

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Направление подготовки/профиль 13.06.01 Электро- и теплотехника 05.14.02

Электрические станции и электроэнергетические системы.

Школа Инженерная школа энергетики

Отделение Отделение электроэнергетики и электротехники

**Научный доклад об основных результатах подготовленной  
научно-квалификационной работы**

Тема научного доклада
<b>Всерезимное моделирование функционирования ветрогенератора в электроэнергетической системе</b>

УДК 621.548.4-049.7:621.311

Аспирант

Группа	ФИО	Подпись	Дата
A5-42	Разживин Игорь Андреевич		

Руководитель профиля подготовки

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
	Барская А.В.	к.т.н., доцент		

Руководитель отделения

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Ивашутенко А.С.	к.т.н., доцент		

Научный руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭЭ ИШЭ	Гусев Александр Сергеевич	Д.т.н., профессор		

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

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

**Официальные рецензенты:** **Андреев Михаил Владимирович,**  
кандидат технических наук, заведующий НИЛ  
МЭЭС, доцент Отделения электроэнергетики и  
электротехники Инженерной школы энергетики  
«Национального исследовательского Томского  
политехнического университета».

Каменева Татьяна Евгеньевна, к.т.н., Инженер  
ПТС ООО «Горсети»

Защита состоится 30 мая 2019 года в 09:00 на заседании Государственной экзаменационной комиссии по направлению 13.06.01 Электро- и теплотехника, профиль 05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 323.

С научным докладом 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

Секретарь ГЭК

Л.Е. Козлова

## **ВВЕДЕНИЕ**

Страны, подписавшие Киотский протокол, в их числе Россия, и особенно страны с весьма ограниченными или отсутствием углеводородных и урановых ресурсов, с различной интенсивностью, но развивают возобновляемую электроэнергетику, преимущественно путём использования ветроэнергоустановок (ВЭУ) [1-6]. При ощутимой для электроэнергетической системы (ЭЭС) мощности, как минимум несколько мегаватт, ВЭУ могут присоединиться к ЭЭС. В последнем случае, среди разных видов ВЭУ наиболее применимым для работы в составе ЭЭС является ВЭУ 4 типа, представляющая собой ветродвигатель с синхронным генератором, присоединенным через вставку постоянного тока и трансформатор к узлу электрической сети ЭЭС [7-10].

### **Актуальность темы исследования.**

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 в аварийных, и невозможности из-за их сложности адекватного физического моделирования единственным путем получения всей необходимой информации становится преимущественно математическое моделирование [11-15]. При этом для всех типов силового оборудования, систем автоматического регулирования, средств релейной защиты и противоаварийной автоматики, системной автоматики могут быть синтезированы бездекомпозиционно 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, 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 [16-19]. Единственный путь улучшения обусловленности – снижение жесткости и размерности совокупной системы дифференциальных уравнений, которые могут быть осуществлены только за счет радикального упрощения совокупной математической модели ЭЭС, в том числе с ВЭУ и ограничения интервала воспроизводимых процессов, соответственно, существенной утраты достоверности результатов ее решения. Кроме этого, независимо от этих упрощений и ограничений всегда неизвестной остается, принципиально присущая численному интегрированию дифуравнений методическая ошибка [20-24].

Поскольку всю данную проблематику неизбежно наследуют многочисленные программно-вычислительные комплексы (ПВК) расчета режимов и процессов в реальных ЭЭС, достоверность таких расчетов нередко оказывается неудовлетворительной, что подтверждается результатом их верификации [25-31].

Радикальным путем решения данной проблемы, может быть только комплексный подход, представляющий в широком смысле, гибридное моделирование ЭЭС с ВЭУ, позволяющий для каждого аспекта обозначенной сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства агрегирования которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом [32-34].

В связи с вышеизложенным в работе реализован указанных комплексный подход, в соответствии с которым разработана концепция всережимного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале ЭЭС с ВЭУ и средства ее реализации, а их свойства и возможности подтверждены комплексом экспериментальных исследований.

**Степень разработанности темы исследования**

Исследованию аэродинамического преобразования и математической модели ветроколеса посвящено множество исследований известных ученых, таких как Н.Е. Жуковский, Ю. Прандтль и А. Бетц, исследованиями различных путей повышения эффективности ветроустановок занимались Н.В. Красовский, Г.Х. Сабинин, Е.М. Фатеев, В.Н. Андриянов, П.П. Безруких, В.В. Елистратов, В.М. Лятхер и другие. Задачей увеличения производительности ВЭУ за счет совершенствования способов и алгоритмов управления занимались Ю.Г. Шакарян, В.З. Манусов, С.Н. Удалов, С.Г. Обухов, В.Б. Лукутин, Г. Мешалке, М. Поллер, П. Андерсон и др. Вопросами моделирования динамики ВЭУ, анализа совместной работы ВЭУ в составе ЭЭС, посвящены труды В. Ахматова, Т. Аккермана, С. Гейера, Б. Ву, А. Хансен, Э. Мулджади, П. Сорансена и др.

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

Таким образом, несмотря на достаточное развитие ветроэнергетики, проблема полноты и достоверности информации и изученность вопроса совместной работы ВЭУ в ЭЭС, является актуальным. Исходя из этого **идея работы**, посвящена решению обозначенной проблемы моделирования ЭЭС с ВЭУ на основе комплексного подхода.

### **Цели и задачи работы.**

Целью работы является решение задач достоверного моделирования ВЭУ в ЭЭС на основе комплексного подхода. Для достижения указанных целей поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Исследование факторов, влияющих на формирование механического момента ветродвигателя (ВД);
- 2) Разработка математической модели ВЭУ 4 типа;
- 3) Разработка концепции моделирования ВЭУ 4 типа на основе комплексного подхода;
- 4) Создание и разработка экспериментального образца специализированного гибридного процессора (СГП) ВЭУ;

5) Проведение экспериментальных исследований СГП ВЭУ и в составе ЭЭС.

**Предметом исследования** являются нормальные и аномальные, квазиустановившиеся и переходные процессы описывающие работу ВЭУ в ЭЭС.

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

**Научная новизна работы:**

- 1) Проведена систематизация и анализ технологий в области ветроэнергетики, результаты которых использованы для разработки СГП для всережимного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале ВЭУ в ЭЭС
- 2) Обоснованы причины существования проблемы всережимного моделирования ВЭУ в ЭЭС, а также её принципиальная неразрешимость в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода и направление её радикального решения;
- 3) Предложен комплексный подход, представляющий собой гибридное моделирование, позволяющий для каждого аспекта решаемой сложной проблемы применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом;
- 4) В соответствии с предложенной концепцией разработан и реализован СГП ВЭУ.

**Теоретическую значимость работы** определяют:

Результаты теоретического обоснования неразрешимости в рамках существующего одностороннего численного подхода проблемы всережимного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале ВЭУ в ЭЭС. Предложен комплексный подход, представляющий собой гибридное моделирование ВЭУ в ЭЭС. Сформулирована в соответствии комплексным подходом концепция решения проблемы всережимного моделирования, в реальном времени и на неограниченном

интервале, ВЭУ в ЭЭС. Разработана в соответствии с предложенной концепцией структура и принципы построения средств реализации всережимного моделирования ВЭУ в ЭЭС.

### **Практическая значимость работы.**

Разработанные средства всережимного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале ВЭУ в ЭЭС позволяют получить в реальном времени достаточно полную и достоверную информацию о едином непрерывном спектре квазиустановившихся и переходных процессов в ВЭУ и реальной ЭЭС с ВЭУ при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы.

### **Методы исследования:**

Теория дифференциального и интегрального исчислений, метод непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, теория методов дискретизации для обыкновенных 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, экспериментальные методы исследования.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- 1) Факторы, влияющие на формирование механического момента ВЭУ.
- 2) Обоснование комплексного подхода, представляющего собой гибридное моделирование;
- 3) Математические модели, описывающие функционирование ВЭУ
- 4) Структура и принципы реализации экспериментального образца СГП ВЭУ, позволяющего получить полную и достоверную информацию о едином непрерывном спектре нормальных и аномальных, квазиустановившихся и переходных процессах в ЭЭС с ВЭУ при

всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, необходимую для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ВЭУ в ЭЭС;

5) Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие реализацию теоретически обоснованных свойств и возможностей разработанных средств всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале ВЭУ в ЭЭС.

#### **Достоверность результатов исследования.**

Подтверждается использованием классических положений и законов теоретической электротехники, математики, теории дифференциального и интегрального исчисления, теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, метода непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, теоретически обоснованных и апробированных независимыми исследованиями математических моделей.

#### **Апробация результатов исследований.**

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на 5 международных и всероссийских научно-технических конференциях и выставках, в частности: IV и V Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», (Россия, г. Томск, 2016, 2017 гг.), XXXIX сессия семинара «Кибернетика энергетических систем» (Россия, г. Новочеркасск, 2017 г.) Международная специализированная выставка «Электрические сети России» (Россия, г. Москва, 2016г.), Science Week 2017 (Россия, г. Томск 2017г.)

#### **Публикации.**

По теме диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

#### **Личный вклад автора.**

Автором сформулированы цель и задачи исследования, проведен анализ достижений в области диссертационного исследования. Выбраны

методы и средства проведения исследования, разработаны математические модели, использованные в исследовании. Разработка экспериментального образца и проведение испытаний выполнялись при непосредственном участии автора.

### **Реализация результатов работы**

Результаты диссертационной работы 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».

Всережимное моделирование ВЭУ в ЭЭС осуществлено на примере Томской ЭЭС. Произведен анализ работы в аварийных режимах при различных параметрах скорости ветра, мощности ВЭУ.

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

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 77 наименований. Общий объем работы 82 стр., в том числе 67 основного текста, 35 рисунков, 3 таблицы, 1 приложения на.