

*На правах рукописи*



**ИВАНОВ Игорь Евгеньевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ  
СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2019

Работа выполнена на кафедре «Электрические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент **Мурзин Андрей Юрьевич**.

**Официальные оппоненты:**

**Лачугин Владимир Федорович**, доктор технических наук, Акционерное общество «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (АО «ЭНИИ»), заведующий лабораторией информационно-измерительных и управляющих систем;

**Онисова Ольга Александровна**, кандидат технических наук, Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством» (ОАО «ВНИИР»), заведующий сектором НИОКР Центра моделирования электроэнергетических систем Департамента информационно-технологических систем.

**Ведущая организация:**

Акционерное общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» (АО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ»)), г. Москва.

Защита состоится 13.12.2019 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

Текст диссертации размещен [http://ispu.ru/files/Dissertation\\_IVANOV\\_I.E.\\_0.pdf](http://ispu.ru/files/Dissertation_IVANOV_I.E._0.pdf).

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.064.01



Ледуховский  
Григорий Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Заданный в настоящее время вектор развития электроэнергетических систем (ЭЭС) предполагает построение цифровых подстанций и, в целом, реализацию концепции интеллектуальных электрических сетей *Smart Grids*. Это диктует необходимость высокой степени автоматизации и разработки алгоритмов самонастройки как цифрового оборудования, так и систем управления электроэнергетическим режимом. Одной из важных задач в данном контексте представляется определение актуальных (фактических) параметров схем замещения элементов ЭЭС, соответствующих текущему электроэнергетическому режиму.

Владение актуальной информацией о параметрах высоковольтных воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) – комплексных сопротивлений  $[Z]$  и проводимостях  $[Y]$  – необходимо для решения следующих задач электроэнергетики: оценивание состояния (ОС) режима электрической сети, повышение точности определения места повреждения (ОМП) на ВЛЭП, выбор уставок дистанционной защиты, а также ряда других. В настоящее время в инженерной практике параметры ВЛЭП рассчитываются по известным выражениям, опираясь на некоторые усредненные данные о геометрии ВЛЭП и физических свойствах системы проводников – фазных проводов, грозозащитных тросов и контура возврата тока через землю. Значения реальных параметров ВЛЭП, во-первых, могут отличаться от рассчитанных, а во-вторых, могут существенно варьироваться (вплоть до 20–30 % и более по результатам серии проведенных вычислительных экспериментов и данным различных публикаций) в зависимости от уровня загрузки ВЛЭП и погодных условий. Помимо естественной вариации значений параметров ВЛЭП вследствие изменений режима ЭЭС, возможны погрешности вычисления этих значений, обусловленные неточностью «паспортных» данных о характеристиках системы проводников ВЛЭП. Поэтому цифровые устройства и программные комплексы, оперирующие значениями параметров ВЛЭП, могут иметь некорректные входные данные. Отсутствие информации о реальных параметрах ВЛЭП также может являться препятствием для разработки адаптивных алгоритмов управления электрическими сетями нового поколения *Smart Grids*. Отмеченные обстоятельства обосновывают актуальность темы диссертации.

**Степень разработанности темы исследования.** Необходимость уточнения параметров ВЛЭП неоднократно отмечалась в технической литературе. Диапазоны возможных вариаций параметров схем замещения элементов ЭЭС (и, в частности, ВЛЭП), а также методы определения (идентификации) этих параметров рассматривались ранее в работах Алюнова А.Н., Бацевой Н.Л., Бартоломея П.И., Бердина А.С., Гамма А.З., Гольдштейна Е.И., Гусейнова Ф.Г., Джумика Д.В., Заславской Т.Б., Идельчика В.И., Ирлахмана М.Я., Рахманова Н.Р., Суворова А.А., Хрущева Ю.В., Шелюга С.Н., Шульгина М.С., K.R. Davis, D.L. Garrison, U. Klapper, G.L. Kusic, T.J. Overbye и др. ученых. В ряде публикаций исследуется возможность определения фактических параметров ВЛЭП по данным систем телеизмерений (ТИ) и SCADA. Основные проблемы при применении ТИ заключаются в их относительно невысокой точности, отсутствии синхронизации измерений с двух концов ВЛЭП, а также низкой скорости обновления данных о параметрах текущего электроэнергетического режима. Решение задачи идентификации сопротивлений и проводимостей ВЛЭП возможно на базе массивов мгновенных значений напряжений и токов, получаемых от регистраторов аварийных событий. Однако погрешность синхронизации времени для подобных устройств может достигать 1 мс, данные для расчетов доступны только при пуске регистраторов, а также возникает заметная нагрузка на каналы связи. Кроме того, в работах Джумика Д.В. указана необходимость достаточно высокой частоты дискретизации аналогового сигнала, а также ставится задача внедрения высокоточных систем синхронизации времени.

В последние годы исследования в области идентификации актуальных параметров ВЛЭП в основном связаны с освоением относительно новой технологии в ЭЭС – синхронизированных векторных измерений (СВИ). Наличие точной синхронизации измерений векторов напряжений и токов всех фаз по обеим сторонам ВЛЭП открывает возможности более эффективного решения задачи мониторинга фактических параметров схем замещения ВЛЭП. Устройства СВИ (УСВИ) нарастающими темпами устанавливаются в ЭЭС по всему миру. В Единой энергетической системе (ЕЭС) Российской Федерации в настоящее время насчитывается несколько сотен интеллектуальных устройств с функцией СВИ. С 2005 г. ведутся работы по реализации в ЕЭС Системы мониторинга переходных режимов (СМНР) – аналога зарубежной системы WAMS (Wide Area Measurement System).

Методы и алгоритмы решения задачи определения фактических параметров ВЛЭП на основе СВИ предлагались ранее в работах Бартоломея П.И., Бердина А.С., Ерошенко С.А., Казакова П.Н., Коваленко П.Ю., Кононова Ю.Г., Лебедева Е.М., Неберы А.А., Плесняева Е.А., Степановой А.А., Суворова А.А., Хохлова М.В., R.K. Aggarwal, M. Asprou, T. Bi, C.-S. Chen, J. Chen, T. Hisakado, M. Kato, M. Kezunovic, Il-D. Kim, E. Kyriakides, Y. Liao, C.-W. Liu, D.J. Tylavsky, D. Shi, R.E. Wilson, Z. Wu, G.A. Zevenbergen, L.T. Zora и др. исследователей. Несмотря на наличие публикаций по расчету сопротивлений и проводимостей ВЛЭП с использованием СВИ, отсутствуют примеры полномасштабного тестирования предложенных методов в реальных условиях (в отличие от компьютерных и лабораторных экспериментов) и внедрения этих методов на объектах ЭЭС. Кроме того, допущения, принятые некоторыми авторами при реализации вычислительных экспериментов, имеют слабое обоснование. Наконец, известно мало работ, в которых был бы осуществлен глубокий анализ систематических и случайных погрешностей СВИ, а также были бы предприняты попытки учета систематических погрешностей при разработке метода идентификации параметров ВЛЭП вместо простого моделирования их деструктивного влияния на результаты решения задачи.

Отмеченные обстоятельства определяют необходимость создания новых методов (а также способов их верификации), направленных на возможно более полный учет особенностей моделируемой ВЛЭП и всей системы формирования векторных измерений, характеристики которой непосредственно отражаются на точности решения задачи идентификации параметров ВЛЭП.

**Целью диссертационной работы** является разработка методов повышения точности определения актуальных параметров ВЛЭП различной конфигурации на основе СВИ.

**Задачи диссертационной работы.** Для достижения обозначенной цели в диссертационном исследовании решаются следующие задачи.

1. Анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных идентификации параметров ВЛЭП на основе СВИ.
2. Обоснование реальных диапазонов изменения значений параметров ВЛЭП, а также выявление факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на эти изменения.
3. Совершенствование методов подготовки массивов СВИ для решения задачи идентификации параметров ВЛЭП.
4. Разработка компактного матричного описания физических процессов на ВЛЭП с распределенными параметрами для моделирования установившихся режимов ЭЭС, содержащих линии различной конфигурации.
5. Разработка и исследование методов определения актуальных параметров однопольных ВЛЭП на базе СВИ без учета погрешностей измерений.
6. Комплексный анализ влияния систематических погрешностей СВИ, одновременно присутствующих во всех измерениях напряжений и токов, на точность определения параметров ВЛЭП.
7. Разработка методов идентификации параметров ВЛЭП на основе СВИ, обес-

печивающих компенсацию влияния систематических погрешностей измерений.

8. Исследование разработанных методов определения параметров ВЛЭП на базе СВИ в режиме «черный ящик» (с привлечением реальных архивов СВИ по обоим концам ВЛЭП).

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются ВЛЭП различной конфигурации напряжением 110 кВ и выше. Предмет исследования представляют актуальные параметры ВЛЭП – элементы матриц сопротивлений [**Z**] и проводимостей [**Y**], отражающие текущий электроэнергетический режим, определяемый конкретными погодными условиями и уровнем загрузки ВЛЭП.

**Методология и методы исследования.** Поставленные в работе задачи решались посредством математического моделирования с привлечением множества массивов СВИ напряжений и токов, полученных с реальных УСВИ, установленных на двух ВЛЭП напряжением 500 кВ (Российская Федерация) и трех ВЛЭП напряжением 345 кВ (США). Теоретические положения обоснованы с использованием аппарата линейной алгебры, теории вероятностей и статистики, цифровой обработки сигналов, теории электрических цепей. Для реализации и тестирования разработанных алгоритмов использовалось программное обеспечение MATLAB и ATP/ATPDraw.

**Научная новизна работы** заключается в следующем.

1. На основе вычислительных экспериментов, выполненных на моделях ВЛЭП 345 кВ и 500 кВ, установлены пределы изменения продольных и поперечных параметров ВЛЭП, а также факторы, в наибольшей степени влияющие на эти изменения.

2. Разработана методика подготовки массивов СВИ напряжений и токов для последующего их использования в задаче идентификации актуальных параметров ВЛЭП, обеспечивающая фильтрацию импульсных помех и уменьшение «шумовой» составляющей СВИ, а также предложен простой способ приблизительной оценки количественных характеристик «шума» СВИ.

3. Получено аналитическое решение задачи определения параметров транспонированной ВЛЭП на базе СВИ без учета погрешностей измерений, требующее только один комплект синхронизированных векторов по концам ВЛЭП.

4. Разработаны математические модели для решения оптимизационной задачи по определению параметров нетранспонированной ВЛЭП на базе СВИ, позволяющие существенно уменьшить размер вектора переменных оптимизации.

5. Разработана методика комплексного анализа влияния систематических погрешностей СВИ, и с ее применением установлено, что ошибки расчета сопротивлений и проводимостей ВЛЭП на базе СВИ практически линейно зависят от класса точности измерительных трансформаторов тока и напряжения для УСВИ.

6. Предложен простой способ определения параметров ВЛЭП на основе линейной регрессии с использованием множества комплектов СВИ, существенно повышающий точность расчета параметров прямой последовательности по сравнению с аналитическим решением на базе одного комплекта СВИ.

**Степень достоверности результатов исследования** определяется использованием многократно проверенных и общепринятых методов математического описания ЭЭС; применением современных инструментов моделирования (MATLAB и ATP/ATPDraw) и точным совпадением результатов решения отдельных подзадач, самостоятельно запрограммированных в MATLAB, с соответствующими результатами ATP/ATPDraw; использованием архивов СВИ напряжений и токов с реальных УСВИ; практическим совпадением результатов расчета индуктивного сопротивления и емкостной проводимости прямой последовательности ВЛЭП с соответствующими данными, принятыми за «эталон», при тестировании разработанных методов в режиме «черный ящик» для трех различных ВЛЭП.

**Теоретическая значимость работы** заключается в следующем.

1. Установлено, за счет каких факторов могут варьироваться значения сопротивлений и проводимостей ВЛЭП, и определены потенциальные диапазоны вариации этих значений отдельно для параметров прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП.

2. Проанализированы особенности реальных конфигураций ВЛЭП при формулировке задачи определения их параметров на основе СВИ (в частности, рассмотрены несколько подходов к идентификации параметров нетранспонированных линий).

3. Смоделировано комплексное влияние погрешностей измерений, неизбежно присутствующих во всех векторах напряжения и тока, формируемых УСВИ, на точность результатов расчета параметров ВЛЭП, а также предложены и апробированы способы нивелирования влияния указанных погрешностей.

4. Выявлено, что определение значений параметров нулевой последовательности ВЛЭП с приемлемой точностью не может быть обеспечено на базе СВИ нормального установившегося режима, однако показано, что решение задачи принципиально возможно с использованием векторных измерений, сформированных в резко несимметричных режимах.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем.

1. Установленные диапазоны изменения параметров ВЛЭП могут быть использованы для уточнения методик выбора параметров срабатывания релейной защиты ВЛЭП, а также оценки точности применяемых методов ОМП.

2. Предложенные методы фильтрации импульсных помех и «шума» СВИ могут применяться для автоматической подготовки массивов СВИ перед их передачей в различные программные комплексы, решающие задачи на базе векторных измерений.

3. Актуальные параметры ВЛЭП, рассчитанные по разработанным методам на основе СВИ, потенциально могут использоваться при решении следующих задач: повышение качества ОС режима электрической сети; повышение точности дистанционных методов ОМП на ВЛЭП; совершенствование алгоритмов функционирования адаптивных дистанционных защит; повышение точности расчета потерь электроэнергии при ее передаче по ВЛЭП; мониторинг температуры фазных проводов ВЛЭП; накопление базы данных о реальных параметрах ВЛЭП.

Разработанные методы определения параметров ВЛЭП внедрены в научно-исследовательскую и производственную деятельность ООО НПО «Цифровые измерительные трансформаторы».

4. Результаты сравнительного анализа функционирования разработанных методов определения параметров ВЛЭП в режиме «черный ящик» позволяют сформулировать предварительные рекомендации по выбору наиболее эффективного метода в эксплуатационной практике, отраженные в виде блок-схемы в заключительной части диссертации.

**Положения, выносимые на защиту**, представлены ниже.

1. Результаты оценки диапазонов изменения параметров ВЛЭП и определения основных факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на изменение сопротивлений и проводимостей ВЛЭП.

2. Результаты аналитического решения задачи идентификации параметров одноцепной транспонированной ВЛЭП без учета ошибок СВИ.

3. Метод определения параметров нетранспонированной (частично транспонированной) ВЛЭП на базе СВИ, требующий решения оптимизационной задачи.

4. Метод на основе линейной регрессии, предполагающий использование множества комплектов СВИ и применимый, прежде всего, для актуализации параметров прямой последовательности ВЛЭП.

5. Результаты тестирования разработанных методов идентификации параметров ВЛЭП с использованием реальных архивов СВИ в режиме «черный ящик».

6. Методика подготовки данных СВИ для последующего их использования в за-

даче идентификации параметров ВЛЭП.

**Личный вклад автора.** Автором выполнен аналитический обзор публикаций по теме диссертации, результаты которого систематизированы в табличной форме и использованы для формулировки задач, недостаточно проработанных ранее и требующих решения в рамках диссертации. Автором разработаны математические модели, применяемые в задаче идентификации параметров ВЛЭП различной конфигурации на основе СВИ напряжений и токов по концам ВЛЭП, а также выполнена алгоритмизация этих моделей на языке MATLAB и верификация полученных результатов с привлечением специализированного программного комплекса ATP/ATPDraw. Автором спланированы и проведены исследования по сравнительному анализу функционирования методов актуализации параметров ВЛЭП с привлечением реальных архивов СВИ с двух сторон ВЛЭП (режим «черный ящик»). Автор разработал метод удаления импульсных помех, которые могут присутствовать в реальных векторных измерениях, и выполнил сравнительный анализ эффективности алгоритмов цифровой фильтрации «шумовой» составляющей СВИ. Автор также подготовил рукописи всех основных публикаций по теме диссертации.

**Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».** В соответствии с *формулой специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»* в работе проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической базы электроэнергетики в части применения новой информационной технологии мониторинга текущих параметров линий электропередачи, что, в конечном счете, имеет целью повышение надежности транспортировки электроэнергии.

Представленные в диссертационной работе научные положения соответствуют *области исследований специальности 05.14.02* по следующим пунктам:

– п. 6 «*Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике*»: разработанные математические модели, позволяющие получить актуальную информацию о параметрах ВЛЭП различной конфигурации, а также методы верификации разработанных алгоритмов определения параметров ВЛЭП с привлечением реальных данных СВИ;

– п. 7 «*Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем*»: результаты актуализации параметров ВЛЭП, которые могут быть использованы для уточнения исходных данных в задачах расчета электроэнергетических режимов и, как следствие, повышения точности оценки режимных параметров;

– п. 13 «*Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике*»: реализация разработанных алгоритмов в программном коде на языке MATLAB, а также моделирование ВЛЭП и участков электрической сети в специализированном программном комплексе ATP/ATPDraw с целью верификации части реализованных в MATLAB алгоритмов.

**Апробация результатов работы.** Отдельные этапы работы обсуждались на научно-методических семинарах во время прохождения автором стажировки в Мичиганском технологическом университете (США, 2012–2013 гг.), а также в ходе личного общения и интенсивной электронной коммуникации с учеными и специалистами электроэнергетического сектора из Российской Федерации, США, Норвегии, Аргентины, Венгрии и других государств, в т.ч. с представителями следующих электроэнергетических компаний: АО «СО ЕЭС» и АО «РТСОфт» (Российская Федерация), «American Transmission Company» (США).

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на следующих научно-технических мероприятиях: Региональной (с 2013 г. – Международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ» (г. Иваново, 2011, 2012, 2013 и 2016 гг.); Международной научно-технической конферен-

ции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново, 2011 г.); Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (г. Иваново, 2017 и 2019 гг.); Международной научно-практической конференции «Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки» (г. Москва, 2013 г.); I Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (г. Томск, 2013 г.); Двадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2014 г.); V и VI Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Томск, 2014 г.; г. Иваново, 2015 г.); 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (г. Севилья, Испания, 2015 г.); 5-й Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (г. Сочи, 2015 г.); 2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (г. Любляна, Словения, 2016 г.); 2017 IEEE Manchester PowerTech (г. Манчестер, Великобритания, 2017 г.).

**Публикации.** Результаты исследования отражены в 24 печатных работах, включая три статьи, опубликованные в журнале, входящем в перечень ВАК РФ, и три статьи, проиндексированные в международных базах «SCOPUS» и «Web of Science». Подана заявка (в соавторстве) на патент «Способ дистанционного определения места короткого замыкания».

**Финансирование.** Диссертационное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме «Мультифункциональная система на основе цифровых трансформаторов тока и напряжения для цифровой подстанции» (соглашение № 075-15-2019-914 о предоставлении субсидии от 30 мая 2019 г. (ранее – № 14.577.21.0276 от 26.09.2017 г.), уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57717X0276).

**Благодарности.** Автор благодарит за консультации и замечания по отдельным аспектам диссертационного исследования, а также за данные, полученные с реальных энергообъектов, своих коллег по факультету, специалистов компаний «American Transmission Company» (США), АО «СО ЭЭС» и АО «РТСофт» (Российская Федерация), а также лично Дубинина Д.М., Хохлова М.В., Бартоломея П.И., Неберу А.А., Казакова П.Н., Bruce A. Mork, James Kleitsch, Adam Manty, H.K. Hoidalen, Laszlo Prikler, Orlando P. Nevia.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация структурирована следующим образом: введение; четыре главы; заключение; список литературы, состоящий из 148 наименований; восемь приложений. Общий объем работы составляет 275 страниц (включая приложения на 34 страницах). Диссертация содержит 73 рисунка и 45 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, кратко изложено состояние проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены положения научной новизны и практической ценности полученных результатов, дана общая характеристика диссертации.

**В первой главе** выполнен подробный анализ классических методов расчета продольных и поперечных параметров ВЛЭП, выявлены основные факторы, предопределяющие вариацию параметров ВЛЭП, оценены возможные диапазоны изменения сопротивлений и проводимостей ВЛЭП, а также детально проанализированы (по нескольким критериям) отечественные и зарубежные публикации по теме диссертации.

Анализ классических выражений для расчета комплексных сопротивлений и проводимостей ВЛЭП свидетельствует о том, что они зависят от множества различных факторов. При этом степень влияния отдельных геометрических характеристик и физических свойств системы проводников (включаящей и контур возврата тока через землю) на конкретные численные значения параметров ВЛЭП не столь очевидна. Вместе с тем один из методов определения фактических параметров ВЛЭП на базе СВИ, представленный в диссертации, основан на решении оптимизационной задачи относительно небольшого числа переменных, описывающих актуальное состояние системы проводников. В связи с этим из множества факторов, от которых зависят сопротивления и проводимости ВЛЭП, необходимо выбрать только те, влиянием которых пренебречь нельзя.

Для решения поставленной задачи рассматривается 11 различных сценариев, в каждом из которых оценивается влияние отдельной характеристики системы проводников ВЛЭП 500 кВ. В каждом случае варьируется только один параметр (или несколько взаимосвязанных параметров, например, средние высоты подвеса фазных проводов и грозозащитных тросов), тогда как остальные соответствуют принятым «базовым» значениям (значениям «по умолчанию»). В результате выявлена совокупность факторов, влияние которых на значения элементов матриц  $[Z]$  и  $[Y]$  не является пренебрежимым (при работе на промышленной частоте). Эти факторы следующие: средние высоты подвеса (с учетом стрелы провеса) фазных проводов и грозозащитных тросов; удельное сопротивление грунта; удельные сопротивления материала проводов ВЛЭП; относительная магнитная проницаемость грозозащитного троса (если он стальной или сталалюминиевый с одним повивом из алюминиевых проволок). Указанные факторы образуют многомерное пространство, каждой «точке» которого соответствуют определенные значения сопротивлений и проводимостей линии.

Для того чтобы оценить потенциальные диапазоны изменения параметров ВЛЭП, целесообразно рассмотреть совокупное влияние указанных выше факторов. Во многих работах, посвященных определению актуальных параметров ВЛЭП, отмечается, что сопротивления и проводимости линии могут существенно варьироваться в зависимости от уровня загрузки ВЛЭП и погодных условий. При этом лишь в немногих публикациях приводятся количественные сведения о подобных вариациях. Анализируя данные, представленные в нескольких работах, можно сделать вывод о возможных изменениях продольных параметров ВЛЭП вплоть до 25–30 %. Вместе с тем интересным (и необходимым с точки зрения доказательства актуальности исследования) представляется выполнить собственные вычислительные эксперименты, подтверждающие потенциальную возможность столь существенных вариаций параметров линий. При этом необходимо понимать, что обозначенные выше основные характеристики (средние высоты подвеса проводов, их удельные сопротивления, проводимость грунта) не являются полностью независимыми друг от друга. Поэтому было бы ошибочным просто генерировать произвольный вектор значений этих характеристик, если для каждой из них задать индивидуальный (но при этом постоянный) диапазон возможных принимаемых величин. Задача, таким образом, не является тривиальной и требует внимательного рассмотрения взаимозависимостей влияющих факторов, что было выполнено с привлечением специализированной литературы по физике почвы. В диссертации рассмотрено несколько режимов, отличающихся погодными условиями и уровнями загрузки двухцепной ВЛЭП 500 кВ, каждый из которых моделировался 10000 раз с различными псевдослучайными числами в пределах заданных диапазонов изменения.

По результатам экспериментов получено 110000 значений для каждого из параметров ВЛЭП, а затем определены отношения максимальных величин к соответствующим минимальным. Если все минимальные значения принять за «1», получаются гистограммы, изображенные на рисунках 1 и 2 (слева). Аналогичные эксперименты были выполнены для модели одноцепной ВЛЭП напряжением 345 кВ, расположенной в США. Соответствующие гистограммы представлены на рисунках 1 и 2 (справа). Данные, отраженные на рисунках 1 и 2, свидетельствуют о том, что значения параметров ВЛЭП действительно могут изменяться существенным образом в

зависимости от погодных условий и мощности, передаваемой по ВЛЭП. Особенно заметными могут быть вариации активных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей, индуктивного сопротивления нулевой последовательности, а также сопротивления взаимоиндукции между параллельными цепями в случае двухцепной ВЛЭП. Полученные данные в целом согласуются с оценками потенциального изменения параметров воздушных линий в литературе и свидетельствуют о необходимости уточнения фактических характеристик ВЛЭП.

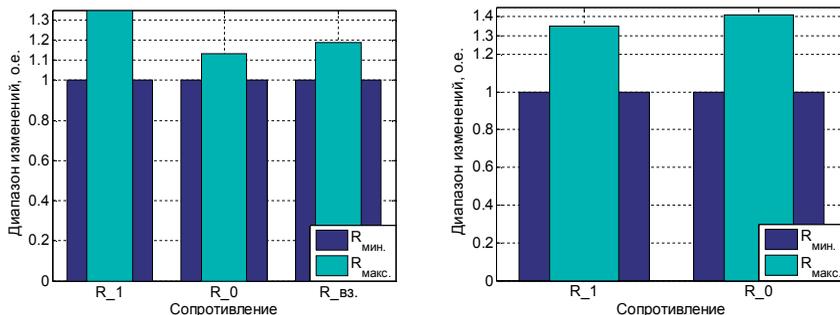


Рисунок 1 – Диапазон возможных вариаций активных сопротивлений для двухцепной ВЛЭП 500 кВ (слева) и одноцепной ВЛЭП 345 кВ (справа)

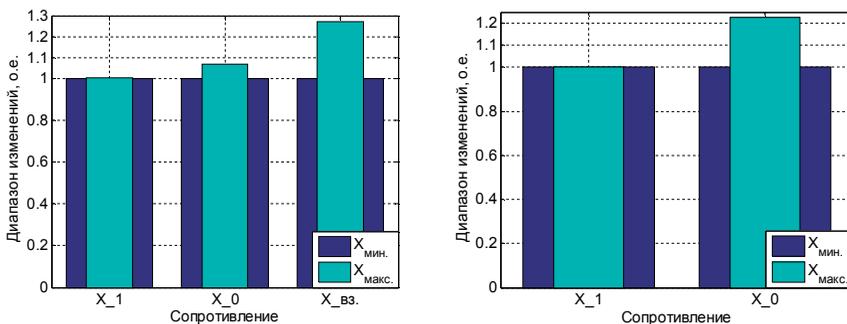


Рисунок 2 – Диапазон возможных вариаций индуктивных сопротивлений для двухцепной ВЛЭП 500 кВ (слева) и одноцепной ВЛЭП 345 кВ (справа)

Подробный анализ достаточно большого количества отечественных и, прежде всего, зарубежных публикаций по идентификации параметров ВЛЭП на основе СВИ показал, что многие предложенные методы и/или способы их верификации нуждаются в критическом переосмыслении и доработке с целью максимально корректного воспроизведения характера реальных процессов на ВЛЭП, а также погрешностей СВИ. К основным недостаткам, выявленным в имеющихся публикациях, можно отнести следующие: использование в целом ряде работ только однолинейной модели ВЛЭП; оценка влияния погрешностей СВИ по отдельным каналам измерительной цепи вместо анализа комплексного влияния погрешностей, одновременно присутствующих во всех без исключения измерительных трактах токов и напряжений по обоим концам ВЛЭП; неучет систематических погрешностей СВИ непосредственно в самой модели либо предположения о характере изменения систематических погрешностей, которые априори можно считать некорректными; решение оптимизационной задачи (там, где это требуется) «напрямую» относительно искомым сопротивлений и проводимостей линии (количество которых достаточно велико), а не группы нескольких факторов, оказывающих основное влияние на значения сопротивлений и проводимостей ВЛЭП; недостаточно обоснованное моделирование изменений режима электрической сети с целью получения нескольких независимых комплектов СВИ, требуемых на этапе тестирования методов.

**Во второй главе** представлены результаты решения вспомогательной, но важной задачи подготовки массивов СВИ напряжений и токов, полученных от УСВИ по концам ВЛЭП, для их последующего использования в главных алгоритмах, направленных на расчет фактических параметров ВЛЭП. На основе анализа реальных архивов СВИ выяснено, что они, как и многие другие измерения, могут содержать заведомо недостоверные точки данных (импульсные помехи), а также быть достаточно «зашумленными».

Под «импульсными помехами» («всплесками», «выбросами») подразумеваются отдельные точки данных (или группы точек данных, соответствующие множеству последовательных измерений), резко выделяющиеся на фоне смежных измерений – предыдущих («слева») и последующих («справа»). Очевидно, «выбросы» необходимо отфильтровать (рисунок 3) перед использованием массива СВИ в алгоритме определения фактических параметров ВЛЭП.

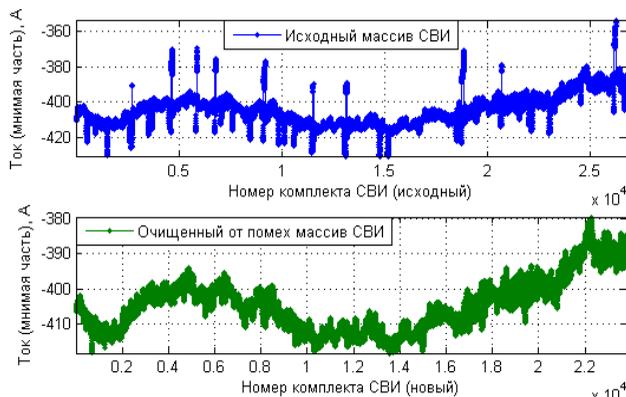


Рисунок 3 – Исходный сигнал тока, содержащий импульсные помехи (сверху), и очищенный от импульсных помех сигнал (снизу)

С целью автоматического детектирования и удаления импульсных помех в диссертации разработан достаточно сложный метод, функционирование которого основано на анализе изменений значений обрабатываемого сигнала от точки к точке, т.е. анализе разностей («флуктуаций») между каждыми двумя смежными точками данных, которые в большинстве случаев не должны выходить за пределы достаточно узкого диапазона величин. Результат, отраженный на рисунке 3, получен с помощью разработанного метода.

Помимо наличия импульсных помех, СВИ сопровождаются «шумом», под которым будем понимать совокупность несистематических, или случайных погрешностей, неизбежно присущих реальным измерениям и характеризующих прецизионность этих измерений. На основании центральной предельной теоремы, а также с использованием двух других критериев, обосновано, что случайные погрешности СВИ имеют закон распределения, близкий к нормальному (гауссовому). Автором выведено выражение, позволяющее получить предельную оценку среднеквадратического отклонения (СКО) «шума» СВИ:

$$\sigma(\varepsilon) < \frac{\sigma(\Delta A_n)}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

где  $\sigma(\Delta A_n)$  – СКО флуктуаций сигнала, образованных разностями всех смежных четных и нечетных измерений.

С использованием выражения (1) и альтернативной методики – вейвлет-анализа – выполнена приблизительная количественная оценка уровня «шума» в векторных измерениях, полученных от различных типов регистраторов по обеим сторонам трех различных ВЛЭП напряжением 345 кВ. Выяснено, что векторные измерения токов, сформированные цифровыми регистраторами аварийных повреждений (ЦРАП) с функцией СВИ, в целом являются значительно более «шумными» по сравнению с аналогичными измерениями,

полученными от цифровых устройств релейной защиты.

Для решения задачи по удалению части «шума» из массивов СВИ токов, полученных от ЦРАП, было рассмотрено множество различных методик цифровой фильтрации, а также несколько каскадов фильтров: скользящее среднее и треугольные фильтры; медианные фильтры; фильтры Savitzky-Golay; быстрое преобразование Фурье с обнулением части компонентов частотного спектра; дискретное вейвлет-преобразование (ДВП); стационарное вейвлет-преобразование. Общее количество протестированных фильтров составило 4285. В итоге установлено, что наиболее эффективными можно считать методы «классического» ДВП, использующие относительно длинные ортогональные вейвлеты и указанные в главе принципы модификации детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения сигнала.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы моделирования установившихся режимов одноцепных ВЛЭП различной конфигурации (транспонированных, частично транспонированных, нетранспонированных, неоднородных), представлен разработанный аналитический метод расчета параметров трехфазной транспонированной ВЛЭП, требующий один комплект СВИ по концам ВЛЭП, подробно рассмотрены возможные подходы к идентификации актуальных параметров нетранспонированной ВЛЭП, а также систематизированы важные аспекты подготовки и решения возникающей оптимизационной задачи.

Аналитическое решение задачи определения параметров одноцепной трехфазной транспонированной ВЛЭП выполняется с использованием фазо-модальных преобразований. Для каждой из трех модальных координат (или, что то же самое, трех волновых каналов) в отдельности решается система уравнений в соответствии с разработанным алгоритмом, блок-схема которого отражена на рисунке 4, и в результате рассчитываются модальные сопротивления и проводимости ВЛЭП, по которым затем вычисляются сопротивления и проводимости в фазных координатах.

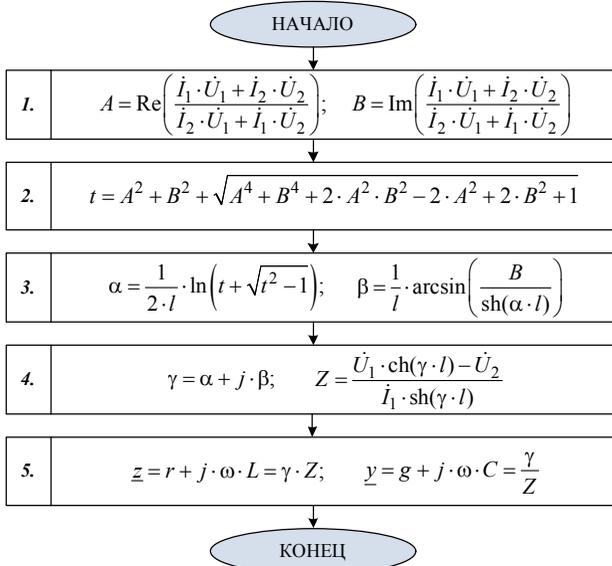


Рисунок 4 – Блок-схема разработанного алгоритма идентификации параметров, соответствующих одному волновому каналу трехфазной транспонированной ВЛЭП

На рисунке 4 приняты следующие обозначения:  $\dot{I}_1$  – модальная составляющая тока в начале линии (ток условно направлен от шин подстанции в линию);  $\dot{I}_2$  – соответствующая составляющая тока в конце линии (ток условно направлен из линии к шинам приемной подстанции);  $\dot{U}_1$  – модальная составляющая напряжения в начале линии;  $\dot{U}_2$  – соответствующая составляющая напряжения в конце линии;  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – соответственно ко-

эффицент затухания, коэффициент фазы и постоянная распространения рассматриваемого волнового канала;  $Z$  – волновое сопротивление канала;  $\underline{z}$  и  $\underline{y}$  – соответственно модальное сопротивление и модальная проводимость на единицу длины ВЛЭП.

Верификация предложенного метода определения параметров трехфазной транспонированной ВЛЭП осуществлена на базе модели электрической сети в специализированном программном комплексе АТР/АТРDraw, состоящей из эквивалентированной системы напряжением 330 кВ, транспонированной ВЛЭП длиной 200 км и узла активно-индуктивной нагрузки. Несимметрия по фазам, требуемая для расчета сопротивления и проводимости нулевой последовательности, внесена за счет небольшой несбалансированности по фазам нагрузки. В отсутствие погрешностей СВИ этого небаланса вполне достаточно для идентификации параметров не только прямой, но и нулевой последовательности (таблица 1). Таким образом, предложенный метод определения параметров транспонированной ВЛЭП, основанный на фазо-модальных преобразованиях и аналитическом решении задачи для каждой из модальных составляющих (рисунок 4), функционирует корректно, если не учитывать погрешности измерений напряжений и токов по концам ВЛЭП.

Таблица 1 – Сравнение результатов вычисления параметров отдельных последовательностей трехфазной транспонированной ВЛЭП по предлагаемому методу с «эталонными» данными

Параметр	«Эталонное» значение	Расчетное значение
$R_1$ , Ом/км	0,0489	0,0489
$X_1$ , Ом/км	0,3064	0,3064
$G_1$ , См/км	0	$2,1726 \cdot 10^{-12}$
$B_1$ , См/км	$3,7283 \cdot 10^{-6}$	$3,7284 \cdot 10^{-6}$
$R_0$ , Ом/км	0,3188	0,3188
$X_0$ , Ом/км	1,0044	1,0044
$G_0$ , См/км	0	$-1,1992 \cdot 10^{-9}$
$B_0$ , См/км	$2,0569 \cdot 10^{-6}$	$2,0587 \cdot 10^{-6}$

Для точного расчета параметров нетранспонированной (частично транспонированной) линии требуется сформулировать и решить оптимизационную задачу. Это определяется тем, что, в отличие от случая с транспонированной ВЛЭП, элементы матриц фазо-модальных преобразований заранее не известны и зависят от элементов матриц  $[Z]$  и  $[Y]$ , а это суть искомые параметры ВЛЭП, подлежащие актуализации. Целевая функция, которую необходимо минимизировать, при этом выражается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 F = & \left( \operatorname{Re} \left( \dot{U}_A^{m(1)} - \dot{U}_A^{c(1)} \right) \right)^2 + \left( \operatorname{Re} \left( \dot{U}_B^{m(1)} - \dot{U}_B^{c(1)} \right) \right)^2 + \left( \operatorname{Re} \left( \dot{U}_C^{m(1)} - \dot{U}_C^{c(1)} \right) \right)^2 + \\
 & + \left( \operatorname{Re} \left( \dot{I}_A^{m(1)} - \dot{I}_A^{c(1)} \right) \right)^2 + \left( \operatorname{Re} \left( \dot{I}_B^{m(1)} - \dot{I}_B^{c(1)} \right) \right)^2 + \left( \operatorname{Re} \left( \dot{I}_C^{m(1)} - \dot{I}_C^{c(1)} \right) \right)^2 + \\
 & + \left( \operatorname{Im} \left( \dot{U}_A^{m(1)} - \dot{U}_A^{c(1)} \right) \right)^2 + \left( \operatorname{Im} \left( \dot{U}_B^{m(1)} - \dot{U}_B^{c(1)} \right) \right)^2 + \left( \operatorname{Im} \left( \dot{U}_C^{m(1)} - \dot{U}_C^{c(1)} \right) \right)^2 + \\
 & + \left( \operatorname{Im} \left( \dot{I}_A^{m(1)} - \dot{I}_A^{c(1)} \right) \right)^2 + \left( \operatorname{Im} \left( \dot{I}_B^{m(1)} - \dot{I}_B^{c(1)} \right) \right)^2 + \left( \operatorname{Im} \left( \dot{I}_C^{m(1)} - \dot{I}_C^{c(1)} \right) \right)^2 + \dots,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где напряжения и токи с индексом « $m$ » («*measured*») – измеренные вектора в конце линии; напряжения и токи с индексом « $c$ » («*computed*») – рассчитанные вектора, соответствующие измерениям; верхние индексы в скобках – «(1)» – номер комплекта СВИ (от «(1)» до «(N)»). Все комплексные разности разделены на вещественную и мнимую части.

Как отмечено выше, в первой главе диссертации приведены результаты исследования, позволившего выявить совокупность факторов, влияние которых на вариации элементов матриц  $[Z]$  и  $[Y]$  нельзя считать пренебрежимо малым. Это всего лишь несколько переменных, входящих в расчетные выражения для вычисления сопротивлений и проводимостей ВЛЭП. Неизвестной (подлежащей актуализации) также следует считать полную длину ВЛЭП (как и длины отдельных участков при наличии частичной транспозиции проводов).

Помимо возможных неточностей в ее задании, влияющих на конечный результат, фактическая длина ВЛЭП отличается от «паспортной» с учетом стрел провеса проводов. Все остальные характеристики, от которых зависит сопротивление и проводимости ВЛЭП, либо являются константами, либо имеют такие диапазоны неопределенности, в пределах которых их влиянием на вариации элементов матриц  $[Z]$  и  $[Y]$  можно практически пренебречь (п. 1.2.1 диссертации). Исходя из этого, если имеются необходимые «паспортные» данные о ВЛЭП (типы опор и проводов, сечения проводников и т.п.), целесообразно выполнять оптимизацию относительно существенно меньшего количества неизвестных, а не «напрямую» относительно элементов матриц  $[Z]$  и  $[Y]$ .

Результаты верификации обсуждаемых выше методов, требующих минимизации целевой функции (2), представлены в таблице 2. При этом «прямой» поиск предполагает решение задачи «напрямую» относительно элементов  $[Z]$  и  $[Y]$ , тогда как «опосредованный» поиск – оптимизацию относительно нескольких переменных, оказывающих основное влияние на вариацию сопротивлений и проводимостей ВЛЭП. Данные, приведенные в таблице 2, получены на основе пяти комплектов СВИ (одних и тех же для обоих вариантов решения задачи). В качестве оптимизатора в обоих случаях использовался «NL2SOL» из состава «ОРТ Toolbox». В отсутствие погрешностей измерений метод «прямого» поиска обеспечивает фактически идеальные результаты, что свидетельствует о корректности теоретических положений и программной реализации соответствующего алгоритма. Результаты оценки сопротивлений и проводимостей ВЛЭП по второму методу («опосредованный» поиск) также можно считать точными: только погрешность по  $R_0$  превышает 1 %, при этом потенциальная степень вариации этого параметра может достигать как минимум 20 % (рисунок 1).

Таблица 2 – Результаты решения оптимизационной задачи по определению параметров нетранспонированной ВЛЭП без учета погрешностей СВИ

Параметр	«Эталонное» значение	Погрешность идентификации (в процентах)	
		«Прямой» поиск	«Опосредованный» поиск
$R_1$ , Ом/км	0,0301	$-3,4810 \cdot 10^{-12}$	-0,0022
$X_1$ , Ом/км	0,3713	$9,4767 \cdot 10^{-13}$	0,0012
$B_1$ , См/км	$4,4535 \cdot 10^{-6}$	$3,8610 \cdot 10^{-14}$	$-1,8807 \cdot 10^{-4}$
$R_0$ , Ом/км	0,3114	$-5,9751 \cdot 10^{-10}$	1,1646
$X_0$ , Ом/км	1,2026	$-5,2971 \cdot 10^{-11}$	-0,3189
$B_0$ , См/км	$2,8499 \cdot 10^{-6}$	$1,9054 \cdot 10^{-10}$	0,0012

В четвертой главе детальным образом анализируется влияние систематических погрешностей СВИ на качество решения задачи по определению фактических параметров ВЛЭП, предлагаются и исследуются методы нивелирования негативного влияния погрешностей СВИ, проводится апробация разработанных методов, направленных на идентификацию параметров ВЛЭП, с использованием реальных архивов СВИ в режиме «черный ящик», а также обсуждается проблема верификации этих методов во «полевых» условиях.

Влияние амплитудных и угловых погрешностей СВИ на качество расчета параметров ВЛЭП подробно анализируется в ряде отечественных и зарубежных работ. При этом, как уже отмечалось выше, систематические погрешности рассматриваются, как правило, по отдельности. Очевидно, на практике погрешности действуют все сразу (одновременно во всех измерительных трактах напряжений и токов по обоим концам ВЛЭП), поэтому необходимо моделирование их совокупного влияния. Для решения поставленной задачи рассмотрены два различных режима участка электрической сети, включающего моделируемую ВЛЭП (для которой за основу взят «паспорт» линии 500 кВ «Костромская ГРЭС – Загорская ГАЭС»): нормальный установившийся с небольшой несимметрией по фазам («РЕЖИМ 1») и режим с резкой несимметрией, имитирующий отключение одной фазы линии («РЕЖИМ 2»). Исследования проведены для двух моделей ВЛЭП – транспонированной и нетранспонированной. Для идентификации параметров ВЛЭП в обоих случаях применяется метод, основанный на переходе к модальным составляющим ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\theta$ ) и описанный в п. 3.2 диссертации (главная часть соответствующего алгоритма представлена блок-схемой на рисунке 4). Нетранспонированная линия при этом условно заменяется транспонированной, что вносит ошибку даже при отсутствии

погрешностей СВИ, однако позволяет решать более простую задачу вместо выполнения оптимизации, а также сравнивать результаты для двух моделей ВЛЭП при наличии погрешностей СВИ. Сценарии моделирования идентичны для «РЕЖИМА 1» и «РЕЖИМА 2». Для объективной оценки влияния погрешностей СВИ использован метод Монте-Карло, широко применяемый при изучении случайных процессов, в т.ч. в электроэнергетике. Для каждого из четырех рассмотренных классов точности трансформаторов напряжения (ТН) и тока (ТТ) выполнена серия из 10000 вычислительных экспериментов в MATLAB, что позволило получить объективную статистику относительно ошибок определения отдельных параметров ВЛЭП. Иерархия организации вычислений отражена в таблице 3.

Таблица 3 – Иерархия организации вычислительных экспериментов для анализа влияния систематических погрешностей СВИ на качество определения параметров моделируемой ВЛЭП 500 кВ

УРОВЕНЬ 1	Задание модели ВЛЭП 500 кВ	Транспонированная			
		Нетранспонированная			
УРОВЕНЬ 2	Задание установившегося режима, в котором получены «эталонные» вектора	«РЕЖИМ 1»: нормальный		«РЕЖИМ 2»: резко несимметричный	
УРОВЕНЬ 3	Задание класса точности измерительных трансформаторов по IEC 60044-1 (для ТТ) и IEC 60044-2 (для ТН)	0,1	0,2	0,5	1,0
УРОВЕНЬ 4	Цикл из 10000 итераций	Генерация конкретных систематических погрешностей для каждого из 12 «эталонных» векторов			
		Получение 12 векторов, искаженных погрешностями			
		Оценка параметров прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП			

Результаты выполненных экспериментов представлены на рисунках 5 и 6 в виде средних значений модулей погрешностей расчета параметров ВЛЭП (в процентах). Ошибки идентификации параметров прямой последовательности во всех случаях определены из «РЕЖИМА 1», нулевой – из «РЕЖИМА 2». Из рисунков 5 и 6 очевидно, что систематические погрешности измерений оказывают в целом значительное влияние на точность вычисления параметров ВЛЭП: наблюдается практически линейная зависимость ошибок идентификации продольных сопротивлений ВЛЭП от погрешностей, вносимых измерительными трансформаторами (то же самое справедливо и в отношении емкостных проводимостей). В связи с этим актуальными представляются следующие направления исследований:

а) создание (и последующее применение для целей СВИ) как можно более точных измерительных трансформаторов, максимально корректно воспроизводящих процессы на «первичной» стороне, в т.ч. в особых режимах, таких как «РЕЖИМ 2» (таблица 3). В последние годы в этом направлении, предполагающем проведение фундаментальных исследований, сделаны важные шаги, отраженные, в частности, в диссертации Яблокова А.А.;

б) разработка методик и алгоритмов, обеспечивающих компенсацию негативного влияния погрешностей СВИ.

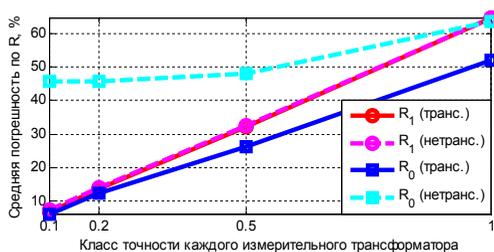


Рисунок 5 – Средние значения погрешностей идентификации активных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП

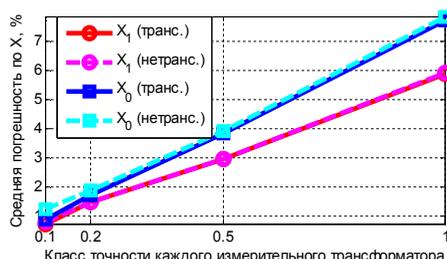


Рисунок 6 – Средние значения погрешностей идентификации индуктивных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП

Одним из эффективных методов, позволяющих несколько скомпенсировать влияние систематических погрешностей измерений при расчете параметров прямой после-

довательности ВЛЭП, является, как было выяснено в ходе исследования, использование линейного метода наименьших квадратов (линейной регрессии). Система уравнений длиной линии для одной симметричной составляющей может быть представлена в следующей матричной форме:

$$[\mathbf{C}] = \underbrace{\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}}_{[\mathbf{A}]} [\mathbf{B}], \quad (3)$$

линейной относительно неизвестных  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , связанных, в свою очередь, с постоянной распространения  $\gamma$  и волновым сопротивлением  $Z$  нелинейными функциями.

Элементы матриц  $[\mathbf{B}]$  и  $[\mathbf{C}]$  в (3) известны (это измерения по концам ВЛЭП):

$$[\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(1)} & \dot{U}_1^{(2)} & \dots & \dot{U}_1^{(N)} \\ \dot{I}_1^{(1)} & \dot{I}_1^{(2)} & \dots & \dot{I}_1^{(N)} \end{bmatrix}; \quad [\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} \dot{U}_2^{(1)} & \dot{U}_2^{(2)} & \dots & \dot{U}_2^{(N)} \\ \dot{I}_2^{(1)} & \dot{I}_2^{(2)} & \dots & \dot{I}_2^{(N)} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где нижний индекс «1» обозначает начало ВЛЭП, нижний индекс «2» – конец ВЛЭП, а «N» – количество независимых комплектов СВИ по концам линии (предполагается, что оно достаточно велико – сотни или тысячи).

В диссертации отражены необходимые преобразования, приводящие к точному аналитическому решению задачи относительно искомым элементов матрицы  $[\mathbf{A}]$ :

$$[\mathbf{A}] = [\mathbf{C}][\mathbf{B}]^T \left[ [\mathbf{B}][\mathbf{B}]^T \right]^{-1}. \quad (5)$$

Рассчитав элементы матрицы  $[\mathbf{A}]$  по уравнению (5), возникает нетривиальная задача, каким же образом на их основе следует определять значения  $\gamma$  и  $Z$ , поскольку теоретически это можно выполнить различными способами. По результатам многочисленных вычислительных экспериментов был выбран следующий вариант:

$$\gamma = \frac{\operatorname{arsh}(\sqrt{b \cdot c})}{l}; \quad Z = -\frac{b}{\operatorname{sh}(\gamma \cdot l)}, \quad (6)$$

где  $l$  – длина ВЛЭП.

На рисунке 7 представлены результаты определения индуктивного сопротивления прямой последовательности линии по описанному выше методу – на основе линейной регрессии – в сравнении с ранее достигнутыми результатами, полученными при использовании лишь одного комплекта СВИ («N = 1» на рисунке 7) и отраженными на рисунке 6. В обоих случаях применялась одна и та же модель нетранспонированной ВЛЭП. Моделирование влияния погрешностей СВИ также осуществлялось аналогично – по методу Монте-Карло. Из рисунка 7 совершенно очевидно, что метод с использованием линейной регрессии обеспечивает существенно более точные (вплоть до одного порядка) результаты расчета параметров прямой последовательности ВЛЭП. Оценки по  $X_1$  и  $Y_1$  при этом становятся резистивными даже к более грубым измерениям (класс «Особый» на рисунке 7 подразумевает измерения от ТН класса 3 и ТГ класса 5). На рисунке 7 отражены лишь средние значения погрешностей, однако и предельные их величины, полученные в экспериментах, можно считать незначительными: так, для класса «Особый» имеем 3,26 % по  $X_1$  и 2,9 % по  $Y_1$ .

Другим возможным подходом, направленным на компенсацию влияния систематических погрешностей СВИ, является переформулировка оптимизационной задачи, описанной в третьей главе, с целью включения дополнительных неизвестных, увеличивающих размер вектора переменных оптимизации, – коэффициентов коррекции. Применение данного метода требует детального «портрета» ВЛЭП, а его наиболее «узким местом» является плохая обусловленность получающейся задачи при использовании комплектов СВИ нормального установившегося режима ЭЭС, отличающихся высокой корреляцией. Векторные

измерения, сформированные в особых режимах с достаточно выраженными напряжениями и токами нулевой последовательности, в распоряжении автора отсутствовали.

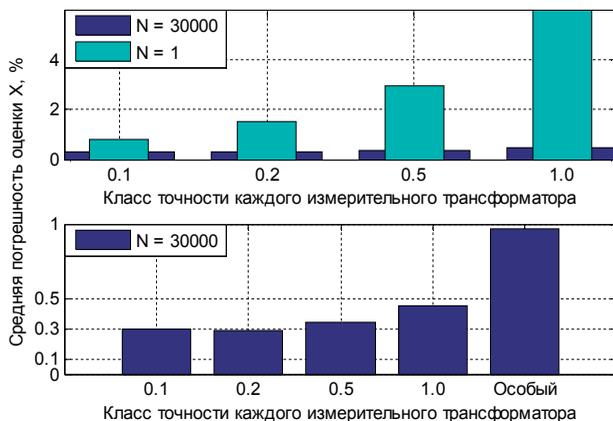


Рисунок 7 – Средние значения погрешностей расчета индуктивного сопротивления прямой последовательности ВЛЭП для двух методов: на основе одного комплекта СВИ («N = 1») и на основе 30000 комплектов СВИ с линейной регрессией («N = 30000»)

Функционирование разработанных методов идентификации параметров ВЛЭП проанализировано с использованием реальных массивов измерений в режиме «черный ящик» (когда все без исключения требуемые вектора напряжений и токов извлекаются из реальных архивов СВИ по концам ВЛЭП). Соответствующие вычислительные эксперименты выполнены для трех одноцепных ВЛЭП (в каждом случае – с несколькими различными архивами СВИ): американская линия 345 кВ, ВЛЭП 500 кВ «Костромская ГРЭС – Загорская ГАЭС», ВЛЭП 500 кВ «Тамань – Кубанская». Выяснено, что два из четырех разработанных методов (линейная регрессия и оптимизация с учетом коэффициентов коррекции) обеспечивают достаточно точные оценки значений индуктивного сопротивления  $X_1$  и емкостной проводимости  $B_1$ . В качестве иллюстрации сказанного в таблице 4 выделены жирным соответствующие результаты, полученные для ВЛЭП 345 кВ.

Таблица 4 – Результаты расчета параметров прямой последовательности ВЛЭП 345 кВ на базе СВИ нормального установившегося режима ЭЭС с применением нескольких разработанных методов

Параметр	«Эталонное»* значение	Отличие «эталонного» и расчетного значений (в процентах)			
		Аналитическое решение (рисунок 4)	Линейная регрессия	Оптимизация без учета коэффициентов коррекции	Оптимизация с учетом коэффициентов коррекции
<i>Архив СВИ 1; количество комплектов СВИ: 108001</i>					
$R_1$	0,0351 Ом/км	23,3335	34,7099	23,2722	-15,3012
$X_1$	0,3715 Ом/км	-42,7362	<b>-1,1225</b>	-41,2782	<b>0,7889</b>
$B_1$	$4,4535 \cdot 10^{-6}$ См/км	-14,6512	<b>1,9005</b>	-14,5997	<b>1,8264</b>
<i>Архив СВИ 2; количество комплектов СВИ: 108002</i>					
$R_1$	0,0351 Ом/км	5,5860	27,9718	7,7608	17,9603
$X_1$	0,3715 Ом/км	-37,4466	<b>1,9595</b>	-35,3223	<b>1,9833</b>
$B_1$	$4,4535 \cdot 10^{-6}$ См/км	-14,8023	<b>3,0743</b>	-15,1012	<b>1,7137</b>

ПРИМЕЧАНИЕ. \* Под «эталонным» в данном случае подразумевается соответствующее «паспортное» значение, используемое электросетевой компанией.

Сделать объективные выводы относительно погрешностей определения  $R_1$  сложно в силу существенной вариации этого сопротивления (рисунок 1) вкпе с отсутствием его «эталонного» значения, соответствующего конкретному интервалу времени. Проблема отсутствия «эталоннов», необходимых для полноценного анализа результатов расчета параметров ВЛЭП в «полевых» условиях, обсуждается в конце четвертой главы. По мнению

автора, целесообразно выполнить серию специально запланированных экспериментов по достаточно точному замеру фактических эквивалентных параметров ВЛЭП, например, методом холостого хода и короткого замыкания, с одновременным расчетом этих параметров по данным СВИ. Вероятно, подобные эксперименты могут быть заранее согласованы и осуществлены при плановом выводе ВЛЭП из работы. Только наличие достаточной базы результатов, полученных при испытаниях такого рода, позволит сделать действительно объективные выводы касательно применимости предлагаемых методик определения параметров ВЛЭП на основе СВИ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены несколько основных факторов, обуславливающих вариацию параметров ВЛЭП, а также приблизительные диапазоны изменения сопротивлений и проводимостей прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП. Соответствующий анализ выполнен для двух линий различной конфигурации, а полученные числовые данные, свидетельствующие о необходимости актуализации параметров ВЛЭП, в целом согласуются с оценками потенциального изменения этих параметров в литературе.

2. Проанализирован большой массив реальных векторных измерений, в результате чего установлено, что в архивах СВИ могут присутствовать заведомо недостоверные точки данных (импульсные помехи). Разработан и успешно протестирован на реальных СВИ метод, обеспечивающий обнаружение и фильтрацию импульсных помех. С целью повышения качества исходных данных, требуемых методам идентификации параметров ВЛЭП, определены наиболее эффективные варианты цифровой фильтрации «шумовой» составляющей векторных измерений тока, формируемых ЦРАП с функцией СВИ.

3. Получено компактное матричное описание установившихся электроэнергетических режимов для ВЛЭП различной конфигурации (в т.ч. неоднородных), используемое в сформулированных оптимизационных задачах по определению параметров ВЛЭП.

4. Разработаны и верифицированы несколько методов идентификации параметров транспонированных и нетранспонированных ВЛЭП на основе СВИ. Показано, что точный расчет параметров нетранспонированной линии требует решения оптимизационной задачи. При этом, если имеются подробные «паспортные» характеристики ВЛЭП (типы опор, сечения проводников и т.п.), целесообразно выполнять оптимизацию относительно вектора неизвестных меньшей размерности. Большое внимание уделено некоторым важным аспектам подготовки оптимизационной задачи.

5. Выполнены вычислительные эксперименты, в результате которых получены зависимости, характеризующие комплексное влияние систематических погрешностей СВИ (одновременно присутствующих во всех без исключения векторах напряжения и тока) на точность расчета параметров ВЛЭП. Установлено, что ошибки вычисления параметров линии на базе векторных измерений практической линейно зависят от класса точности ТТ и ТН, формирующих входные данные для УСВИ. Показано также, что упрощение модели ВЛЭП оказывает тем меньшее влияние на точность определения ее параметров, чем «грубее» приемлемые для этой цели СВИ.

6. Проанализировано функционирование большинства методов определения параметров ВЛЭП, разработанных в диссертации, с привлечением реальных архивов СВИ по обоим концам ВЛЭП (тестирование в режиме «черный ящик»). Соответствующие эксперименты, выполненные для трех различных ВЛЭП и нескольких отдельных массивов СВИ, позволяют достаточно объективно заключить, что два из четырех протестированных методов обеспечивают приемлемые оценки фактических значений  $X_1$  и  $B_1$ . Сделать окончательные выводы относительно точности определения параметров ВЛЭП можно только при наличии корректных «эталонных» значений этих параметров.

7. Представлены предварительные рекомендации по выбору наиболее эффективного метода расчета параметров ВЛЭП на основе СВИ, отраженные в виде блок-схемы, а также предложены варианты достоверизации результатов определения параметров ВЛЭП в реальных практических условиях.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. **Иванов, И.Е.** Определение статистических свойств случайной ошибки, сопровождающей синхронизированные векторные измерения токов и напряжений в установившемся режиме / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 3. – С. 29–38.
2. **Иванов, И.Е.** Оценка влияния различных факторов на значения сопротивлений и проводимостей высоковольтной воздушной линии электропередачи / И.Е. Иванов // Вестник ИГЭУ. – 2017. – №. 3. – С. 30–39.
3. **Иванов, И.Е.** Аналитическое определение параметров транспонированной линии электропередачи на базе синхронизированных векторных измерений / И.Е. Иванов // Вестник ИГЭУ. – 2019. – №. 1. – С. 30–42.

Публикации, индексированные в «Web of Science», «Scopus»

4. **Ivanov, I.** Optimal filtering of synchronized current phasor measurements in a steady state / I. Ivanov, A. Murzin // Proc. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – Seville, Spain. – March 17–19, 2015. (публикация индексирована в «Scopus» и «Web of Science»)
- (**Иванов, И.Е.** Оптимальные методы фильтрации синхронизированных векторных измерений тока в установившемся режиме / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Международная конференция по технологиям в промышленности под эгидой IEEE – 2015: сборник материалов. – Севилья, Испания, 2015)
5. **Ivanov, I.** Synchronphasor-based transmission line parameter estimation algorithm taking into account measurement errors / I. Ivanov, A. Murzin // Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). – Ljubljana, Slovenia. – October 9–12, 2016. (публикация индексирована в «Scopus» и «Web of Science»)
- (**Иванов, И.Е.** Метод расчета параметров линий электропередачи на основе синхронизированных векторных измерений, учитывающий погрешности измерений / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Европейская конференция по инновационным технологиям интеллектуальной электрической сети под эгидой IEEE PES: сборник материалов. – Любляна, Словения, 2016)
6. Lebedev, V. Development of a high accuracy digital voltage transformer and a test bed supporting IEC 61850 and IEEE C37.118 / V. Lebedev, A. Yablokov, **I. Ivanov**, S. Litvinov // Proc. 2017 IEEE Manchester Power-Tech. – Manchester, UK. – June 18–22, 2017. (публикация индексирована в «Scopus» и «Web of Science»)
- (Лебедев, В.Д. Разработка высокоточного цифрового трансформатора напряжения и испытательного стенда с поддержкой протоколов IEC 61850 и IEEE C37.118 / В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков, **И.Е. Иванов**, С.Н. Литвинов // Конференция «PowerTech» под эгидой IEEE – 2017: сборник материалов. – Манчестер, Великобритания, 2017)

Публикации в других изданиях

7. **Иванов, И.Е.** Исследование возможностей программного комплекса ATPDraw для моделирования воздушных линий электропередачи в целях релейной защиты / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Электроэнергетика. Региональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «ЭНЕРГИЯ-2011». – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2011. – Т. 3. – С. 108–111.
8. **Иванов, И.Е.** Исследование моделей воздушных линий электропередачи в программном комплексе ATP-EMTP в целях релейной защиты / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2011. – Т. 1. – С. 153–154.
9. **Иванов, И.Е.** Моделирование воздушных линий электропередачи в целях совершенствования функционирования микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики этих линий / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Инновационные проекты молодых ученых за 2011 г.: сборник отчетов. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2012. – Т. 1. – С. 154–158.
10. **Иванов, И.Е.** Определение актуальных параметров воздушных ЛЭП по данным двустороннего замера токов и напряжений / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Электроэнергетика. Региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «ЭНЕРГИЯ-2012». – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2012. – Т. 3. – С. 102–107.
11. **Иванов, И.Е.** К проблеме определения актуальных параметров высоковольтных воздушных линий электропередачи / И.Е. Иванов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – № 4. – С. 11–13.
12. **Иванов, И.Е.** Моделирование установившегося режима одноцепных транспонированных и нетранспонированных линий электропередачи на языке MATLAB / И.Е. Иванов, С.Ю. Токарев, А.Ю. Мурзин // Вестник Российского национального комитета СИГРЭ: сборник конкурсных докладов по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ «Энергия-2013» по итогам Конкурса докладов в рамках VIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013». Специальный выпуск № 1. Материалы Молодежной секции РНК СИГРЭ. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2013. – С. 137–143.
13. **Иванов, И.Е.** Разработка алгоритма идентификации актуальных параметров одноцепных нетранспонированных линий электропередачи на основе технологии синхронизированных векторных измерений / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Вестник Российского национального комитета СИГРЭ: сборник конкурсных докладов по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ «Энергия-2013» по итогам Конкурса докладов в рамках VIII Международной научно-

технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013». Специальный выпуск № 1. Материалы Молодежной секции РНК СИПРЭ. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2013. – С. 325–329.

14. **Иванов, И.Е.** Моделирование установившегося режима неоднородных воздушных линий электропередачи в программном комплексе MATLAB / И.Е. Иванов // Материалы международной научно-практической конференции «Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки» («Fundamental science and technology – promising developments: Proceedings of the Conference»). В 2 т. – Москва, 22–23 мая 2013 г. – North Charleston, SC, USA: CreateSpace Independent Publishing Platform. – 2013. – Т. 2. – С. 173–179.

15. **Иванов, И.Е.** Оценка статистических свойств несистематической ошибки устройств синхронизированных векторных измерений / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Интеллектуальные энергосистемы: труды I Международного молодёжного форума. В 2 т. – Томск, 21–25 октября 2013 г. – Томск: Томский политехнический университет. – 2013. – Т. 1. – С. 58–62.

16. **Иванов, И.Е.** Разработка алгоритма идентификации актуальных параметров линий электропередачи, учитывающего ошибки измерений / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: двадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: тез. докл. В 4 т. – Москва, 27–28 февраля 2014 г. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2014. – Т. 4. – С. 257.

17. **Иванов, И.Е.** Detection and removal of spikes present in synchronized phasor measurements / И.Е. Иванов // Молодой ученый. – 2014. – № 12. – С. 78–87.

(**Иванов, И.Е.** Обнаружение и удаление импульсных помех, присутствующих в синхронизированных векторных измерениях / И.Е. Иванов // Молодой ученый. – 2014. – № 12. – С. 78–87.)

18. **Иванов, И.Е.** Обнаружение и фильтрация импульсных помех в синхронизированных векторных измерениях токов и напряжений / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды V международной научно-технической конференции. В 2 т. – Томск, 10–14 ноября 2014 г. – Томск: Томский политехнический университет. – 2014. – Т. 2. – С. 112–116.

19. **Иванов, И.Е.** Идентификация параметров одноцепной линии электропередачи на основе синхронизированных векторных измерений / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Сборник докладов 5-й Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Сочи, 1–5 июня 2015 г.

20. **Иванов, И.Е.** Определение актуальных параметров неоднородной линии электропередачи на основе технологии синхронизированных векторных измерений / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции. В 2 т. – Иваново, 9–13 ноября 2015 г. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2015. – Т. 1. – С. 105–108.

21. Новиков, В.А. Определение параметров трёхфазных двухцепных линий электропередачи на базе синхронизированных векторных измерений / В.А. Новиков, Д.С. Виноградова, **И.Е. Иванов** // Электроэнергетика. Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ-2016»: материалы конференции. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2016. – Т. 3. – С. 44–46.

22. **Иванов, И.Е.** Особенности практической реализации алгоритма определения параметров воздушных линий электропередачи на основе синхронизированных векторных измерений / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологий (XIX Бенардосовские чтения): материалы Международной научно-технической конференции. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2017. – Т. 1. – С. 369–373.

23. **Иванов, И.Е.** Анализ степени вариации параметров высоковольтных воздушных линий электропередачи / И.Е. Иванов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2018. – № 12. – С. 95–100.

24. **Иванов, И.Е.** Обобщенная методология определения параметров нетранспонированной линии электропередачи с использованием векторных измерений / И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологий (Бенардосовские чтения): сборник научных трудов по материалам Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2019. – Т. 1. – С. 310–322.

---

**ИВАНОВ Игорь Евгеньевич**  
**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ**  
**ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ**  
**СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 03.10.2019 г. Формат 60×80<sup>1/16</sup>.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 133.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГУУ