



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**Бай Юлий Дмитриевич**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЕМОВ И МЕСТ  
ПОДКЛЮЧЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ  
ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВИВШЕГОСЯ  
РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

05.14.02 – Электрические станции и  
электроэнергетические системы

Томск – 2022

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

**Научный руководитель:**

**Андреев Михаил Владимирович**

кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:**

**Соснина Елена Николаевна**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»

**Сулов Константин Витальевич**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники

Защита состоится «26» апреля 2022 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.17 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru).

Автореферат разослан «10» марта 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.17  
к.т.н.



А.В. Прохоров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Согласно статистическим данным потребление электроэнергии в мире стремительно увеличивается, и за последние 15 лет прирост составил примерно 35-40%. Такая тенденция приводит к необходимости ввода новых генерирующих мощностей и замене старых, преимущественно основанных на использовании ископаемого топлива. Многие страны, учитывая мировую экологическую повестку и стремление к энергетической независимости, стремятся перейти к низкоуглеродной или безуглеродной энергетике за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Мировыми лидерами в интеграции ВИЭ являются США, Китай и страны Западной Европы. В настоящее время суммарная установленная мощность ВИЭ в мире приблизительно равна 2497 ГВт, что составляет 37% от всей генерации. Российской Федерацией подписано Парижское соглашение по климату, что накладывает на страну ряд обязательств по снижению углеродных выбросов, в частности, за счет перехода на «зеленую» энергетику. В этом направлении уже предпринят ряд шагов: ГК «Росатом» и Фонд развития ветроэнергетики (ГК «РОСНАНО») получили право на строительство порядка 1,5 ГВт ветрогенерации в Адыгее, Краснодарском крае, Ростовской области, Калмыкии, Астраханской области и Ставропольском крае. Благодаря этому общая установленная мощность ВИЭ будет постепенно увеличиваться, при этом прогнозы, сделанные разными аналитическими агентствами, также показывают, что спрос за период с 2010 по 2040 год на альтернативные источники энергии увеличится на 92%. В рамках диссертации для исследования выбраны ветроэнергетические установки (ВЭУ), поскольку для России они более перспективны в плане широкомасштабного внедрения.

Темпы развития «зеленой» энергетики значительно опережают планы по модернизации электрических сетей, вследствие чего интеграция объектов ВЭУ зачастую происходит без решения ряда вопросов, связанных с их подключением к существующей сети. Это особенно справедливо для российских электроэнергетических систем (ЭЭС), сети в которых отличаются значительной протяжённостью и сложностью топологии. В итоге такой подход неминуемо ведет к повышению токовой загрузки в сети (35 кВ и выше) и, как следствие, росту потерь мощности.

Минимизировать потери мощности при передаче энергии без существенных изменений инфраструктуры можно путем решения задачи определения оптимального объема и места подключения ВЭУ. Данный вопрос

относится к классу задач глобальной оптимизации, решение которой относительно заданной целевой функции позволяет минимизировать (или максимизировать) интересующий параметр. Сам вид и состав целевой функции может варьироваться, однако минимизация потерь мощности выступает одним из основных индикаторов в составе целевой функции как в явном виде, так и с точки зрения расчета себестоимости электроэнергии, поскольку объем выработки электроэнергии объектами ВЭУ носит переменный характер, и несовпадение графиков мощности ветрового потока и электрической нагрузки непосредственно оказывают влияние на возрастание потерь мощности. Минимизация данной составляющей, в свою очередь, зависит от достоверности учета вероятностного характера ВЭУ и параметров режима ЭЭС.

Поставленный вопрос относится к задачам перспективного планирования, и требует оценки распределения перетоков мощности в ЭЭС для разных комбинаций графиков мощности ветрового потока и электрической нагрузки, достоверность проверки которых зависит от используемых в исследовании методов оптимизации. Для решения задач подобного типа активно используются классические (линейного, нелинейного программирования) и современные (алгоритм имитации отжига, роя частиц, генетический алгоритм и др.) алгоритмы оптимизации. С точки зрения нахождения глобального экстремума самыми точными являются методы полного перебора, случайного поиска (методы Монте-Карло) и случайного поиска с накоплением. Также, благодаря полному охвату всей области возможных состояний ЭЭС, данные методы позволяют сформировать соответствующие вероятностные характеристики исследуемых величин, такие как плотность (ПРВ) и функцию распределения вероятностей (ФРВ), что позволяет оценить все возможные значения параметров электрического режима, которые могут наблюдаться в ветвях и узлах ЭЭС. Тем не менее, из-за проблемы формирования вероятностных характеристик параметров режима при значениях редкой повторяемости, применимость ранее обозначенных методов ограничена. Учитывая размерность и сложную топологию современных ЭЭС, актуальными на данный момент являются стохастические и метаэвристические методы. Однако для данных методов возможность решения достигается снижением точности получаемого результата, или отсутствует гарантия получения глобального решения в соответствии с логикой цепей Маркова, которые позволяют доказать сходимость алгоритмов

к глобальному оптимуму только теоретически при устремлении времени работы алгоритма к бесконечности.

Для решения обозначенной проблемы формирования вероятностных характеристик параметров режима при значениях редкой повторяемости, в диссертационной работе представлена разработка методики и средств повышения достоверности формирования вероятностных характеристик параметров установившегося режима ЭЭС для уточнения (в сравнении с методом Монте-Карло) потокораспределения и возможных потерь мощности, в значительной степени определяющих выбор оптимального объема и места подключения ВЭУ.

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

Общие исследования формирования законов распределения вероятностей (ЗРВ) многомерных функциональных зависимостей (ФЗ) различных задач как электроэнергетики, так и математики занимают немаловажную часть в изучении протекаемых в природе процессов. В СССР этой проблеме уделял особое внимание ряд советских ученых: Е.С. Вентцель, А.М. Андронов, В.П. Обоскалов, А.С. Шведов. В других странах данный вопрос разрабатывали: A. Genz, J. Hsu, Ch. M Grinstead и др.

Сравнительный анализ существующих численных методов получения полных вероятностных характеристик представлен в работах ученых: Н.И. Воропай, Н. Huang, K. Dongbum, A. Genz и др. В связи с ростом объемов подключения ВИЭ отдельно можно выделить связанные с этой проблемы при решении задач перспективного планирования, развития сети: Н.И. Воропай, В.А. Веников, В.В. Елистратов, С.А. Ульянов, А. Karimishad, T. Tran-Quoc, P. A. C. Rosas, P. Ju, A. Azmy, J. Milanović, M. Ehsan, S. Xia, L. Miao, и др. Проблема определения оптимальных узлов и объемов подключения ВЭУ рассматривается в статьях: Н. Huang, W. LI, M.A. Ehsan, P. Lamaina, Y.C. Chen, Н. Kumar, R. Anand, J. Mengshoel, U. Sultana и др.

Проблемам сбора, анализа, аппроксимации и воспроизведения временных рядов скорости ветра посвящены труды: А.Б. Рыхлов, Л.М. Гафарова, J. Wang, Н. Akyuz, А. Akdag, Н. Celik, R. Ross, D. Cousineau, K. Dongbum, J.V. Seguro. Непосредственному моделированию полных детерминированных и вероятностных характеристик ВЭУ посвящены труды ученых: V. Sohoni, S.H. Karaki, В.З. Манусов, А. Soroudi, K. Dongbum, А. Teyabeen, S. Vaishali, K. Yang.

Несмотря на достаточно глубокое изучение отдельных вероятностных характеристик параметров установившегося режима ЭЭС, вопросы, связанные

с комплексным анализом процессов в ЭЭС, по-прежнему являются актуальными, поскольку данная информация необходима для надежного и эффективного решения задачи определения оптимальных объемов и мест подключения ВИЭ.

#### **Цели и задачи работы.**

Целью работы является повышение достоверности оценки параметров установившегося режима электроэнергетических систем с ветроэнергетическими установками.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Провести анализ существующих методов и алгоритмов учета вероятностного характера параметров установившегося режима при решении задачи определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ.

2. Разработать и верифицировать методику повышения достоверности формирования вероятностных характеристик параметров установившегося режима ЭЭС с ВЭУ, снижающую необходимое количество статистических испытаний с сохранением статистической значимости.

3. Разработать методику и алгоритм вероятностного определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ в ЭЭС, обеспечивающие контролируемую дискретизацию параметров узлов, которая позволяет учесть влияние вида закона распределения вероятностей входных параметров ЭЭС (напряжение в узлах, мощность генерации и нагрузки) на закон распределения вероятностей выходных параметров (потери мощности).

4. Провести комплекс экспериментальных исследований, подтверждающих свойства и возможности разработанных методики и алгоритма определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ в ЭЭС.

**Объект исследования** – расчет установившегося режима ЭЭС.

**Предмет исследования** – законы распределения вероятностей параметров установившихся режимов ЭЭС, в том числе с ВЭУ.

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработана методика расчета вероятностных характеристик параметров установившегося режима ЭЭС, повышающая достоверность и скорость их формирования за счет учета значений редкой повторяемости путем обработки вероятностных характеристик по принципу несовместных независимых событий установившегося режима.

2. Предложена методика определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ на основе законов распределения вероятностей параметров установившегося режима ЭЭС, задающая контролируемую дискретизацию аргументов для учета влияния вида закона распределения вероятностей входных параметров (напряжение в узлах, мощность генерации и нагрузки) на закон распределения вероятностей выходных параметров (потери мощности) и контроля заданных предельно допустимых параметров режима.

3. Разработан алгоритм определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ в ЭЭС, основанный на формировании и оценке вероятностных характеристик параметров режима, обеспечивающий минимизацию возможных потерь мощности путем оценки изменения числовых характеристик вероятностных параметров потерь мощности.

### **Практическая значимость работы.**

Разработанный алгоритм по сравнению с существующими обладает более высокой достоверностью и скоростью формирования вероятностных характеристик, что способствует уточнению значений потокораспределения и, как следствие, определению объемов и мест подключения ВЭУ с минимально возможными потерями мощности. Данные результаты могут быть актуальны организациям, специализирующимся на интеграции ВИЭ (например, АО «Роснано», АО «НоваВинд» и др.), а также электросетевым компаниям (ПАО «Россети» и др.), поскольку одним из приоритетных направлений программ их инновационной деятельности является снижение электрических потерь в сети и повышение ресурсоэффективности.

### **Методы исследований.**

Методы статистического моделирования, теория вероятностей и математическая статистика, теория дифференциального и интегрального исчисления, теория методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, теория линейных и нелинейных электрических цепей, методы математического моделирования.

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

1. Разработанная методика повышения достоверности формирования вероятностных характеристик параметров установившегося режима ЭЭС с ВЭУ обеспечивает более достоверный расчет вероятностных характеристик посредством учета значений редкой повторяемости и снижения количества статистических испытаний (в сравнении с методом Монте-Карло).

2. Предложенная методика определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ на основе законов распределения вероятностей

параметров установившегося режима ЭЭС позволяет учитывать характеристики формы вероятностных распределений различных типов, обеспечивая полное и достоверное формирование вероятностных характеристик выходных параметров (потери мощности).

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

Достоверность полученных в ходе экспериментальных исследований результатов подтверждается регламентирующими нормативно-техническими документами, общими положениями теории вероятностей, математики, теоретически обоснованными исследованиями свойств зависимых/независимых случайных аргументов и несовместных значений многомерных функциональных зависимостей, верификацией разработанной методики путем сравнения результатов расчетов с аналитическими решениями задач малой размерности, использованием методов аппроксимации в совокупности с критериями согласия.

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

Результаты исследования были представлены и обсуждены на XXV Международном научном симпозиуме студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2021), XI Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Ставрополь, 2020), International Youth Scientific Conference on Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment (Томск, 2019), Международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития» (Томск, 2018), XXXIX сессии семинара «Кибернетика энергетических систем» по тематике «Электроснабжение» (Новочеркасск, 2017), 5th International Youth Forum on Smart Grids (Томск, 2017), VII Всероссийской конференции «Ресурсоэффективным технологиям — энергию и энтузиазм молодых» (Томск, 2016), VII Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (Томск, 2015), XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2014), I международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (Новосибирск, 2014), Двадцатой всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2014).

#### **Публикации.**

Все основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 10 работах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых изданиях



перечня ВАК РФ, в 3 работах в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, а также в патенте на изобретение.

#### **Личный вклад автора.**

В ходе работы над диссертационной работой была произведена разработка методики повышения достоверности формирования вероятностных характеристик параметров установившегося режима ЭЭС; разработка и отладка программы реализации алгоритма вероятностного расчета оптимального потокораспределения по критерию минимизации потерь мощности в ЭЭС. Автором проведено сравнение вероятностных характеристик маломерных функциональных зависимостей, полученных разработанной методикой и аналитическими инструментами; реализовано получение ЗРВ параметров режимов и электрических величин в установившемся режиме, с учетом разработки вычислительных процедур для поиска оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ.

#### **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».

При поддержке стипендиального фонда Президента Российской Федерации (2021-2023) по направлению «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива» осуществляется работа по теме: «Вероятностная оценка устойчивости электроэнергетических систем со значительной долей возобновляемых источников энергии» (СП-4505.2021.1).

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

Диссертационная работа содержит 137 страниц, в том числе 56 рисунков, 25 таблиц, список цитируемой литературы из 96-ти наименований и состоит из введения, 4-х глав, заключения, и 3-х 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, публикации и реализации результатов, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** приведен аналитический обзор работ, публикаций, посвященных методам и алгоритмам учета вероятностного характера параметров установившегося режима при решении задачи определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ. Учитывая стохастический характер ВЭУ и флуктуации параметров ЭЭС, вопрос требует оценки распределения возможных перетоков мощности для разных вариантов графиков мощности ВЭУ и электрической нагрузки. Детерминированные методы не способны в полной мере обеспечить охват всех возможных изменений параметров режима, в соответствии с чем решение задачи осуществляют с использованием методов и средств оптимизации. Анализ целевых функций данной задачи глобальной оптимизации показал, что потери мощности в ЭЭС являются одним из основных индикаторов, используемых при решении задачи поиска оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ, в соответствии с чем уточнение потокораспределения и возможных потерь мощности будет способствовать повышению качества решения задачи по критерию минимизации потерь мощности в ЭЭС. Возможность же частичного учета этих процессов стохастическими или полный учет вероятностными методами предопределяет направление разработки и реализации методики.

Для решения поставленной проблемы с применением вероятностных характеристик аналитически требуется рассмотреть решение соответствующих многомерных интегралов. Однако из-за их размерности аналитическое решение не осуществимо в связи со сложностью определения пределов интегрирования подынтегральной функции. В связи с этим применяется ряд численных методов моделирования как самих режимов сети с ВЭУ, так и агрегатов отдельно. К ним можно отнести: методы численного интегрирования; методы оценки выходных параметров ВИЭ с частичным применением моментных характеристик входных данных; и с использованием полных совокупностей вероятностных характеристик.

Основная проблема используемых численных методов, основанных на применении метода Монте-Карло и аналогичных, заключается в том, что они основаны на случайном формировании исходных данных. При увеличении

размерности ЭЭС экспоненциально возрастает минимально необходимое количество проводимых экспериментов для получения достоверного результата. Также, численные методы не подразумевают прямой калькуляции вероятностных характеристик. Для их получения дополнительно требуется использовать аппроксимационные алгоритмы, а после проводить проверку критериями согласия на соответствие исходным данным, что также усложняет применение данного подхода к определению оптимальных объемов и узлов подключения ВЭУ.

Учитывая вышеизложенное, разработка и реализация методики определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ путем формирования и оценки выходных вероятностных характеристик параметров режима по входным является актуальной.

**Во второй главе** приведена разработка и верификация методики повышения достоверности формирования вероятностных характеристик параметров установившегося режима. Основная логика методики заключается в осуществлении преобразования входных вероятностных данных в выходные, когда и на входе имеются полные вероятностные характеристики, и на выходе также получаются полные вероятностные характеристики исследуемых величин.

Исходя из свойств ЭЭС, основные параметры сети в разных узлах схемы являются вероятностно-независимыми друг от друга, а в рамках одного узла они независимы или имеют парную зависимость. При этом каждое отдельное состояние энергосистемы имеет свою вероятность наступления и эта вероятность несовместная, т.к. система не может находиться в нескольких состояниях одновременно. При разных состояниях системы может происходить так, что изучаемая величина имеет то же самое значение, но вероятность иная. Из-за того, что события несовместные, их вероятности можно суммировать для каждого отдельного значения исследуемой величины.

Алгоритм получения ПРВ многомерной ФЗ в обобщенном упрощенном виде можно представить в виде следующих процедур:

1. Подготовка видов и параметров одномерных ФРВ и ПРВ случайных аргументов (СА):

$$\begin{aligned} & \mu_1 \dots \mu_i \dots \mu_n, \sigma_1 \dots \sigma_i \dots \sigma_n; \\ & X_1, \dots, X_i, \dots, X_n, \text{ т.е. } f_1(x_1), \dots, f_i(x_i), \dots, f_n(x_n); \\ & c_1(x_1), \dots, c_i(x_i), \dots, c_n(x_n), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mu$  – математическое ожидание (МО),  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение (СКО),  $f$  – ФРВ,  $c$  – ПРВ.

2. Выбор количества и самих значений порядков квантилей ФРВ:  $0, p_1, \dots, p_j, \dots, 1$ ,

где  $p$  – порядок квантиля.

3. Формирование значений СА, функциональной зависимости  $Y = \varphi(X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)$  как квантилей каждого выбранного одного порядка ФРВ и одномерных ПРВ случайных аргументов от этих квантилей:

порядок 0:

$$\begin{aligned} x_{10} = f_1^{-1}(0), \dots, x_{i0} = f_i^{-1}(0), \dots, x_{n0} = f_n^{-1}(0) \\ y_0 = \varphi(x_{10}, \dots, x_{i0}, \dots, x_{n0}); \\ c_1(x_{10}), \dots, c_i(x_{i0}), \dots, c_n(x_{n0}), \end{aligned} \quad (2)$$

порядок  $p_j$ :

$$\begin{aligned} x_{1p_j} = f_1^{-1}(p_j), \dots, x_{ip_j} = f_i^{-1}(p_j), \dots, x_{np_j} = f_n^{-1}(p_j); \\ y_{p_j} = \varphi(x_{1p_j}, \dots, x_{ip_j}, \dots, x_{np_j}); \\ c_1(x_{1p_j}), \dots, c_i(x_{ip_j}), \dots, c_n(x_{np_j}), \end{aligned} \quad (3)$$

порядок 1:

$$\begin{aligned} x_{11} = f_1^{-1}(1), \dots, x_{i1} = f_i^{-1}(1), \dots, x_{n1} = f_n^{-1}(1); \\ y_1 = \varphi(x_{11}, \dots, x_{i1}, \dots, x_{n1}); \\ c_1(x_{11}), \dots, c_i(x_{i1}), \dots, c_n(x_{n1}), \end{aligned} \quad (4)$$

4. Базовые составляющие совместных ФРВ и ПРВ случайных аргументов ФЗ или порядки квантилей ФЗ как совмещений значений всех независимых СА (как квантилей одного порядка):

порядок 0:

$$\begin{aligned} 0 \cdots 0 \cdots 0 = f_{1\dots i\dots n}(x_{10}, \dots, x_{i0}, \dots, x_{n0}) = f_1(x_{10}) \cdots f_i(x_{i0}) \cdots f_n(x_{n0}); \\ c_{1\dots i\dots n}(x_{10}, \dots, x_{i0}, \dots, x_{n0}) = c_1(x_{10}) \cdots c_i(x_{i0}) \cdots c_n(x_{n0}), \end{aligned} \quad (5)$$

порядок  $p_j$ :

$$\begin{aligned} p_j \cdots p_j \cdots p_j = f_{1\dots i\dots n}(x_{1p_j}, \dots, x_{ip_j}, \dots, x_{np_j}) = f_1(x_{1p_j}) \cdots f_i(x_{ip_j}) \cdots f_n(x_{np_j}) \\ c_{1\dots i\dots n}(x_{1p_j}, \dots, x_{ip_j}, \dots, x_{np_j}) = c_1(x_{1p_j}) \cdots c_i(x_{ip_j}) \cdots c_n(x_{np_j}), \end{aligned} \quad (6)$$

порядок 1:

$$\begin{aligned} 1 \cdots 1 \cdots 1 = f_{1\dots i\dots n}(x_{11}, \dots, x_{i1}, \dots, x_{n1}) = f_1(x_{11}) \cdots f_i(x_{i1}) \cdots f_n(x_{n1}); \\ c_{1\dots i\dots n}(x_{11}, \dots, x_{i1}, \dots, x_{n1}) = c_1(x_{11}) \cdots c_i(x_{i1}) \cdots c_n(x_{n1}), \end{aligned} \quad (7)$$

5. Формирование и обработка квантилей порядков независимых СА  $X_1, \dots, X_i, \dots, X_n$  функциональной зависимости  $Y = \varphi(X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)$ , вычисление значений ФЗ  $\varphi(x_{1p_j}, \dots, x_{ik}, \dots, x_{nl})$ , совместных ПРВ случайных аргументов, выбор и суммирование последних как составляющих ПРВ функциональной зависимости  $Y = \varphi(X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)$  по принципу равенства ФЗ.

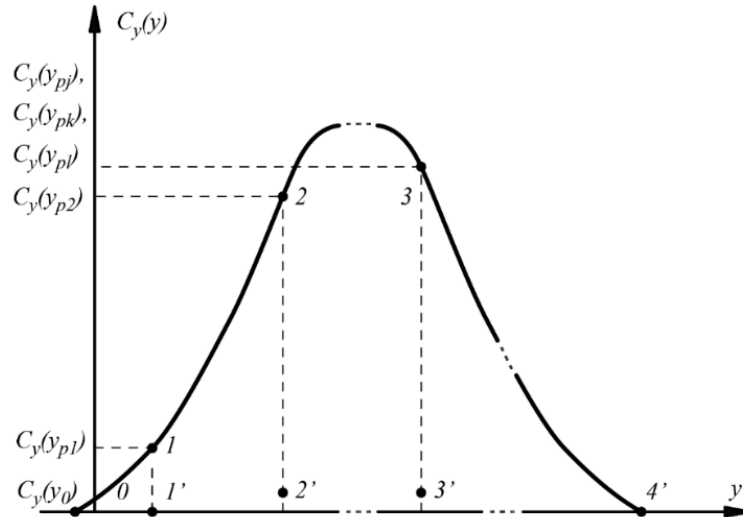


Рисунок 1 – Формирование ПРВ функциональной зависимости

Для верификации методики было выполнено сравнение с аналитическим решением на примере задач малой размерности.

Пример 1. Функциональная зависимость  $Y = \varphi(X_1 + X_2 + X_3)$ .

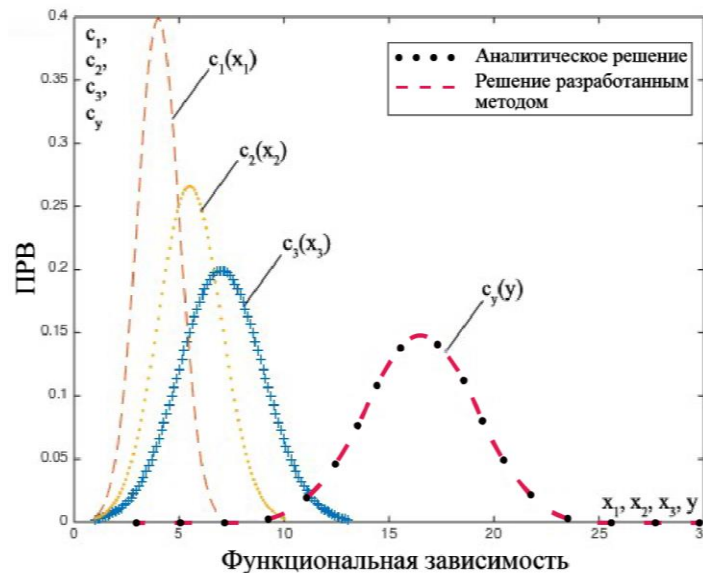


Рисунок 2 – ПРВ функциональной зависимости  $Y = \varphi(X_1 + X_2 + X_3)$ ,

где:  $c_1(x_1)$  – ПРВ случайного аргумента  $X_1$ , нормальный ЗРВ с параметрами МО = 4 и СКО = 1;  $c_2(x_2)$  – ПРВ случайного аргумента  $X_2$ , нормальный ЗРВ с параметрами МО = 5.5 и СКО = 1.5;  $c_3(x_3)$  – ПРВ

случайного аргумента  $X_3$ , нормальный ЗРВ с параметрами  $MO = 7$  и  $CKO = 2$ ;  $c_y(y)$  – ПРВ функциональной зависимости.

Пример 2. Функциональная зависимость  $Y = \varphi(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n)$ .

С увеличением числа СА с равномерным распределением, результирующая форма свертки ФЗ будет стремиться к формированию нормального закона. Ниже представлена работа методики для случая использования 2, 3, и 4 аргументов с равномерным распределением для  $Z = \varphi(X + Y + V + W)$ .

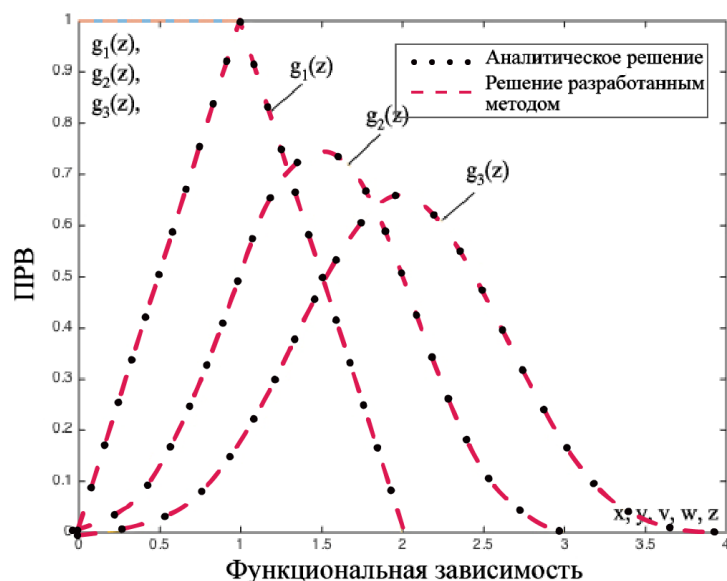


Рисунок 3 – ПРВ суммы  $n$ -равномерных распределений СА

Исходя из полученных результатов сравнений данных плотность, полученная аналитическим путем, и плотность, полученная разработанной методикой, полностью совпадают. Таким образом, можно сделать вывод об адекватности разработанной методики.

Дополнительно было проведено сравнение разработанной методики (РМ) с численным методом формирования ПРВ Монте-Карло (МК) для задач малой размерности и тестовых схем – IEEE-4, IEEE-14, и IEEE-57.

Пример 3. Потери мощности ветви №1 схемы IEEE-14.

Метод	$\mu_{ФЗ}$	$\delta_{\mu}(\%)$	$\sigma_{ФЗ}$	$\delta_{\sigma}(\%)$	$\Phi_{Зabs}$	$\delta_{РМ/МК}$	n	Время, с
МК	5.6657	-	9.3321	-	22.9743	1.0000	3100450	6867.317
РМ	5.6658	0.0017	13.6558	46.3314	33.4909	1.0000		4025.125
МК	5.6557	0.1765	9.1765	1.6673	22.8809	0.8052	300000	664.482
РМ	5.6658	0.0017	13.6681	46.4632	33.4909	0.8740		389.471
МК	5.6874	0.3830	9.1889	1.5344	21.3552	0.5061	83521	176.075
РМ	5.6658	0.0017	13.6737	46.5232	33.4909	0.6168		77.054
МК	5.4175	4.3807	9.1561	1.8859	15.1069	0.1672	6400	19.470
РМ	5.6658	0.0017	13.7345	47.1748	33.4909	0.2759		11.858

**В третьей главе** представлена логика формирования ПРВ параметров установившегося режима ЭЭС, в том числе с ВЭУ.

Сформирована соответствующая модель и вероятностные характеристики ветрогенератора с учетом следующих требований:

- 1) использование полных верифицированных данных временных рядов ветра, аппроксимированных по реальным замерам;
- 2) использование контролируемой дискретизации для учета значений редкой повторяемости, применение единой шкалы выборки для всех аргументов ЭЭС (генерация, нагрузка, ВЭУ);
- 3) возможность стохастического расчета ЭЭС и получения достоверных вероятностных характеристик параметров системы на всем интервале данных формирования плотности вероятности.

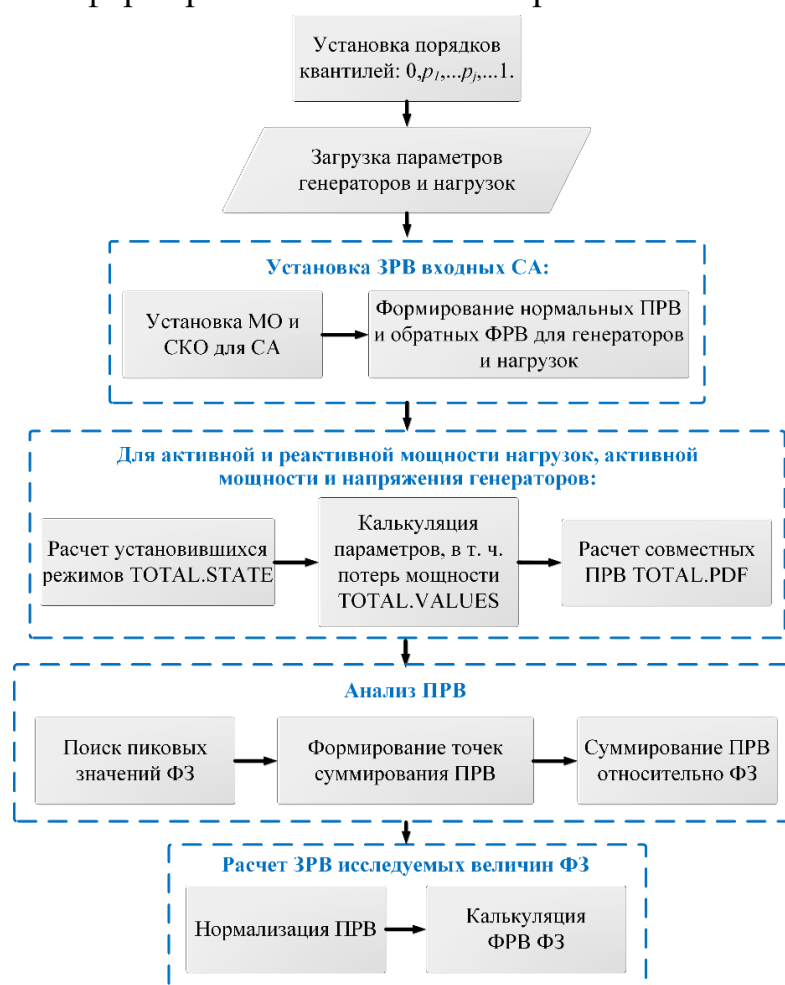


Рисунок 4 – Алгоритм вероятностного расчета установившегося режима

**В четвертой главе** приведены методика и алгоритм вероятностного определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ. Также представлены результаты экспериментальных исследований. Для моделирования ЭЭС с ВЭУ в вероятностном формате использовался программный комплекс Matpower. Расчеты проводились для схем ЭЭС IEEE-14 и IEEE-57.

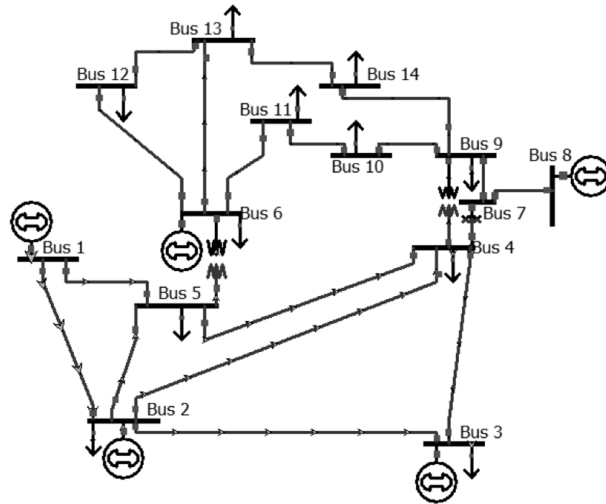


Рисунок 5 – Тестовая схема IEEE-14

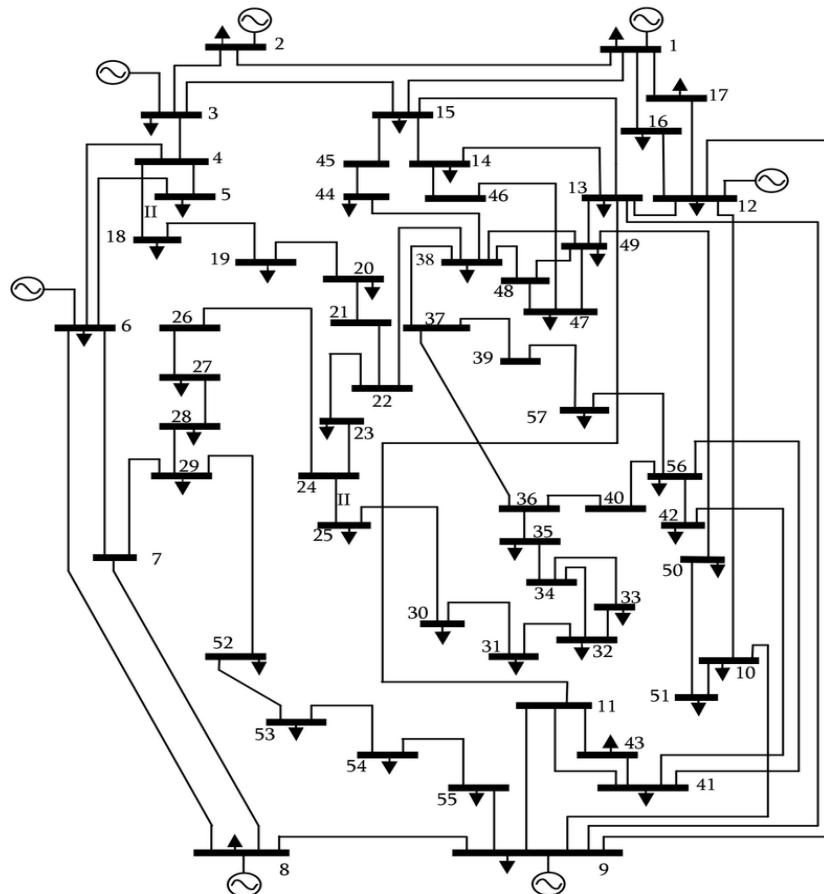


Рисунок 6 – Тестовая схема IEEE-57

Отслеживаемыми параметрами задаются потери мощности в ветвях (МО, СКО, мода, медиана) и изменения уровней напряжений в узлах ЭЭС, учитывающие выполнение предельно допустимых ограничений по напряжению и току. Планируемый учет значимости ПРВ параметров – 95-99%. Ограничение тока в каждой ветви тоже устанавливается в 95% случаев. В первую очередь рассчитывается установившийся режим IEEE-14. Первым этапом происходит определение вероятностных характеристик узлов и ветвей.



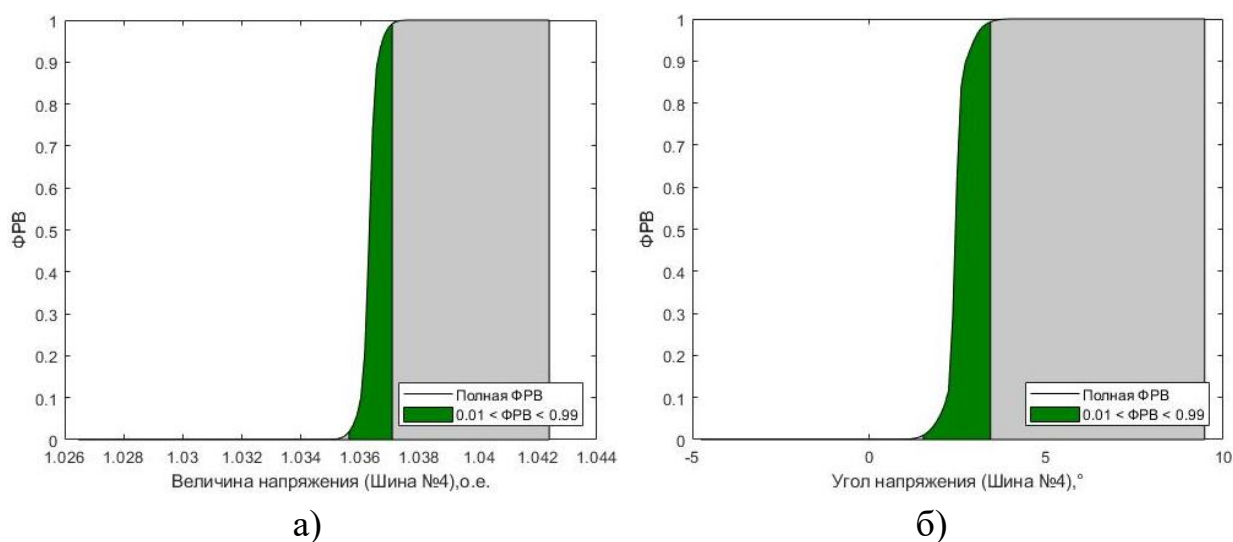


Рисунок 7 – ФРВ величины напряжения (а) и его угла (г) на шине № 4  
Вторым этапом происходит определение вероятностных характеристик потерь мощности в ветвях.

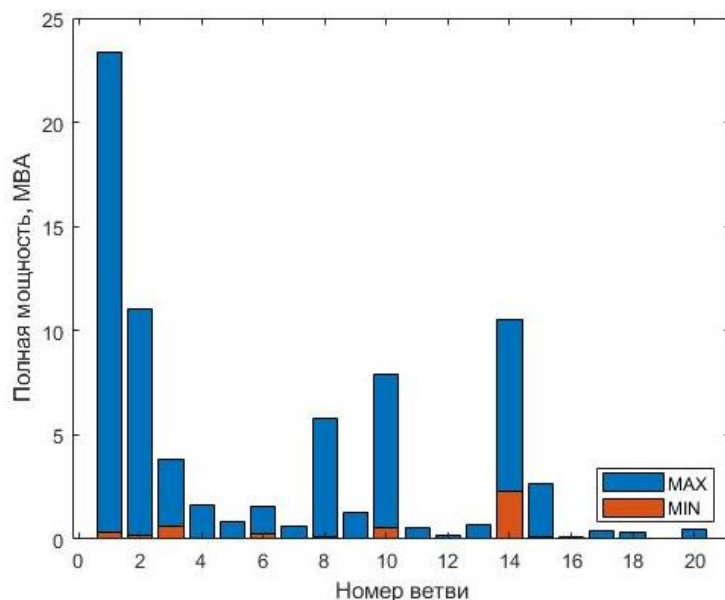


Рисунок 8 – Потери мощности в ЭЭС

Для рассмотрения дальнейшего подключения ВЭУ выделены ветви № 1, 2 и 14, а именно узлы № 2, 5, и 8.

Таблица 1 – Вероятностные данные потерь мощности выборки ветвей

Величина	Минимум ФЗ	Максимум ФЗ	ФЗ (ФРВ > 0,99)	ФЗ (%) от максимума ФЗ
$S_{л1}$ , МВА	0,3617	23,3366	5,34	23,24
$S_{л2}$ , МВА	0,203	11,035	5,168	47,71
$S_{л14}$ , МВА	2,317	10,534	6,563	53,93

Аналогично для IEEE-57. Максимально допустимые потери представлены на рисунке 9.

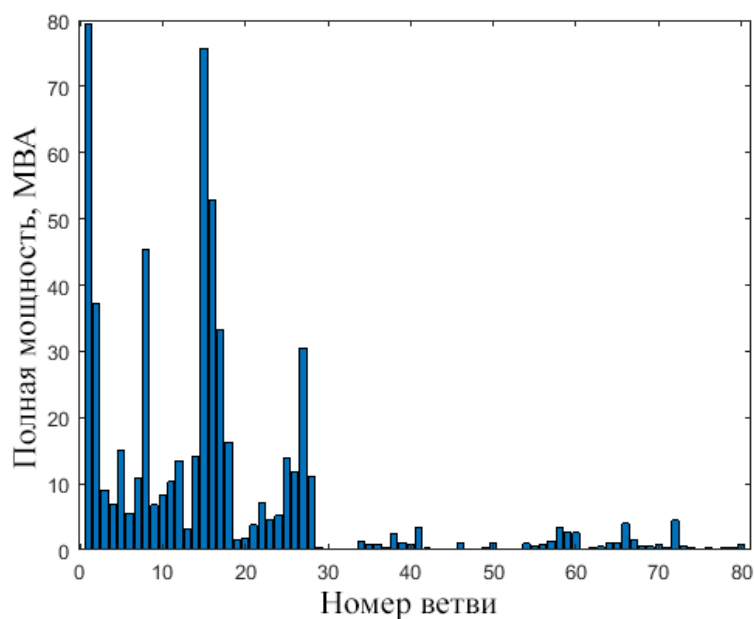


Рисунок 9 – Потери мощности в ЭЭС

Таблица 2 – Вероятностные данные выборки ветвей

	Величина	Минимум ФЗ	Максимум ФЗ	ФЗ (ФРВ > 0,99)	ФЗ (%) от максимума ФЗ	Мода
1	$S_{л1}$ , МВА	0,7959	75,671	3,218	4,25	2,5884
	$S_{л15}$ , МВА	<b>0,0685</b>	<b>79,4</b>	<b>6,691</b>	<b>8,65</b>	<b>5,3812</b>
2	$S_{л8}$ , МВА	<b>1,860</b>	<b>45,431</b>	<b>13,122</b>	<b>30,11</b>	<b>11,301</b>
	$S_{л16}$ , МВА	0,0156	52,752	2,213	4,19	0,8945
3	$S_{л2}$ , МВА	0,0005	37,289	1,554	4,16	0,9327
	$S_{л17}$ , МВА	0,0090	33,232	1,671	5,03	1,1165
	$S_{л27}$ , МВА	<b>0,0036</b>	<b>30,482</b>	<b>1,508</b>	<b>4,62</b>	<b>2,2541</b>

В случае примерного равенства наблюдаемых потерь в ряде узлов вычисляются моды распределений – самые часто повторяемые значения. Для рассмотрения дальнейшего подключения ВЭУ выделены ветви № 27, 8 и 15, а именно узлы № 9, 12 и 15.

Далее в рассматриваемые системы подключается ветроэнергетическая установка в качестве P-V узла, чтобы иметь возможность регулировать уровень напряжения. Для экспериментов были взяты три временных ряда ветра с неизвестными законами распределения. Каждая выборка аппроксимировалась с последующей проверкой на соответствие выбранным законам критериями согласия. Первым данным максимально соответствует распределение Вейбулла, вторым – Рэлея, а третьим – нормальное.

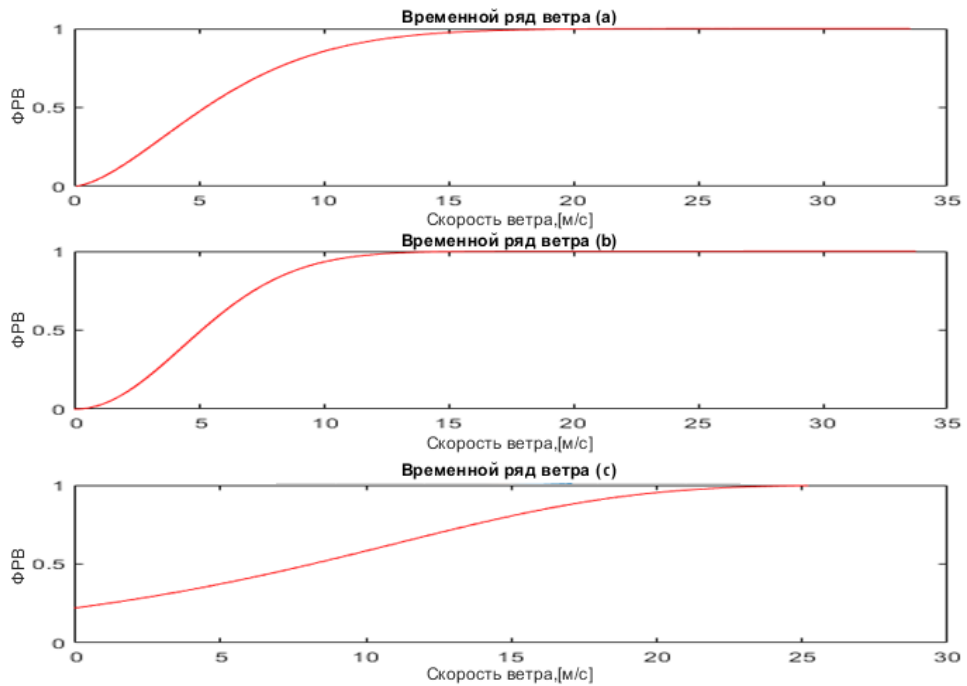


Рисунок 10 – Сформированные ФРВ временных рядов ветра

Модель кривой мощности для моделирования ВЭУ выбрана параметрическая кубическая (тип 2). Технические характеристики взяты из данных турбины NREL 5.0 МВт. По полученным ранее законам ветра находятся кривые мощности и вероятностные характеристики для каждой выборки. Генерируемая мощность ветротурбины определяется как:

$$P_i^w = \begin{cases} 0 & \text{если } v \leq v_{\text{трог.}} \text{ или } v \geq v_{\text{срыв.}} \\ \frac{v^3 - v_{\text{трог.}}^3}{v_{\text{ном.}}^3 - v_{\text{трог.}}^3} P_{i,r}^w & \text{если } v_{\text{трог.}} \leq v \leq v_{\text{ном.}} \\ P_{i,r}^w & \text{иначе} \end{cases} \quad (8)$$

Где  $P_{i,\text{ном.}}^w$  - номинальная мощность ветротурбины, подключенной к  $i$ -ой шине,  $P_i^w$  - генерируемая мощность ветротурбины в  $i$ -ой шине,  $v_{\text{срыв.}}$  - скорость срыва,  $v_{\text{трог.}}$  - скорость трогания,  $v_{\text{ном.}}$  - номинальная скорость ветротурбины.

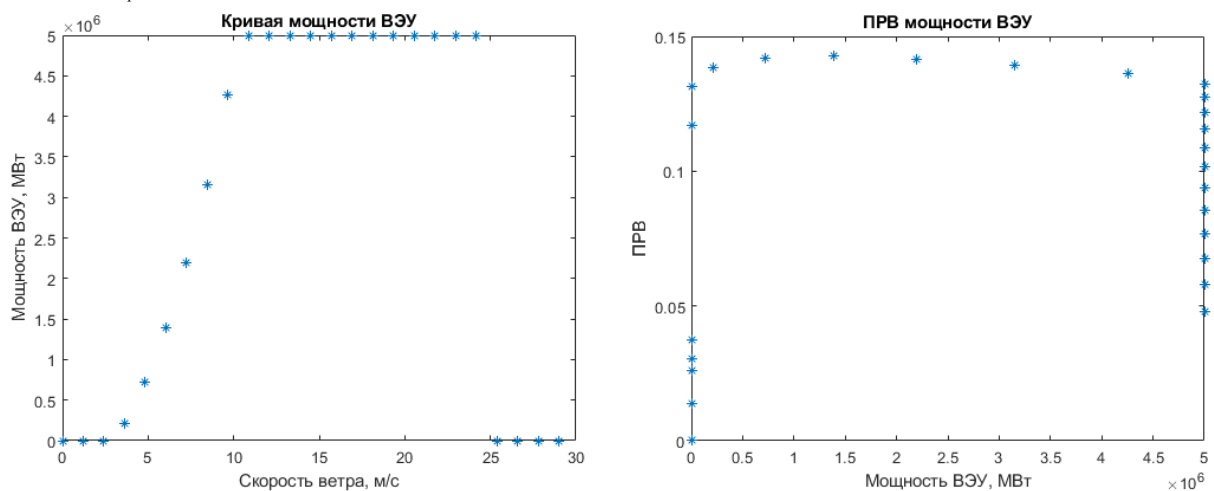


Рисунок 11 – Кривая мощности и ПРВ для закона Вейбулла

Условия выбора оптимального объема мощности ВЭУ, места подключения, а также закона распределения сформированы исходя из общих положений теории вероятностей и свойств случайных аргументов, в соответствии с чем:

- полные потери мощности увеличиваются не более, чем на 5%;
- превышение ФРВ полных потерь мощности сети 99% (не более 20%);
- минимальное смещение моды потерь мощности (до 20%);
- ограничение предельного тока каждой ветви устанавливается в 95%;
- смещение СКО относительно МО (до 20%).

Далее проводятся эксперименты по подключению ВЭУ.

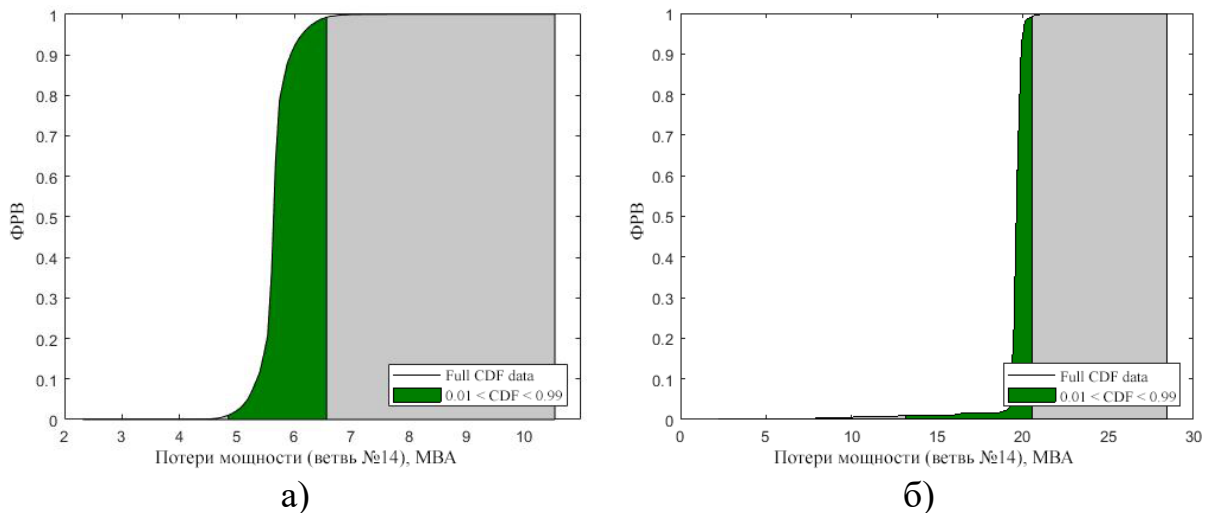


Рисунок 12 – ФРВ потерь мощности в 14 ветви ЭЭС без ВЭУ (а) и с ВЭУ (б)

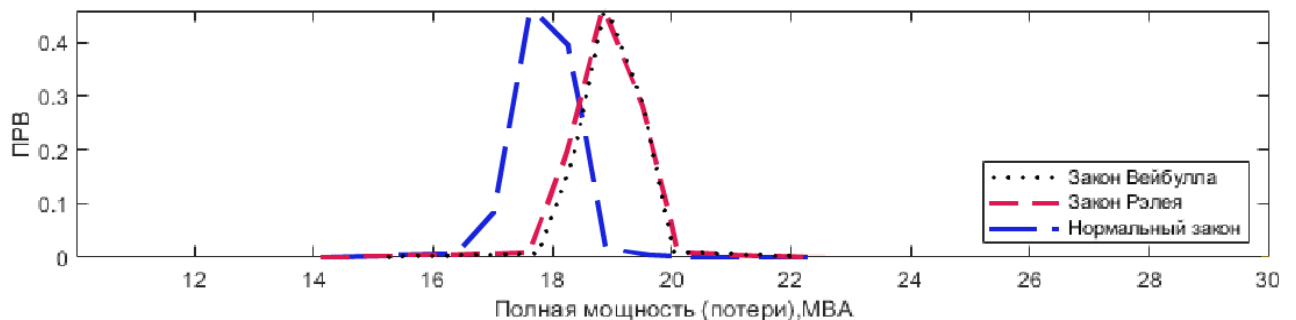


Рисунок 13 – Изменение ПРВ потерь мощности при подключении ВЭУ с разным ЗРВ ветра мощностью 20 МВт в узел 5

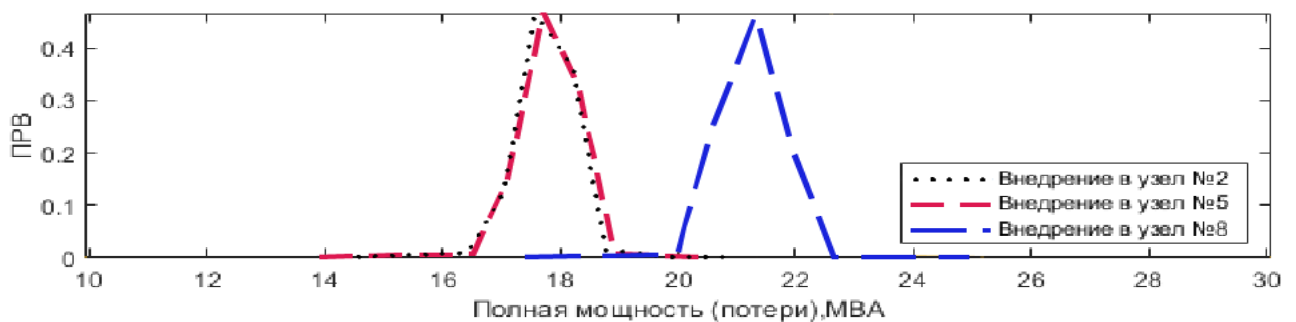
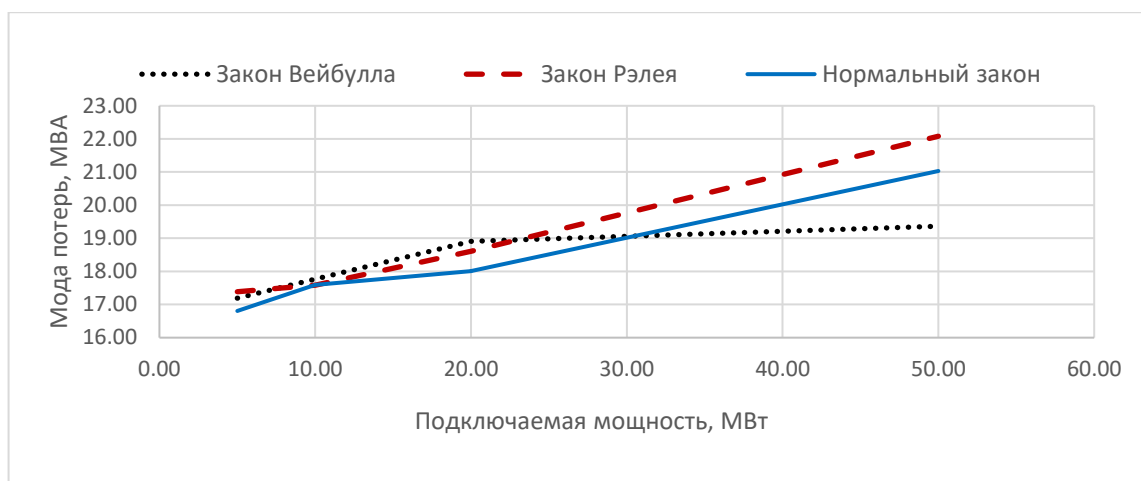
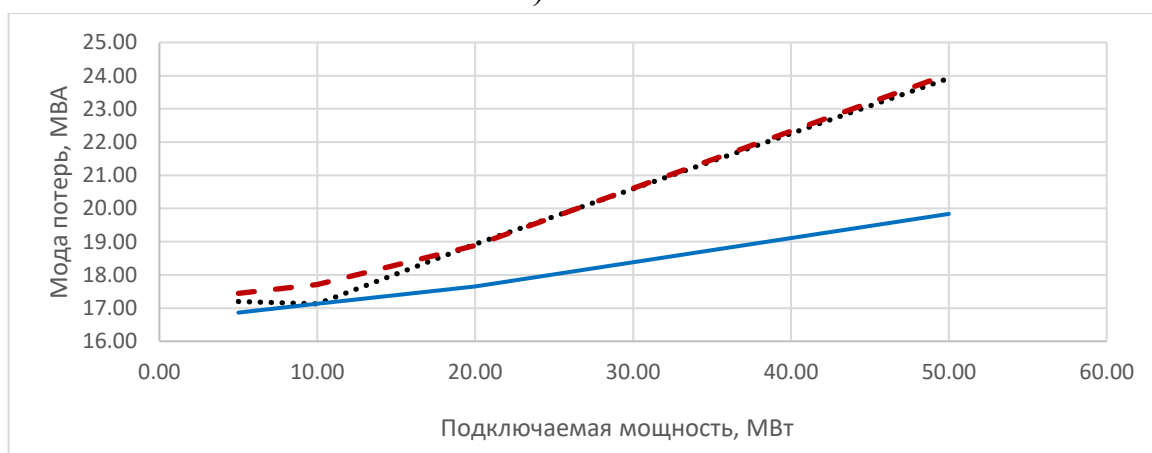


Рисунок 14 – Изменение ПРВ потерь мощности при подключении ВЭУ с ЗРВ Рэлея мощностью 10 МВт в перечень узлов



а) Узел 2



б) Узел 5

Рисунок 15 – Изменение мод потерь мощности при подключении ВЭУ с различным ЗРВ в перечень узлов

Согласно полученным данным:

– для объема подключения 5 МВт допустимо присоединение ко всем рассмотренным узлам, однако оптимальными вариантами будут: № 2 (нормальный закон), № 5 (нормальный закон) и № 2 (закон Вейбулла);

– для объема подключения 10 МВт допустимо присоединение ко всем рассмотренным узлам, но в узле № 8 возможно использование только нормального закона. Оптимальными вариантами будут: № 5 (закон Вейбулла) и № 2 (закон Рэля);

– для объема подключения 20 МВт допустимо присоединение к узлам №2 и № 5. Оптимальные варианты: № 5 (нормальный закон) и № 2 (нормальный закон, закон Вейбулла);

– объем подключения 50 МВт допустим в узел № 2 (закон Вейбулла).

Аналогично проводятся эксперименты по присоединению ВЭУ к 57 узловой схеме. В данном случае рассмотрено подключение ВЭУ только с законом Вейбулла.

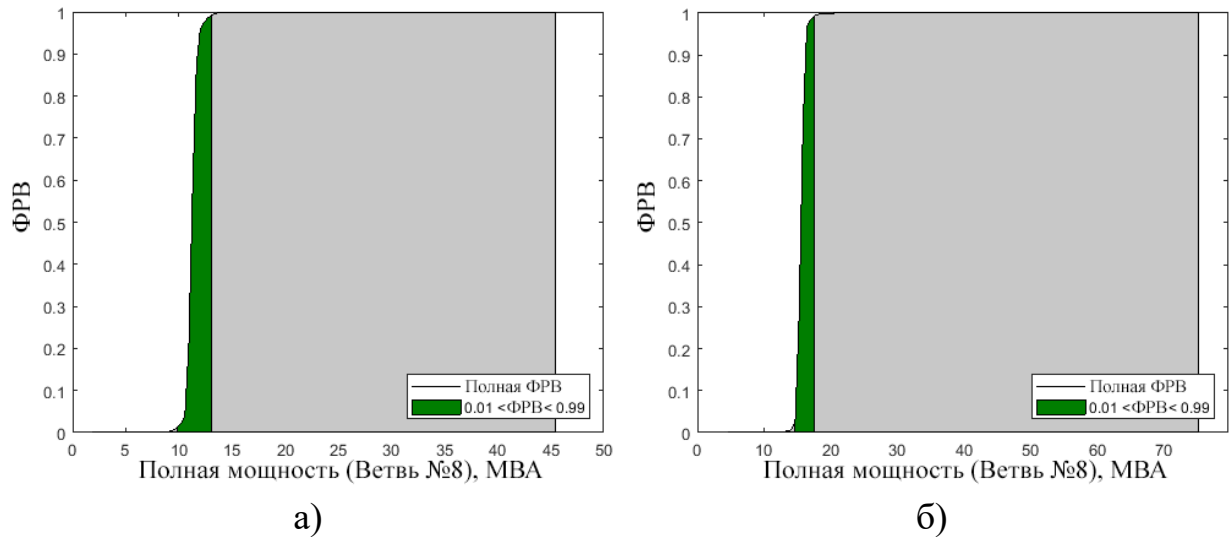


Рисунок 16 – ФРВ потерь мощности в 8 ветви ЭЭС без ВЭУ (а) и с ВЭУ (б)

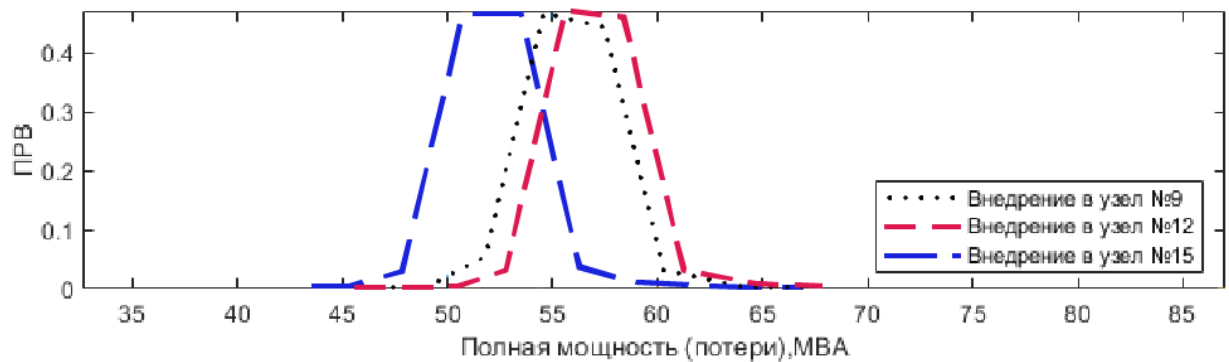


Рисунок 17 – Изменение ПРВ потерь мощности при подключении ВЭУ с ЗРВ Вейбулла мощностью 20 МВт в перечень узлов

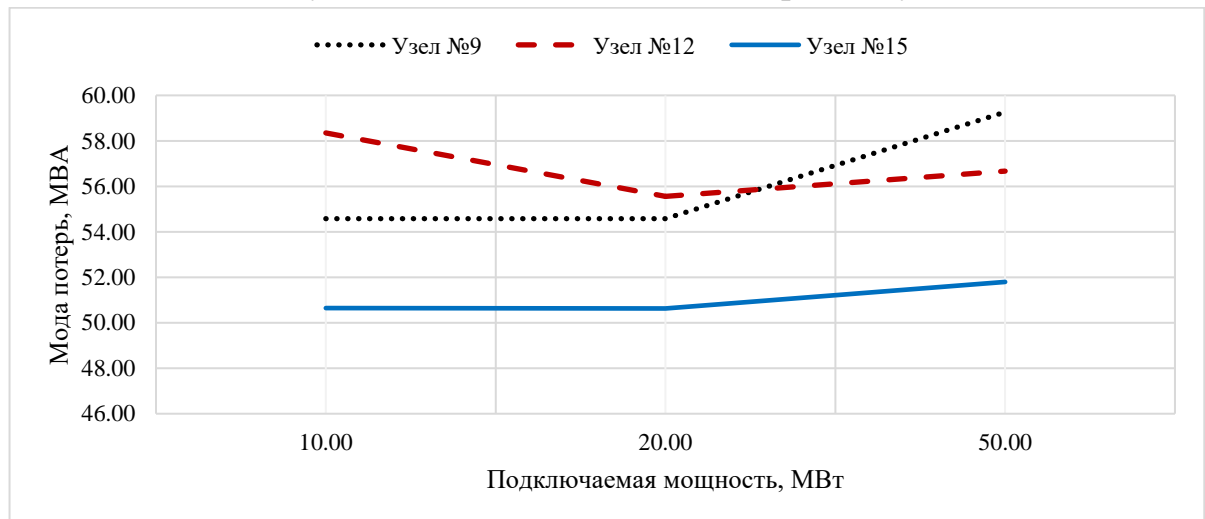


Рисунок 18 – Изменение мод потерь мощности при подключении ВЭУ с ЗРВ Вейбулла в перечень узлов

В соответствии с полученными данными:

- для подключения 10 МВт оптимальными узлами являются: № 15, 9, 12;
- для подключения 20 МВт оптимальными узлами являются: № 15, 9, 12;
- для подключения 50 МВт оптимальными узлами являются: № 15 и 12.

По контролируемым параметрам не проходит подключение 50 МВт в узел №9.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполнения диссертационной работы получены теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные результаты, актуальные для исследования оптимальных сценариев подключения ВЭУ:

1. Разработана методика расчета вероятностных характеристик параметров установившегося режима ЭЭС, повышающая достоверность и скорость их формирования за счет учета значений редкой повторяемости путем обработки вероятностных характеристик по принципу несовместных независимых событий установившегося режима.

2. Предложена методика определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ на основе законов распределения вероятностей параметров установившегося режима ЭЭС, задающая контролируемую дискретизацию аргументов для учета влияния вида закона распределения вероятностей входных параметров (напряжение в узлах, мощность генерации и нагрузки) на закон распределения вероятностей выходных параметров (потери мощности) и контроля заданных предельно допустимых параметров режима.

3. Разработан алгоритм определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ в ЭЭС, основанный на формировании и оценке вероятностных характеристик параметров режима, обеспечивающий минимизацию возможных потерь мощности путем оценки изменения числовых характеристик вероятностных параметров потерь мощности.

4. Выполнен комплекс тестовых и экспериментальных исследований, подтверждающий свойства и возможности созданных средств повышения достоверности оценки параметров установившегося режима ЭЭС с ВЭУ, основанных на формировании и оценке вероятностных характеристик параметров режима, для минимизации потерь мощности. Определены оптимальные узлы и объемы подключения ВЭУ.

5. Разработанные методики и средства позволяют:

- повысить достоверность формирования вероятностных характеристик параметров установившегося режима ЭЭС;
- осуществить моделирование ЭЭС с ВЭУ разной размерности в вероятностной форме;
- определить объемы и места подключения ВЭУ любого типа для обеспечения работы сети с минимально возможными потерями мощности.

**Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих работах:**

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

1) Бай Ю.Д., Шмойлов А.В., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А., Рудник В.Е., Киевец А.В. Получение законов распределения вероятностей параметров установившегося режима электроэнергетических систем // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 3. С. 41-51.

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

3) Бай Ю.Д., Андреев М.В., Шмойлов А.В., Суворов А.А., Киевец А.В., Разживин И.А. 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.

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

1) Bay Y.D., Gusev A.S., Suvorov A.A., Razzhivin I.A., Askarov A.B. // Stochastic Modeling of a DFIG Wind Turbine in Matpower, IEEE Access, 2021, Vol. 9, pp.76005–76014, 9435389.

2) Bay Y.D., Andreev M.V., Razzhivin I.A., Kievets A.V., Rudnik V.E. // Full probabilistic characteristics of power losses in the electrical power system branches, EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica, 2020, 68(3), pp. 32–40.

3) Bay Y.D., Razzhivin I.A., Kievets A.V., Askarov A.B., Rudnik V.E. // Obtaining Probabilistic Characteristics of Electrical Quantities and their Imbalances // EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica. 2019. Vol. 67, iss. 3, pp. 73-80.

**Патент:**

1) Патент на изобретение RU 2711472 C1, 17.01.2020. Способ обработки информации сигналов многовходовой системы // Шмойлов А.В., Бай Ю.Д. Заявка № 2019125018 от 07.08.2019.

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

1) Bay Yu., Kievets A., Cheremisina Harrer I. Comparative study on influence of different drive train models on the transient responses of wind turbine. // AIP Conference Proceedings 2135, 020027, 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5120664>.



2) Bay Y., Shmoilov A., Gusev A., Razzhivin I. The selection of interval boundaries of input and output data method for obtaining complete probabilistic characteristics. // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 141: Smart Grids 2017: The Fifth International Youth Forum, October 9-13, 2017, Tomsk, Russia. – [01037, 4 p.].

3) Kievets A., Bay J., Suvorov A., Askarov A., Rudnik V. The Effect of Temperature Change on the Output Characteristics of a Solar Power Plant under Partial Shading Conditions. // International Journal of Emerging Electric Power Systems. — 2020. — Vol. 21, iss. 1. — [20190198, 7 p.].

4) 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. – Vol. 20. – iss. 5. – [20190075, 13 p.].

5) 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>.

6) Малькова Я.Ю., Уфа Р.А., Бай Ю.Д. Влияние распределенной генерации на уровень напряжения // Электроэнергетика глазами молодежи - 2020 материалы XI Международной научно-технической конференции, Ставрополь, 15-17 Сентября 2020: в 2 т. — 2020. — Т. 2. — С. 187-190.

7) Бай Ю.Д., Разживин И.А., Сулайманов А.О. Алгоритм метода СПИД для получения полных вероятностных характеристик задач электроэнергетики // Кибернетика энергетических систем. Сборник материалов XXXIX сессии Всероссийского научного семинара по тематике "Электроснабжение". — 2018. — С. 251-253.

8) Бай Ю.Д., Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А., Суворов А.А., Ставицкий С.А., Киевец А.В., Разживин И.А. Фактические и располагаемые электрические величины и их небалансы для узлов энергосистемы // Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития сборник научных трудов международной научной конференции, г. Томск, 12–16 ноября 2018 г. — С. 64-65.