

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Автоматизированных электроэнергетических систем»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Кирияновой Натальи Геннадьевны

Математическое моделирование источников распределенной генерации

(тема работы)

в составе виртуальной электростанции

Направление подготовки 140200 «Электроэнергетика»

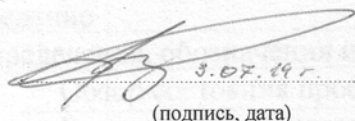
Руководитель

Зырянов В. М.

(фамилия, И., О.)

К. Т. Н., С. Н. С.

(уч. степень, уч. звание)


(подпись, дата)

Автор

Кириянова Н.Г.

(фамилия, И., О.)

ФЭН, ЭН2-01

(факультет, группа)



Новосибирск 2014 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения и сокращения	5
Введение	6
1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	8
2 ВИРТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ НА О. РУССКИЙ	11
2.1 Варианты развития сети электроснабжения о. Русский	11
2.2 Перспективная схема микроэнергосистемы кампуса ДВФУ	13
2.3 Выводы по разделу	15
3 ТЕСТОВЫЕ МОДЕЛИ МИКРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ	16
3.1 Расчетная схема сети электроснабжения о. Русский	16
3.2 Модели устройств управления	19
3.2.1 Обзор применения нечеткой логики в электроэнергетике	21
3.2.2 Модель фаззи-контроллера в ПК MATLAB/Simulink	25
3.3 Модель газовой турбины	29
3.4 Модель ветрогенератора	33
3.5 Выводы по разделу	35
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	36
4.1 Совместное действие управляемой нагрузки и АЧР	36
4.2 Исследование влияния различных функций принадлежности на качество переходных процессов	38
4.3 Исследование эффективности фаззи-контроллера в различных режимах сети	40
4.4 Выводы по разделу	42
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МИНИ-ТЭЦ НА О. РУССКИЙ	43
5.1 Проблема сегодня	43
5.2 Перспектива решения	45
Заключение	47
Список литературы	48
Приложение А	53

Определения, обозначения и сокращения

Микроэнергосистема - сеть электроснабжения низшего и/или среднего класса напряжения, имеющая в своем составе источники распределенной генерации (в том числе – возобновляемой энергии) и управляемую нагрузку – комбинацию различных потребителей энергии и устройств ее накопления, - которая может функционировать и как автономная система, и как часть энергосистемы более высокого уровня. [1]

Виртуальная электростанция (Virtual Power Plant -VPP) - сеть электроснабжения низшего и/или среднего класса напряжения, отдельные компоненты которой средствами мультиагентной системы управления могут образовывать кластеры распределенной генерации и управляемой нагрузки, и которая имеет несколько точек примыкания к энергосистеме. [1]

Сколтех – Сколковский институт науки и технологий

ЦНИО – Центр Науки, Инноваций и Образования

ДВФУ – Дальневосточный федеральный университет

ПК – программный комплекс

АЧР – автоматическая частотная разгрузка

КГУ – когенерационная установка

ЕЭС – единая энергетическая система

ОЭС – объединенная энергетическая система

ЛЭП – линия электропередачи

ВЛ – воздушная линия электропередачи

ПС – подстанция

АПНУ – автоматика предотвращения нарушения устойчивости

САОН – специальная автоматика отключения нагрузки

Введение

Повышенный интерес к сети электроснабжения о. Русский как к потенциальной площадке для освоения новых технологий интеллектуальных сетей (Smart Grid) [1,2] в российских энергосистемах обусловлен двумя обстоятельствами. Во-первых, удобным расположением острова на тихоокеанском побережье России с доступным для освоения потенциалом ветровой, солнечной и волновой энергетики. Эта тема вошла в качестве одного из исследовательских проектов [3], предпринятых Сколтехом в рамках инициативы по созданию Центра Науки, Инноваций и Образования (ЦНИО) по направлению «Энергетика» - одного из пятнадцати организуемых ЦНИО в России. Во-вторых, на о. Русский недавно создан Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ), который по замыслу некоммерческого партнерства «Распределенная энергетика», действующего под эгидой Минэнерго РФ, должен стать полигоном для отработки технических, коммерческих и информационных решений в области Smart Grid в России.

Настоящая выпускная квалификационная работа бакалавра отражает некоторые результаты, полученные на предварительной стадии исследований, которые должны быть выполнены в ближайшие пять лет в рамках упомянутого проекта Сколтеха.

Инструментом для исследований служили методы математического моделирования установившихся и переходных режимов электроэнергетических систем, реализованные в ПК MATLAB/Simulink/SimPowerSystems. Сформированная расчетная схема сети электроснабжения о. Русский может стать базовой моделью для выбора структуры микроэнергосистемы или виртуальной электростанции, в том числе на базе кампуса ДВФУ. Создание такого энергетического и образовательного кластера на о. Русский будет способствовать освоению самых разнообразных технологий Smart Grid. Возможность применения так называемой управляемой нагрузки для коррекции динамических свойств

микроэнергосистемы, которая будет создана на о. Русский, представляет одну из инновационных задач, требующих решения в рамках упомянутого проекта.

Принимая во внимание, что поставка генерирующего оборудования для мини-ТЭЦ о. Русский выполнена зарубежными компаниями, а параметры моделей газовых турбин не всегда достоверны, необходима верификация этих моделей, в том числе их систем регулирования, с тем, чтобы результаты исследований переходных процессов, необходимых для краткосрочного планирования и ведения оперативно-диспетчерской деятельности, соответствовали действительности.

Если будут осуществлены планы ОАО «РусГидро» по развитию в этом регионе ветроэнергетики, то на о. Попова, в непосредственной близости от о. Русский, может быть создан ветропарк, со схемой выдачи мощности в сеть электроснабжения о. Русский. В этом случае будет создана классическая система распределенной генерации, которая также требует адекватного математического моделирования.

Интеллектуализация энергосистем предполагает применение современных методов автоматического управления компонентами генерации и потребления в аварийных и послеаварийных режимах. Одним из направлений исследований в этой области стало применение технологии нечетких множеств или фаззи-логики. Сочетание возможностей управляемой нагрузки и фаззи-контроллеров для противоаварийного управления микроэнергосистемами и виртуальными станциями может быть исследовано на примере сети электроснабжения о. Русский. Эта технология – может стать эффективным решением для минимизации объема управляющих воздействий, формируемых устройствами автоматической частотной разгрузки (АЧР).

Таким образом, результаты выпускной квалификационной работы бакалавра могут способствовать формированию направлений исследований в области Smart Grid на о. Русский. **Результаты работы апробированы автором на XXII научно-практической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем» (Москва, 2014г.).**

1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Энергетика — это основа современной цивилизации, отрасль жизнеобеспечения. Состояние энергетики в стране влияет на состояние всех отраслей производства государства, экономику, политику, уровень жизни населения и даже международное положение государства.

В сопоставлении со сравнительно быстрой модернизацией в электроэнергетической отрасли, наблюдаемой, например, в Германии и некоторых других Европейских странах, развитие электроэнергетики в России последние 20 лет было медленным, структура существенно не менялась. Современная электроэнергетика в России характеризуется высоким уровнем износа (доля устаревшего оборудования составляет свыше 40%), большими потерями (до 10-15%) и низким уровнем надежности [4]. Проблема физического износа генерирующих мощностей усугубляется высоким уровнем их морального износа. Генерирующие мощности в России в основном представляют собой электростанции с паросиловым циклом, КПД которых ниже парогазовых или газотурбинных электростанций, используемых в большинстве развитых стран. [5]

В этих условиях главной стратегической задачей, стоящей перед электроэнергетической отраслью страны, является выбор стратегически правильных решений по развитию электроэнергетики, механизмам и структуре ее управления, обеспечивающих электроэнергетическую безопасность страны, устойчивое развитие и эффективное функционирование электроэнергетической отрасли. В настоящее время перспективным направлением модернизации электроэнергетической отрасли стало применение технологий Smart Grid.

В целом Smart Grid — это энергосистема, в которой передающая и распределительная электрическая сеть используется для двусторонних коммуникаций между электростанциями, потребителями и центрами управления с целью оптимизации процессов электроснабжения и

электропотребления для повышения их эффективности в соответствии с рисунком 1.1.

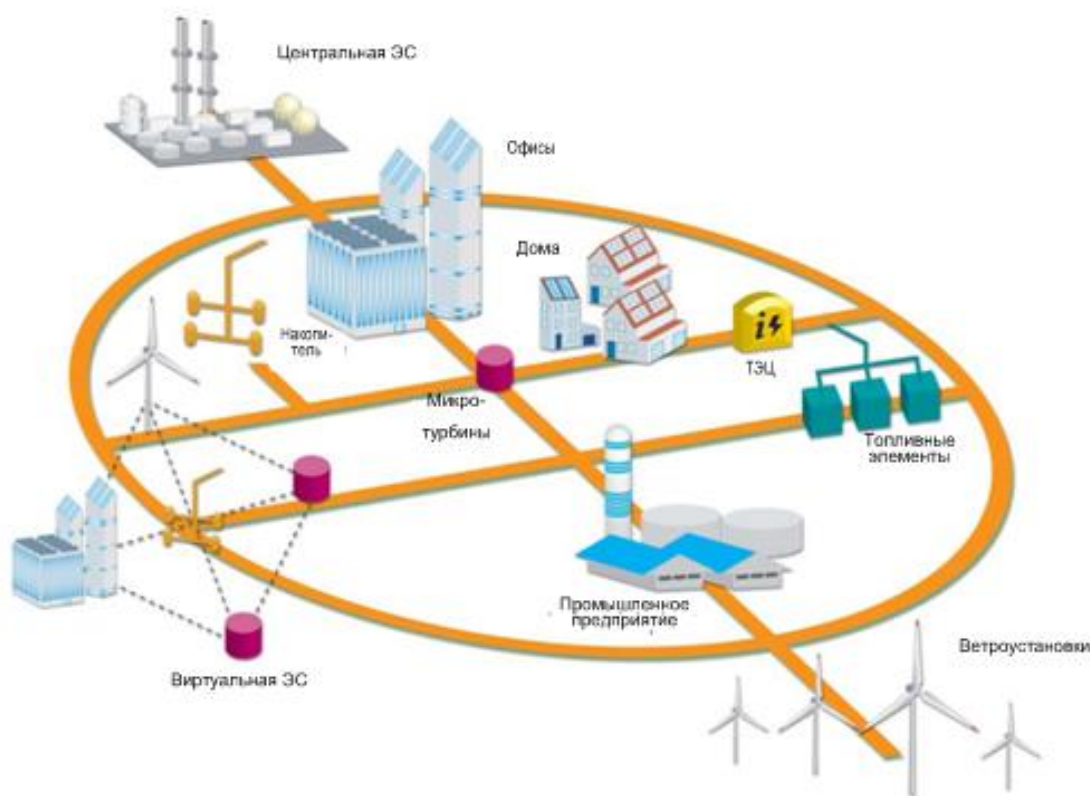


Рисунок 1.1 - Концепция Smart Grid [6]

Одним из компонентов интеллектуальной сети является виртуальная электростанция, объединяющая в себе элементы трех видов:

- Распределенные генераторы (ветроустановки, фотоэлектрические станции, мини- и микроТЭЦ и др.).
- Потребители-регуляторы нагрузки – бытовые и промышленные. Бытовые потребители являются наиболее легко управляемыми нагрузками. Управляемость нагрузки промышленных потребителей в основном зависит от гибкости их технологических процессов. Для некоторых процессов гибкость повышают за счет систем аккумулирования энергии.
- Системы аккумулирования энергии. Эти системы могут накапливать энергию в разных формах (тепловой, электрической, механической и химической). Система аккумулирования энергии выбирается исходя из

области применения и стоимости накопителей с учетом, при необходимости, географического фактора.

Распределенная генерация является важным компонентом интеллектуальной сети. Технология распределенной генерации подразумевает строительство дополнительных источников электроэнергии в непосредственной близости от потребителей. При этом потребитель не отключается от общей сети электроснабжения. В качестве дополнительных источников электроэнергии могут применяться как средства альтернативной энергетики (солнечные батареи, ветровые генераторы, топливные элементы), так и традиционные когенерационные установки (КГУ) малой и средней мощности, работающие на природном газе (как на наиболее чистом виде топлива). В последнем случае благодаря расположению когенерационных установок непосредственно у потребителей, становится возможным использование не только вырабатываемой электроэнергии, но и побочной тепловой энергии на нужды отопления, горячего водоснабжения или абсорбционного холодоснабжения самого владельца КГУ или сторонних потребителей, расположенных поблизости. Это позволяет добиться высокой эффективности использования топлива. [7]

Стоимость электроэнергии ЕЭС включает в себя сетевую составляющую, доля которой в конечной цене для потребителя в среднем по России составляет более 60% (для сравнения, среднемировой показатель — 32%). Поэтому выработка электрической энергии в непосредственной близости от потребителя в 1,5–2,5 раза удешевляет стоимость электроэнергии. [8]

Концепция Smart Grid в России находится сейчас в начальной стадии проработки и требует дополнительных исследований, в том числе и с использованием математических моделей. **Цель настоящей работы состоит в создании математических моделей источников распределенной генерации, а также управляемой нагрузки в качестве компонентов сети электроснабжения** о. Русский для последующего проведения вычислительных экспериментов и анализа полученных результатов.

2 ВИРТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ НА О. РУССКИЙ

2.1 Варианты развития сети электроснабжения о. Русский

Географическое положение о. Русский и конфигурация его сети электроснабжения, в том числе вновь созданного кампуса ДВФУ, позволяет рассматривать о. Русский как уникальную площадку для экспериментальных исследований технологий микроэнергосистем и виртуальных электростанций, поскольку этот регион известен своими возможностями развития солнечной и ветровой энергетики.

Сеть электроснабжения о. Русский как компонент ОЭС Востока, с единственной точкой присоединения этой сети к Приморской энергосистеме, в будущем может представлять собой микроэнергосистему большого размера с установленной мощностью 10-50 МВт.

Три современных когенерационных электростанции на базе газовых турбин и котлов утилизаторов недавно введены в эксплуатацию, и существуют планы создания четвертой. Эскиз существующей энергосистемы острова Русский представлен на рисунке 2.1,а. Сплошные линии черного цвета соответствуют двум цепям кабельной линии 35 кВ, сплошная линия желтого цвета обозначает двухцепную ЛЭП 220 кВ, которая соединяет сети электроснабжения о. Русский и Владивостока.

В случае реализации проекта российской компании «РусГидро» по установке ветровой электростанции на о. Попова (в непосредственной близости от о. Русский), структура электрической сети может принять вид, показанный на рисунке 2.1,б. Здесь пунктирная линия красного цвета обозначает ВЛ 110 кВ.

Учитывая удобное расположение о. Русский для установки волновых электростанций, а также основываясь на том, что использование топливных ячеек стало одним из самых перспективных направлений Smart Grid технологий, можно представить перспективную электрическую схему VPP

острова согласно рисунку 2.1,в. Пунктирные линии черного цвета иллюстрируют возможные ВЛ 35 кВ.

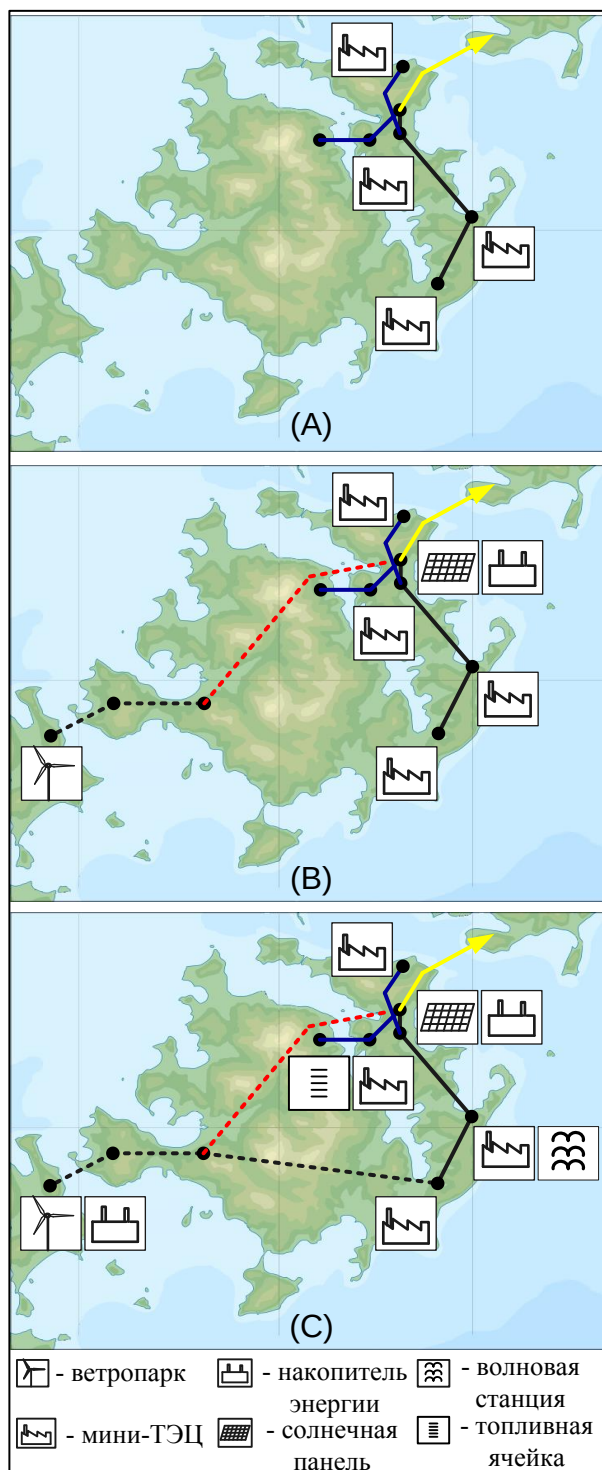
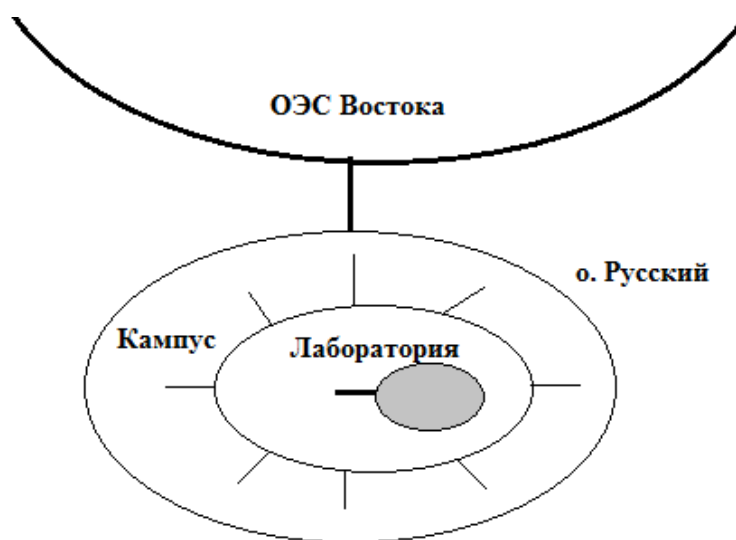


Рисунок 2.1 - Этапы развития энергосистемы о. Русский:

А – существующая энергосистема острова, В– один из вариантов ближайшего развития, С – один из вариантов перспективного развития

2.2 Перспективная схема микроэнергосистемы кампуса ДВФУ

Сеть электроснабжения кампуса ДВФУ, запитанная от ПС “Центральная”, может быть рассмотрена, во-первых, в качестве возможной микроэнергосистемы среднего размера – от 1 МВт до 10 МВт. Во-вторых, принимая во внимание наличие нескольких трансформаторных подстанций 10/0.4 кВ для электроснабжения проектируемого лабораторного кампуса ДВФУ, - в качестве потенциального места реализации технологии виртуальной электростанции. Наконец, учитывая ожидаемый в ближайшее время пуск в эксплуатацию лабораторного корпуса ДВФУ, с единственной точкой присоединения к сети электроснабжения кампуса университета, а также наличие находящихся в распоряжении Инженерной школы ДВФУ площадей этого лабораторного корпуса, нетрудно предположить возможность создания на базе лабораторного корпуса действующей физической модели или собственно микроэнергосистемы малого размера – в несколько сотен кВт. На рисунке 2.2 приведены возможные варианты подключения к сети электроснабжения о. Русский кампуса и лабораторного корпуса ДВФУ.



*Рисунок 2.2 - Варианты подключения к сети электроснабжения
о. Русский кампуса и лабораторного корпуса ДВФУ*

Таким образом, о. Русский может стать полигоном для отработки самых разнообразных коммерческих, технических и информационных решений, в

том числе мультиагентных систем управления [9] в области интеллектуальных энергосистем в России.

На рисунке 2.3 представлена возможная инфраструктура микроэнергосистемы кампуса и/или лабораторного корпуса ДВФУ, которая могла бы содержать опытные образцы солнечных панелей, волновых электростанций, ветроэнергетических установок, топливных ячеек и других типов возобновляемых источников энергии, а также накопителей энергии, микро-турбин, аккумуляторов электромобилей и электровелосипедов как элементов рынка электрической энергии и мощности. Новые технологии управления микроэнергосистемой и виртуальной электростанцией с использованием мультиагентных систем управления позволят эффективно исследовать проблемы микроэнергосистем и служить удобным инструментом для освоения новых технологий в сфере электроэнергетики. Номинальные параметры отдельных компонентов распределенной генерации предложены специалистами ДВФУ [10]; параметры остальных компонентов адаптированы к рассматриваемой микроэнергосистеме.

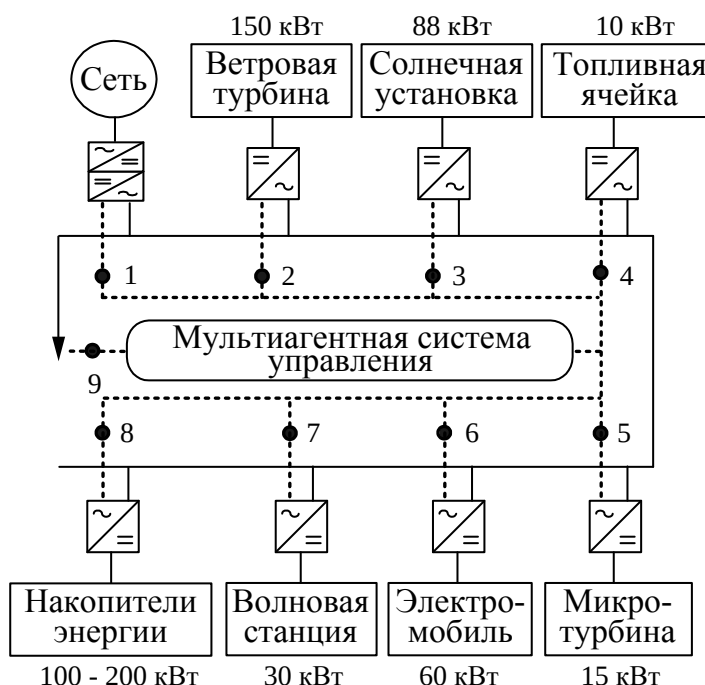


Рисунок 2.3 - Развитие схемы электроснабжения кампуса и/или лабораторного корпуса ДВФУ, 1-9 – агенты

2.3 Выводы по разделу

Остров Русский рассматривается как испытательный полигон для исследования и практической реализации технологий Smart Grid. Представленные варианты развития сети электроснабжения острова могут получить практическую реализацию в ближайшее время. В случае реализации проекта ДВФУ по созданию лабораторного корпуса или даже лабораторного кампуса с опытными образцами современных источников генерации и накопления энергии в России появится полноценная испытательная площадка для освоения новых технологий в сфере электроэнергетики.

3 ТЕСТОВЫЕ МОДЕЛИ МИКРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ

3.1 Расчетная схема сети электроснабжения о. Русский

Одной из особенностей микроэнергосистемы о. Русский может стать возможность её использования в качестве средства автоматического предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) в ОЭС Востока, например, специальной автоматики отключения нагрузки (САОН), с последующим действием на о. Русский устройств АЧР. Поэтому математическая модель микроэнергосистемы должна адекватно отражать переходные процессы в распределенной генерации и быть встроена в модель большой энергосистемы.

В настоящий момент электроснабжение о. Русский происходит по ЛЭП 220 кВ от ОЭС Востока, а на мини-ТЭЦ задействованы лишь водогрейные котлы. В будущем, возможна автономная работа этой сети с самостоятельной электрогенерацией. Условия параллельной работы энергосистемы о. Русский с ОЭС Востока, а также условия аварийного отключения микроэнергосистемы от энергообъединения требуют дополнительных исследований. На этапе предварительного анализа динамических свойств энергокластера о. Русский, использована принципиальная схема, приведенная на рисунке 3.1.

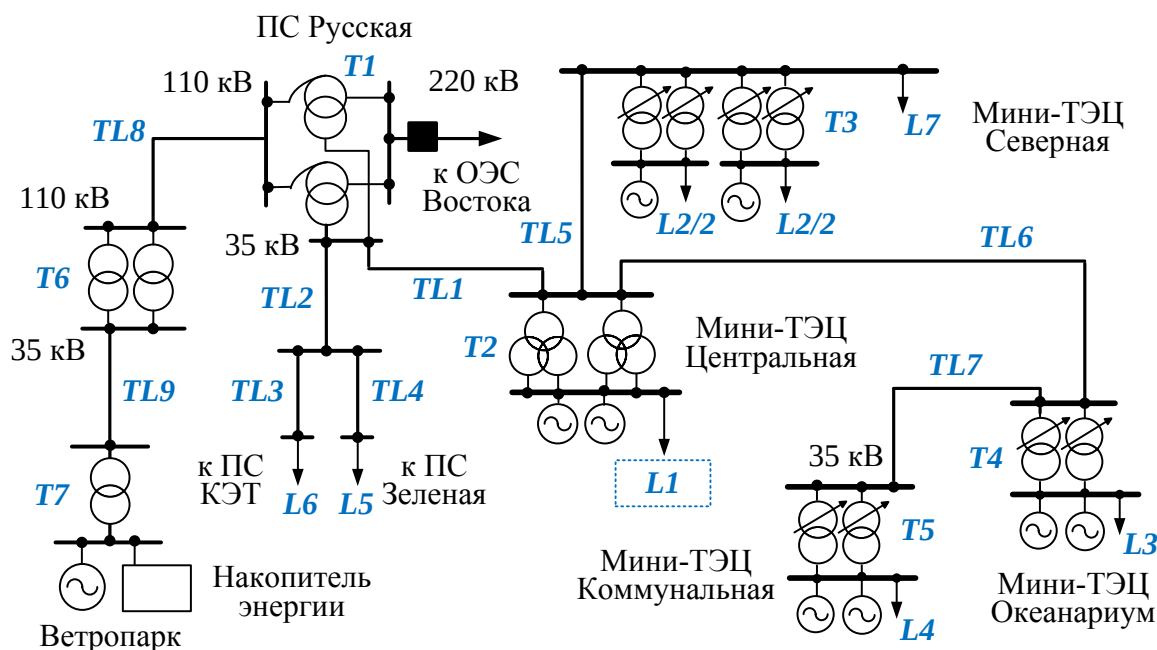


Рисунок 3.1 - Принципиальная схема сети электроснабжения о. Русский

В отличие от однолинейной схемы сети, представленной на рисунке 3.1, в реальной схеме ВЛ выполнены двухцепными, за исключением кабельных линий электропередачи 35 кВ TL3 и TL4, а также ВЛ 110 кВ TL8. Тестовая расчетная схема создана на основе параметров сети электроснабжения, приведенных в таблице 3.1, где символ “G” – обозначает эквивалентную газотурбинную установку, а “D” – эквивалентный резервный дизель-генератор.

Таблица 3.1 – Параметры базового режима

Генерация			Нагрузка		ЛЭП	
Название станции	Установленная мощность, МВт	Рабочая мощность, МВт	Название узла	Мощность нагрузки, МВт	Название ЛЭП	Длина линии, км
Северная-G	5 x 6,6	5 x 6,6	L1	34,5	TL1	0,15
Северная-D	2 x 1	0	L2	0,4	TL2	5
Центральная-G	2 x 1,8	2 x 1,8	L3	16,1	TL3	1
Центральная-D	2 x 1	0	L4	2,1	TL4	1
Океанариум-G	2 x 6,6	2 x 6,6	L5	16,3	TL5	2
Океанариум-D	2 x 1	0	L6	6,3	TL6	6
Коммунальная-G	2 x 1,5	2 x 1,5	L7	4,0	TL7	3,7
Коммунальная-D	2 x 0,4	0	Σ	79,6	TL8	11,1
Ветропарк	5 x 2,3	5 x 2,3	Импорт	14,5	TL9	4,7
Σ	73,1	66,3				

Предварительные расчеты проведены в предположении, что все нагрузки замещены постоянными сопротивлениями, за исключением нагрузки L1, представленной двумя частями: 70% – постоянным сопротивлением, и 30% – управляемой нагрузкой, представленной активной и реактивной мощностью. Параметры силового оборудования приведены в приложении А.

Практическая реализация этой схемы в формате MATLAB/Simulink/SimPowerSystems показана на рисунке 3.2. Каждая станция представлена эквивалентным генератором - прямоугольником с изображением электрической станции. Здесь же показана модель ветровой станции.

Прямоугольники серого цвета символизируют силовые трансформаторы. Блоки с изображением жилого дома - это эквивалентные нагрузки. Прямоугольники с изображениями кабельных и воздушных линий – модели линий электропередачи. Модель ОЭС Востока представлена ПС Зеленый Угол. Смешанная нагрузка L1 представлена прямоугольником с изображением кампуса ДВФУ. Остальная нагрузка приведена к напряжению 35 кВ, за исключением нагрузки собственных нужд мини-ТЭЦ.

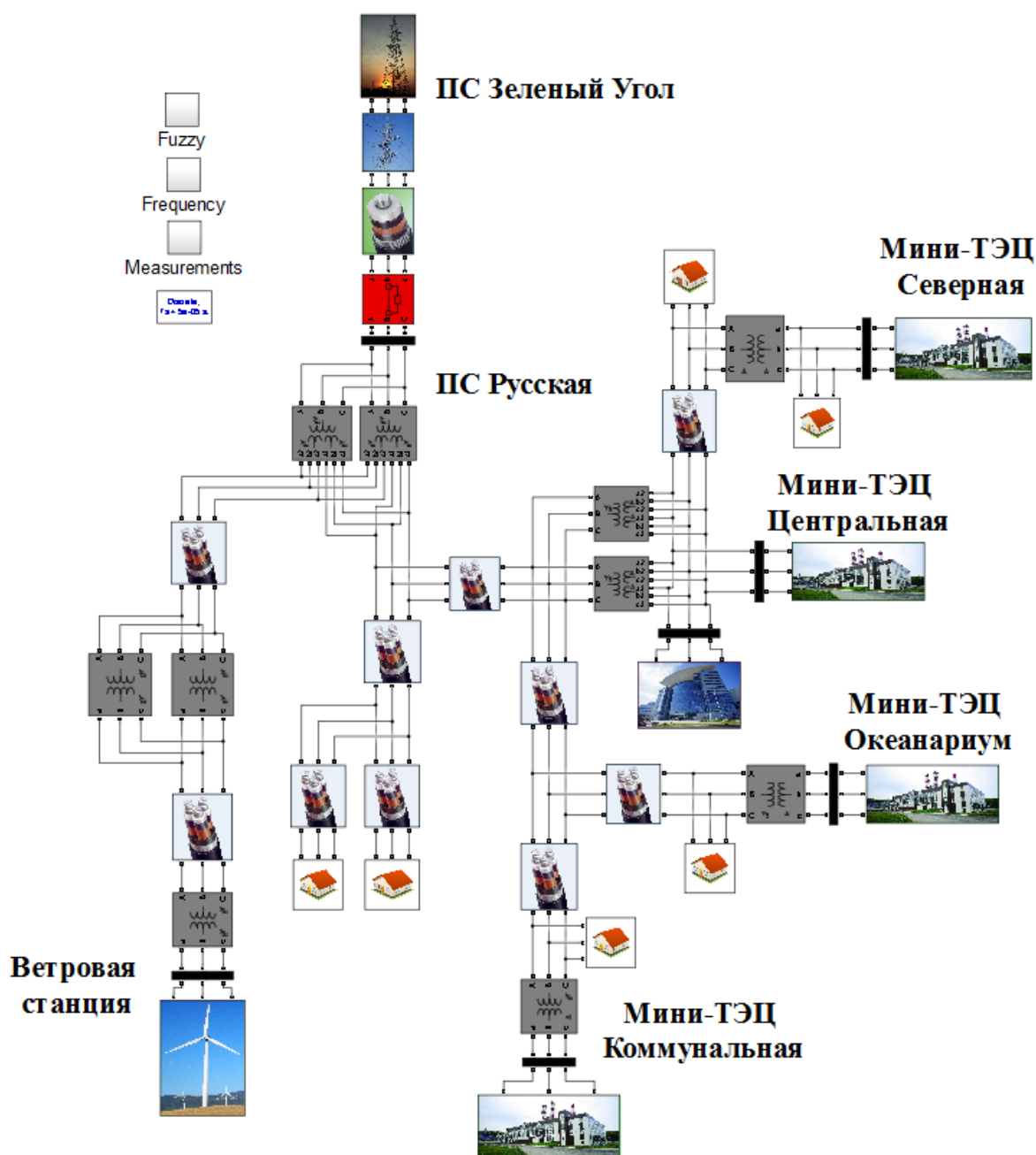


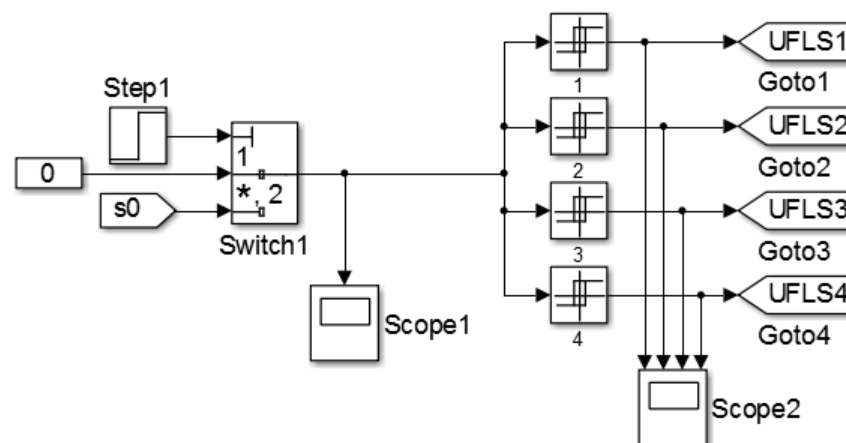
Рисунок 3.2 - Модель сети электроснабжения о. Русский в ПК MATLAB/Simulink/SimPowerSystems.

3.2 Модели устройств управления

Модель устройства АЧР выбрана типовой для российских энергосистем: диапазон уставок срабатывания - от 48.8 Гц до 46.5 Гц с шагом 0.2 Гц [11]. Предполагалось, что устройства АЧР размещены на всех ПС 35 кВ; мощность отключаемых каждой ступенью АЧР потребителей электроэнергии составляла 5% от исходной мощности нагрузки в узле. Кроме того, были сделаны следующие допущения:

1. Предполагалось существование связи 220 кВ между сетями электроснабжения о. Русский и Владивостока;
2. Резервные дизель-генераторы энергоблоков мини-ТЭЦ не учитывались;
3. Мощности нагрузки могли не отражать реально существующие из-за отсутствия достоверных данных о них.

Внезапная потеря связи сети электроснабжения о. Русский с Приморской энергосистемой и возникающий небаланс мощности вызывает срабатывание традиционных средств противоаварийного управления - устройств АЧР. На рис. 6 представлена модель устройства АЧР в ПК MATLAB.



*Рисунок 3.3 – модель устройства АЧР в ПК
MATLAB/Simulink/SimPowerSystems*

Входным параметром для управления выступает средневзвешенное отклонение угловой скорости вращения турбин от номинальной (блок s0). С

помощью блока Step1 можно управлять временем включения устройства АЧР в работу посредством изменения положения ключа Switch1 ($\text{Step1}=0 \Rightarrow 0$, $\text{Step1}=1 \Rightarrow s_0$). Далее сигнал поступает на реле 1,2,3,4. Реле 1 имеет порог срабатывания 0,024, реле 2 – 0,028, реле 3 – 0,032 и реле 4 – 0,036. При достижении реле порога срабатывания формируется сигнал об отключении соответствующей ступени АЧР.

В рассматриваемом случае дополнительным средством служила управляемая по параметрам переходного процесса нагрузка, с тем, чтобы демпфировать возникающие в результате аварийного возмущения и действия устройств противоаварийной автоматики колебания частоты и активной мощности, а также сократить объем отключения потребителей устройствами АЧР. Как правило, управляемую нагрузку рассматривают как средство управления установившимися режимами. Впрочем, нет явных препятствий для её использования в качестве средства управления переходными режимами. Предполагалось, что одним из компонентов управляемой нагрузки может быть быстродействующий накопитель энергии, на настоящем этапе исследований моделируемый изменением мощности нагрузки. Одно из основных требований к таким устройствам с точки зрения управления переходными режимами - малое время отклика на сигнал управления.

Как известно, приоритетным направлением управления в интеллектуальных энергосистемах стало применение методов теории нечетких множеств. Для задачи, решаемой в рамках настоящей работы, можно использовать методы теории нечетких множеств для регулирования активной мощности управляемой нагрузки с помощью фаззи-контроллера. Результат моделирования действия фаззи-контроллера на примере расчетной схемы сети электроснабжения о. Русский мог бы показать перспективность решения задачи демпфирования колебаний параметров режима предлагаемым способом.

3.2.1 Обзор применения нечеткой логики в электроэнергетике

Теория нечетких множеств (fuzzy sets theory) ведет свое начало с 1965г., когда профессор Лотфи Заде (Lotfi Zadeh) из университета Беркли опубликовал основополагающую работу “Fuzzy Sets” в журнале “Information and Control” [12]. За прошедшие полвека на основании этой теории был сформулирован целый раздел математики, соединивший в себе классическую логику и теорию множеств. А если учесть, что это происходило в век массовой компьютеризации науки и образования в мире, то в скором времени на принципах нечеткой логики стали строиться практически все инновационные проекты, использующие искусственный интеллект. Электроэнергетика, как одна из ведущих отраслей мировой экономики, не могла остаться в стороне от этого процесса.

Перспективным направлением интеллектуализации энергетической отрасли стало исследование и внедрение технологии управляемых гибких электропередач переменного тока или, в соответствии с терминологией IEEE, Flexible AC Transmission Systems (FACTS). Основная задача технологии FACTS - повышение эффективности управления потоками мощности, регулирования напряжения, обеспечение статической или динамической устойчивости. [13]

Установка в сети нескольких устройств FACTS (например тиристорных управляемых источников реактивной мощности) предполагает наличие централизованной системы управления этими устройствами с целью исключения негативных воздействий от индивидуальных управляющих сигналов [14]. Обычно применяемый линейный подход к синтезу регуляторов на основе устройств FACTS учитывает, как правило, одну рабочую точку. При изменении режима ЭЭС необходимо корректировать параметры регулятора. Кроме того, на параметры ЭЭС оказывает влияние работа самих устройств FACTS. Нелинейность моделей ЭЭС, их параметрическая неопределенность и непредсказуемые в аварийных ситуациях изменения их режимов работы существенно затрудняют задачу синтеза координированного (согласованного)

управления. Применение методов нечеткой логики наряду с традиционными численными методами позволяет решить вышеуказанные проблемы. Регуляторы на основе нечеткой логики не требуют знания полной математической модели исследуемой системы, являются робастными (грубыми) к действию параметрических и структурных возмущений и способны функционировать в широком диапазоне режимов работы системы [13].

Возросший в последние годы интерес к нетрадиционной и возобновляемой энергетике открывает новые возможности для применения методов теории нечетких множеств. Одно из перспективных направлений модернизации старых систем генерации - ветроэнергетика. Но из-за стохастического характера генерации в автономной системе с ветрогенератором практически невозможно обеспечить требования к надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей. Гибридная ветро-дизельная система, предложенная в [15,16], очевидно, не имеет такого недостатка. Но, случайный характер ветра и большая неравномерность нагрузки могут привести к существенным колебаниям мощности в сети. В худшем случае может произойти потеря устойчивости, если частота в системе не будет поддерживаться в приемлемом диапазоне. Для регуляторов скорости дизельных турбин нашли широкое применение ПИ-контроллеры. Однако, так как обычные ПИ-контроллеры с фиксированными коэффициентами усиления предназначены для работы при номинальных условиях эксплуатации, то при широком диапазоне изменения рабочих условий такие контроллеры показывают плохие динамические характеристики. Исследования, приведенные в [17], показывают, что применение фаззи-контроллера значительно улучшает показатели качества системы регулирования при изменении нагрузки и интенсивности ветровых потоков.

В [18] описано применение методов фаззи-логики для целей повышения эффективности захвата энергии ветровыми турбинами.

Применение методов нечеткой логики эффективно и в таком классическом виде повышения динамической устойчивости как электрическое торможение. Электрическое торможение генератора происходит путем введения нагрузочных резисторов в цепь выдачи мощности генератора. Схемы включения тормозных резисторов описаны в [19]. В [20] исследовано применение нечеткой логики для управления нагрузочным резистором. На контроллер, реализованный на принципах нечеткой логики, подается сигнал об изменении скорости вращения ротора генератора. На выходе фаззи контроллера формируется сигнал для управления углом зажигания тиристора, который контролирует нагрузочный резистор, как показано на рисунке 3.4.

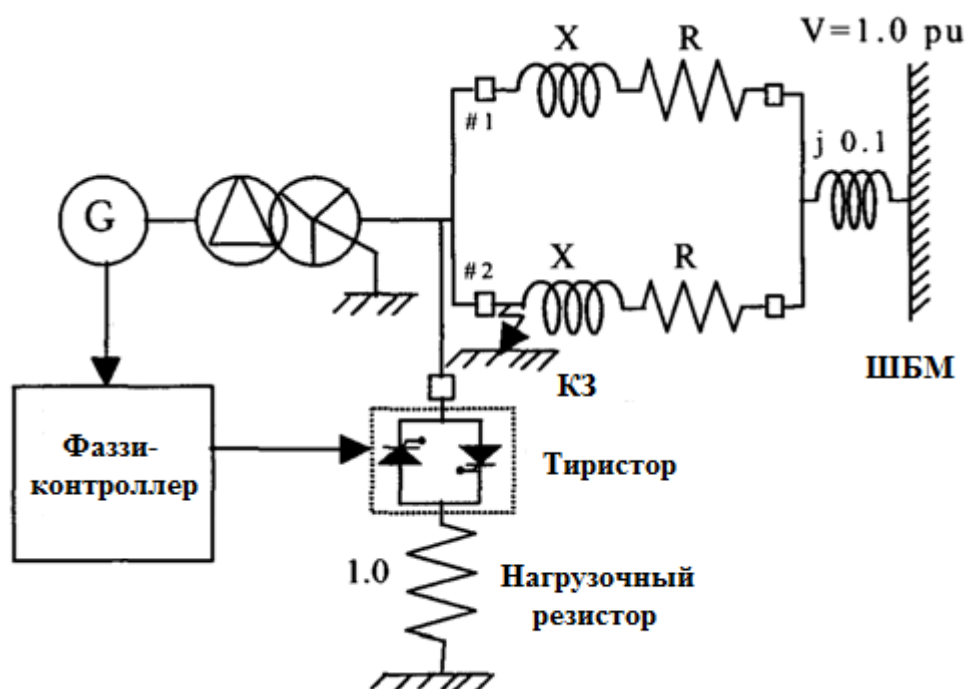


Рисунок 3.4 – Схема включения нагрузочного резистора [20]

Вышеизложенная схема позволяет просто и эффективно осуществлять контроль за ускорением вращения ротора и тем самым улучшить динамическую устойчивость.

Инновация в системе регулирования возбуждения генератора – стабилизатор на основе нечеткой логики. Стабилизаторы широко используются для улучшения стабильности синхронных генераторов в энергосистемах. Обычные стабилизаторы имеют постоянные параметры,

настроенные для одной рабочей точки и могут эксплуатироваться с оптимальной производительностью в номинальных условиях. Поскольку характеристики элементов системы питания являются нелинейными, обычные стабилизаторы не способны обеспечить оптимальную производительность для всех условий эксплуатации [21]. На настоящий момент разработано множество схем управления для улучшения динамических характеристик генераторов. Одна из них – на основе методов теории нечеткой логики. Нечеткое управление – наиболее подходящее для данных целей средство благодаря надежности и простоте вычислений. Результаты исследований, описанные в [22], показывают, что фаззи-контроллер не подвержен влиянию условий эксплуатации и достаточно быстро реагирует на изменение входной величины.

Таким образом, применение методов нечеткой логики – перспективное направление исследований в различных областях электроэнергетики.

3.2.2 Модель фаззи-контроллера в ПК MATLAB/Simulink

Широкому распространению фаззи-систем управления в немалой степени способствует ПК MATLAB, в состав которого включен пакет программ по фаззи-логике - Fuzzy Logic Toolbox. Базовым понятием Fuzzy Logic Toolbox является FIS-структура - система нечеткого вывода (Fuzzy Inference System). Типовая структура системы нечеткого вывода показана на рисунке 3.5. Она содержит следующие модули:

- Фазификатор, преобразующий фиксированный вектор влияющих факторов (x) в вектор нечетких множеств $\tilde{x}$, необходимых для нечеткого вывода;
- Нечеткая база знаний, содержащая информацию о зависимости $y = f(x)$ в виде лингвистических правил <Если – то>;
- Функции принадлежности, используемые для представления лингвистических термов (лингвистические оценки) в виде нечетких множеств;
- Машина нечеткого логического вывода, которая на основе правил базы знаний определяет значение выходной переменной в виде нечеткого множества $\tilde{y}$, соответствующего нечетким значениям входных переменных ($\tilde{x}$);
- Дефазификатор, преобразующий выходное нечеткое множество $\tilde{y}$ в четкое число y .

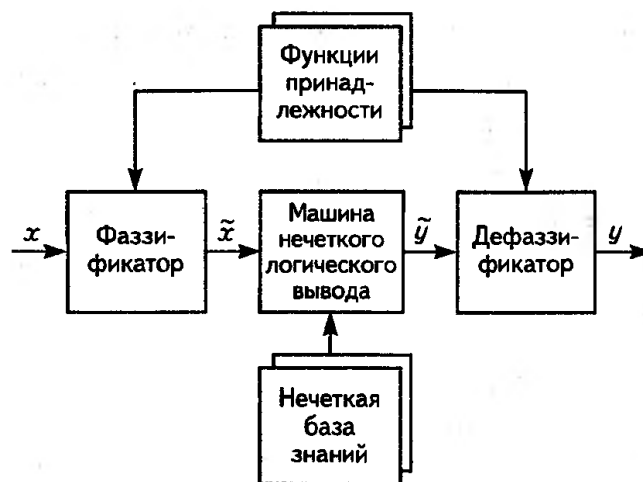


Рисунок 3.5 – Структура системы нечеткого вывода [23]

Фаззи-контроллер, как было отмечено выше, управляет 30% нагрузки L1. Входным сигналом для контроллера служит отклонение частоты сети от 50 Гц, выходным – изменение мощности управляемой нагрузки. Для нечеткого вывода использован алгоритм Мамдани [24].

Изменяя количество и вид функций принадлежности, можно получить разнообразные зависимости выходной переменной от входной. Например, возьмем по 3 входных и выходных функций принадлежности, как показано на рисунке 3.6.

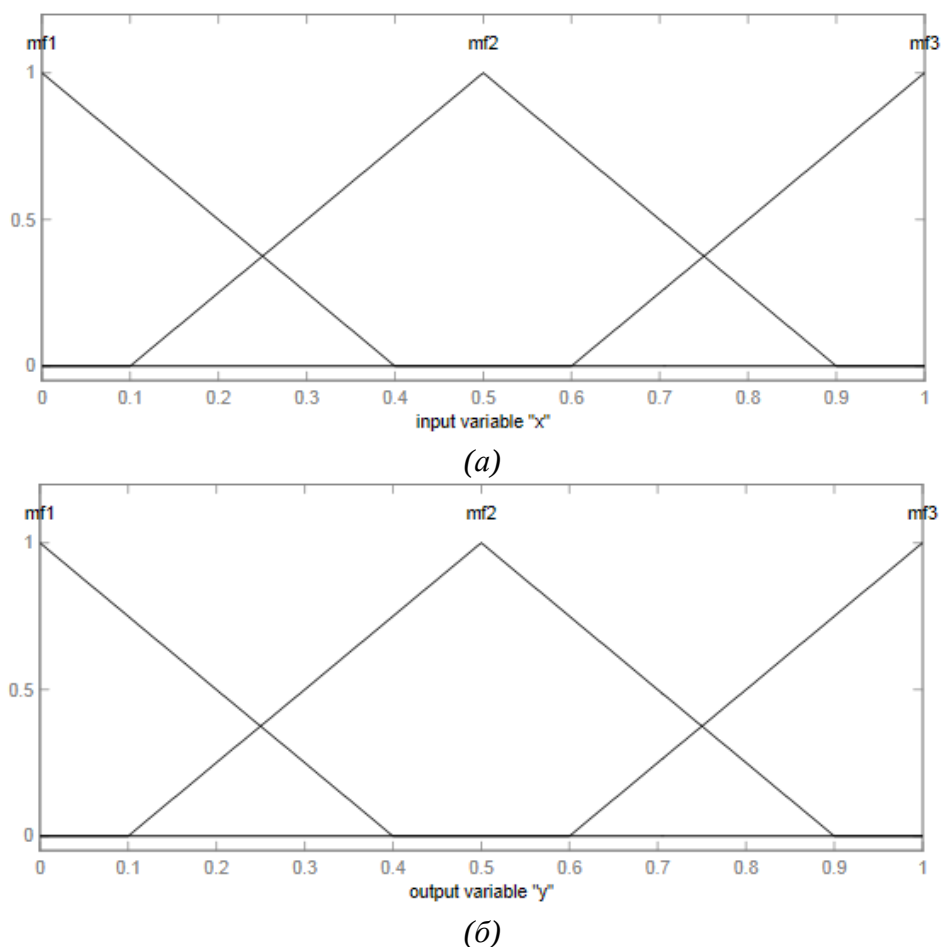


Рисунок 3.6 – Входная (а) и выходная (б) функции принадлежности

Получим график зависимости выходной переменной от входной, представленный на рисунке 3.7.

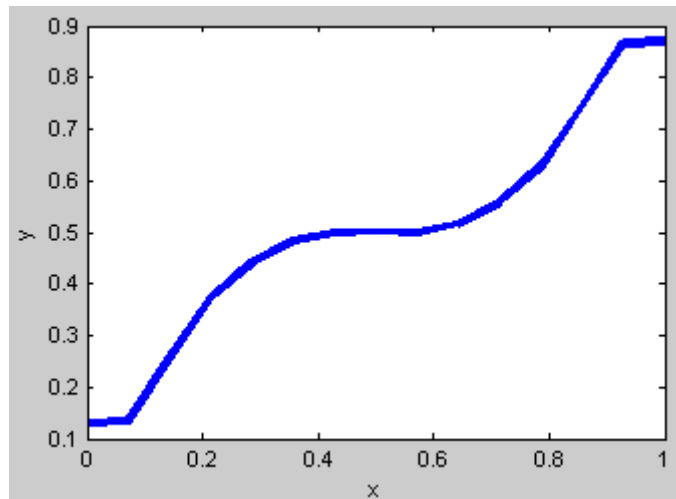
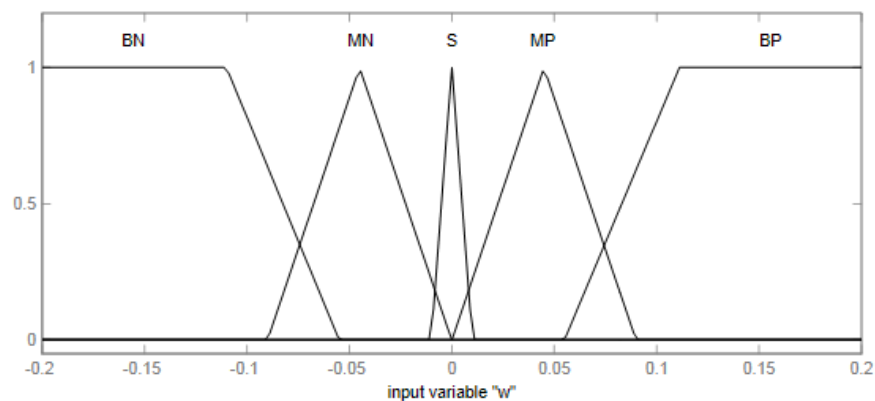
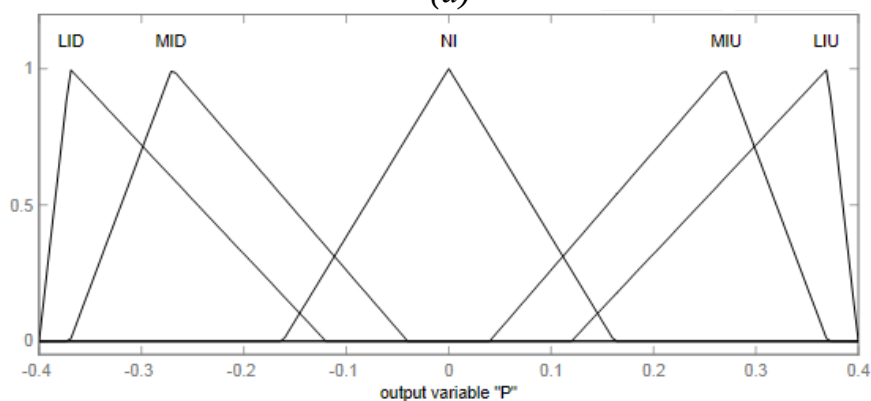


Рисунок 3.7 – График зависимости выходной переменной от входной

В рамках данной работы фаззи-контроллер применяется для регулирования активной мощности управляемой нагрузки в зависимости от изменения частоты в сети. Следовательно, функция, приведенная на рисунке 3.7, для такой цели не подойдет. Путем перебора сочетаний количества и видов функций принадлежности была получена функция I, представленная на рисунках 3.8 и 3.9.



(a)



(б)

Рисунок 3.8 - Входная (a) и выходная (б) функции принадлежности функции I

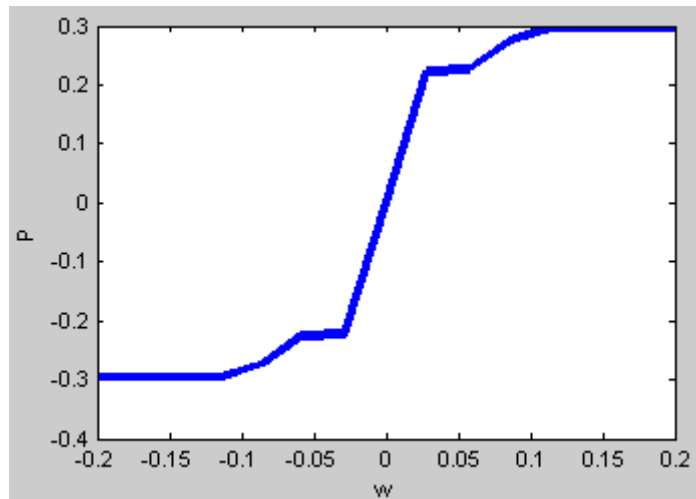


Рисунок 3.9 – График зависимости выходной переменной от входной функции I

Входной переменной для фаззи-контроллера служит отклонение частоты в диапазоне $[-0,2 \dots 0,2]$ Гц, выходной – изменение мощности управляемой нагрузки в диапазоне $[-30 \dots 30]$ %.

3.3 Модель газовой турбины

Очень привлекательным и актуальным для России является использование когенерации, в том числе модернизация старых ТЭС. На рисунке 3.10 приведена схема когенерационной установки.

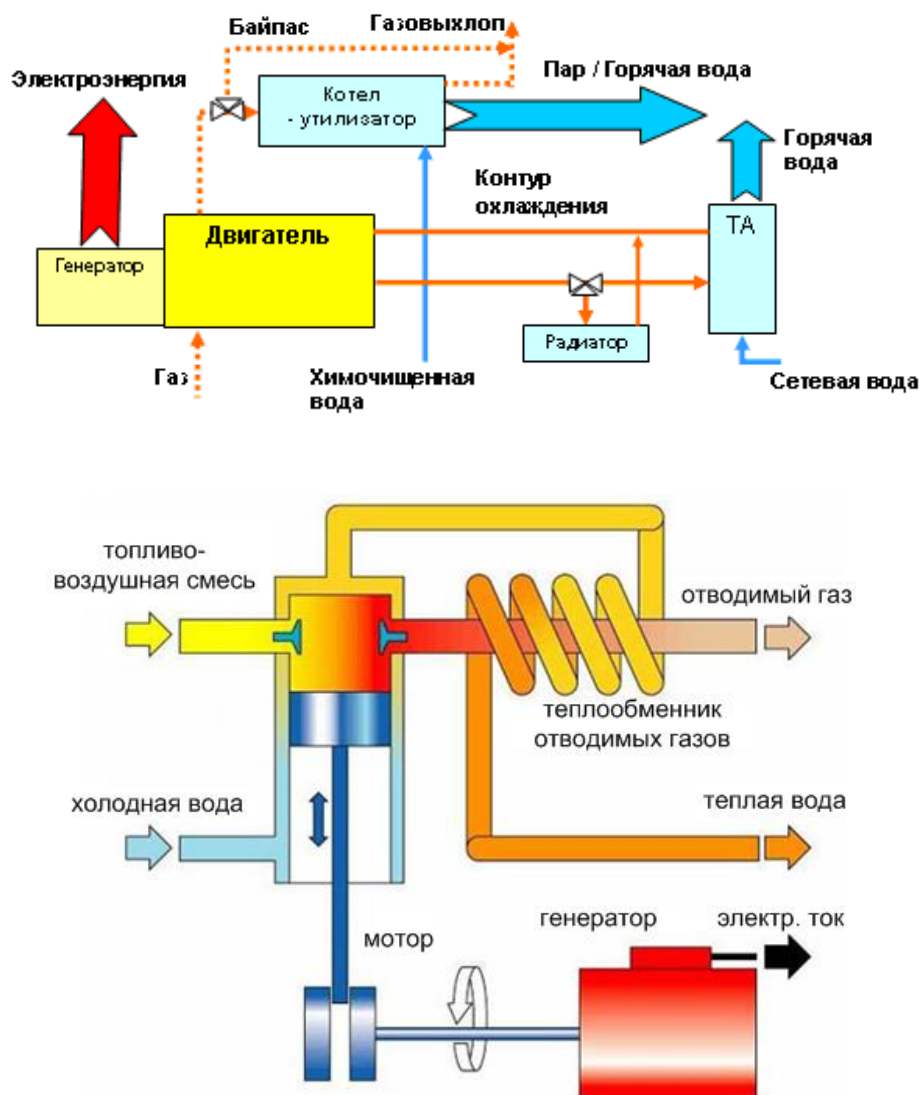


Рисунок 3.10 - Схема когенерационной установки [25]

В настоящее время достаточно популярны малые когенерационные установки на газе (приблизительно две трети генерирующих мощностей когенерационных станций приходится на газотурбинные установки (ГТУ) [26]). Россия имеет огромные запасы природного газа и решение проблем электро- и теплоснабжения на базе малых (до 30 МВт) когенерационных

электростанций на газе, прежде всего газотурбинных, является привлекательной перспективой. Такие малые когенерационные установки имеют много преимуществ по сравнению с традиционными: эффективное производство электроэнергии и тепла, близость к потребителям, отсутствие дорогих линий электропередачи и подстанций, малое экологическое влияние, мобильность, простота установки.[6]

Сравнительный анализ и обзор различных моделей газовых турбин представлен в [27,28,29]. Так как исследование сети теплоснабжения о. Русский не является целью данной работы, то для анализа динамических свойств газовой турбины в составе сети электроснабжения острова отлично подойдет модель Rowen [30], представленная на рисунке 3.11. Кроме того, модель пригодна для изучения динамических свойств системы в условиях изменения частоты в аварийных режимах [31].

Динамические свойства турбины определяют в основном функциональные блоки f_1 и f_2 . Функции этих блоков зависят от скорости ротора и количества поступающего энергоносителя. Первый блок вычисляет температуру выхлопных газов турбины, второй – определяет механический момент турбины. Формирование сигнала о необходимом объеме подачи топлива V_c происходит в блоке выбора наименьшего из значений параметров регулирования [28].

За поддержание выходных параметров газовой турбины (момента и температуры выхлопных газов) в допустимых пределах отвечают три канала регулирования положения топливной заслонки - по скорости вращения ротора турбины, по первой производной скорости и по температуре выхлопных газов, как показано на рисунке 3.12.

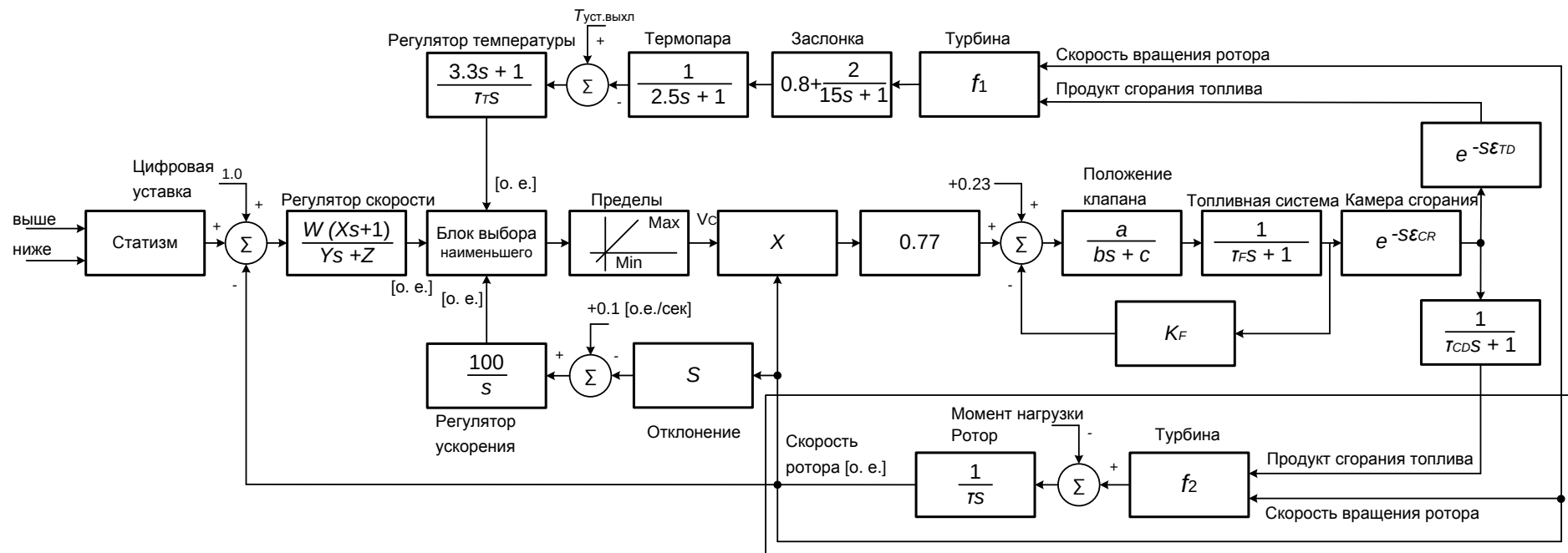


Рисунок 3.11 – Газовая турбина, представленная моделью Rowen

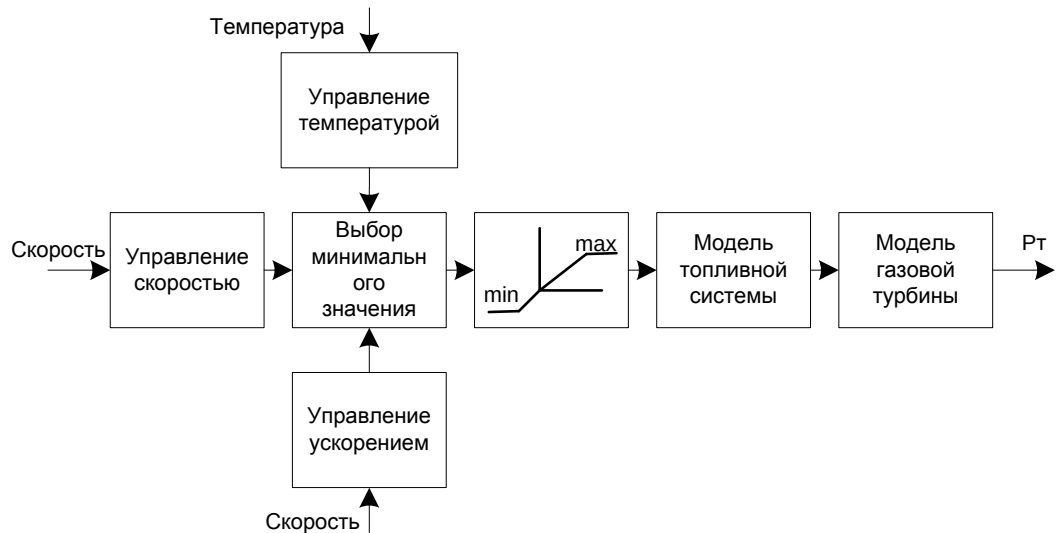


Рисунок 3.12 – Функциональная схема модели газовой турбины Rowen

Регулирование по трем каналам – весьма долгий и ёмкий процесс. Поэтому, для упрощения расчетов принято, что каналы регулирования по ускорению и по температуре выхлопных газов не учитывались.

На рисунке 3.13 представлена модель газовой турбины и синхронного генератора в формате MATLAB/Simulink/SimPowerSystems. Синхронный генератор представлен моделью шестого порядка. В моделях также использованы стандартные параметры MATLAB/Simulink/SimPowerSystems APB и APC.

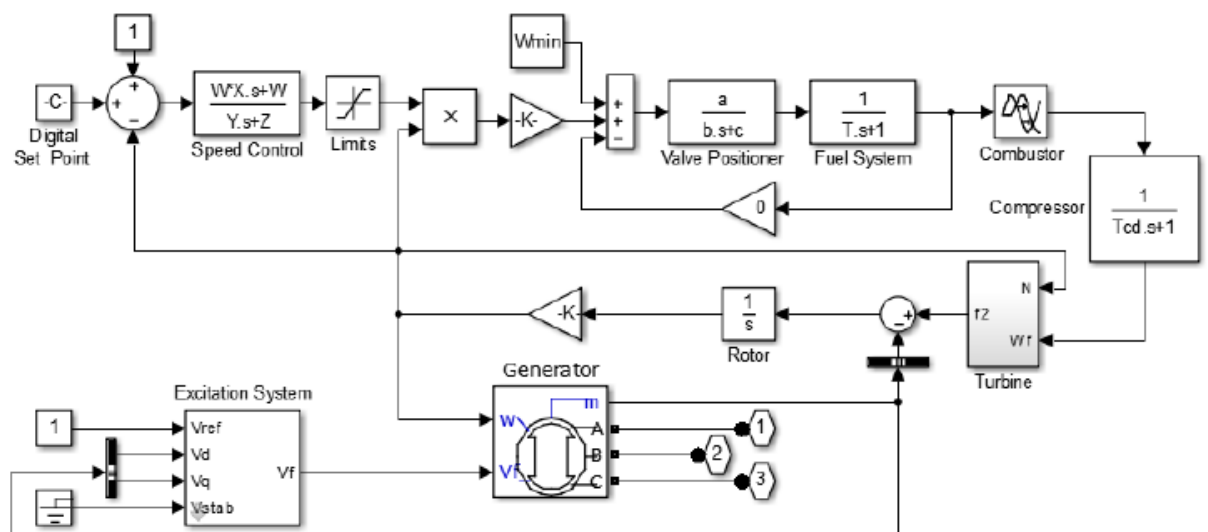


Рисунок 3.13 – Модель газовой турбины и синхронного генератора

3.4 Модель ветрогенератора

Всё большую популярность приобретают ветроэлектрические установки (ВЭУ) в качестве источников энергии в составе распределенной генерации. ВЭУ классифицируются по устройству, типу генератора, типу подсоединения к сети, типу системы управления, а также особенностям функционирования. [6]

Обзор ВЭУ по типу генератора представлен в [32].

В настоящее время большую популярность приобретают ВЭУ на базе машины двойного питания (МДП), из-за преимуществ работы при переменной скорости с минимальными затратами [33]. На рисунке 3.14 представлена общая схема ВЭУ на базе МДП.

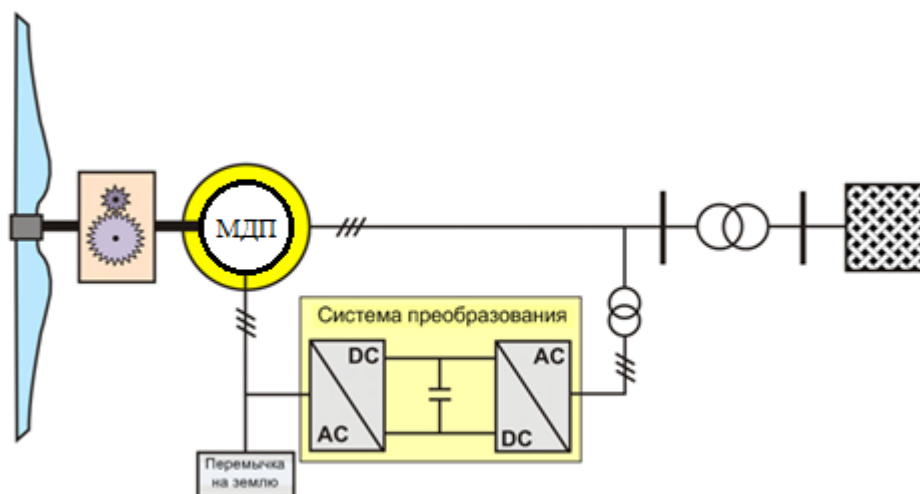
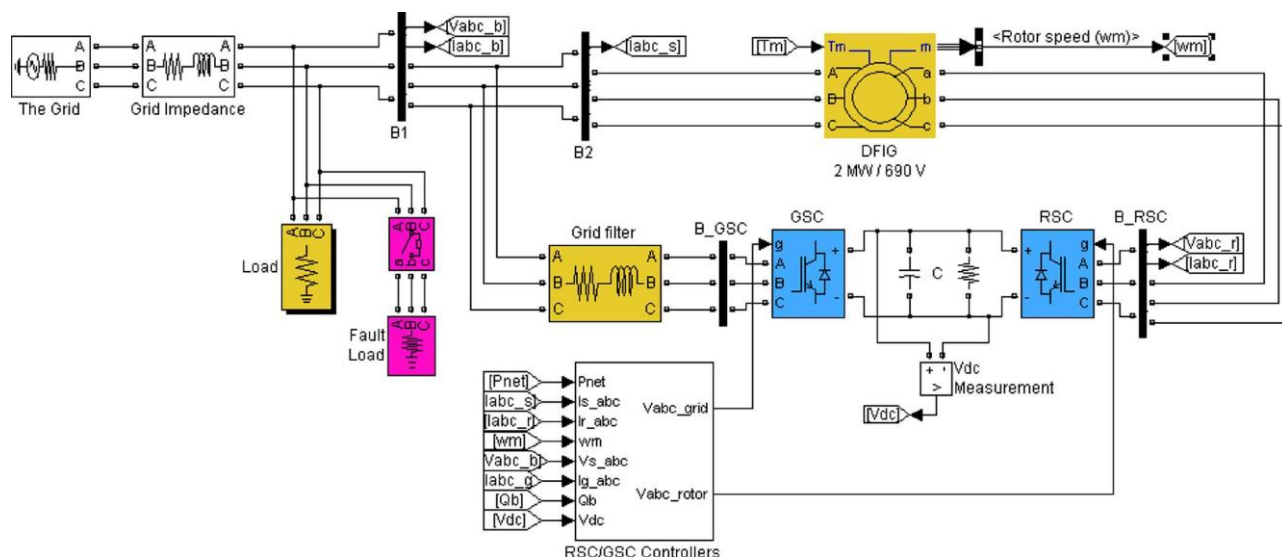


Рисунок 3.14 - Общая схема ВЭУ с МДП [34]

Цепь ротора включена в сеть при помощи электронного силового преобразователя, что позволяет рассчитывать преобразователь не на полную мощность машины, как например при включении преобразователя в силовые цепи статора, а примерно на одну треть. [35] Устройство преобразователя позволяет изменять угловую скорость вращения магнитного поля в определенном интервале (в воздушном зазоре создается дополнительное магнитное поле, равное разности частоты сети и частоты вращения ротора генератора). Этот диапазон ограничен как механическими параметрами ВЭУ (например, максимальное значение механического напряжения), так и техническими характеристиками устройства преобразователя. Большинство

На рисунке 3.15 приведена стандартная модель ветрогенератора на базе МДП в ПК MATLAB/Simulink.



Принцип управления моделью, показанной на рисунке 3.15, проиллюстрирован на рисунке 3.16.

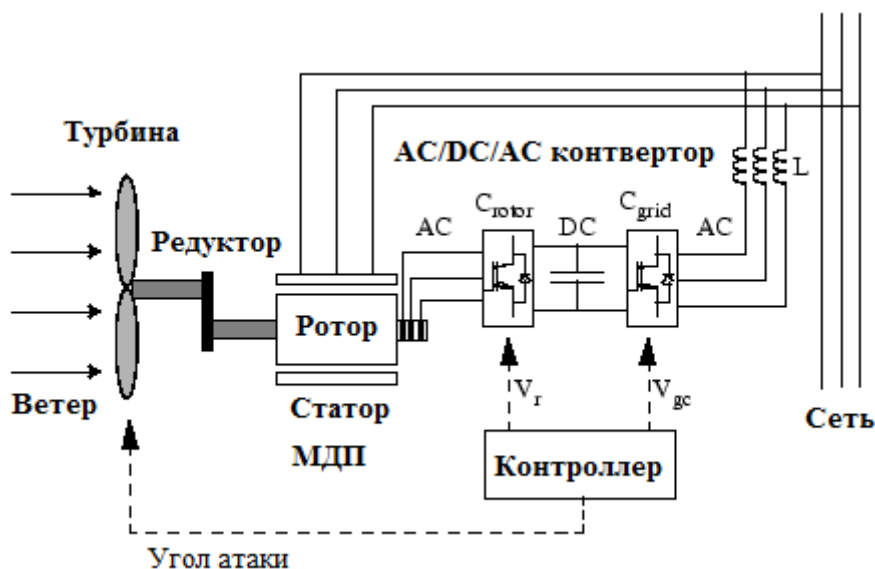


Рисунок 3.16 – Принцип управления ВЭУ с МДП

Система управления реализует контроль за углом атаки лопастей турбины, а также за конверторами со стороны сети и со стороны ротора, для регулирования мощности турбины, напряжения постоянного тока, а также напряжения, выдаваемого в сеть.

3.5 Выводы по разделу

Рассмотрены модели основных элементов энергосистемы о. Русский.

- Модель устройства АЧР, содержащая 4 очереди отключения, является типовой для российских энергосистем;
- Модель управляемой фаззи-контроллером нагрузки представлена изменением активной и реактивной мощности;
- Модель фаззи-контроллера сформирована в интерфейсе Fuzzy Inference System (FIS) ПК MATLAB/Simulink. Для нечеткого вывода использован алгоритм Мамдани.
- Модель газовой турбины представлена моделью Rowen и использует только один канал регулирования – по скорости вращения ротора турбины;
- Модель ветрогенератора на базе МДП является стандартным блоком ПК MATLAB/Simulink/SimPowerSystems и реализует контроль за углом атаки турбины, а также конвертором со стороны ротора и конвертером со стороны сети.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве расчетных возмущений в вычислительных экспериментах в нормальном и утяжеленном режимах рассмотрено аварийное отключение ЛЭП 220 кВ, связывающую о. Русский и Приморскую энергосистему, а также успешное АПВ на ЛЭП.

Исходные данные для расчета базового режима приведены в таблице 1.1.

4.1 Совместное действие управляемой нагрузки и АЧР

Из рисунка 4.1 следует, что совместное использование устройств АЧР и управляемой нагрузки для противоаварийного управления в сети электроснабжения о. Русский может стать одним из возможных средств ПА и обеспечить эффективное демпфирование низкочастотных колебаний параметров режима. В фаззи-контроллере реализована функция I , представленная в главе 3.2.2 на рисунках 3.8 и 3.9.

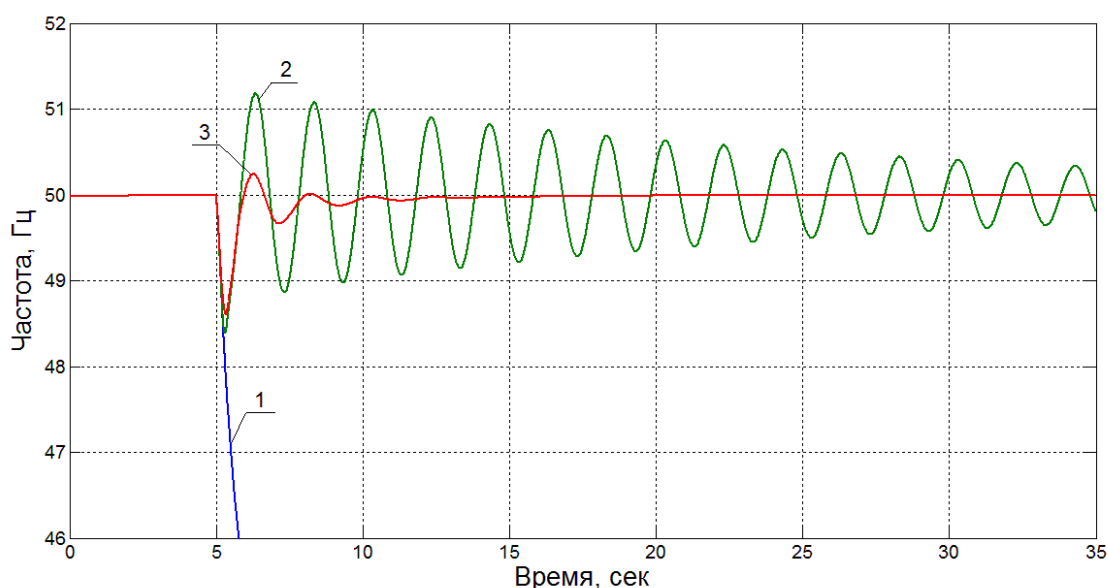


Рисунок 4.1 - Частота сети в нормальном режиме

1 – без управляющих воздействий, 2 – с действием АЧР, 3 – с действием АЧР и управляемой нагрузки

Из рисунка 4.2 следует, что применение регулируемой нагрузки под управлением фаззи-контроллера снижает объем отключения потребителей устройствами АЧР.

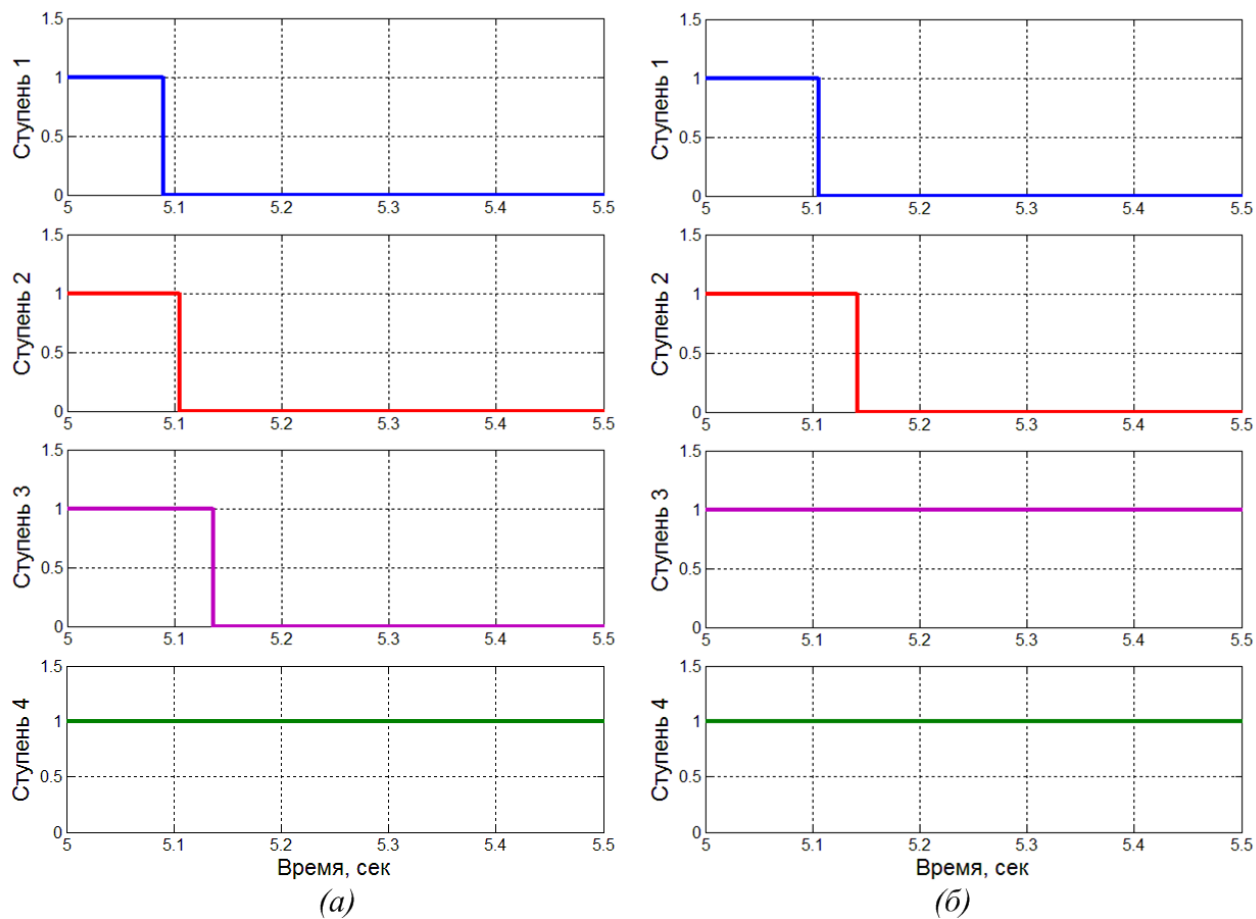


Рисунок 4.2 - Срабатывание ступеней АЧР

а – только АЧР, б – АЧР и фаззи-контроллер

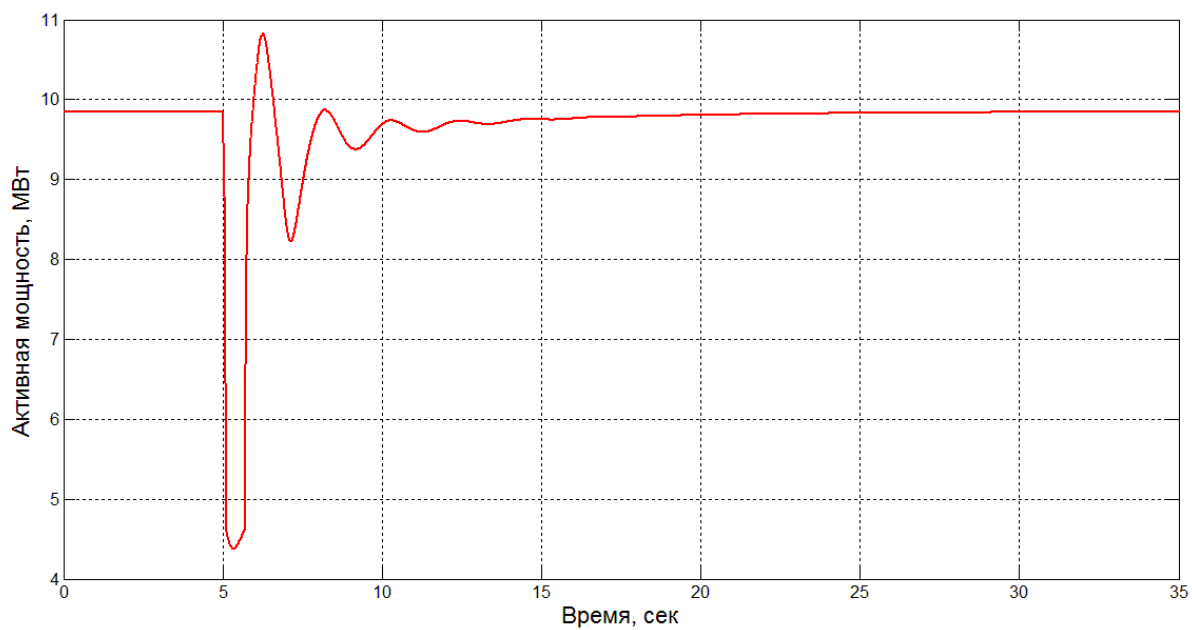


Рисунок 4.3 - Изменение активной мощности управляемой нагрузки

4.2 Исследование влияния различных функций принадлежности на качество переходных процессов

Для исследования влияния функций принадлежности фаззи-контроллера на изменение частоты системы рассмотрены следующие функции:

1. Функция II

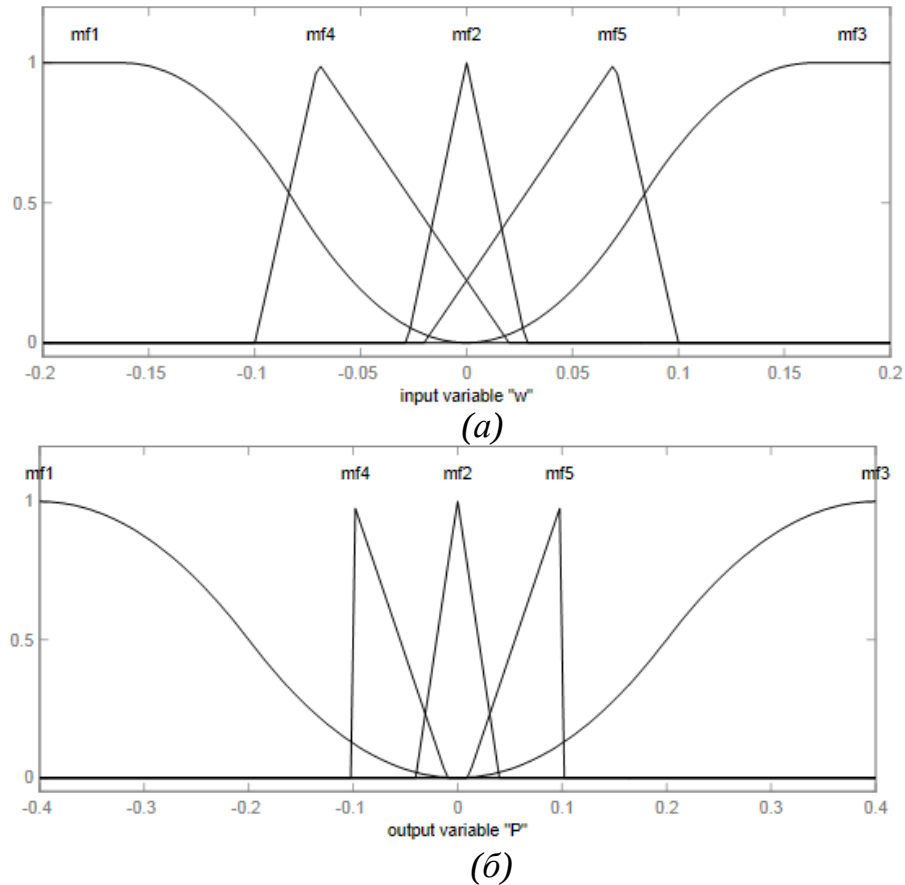


Рисунок 4.4 - Входная (а) и выходная (б) функции принадлежности функции II

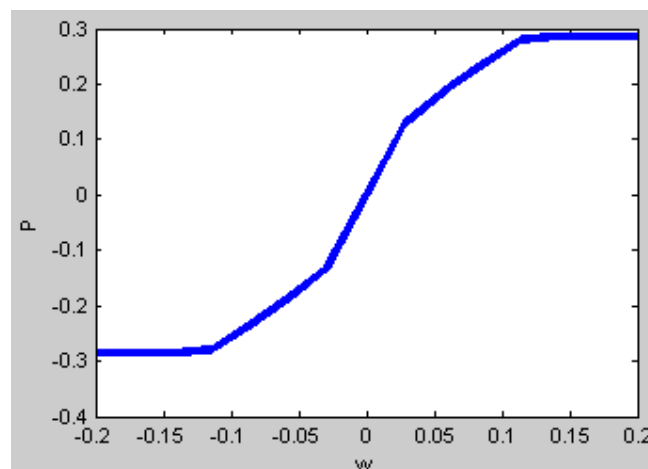


Рисунок 4.5 - График зависимости выходной переменной от входной функции II

2. Функция III

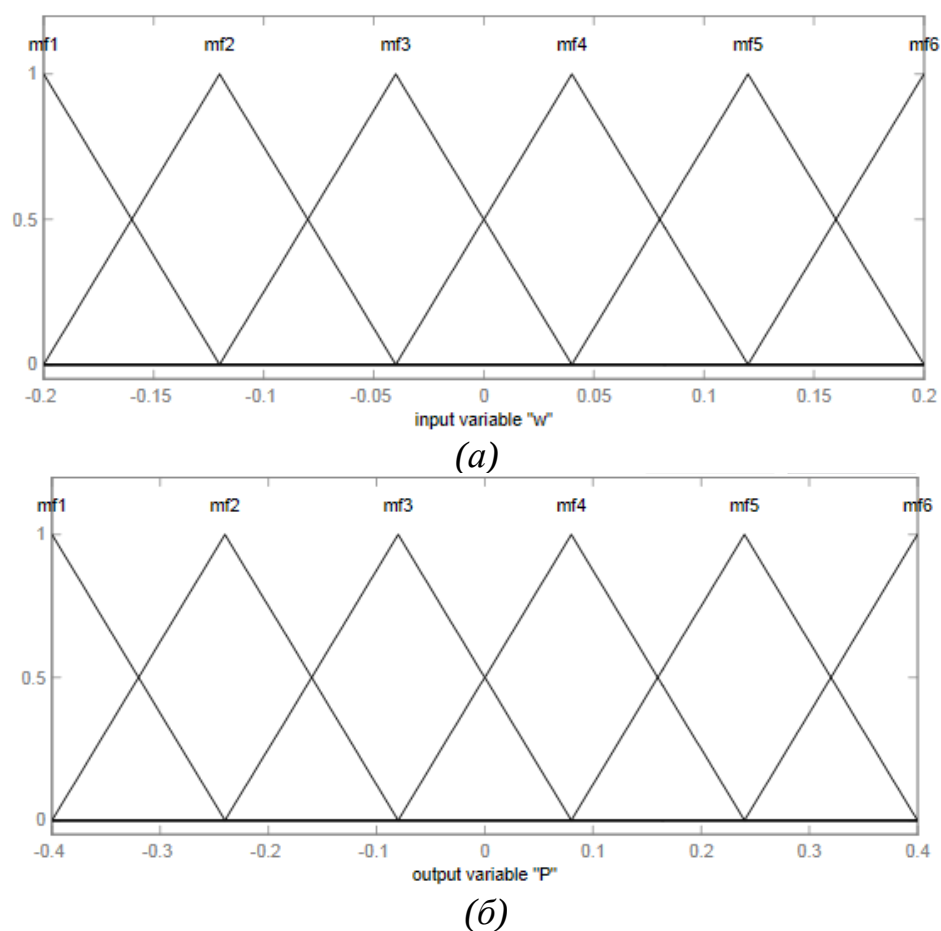


Рисунок 4.6 - Входная (а) и выходная (б) функции принадлежности функции III

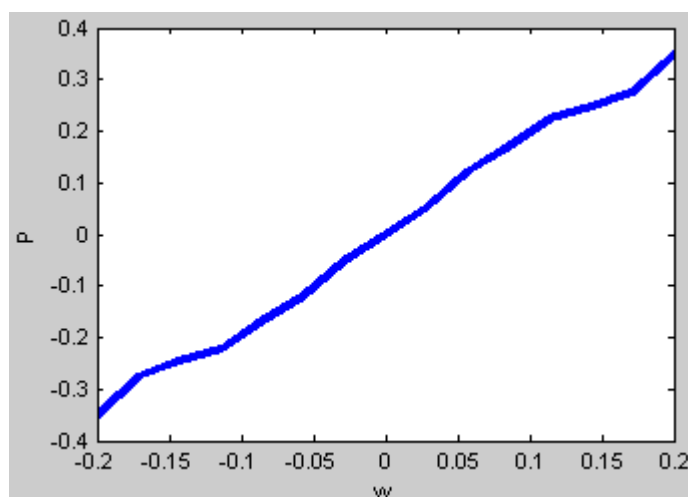


Рисунок 4.7 - График зависимости выходной переменной от входной функции III

На рисунке 4.8 продемонстрирован результат моделирования совместного действия АЧР и фаззи-контроллера с различными функциями принадлежности.

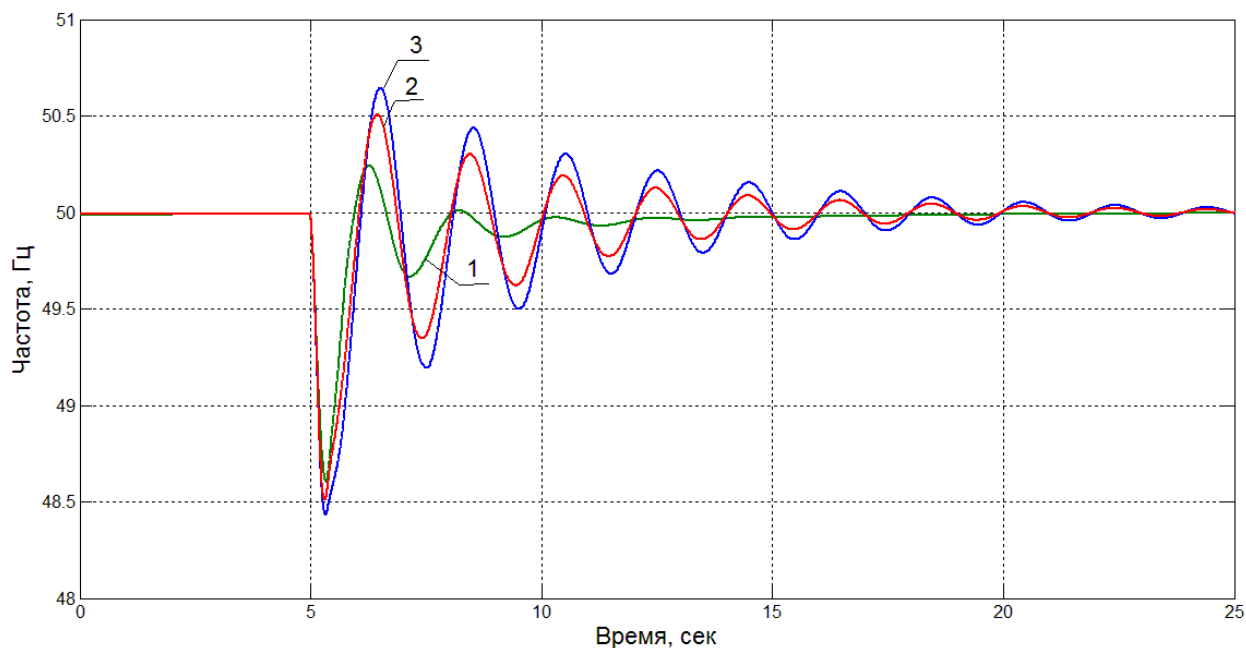


Рисунок 4.8 - Частота сети в нормальном режиме с действием АЧР и фаззи-контроллера на базе

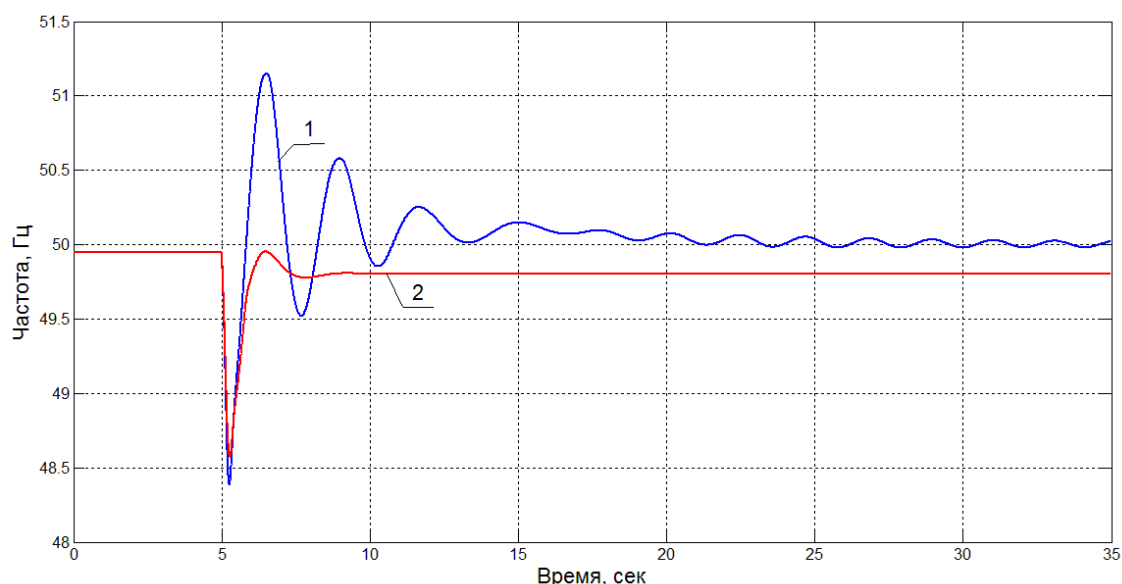
1 – функции I, 2 – функции II, 3 – функции III

Из рисунка 4.8 следует, что применение фаззи-контроллера на базе функции I лучше и быстрее демпфирует колебания частоты системы.

4.3 Исследование эффективности фаззи-контроллера в различных режимах сети

1. Утяжеленный режим (коэффициент утяжеления по активной мощности принят равным 1,4)

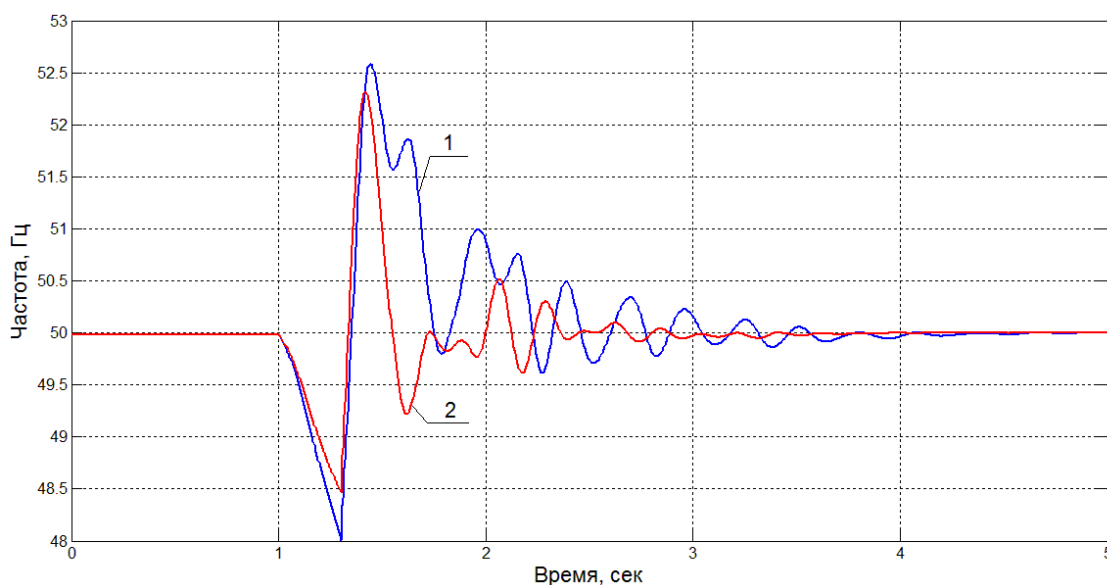
Из рисунка 4.9 следует, что в утяжеленном режиме после действия АЧР колебания частоты затухают быстрее, чем в нормальном. Фаззи-контроллер не способен после возмущения вернуть прежнее значение частоты, но отклонение частоты от 50 Гц не превышает $\pm 0,4$ Гц, что допустимо в послеаварийном режиме.



*Рисунок 4.9 – Частота сети в утяжеленном режиме
1 – с действием АЧР, 2 – с действием АЧР и фаззи-контроллера*

2. Успешное АПВ (пауза АПВ составляет 0,3 с)

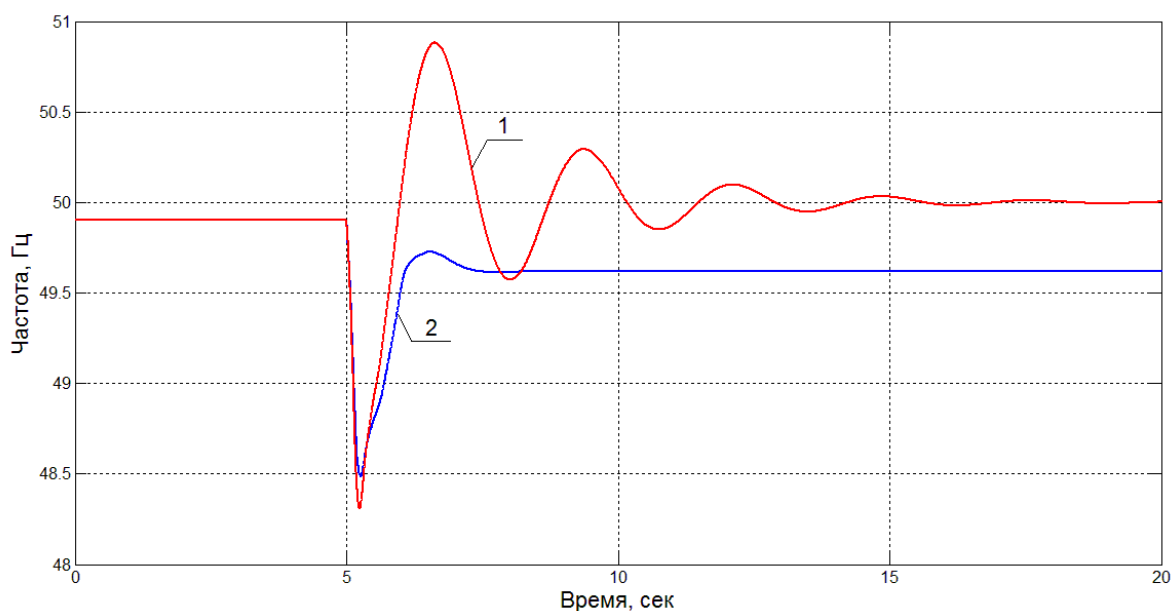
Из рисунка 4.10 следует, что при успешном АПВ на линии связи о. Русский и ОЭС Востока частота стабилизируется и без управляющих воздействий. Применение фаззи-контроллера практически не влияет на время затухания колебаний частоты. В этом вычислительном эксперименте не учтено действие устройства АЧР.



*Рисунок 4.10 – Частота сети в нормальном режиме при успешном АПВ
1 – без управляющих воздействий, 2 – с действием фаззи-контроллера*

3. Утяжеленный ремонтный режим (коэффициент утяжеления 1,4, выведен в ремонт один из генераторов на станции Коммунальная)

Из рисунков 4.9 и 4.11 следует, что чем существенней утяжеление режима, тем фаззи-контроллеру сложнее поддерживать частоту 50 Гц после отключения сети электроснабжения о. Русский от ОЭС Востока.



*Рисунок 4.11 – Частота сети в утяжеленном ремонтном режиме
1 – с действием АЧР, 2 – с действием АЧР и фаззи-контроллера*

4.4 Выводы по разделу

Анализ результатов моделирования показал, что регулируемая нагрузка может быть эффективно использована и для уменьшения объема отключения нагрузки устройствами АЧР, и для демпфирования низкочастотных колебаний параметров режима, возникающих в изолированной энергосистеме.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МИНИ-ТЭЦ НА О. РУССКИЙ

5.1 Проблема сегодня

На основании постановления Правительства Российской Федерации от 31 марта 2010 г. № 201 в Приморском крае на острове Русский создана особая экономическая зона (ОЭЗ) с туристическим профилем.

Особая экономическая зона - часть территории Российской Федерации, которая определяется Правительством Российской Федерации и на которой действует особый режим осуществления предпринимательской деятельности, а также может применяться таможенная процедура свободной таможенной зоны. [38]

В сентябре 2012 года в России прошел саммит «Азиатско-тихоокеанского экономического сотрудничества» (АТЭС). Россия является членом АТЭС с 1998 года и встреча лидеров государств АТЭС впервые прошла в России. Местом проведения саммита выбран остров Русский Приморского края Дальневосточного федерального округа.

Проект туристско-рекреационной ОЭЗ на острове Русский создавался под саммит АТЭС в 2012 году и был увязан с идеей создания игровой зоны. Но уже в 2011 году было принято решение о размещении после саммита на острове Дальневосточного федерального университета и об отказе от строительства там ряда гостиниц. Существуют планы по перепрофилированию острова в территорию опережающего развития.

Подготовка к саммиту АТЭС включала в себя модернизацию энергосистемы о. Русский. Когда только разрабатывались проекты строительства объектов саммита, в Минрегионразвития РФ посчитали, что остров Русский будет потреблять более 40 МВт электрической мощности и 120-130 Гкал/час тепловой нагрузки. Именно под эти параметры были запроектированы мини-станции "Северная", "Центральная" и "Океанариум". На деле текущее потребление тепловой энергии держится на уровне 30-35% от

проектного, а электроэнергия, которую способны вырабатывать источники генерации, не востребована вовсе. Загрузка мини-ТЭЦ по теплу в отопительный период 2012-2013 годов была в среднем лишь на уровне 12%. [39]

В условиях такой недозагрузки генерирующих мощностей расчетный уровень тарифа на тепло превышает 4,5 тыс. руб./Гкал, но он искусственно занижен до материкового уровня (1,45 тыс. руб. за Гкал). Результаты сравнительного анализа уровня тарифов по мини-ТЭЦ о. Русский в зависимости от режимов работы станций показали, что даже при максимальной (оптимальной) загрузке для производства электро- и теплоэнергии, тариф на теплоэнергию составит порядка 2,5 тыс. руб./Гкал, но при этом тариф на электроэнергию будет равен 4,4 руб./кВтч. [40]

В загрузке мини-ТЭЦ по электрической мощности не было необходимости как в 2012-2013 годах, так и на 2014 год. Стоит обратить внимание, что отсутствие выработки электрической энергии является одним из факторов, определяющих убыточность станций.

Многочисленные попытки решить данный вопрос на уровне Администрации Приморского края, Федеральной службы по тарифам России, Минэнерго России не принесли результата – до настоящего момента в балансе электрической энергии и мощности на 2014 год по Приморскому краю отсутствует плановая выработка электроэнергии от мини-ТЭЦ о. Русский, тем самым подтверждая отсутствие потребности в "островной" электроэнергии.[39]

ОАО «Дальневосточная энергетическая управляющая компания», эксплуатирующая объекты генерации на о. Русский, выступала с предложением о размере тарифа на производство электрической энергии на мини-ТЭЦ о. Русский на 2014 год в размере 4,982 руб/кВт*ч. На 2015 год компания предлагает установить тариф в размере 2,909 руб/кВт*ч, что соизмеримо с тарифом для населения по Приморскому краю на 2014 год – 2,9 руб/кВт*ч. Возможно, в 2015 году на мини-ТЭЦ начнется выработка электрической энергии.[41]

5.2 Перспектива решения

Ключевым параметром ценовой (тарифной) политики на долгосрочную перспективу (до 2030 года) является динамика внутренних цен на газ. Правительством Российской Федерации одобрены подходы к установлению оптовых цен на газ, направленные на постепенное приближение внутренних цен к равнодоходным ценам поставок газа на экспорт.

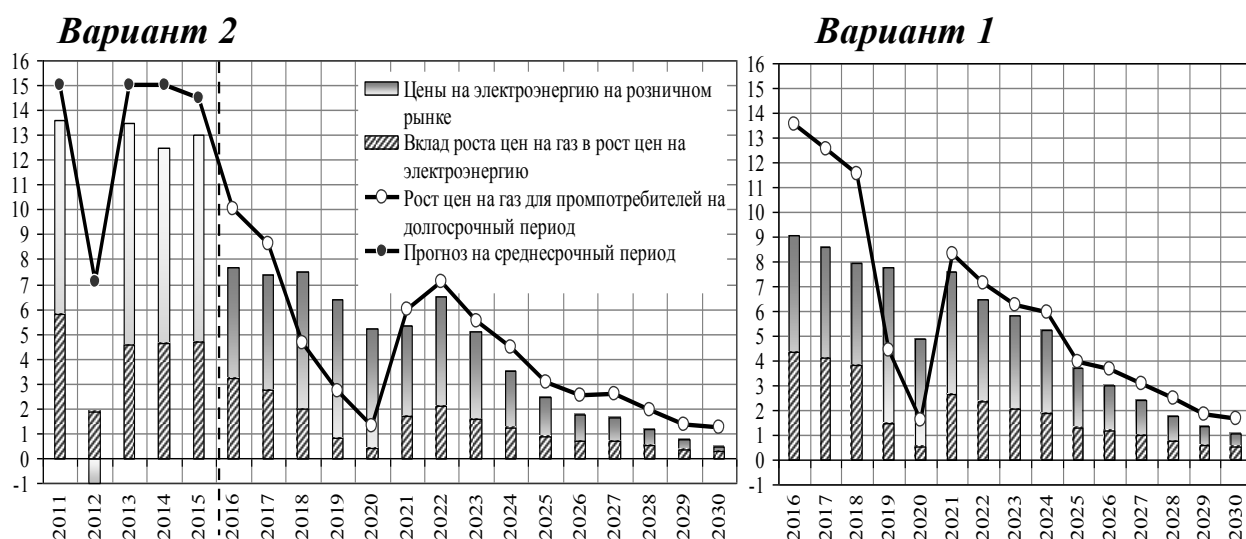


Рисунок 5.1 – Динамика цен на газ и электроэнергию до 2030 года по вариантам (прирост цен в % к предыдущему году)[42]

В консервативном сценарии (Вариант 1) предлагается уровень внутренних оптовых цен на газ для потребителей (кроме населения) установить на 20% ниже равнодоходных цен поставки российского газа в Европу. Рост цен будет регулироваться с плавно понижающимся темпом до установленной отметки, которая ориентировочно будет достигнута в 2018 году, после чего динамика будет ориентирована на европейскую с поправкой на курс доллара США.

В инновационном и форсированном сценариях (Вариант 2) предполагается, что внутренние цены на газ будут ниже, чем в консервативном сценарии – примерно на 30% ниже цен равнодоходности поставок в Европу. В этих сценариях цены на газ уже в 2016 году установятся на этом уровне, а с 2017 года их динамика будет переориентирована на европейскую с поправкой на курс доллара США. [42]

Анализ графиков, приведенных на рисунке 5.1 показывает, что при прогнозируемых темпах снижения цен на газ и электроэнергию, к 2018 году производство электроэнергии с использованием газа станет привлекательным в связи с меньшим темпом роста цены на энергоноситель. Возможно, при такой ценовой политике и прогнозируемом увеличении электрической нагрузки на о. Русский производство электрической энергии на мини-ТЭЦ станет не только востребованным, но и прибыльным.

Заключение

Предложенная в настоящей работе расчетная схема может быть полезной для дальнейших исследований Smart Grid технологий на о. Русский, а предложенная структура микроэнергосистемы - базой для исследования мультиагентных систем управления применительно к кампусу ДВФУ.

Нагрузка, управляемая контроллером нечетной логики и содержащая накопители энергии, может стать эффективным средством демпфирования низкочастотных колебаний параметров режима и минимизации объема отключения потребителей устройствами АЧР.

Список литературы

- 1 Остров Русский – экспериментальная площадка для исследования противоаварийной автоматики микроэнергосистем/ О.И. Горте, Н.Г. Кирьянова, М.С. Хмелик и др.// Сборник докладов XXII научно-практической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем». - Москва, 2014. - С. 627-633.
- 2 European SmarGrids technology platform. Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future. European commission. – 2006.
- 3 Официальный сайт Сколковского института науки и технологий [Электронный ресурс]: Программа стратегического развития. (<http://www.skoltech.ru/crei/programma-strategicheskogo-razvitiya-sdp/>).
- 4 Практика энергоэффективности [Электронный ресурс]: Энергоэффективность. Энергосбережение. Новости (<http://www.rsci.ru/sti/?mode=nmore&id=4880>).
- 5 Состояние генерирующих мощностей в электроэнергетике России [Электронный ресурс]: - (<http://www.sibai.ru/sostoyanie-generiruyushhix-moshhnostej-v-elektroenergetike-rossii.html>).
- 6 З. А. Стычинский, Н. И. Воропай. Возобновляемые источники энергии: Теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / З. А. Стычинский, Н. И. Воропай ; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. - Магдебург, 2010. – 209 с.
- 7 Распределенная энергетика [Электронный ресурс]: - (http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%E0%F1%EF%F0%E5%E4%E5%EB%B8%ED%ED%E0%FF_%FD%ED%E5%F0%E3%E5%F2%E8%EA%E0).
- 8 Информационный портал bigpowernews [Электронный ресурс]: - (<http://www.bigpowernews.ru/research/document47671.phtml>).
- 9 Nagata T., Sasaki H. A multi-agent approach to power system restoration// IEEE transactions on power systems. – May 2002. – Vol. 17, №2. – pp. 457 – 462.
- 10 О.А. Калинко. Научно-образовательный производственный центр энергоэффективных технологий и возобновляемой энергетики. ДВФУ – 2014.

11 Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования. СТО59012820.29.240.001-2011., Москва, 2011 г.

12 Zadeh L. Fuzzy sets // Information and Control. - 1965. - №8. - P. 338-353.

13 Ситников В.Ф. Совершенствование методов и средств управления режимами электроэнергетических систем на основе элементов гибких электропередач (facts) // Иваново, 2009.

14 A. Oudalov, R. Cherkaoui, A.J. Germond. Application of fuzzy logic techniques for the coordinated power flow control by multiple series facts devices / Power Industry Computer Applications, 2001. PICA 2001. Innovative Computing for Power - Electric Energy Meets the Market. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on.

15 Ray Hunter, George Elliot "Wind-Diesel Systems; A guide to the technology and its implementation" Cambridge university Press, 1994.

16 Lipman, N.H. "Wind-diesel and autonomous energy systems" Elsevier Science Publishers Ltd, 1989.

17 R.Dhanalakshmi, S.Palaniswami, «Application Of Multi Stage Fuzzy Logic Control For Load Frequency Control Of An Isolated Wind Diesel Hybrid Power System», Green Technology and Environmental Conservation (GTEC 2011), 2011 International Conference on.

18 Joanne Hui, Praveen K. Jain, «Power Management and Control of a Wind Energy Conversion System (WECS) with a Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking (MPPT)» IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.

19 Ellis H.M., et al., "Dynamic Stability of The Peace River Transmission System," IEEE Transactions, Vol. PAS-85, No. 6, pp. 586-600, June 1966.

20 Mohd. Hasan AH, Yuki Soma, Toshiaki Murata, Junji Tamura, « A Fuzzy Logic Controlled Braking Resistor Scheme For Stabilization of Synchronous

Generator » Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International.

21 Cheng, S. J., Chow, Y.S., Malik, O.P., Hope, G.S., "An Adaptive Synchronous machine Stabilizer", IEEE Trans., Vol. PWRD-1(3), 1986, pp. 101-109.

22 M. A. M. HASSAN, O. P. Malik, G. S. Hope, « A FUZZY LOGIC BASED STABILIZER FOR A SYNCHRONOUS MACHINE» Energy Conversion, IEEE Transactions on (Volume:6 , Issue: 3) 1991.

23 С.Д. Штовба. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с., ил.

24 Моделирование фаззи-систем [Электронный ресурс]: - (<http://www.mathworks.com/help/fuzzy/building-systems-with-fuzzy-logic-toolbox-software.html>).

25 Ушаков В.Я. Современная и перспективная энергетика: технологические, социально-экономические и экологические аспекты: монография / В.Я.Ушаков.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.

26 Pourbeik P. Modeling of combined-cycle power plants for power system studies// IEEE. – 2003. – pp. 1308 – 1313.

27 CIGRE Technical Brochure on «Modeling of gas turbines and steam turbines in combined cycle power plants», Task Force C4.02.25, December 2003.

28 Yee S.K., Milanovic J.V., Hughes F.M. Overview and comparative analysis of gas turbine models for system stability studies// IEEE transactions on power systems. – Feb. 2008. – Vol. 23, №1. – pp. 108 – 118.

29 Yee S.K., Milanovic J.V., Hughes F.M. Validated models for gas turbines based on thermodynamic relationships// IEEE transactions on power systems. – Feb. 2011. – Vol. 26, №1. – pp. 270 – 281.

30 W. I. Rowen, “Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines,” Trans. ASME, J. Eng. Power, vol. 105, no. 1, pp. 865–869, 1983.

31 Modeling frequency dependency of gas turbine output/ K. Kunitomi, A. Kurita, H. Okamoto et al.// IEEE. – 2001. – pp. 678 – 683.

32 CIGRE TF38.01.10 «Modeling new forms of generation and storage», November, 2000.

33 Kayikci M., Milanovic J.V. Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances// IEEE transactions on power systems. – May 2009. – Vol. 24, №2. – pp. 859 – 867.

34 Buchholz, B.; Styczynski, Z. A.; Winter, W.: Dynamic Simulations of Renewable Energy Sources and Requirements on Fault Ride Through Behavior. Proceedings of the IEEE PES General Meeting. 18-22 June 2006, Montreal, Canada.

35 Kawady T., Feltes C., Erlich I., Taalab A.I. Protection System Behavior of DFIG Based Wind Farms for Grid-Faults with Practical Considerations/ Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE.

36 S. Muller, M. Deicke, and R. W. De Doncker, “Doubly fed induction generator systems for wind turbines,” IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 8, no. 3, pp. 26–33, May/Jun. 2002.

37 A. D. Hansen, P. Sørensen, F. Iov, and F. Blaabjerg, “Control of variable speed wind turbines with doubly-fed induction generators,” Wind Eng., vol. 28, no. 4, pp. 411–432, Jun. 2004.

38 Об особых экономических зонах в российской федерации: федеральный закон от 22 июля 2005 года N 116-ФЗ [Электронный ресурс]: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102098960&intelsearch=%F4%E5%E4%E5%F0%E0%EB%FC%ED%FB%E9+%E7%E0%EA%EE%ED+%EE%F2+22+%E8%FE%EB%FF+2005+%E3%EE%E4%E0+N+116-%D4%C7>.

39 Перспективы развития энергетики обсудят на Дальневосточном инвестиционном конгрессе [Электронный ресурс]: <http://primamedia.ru/news/economics/30.08.2013/299162/perspektivi-razvitiya-energetiki-obsudyat-na-dalnevostochnom-investitsionnom-kon.html>.

40 Мини-ТЭЦ на острове Русском: закрывать или нет? [Электронный ресурс]: материалы онлайн-конференции 1-9 августа 2013 <http://primamedia.ru/chat/327>.

41 ОАО «ДВЭУК» [Электронный ресурс]:
<http://www.dveuk.ru/about/tarif/raskr/index.htm>.

42 Прогноз долгосрочного социально – экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]:
http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/doc20130325_06

Приложение А

Таблица А.1 – Параметры генераторов

Станция	Северная-Г	Центральная-Г	Океанариум-Г	Коммунальная-Г
Количество генераторов	5	2	2	2
S_n , МВА	7.33	2	7.33	1.8
P_n , МВт	6.6	1.8	6.6	1.5
U_n , кВ	10	6.3	10	10
$\cos\phi$	0.85	0.9	0.85	0.9
f , Гц	50	50	50	50
Скорость, об/мин	1500	1500	1500	1500
Сопротивления				
x_d (%)	238	238	238	375
x_d' (%)	33.6	33.6	33.6	26.7
x_d'' (%)	24	24	24	14.8
x_q (%)	121	121	121	225
x_q'' (%)	23	23	23	15
x_l	18	18	18	20
Постоянные времени				
T_{d0}' (с)	9.67	9.67	9.67	2.6
T_{d0}'' (с)	0.05	0.05	0.05	0.019
T_q' (с)	0.337	0.337	0.337	0.267
T_q'' (с)	0.029	0.029	0.029	0.010
T_j (с)	1.19	1.19	1.19	3

Таблица А.2 – Параметры трансформаторов

Обозначение	2*Т1	2* Т2	2*Т4	2*Т3	2*Т5	2*Т6	2*Т7
S , МВА	63	25	25	16	6.3	25	2*16
Сочетание напряжений, кВ	220/110/35	35/10	10/6.3	35/10	35/10	110/35/10	35/0.575
U_k (%)	11/35.7/22	10.5	10	10	7.5	10.5/17.5/6.5	10

Таблица А.3 – Параметры ветрогенераторов

Количество	5
P_n , МВт	2.3
U_n , В	575
f , Гц	50
Сопротивления	
R_s (р.у.)	0.0071
L_{ls} (р.у.)	0.171
R_r' (р.у.)	0.005
L_{lr}' (р.у.)	0.156
L_m (р.у.)	2.9
Постоянные времени	
T_j (с)	4.41
Условия	
Скорость ветра (м/с)	14