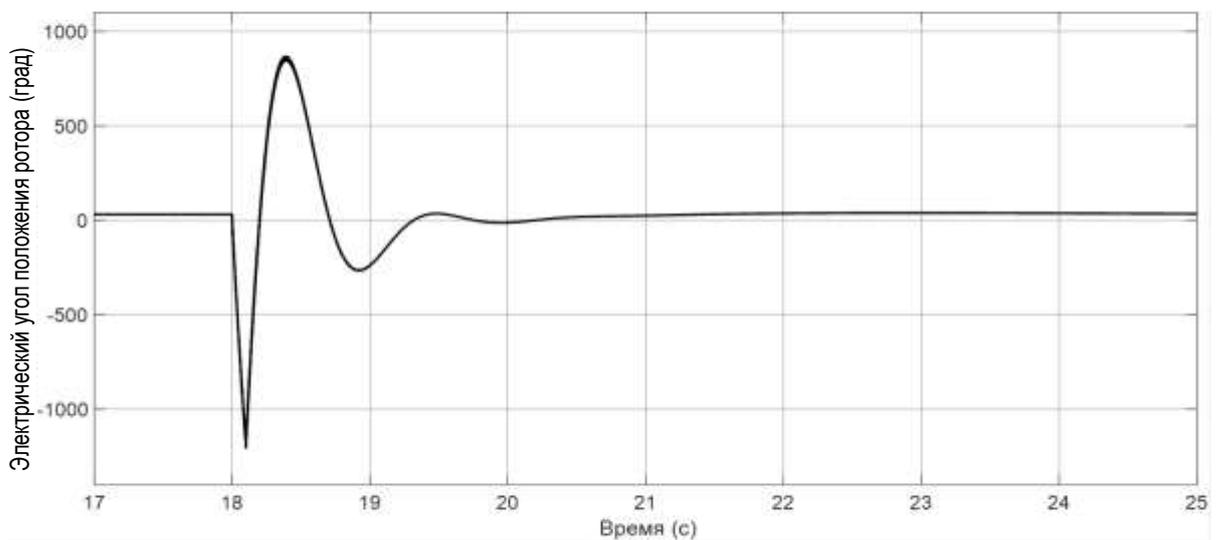


Рисунок 4.14 – Осциллограмма электрического угла положения ротора генераторов

На рисунке 4.15 представлена осциллограмма мощности при КЗ, отметим, что при устранении КЗ, обеспечивается результирующая устойчивость АЭС.

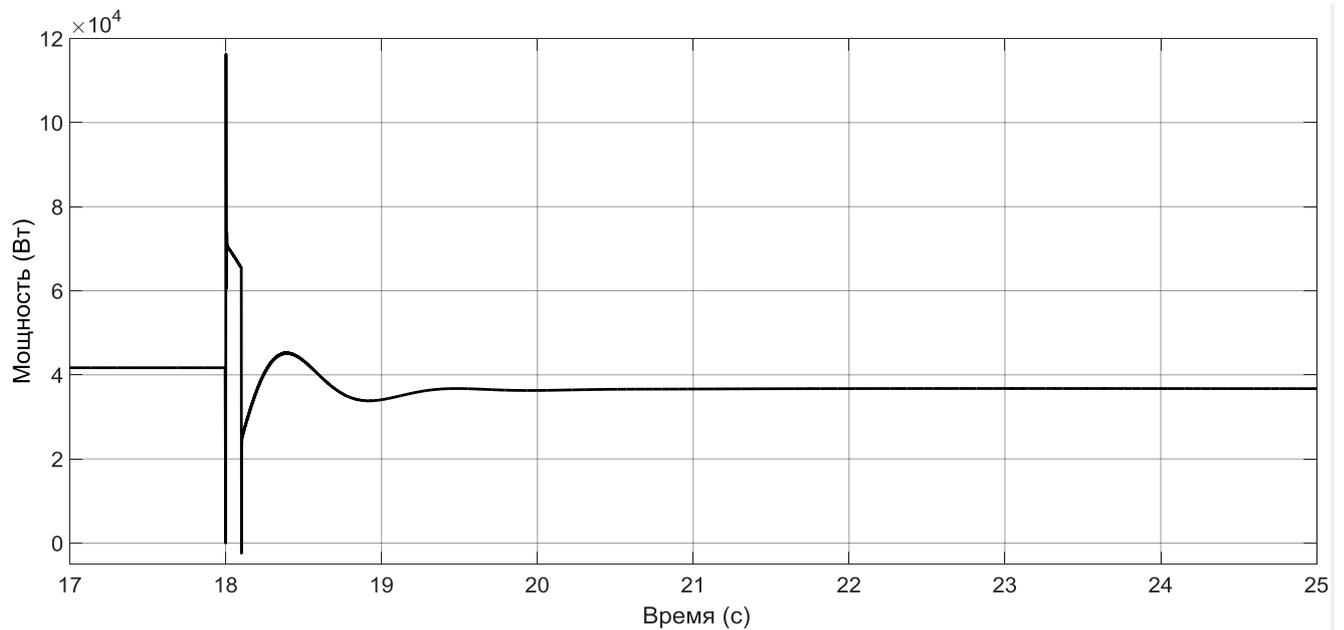


Рисунок 4.15 – Осциллограмма мощности при КЗ в АЭС

Проведенные исследования относятся к энергетическим системам с преимущественно активной нагрузкой. СГПМ являются источниками реактивной мощности, безусловно, необходимость в обеспечении реактивной мощности. Далее представим исследования при изменении активной и реактивной мощности нагрузки при реализации возмущающих воздействий, проведённых выше. На рисунке 4.21 представлена система электроснабжения, состоящая из двух ВЭУ и нагрузки, содержащую комплексную нагрузку.

Приведенные выше исследования, относятся к анализу переходных процессов энергетических систем однородному по составу генерирующих ВЭУ. Безусловно, электроэнергетические системы, состоящие только из ВЭУ, однородных по типу и значению моментов инерции роторов электрических генераторов, не могут получить распространения, так как стохастический характер выработки электрической энергии и потребления меняется.



На рисунке 4.17 отображена модель, выполненная в программе *Matlab Simulink*. Модель генератора дизельной станции представлена синхронной машиной с регулятором скорости турбины. Отметим, что рисунок 4.17 отображает магнитный вариатор ВЭУ с использованием только алгоритма стабилизации скорости вращения. В случае разнородных по природе происхождения источников электрической энергии, использование алгоритма стабилизации скорости вращения магнитного вариатора со стороны электрического генератора, по причине разной постоянной времени механической инерции, наблюдаются асинхронные режимы при резких изменениях нагрузок в АЭС.

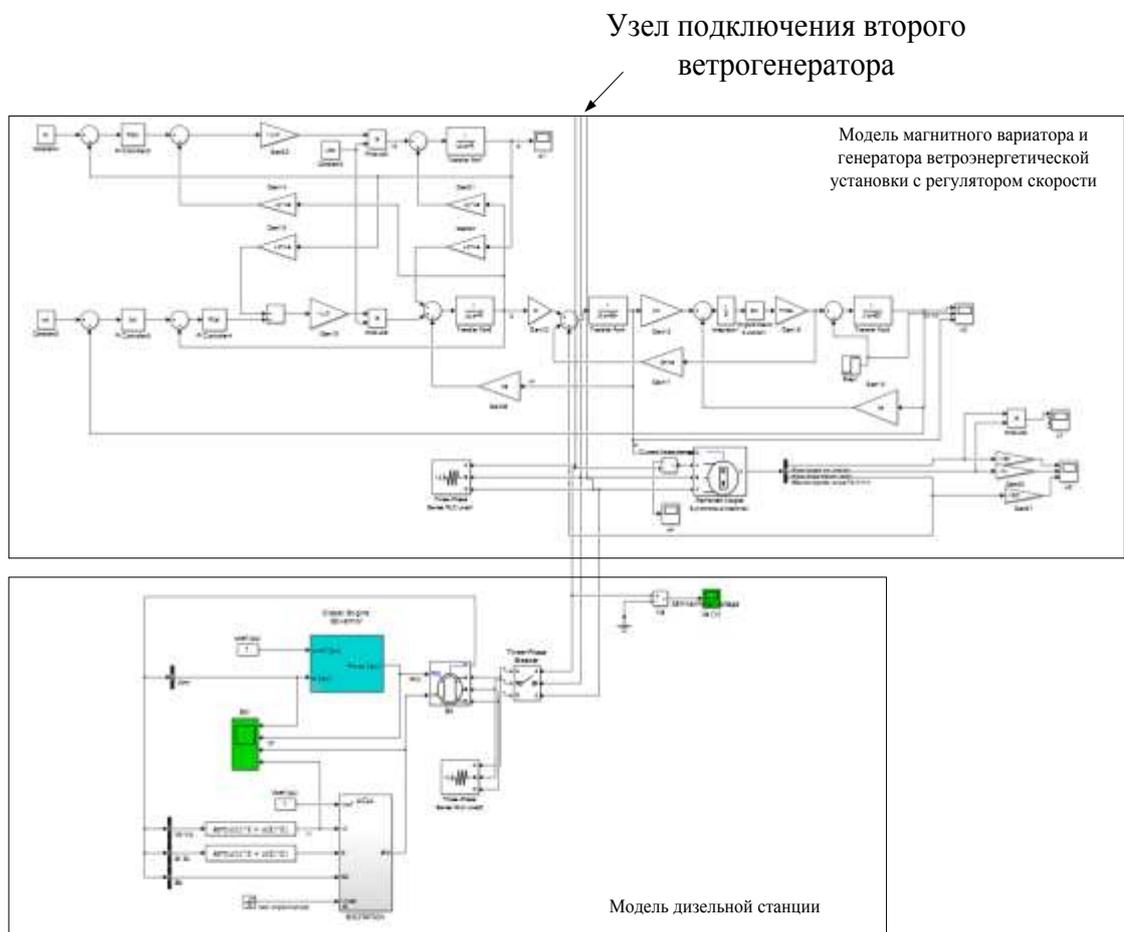


Рисунок 4.17 – Модель автономной энергетической системы, состоящей из дизельной станции и ВЭУ на базе магнитного вариатора

При формировании ведущей станции со стороны синхронного генератора дизельной станции и реализации алгоритма фазной коррекции на ВЭУ были проведены исследования. На рисунке 4.18 изображена осциллограмма скорости при резком уменьшении нагрузки на 20%. При изменении мощности наблюдается увеличение скорости. После переходного процесса, длившегося 5,5 сек восстановился синхронный режим работы АЭС.

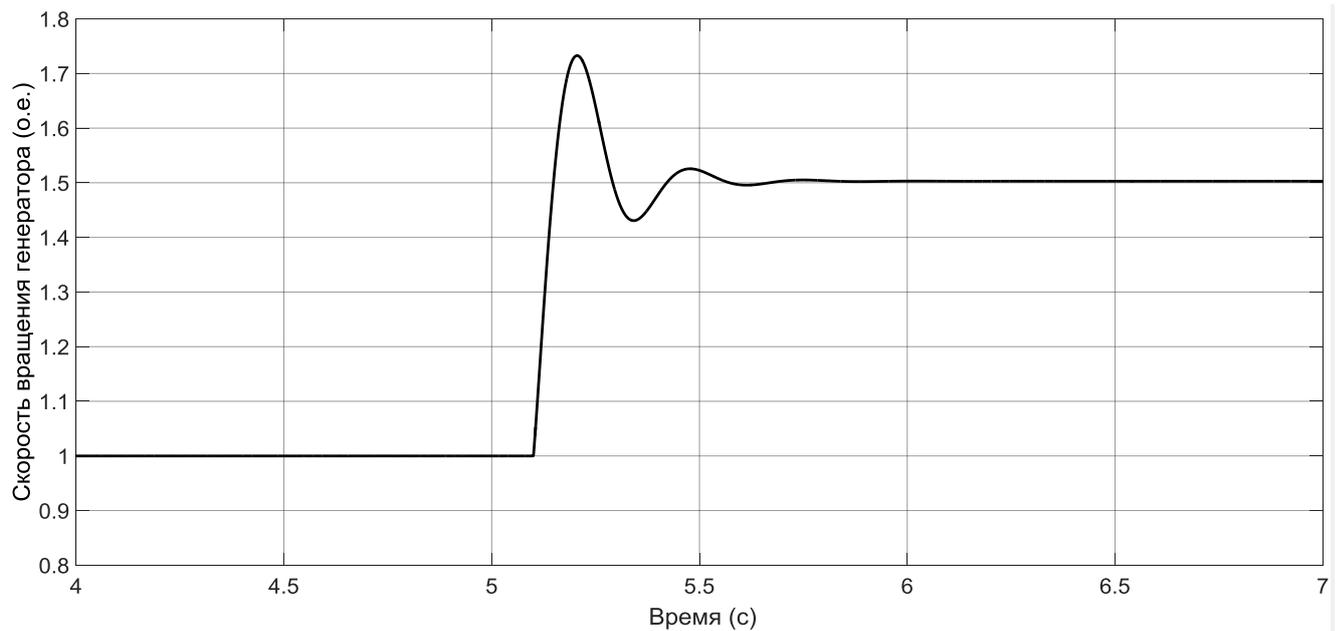


Рисунок 4.18 – Осциллограмма скорости вращения при резком снижении нагрузки

На рисунке 4.19 изображена фазовая осциллограмма переходного процесса, которая сопровождается дальнейшей стабилизацией фазы по углу синхронного генератора ведущей станции, которой является дизельный генератор на базе синхронного генератора с постоянными магнитами, мощностью 65 кВт и 35 кВт ВЭУ с магнитным вариатором. Отметим, что на 5,8 сек. угол стабилизируется на значении 58 град.

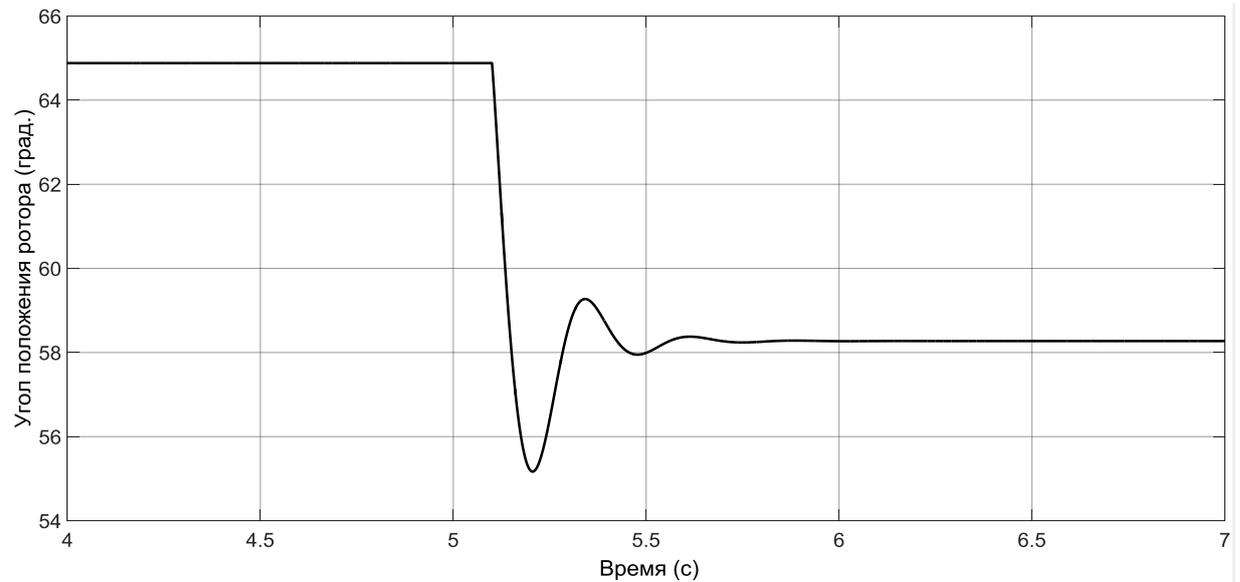
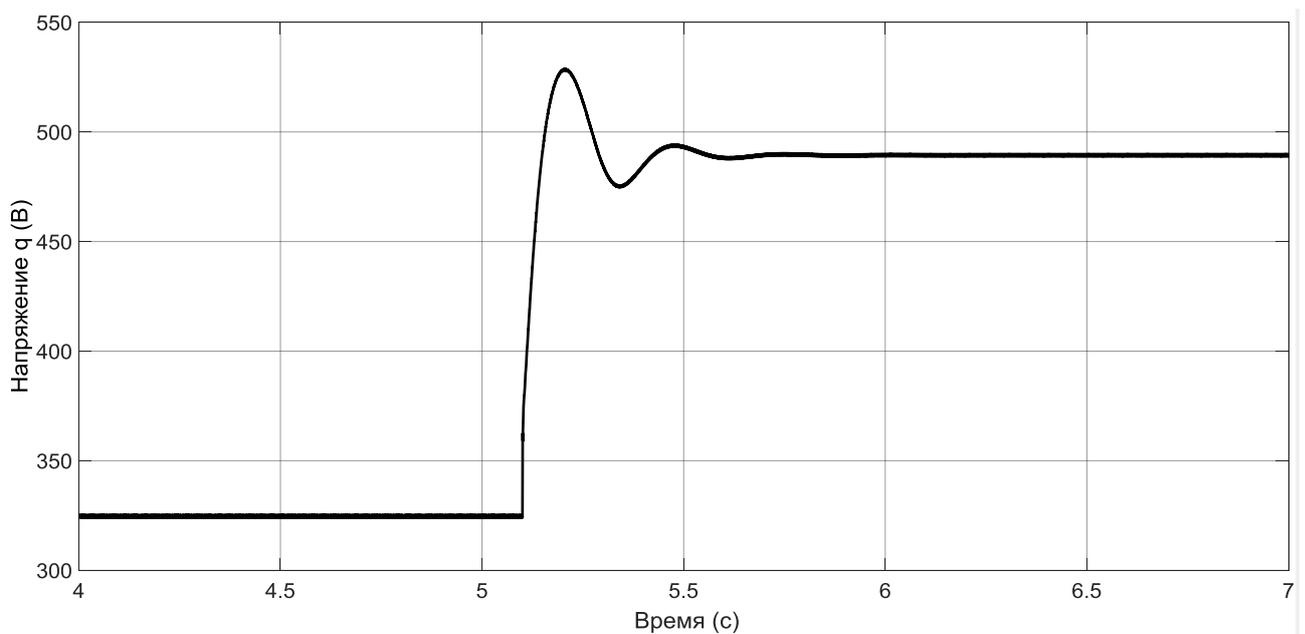
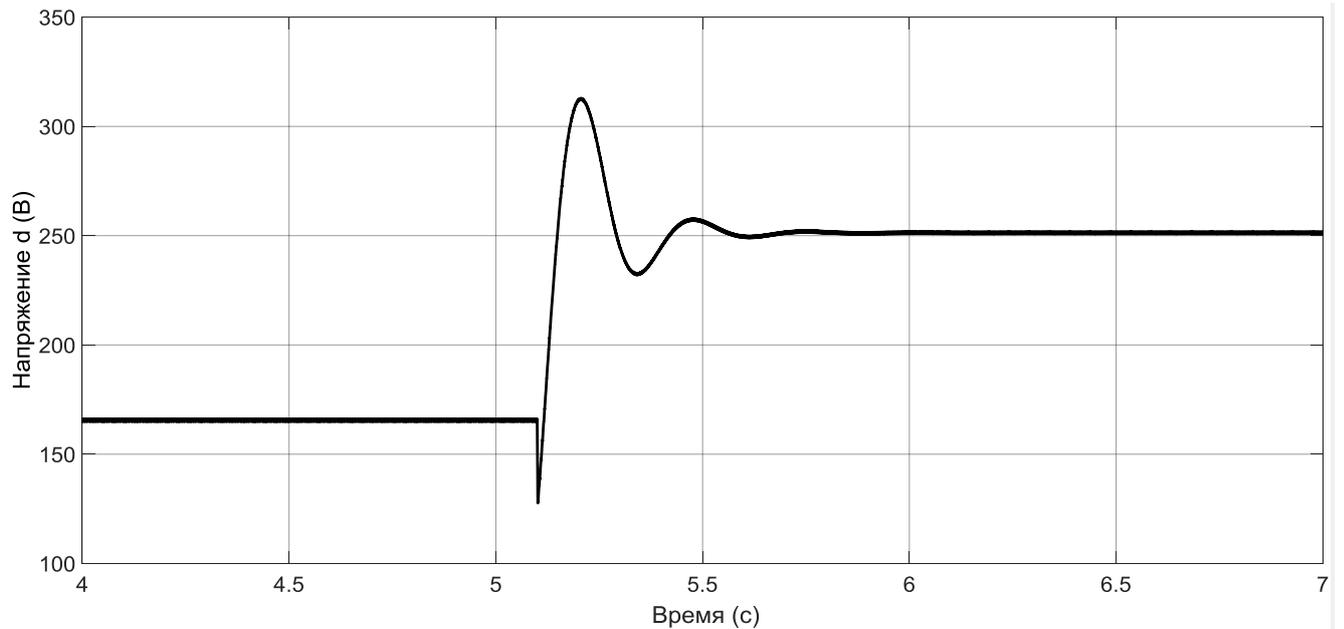


Рисунок 4.19 – Осциллограмма электрического угла положения ротора при резком сбросе нагрузки

На рисунке 4.20 изображены осциллограммы напряжения на выходе генератора при переходном процессе в АЭС, состоящей из ВЭУ и дизельной станции на базе СГПМ. Отметим, что по оси  $d$  и  $q$  происходит снижение напряжения вследствие снижения скорости СГПМ.



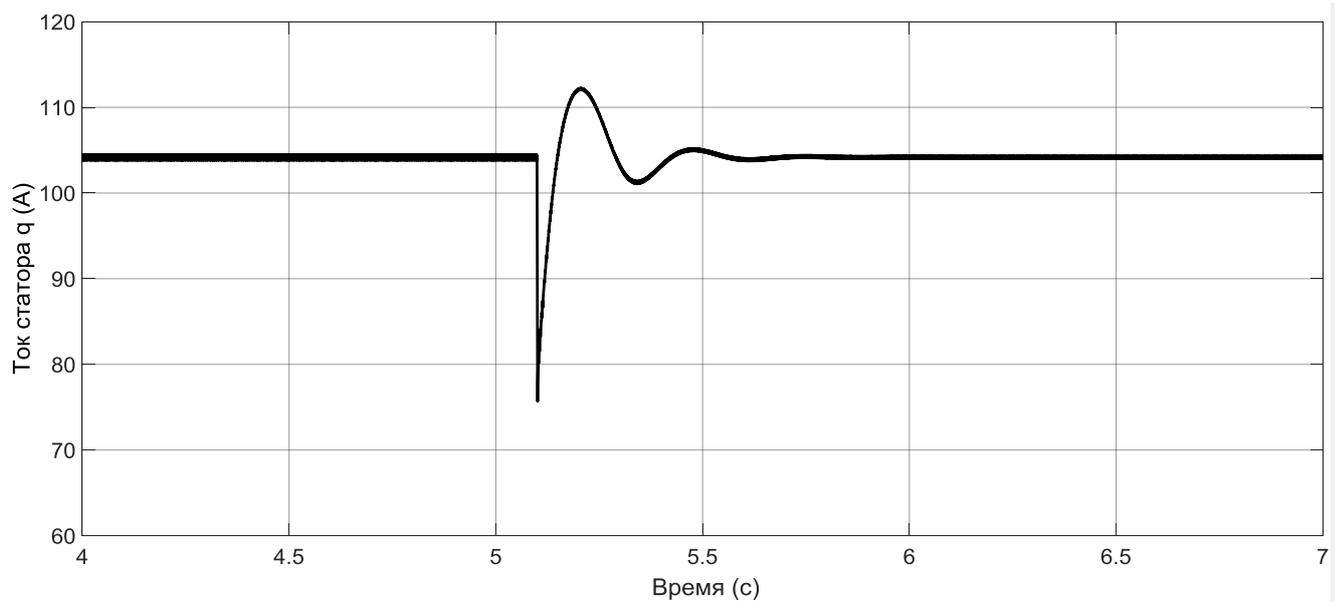
а



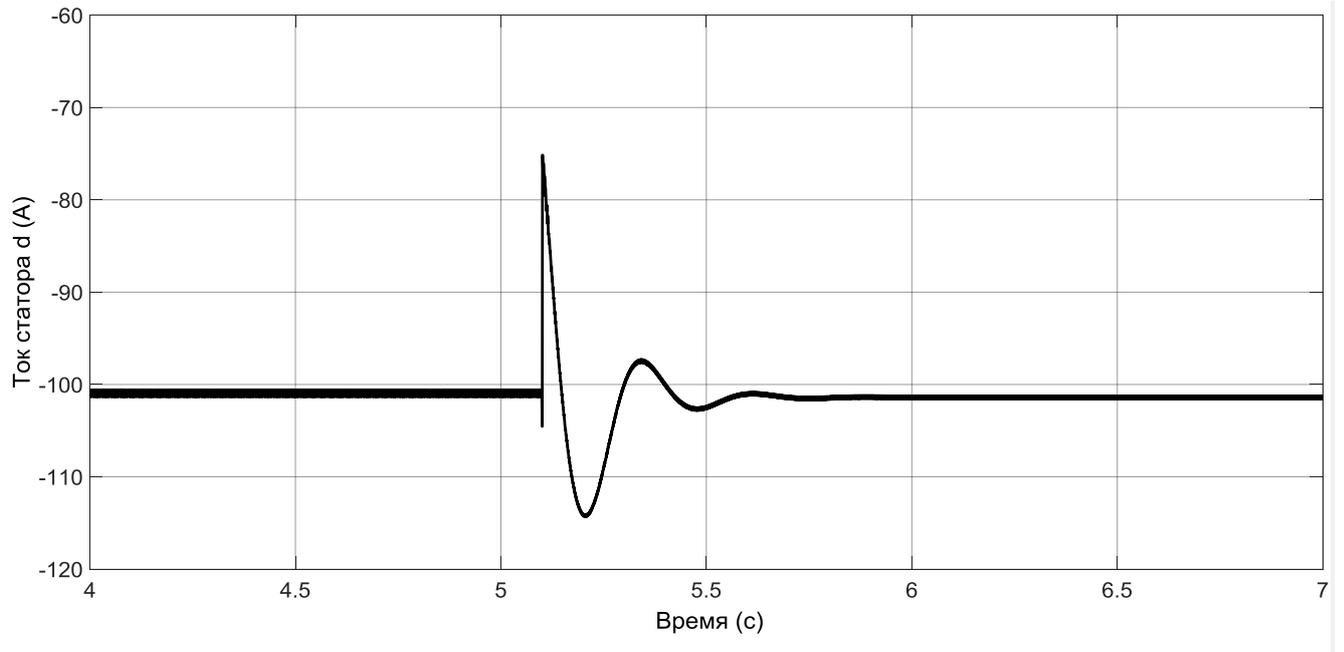
б

Рисунок 4.20 – Осциллограмма напряжения на выходе генератора:  
а – по оси  $q$ ; б – по оси  $d$

На рисунке 4.21 изображены осциллограммы токов по осям  $d$  и  $q$  на выходе генератора одного из СГПМ. Также, отмечаем снижение тока без проявлений асинхронного режима.



а



б

Рисунок 4.21 – Осциллограмма тока на выходе генератора при переходном процессе:

а – по оси  $q$ ; б – по оси  $d$

#### **4.5 Согласование скорости вращения роторов генераторов ветроэнергетических установок, имеющие разные постоянные времени механической инерции**

На рисунке 4.22 изображена АЭС, состоящая из однородного по составу источников электрической энергии, но различной по постоянному времени механической инерции. Рассмотрим особенности построения алгоритма фазового согласования угла нагрузки. Отметим следующее, что ведущей станцией будет ВЭУ с большей постоянной времени механической инерции.

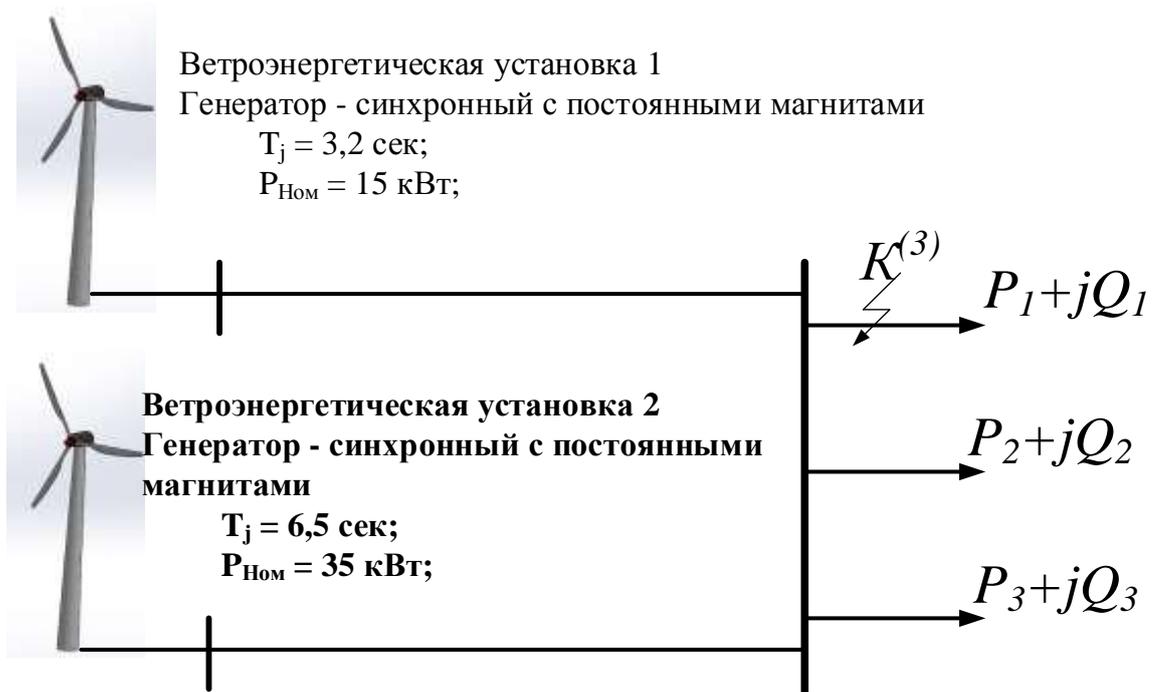


Рисунок 4.22 – Структурная схема исследуемой автономной энергосистемы состоящей из двух ВЭУ однородных по параметрам электрических генераторов и турбины

В случае использования алгоритма фазовой компенсации углового положения ротора СГПМ ВЭУ магнитным вариатором по ведущей дизельной станции в АЭС не выявляет асинхронный режим при изменении нагрузки в автономной энергетической системе.

На рисунке 4.23 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.

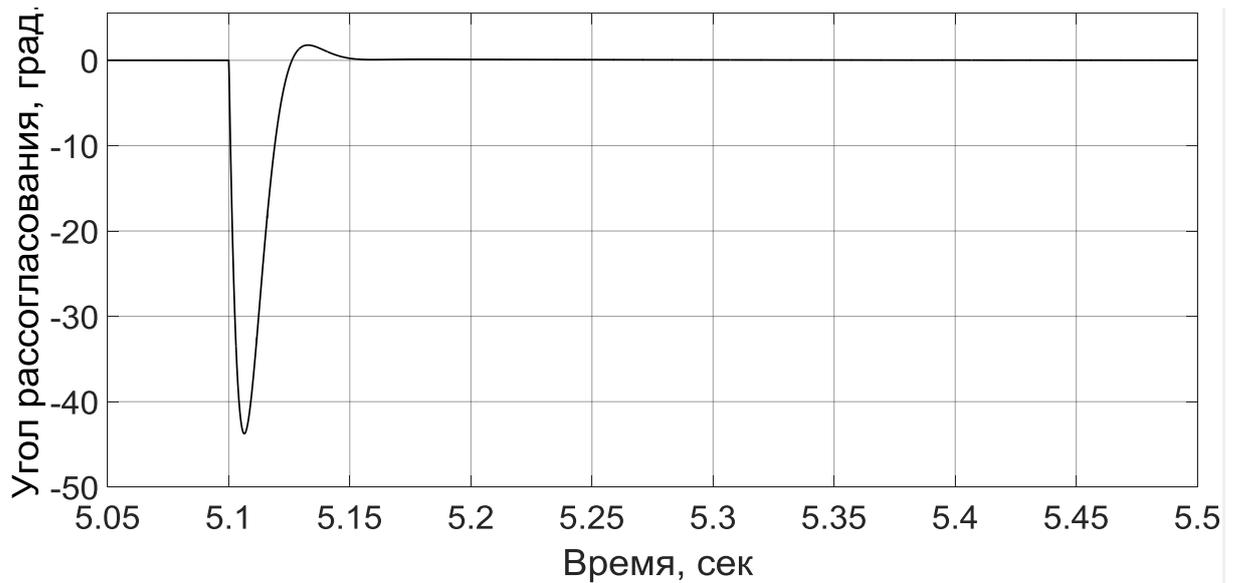


Рисунок 4.23 – Осциллограмма приведенного угла дополнительного рассогласования электромагнитного вариатора

На рисунке 4.24 изображена осциллограмма приведенного рассогласования быстроходного и тихоходного роторов вращения электромагнитного вариатора. Как видно из осциллограммы, происходит незначительное изменение скорости, которое впоследствии устраняется до нуля. Это изменение скорости, которое формирует согласование фазы ведомого генератора ВЭУ с ведущим генератором в АЭС.

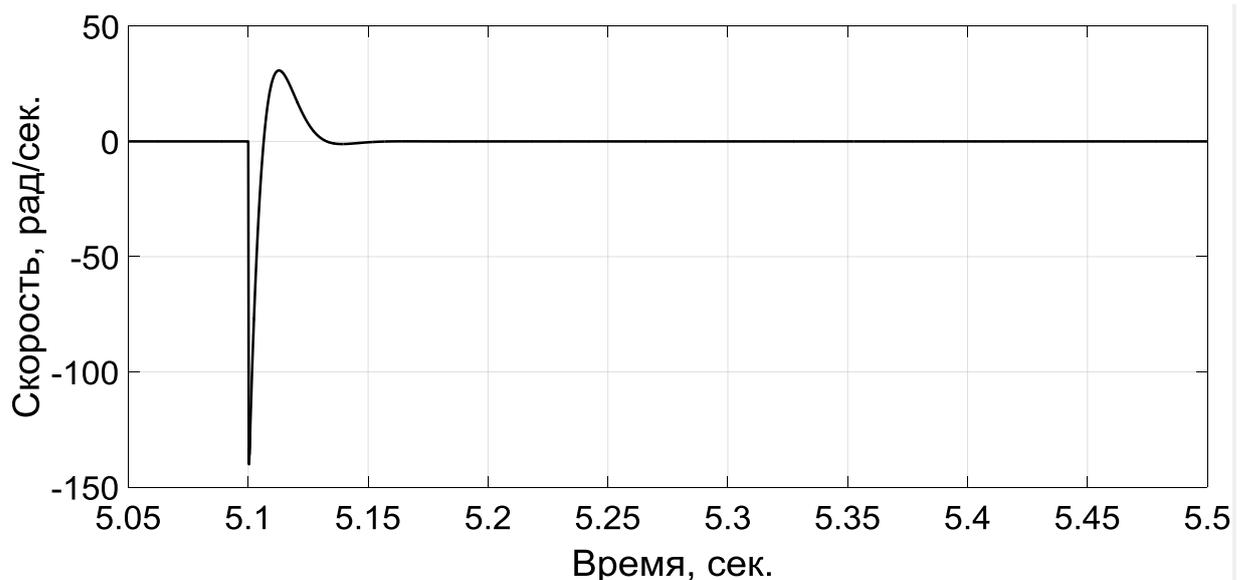


Рисунок 4.24 – Осциллограмма приведенного рассогласования скорости вращения быстроходного и тихоходного роторов электромагнитного вариатора

На рисунке 4.25 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 спадает в два раза, и, после установления нового фазового положения спадает до нуля через 100 мс.

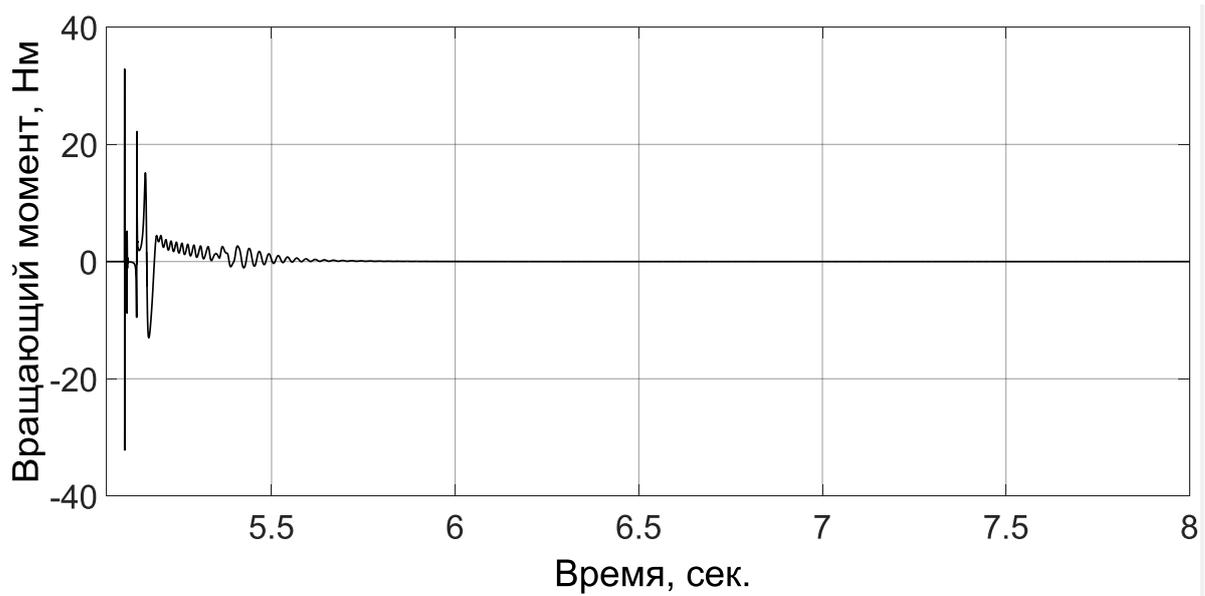


Рисунок 4.25 – Осциллограмма дополнительного вращающего момента электромагнитного вариатора при возникновении возмущающего воздействия в АЭС

Исследования, представленные в данной главе, посвящены проблеме повышения динамической устойчивости АЭС, состоящей из ВЭУ, а также с дизельной станцией. Были представлены два алгоритма для разного состава источников электрической энергии.

Алгоритм стабилизации скорости вращения электрических генераторов магнитным вариатором позволяет обеспечить стабилизацию частоты вращения параллельно работающих ВЭУ в автономной энергетической системе. Исследования показали, что в автономной энергетической системе, состоящей только из однородных по составу и природе происхождения источников

электрической энергии с одинаковой постоянной времени механической инерции, не был выявлен асинхронный режим.

При наличии в автономной энергетической системе источников электрической энергии неоднородного по составу и постоянной времени механической инерции, использование алгоритма стабилизации скорости магнитным вариатором со стороны электрического генератора недостаточно. Как показывают исследования, возникает при определенных условиях изменения мощности энергетической системы асинхронный режим. В главе представлен алгоритм компенсации фазового рассогласования углов положений роторов генераторов. Были представлены результаты исследований при различных вариантах изменения мощности нагрузки. Отметим, что алгоритмы стабилизация скорости и фазы дополнены инерционным аэродинамическим контуром регулирования для компенсации вращающего момента со стороны электромагнитного вариатора через момент ветроэнергетической турбины в целях снижения нагрузки на накопитель электрической энергии на вариатор, который является быстродействующим контуром. Возможно использование различных видов дополнительных аэродинамических устройств. К таким устройствам можно отнести использование плазменного привода на поверхности лопасти [80].

#### **4.6 Использование электромагнитного вариатора при поддержании синхронной скорости вращения генераторов ветроэнергетических установок при резких изменениях скорости ветра**

Наряду с изменениями в составе нагрузки, возможно условие резкого изменения скорости ветра на каждой ВЭУ. На рисунке 4.26 представлена график скорости ветра на каждой из ВЭУ при рассогласованном его изменении. Отметим, что в первой турбине скорость изменилась от 7 м/с до 15 м/с, второй от 7 м/с до 19 м/с в разный момент времени [102].

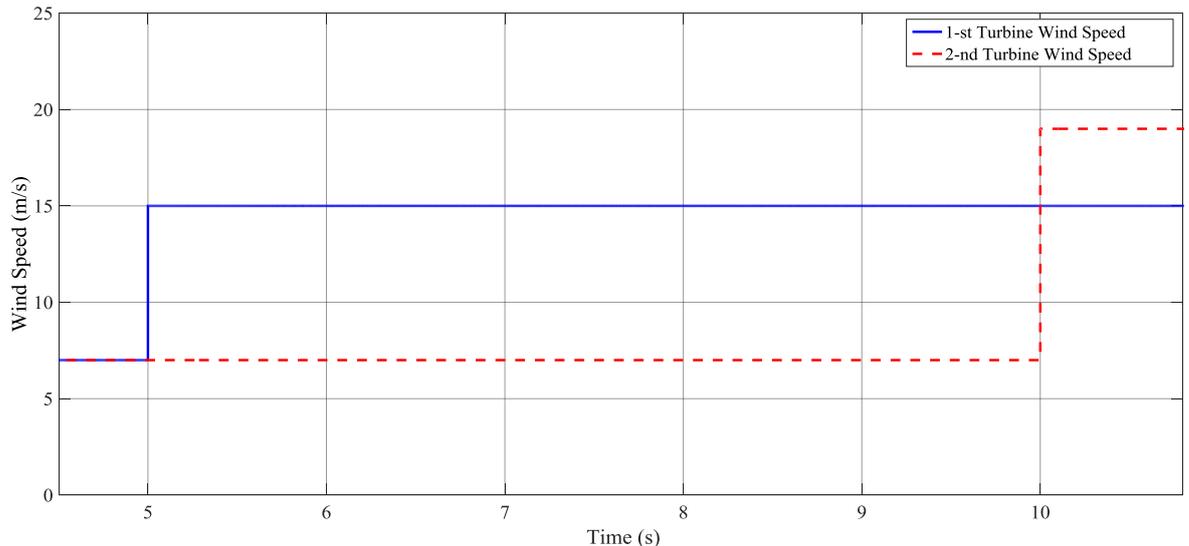
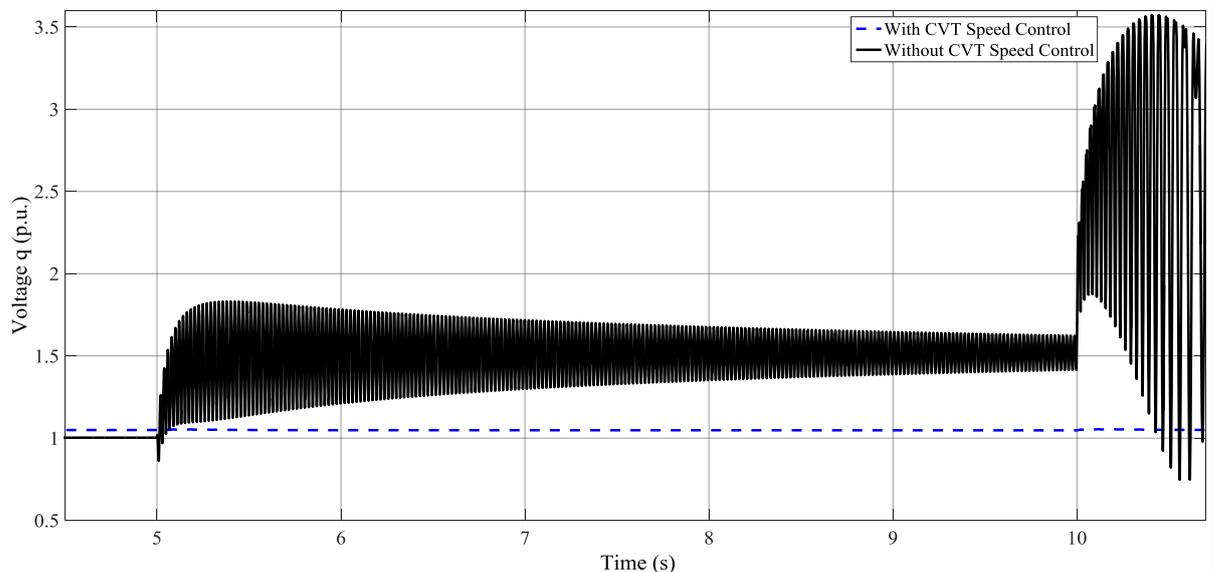
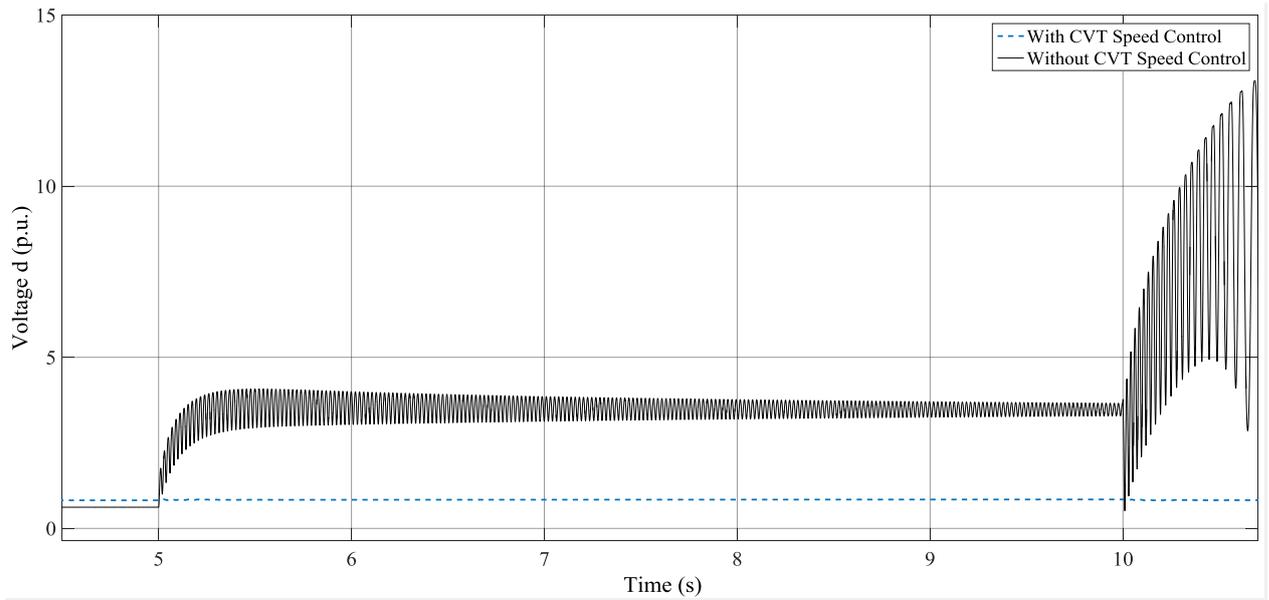


Рисунок 4.26 – График изменения скорости ветра на каждой ВЭУ

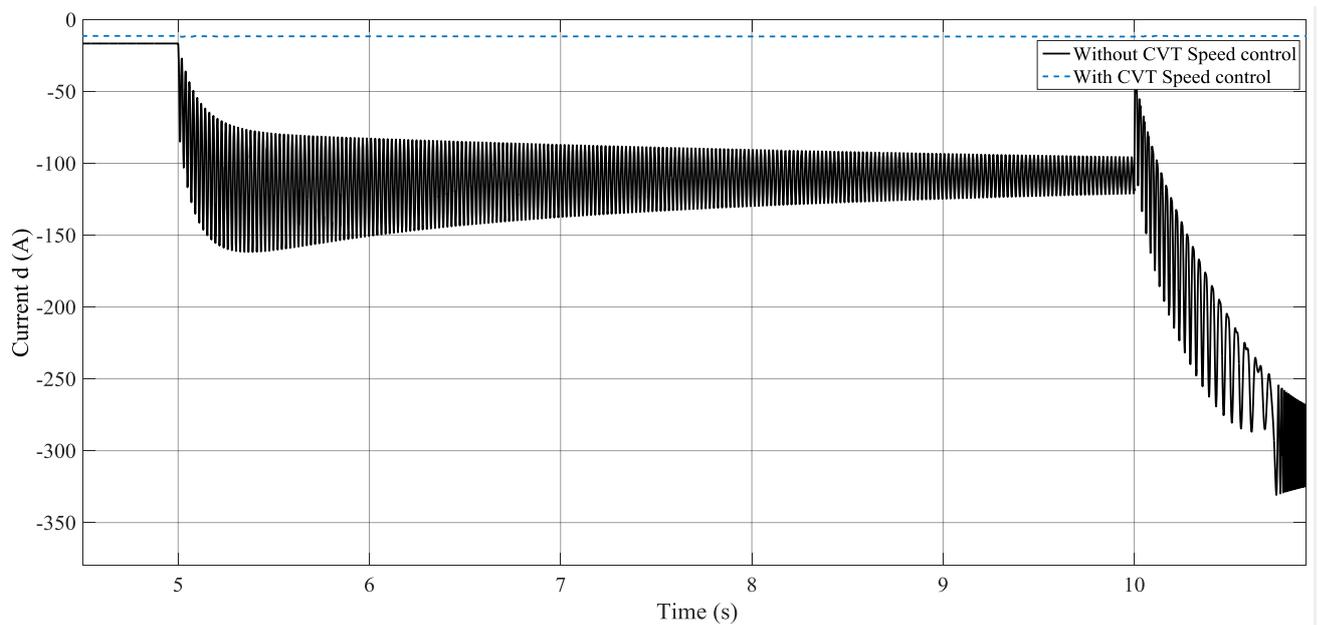
На рисунках 4.27 и 4.28 представлены сравнительные осциллограммы напряжений и тока по оси  $q$  и  $d$  соответственно при изменениях скорости ветра на каждой установке. При отсутствии регулирования скорости генератора при резких изменениях скорости ветра на одной из ВЭУ наблюдается повышение напряжения вследствие увеличения скорости вращения генератора. Однако, при изменении скорости на второй установке наблюдается нарушения синхронной работы генераторов. Отметим, что в случае использования алгоритма стабилизации скорости вращения генератора наблюдается сохранение синхронной скорости параллельно работающим генераторов.



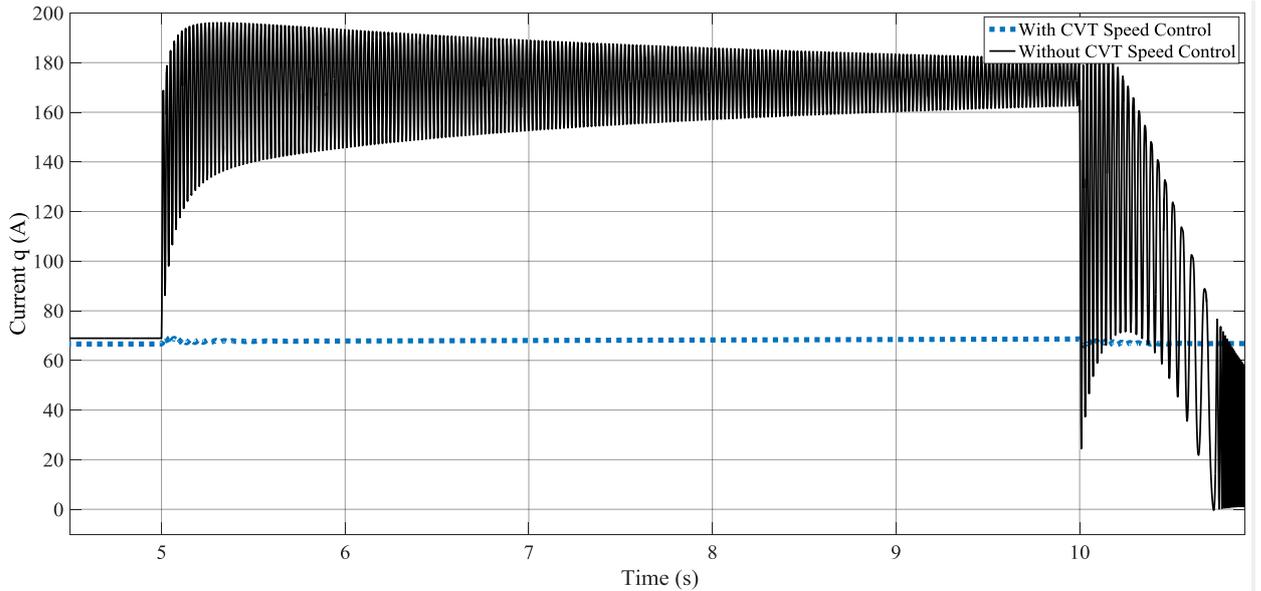


б

Рисунок 4.27 – Осциллограмма напряжения:  
а – по оси  $q$  генератора; б – по оси  $d$  генератора



а



б

Рисунок 4.28 – Осциллограмма тока: а – по оси  $d$ ; б – по оси  $q$

На рисунках 4.29 и 4.30 представлены сравнительные осциллограммы скорости вращения ротора генератора и угла положения ротора при различных изменениях скорости ветра. В реальной ВЭУ не существует систем без регулирования скорости вращения ротора генератора. Поэтому таких режимов не может существовать на практике. Отметим также, что в случае использования алгоритма стабилизации скорости вращения ротора, выпадения из синхронизма не наблюдается.

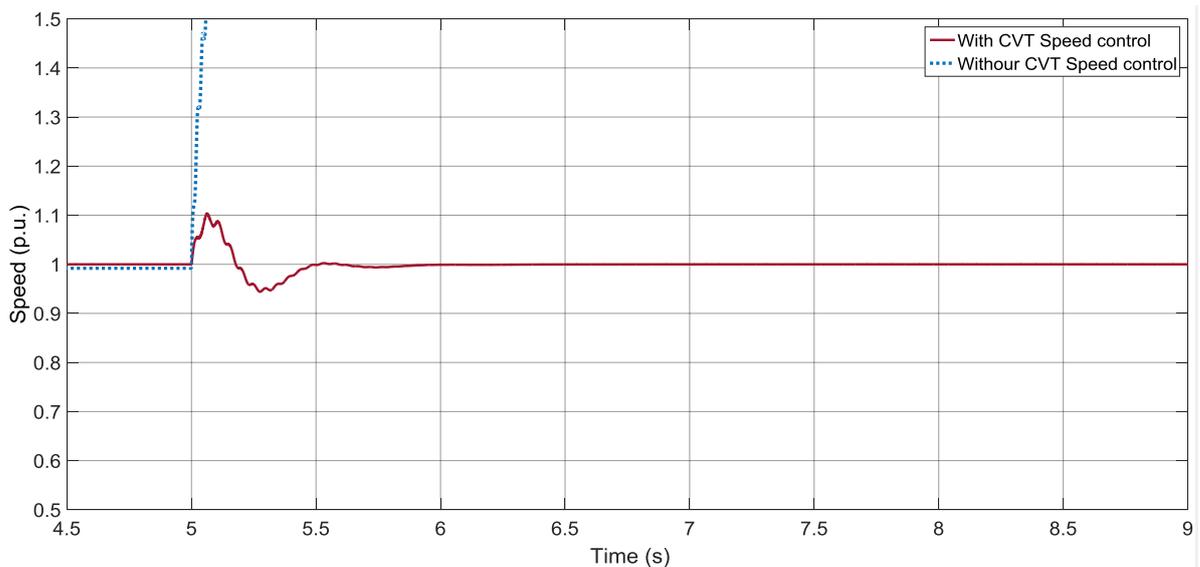


Рисунок 4.29 – Осциллограмма скорости ветроэнергетической установки

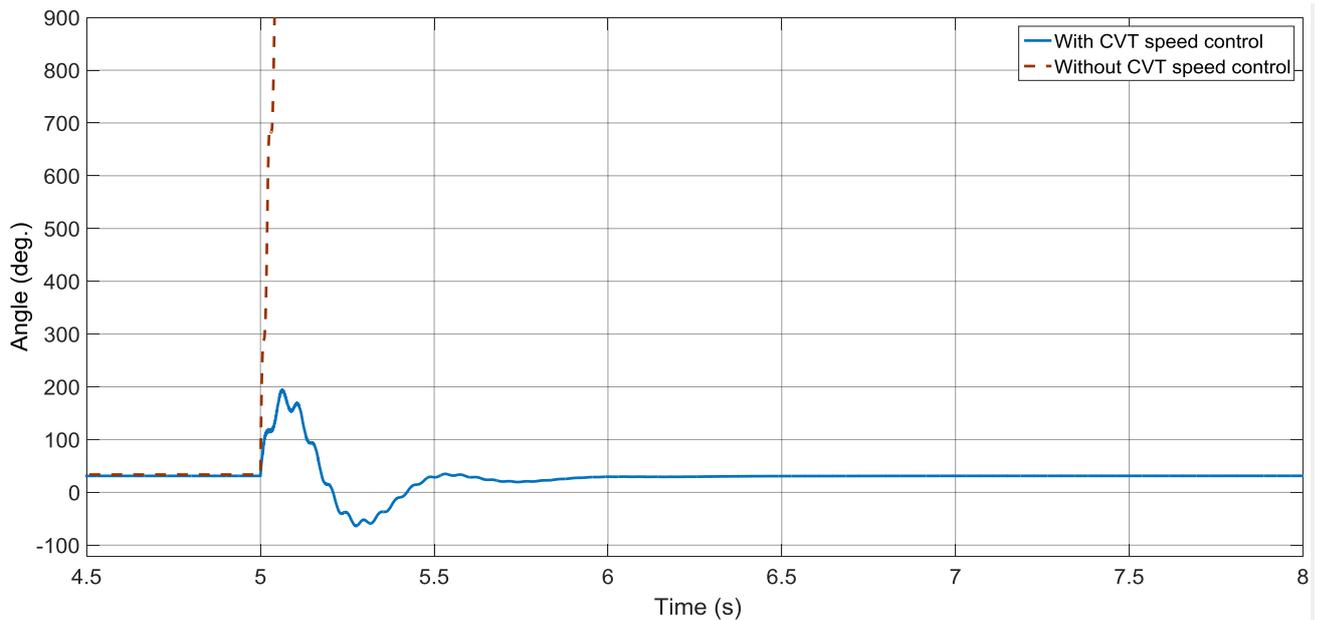


Рисунок 4.30 – Осциллограмма фазового положения ротора генератора

#### 4.7 Выводы

1. Предложена схема, состоящая из магнитного вариатора и системы управления стабилизации скорости вращения его выходного ротора. Это позволило повысить динамическую устойчивость при ЭПП в АЭС на величину мощности магнитного вариатора 20-30%;

2. Численные расчеты при резком изменении нагрузки на 15 % показали восстановление параллельной работы СГПМ через 10 с. Исследован подход к сопряжению генератора ВЭУ и магнитного вариатора в составе с автономной энергетической системы без использования ИН в силовой части цепи;

3. Проведено исследование энергетической системы, состоящей из двух ветрогенераторов с одинаковой постоянной времени механической инерции 6,5 сек. Использование алгоритма стабилизации скорости вращения генератора без ВПТ тока позволило сохранить динамическую устойчивость;

4. Проведены исследования переходных процессов в АЭС, состоящей из разных генераторов с использованием алгоритма фазового согласования по ведущему генератору в АЭС, имеющего наибольший момент инерции. Было

проведено сравнительное исследование в той же энергосистеме, но с использованием алгоритма стабилизации скорости. При использовании только стабилизации скорости наблюдается возникновение колебательных процессов вследствие разности постоянной времени механической инерции. Доказано, что при использовании алгоритма поддержания фазы по ведущему генератору в АЭС, позволило поддерживать синхронную скорость вращения генераторов на заданном уровне при изменении мощности потребления нагрузки;

5. Получены исследования переходных процессов при изменении скорости ветра на каждой из ВЭУ с использованием алгоритма стабилизации скорости. Были созданы возмущающие воздействия с изменением скорости ветра на каждой ВЭУ в разный момент времени с применением только регулирования скорости. Доказано, что использование регулирования скорости в АЭС алгоритм позволил обеспечить синхронную работу. Для сравнения была построена система, содержащая два параллельных СГПМ без средств регулирования скорости. Анализ показал, что при таком варианте наблюдаются колебания и возникновение асинхронного хода, свидетельствующий о потере устойчивости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью диссертационной работы является исследование переходных режимов ветроэнергетических установок с электромагнитными вариаторами в автономной электроэнергетической системе. А также, разработка электромагнитного вариатора и способов управления им, обеспечивающего электромеханическую совместимость параллельной работы генераторов энергоблоков ветроэнергетической станции в составе автономной электроэнергетической системы.

На основе проведенных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований получены следующие результаты:

1. Проведен анализ переходных процессов 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 автономной системе с использованием электромагнитного вариатора на каждой ВЭУ при изменениях скоростей 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;

3. Впервые описано влияние динамических моделей электромагнитного вариатора при различных возмущающих воздействиях со стороны нагрузки на устойчивость автономной системы. Получено математическое описание физического принципа работы и динамики при переходных процессах в АЭС. Модернизировано уравнение параллельной работы электрических генераторов с учетом жёсткости магнитной связи  $K_{em}$  между турбиной и генератором, вносимое электромагнитным вариатором. Доказано наличие приведенного угла

дополнительного рассогласования в электромагнитном вариаторе при возникновении возмущений со стороны генератора.

4. Сформулирован алгоритм комплексного управления электромагнитным вариатором, основанного на принципах построения системы стабилизации скорости вращения ротора синхронного генератора. Создан алгоритм стабилизации скорости вращения электромагнитного вариатора и алгоритм фазовой коррекции при различных возмущающих воздействиях в автономной системе.

5. Получены экспериментальные результаты, доказывающие наличие и влияние на момент приведенного угла дополнительного рассогласования при формировании добавочного момента со стороны генератора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортов В. Е., Попель О. С. Возобновляемая энергетика в современном мире. Москва, Издательский дом МЭИ. 2015 –447 с.
2. Яндульский А.С., Марченко А.А., Нестерко А.Б. Оценка динамических характеристик многомашинных электроэнергетических систем на основе данных системы мониторинга переходных режимов // Научные труды Винницкого национального технического университета. – 2014. – № 4. – С. 1–9.
3. Беляев А.Н. Повышение динамической устойчивости автономных энергосистем нефтегазодобывающих комплексов на основе электрического торможения//Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2008. – № 63. – С. 163–169.
4. Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи / Абрамович Б.Н. и др. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 17–25.
5. Абрамович, Б. Н., Сычев, Ю. А., Устинов, Д. А., Шклярский, А. Я. Активная компенсация провалов и искажений напряжения в системах электроснабжения нефтедобывающих предприятий //Промышленная энергетика. – 2012. – №. 4. – С. 23-25.
6. Кондрашова, Ю. Н., Газизова, О. В., Турищев, А. Ю., Нуждин, А. В. Исследование влияния учета характерных групп электроприемников на устойчивость при больших возмущениях источников собственной генерации //АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2017. – С. 123-126.
7. Сагадатов, Т. Р., Газизова, О. В., Кондрашова, Ю. Н., & Малафеев, А. В. Исследование результирующей устойчивости синхронных двигателей при выходе электростанции с нагрузкой на отдельную с энергосистемой работу и последующей ресинхронизацией //АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2017. – С. 144-147.

8. Ling Y. The fault ride through technologies for doubly fed induction generator wind turbines // *Wind Engineering*. – 2016. – Т. 40. – №. 1. – С. 31-49.
9. Hossain M. E. A new approach for transient stability improvement of a grid-connected doubly fed induction generator–based wind generator // *Wind Engineering*. – 2017. – Т. 41. – №. 4. – С. 245-259.
10. Aho J. et al. A tutorial of wind turbine control for supporting grid frequency through active power control // *American Control Conference (ACC), 2012*. – IEEE, 2012. – С. 3120-3131.
11. Schkoda R. et al. Hardware-in-the-Loop Testing of Utility-Scale Wind Turbine Generators. – National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2016. – №. NREL/TP--5000-64787.
12. Erlich I. et al. Effect of wind turbine output current during faults on grid voltage and the transient stability of wind parks // *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE*. – IEEE, 2009. – С. 1-8.
13. Morren, Johan, Sjoerd WH De Haan, and J. A. Ferreira. «Contribution of DG units to primary frequency control» *European transactions on electrical power* 16.5 (2006): 507-521.
14. Li, J., Yang, Q., Yao, P., Sun, Q., Zhang, Z., Zhang, M., & Yuan, W. (2016). A Novel use of the Hybrid Energy Storage System for Primary Frequency Control in a Microgrid. *Energy Procedia*, 103, pp. 82-87.
15. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
16. Z. Chen, J. M. Guerrero, and F. Blaabjerg, «A review of the state of the art of power electronics for wind turbines» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 8, pp. 1859–1975, Aug. 2009.
17. R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz, and G. Asher, «Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 7, pp. 2776–2798, Jul. 2013.

18. J. Morren and S. W. H. de Haan, «Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip,» *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 2, pp. 435–441, Jun. 2005.

19. C. Wessels, F. Gebhart, and R. W. Fuchs, «Fault ride-through of a DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer during symmetrical and asymmetrical grid faults,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 3, pp. 807–815, Mar. 2011.

20. A. D. Hansen and G. Michalke, «Fault ride-through capability of DFIG wind turbines,» *Renew. Energy*, vol. 32, no. 9, pp. 1594–1610, 2007.

21. G. Pannell, D. J. Atkinson, and B. Zahawi, «Minimum-threshold crowbar for a fault-ride-through grid-code-compliant DFIG wind turbine,» *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 750–759, Sep. 2010.

22. Голов П.В., Шаров Ю.В., Строев В.А. Система математических моделей для расчета переходных процессов в сложных электроэнергетических системах // *Электричество*. – 2007. – № 5. – С. 2–11.

23. Бушуев В. В., Лизалек Н. Н., Новиков Н. Л. Динамические свойства энергообъединений. – М. : Энергоатомиздат, 1995.

24. Криворот А.В. Неоднозначное влияние распределенной генерации на динамическую устойчивость в распределительной сети при тяжелых возмущениях // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики Междунар. науч. семинар им. Руденко Ю.Н. – Иркутск, 2014. – С. 156-163.*

25. Енин В.Н., Степанов А.В. Моделирование переходных процессов и анализ динамической устойчивости синхронных генераторов при воздействии больших возмущений // *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*. – 2012. – № 10. – С. 495–504.

26. Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В. Расчет и анализ динамической устойчивости узлов нагрузки промышленных предприятий с собственными электростанциями // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2006. – № 4. – С. 94–98.

27. Анализ переходных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем составе объекты малой энергетики / О.В. Буланова,

А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов // Промышленная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 22–28.

28. Lukutin B. V. et al. Simulation and optimization of wind and diesel power supply systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Т. 177. – №. 1. – С. 012090.

29. Лукутин Б. В., Суржикова О. А., Шандарова Е. Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении // М.: Энергоатомиздат. – 2008. – С. 283.

30. Лукутин Б. В., Сарсикеев Е. Ж., Шандарова Е. Б. Оценка технико-экономической эффективности использования накопителей электроэнергии в автономной микрогидроэлектростанции // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №. 2-2. – С. 145.

31. Андреюк В. А. Использование абсолютного угла для управления переходными режимами энергосистемы // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2011. – №. 65. – С. 27-42.

32. Андреюк В. А., Асанбаев Ю. А., Сказываева Н. С. Динамическая устойчивость энергосистемы при регулировании мощности турбин генераторов по абсолютному углу // Электрические станции. – 2005. – №. 12. – С. 11-16.

33. Фишов А. Г. и др. Контроль устойчивости режима электроэнергетической системы по данным синхронизированных измерений в генераторных узлах // Оперативное управление в электроэнергетике. Подготовка персонала и поддержание его квалификации. - 2015. - № 2. - с. 43-51.

34. Семендяев Р. Ю., Фишов А. Г. Алгоритм работы автоматики восстановления электроснабжения в сети с распределенной малой генерацией // наука. Технологии. Инновации. – 2016. – С. 60-62.

35. Чебан В. М., Толкацкий Р. А. Использование вращения статора для повышения управляемости электрических машин переменного тока // Электротехника. Энергетика. Машиностроение Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2014. - Ч. 2. Секция "Энергетика". - с. 116-119.

36. Чебан В. М., Толкацкий Р. А. Применение электрических машин двойного вращения в электроэнергетике и электромеханике // *Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. Екатеринбург 22-26 октября 2012: УрФУ, 2012. Т.1. с.687-691.*

37. Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Расчет динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей промышленных предприятий с целью анализа устойчивости систем электроснабжения // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2006. – № 2. – С. 71–75.*

38. Заславец Б.И, Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Ю.Н Ротанова. Представление машин переменного тока в расчетах динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2008. – № 11 (111). – С. 3–10.*

39. Кирпиченкова В.Я. Влияние канала регулирования частоты вращения вала асинхронизированного синхронного электромеханического преобразователя частоты на стохастическую устойчивость межсистемной гибкой связи // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2007. – № 5. – С. 38–43.*

40. База данных Scopus: электронный ресурс – [Режим доступа]: <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic>

41. L. G. Meegahapola, T. Littler, and D. Flynn, «Decoupled-DFIG fault ride-through strategy for enhanced stability performance during grid faults» *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 1, no. 3, pp. 152–162, Oct. 2010.

42. Aho J.P., Kraft L.G. Control of a Wind Turbine with a Magnetic Continuously Variable Transmission for Mitigation of Torque Variations // *Proc. of the 2011 AIAA/ASME Wind Symposium. – USA, Orlando, 2011. – 28 p.*

43. Polinder H. Trends in Wind Turbine Generator Systems // *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics. – 2013 September. – V. 1. – № 3. – pp. 174–185.*

44. Rasmussen P.O. Development of a high-performance magnetic gear. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, vol. 41, no. 3, pp. 764–770.
45. Wang J., Atallah K., Carvley S.D. A magnetic continuously variable transmission device // *Magnetics, IEEE*. – 2011. – T. 47. – № 10. – pp. 2815–2818.
46. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears // *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*. – 2012. – T. 17. – № 2. – pp. 269-278.
47. Bouheraoua M., Wang J., Atallah K. Speed Control for a Pseudo Direct Drive Permanent-Magnet Machine With One Position Sensor on Low-Speed Rotor // *Industry Applications, IEEE Transactions on*. – 2014. – T. 50. – № 6. – pp. 3825-3833.
48. J. Wang and K. Atallah, «Modeling and control of ‘pseudo’ direct-drive brushless permanent magnet machines,» in *Proc. IEEE IEMDC*, 2009, pp. 870–875.
49. Atallah K., Calverley S. D., Howe D. High-performance magnetic gears // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2004. – T. 272. – pp. E1727-E1729.
50. K. Atallah et al. A novel «Pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machine // *Magnetics, IEEE Transactions on*. – 2008. – T. 44. – № 11. – pp. 4349–4352.
51. Atallah K., Wang J. A brushless permanent magnet machine with integrated differential // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2011. – T. 47. – № 10. – pp. 4246-4249.
52. Neuland A.H. Apparatus for transmitting power. US Patent 1171351, Feb. 1916.
53. L. Jian et al. Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies // *Transaction on Magnetics, IEEE*. – 2009. – T. 45. – № 10. – pp. 4526–4529.
54. K. Atallah et al. A novel «Pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machine // *Magnetics, IEEE Transactions on*. – 2008. – T. 44. – № 11. – pp. 4349–4352.
55. Peng S., Fu W.N., Ho S.L. A Novel High Torque-Density Triple-Permanent-Magnet-Excited Magnetic Gear // *Magnetics, IEEE*. – 2014. – T. 50. – № 11. – pp. 1–4.
56. Kobayashi H. et al. Design of axial-flux permanent magnet coreless generator for the multi-megawatts wind turbines // *EWEC2009*. – 2009.
57. Atallah K., Calverley S.D., Howe D. High-performance magnetic gears // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, vol. 272, pp. E1727–E1729.

58. Афанасьев А. А., Ефимов В. В., Никитин В. М. Численное математическое моделирование одноступенчатого магнитного редуктора //Электричество. – 2014. – №. 4. – С. 62-68.
59. Афанасьев А. А. Расчет магнитного мультипликатора //Электричество. – 2013. – №. 9. – С. 42-48.
60. Афанасьев А. А. и др. Стабилизация напряжения и частоты электрогенератора ветроэнергетической установки с помощью магнитного редуктора //Вестник Чувашского университета. – 2017. – №. 1.
61. Enomoto Y. et al. Magnetic gear mechanism: пат. 9385581 США. – 2016.
62. Molokanov O. et al. Dynamic model of coaxial magnetic planetary gear //Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2015 18th International Conference on. – IEEE, 2015. – С. 944-948.
63. Molokanov O. et al. Study on cogging torque in coaxial planetary magnetic gear //Power Electronics Conference (SPEC), IEEE Annual Southern. – IEEE, 2016. – С. 1-5.
64. Molokanov O. et al. Analyses and experimental validation of coaxial magnetic planetary gear //Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), 2014 18th International Symposium on. – IEEE, 2014. – С. 1-4.
65. Dergachev P. A., Kurbatov P. A., Molokanov O. N. A magnetic multiplier with a controllable reduction ratio for wind and small hydroelectric power plants //Russian Electrical Engineering. – 2013. – Т. 84. – №. 4. – С. 206-211.
66. Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 458 с.
67. Ragheb M., Tung M. T. Kinetic energy flywheel energy storage //University of Illinois at Urbana-Champaign: Champaign, IL, USA. – 2013.
68. Альдо В. да Роза. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы. – М.: ИД «Интеллект», МЭИ, 2010. – 704 с.
69. Удалов С.Н., Манусов В.З. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 200 с.

70. Taghizadeh, Mahdi, Mohammad Hoseintabar, and Jawad Faiz. «Frequency control of isolated WT/PV/SOFC/UC network with new control strategy for improving SOFC dynamic response.» *International Transactions on Electrical Energy Systems* (2014).

71. Kouba N. E. L. Y. et al. A novel optimal frequency control strategy for an isolated wind–diesel hybrid system with energy storage devices // *Wind Engineering*, 2016, vol. 40, No. 6, pp. 497-517.

72. Muljadi E., McKenna H. E. Power quality issues in a hybrid power system // *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE. – IEEE, 2001. – T. 2. – C. 773-781.*

73. Muljadi E. et al. Energy storage and reactive power compensator in a large wind farm // *AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. – 2004. – C. 114-123.*

74. Sapsalev A. V. et al. Structural model of a magnetic gearbox // *Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2017 18th International Conference of Young Specialists on. – IEEE, 2017. – C. 568-571.*

75. Montague R. G. Control of drive trains incorporating magnetic gears : Ph.D. thesis. – University of Sheffield, 2011.

76. Dergachev P. A. et al. Analysis of a double-stage magnetic multiplier // *Russian Electrical Engineering. – 2012. – T. 83. – №. 5. – C. 271-277.*

77. Comparative study between mechanical and magnetic planetary gears / E. Gouda et al. // *Magnetics, IEEE. – 2011. – T. 47. – № 2. – pp. 439–450.*

78. Keller J., Guo Y., Sethuraman L. Gearbox reliability collaborative investigation of gearbox motion and high-speed-shaft loads // *Contract. – 2016.*

79. Achitaev A.A., Udalov S.N., Tarbill R.D. Increasing the regulating ability of lift force in the power-limited mode of wind turbines based on plasma technology // *Wind Engineering*, 2017, No. 1, pp. 91-100.

80. Poore R., Lettenmaier T. Alternative Design Study Report: WindPACT Advanced Wind Turbine Drive Train Designs Study; November 1, 2000--February 28, 2002. – National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 2003. – №. NREL/SR-500-33196.

81. Active Load Control Techniques for Wind Turbines: Sandia report sand 2008-4809 / Scott J. Johnson, CP "Case" van Dam and Dale E. Berg. - Prepared by Sandia National lab Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore California 94550. - (Unlimited Release Printed. August 2008).

82. Sapsalev A. V. et al. Structural model of a magnetic coupling //Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2016 17th International Conference of Young Specialists on. – IEEE, 2016. – C. 555-558.

83. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears //IEEE/Asme Transactions on Mechatronics. – 2012. – T. 17. – №. 2. – C. 269-278.

84. Udalov S. N., Achitaev A. A., Pristup A. G., Bochenkov B.M. Improving dynamic stability of a wind turbine using a magnetic continuously variable transmission // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2016. – IEEE, 2016. – pp. 1-4.

85. Udalov S. N., Achitaev A. A., Pristup A. G. Investigations of a magnetic gear for application in wind turbines // Strategic Technology (IFOST), 2016 11th International Forum on. – IEEE, 2016. – pp. 166-171.

86. Udalov S. N., Achitaev A.A., Pristup A.G., Bochenkov B.M. Increase of dynamic stability stoke of autonomous energy system based on wind energy installations under sudden load change // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, vol. 327, No. 8, pp. 89-98, 2016.

87. Udalov S.N., Pristup A.G., Achitaev A.A. Research of magnetic transmission with variable gear ratio in a wind-driven generator for improving dynamic stability stoke. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 123–132.

88. Hinrichsen E. N., Nolan P. J. Dynamics and stability of wind turbine generators //IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1982. – №. 8. – C. 2640-2648.

89. Jafari, Seyyed Hosein, Mahdi Raoofat, and Haidar Samet. "Improving transient stability of double fed induction generator using fuzzy controller." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 24.8 (2014): 1065-1075.

90. K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 2002

91. G. Zhang and J. Furusho, "Speed control of two-inertia system by PI/PID control," in *Power Electronics and Drive Systems, 1999. PEDS '99. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on*, 1999, pp. 567-572 vol.1.

92. T. M. O'Sullivan, C. M. Bingham, and N. Schofield, "High-performance control of dual-inertia servodrive systems using low-cost integrated SAW torque transducers," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 1226-1237, 2006.

93. Удалов С. Н., Ачитаев А.А., Приступ А.Г., Боченков Б.М. Повышение регулировочной способности ветроэнергетической установки в составе локальной энергосистемы // *Энергобезопасность и энергосбережение*. – 2017. – №. 3. – С. 33-40.

94. Удалов С. Н. Ачитаев А.А., Приступ А.Г., Топорков Д.М. Повышение эффективности ветроэнергетической установки путем использования псевдопрямого привода // *Энергобезопасность и энергосбережение*. – 2017. – №. 5. – С. 59-63.

95. Penzkofer A., Atallah K. Scaling of Pseudo Direct Drives for Wind Turbine Application // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2016. – Т. 52. – №. 7. – С. 1-5.

96. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем. – 1979.

97. Achitaev A. A., Udalov S. N. Increasing the regulating ability of wind turbines based on jet drive// *12 International forum on strategic technology (IFOST 2017) : proc.*, Korea, Ulsan, 31 May – 2 June 2017. – Ulsan, 2017. – Vol. 1. – P. 273-276. - ISBN 978-1-5090-5703-0.

98. Poore R., Lettenmaier T. WindPACT Advanced wind turbine drive train designs study. – Tech. Rep. NREL/SR-500-33196, National Renewable Energy Laboratory, Colorado.(Cited on pages 15, 20, 59, 65, and 66.), 2003.

99. Feng Z. et al. Fault diagnosis for wind turbine planetary gearboxes via demodulation analysis based on ensemble empirical mode decomposition and energy separation // *Renewable Energy*. – 2012. – Т. 47. – С. 112-126.

100. Niu S. et al. Development of a novel brushless power split transmission system for wind power generation application //IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. – T. 50. – №. 11. – C. 1-4.

101. Yin, X., Fang, Y., Huang, X., Pfister, P. D. Analytical modeling of a novel Vernier pseudo-direct-drive permanent-magnet machine //IEEE Transactions on Magnetics. – 2017. – T. 53. – №. 6. – C. 1-4.

102. Udalov S. N., Achitaev A. A., Pristup A. G., Bochenkov B.M., Pankratc Y.V. Using a Magnetic Continuously Variable Transmission for Synchronization of Wind Turbine Generators Under a Variable Wind Speed// Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2017. – IEEE, 2017. – pp. 1-5.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

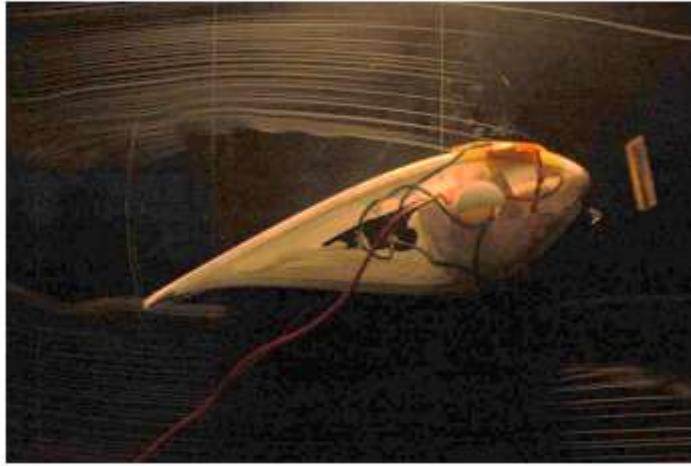
Текст программы для реализации исследования асинхронного хода в автономной энергетической системе:

```
function
[Breaker_1,Breaker_2,Breaker_3,Load_Master,Load_Slave,Fault]=
fcn(Real_Time,speed_Master,Load_angle_Master,speed_Slave,Load_angle_
Slave,Breaker_2_old,Breaker_3_old,Load_Slave_old,Breaker_1_old,Load_
Master_old,Fault_old)
%% ввод данных задержки
Breaker_2=Breaker_2_old;
Breaker_3=Breaker_3_old;
Load_Slave=Load_Slave_old;
Breaker_1=Breaker_1_old;
Load_Master=Load_Master_old;
Fault=Fault_old;
%% ввод коренного цикла (ввод первой нагрузки)
if Real_Time>=0
    Load_Master=100;
    Breaker_1=1;
    %% ввод цикла включения второго выключателя
    if Real_Time>2
        Breaker_2=1;
        %% алгоритм синхронизации второго генератора с сетью
        if Real_Time>5
            if ((abs(speed_Master)-
abs(speed_Slave))/abs(speed_Master)<0.1)&&(((abs(Load_angle_Master)-
abs(Load_angle_Slave))/(abs(Load_angle_Master)))<0.1)&&(Breaker_3==0
)
                %% ввод мощности второго генератора 30%
                Load_Slave=30;
                %% ввод 60% мощности
                if Real_Time>8
                    Breaker_3=1;
                end
            end
        end
    end
end
end
%% ввод режима трехфазного КЗ на нагрузке
if (Real_Time>15)&&(Real_Time<=15.1)
    Fault=1;
end
%% вывод первой ступени нагрузки
if Real_Time>15.1
    Breaker_1=0;
end
end
end
```

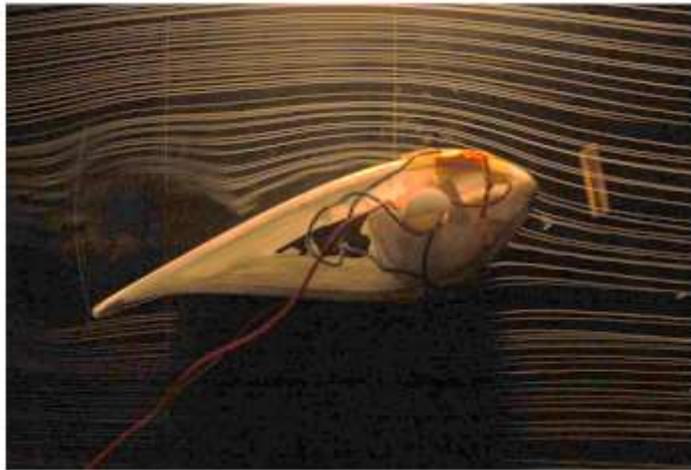
### Плазменный привод

В настоящее время в литературе начинает получать распространение исследование по использованию в конструкции ВЭУ различных видов вспомогательных средств аэродинамического регулирования, они также получили экспериментальное подтверждение повышения регулировочной способности турбины ВЭУ с плазменным приводом, основанного на движении ионизированного воздуха по поверхности лопасти турбины ВЭУ. Данное направление получило высокую заинтересованность в последние несколько лет. Дело в том, что это устройство для управляемого действия воздушным потоком и открывается возможность преобразования электрической энергии непосредственно в кинетическую для формирования скорости потока. Свойства данного устройства имеет преимущество над механическими электроприводами: механизм простой, малогабаритные и не требует использование вращающихся элементов. Исследования также показали, что присутствие электродов не влияет на окружающий воздушный поток, когда они неактивны и не требуется значительных изменений конструкции лопасти турбины для их установки. Другой более важной особенностью плазменного привода состоит в возможности их разработки так, чтобы регулировать подъемную силу.

Плазменный привод основан на принципе ионизации пространства между катодом и анодом при прикладывании высокого напряжения и создания электрического поля между двумя электродами. Ионизированный поток формирует соударение между ионами и нейтральными элементами. Данный поток формирует дополнительную силу и создает среду (см. рисунок П.1) для формирования перепада давления. В этом случае формируется поток воздуха, и он изменяет параметры воздуха вдоль лопастей и смещает точку естественного деления потока. Характеристика привода основывается при формировании геометрических размеров (форма электрода и размер, расстояние между ними и т.д.), электрических параметрах среды, свойствах окружающего воздуха (температура, давление, влажность, скорость ветра и т.д.) и природе диэлектрической границы.



а



б

Рисунок П.1 – Визуализация испытания лопасти ВЭУ, проведенного в NREL:  
а – с использованием плазменного привода; б – без использования плазменного привода

На рисунке П.2 представлена модель лопасти профиля *NACA4424* ВЭУ с применением плазменного привода на поверхности лопасти.

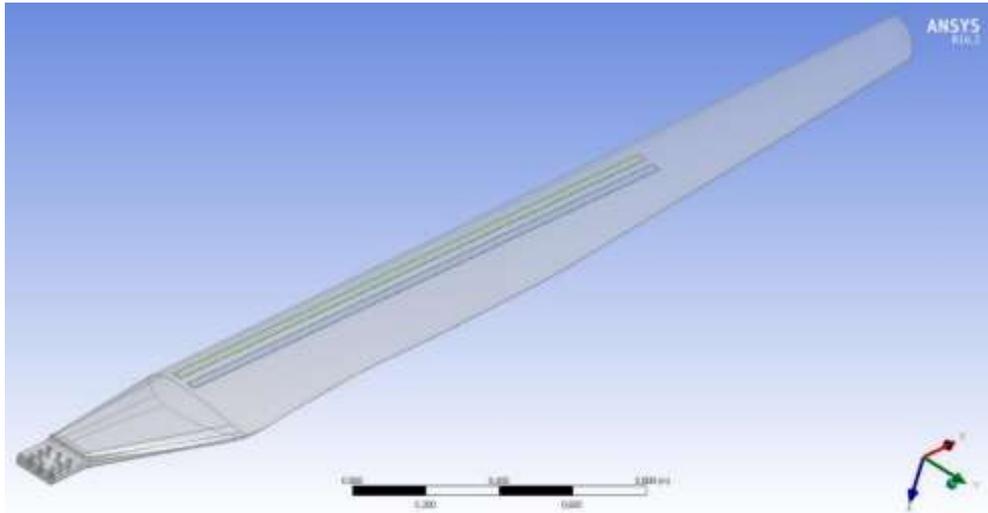


Рисунок П.2 – Проект плазменного привода в составе лопасти профиля NACA4424

Привод, который установлен на поверхности лопастей ВЭУ имеет коронный разряд при постоянном токе и состоит из двух широких электродов (рисунок П.3). При прикладывании высокого напряжения с постоянным током ( $>10$  кВ), создается эффект короны вокруг проводников, обычно около анода и создается ионизированный поток тангенциально к поверхности двух электродов. Данный поток меняет свойство поверхностного слоя воздушного потока в профиле. Рисунок П.3 б показывает данную особенность визуально при низкоскоростном движении воздушного потока вдоль плоскости. При отсутствии плазменного привода, индикатор (дым) остается горизонтальным. При активации плазменного привода, поток вдоль анода претерпевает смещение по направлению к поверхности, вызывая стягивание дыма к поверхности и затем увеличивая скорость в область разряда за счет перепада давления. Преимущество данного способа состоит в том, что оно требует простое электропитание, но проектирование ограничивается скоростью ионизированного потока м/с.

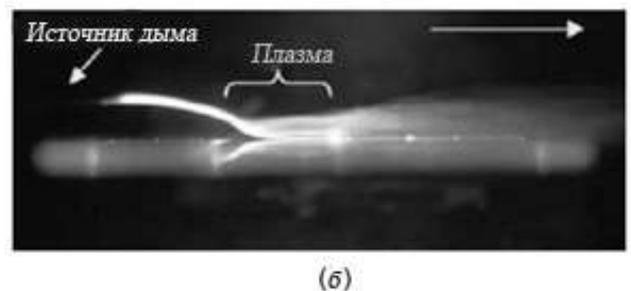
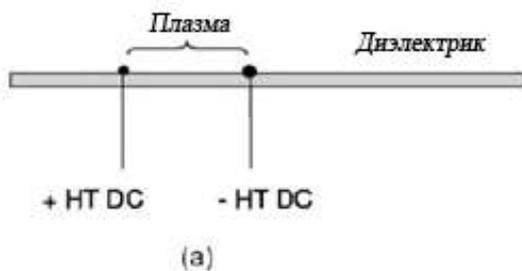


Рисунок П.3 – Поверхностный коронный разряд:

- а – схематично с точки зрения привод коронного разряда постоянного тока;
- б – 2D визуализация управляемого воздушного потока вдоль плоской пластины

Использование плазменного привода как средства аэродинамического управления потоком сравнительно новая идея. До 2000 года было несколько публикаций на эту тему. Первые значительные научные работы были опубликованы в 1968 году и в 1978 году. В середине 1990 годов, исследования начали приостанавливаться, но несколько исследовательских групп анализировали управление воздушным потоком, используя наиболее основное устройство, поверхностный коронный разряд постоянного тока.

Напряженность электрического поля, созданной плоской пластиной будет определяться следующим выражением:

$$\vec{E} = \frac{\vec{j}_k}{2 \cdot \varepsilon_0} + \frac{\vec{j}_a}{2 \cdot \varepsilon_0}; \quad (\text{П.1})$$

где  $j_k$  – поверхностная плотность заряда катода,  $j_a$  – поверхностная плотность заряда анода,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

Методом конечных элементов был проведен расчет электростатического поля. Уравнение Пуассона выглядит следующим образом:

$$\rho_V(q) = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y \frac{\partial U}{\partial y} \right); \quad (\text{П.2})$$

где  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  – тензоры диэлектрической проницаемости,  $\rho_V$  – объемная плотность электрического заряда.

Напряженность электрического поля выражается следующей формулой:

$$E = -\nabla U; \quad (\text{П.3})$$

где  $U$  – приложенное напряжение.

Электрический заряд озона в электростатическом поле, определяется следующим уравнением:

$$q = 4\pi\varepsilon_0 r \varphi_0; \quad (\text{П.4})$$

где  $r$  – расстояние от частицы до заданной точки;  $q$  – электрический заряд озона;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость, равная  $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ;  $\varphi_0$  – электрический потенциал.

В плазменном состоянии озон представляет собой заряженные частицы. И поэтому существует действие кулоновского притяжения около частиц и преобладание частиц ионизированного воздуха и зарядов, которые противоположны по знаку. Однако, происходит ослабление (экранирование) поля частиц в плазме. Известно, потенциал  $\varphi$  поля заряда  $q$  в плазме убывает с расстоянием  $r$  значительно быстрее, чем в вакууме:

$$q = \frac{4\pi\varepsilon_0 r \varphi}{e^{-r/D}}. \quad (\text{П.5})$$

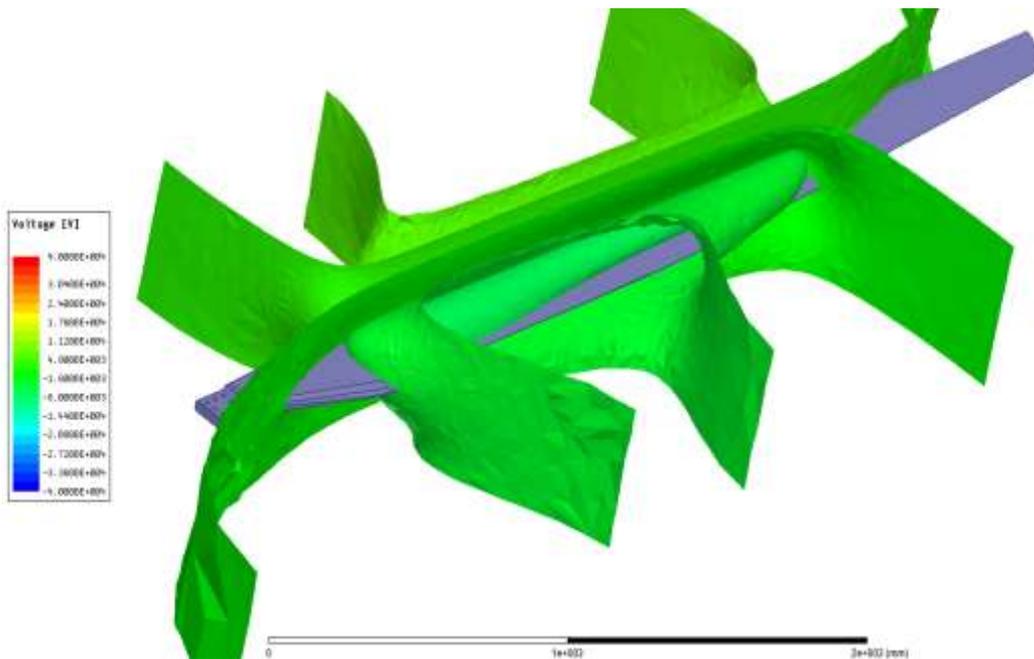
Дебаевский радиус экранирования  $D$ , определяемый по формуле:

$$D = \sqrt{\varepsilon_0 k T_2 / (2 n_0 e^2)}; \quad (\text{П.6})$$

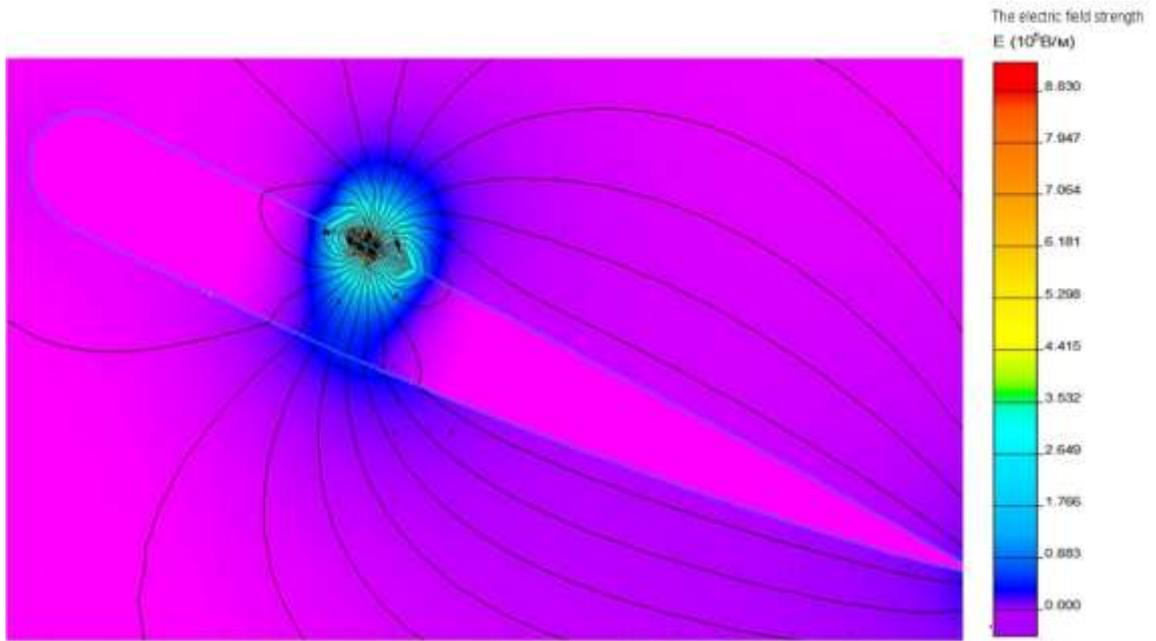
где  $k$  – коэффициент Больцмана, равный  $1,38 \cdot 10^{-34}$  Дж/К;  $T$  – температура;  $n_0$  – концентрация заряженных частиц.

Предыдущее уравнение позволяет перейти к расчетам подъемной силы в условиях работы плазменного привода, который влияет на соответствующую компоненту.

Рисунок П.3 показывает модели распределения напряженности электростатического поля при приложении на катод напряжения  $10$  кВ. При взаимодействии потока с аэродинамическим профилем действуют аэродинамическая сила, ее можно разделить на две составляющие: подъемную силу и силу сопротивления. Подъемная сила действует на профиль, отображенная на рисунке П.4, перпендикулярный направлению скорости утечки потока ( $v_r$ ). Сила сопротивления совпадает с направлением потока свободного потока вектора скорости. Подъемная сила ( $dF_L$ ) и сопротивления ( $dF_D$ ) обозначены соответственно. Угол между направлением потока и свободным от скорости потока равен  $\alpha$  или углу атаки. Использование плазменного привода совместно с регулированием угла заклинения лопасти турбины ВЭУ дает более широкий диапазон изменения подъемной силы.

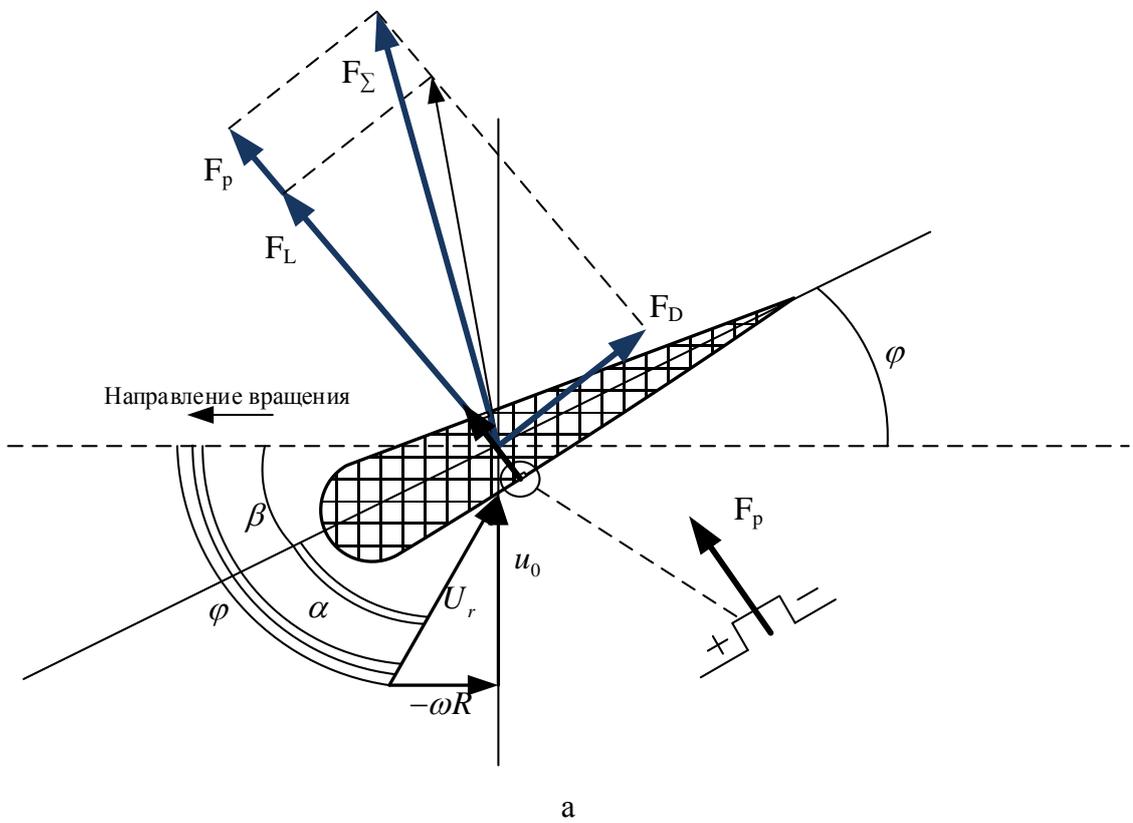


а



б

Рисунок П.4 – Результаты моделирования распределения электростатического поля лопасти ВЭУ: а – 3D модель распределения уровня напряжения лопасти профиля *NACA4424*;  
б – двухмерная модель лопасти ВЭУ



а

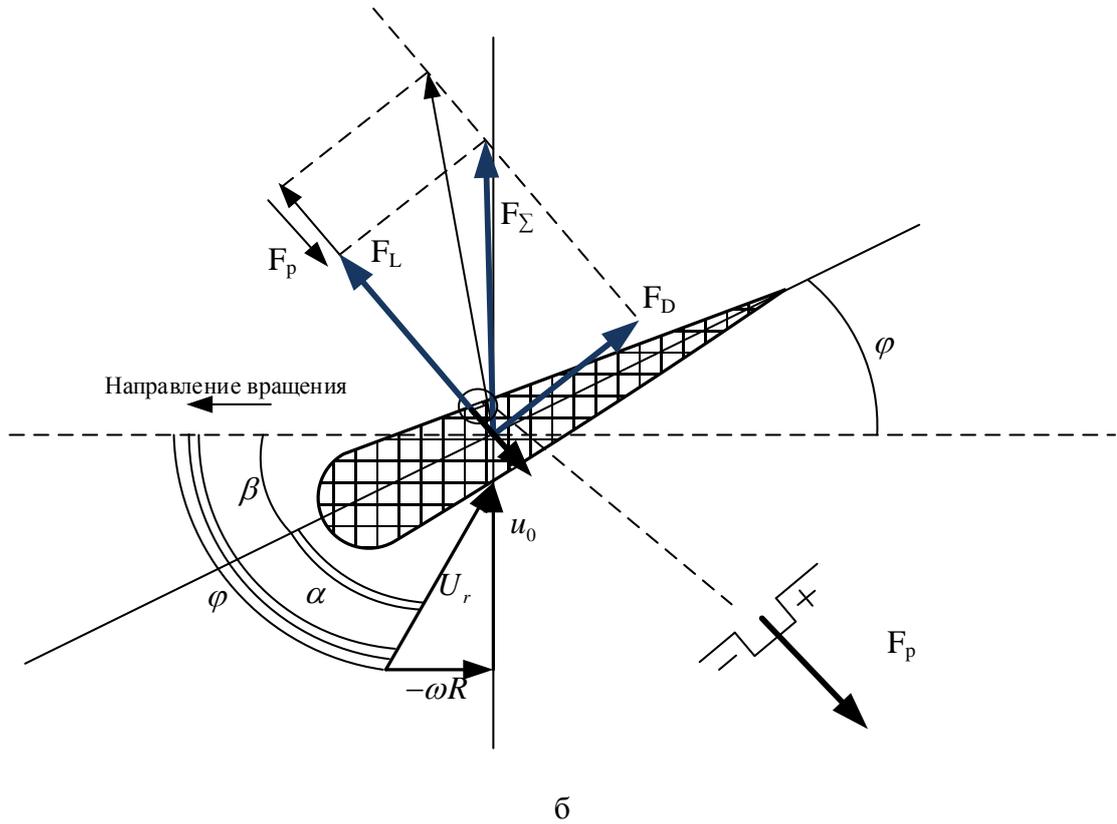


Рисунок П.5 – Векторные диаграммы сил, действующую на лопасть:

а – в режиме повышения подъёмной силы; б – в режиме ограничения подъёмной силы

Вычисление давления  $p$  позволяет определить величину подъемной силы. Скорость ветра, заданная граничным условием, постоянна. Для расчетов механического натяжения скорость ветра формулируется численно через давление, описанную в:

$$p = C_L \frac{\rho u_0^2}{2} \pm \Delta p; \quad (\text{П.7})$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;  $u_0$  – скорость ветра,  $\text{м/с}$ ,  $C_L$  – коэффициент подъемной силы турбины ВЭУ.

Перепад давления, созданный ионизацией газа, зависит от температуры и напряженности электрического поля:

$$\Delta p = \left( \frac{1}{\mu_2} - \frac{1}{\mu_1} \right) \int_{T_1}^{T_2} \rho(T) R dT = \left( \frac{1}{\mu_2} - \frac{1}{\mu_1} \right) \rho_0 \cdot \int_{T_1}^{T_2} e^{-qE/kT} R dT; \quad (\text{П.8})$$

где  $\mu_1$  – молярная масса озона,  $\mu_2$  – молярная масса кислорода,  $R$  – газовая постоянная,  $E$  – напряженность электрического поля,  $q$  – величина заряд иона озона,  $T_1$  – температура неионизированного участка поверхности лопасти;  $T_2$  – температура ионизированного участка лопасти,  $k$  – постоянная Больцмана,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Также, перепад давления выражается через следующее выражение:

$$\Delta p = \frac{\rho_2 u_1^2}{2}. \quad (\text{П.9})$$

где  $\rho_2$  – плотность озона,  $u_1$  – скорость истечения ионизированного газа.

Учтем уравнение (П.8) и запишем следующее выражение для  $u_1$ :

$$u_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho_1} \left( \frac{1}{\mu_2} - \frac{1}{\mu_1} \right) \rho_0 \cdot \int_{T_1}^{T_2} e^{-qE/kT} R dT}. \quad (\text{П.10})$$

Дополнительная нагрузка, действующая на лопасть ветровой турбины, выражается через следующее выражение:

$$F_p = \frac{\rho_2}{\rho_1} \left( \frac{1}{\mu_2} - \frac{1}{\mu_1} \right) \rho_0 \cdot A_0 \cdot C_L \int_{T_1}^{T_2} e^{-qE/kT} R dT. \quad (\text{П.11})$$

где  $A_0$  – площадь участка плазменного привода.

Согласно закону Видемана-Франца-Лоренца, который устанавливает связь между теплопроводностью, электропроводностью и абсолютной температурой для молекул ионизированного озона получим:

$$T_2 = 5 \frac{\lambda q^2}{\sigma \pi^2 k^2}. \quad (\text{П.12})$$

Используя метод подобия расчёта задач аэродинамики, и задач механической напряженности, проведем расчёт механических полей, где в качестве начальных условий будут взяты приращение давления, созданного ионизированной областью лопасти ВЭУ.

С помощью метода конечных элементов был произведен расчет механических взаимодействий.

Исследование деформаций проводился в программе ElCut с учетом наличия перепада давления с заданными параметрами. При двухмерной постановке задачи, поле смещений определяется двумя компонентами тензора перемещений  $\delta$ :

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{Bmatrix} \quad (\text{П.13})$$

где  $\delta_x, \delta_y$  – тензоры механических перемещений;  $\{\delta\}$  – вектор перемещения.

Соответствующее ей напряжение выражается как:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (\text{П.14})$$

где  $\{\sigma\}$  - вектор механической напряжённости;  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  - компоненты тензора механических деформаций.

Уравнения расчета объемной плотности силы:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -f_x \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = -f_y \end{cases} \quad (\text{П.15})$$

где  $f_x, f_y$  - компоненты вектора плотности объёмной силы.

Расчёты  $f_y$  составляющей позволяют определить величину подъёмной силы.

Скорость ветра задаётся граничным условием и является величиной постоянной. В формате задач напряжений, скорость ветра формируется через параметр давления по соответствующей формуле:

$$p_0 = \frac{\rho_1 u_0^2}{2}. \quad (\text{П.16})$$

Расчеты, представленные на рисунке П.6, отображают распределение механических напряжений по поверхности лопасти ВЭУ.

На рисунке П.6 показаны результаты расчетов механического поля лопасти ВЭУ в зависимости от угла атаки, что иллюстрирует эффект увеличения регулирующей способности подъемной силы лопасти ветровой турбины с использованием коронного разряда на поверхности.

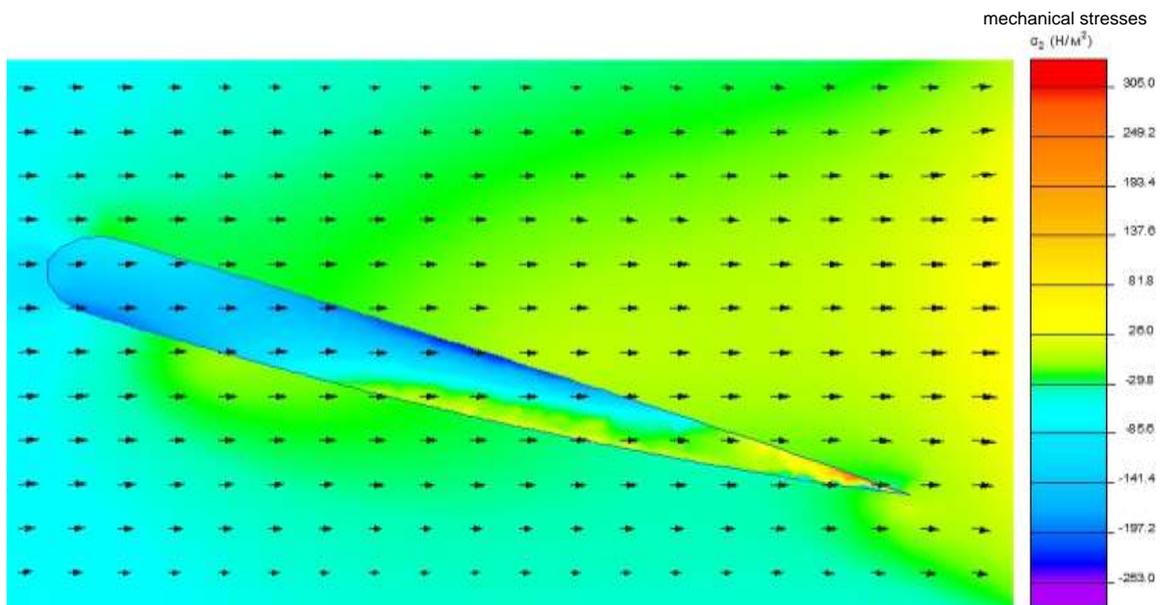


Рисунок П.6 – Распределение механических напряжений вдоль поверхности лопасти

Значительные преимущества в механической конструкции: малые размеры и прочная конструкция, которая приводит к простой и легкой интеграции в конструкции ВЭУ. Процесс интеграции включает в себя простой этап склеивания, при котором привод в виде полос размещаются на поверхности лопасти. Единственными элементами, которые необходимо правильно интегрировать, являются силовые кабели исполнительных механизмов. Общее энергопотребление таких систем очень низкое.

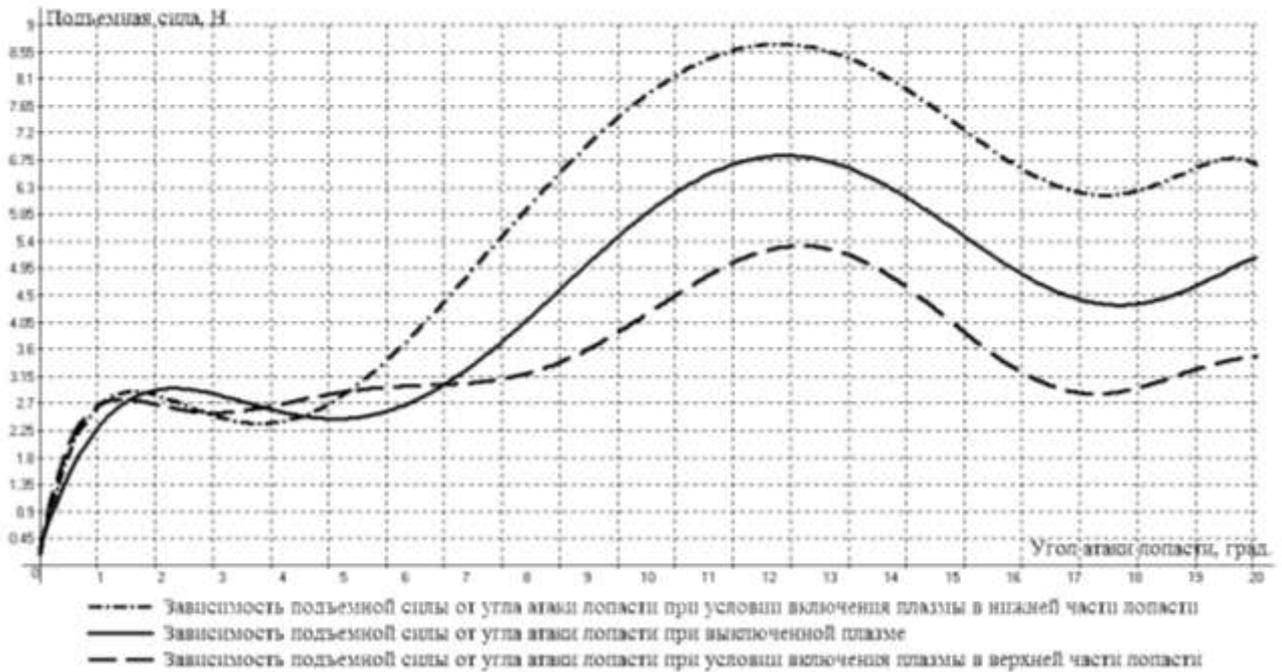


Рисунок П.7 – Сравнительные характеристики влияния на величину подъемной силы в случае использования ППЛ

На рисунке П.8 представлены экспериментальные исследования расчёта коэффициента подъемной силы с использованием плазменного привода и без него. При увеличении напряжения, генерируется более мощный ионизированный поток и возникает большее влияние на локальную скорость ветрового потока. Результаты показали, что привод способен увеличивать и уменьшать локальную скорость возле плоской поверхности. Скорость потока, которая использовалась в этих исследованиях, была сравнительно низкой. Исходя из анализа полученных данных можно сделать вывод о допустимой верификации разработанной математической модели действия на величину подъемной силы.

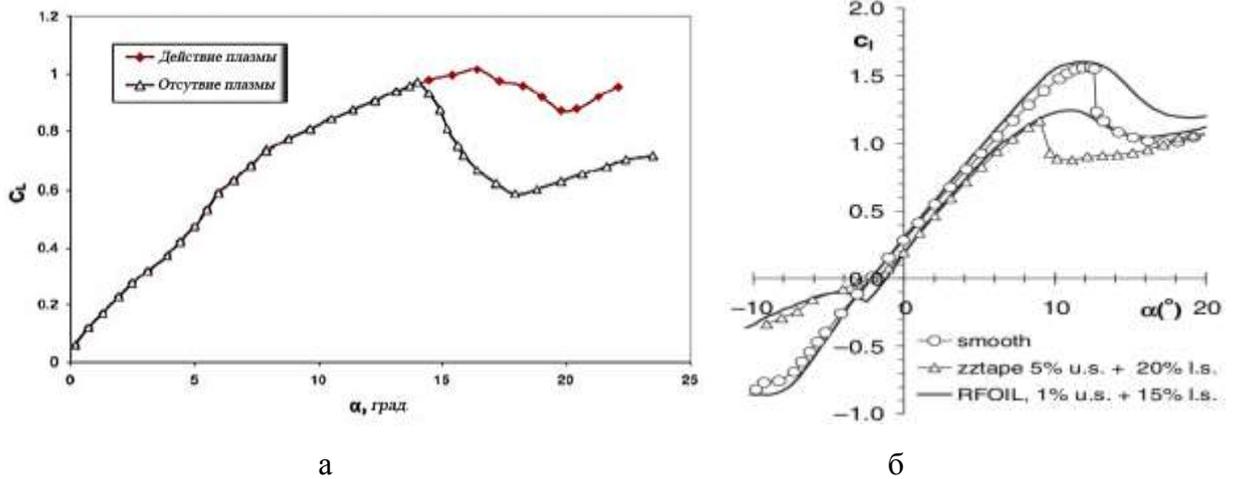


Рисунок П.8 – Экспериментальные данные по результатам исследований:

а – значений коэффициента подъёмной силы при использовании и отсутствие привода на лопасти NACA4424, проведенных в NREL; б – исследований, проведенные в Boeing

### Струйный привод форсуночного действия

В настоящий момент существует тенденция использования ВЭУ, расположенных вдоль морских побережий. Они достигают больших габаритов и мощностей. Более того, вследствие этого необходимо осуществить охлаждение лопастей турбин и осуществить дополнительное ограничение подъемной силы. В настоящий момент представляет интерес так называемый струйный привод. Его принцип основан на использовании воды или сжатого воздуха в качестве охлаждения лопастей турбины, протекающая по внутренней области лопасти и для того, чтобы её удалить применяют на поверхности форсуночные клапаны, обеспечивающий выброс воды или воздуха. Это позволяет сформировать наряду с подъемной силой, реактивную силу, которая позволяет ограничить результирующее воздействие, действующую на лопасть. Турбина SmartGen, представляет собой установку с гибкой масштабируемостью системы. Помимо стабилизации выходной мощности ветровой турбины, сжатый воздух подается для поддержания постоянной температуры, используемой для охлаждения компонентов генератора. Эта система захватывает избыточную энергию, вырабатываемую ветряными турбинами, в форме сжатого воздуха и использует ее в часы пик для вращения турбины.

Переменная мощность ветровых электростанций - это проблема, которая должна быть решена при подключении ветровой электростанции к электрической сети. Скорость ветра может меняться от нескольких раз в день до нескольких раз в час, что приводит к нерегулярной выходной мощности такой электростанции. Этот недостаток должен быть компенсирован либо с помощью дорогостоящих систем аккумулирования энергии в периоды высокой активности и отдачи его в

спокойное время, либо с использованием других источников энергии. Это приводит к увеличению стоимости электроэнергии.

Гибридная турбина предлагает компенсировать этот недостаток с помощью сжатого воздуха, который будет вращать турбину, подключенную к генератору ветровой турбины. Сжатый воздух может подаваться с помощью турбокомпрессора, установленного у основания башни, работающей на природном газе или биогазе.

При снижении скорости ветра до стартовой скорости, может привести к перерыву генерации, поэтому использование дополнительного источника питания для вращения турбогенератора позволяет более эффективно использовать оборудование, что означает более быстрый возврат инвестиций, более дешевую энергию для конечного пользователя.

Турбина SmartGen, согласно заверениям компании, является масштабируемой системой и может устанавливаться либо на небольших ветровых турбинах мощностью от 3 до 100 кВт, либо на больших морских ветровых турбинах до 4 МВт (см. рисунок П.9).

В дополнение к стабилизации выходной мощности ветровой турбины подаваемый сжатый воздух будет поддерживать постоянную температуру, охлаждая компоненты генератора.

Вероятно, эту систему можно улучшить, сохранив избыточную энергию, вырабатываемую ветряной электростанцией, в виде сжатого воздуха, и использовать ее в часы пиковой нагрузки для вращения турбины.

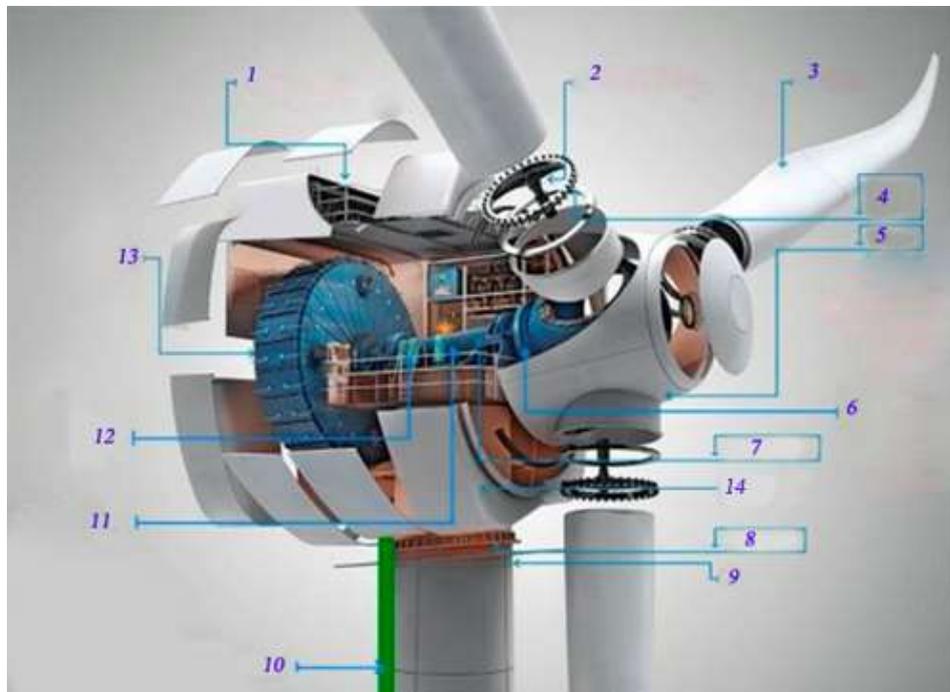


Рисунок П.9 – Расположение компонентов ВЭУ основе СПФД форсуночного действия: 1 - система управления; 2 - контроль угла атаки; 3 - лопасть; 4 - крепление лопасти; 5 - ротор; 6 - автоматическое соединение; 7 - ось вращения; 8 - поворотный привод гондолы; 9 - башня; 10 - воздуховод; 11 - компрессор; 12 - воздушный регулятор; 13 - генератор; 14 – гондола

Важным в этом изобретении является возможность модернизации существующих ветрогенераторов путем установки в них системы *SmartGen*. Такая модернизация сделает ветроэнергетику более привлекательной и эффективной и предоставит энергетикам инструмент для регулирования мощности ветряной электростанции на основе текущих потребностей сети. Такая система должна найти массовое применение в сельских районах, где уже установлены ветровые турбины. Таким образом, гибридная система биогаза-ветра будет получать 100% энергии из возобновляемых источников.

Необходим анализ технологии. Разработка математической модель устройства представляет интерес, которая позволяет нам анализировать структуру лопасти, расположение этих устройств и их влияние на подъемную силу.

Ниже приведено математическое моделирование аэродинамического взаимодействия лопасти, оснащенной соплом, ветровым потоком, действия, описываемые уравнениями Навье-Стокса:

$$\rho_1 \cdot \partial u / \partial t + \rho_1 (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot \left[ -p \cdot I + \eta (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + F \nabla \cdot u = 0$$

где  $u$  - скорость потока ветра,  $м / с$ ;  $P$  - давление,  $Па$ ;  $H$  - кинематическая вязкость  $Па \cdot с$ ;  $F$  - сила,  $H$ ;  $\rho_1$  - плотность потока,  $кг / м^3$ ;  $t$  - время,  $с$ .

Расчет подъемной силы в потоке реактивного газа основан на динамике реактивного двигателя, разработанного Мещерским. Результирующая сила является разницей между подъемной силой и реактивной силой, действующей на лопасть при действии форсуночного привода (рисунке П.11):

$$M \frac{dU}{dt} = \left( \frac{1}{2} 2\pi R_1^2 \rho_1 u^2 - v \frac{dm}{dt} \right) C_L, \quad (П.17)$$

где  $F_R = v dm/dt$  - реактивная сила, так как она воздействует на лопасть при выходе сжатого воздуха  $m$  из форсунки,  $H$ ;  $u$  - скорость потока газа из форсунки,  $м/с$ ;  $C_L$  - коэффициент подъемной силы;  $U$  - линейная скорость вращения лопасти,  $м/с$ ;  $M$  - масса лопасти,  $кг$ ;  $R$  - радиус лопасти,  $м$ .

График, изображенный на рисунке П.12, показывает зависимость результирующей подъемной силы от скорости газа в сопле. В зависимости от скорости ветра через СПФД подъемная сила может поддерживаться постоянной даже при достаточно низкой скорости ветра. Сжатие воздуха, его хранение и использование его в периоды необходимости более экономично, чем использование балластных резисторов.

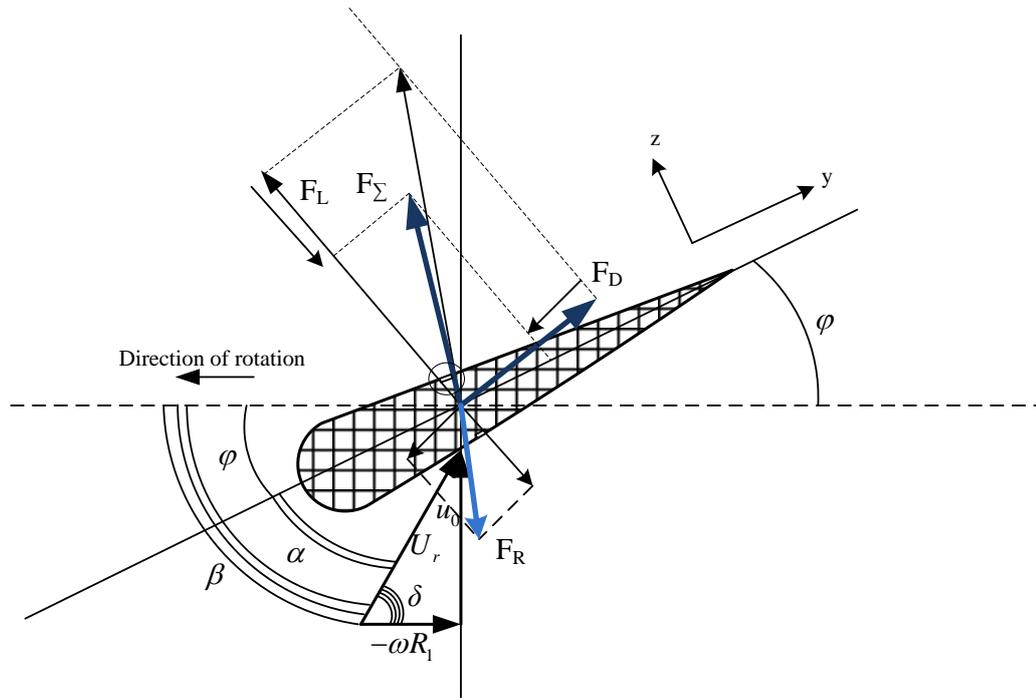


Рисунок П.10 – Векторная диаграмма сил на поперечном сечении аэродинамического профиля с использованием СПФД

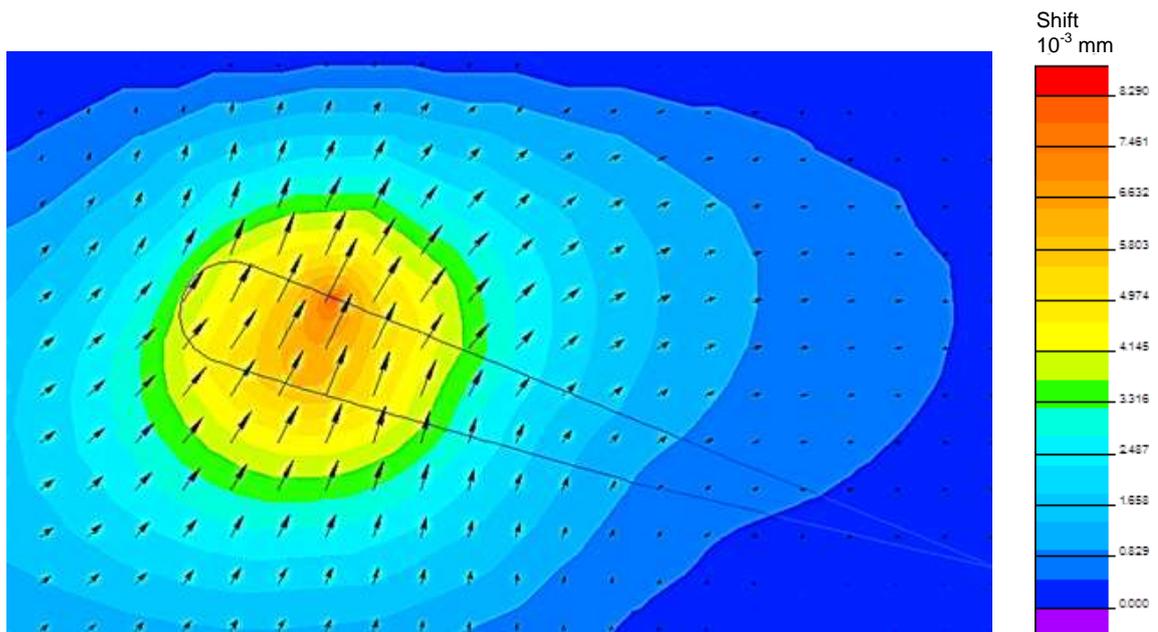


Рисунок П.11 – Моделирование результатов действия СПФД на подъемную силу

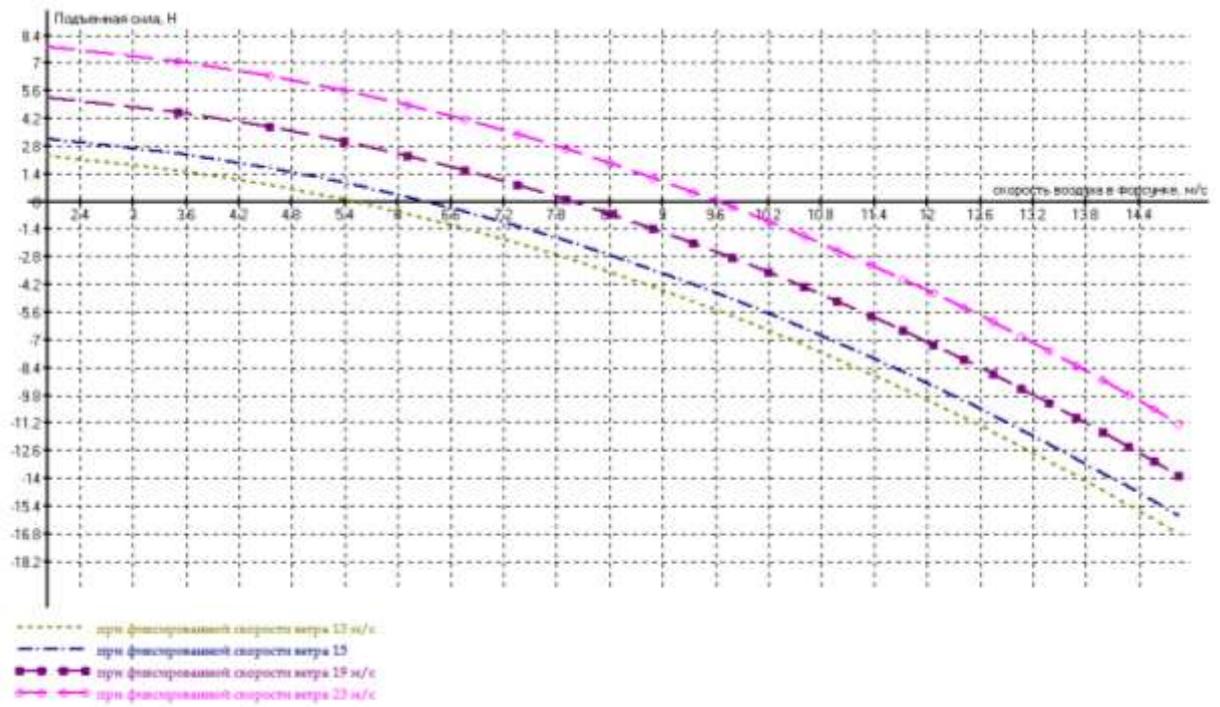


Рисунок П.12 –Результаты моделирования влияния скорости потока сопла на подъемную силу при различных значениях скорости ветра

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**168 788**<sup>(13)</sup> **U1**

(51) МПК  
*H02P 9/06* (2006.01)  
*H02P 15/00* (2006.01)  
*H02K 7/10* (2006.01)  
*B60W 1/008* (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

**(12) ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ  
 ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2016129434, 18.07.2016  
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
 18.07.2016  
 Дата регистрации:  
 21.02.2017  
 Приоритет(ы):  
 (22) Дата подачи заявки: 18.07.2016  
 (45) Опубликовано: 21.02.2017 Бюл. № 6  
 Адрес для переписки:  
 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ

(72) Автор(ы):  
 Сапсалаев Анатолий Васильевич (RU),  
 Харитонов Сергей Александрович (RU),  
 Ачитаев Андрей Александрович (RU),  
 Жарков Максим Андреевич (RU)  
 (73) Патентообладатель(и):  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
 БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
 УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
 ОБРАЗОВАНИЯ \*НОВОСИБИРСКИЙ  
 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
 УНИВЕРСИТЕТ\* (RU)  
 (56) Список документов, цитированных в отчете  
 о поиске: RU 81609 U1, 20.03.2009. RU 150254  
 U1, 10.02.2015. DE 112008001553 T5, 29.04.2010.  
 JP 5018972 B2, 05.09.2012. US 688648 B1,  
 03.05.2005. EP 1832743 A1, 12.09.2007.

(54) Устройство генерирования стабильного напряжения переменного тока

**(57) Формула полезной модели**

Устройство генерирования стабильного напряжения переменного тока, содержащее первичный двигатель, магнитоэлектрический генератор, выходы которого подключены к нагрузке, и полупроводниковое устройство управления, отличающееся тем, что в него введены источник задания напряжения, узел сравнения и управляемая магнитная трансмиссия, входной вал которой соединен с валом первичного двигателя, выходной вал - с валом магнитоэлектрического генератора, а обмотка трансмиссии присоединена к выходу полупроводникового устройства управления, силовые входы которого присоединены к выходам магнитоэлектрического генератора, а к входу управления присоединен узел сравнения, один из входов которого присоединен к нагрузке, а второй - к источнику задания напряжения.

RU 168788 U1

RU 168788 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 592 641** (13) **C1**

(51) МПК

*H02P 9/06* (2006.01)*H02K 7/18* (2006.01)*H02K 51/00* (2006.01)*B60K 6/543* (2007.10)*B60L 11/08* (2006.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015126013/07, 30.06.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
30.06.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.06.2015

(45) Опубликовано: 27.07.2016 Бюл. № 21

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2184040 C1, 27.06.2002. RU 2519590  
C2, 20.06.2014. GB 2457682 A, 26.08.2009. DE  
102007040342 A1, 27.03.2008. JP 5567596 B2,  
06.08.2014. US 2012119573 A1, 17.05.2012. US  
46617142 A, 28.04.1987. EP 1624177 A1,  
08.02.2006. WO 2012108906 A1, 16.08.2012.

Адрес для переписки:

101000, Москва, а/я 312, Белокопытову А.В.

(72) Автор(ы):

Ачитаев Андрей Александрович (RU),

Удалов Сергей Николаевич (RU),

Юманов Михаил Сергеевич (RU),

Пчелинцев Антон Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Ачитаев Андрей Александрович (RU),

Удалов Сергей Николаевич (RU),

Юманов Михаил Сергеевич (RU),

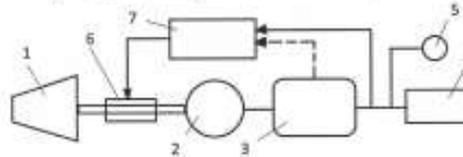
Пчелинцев Антон Сергеевич (RU)

## (54) ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электротехники и может быть использовано в электроэнергетических системах распределения генерируемой электроэнергии. Техническим результатом является обеспечение эксплуатационной надежности электроэнергетической системы за счет трансформации отношения между тихоходным и быстроходным валами для исключения режима аварийного перехода генераторов в асинхронный режим. Электромеханическая система состоит из двигателя, выполненного с функцией преобразования тепловой энергии во вращение выходного элемента, и кинематически связанного с по крайней мере одним генератором, который

через блок измерения частоты сети, напряжения, фазы, угла нагрузки связан с потребителем. Система снабжена электромагнитной трансмиссией с переменным передаточным отношением, размещенной в кинематической цепи связи двигателя, с по крайней мере одним генератором и выполненной в виде кольцевого ротора синхронной машины с постоянными магнитами, внутри которой размещен ротор асинхронной машины с вращающимся магнитным полем, созданным постоянными магнитами, при этом между ними размещена многофазная обмотка управления, которая обеспечивает изменение передаточного отношения между тихоходным и быстроходным валами. 11 ил.



ФИГ. 1

(12) МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗАЯВКА, ОПУБЛИКОВАННАЯ В СООТВЕТСТВИИ С  
ДОГОВОРом О ПАТЕНТНОЙ КООПЕРАЦИИ (РСТ)(19) Всемирная Организация  
Интеллектуальной Собственности  
Международное бюро(10) Номер международной публикации  
**WO 2012/169924 A1**(43) Дата международной публикации  
13 декабря 2012 (13.12.2012)

WIPO | PCT

(51) Международная патентная классификация:  
*H02K 17/16* (2006.01) *H02K 9/02* (2006.01)

(21) Номер международной заявки: PCT/RU2011/000409

(22) Дата международной подачи:  
10 июня 2011 (10.06.2011)

(25) Язык подачи: Русский

(26) Язык публикации: Русский

(72) Изобретатель: и

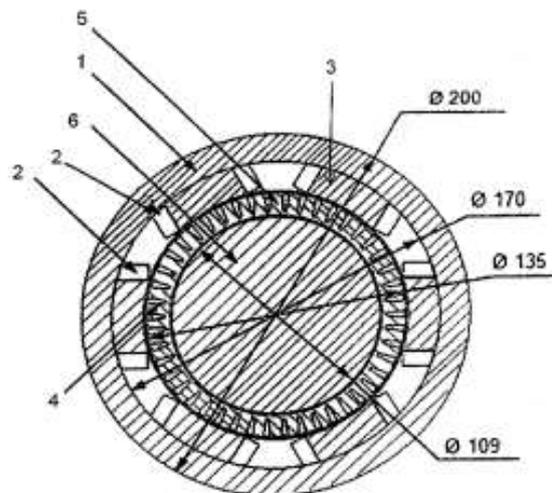
(71) Заявитель: АЧИТАЕВ, Андрей Александрович  
(ACHITAEV, Andrej Aleksandrovich) [RU/RU]; ул.  
Комарова, 11-321, Абакан, Республика Хакасия,  
655017, Абакан (RU).(74) Агент: НИКОЛАЕВА, Наталья Владимировна  
(NIKOLAeva, Natalya Vladimirovna); а/я 852,  
Москва, 101000, Москва (RU).(81) Указанные государства (если не указано иначе, для  
каждого вида национальной охраны): AE, AG, AL, AM,  
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ,CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO,  
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,  
HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR,  
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME,  
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,  
OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG,  
SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ,  
UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.(84) Указанные государства (если не указано иначе, для  
каждого вида региональной охраны): ARIPO (BW, GH,  
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,  
ZM, ZW), евразийский (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,  
TJ, TM), европейский патент (AL, AT, BE, BG, CH, CY,  
CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,  
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE,  
SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA,  
GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Опубликована:

— с отчетом о международной поиске (статья 21.3)

(54) Title: ELECTRIC GENERATOR FOR A WIND ENERGY INSTALLATION

(54) Название изобретения: ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ



ФИГ. 1

the outer stator and the rotor and between the rotor and the inner stator is 3 mm.

(57) Реферат:

(57) Abstract: The invention relates to the field of wind power engineering. The electric generator for a wind energy installation comprises an outer stator consisting of a laminated magnetic core and an inner stator, said inner stator being arranged inside the outer stator and being mounted concentrically in relation to the outer stator, as well as an annular rotor, which is arranged in the gap between the stators, wherein poles consisting of anisotropic electrical steel with a high magnetic permeability and having a bevelled shape are formed on the outer stator with a salient-pole design, and a three-phase winding consisting of copper is laid in said poles, the rotor winding is a squirrel-cage winding and is laid in the gaps in the magnetic core with a high magnetic permeance, the inner stator acts as the magnetic core of the field of the outer stator, and a nonmagnetic gap between

[продолжение на следующей странице]

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
**«ЭКОФАКЕЛ»**

ИНН 5405998594/КПП 540501001, ОГРН 1175476038484  
 Код по ОКВЭД 33.20;42.22;41.20;43.29;43.22;43.21;27.90; 27.33;27.12;27.11;  
 Р/сч 40702810923240001360 в Филиале «Новосибирский» АО «АЛЬФА-БАНК»  
 БИК 045004774 Кор.счет 30101810600000000774  
 630028, г. Новосибирск-28, Средний переулок 51.  
[ekofakel@yandex.ru](mailto:ekofakel@yandex.ru), [judinva@mail.ru](mailto:judinva@mail.ru)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «ЭКОФАКЕЛ»

В.А. Юдин

«15» марта 2018 г.

АКТ

внедрения результатов кандидатской диссертации  
 А.А. Ачитаева в ООО «ЭКОФАКЕЛ»

Настоящим актом подтверждается, что разработанные в диссертационной работе Ачитаева А.А. алгоритмы электромагнитного вариатора и динамические модели магнитного редуктора при различных возмущающих воздействиях со стороны нагрузки были использованы для разработки привода МРЭЦ 100.

Данные модели позволяют спрогнозировать динамические явления при переходных процессах и повысить механический ресурс разрабатываемых электроприводов.

Технический директор

к.т.н. С.Д. Перков



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«СИБИРСКИЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ»

6440041, Россия, г. Омск, ул. Харьковская, 2  
Тел/факс (+381-2) 54-80-40 <http://www.sibpribor.ru> E-mail: [mail@sibpribor.ru](mailto:mail@sibpribor.ru)

Исх. № 171/01 от 20.03 2018г.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора-  
Главный конструктор  
АО «Сибирские приборы и системы»



В.А. Цоллер

03 2018 г.

АКТ

использования результатов кандидатской диссертации  
А.А. Ачитаева для производства гражданской продукции  
в АО «Сибирские приборы и системы»

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы «Исследование электромеханической совместимости ветроэнергетической установки с автономной электроэнергетической системой» Ачитаева А.А. представляют практический интерес для АО «Сибирские приборы и системы» и будут использоваться при разработках ветроэнергетических установок с псевдопрямым приводом, оснащенный магнитным редуктором.

Особенностью разрабатываемых ветроэнергетических установок с псевдопрямым приводом является возможность подключения к гибридным электроэнергетическим системам с обеспечением электромеханической совместимости с другими источниками энергии при различных возмущениях в сети.

Заместитель главного конструктора  
по гражданской продукции

А.Н. Макаров

Факс. (3812) 32-36-78 тел. (3812) 39-42-70  
e-mail: [makarov@sibpribor.ru](mailto:makarov@sibpribor.ru)