

На правах рукописи



**Разживин Игорь Андреевич**

**ВСЕРЕЖИМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
УСТАНОВКИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические  
системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:** **Гусев Александр Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Воропай Николай Иванович**  
член-корреспондент РАН, доктор  
технических наук, профессор, Федеральное  
государственное бюджетное учреждение  
науки Институт систем энергетики им. Л.А.  
Мелентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Иркутск,  
научный руководитель института.

**Манусов Вадим Зиновьевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Новосибирский  
государственный технический университет»,  
профессор кафедры «Систем  
электрооборудования предприятий»

Защита состоится «23» декабря 2019 года в 14:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.17 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53а и на сайте: [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru)

Автореферат разослан « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь диссертационного  
совета ДС.ТПУ.17



А.В. Прохоров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования.

Страны, подписавшие Киотский протокол, в их числе Россия, и особенно страны с весьма ограниченными или отсутствующими углеводородными и урановыми ресурсами, с различной интенсивностью развивают возобновляемую электроэнергетику, преимущественно путём использования ветроэнергоустановок (ВЭУ). При ощутимой для электроэнергетической системы (ЭЭС) мощности, как минимум несколько мегаватт, ВЭУ могут присоединяться к ЭЭС. В последнем случае, среди разных видов ВЭУ наиболее применимой для работы в составе ЭЭС является ВЭУ 4 типа, представляющая собой ветротурбину (ВТ) с синхронным генератором, возбуждаемым постоянными магнитами (СГПМ), присоединенным через вставку постоянного тока (ВПТ) и трансформатор присоединения (ТП) к узлу электрической сети ЭЭС.

Для решения большинства задач исследования, проектирования и эксплуатации ЭЭС, в том числе ЭЭС с ВЭУ необходима полная и достоверная информация о едином непрерывном спектре нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессах в оборудовании и ЭЭС в целом. Ввиду недопустимости натуральных экспериментов в реальных ЭЭС, тем более аварийных, и невозможности из-за их сложности адекватного физического моделирования единственным путем получения всей необходимой информации становится преимущественно математическое моделирование.

При этом для всех видов и типов силового оборудования, систем автоматического регулирования, средств релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗ и ПА), могут быть синтезированы бездекомпозиционные всережимные математические модели, теоретическая и практическая достоверность которых достаточно строго и всесторонне обоснована, экспериментально проверена и подтверждена опытом эксплуатации.

Однако получаемая в результате совокупная математическая модель любой реальной ЭЭС, в том числе с ВЭУ, даже с учетом приемлемого частичного эквивалентирования, неизбежно содержит жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой, по математическим меркам, размерности, плохо обусловленную на ограничительных условиях применимости теории методов численного интегрирования и соответственно не подлежащую удовлетворительному решению. Единственный путь улучшения обусловленности – снижение жесткости и размерности совокупной системы дифференциальных уравнений, которые могут быть осуществлены только за счет радикального ее упрощения и применения декомпозиции, в соответствии с которой выделяются и отдельно рассчитываются нормальные и аварийные установившиеся режимы, а также различные стадии переходных процессов на ограниченном интервале их воспроизведения. В результате существенно утрачивается полнота и достоверность получаемой таким образом

информации. Кроме этого, независимо от этих упрощений и ограничений всегда неизвестной остается, принципиально присущая численному интегрированию дифференциальных уравнений методическая ошибка.

Поскольку всю данную проблематику неизбежно наследуют многочисленные программно-вычислительные комплексы (ПВК) расчета режимов и процессов в реальных ЭЭС, достоверность таких расчетов нередко оказывается низкой или неудовлетворительной, что подтверждается результатами их верификаций [1-5].

Радикальным путем решения данной проблемы, может быть только комплексный подход, представляющий, в широком смысле, гибридное моделирование, позволяющий для каждого аспекта обозначенной сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства агрегирования которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом.

В связи с вышеизложенным, в диссертации в соответствии с указанным комплексным подходом разработана концепция всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС в реальном времени и на неограниченном интервале и средства ее реализации, а их свойства и возможности подтверждены комплексом тестовых и экспериментальных исследований.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиям аэродинамического преобразования посвящено множество трудов известных ученых: Н.Е. Жуковский, А. Бетц, Ю. Прандтль и др. Вопросы использования возобновляемых источников энергии рассматриваются в работах: В.Н. Андриянова, П.П. Безруких, Б.В. Валова, В.В. Елистратова, Н.В. Красовского, Б.В. Лукутина, В.М. Лятхера, В.З. Манусова, С.Г. Обухова, Г.Х. Сабина, С.Н. Удалова, В.Я. Ушакова, Е.М. Фатеева, Ю.Г. Шакарьяна, G. Michalke, M. Poller, P. Anderson V. Akhmatov, T. Ackerman, S. Heier, B. Wu, A. Hansen, E. Muljadi, P. Sorensen и др. и других.

Проблемам адекватного моделирования ЭЭС посвящены труды В.А. Веникова, Н.И. Воропая, П.И. Бартоломея, А.С. Гусева, и др.

Однако, несмотря на достаточно глубокое изучение ВЭУ и ЭЭС, комплекс вопросов, связанных с получением достаточно полной и достоверной информации о работе ВЭУ 4 типа в ЭЭС по-прежнему актуален, исследованию и решению которых посвящена данная работа.

**Цели и задачи работы.** Целью работы является достаточно полное и достоверное всережимное моделирование ВЭУ 4 типа в ЭЭС на основе комплексного подхода.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

- 1) исследование факторов, определяющих механический момент ВТ;
- 2) разработка концепции всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС в реальном времени и на неограниченном интервале;
- 3) разработка средств реализации данной концепции;

4) проведение комплекса тестовых и экспериментальных исследований средств реализации всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС.

**Предметом исследования** являются нормальные и аномальные, квазиустановившиеся и переходные процессы ВЭУ 4 типа в ЭЭС.

**Объектом исследования** являются средства всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС в реальном времени и на неограниченном интервале.

**Научная новизна работы:**

1) проведен анализ технологий в области ветроэнергетики, на основе которого синтезирована математическая модель ветра, примененная для создания специализированного гибридного процессора (СП) ВЭУ 4 типа;

2) предложена концепция на основе комплексного подхода, позволяющая для каждого аспекта решаемой сложной проблемы всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС, применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивают успешное решение проблемы в целом;

3) в соответствии с предложенной концепцией разработан и реализован СП ВЭУ 4 типа.

**Теоретическая значимость работы:**

1) обоснованы причины существования проблемы всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС, а также ее принципиальная неразрешимость в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода и направление ее радикального решения;

2) обоснована и синтезирована математическая модель ветра учитывающая турбулентную и среднюю составляющие.

3) сформулирована в соответствии с комплексным подходом концепция непрерывного всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС, а также структура и принципы ее реализации.

**Практическая значимость работы.** Разработаны средства непрерывного всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС в реальном времени на неограниченном интервале, позволяющие получить достаточно полную и достоверную информацию о едином непрерывном спектре квазиустановившихся и переходных процессах в ВЭУ указанного типа в ЭЭС при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы, необходимую для решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ВЭУ 4 типа в ЭЭС.

**Методы исследования:**

Теория дифференциального и интегрального исчисления, теория методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, метод непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, теория автоматического регулирования и управления, теория линейных и нелинейных электрических цепей, методы теории точности и чувствительности вычислительных устройств, методы

математического и физического моделирования, схемотехника на интегральных микросхемах, тестовые и экспериментальные методы исследования процессов в ПВК Real Time Digital Simulator (RTDS) и на прошедшем всесторонние лабораторные испытания и опытную эксплуатацию экспериментальном образце многопроцессорного программно-технического комплекса гибридного типа – Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- 1) обоснование положений концепции всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС в реальном времени и на неограниченном интервале;
- 2) всережимная математическая модель ВЭУ 4 типа;
- 3) структура и принципы реализации экспериментального образца СГП ВЭУ 4 типа;
- 4) результаты тестовых и экспериментальных исследований, подтверждающие свойства и возможности разработанных средств всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС в реальном времени и на неограниченном интервале.

**Достоверность результатов исследования** подтверждается использованием:

- 1) классических положений и законов теоретической электротехники, математики, теории дифференциального и интегрального исчисления;
- 2) теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений;
- 3) метода непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений;
- 4) теоретически обоснованных и апробированных независимыми исследованиями применяемых математических моделей;
- 5) подтверждается соответствием результатов тестовых и экспериментальных исследований.

**Апробация результатов исследований.**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на 8 международных и всероссийских научно-технических конференциях и выставках, в частности: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Europe (Румыния, г. Бухарест, 2019г.), IEEE PES ISGT, Europe (Босния и Герцеговина, г. Сараево, 2018г.); All-Russian Forum of Young Scientists «Towards the World Festival of Youth and Students» (Россия, г. Екатеринбург, 2017 г.); IV и V Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», (Россия, г. Томск, 2016, 2017 гг.); Science Week 2017 (Россия, г. Томск 2017г.), XXXIX сессия семинара «Кибернетика энергетических систем» (Россия, г. Новочеркасск, 2017 г.); Международная специализированная выставка «Электрические сети России» (Россия, г. Москва, 2016г.).

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus, получен патент РФ.

### **Реализация результатов работы.**

Результаты диссертационной работы реализованы и используются:

- в рамках Гранта Российского научного фонда №18-79-10006 от 02.08.2018 г. «Исследование проблемы достоверности расчетов режимов и процессов в электроэнергетических системах с активно-адаптивными сетями и распределенной генерацией и разработка методики их всережимной верификации»,

- в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ Соглашение №075-02-2018-271 от 17.01.2018 г. «Исследование влияния спектра процессов в электроэнергетических системах со значительной долей распределённой генерации и возобновляемыми источниками энергии на функционирование устройств релейной защиты и разработка методики её адекватной настройки»

- в рамках государственного контракта: Гос. задание «Наука» №13.5852.2017/БЧ от 01.02.2017 г. «Разработка концепции всережимной верификации расчётов режимов и процессов в электроэнергетических системах и средств её реализации».

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа содержит 115 страниц, в том числе 94 рисунка, 2 таблицы, список цитируемой литературы из 88 наименований и состоит из введения, 4-х глав, заключения и 3 приложений.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обозначена проблема и обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, приведены выносимые на защиту основные положения, а также сведения о методах исследования, достоверности результатов, апробации, публикациях, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** выявлены факторы, определяющие механический момент ВЭУ: параметры ветра и его аэродинамическое преобразование, характеризуемое средней скоростью ветра ( $V_0$ ), турбулентной составляющей скорости ветра ( $V(t)$ ), с учетом плотности воздуха ( $\rho$ ), радиуса ( $R$ ) и скорости вращения ветроколеса ( $\omega$ ), угла атаки лопастей ветроколеса ( $\beta$ ) и ряда конструктивных данных, определяющих быстроходность ВТ ( $Z_i$ ) и коэффициент использования энергии ветра ( $C_p$ ).

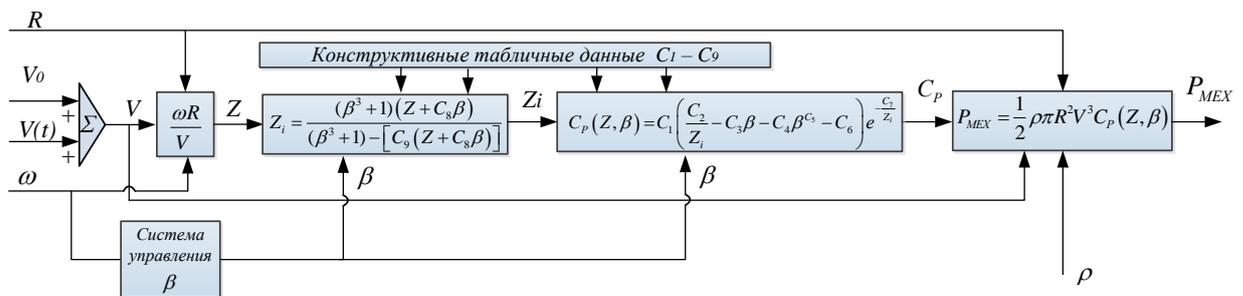


Рисунок 1 – Функциональная схема математической модели аэродинамического преобразования ВЭУ

**Во второй главе** на основе анализа специфики функционирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС сформированы конкретные положения концепции ее непрерывного всережимного моделирования в реальном времени, а также принципы и средства ее реализации:

1) для бездекомпозиционного полного и достоверного воспроизведения единого непрерывного спектра нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов оборудования ВЭУ 4 типа, синтезируется и применяется гибридная всережимная математическая модель;

2) для решения систем дифференциальных уравнений математически моделируемого оборудования используется способ методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале;

3) для осуществления указанного способа разрабатываются и применяются специализированные параллельные цифро-аналоговые структуры – гибридные сопроцессоры (ГСП);

4) адекватное воспроизведение спектра всевозможных коммутационных процессов оборудования ВЭУ, связанных с различными короткими замыканиями, работой выключателей и силовых полупроводниковых элементов ВПТ, обеспечивается с помощью цифруправляемых физических моделей на базе цифруправляемых аналоговых ключей (ЦУАК);

5) естественное трехфазное взаимодействие ГСП осуществляется на модельном физическом уровне, путем преобразования представленных напряжениями входных-выходных математических переменных фазных токов в соответствующие им модельные физические токи, с помощью преобразователей напряжение-ток (ПНТ), а формирующиеся в узлах взаимодействия напряжения, заводятся посредством повторителей напряжения (ПН) в ГСП;

б) управление коэффициентами и параметрами математически моделируемого оборудования ВЭУ, состоянием ЦУАК, отображением и преобразованием информации, моделированием автоматики и релейной защиты, осуществляется применением цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования, ИТ – технологий и специальных программно-технических средств, образующих информационно-управляющую систему (ИУС);

7) достижение высоких эксплуатационных и метрологических характеристик, необходимого уровня информационно-управляющих возможностей обеспечивается применением современной интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и IT-технологий.

Сформированная в соответствии с положениями данной концепции структурная схема СГП ВЭУ 4 типа, предназначенная для применения в ВМК РВ ЭЭС имеет вид:

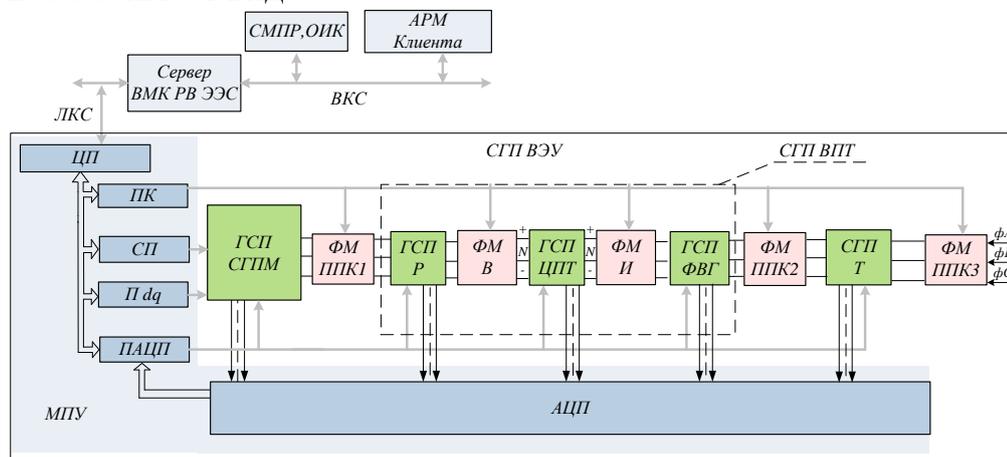


Рисунок 2 – Структурная схема СГП ВЭУ 4 типа,

где: ГСП СГПМ – гибридный сопроцессор математической модели СГПМ, МПУ – микропроцессорный узел, обеспечивающий все информационно-управляющие функции СГП ВЭУ 4 типа и состоящий из периферийных микропроцессоров: СП – сопроцессор математической модели ветра, его аэродинамического преобразования и управления углом поворота лопастей ВТ, согласно рис.1, реализации алгоритмов релейной защиты и автоматики; ПК – процессор коммутации, обеспечивающий управление ЦУАК физических моделей (ФМ): ФМ ППК 1 (осуществление всевозможных продольно-поперечных коммутаций) и идентичных ФМ ППК 2, ФМ ППК 3, а также ФМ В – выпрямителя и ФМ И – инвертора; П dq – процессор  $d, q$ , обеспечивает координатное преобразование  $d, q \rightleftharpoons A, B, C$ ; ПАЦП – процессор аналого-цифрового преобразования (АЦП), обеспечивает посредством АЦП оцифровку результатов моделирования, а также всевозможные функциональные преобразования информации; ЦП – центральный процессор, осуществляет информационно-управляющее взаимодействие по локальной компьютерной сети (ЛКС) между сервером ВМК РВ ЭЭС и периферийными процессорами, а также обеспечивает ввод данных в цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) ГСП и предварительную функциональную обработку результатов моделирования при необходимости; ГСП Р – гибридный сопроцессор реактора; ГСП ЦПТ – гибридный сопроцессор цепи постоянного тока; ГСП ФВГ – гибридный сопроцессор фильтра высших гармоник; ГСП Т – гибридный сопроцессор трансформатора присоединения. АРМ Клиента – автоматизированное рабочее место клиента, размещаемое на компьютерах во внешней компьютерной сети (ВКС) и предназначенное, в том числе, для удаленной работы пользователей ВМК РВ ЭЭС

Система уравнений СГПМ в осях  $d, q$ :

- уравнение движения ротора

$$T_j \frac{d\omega}{dt} + K_{ПТ} \omega = \frac{P_{МЭХ}}{\omega} - (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d), \quad (1)$$

- потокосцепление в воздушном зазоре по оси  $q$ :

$$\Psi_{\delta q} = x_{aq} i_q, \quad (2)$$

- потокосцепление в воздушном зазоре по оси  $d$ :

$$\Psi_{\delta d} = x_{ad} i_d, \quad (3)$$

- внутренняя ЭДС в воздушном зазоре по оси  $q$ :

$$E_{iq} = x_{aq} i_q, \quad (4)$$

- внутренняя ЭДС в воздушном зазоре по оси  $d$ :

$$E_{id} = x_{ad} i_d + E_{ПМ}, \quad (5)$$

- результирующее потокосцепление по оси  $q$ :

$$\Psi_q = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma} i_q, \quad (6)$$

- напряжение статора по оси  $q$ :

$$u_q = \omega \Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - r_a i_q, \quad (7)$$

- результирующее потокосцепление по оси  $d$ :

$$\Psi_d = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma} i_d, \quad (8)$$

- напряжение статора по оси  $d$ :

$$u_d = -\omega \Psi_q - \frac{d\Psi_d}{dt} - r_a i_d, \quad (9)$$

- ток статора по оси  $d$ :

$$i_d = \frac{1}{x_{\sigma}} (\Psi_d - E_{id}), \quad (10)$$

- ток статора по оси  $q$ :

$$i_q = \frac{1}{x_{\sigma}} (\Psi_q - E_{iq}), \quad (11)$$

где:  $K_{ПТ}$  – коэффициент учитывающий потери на трение,  $T_j$  – постоянная инерции ВЭУ,  $\omega$  – угловая частота вращения ВЭУ,  $\frac{d\Psi_q}{dt}$ ,  $\frac{d\Psi_d}{dt}$  и  $\omega \Psi_d$ ,  $\omega \Psi_q$  – соответствующие трансформаторные ЭДС и ЭДС вращения;  $x_{ad}$  и  $x_{aq}$  – сопротивления взаимоиндукции в соответствующих осях между контурами ротора и статора;  $x_{\sigma}$  – сопротивление рассеяния,  $r_a$  – активное сопротивление статорной обмотки;

Формируемая в ЦП  $E_{ПМ}$  определяется в соответствии с выражением:

$$E_{ПМ} = \frac{4,44}{p} \Phi W_{\phi} f K_{об}, \quad (12)$$



Аналогичным образом реализуются всережимные математические модели ГСП ЦПТ, ГСП ФВГ, ГСП Р, ГСП Т.

В третьей главе представлены фрагменты сопоставительных результатов тестовых исследований СГП ВЭУ 4 типа в двухмашинной схеме ЭЭС с узлом нагрузки (Н), данные воспроизведения в которой в ПВК RTDS приемлемо достоверны для сравнения с данными ВМК РВ ЭЭС. Фрагменты этих исследований представлены на рисунках 4-14.

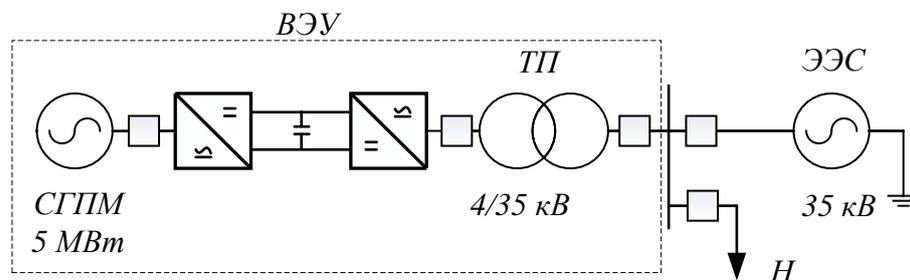


Рисунок 4 – Тестовая схема ЭЭС

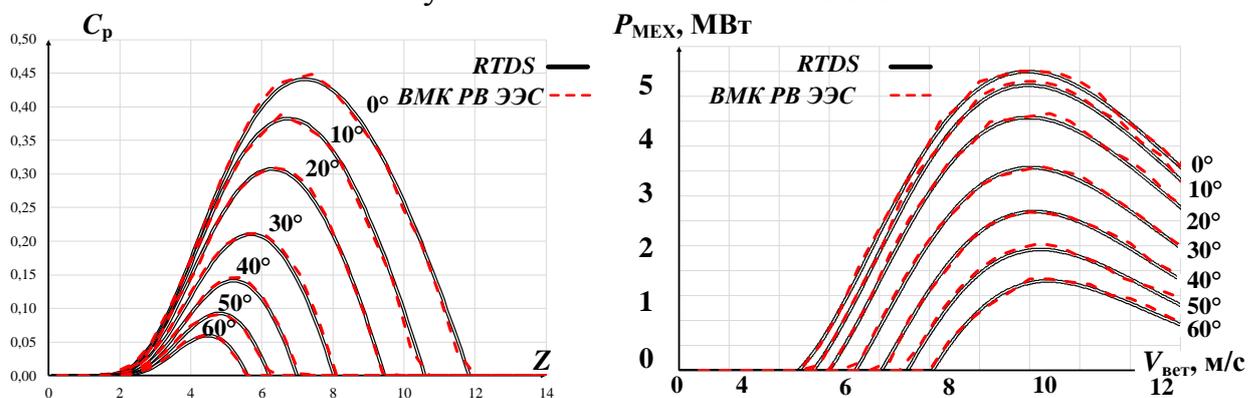


Рисунок 5 – Тестирование математической модели аэродинамического преобразования ВЭУ,

где изменение  $\beta$  осуществляется сервоприводом в пределе от 0 до 60 градусов.

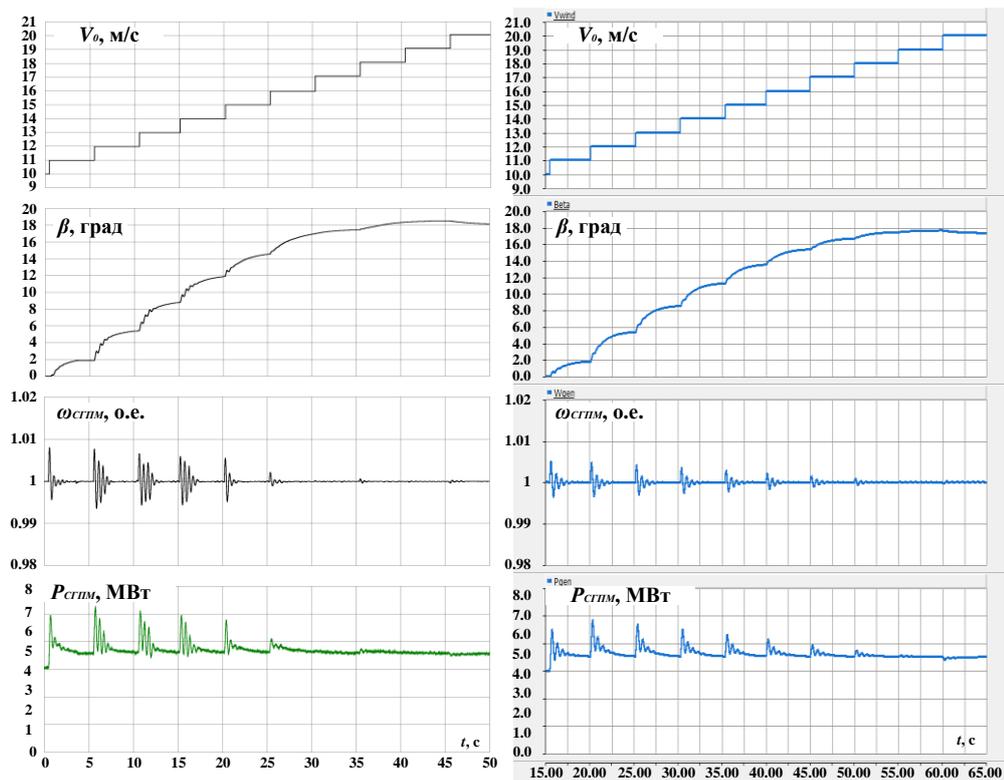


Рисунок 6 – Осциллограммы процессов функционирования регулятора угла поворота лопастей ВЭУ при ступенчато изменяющейся скорости ветра (от 10 м/с до 20 м/с)

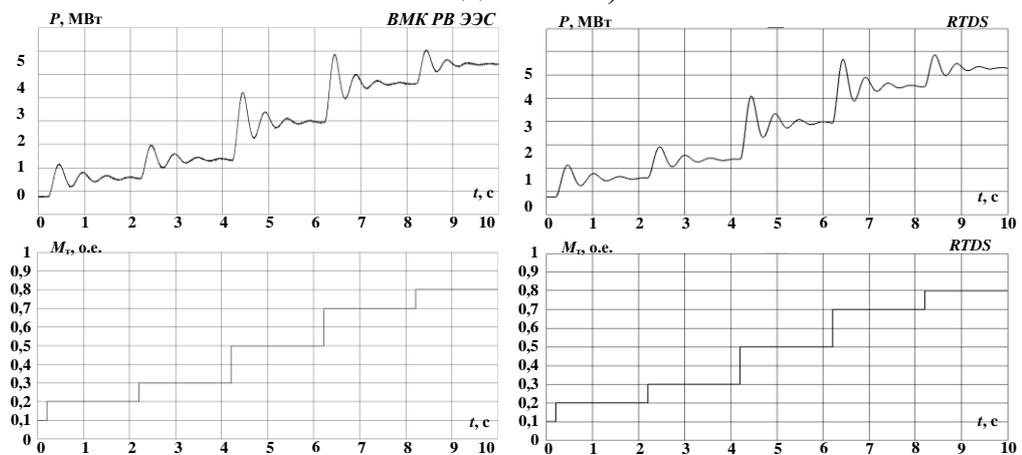


Рисунок 7 – Осциллограммы процессов при ступенчатом изменении момента ВТ

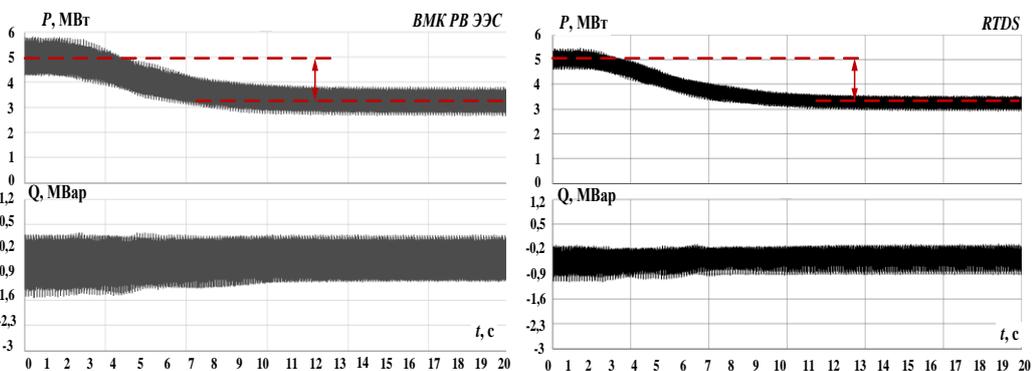


Рисунок 8 – Осциллограммы активной и реактивной мощности ВЭУ при снижении генерируемой мощности ВЭУ до 3,2 МВт

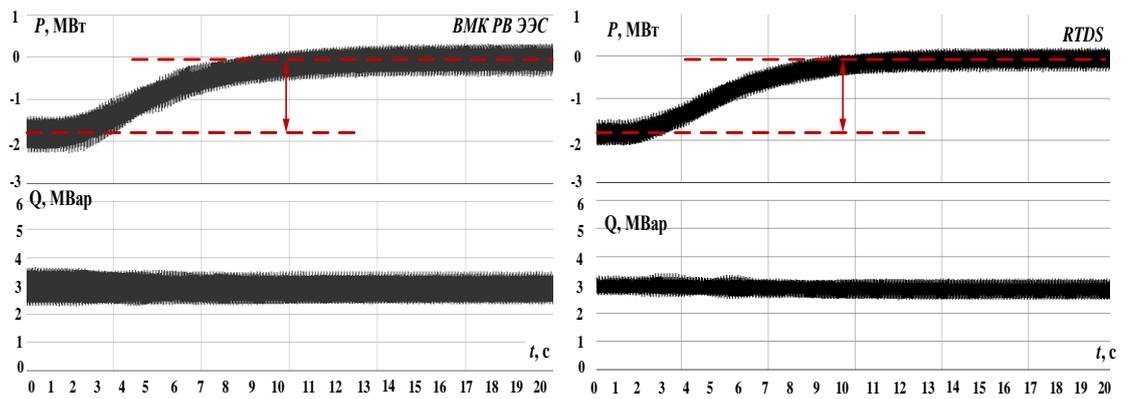


Рисунок 9 – Осциллограммы перетока активной и реактивной мощности в ЭЭС при снижении генерируемой мощности ВЭУ до 3,2 МВт

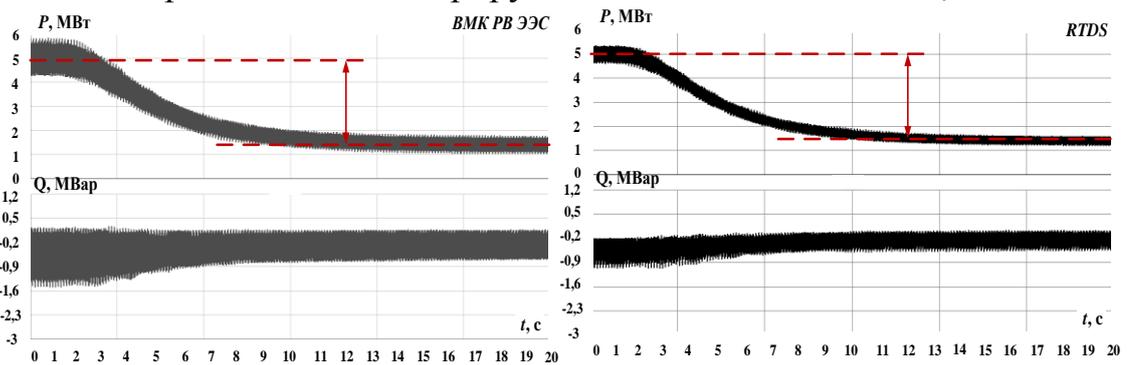


Рисунок 10 – Осциллограммы активной и реактивной мощности ВЭУ при снижении генерируемой мощности ВЭУ до 1,5 МВт

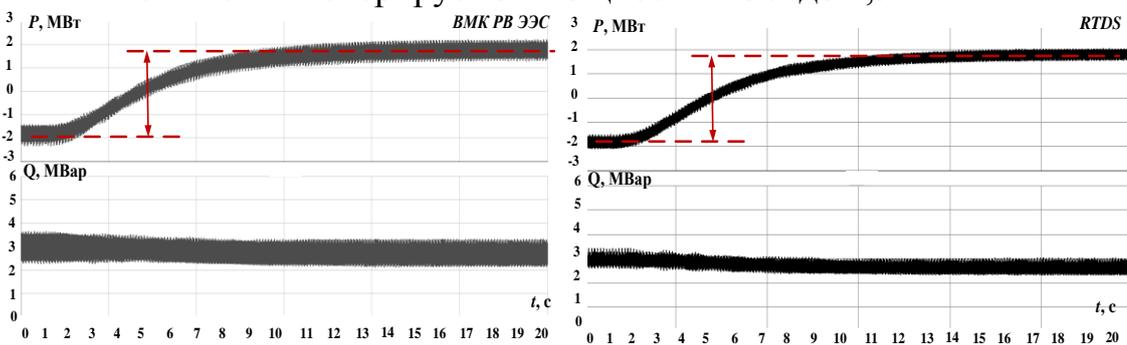


Рисунок 11 – Осциллограммы перетока активной и реактивной мощности в ЭЭС при снижении генерируемой мощности ВЭУ до 1,5 МВт

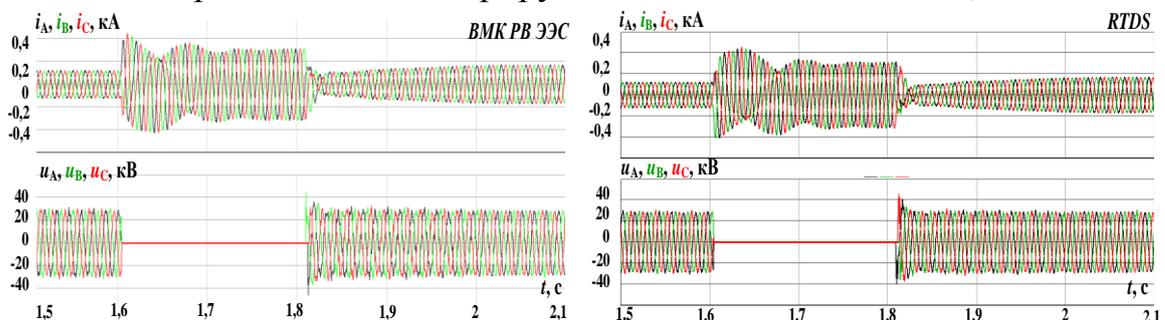


Рисунок 12 – Осциллограммы фазных токов и напряжений в узле подключения ВЭУ к ЭЭС при трехфазном КЗ

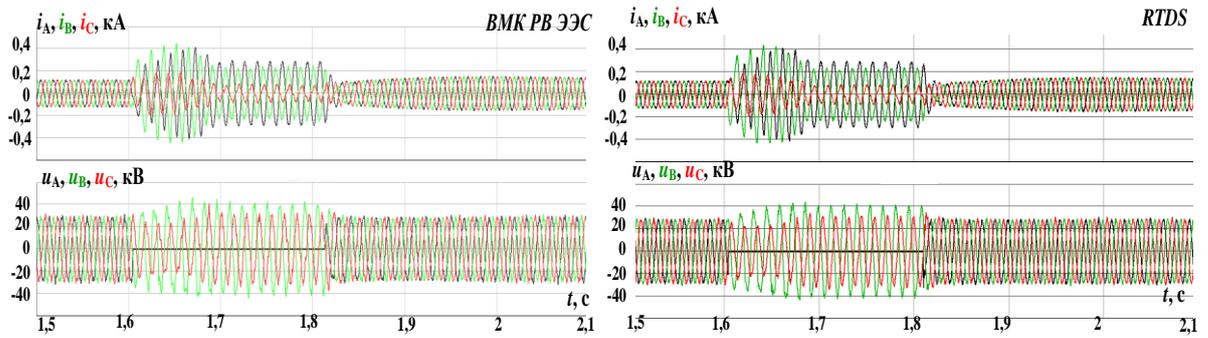


Рисунок 13 – Осциллограммы фазных токов и напряжений в узле подключения ВЭУ к ЭЭС при однофазном КЗ

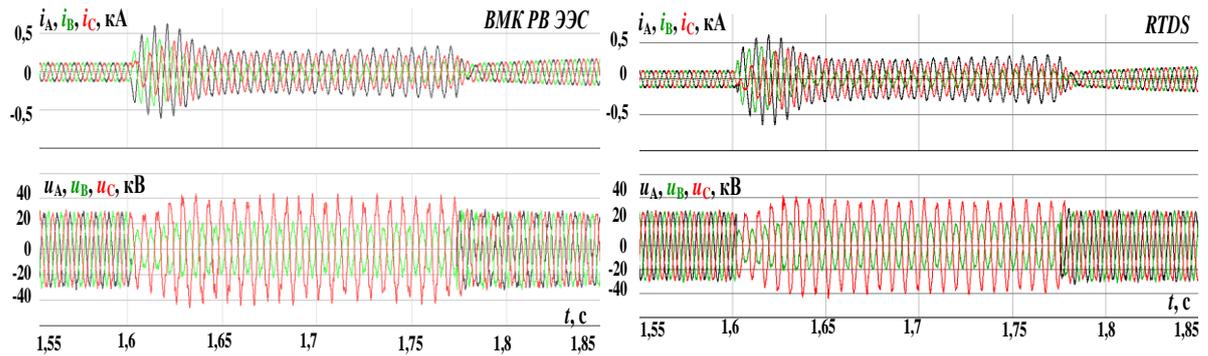


Рисунок 14 – Осциллограммы фазных токов и напряжений в узле подключения ВЭУ к ЭЭС при междуфазном КЗ

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований ВЭУ 4 типа в ЭЭС, фрагмент которой представлен ниже

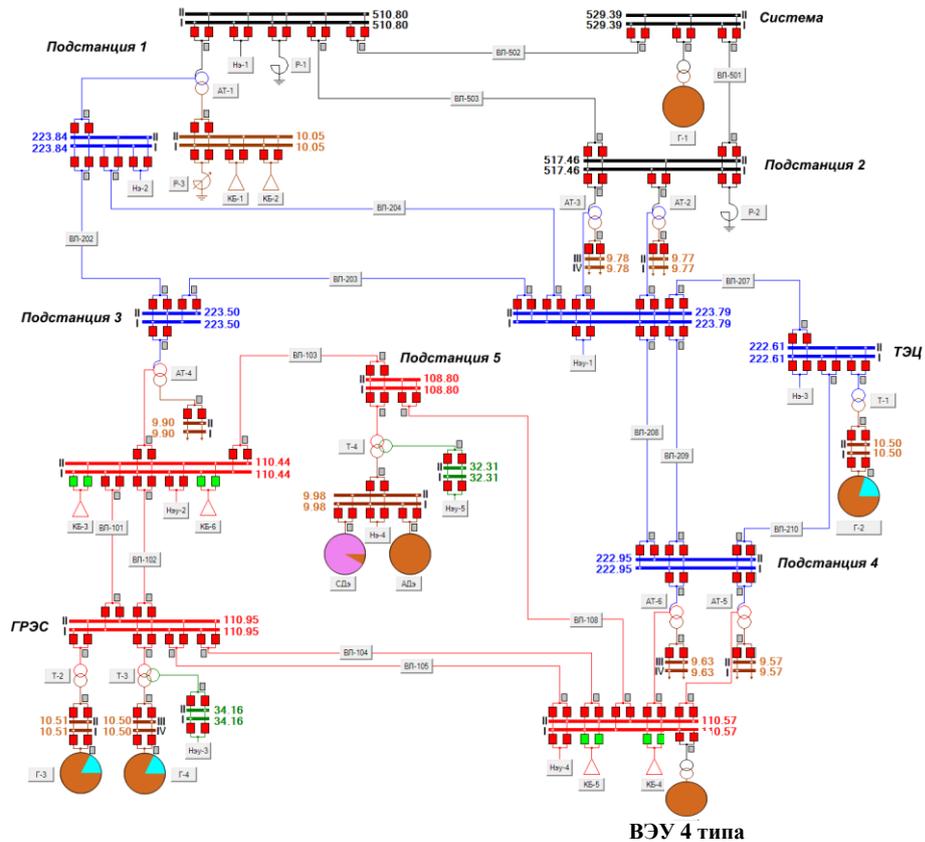


Рисунок 15 – Фрагмент экспериментальной ЭЭС с ВЭУ

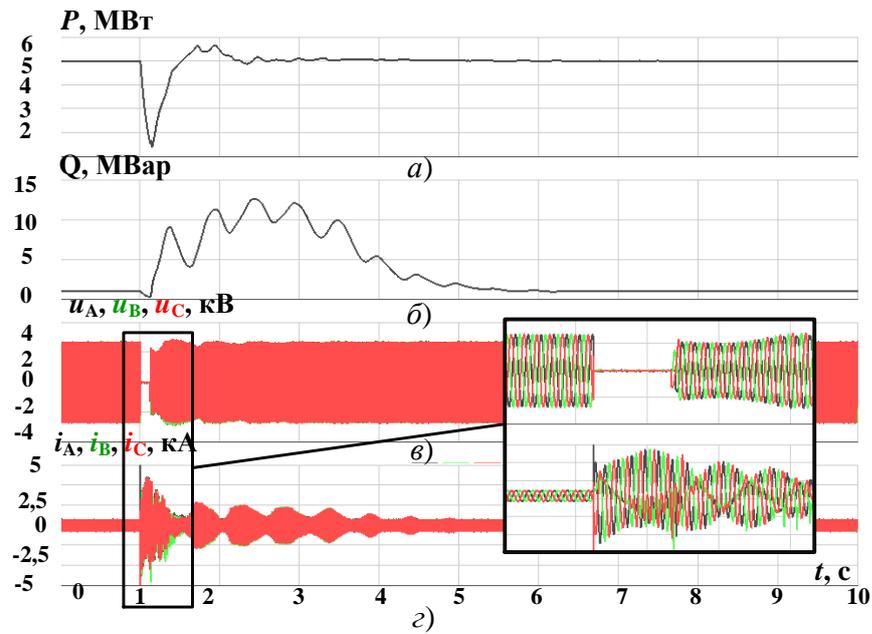


Рисунок 16 – Осциллограммы активной (а) и реактивной (б) мощности, фазных токов (г) и напряжений (в) на выходе ВПТ при трехфазном КЗ

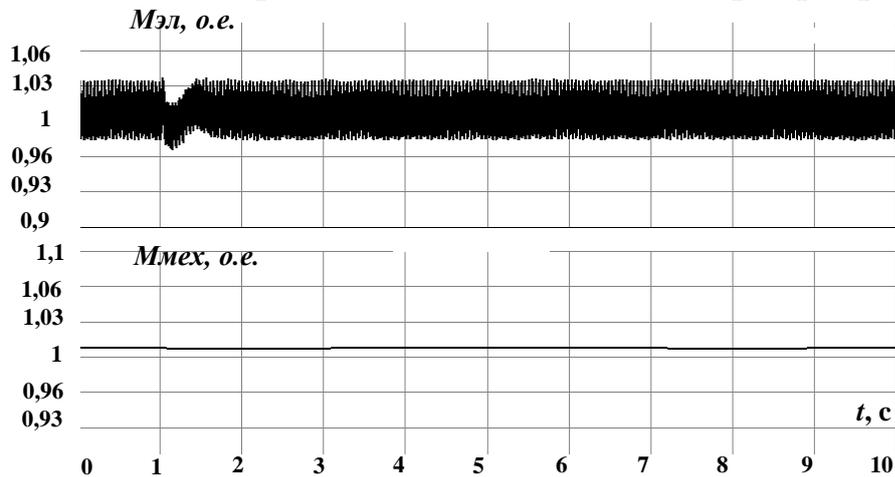


Рисунок 17 – Осциллограммы электромагнитного и механического моментов при трехфазном КЗ

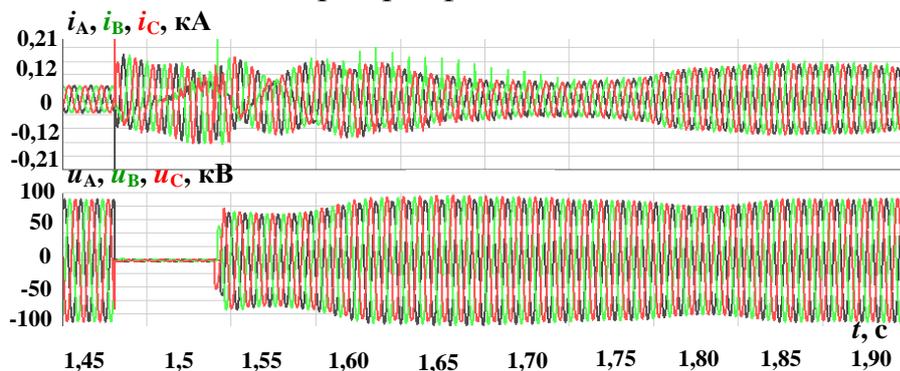


Рисунок 18 – Осциллограммы фазных токов и напряжений в узле присоединения ВЭУ при трехфазном КЗ

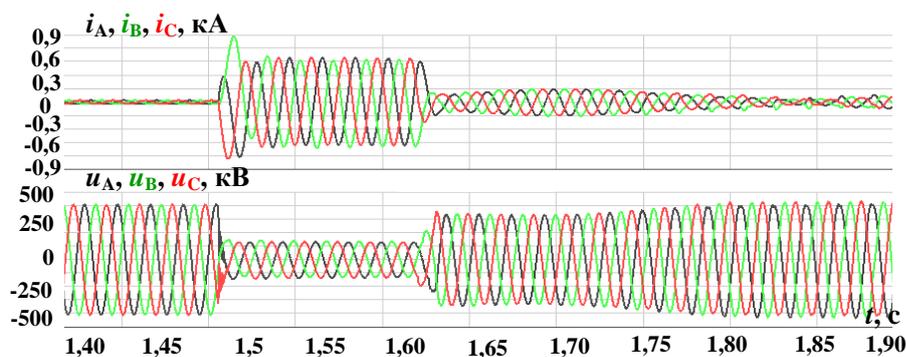


Рисунок 19 – Осциллограммы фазных токов и напряжений ЛЭП 500 кВ ПС 1 при трехфазном КЗ

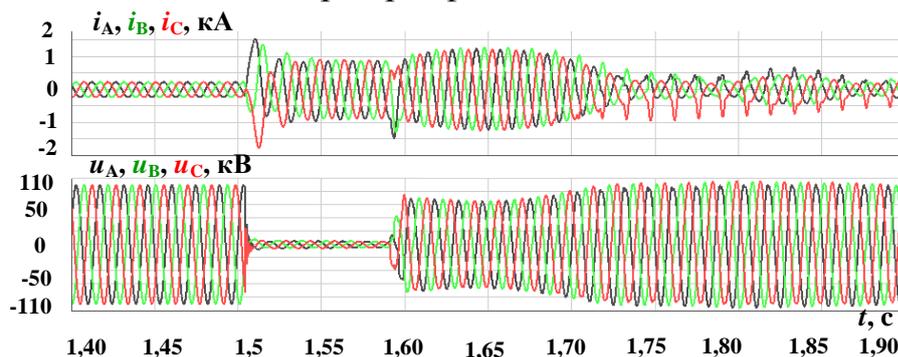


Рисунок 20 – Осциллограммы фазных токов и напряжений ЛЭП 110 кВ ПС 3 при трехфазном КЗ

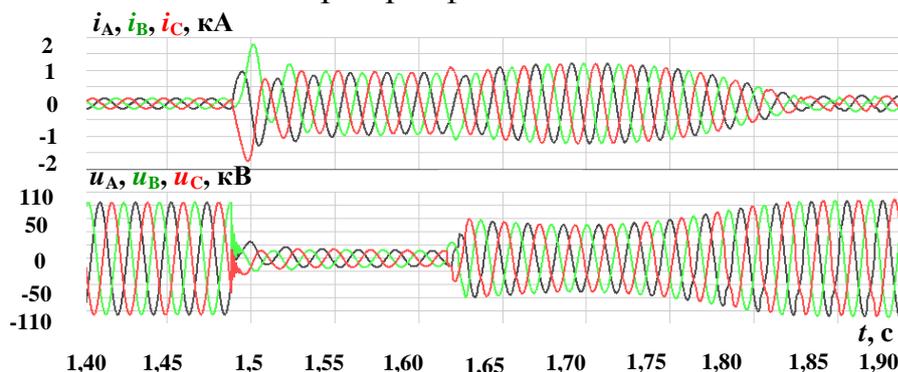


Рисунок 21 – Осциллограммы фазных токов и напряжений ЛЭП 110 кВ ГРЭС при трехфазном КЗ

### Заключение

В результате выполнения диссертационной работы получены теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные результаты, актуальные для исследования проектирования и эксплуатации ВЭУ 4 типа в ЭЭС:

1) выявлены и обоснованы причины существования проблемы всережимного адекватного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС, а также её принципиальная неразрешимость в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода;

2) предложен альтернативный существующему комплексный подход решения проблемы, в соответствии с которым разработана концепция бездекомпозиционного всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС в реальном времени;

3) на основе анализа опубликованных работ и экспериментальных данных, сформулирована математическая модель формирования среднего значения скорости ветра и ее турбулентная составляющая;

4) разработаны структура и принципы построения средств осуществления предложенной концепции моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС;

5) создан экспериментальный образец СПП ВЭУ 4 типа, адаптированный для применения в средствах аналогичного моделирования реальных ЭЭС - ВМК РВ ЭЭС;

6) выполнен комплекс тестовых и экспериментальных исследований, подтверждающий свойства и возможности созданных средств всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС, обеспечивающие бездекомпозиционное с гарантированной приемлемой точностью воспроизведение в реальном времени и на неограниченном интервале единого непрерывного спектра значимых квазиустановившихся и переходных процессов с ВЭУ 4 типа в ЭЭС при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы;

7) результаты тестовых и экспериментальных исследований позволяют:

- осуществлять моделирование ветра для настройки САУ сервоприводом угла поворота лопастей  $\beta$ ;
- моделировать нагрузочные режимы для настройки САУ ВПТ;
- использовать результаты моделирования аварийных режимов для настройки средств релейной защиты и автоматики.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих работах:

**Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:**

1) Ю.Д. Бай, А.В. Шмойлов, М.В. Андреев, А.А. Суворов, А.В. Киевец, И.А. Разживин. Алгоритм определения законов распределения вероятностей параметров режимов и электрических величин при повреждениях в электрических сетях энергосистем // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2018. — Т. 18, № 4. — [С. 13-21]. DOI: 10.14529/power180402

2) Ю.Д. Бай, А.В. Шмойлов, М.В. Андреев, А.А. Суворов, А.В. Киевец, И.А. Разживин. Получение полных вероятностных характеристик параметров режимов задач электроэнергетики // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2018. — Т. 14, № 5. — [С. 64-74].

**Статьи в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus:**

1) Ufa R., Andreev, M., Ruban N., Suvorov A., Gusev A., Razzhivin I., Askarov A., Bay Y., Kievets A., Lozinova N., Suslova O. The hybrid model of VSC HVDC. // Electrical Engineering. – 2019. Vol. 1 <https://doi.org/10.1007/s00202-018-00752-y>

2) Razzhivin I., Bay J., Kievets A., Askarov A., Influence of mathematical model comprehensiveness on distance protection setting of transmission lines. // Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA), 2019, vol. 67, no. 1, pp. 54-60, ISSN 1582-5175.

### **Патент:**

1) Патент на изобретение № 2 694 014 РФ, (51) МПК G06G 7/62 (2006.01) G06G 7/63 (2006.01). Устройство для моделирования передачи постоянного тока в энергетической системе. // Заявка № 2018136514, 16.10.2018. Опубликовано: 08.07.2019 Бюл. № 19.

### **Прочие вышедшие и принятые к печати публикации и материалы конференций:**

1) Малькова Я.Ю., Уфа Р.А., Разживин И.А., Киевец А.В. Анализ факторов, сдерживающих развитие возобновляемых источников энергии в России // Энергия единой сети. 2019. – № 1 (43). С. 49 – 56.

2) Рубан Н.Ю., Разживин И.А., Суворов А.А. Анализ и обоснование причин влияния ветроэнергетических установок разных типов на работу электроэнергетических систем // Научно-технические ведомости Севмашвуза №1 – 2019, С. 4 – 13.

3) Разживин И.А., Аскарлов А.Б., Суворов А.А., Киевец А.В. Синтез математической модели ветротурбины для достоверной оценки влияния ветроэнергетики на режимы работы энергосистем. // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 6 (119). С. 10-15.

4) И.А. Разживин, Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскарлов, Р.А. Уфа, А.В. Киевец. Разработка программно-технических средств моделирования ветроэнергетической установки 4 типа // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2019 (in press).

5) A. A. Suvorov, A. S. Gusev, Y. S. Borovikov, A. O. Sulaymanov, M .V. Andreev, N. Y. Ruban, R. A. Ufa, I. A. Razzhivin, Y. D. Bay, and S. A. Stavitsky. Development of software – hardware system for real time simulation of electric power system with smart grids // Russian Forum of Young Scientists, KnE Engineering, pages 139–146. DOI 10.18502/keg.v3i4.2236.

6) Suvorov A., Gusev A., Ruban, N., Andreev M., Askarov A., Ufa R., Razzhivin I., Kievets A., Bay J. Potential Application of HRTSim for Comprehensive Simulation of Large-Scale Power Systems with Distributed Generation. // International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2019 (in press).

7) Razzhivin I., Sulaimanov A., Stavitsky S. Approach in the modeling of wind turbines for power system stability studies and evaluation of their impact on electric power systems. // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 141 : Smart Grids 2017 : The Fifth International Youth Forum, October 9-13, 2017, Tomsk, Russia: [proceedings]. – [01041, 5 p.].

8) Razzhivin, I.A., Ruban, N.U., Kievets, A.V., Askarov, A.B., Ufa, R.A. Simulating wind power plants for relay protection problems. // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1111 : Problems of energy systems and thermal power complexes. – [012054, 6 p.].

9) Suvorov, I. Razzhivin, A. Evseeva. Challenges and approaches in modeling wind power plants in electric power systems. // AIP Conference Proceedings 2135, 020055, 2019., <https://doi.org/10.1063/1.5120692>

10) A. Suvorov, I. Razzhivin, V. Rostovtseva. Analysis of the effect of wind power plants on the out-of-step protection operation // AIP Conference Proceedings 2135, 020056, 2019., <https://doi.org/10.1063/1.5120693>

11) И. А. Разживин, А. О. Сулайманов, А. В. Хлебов; науч. рук. А. О. Сулайманов. Использование гибридного моделирования для задач интеграции возобновляемых источников энергии в электроэнергетические системы // Интеллектуальные энергосистемы : труды IV Международного молодёжного форума, 10-14 октября 2016 г., г. Томск / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) – 2016. – Т. 3. – С. 13-15.

12) Р. А. Уфа, И. А. Разживин, В. Е. Рудник; науч. рук. Р. А. Уфа. Физическая модель трехуровневого статического преобразователя напряжения // Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИН). – 2016. – Т. 2. – С. 316-320.

13) А. Г. Гожин, И. А. Разживин; науч. рук. И. А. Разживин. Проектирование ветро-солнечной электростанции для электроснабжения села Новоникольское // Интеллектуальные энергосистемы : труды V Международного молодёжного форума, 9-13 октября 2017 г., г. Томск / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИН). – 2017. — Т. 2. – С. 159-163.

14) И.А. Разживин, А.В. Хлебов, С.А. Ставицкий. Подходы в моделировании ветровых электростанций для изучения оценки их влияния на электроэнергетические системы. // XXXIX сессия семинара «Кибернетика энергетических систем» Новочеркасск, 2017 г.

15) А.О. Сулайманов., И.А. Разживин., А.В. Хлебов., В.А. Сулайманова. Использование моделей реального времени при построении систем поддержки принятия решений диспетчерским персоналом ЭЭС //Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. г. Чолпон-Ата, 11-15 сентября 2017 г. С. 452-457