

федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Мурзин А.Ю.

Иваново – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЛЭП И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ВАРИАНТОВ ЕЕ РЕШЕНИЯ.....	20
1.1 Анализ традиционных методов расчета параметров ВЛЭП.....	20
1.2 Выявление основных факторов, влияющих на вариации параметров ВЛЭП, и возможных диапазонов изменения параметров.....	34
1.3 Описание технологии синхронизированных векторных измерений напряжений и токов.....	56
1.4 Аналитический обзор опубликованных работ по идентификации параметров ВЛЭП на основе синхронизированных векторных измерений.....	59
1.5 Систематизация результатов анализа публикаций и формулировка связанных с этим задач исследования.....	76
1.6 Выводы по главе 1.....	81
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОДГОТОВКИ МАССИВОВ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЛЭП.....	83
2.1 Характеристика реальных массивов СВИ напряжений и токов.....	83
2.2 Разработка и исследование метода обнаружения и фильтрации импульсных помех в СВИ напряжений и токов.....	86
2.3 Определение статистических свойств «шумов», сопровождающих СВИ напряжений и токов в установившемся режиме.....	98
2.4 Выявление наиболее эффективных методов цифровой фильтрации СВИ токов.....	109
2.5 Выводы по главе 2.....	123

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ВЛЭП И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛЭП НА ОСНОВЕ СВИ БЕЗ УЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ..	125
3.1 Аналитическое решение задачи определения параметров однофазной ВЛЭП.....	125
3.2 Аналитическое решение задачи определения параметров одноцепной трехфазной транспонированной ВЛЭП.....	129
3.3 Постановка и решение задачи определения параметров одноцепной трехфазной нетранспонированной ВЛЭП.....	139
3.4 Методика моделирования установившихся режимов однородных и неоднородных ВЛЭП произвольной конфигурации.....	168
3.5 Выводы по главе 3.....	179
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛЭП НА ОСНОВЕ СВИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ.....	181
4.1 Анализ несимметрии и характера изменений напряжений и токов посредством обработки реальных массивов СВИ.....	181
4.2 Оценка влияния погрешностей измерений на качество идентификации параметров ВЛЭП.....	185
4.3 Разработка методов компенсации систематических погрешностей СВИ.....	194
4.4 Анализ функционирования разработанных методов на реальных архивах СВИ с обеих сторон ВЛЭП (тестирование в режиме «черный ящик».....	207
4.5 Методика анализа функционирования и принципы использования методов определения параметров ВЛЭП в эксплуатационной практике.....	216
4.6 Выводы по главе 4.....	221
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	223
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	225

ПРИЛОЖЕНИЕ А Модели ВЛЭП, используемые для выполнения вычислительных экспериментов.....	242
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Аналитическое решение системы уравнений для определения удельных параметров однофазной длинной линии.....	247
ПРИЛОЖЕНИЕ В Пояснения к методике диагонализации дифференциальных уравнений, описывающих одноцепную трехфазную нетранспонированную ВЛЭП.....	256
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Базовый код на языке MATLAB, используемый в ходе оптимизации для идентификации параметров нетранспонированной ВЛЭП.....	259
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Код на языке MATLAB для моделирования установившегося режима ЭЭС.....	264
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Иллюстрации к характеру изменения напряжений и токов установившегося режима ЭЭС по данным анализа реальных массивов СВИ.....	268
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Решение матричных уравнений для метода идентификации параметров ВЛЭП с использованием линейной регрессии.....	272
ПРИЛОЖЕНИЕ И Акт внедрения результатов диссертации.....	275

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
БПФ – быстрое преобразование Фурье
ВЛЭП – воздушная линия электропередачи
ДВП – дискретное вейвлет-преобразование
ЕЭС – Единая энергетическая система
КЗ – короткое замыкание
МАО – медианное абсолютное отклонение
МНК – метод наименьших квадратов
ОАПВ – однофазное автоматическое повторное включение
ОВФ – основные влияющие факторы
ОМП – определение места повреждения
ОС – оценивание состояния
ПС – подстанция
РАС – регистратор аварийных событий
РЗА – релейная защита и автоматика
СВИ – синхронизированные векторные измерения
СВП – стационарное вейвлет-преобразование
СКО – среднеквадратическое отклонение
СМНР – система мониторинга переходных режимов
ТИ – телеизмерение
ТН – трансформатор напряжения
ТТ – трансформатор тока
ТОС – температура окружающей среды
УСВИ – устройство синхронизированных векторных измерений
ЦРАП – цифровой регистратор аварийных повреждений
ЦФ – целевая функция
ЭДС – электродвижущая сила
ЭЭС – электроэнергетическая система

ВВЕДЕНИЕ

В.1 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 [1, 2]. Одной из важных задач в данном контексте представляется определение актуальных (фактических) параметров схем замещения элементов ЭЭС, соответствующих текущему электроэнергетическому режиму.

Параметры высоковольтных воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) – комплексные сопротивления $[Z]$ и проводимости $[Y]$ – являются важными входными данными для различных информационно-технических комплексов, используемых в электроэнергетике [3–6]. Владение актуальной информацией о параметрах ВЛЭП необходимо для решения таких задач как оценивание состояния (ОС) режима электрической сети, повышение точности определения места повреждения (ОМП) на ВЛЭП, выбор параметров срабатывания (уставок) дистанционной защиты, а также ряда других [3–8]. 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 (грунт) [9–15]. 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 [7, 16–18]) в зависимости от уровня загрузки ВЛЭП и погодных условий. Помимо вариации значений параметров ВЛЭП вследствие

изменений режима ЭЭС, возможны погрешности вычисления этих значений, обусловленные сложностью учета всех характеристик системы проводников ВЛЭП, имеющихся в «паспортных» данных (геометрия типовой опоры и др.). Поэтому цифровые устройства и программные комплексы, использующие информацию о параметрах ВЛЭП, могут иметь некорректные входные данные. Очевидно также, что разработка адаптивных алгоритмов управления электрическими сетями нового поколения *Smart Grids* предполагает как можно более точную информацию о реальных параметрах ВЛЭП. Отмеченные обстоятельства обосновывают актуальность темы диссертации.

В.2 Степень разработанности темы исследования. Необходимость уточнения параметров ВЛЭП неоднократно отмечалась в технической литературе [2–8, 16–42]. Диапазоны возможных вариаций параметров схем замещения элементов ЭЭС (и, в частности, ВЛЭП), а также методы идентификации этих параметров рассматривались 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 работ исследуется возможность определения (идентификации) фактических параметров ВЛЭП по данным систем телеизмерений (ТИ) и SCADA [18–20]. Основные проблемы при применении ТИ заключаются в их относительно невысокой точности [7], отсутствии синхронизации измерений с двух концов ВЛЭП, а также низкой скорости обновления данных о параметрах текущего электроэнергетического режима (например, один раз в несколько минут, что может оказаться критичным при необходимости накопления массива в несколько сотен или тысяч точек данных за небольшой интервал времени, в течение которого изменением параметров ВЛЭП можно пренебречь).

Решение задачи идентификации сопротивлений и проводимостей ВЛЭП возможно на базе массивов мгновенных значений напряжений и токов, получаемых от регистраторов аварийных событий (РАС) [16, 21, 22]. Однако погрешность синхронизации времени для подобных устройств может достигать 1 мс [3, 43], данные для расчетов доступны только при пуске регистраторов, а также возникает заметная нагрузка на каналы связи [3]. Кроме того, в [22] указана необходимость достаточно высокой частоты дискретизации аналогового сигнала, а также ставится задача внедрения высокоточных систем синхронизации времени.

В литературе также имеются публикации, в которых предлагается вычисление параметров схемы замещения ВЛЭП с использованием замеров токов и напряжений на одной стороне линии при разомкнутом, а затем замкнутом накоротко противоположном конце линии [27]. Возможность широкого применения подобного подхода на практике вызывает большие сомнения: эксперименты должны быть регулярными, а вывод из эксплуатации ВЛЭП напряжением 110 кВ и выше без весомых на то оснований (восстановление после повреждения, плановая замена оборудования и т.д.) – событие практически невероятное.

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 (посредством GPS или ГЛОНАСС) измерений векторов напряжений и токов всех фаз по обеим сторонам ВЛЭП открывает возможности как более эффективного решения задачи ОС режима сети [7, 44–46], так и мониторинга фактических параметров схем замещения ВЛЭП [23, 47]. Устройства СВИ (УСВИ) нарастающими темпами устанавливаются в ЭЭС по всему миру [48]. В Единой энергетической системе (ЕЭС) Российской Федерации в настоящее время насчитывается несколько сотен интеллектуальных устройств с функцией СВИ [49]. С 2005 г. ведутся работы по реализации в ЕЭС Системы мониторинга переходных

режимов (СМПП) – аналога зарубежной системы WAMS (Wide Area Measurement System) [49, 50].

Задача определения фактических параметров ВЛЭП на основе СВИ напряжений и токов нашла отражение в ряде опубликованных работ российских и зарубежных ученых, например, [2–8, 35–41]. Методы и алгоритмы решения задачи предлагались в работах Бартоломея П.И., Бердина А.С., Ерошенко С.А., 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, известен ограниченный круг 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 сбора и анализа измерений (включающей трансформаторы напряжения и тока, УСВИ, соединительные кабели и другое оборудование),

характеристики которой непосредственно отражаются на качестве решения задачи идентификации параметров ВЛЭП.

В.3 Цель диссертационной работы заключается в разработке методов повышения точности определения актуальных параметров ВЛЭП различной конфигурации на основе СВИ.

В.4 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 одноцепных 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, обеспечивающих 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).

В.5 Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются ВЛЭП различной конфигурации напряжением 110 кВ и выше. Предмет исследования представляют актуальные параметры ВЛЭП – элементы матриц сопротивлений [\mathbf{Z}] и проводимостей [\mathbf{Y}], отражающие текущий электроэнергетический режим, определяемый погодными условиями и уровнем загрузки ВЛЭП.

В.6 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).

Для разработки теоретических положений и осуществления вычислительных экспериментов в работе использовался следующий основной инструментарий:

а) математический аппарат линейной алгебры, теории вероятностей и статистики, цифровой обработки сигналов;

б) методы теории электрических цепей и электромагнитных переходных процессов в ЭЭС, в частности, уравнения и зависимости, позволяющие рассчитывать параметры ВЛЭП принятыми в инженерной практике способами, а также рассчитывать установившийся режим ЭЭС, содержащей ВЛЭП с распределенными параметрами;

в) программное обеспечение MATLAB с редактором m-файлов как инструмент непосредственной реализации и тестирования всех разработанных алгоритмов;

г) программное обеспечение ATP (с графическим препроцессором ATPDraw) как инструмент верификации реализованных в MATLAB алгоритмов расчета матриц [\mathbf{Z}] и [\mathbf{Y}], а также методов вычисления массивов напряжений и токов для ВЛЭП различной конфигурации.

В.7 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.

В.8 Степень достоверности и обоснованности результатов исследования определяется следующим:

а) использованием многократно проверенных и общепринятых методов математического анализа и моделирования ЭЭС (в частности, математического описания ВЛЭП);

б) применением при проведении вычислительных экспериментов современных инструментов моделирования, прежде всего, MATLAB (для реализации математических алгоритмов и обработки массивов СВИ) и ATP/ATPDraw (для моделирования ВЛЭП с учетом их реальной конфигурации, установившихся режимов и электромагнитных переходных процессов в ЭЭС);

в) точным совпадением результатов решения отдельных подзадач, запрограммированных на языке MATLAB, с соответствующими результатами, полученными с помощью ATP/ATPDraw (прежде всего, при расчете матриц сопротивлений и проводимостей для ВЛЭП различной конфигурации, а также при вычислении напряжений и токов на одном конце ВЛЭП по соответствующим значениям на другом ее конце);

г) использованием массивов СВИ напряжений и токов, полученных с реальных УСВИ, что позволяет определить статистические характеристики «шума» СВИ, выполнить анализ общего характера измерений (в частности, обнаружить импульсные помехи и разработать метод их фильтрации), оценить уровень несимметрии и степень вариации напряжений и токов на ВЛЭП, а также использовать реальные архивы измерений на этапе тестирования методов идентификации параметров ВЛЭП;

д) 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 ВЛЭП: американская линия 345 кВ, ВЛЭП 500 кВ «Костромская ГРЭС – Загорская ГАЭС», ВЛЭП 500 кВ «Тамань – Кубанская».

В.9 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.

В.10 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:

а) повышение качества ОС режима электрической сети;

- б) повышение точности дистанционных методов ОМП на ВЛЭП;
- в) совершенствование алгоритмов функционирования адаптивных дистанционных защит;
- г) повышение точности расчета потерь электроэнергии при ее передаче по ВЛЭП;
- д) мониторинг температуры фазных проводов ВЛЭП;
- е) накопление базы данных о реальных параметрах ВЛЭП.

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

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 диссертационной работы.

В.11 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 задаче идентификации параметров ВЛЭП.

В.12 Личный вклад автора. Автором выполнен аналитический обзор отечественных и зарубежных 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 (транспонированных, нетранспонированных, неоднородных) 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 алгоритмов цифровой фильтрации «шумовой» составляющей СВИ, что может использоваться для широкого круга задач, решаемых на базе векторных измерений. Автор также подготовил рукописи всех основных публикаций по теме диссертации.

В.13 Соответствие паспорту специальности. 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.

В.14 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 конференции «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.); Двдцатой 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.).

В.15 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».

В.16 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).

В.17 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 ЕЭС» 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.

В.18 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.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЛЭП И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ВАРИАНТОВ ЕЕ РЕШЕНИЯ

1.1 Анализ традиционных методов расчета параметров ВЛЭП

1.1.1 Расчетные выражения для вычисления параметров ВЛЭП. Принятые в инженерной практике методы расчета параметров схем замещения ВЛЭП базируются на определенных допущениях относительно геометрии и физических свойств системы проводников ВЛЭП, включающей фазные провода, грозозащитные тросы и контур возврата тока через землю (грунт). Рассчитанные сопротивления и проводимости вводятся в качестве исходных данных в информационно-технические комплексы для расчета режимов электрической сети, параметров срабатывания устройств РЗА, уставок устройств ОМП и т.д. При этом заданные исходные данные не только могут быть неточны, но и впоследствии никак не корректируются, т.е. предполагаются неизменными для всех электроэнергетических режимов.

В российской практике одним из наиболее авторитетных источников, используемых при вычислении параметров ВЛЭП, являются «Руководящие указания по релейной защите» [9]. Несмотря на подробное изложение многих расчетных выражений для определения удельных параметров ВЛЭП, приведенный в [9] материал представляется автору недостаточно строгим и функциональным для автоматизации вычисления параметров ВЛЭП. *Во-первых*, по имеющимся в [9] формулам можно вычислить только сопротивления прямой и нулевой последовательностей, тогда как определение полных матриц фазных параметров ВЛЭП выходит за рамки изложения. Многие реальные линии являются нетранспонированными [10], т.е. ротация проводов по трассе линии не осуществляется, и поэтому оперирование симметричными составляющими при создании строгой математической модели не вполне корректно [51]. *Во-вторых*, в [9] рассматривается группа частных случаев, отражающих различные

конфигурации проводов (одноцепная линия с одним тросом, с двумя тросами и т.д.), однако отсутствует удобная методика, позволяющая обобщить рассмотренные случаи на ВЛЭП с произвольным количеством фазных проводов и грозозащитных тросов. *В-третьих*, влияние земли учитывается не столь строгой аппроксимацией интеграла Карсона, как это принято в современных программных средствах, например, Simulink/Simscapе Power Systems [52]. Кроме того, при выводе соответствующих формул предполагается значение промышленной частоты, равной 50 Гц, тогда как в диссертационной работе, помимо российских, анализируются и американские ВЛЭП, работающие на частоте 60 Гц. *В-четвертых*, поверхностный эффект учитывается одной упрощенной формулой (2-63а) вместо использования модифицированных функций Бесселя [10].

Отмеченные обстоятельства побудили автора к анализу и реализации в программном коде выражений для вычисления параметров ВЛЭП из авторитетной зарубежной литературы [10-12, 15, 53]. Рассмотрим систему из n проводников над поверхностью земли (рисунок 1.1, а).

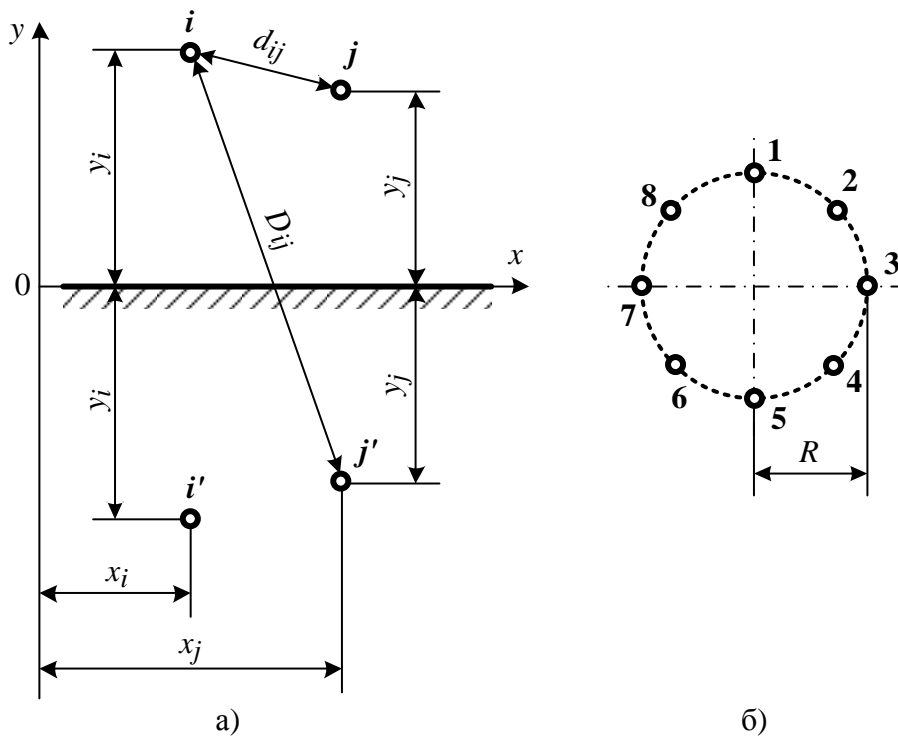


Рисунок 1.1 – Система проводов над поверхностью земли (а) и расщепленная фаза (б)

Матрица емкостей $[\mathbf{C}]$ определяется посредством инверсии матрицы потенциальных коэффициентов $[\mathbf{P}]$, элементы которой вычисляются следующим образом:

$$[\mathbf{P}] = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} \ln \frac{D_{11}}{r_1} & \dots & \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{n1}}{d_{n1}} & \dots & \ln \frac{D_{nn}}{r_n} \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; r_i – внешний радиус проводника i , м; d_{ij} и D_{ij} – расстояния между проводниками i и j , а также между проводником i и изображением другого проводника j' (рисунок 1.1, а), определяемые по теореме Пифагора:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}; \quad (1.2)$$

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}. \quad (1.3)$$

В случае расщепленной фазы (рисунок 1.1, б) вместо радиуса проводника r_i в выражение (1.1) подставляется эквивалентный радиус R_{eq} , вычисляемый следующим образом:

$$R_{eq} = \sqrt[N]{N \cdot r_i \cdot R^{N-1}}, \quad (1.4)$$

где N – число проводов в фазе, а R – радиус расщепления (рисунок 1.1, б).

Элементы матрицы емкостных проводимостей зависят от частоты сети f :

$$[\mathbf{Y}] = j \cdot 2\pi f \cdot [\mathbf{C}]. \quad (1.5)$$

Матрицу сопротивлений можно представить суммой нескольких матриц:

$$[\mathbf{Z}] = [\mathbf{Z}_1] + [\mathbf{Z}_2] + [\mathbf{Z}_3], \quad (1.6)$$

в которой первые два слагаемых учитывают влияние внешнего магнитного поля, а третья составляющая представляет собой «внутреннее»

сопротивление проводника с учетом поверхностного эффекта.

Матрица $[\underline{\mathbf{Z}}_1]$ зависит только от геометрических характеристик системы проводников (рисунок 1.1, а):

$$[\underline{\mathbf{Z}}_1] = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{D_{11}}{r_1} & \dots & \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{n1}}{d_{n1}} & \dots & \ln \frac{D_{nn}}{r_n} \end{bmatrix}, \quad (1.7)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, а $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад/с.

Составляющая $[\underline{\mathbf{Z}}_2]$ учитывает влияние земли как проводника электрического тока. Многие современные программные средства, используемые инженерами-электроэнергетиками, такие как EMTP, ATP, Simulink/Simscape Power Systems, вычисляют эту матрицу посредством аппроксимации интегральной зависимости, предложенной американским специалистом в области систем коммуникаций Дж. Р. Карсоном в 20-х гг. прошлого столетия [53, 54]:

$$[\underline{\mathbf{Z}}_2] = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \begin{bmatrix} J_{11} & \dots & J_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{n1} & \dots & J_{nn} \end{bmatrix}; \quad (1.8)$$

$$J_{ii} = \int_0^{\infty} \frac{e^{-2y_i\lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 1/\delta^2}} d\lambda; \quad (1.9)$$

$$J_{ij} = \int_0^{\infty} \frac{e^{-(y_i+y_j)\lambda} \cdot \cos(\lambda \cdot (x_i - x_j))}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 1/\delta^2}} d\lambda; \quad (1.10)$$

$$\delta = 1/\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_e}, \quad (1.11)$$

где σ_e – удельная проводимость грунта, См/м.

Альтернативой интегралу Карсона является методика, опубликованная в работах С. Gary, А. Deri, G. Tevan, А. Semlyen и А. Castanheira [55]. Идея

данного подхода заключается в применении метода зеркальных отображений, но каждый из двух проводников – реальный и «мнимый» – дополнительно удаляется от поверхности земли на величину p , называемую «комплексной глубиной возврата тока через землю»:

$$p = \sqrt{\frac{1}{j\omega\mu_0\mu_e(\sigma_e + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_e)}}, \quad (1.12)$$

где μ_e и ε_e – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости грунта соответственно.

Элементы матрицы $[\underline{\mathbf{Z}}_2]$ в данном случае вычисляются следующим образом:

$$[\underline{\mathbf{Z}}_2] = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{D'_{11}}{D_{11}} & \dots & \ln \frac{D'_{1n}}{D_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D'_{n1}}{D_{n1}} & \dots & \ln \frac{D'_{nn}}{D_{nn}} \end{bmatrix}, \quad (1.13)$$

где

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j + 2p)^2}. \quad (1.14)$$

В [10] отмечается, что учет влияния земли с помощью двух обозначенных подходов приводит практически к одинаковым численным результатам: максимальные различия достигают 9 % для частот в диапазоне от 100 Гц до 10 кГц и меньше для других частот. Собственные вычислительные эксперименты, отраженные в диссертационной работе, свидетельствуют об очень хорошем совпадении результатов, полученных по выражениям (1.8)–(1.11) и (1.12)–(1.14): максимальные погрешности и для активных, и для индуктивных сопротивлений составляют порядка 1–1,5 %, что доказывает применимость альтернативной интегралу Карсона методики.

Наконец, третье слагаемое матрицы сопротивлений $[\underline{\mathbf{Z}}_3]$ определяется по нижеприведенным сложным зависимостям с учетом конструкции провода.

Структура матрицы $[\underline{\mathbf{Z}}_3]$ в обоих случаях одинакова и предполагает наличие ненулевых элементов только на главной диагонали:

$$[\underline{\mathbf{Z}}_3] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \underline{Z}_{nn} \end{bmatrix}. \quad (1.15)$$

Для однородного проводника

$$\underline{Z}_{ii} = \frac{Z_w}{2\pi r_i} \cdot \frac{I_0(\gamma_i r_i)}{I_1(\gamma_i r_i)} \cdot \frac{1}{N}. \quad (1.16)$$

В выражении (1.16) $I_0(\gamma_i r_i)$ и $I_1(\gamma_i r_i)$ – модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков соответственно, а Z_w и γ_i – соответственно волновое сопротивление и постоянная распространения материала проводника, определяемые как

$$Z_w = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0\mu_c}{\sigma_c}}, \quad (1.17)$$

$$\gamma_c = \sqrt{j\omega\mu_0\mu_c\sigma_c}, \quad (1.18)$$

где μ_c – относительная магнитная проницаемость материала провода, а σ_c – удельная проводимость материала провода, См/м.

Для ВЛЭП обычно применяются сталеалюминиевые провода, и поэтому возникает вопрос о вычислении «внутреннего» сопротивления подобного проводника неоднородной структуры. Как отмечается в [10], сталеалюминиевые провода могут быть представлены как полые проводники, если влиянием стального сердечника можно пренебречь, что наиболее вероятно при четном количестве повивов из алюминиевых проволок. Подпрограммы вычисления параметров ВЛЭП, имеющиеся в АТР и Simulink/Simscape Power Systems, используют указанную аппроксимацию, т.е. представляют сталеалюминиевый провод как полый алюминиевый. В этом случае каждый ненулевой элемент матрицы $[\underline{\mathbf{Z}}_3]$ вычисляется по

следующему выражению [10]:

$$\underline{Z}_{ii} = \frac{\gamma_c}{2\pi r_{out} \sigma_c N} \cdot \frac{I_0(\gamma_c r_{out}) K_1(\gamma_c r_{in}) + K_0(\gamma_c r_{out}) I_1(\gamma_c r_{in})}{I_1(\gamma_c r_{out}) K_1(\gamma_c r_{in}) - I_1(\gamma_c r_{in}) K_1(\gamma_c r_{out})}, \quad (1.19)$$

где r_{in} и r_{out} – соответственно внутренний (определяемый сечением стального сердечника) и внешний радиусы провода; I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков соответственно; K_0 и K_1 – модифицированные функции Бесселя второго рода нулевого и первого порядков соответственно.

При наличии грозозащитных тросов и использовании приведенных выше выражений получим, что рассчитанные квадратные матрицы $[\underline{Z}]$ и $[\underline{Y}]$ содержат большее количество строк (и столбцов) по сравнению с числом фаз линии. Вместе с тем интерес обычно представляют лишь эквивалентные фазные величины [11]. Предположим, что в полной матрице сопротивлений элементы на главной диагонали, соответствующие собственным сопротивлениям контуров утечки тока через грозозащитные тросы, расположены последними. В этом случае можно записать следующую систему уравнений в матричном виде [11]:

$$\begin{bmatrix} -\left[\frac{d\dot{\mathbf{U}}_{phase}}{dx} \right] \\ [\mathbf{0}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\underline{\mathbf{Z}}_{phase}] & [\underline{\mathbf{Z}}_{ph-ground}] \\ [\underline{\mathbf{Z}}_{ground-ph}] & [\underline{\mathbf{Z}}_{ground}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{i}}_{phase}] \\ [\dot{\mathbf{i}}_{ground}] \end{bmatrix}, \quad (1.20)$$

где элементы подматрицы $[\underline{\mathbf{Z}}_{ground}]$ не содержат сопротивлений фазных проводов.

Задача заключается в нахождении эквивалентной матрицы сопротивлений $[\underline{\mathbf{Z}}_{phase, eq}]$, удовлетворяющей матричному уравнению

$$-\left[\frac{d\dot{\mathbf{U}}_{phase}}{dx} \right] = [\underline{\mathbf{Z}}_{phase, eq}] [\dot{\mathbf{i}}_{phase}], \quad (1.21)$$

и решается следующим образом [10, 11]:

$$\left[\underline{\mathbf{Z}}_{phase, eq} \right] = \left[\underline{\mathbf{Z}}_{phase} \right] - \left[\underline{\mathbf{Z}}_{ph-ground} \right] \left[\underline{\mathbf{Z}}_{ground} \right]^{-1} \left[\underline{\mathbf{Z}}_{ground-ph} \right]. \quad (1.22)$$

Аналогичное выражение позволяет найти эквивалентную матрицу потенциальных коэффициентов, инверсия которой равна эквивалентной матрице проводимостей ВЛЭП $\left[\underline{\mathbf{Y}}_{phase, eq} \right]$.

Следует отметить, что грозозащитные тросы учитываются в матрице сопротивлений только в том случае, если применяется их непрерывное (практически на каждой опоре) заземление. При наличии схемы с разрезанием троса и искровыми промежутками тросы никакого влияния на сопротивление линии не оказывают [9, 10]. Вместе с тем учет тросов при вычислении элементов матрицы проводимостей обязателен вне зависимости от схемы заземления.

После вычисления эквивалентных матриц параметров ВЛЭП $\left[\underline{\mathbf{Z}}_{phase, eq} \right]$ и $\left[\underline{\mathbf{Y}}_{phase, eq} \right]$ часто требуется определить параметры прямой и нулевой последовательностей. Для одноцепной трехфазной ВЛЭП матрицу симметричных составляющих сопротивлений $\left[\underline{\mathbf{Z}}_{symm} \right]$ (для проводимостей – аналогично) можно вычислить следующим образом [11]:

$$\left[\underline{\mathbf{Z}}_{symm} \right] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_0 & \underline{Z}_{0,1} & \underline{Z}_{0,2} \\ \underline{Z}_{1,0} & \underline{Z}_1 & \underline{Z}_{1,2} \\ \underline{Z}_{2,0} & \underline{Z}_{2,1} & \underline{Z}_2 \end{bmatrix} = \left[\underline{\mathbf{S}} \right]^{-1} \left[\underline{\mathbf{Z}}_{phase, eq} \right] \left[\underline{\mathbf{S}} \right], \quad (1.23)$$

где

$$\left[\underline{\mathbf{S}} \right] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

и

$$a = e^{j120^\circ}. \quad (1.25)$$

При этом для транспонированной линии все недиагональные элементы матрицы $\left[\underline{\mathbf{Z}}_{symm} \right]$, рассчитанной по (1.23), тождественно равны нулю.

Элементы на главной диагонали представляют собой искомые сопротивления нулевой, прямой и обратной последовательностей (последние две из перечисленных величин эквивалентны). Значения этих сопротивлений абсолютно одинаковы для транспонированной и нетранспонированной ВЛЭП, однако при отсутствии транспозиции проводов недиагональные элементы в матрице $[\underline{\mathbf{Z}}_{symm}]$ более не будут нулевыми, и по ним можно судить о степени несимметрии.

Аналогичные преобразования для двухцепной ВЛЭП выглядят следующим образом:

$$[\underline{\mathbf{Z}}_{symm}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{S}]^{-1} & [\mathbf{0}] \\ [\mathbf{0}] & [\mathbf{S}]^{-1} \end{bmatrix} [\underline{\mathbf{Z}}_{phase, eq}] \begin{bmatrix} [\mathbf{S}] & [\mathbf{0}] \\ [\mathbf{0}] & [\mathbf{S}] \end{bmatrix}, \quad (1.26)$$

$$[\underline{\mathbf{Z}}_{symm}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{0-I} & & & & & & & & \\ & \underline{Z}_{1-I} & & & & & & & \\ & & \underline{Z}_{1-I} & & & & & & \\ \underline{Z}_{0-I-II} & & & \underline{Z}_{0-II} & & & & & \\ & & & & \underline{Z}_{1-II} & & & & \\ & & & & & \underline{Z}_{1-II} & & & \\ & & & & & & \underline{Z}_{1-II} & & \end{bmatrix}, \quad (1.27)$$

где \underline{Z}_{0-I} и \underline{Z}_{1-I} – сопротивления соответственно нулевой и прямой последовательностей для первой цепи; \underline{Z}_{0-II} и \underline{Z}_{1-II} – сопротивления соответственно нулевой и прямой последовательностей для второй цепи; \underline{Z}_{0-I-II} – сопротивление взаимной индукции между цепями по токам нулевой последовательности. При этом структура матрицы $[\underline{\mathbf{Z}}_{symm}]$ (количество ненулевых элементов) определяется схемами транспозиции обеих цепей. Данный вопрос углубленно исследуется в [10, 11].

1.1.2 Сопоставление результатов вычисления параметров ВЛЭП. Приведенные выше выражения для расчета сопротивлений и проводимостей ВЛЭП используются при решении оптимизационной задачи в разработанных автором методах идентификации актуальных параметров

нетранспонированной ВЛЭП (главы 3 и 4). Для того чтобы убедиться, что все выражения корректно реализованы в программном коде, необходимо сопоставить результаты расчетов с соответствующими данными, полученными для той же конфигурации ВЛЭП с помощью ЕМТР-подобных программ или Simulink/Simscape Power Systems. Ниже представлены результаты подобной верификации для двух различных моделей ВЛЭП.

Параметры первой конфигурации – двухцепной ВЛЭП напряжением 500 кВ – приведены на рисунке А.1 и в таблице А.1 (Приложение А), а на рисунке А.2 изображена соответствующая модель линии, заданная в ATPDraw – графическом препроцессоре программы АТР. Все необходимые и известные характеристики проводников получены из технической документации, предоставленной специалистами Волго-Окского и Московского ПМЭС, а также на основании данных, имеющих в [56–59]. Матрицы сопротивлений и проводимостей в фазных координатах, а также соответствующие симметричные составляющие были рассчитаны как в MATLAB с использованием выражений (1.1)–(1.27), так и в АТР. Каждая пара полученных значений сравнивалась следующим образом:

$$\delta_i = 100 \cdot \frac{C_i - R_i}{R_i}, \quad (1.28)$$

где C_i – значение параметра, полученное в MATLAB; R_i – соответствующее значение, рассчитанное с помощью АТР и принятое за «эталонное»; δ_i – отличие двух величин в процентах.

В таблицах 1.1, 1.2 и 1.3 отражены процентные разности, вычисленные по (1.28), соответственно для действительных частей элементов эквивалентной матрицы фазных сопротивлений, мнимых частей элементов этой же матрицы и всех элементов матрицы проводимостей. В каждой из матриц-таблиц выделены максимальные по модулю величины. При этом учет влияния земли при расчете матрицы сопротивлений с помощью кода в MATLAB осуществлялся на основе выражений (1.8)–(1.11). В таблице 1.4 приведены значения сопротивлений и проводимостей отдельных

последовательностей. Анализируя данные, представленные в таблицах 1.1–1.4, можно сделать вывод об очень хорошем совпадении результатов расчета.

Таблица 1.1 – Матрица процентных разностей для действительных частей элементов матрицы [\underline{Z}]

Строки матрицы	Столбцы матрицы					
	1	2	3	4	5	6
1	-0,0068	-0,0034	0,0024	-0,0012	-0,0014	-0,0024
2	-0,0034	-0,0072	-0,0035	-0,0010	-0,0006	-0,0014
3	0,0024	-0,0035	-0,0066	-0,0052	-0,0010	-0,0012
4	-0,0012	-0,0010	-0,0052	-0,0066	-0,0035	0,0024
5	-0,0014	-0,0006	-0,0010	-0,0035	-0,0072	-0,0034
6	-0,0024	-0,0014	-0,0012	0,0024	-0,0034	-0,0068

Таблица 1.2 – Матрица процентных разностей для мнимых частей элементов матрицы [\underline{Z}]

Строки матрицы	Столбцы матрицы					
	1	2	3	4	5	6
1	0,0022	0,0035	-0,0072	-0,0045	-0,0074	-0,0071
2	0,0035	0,0031	0,0036	-0,0017	-0,0064	-0,0074
3	-0,0072	0,0036	0,0023	0,0066	-0,0017	-0,0045
4	-0,0045	-0,0017	0,0066	0,0023	0,0036	-0,0072
5	-0,0074	-0,0064	-0,0017	0,0036	0,0031	0,0035
6	-0,0071	-0,0074	-0,0045	-0,0072	0,0035	0,0022

Таблица 1.3 – Матрица процентных разностей для элементов матрицы [\underline{Y}]

Строки матрицы	Столбцы матрицы					
	1	2	3	4	5	6
1	-0,0031	0,0004	-0,0639	-0,0331	-0,0327	-0,0117
2	0,0004	-0,0045	0,0016	-0,0363	-0,0533	-0,0327
3	-0,0639	0,0016	-0,0034	0,0128	-0,0363	-0,0331
4	-0,0331	-0,0363	0,0128	-0,0034	0,0016	-0,0639
5	-0,0327	-0,0533	-0,0363	0,0016	-0,0045	0,0004
6	-0,0117	-0,0327	-0,0331	-0,0639	0,0004	-0,0031

Таблица 1.4 – Значения сопротивлений и проводимостей отдельных последовательностей

\underline{Z} , Ом/км:	\underline{Z}_1	\underline{Z}_0	\underline{Z}_0 , взаим.
Код в MATLAB:	0,0256 + 0,3018j	0,1764 + 0,6627j	0,1336 + 0,1899j
АТР:	0,0256 + 0,3018j	0,1764 + 0,6627j	0,1336 + 0,1899j
\underline{Y} , 10 ⁻⁵ См/км:	\underline{Y}_1	\underline{Y}_0	\underline{Y}_0 , взаим.
Код в MATLAB:	0,3813j	0,2663j	-0,0170j
АТР:	0,3814j	0,2663j	-0,0170j

В таблицы 1.5–1.7 сведены процентные разности значений сопротивлений, вычисленных с использованием различных методов учета влияния земли – по выражениям (1.8)–(1.11) и по (1.12)–(1.14). Во всех таблицах выделены максимальные по модулю величины. Сравнение, как и прежде, осуществлялось по (1.28); при этом в качестве «эталонных» параметров принимались сопротивления, вычисленные по (1.8)–(1.11) и сопоставленные с соответствующими данными, рассчитанными в АТР (таблицы 1.1, 1.2 и 1.4). Из анализа данных в таблицах 1.5–1.7 видно, что максимальные расхождения составляют 1,6 % для фазных величин и 1,1 % для составляющих отдельных последовательностей, причем в обоих случаях максимум достигается для сопротивления взаимной индукции между цепями.

Таблица 1.5 – Матрица процентных разностей для действительных частей элементов матрицы $[Z]$

Строки матрицы	Столбцы матрицы					
	1	2	3	4	5	6
1	0,5289	0,8214	0,8964	1,0918	1,2237	1,3667
2	0,8214	0,5522	0,8500	0,9958	1,1023	1,2237
3	0,8964	0,8500	0,5700	0,9224	0,9958	1,0918
4	1,0918	0,9958	0,9224	0,5700	0,8500	0,8964
5	1,2237	1,1023	0,9958	0,8500	0,5522	0,8214
6	1,3667	1,2237	1,0918	0,8964	0,8214	0,5289

Таблица 1.6 – Матрица процентных разностей для мнимых частей элементов матрицы $[Z]$

Строки матрицы	Столбцы матрицы					
	1	2	3	4	5	6
1	0,1973	0,5710	0,7963	1,1727	1,3984	1,6095
2	0,5710	0,1723	0,5369	0,9309	1,1672	1,3984
3	0,7963	0,5369	0,1633	0,6921	0,9309	1,1727
4	1,1727	0,9309	0,6921	0,1633	0,5369	0,7963
5	1,3984	1,1672	0,9309	0,5369	0,1723	0,5710
6	1,6095	1,3984	1,1727	0,7963	0,5710	0,1973

Таблица 1.7 – Процентные разности для симметричных составляющих сопротивлений

Комплексное сопротивление:	Z_1	Z_0	$Z_{0, \text{взаим.}}$
Действительная часть:	-0,0655	0,7204	1,1044
Мнимая часть:	0,0059	0,3394	1,1017

Параметры второй проанализированной конфигурации – американской одноцепной ВЛЭП напряжением 345 кВ – представлены на рисунке А.3 и в таблице А.2, а на рисунке А.4 приведена модель линии, заданная в ATPDraw. Данные о конфигурации ВЛЭП в целом и о характеристиках отдельных проводов получены из технической документации, предоставленной специалистами американской компании «АТС», а также посредством анализа дополнительных источников [60–63].

В таблице 1.8 отражены процентные разности, вычисленные по (1.28) для действительных и мнимых частей элементов эквивалентной матрицы фазных сопротивлений, а также для всех элементов матрицы проводимостей. Пронумерованные строки таблицы 1.8 соответствуют строкам матрицы сопротивлений или проводимостей, а пронумерованные столбцы таблицы 1.8 – столбцам соответствующей матрицы. В каждой из матриц процентных разностей, представленных в таблице 1.8, выделены максимальные по модулю величины. Учет влияния земли при расчете сопротивлений в MATLAB осуществлялся на базе (1.8)–(1.11). В таблице 1.9 приведены значения параметров прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП.

Таблица 1.8 – Матрицы процентных разностей для действительных частей элементов матрицы $[Z]$, мнимых частей элементов матрицы $[Z]$ и всех элементов матрицы $[Y]$

Действительная часть $[Z]$			Мнимая часть $[Z]$			Мнимая часть $[Y]$					
	1	2	3		1	2	3		1	2	3
1	-0,0039	0,0029	0,0091	1	0,0059	-0,0146	-0,0178	1	-0,0129	-0,0873	-0,1309
2	0,0029	-0,0019	0,0029	2	-0,0146	0,0090	-0,0146	2	-0,0873	-0,0203	-0,0873
3	0,0091	0,0029	-0,0039	3	-0,0178	-0,0146	0,0059	3	-0,1309	-0,0873	-0,0129

Таблица 1.9 – Значения сопротивлений и проводимостей отдельных последовательностей

	Z_1 , Ом/км	Z_0 , Ом/км	Y_1 , 10^{-5} См/км	Y_0 , 10^{-5} См/км
Код в MATLAB:	0,0301 + 0,3713j	0,3333 + 1,2635j	0,4454j	0,2850j
АТР:	0,0301 + 0,3712j	0,3333 + 1,2636j	0,4455j	0,2849j

Анализ данных в таблицах 1.8 и 1.9 свидетельствует о высокой степени совпадения результатов расчета, полученных с помощью АТР и

реализованного кода в MATLAB, использующего аппроксимацию интегральной зависимости, предложенной Карсоном, для учета влияния земли.

В таблицу 1.10 сведены процентные разности значений сопротивлений, вычисленных с использованием различных методов учета влияния земли – по выражениям (1.8)–(1.11) и по (1.12)–(1.14), а в таблице 1.11 сопоставлены сопротивления отдельных последовательностей. В обеих матрицах процентных разностей в таблице 1.10 и в последней строке таблицы 1.11 выделены максимальные по модулю величины. В качестве «эталонных» значений принимались сопротивления, вычисленные с использованием формул Карсона (1.8)–(1.11) и хорошо совпадающие с соответствующими данными, рассчитанными в АТР (таблицы 1.8 и 1.9). Из анализа результатов, отраженных в таблицах 1.10 и 1.11, видно, что максимальные отличия при вычислении $[Z]$ по двум методикам составляют для данной ВЛЭП немногим более 1,5 %.

Таблица 1.10 – Матрицы процентных разностей отдельно для действительных частей элементов матрицы $[Z]$ и мнимых частей элементов матрицы $[Z]$

Действительная часть $[Z]$			Мнимая часть $[Z]$				
	1	2	3		1	2	3
1	1,3478	1,7520	1,7771	1	0,6183	1,3094	1,5683
2	1,7520	1,3497	1,7520	2	1,3094	0,6143	1,3094
3	1,7771	1,7520	1,3478	3	1,5683	1,3094	0,6183

Таблица 1.11 – Сопоставление сопротивлений прямой и нулевой последовательностей

Сопротивление, Ом/км:	R_1	X_1	R_0	X_0
Учет влияния земли по (1.8)–(1.11):	0,0301	0,3713	0,3333	1,2635
Учет влияния земли по (1.12)–(1.14):	0,0301	0,3713	0,3387	1,2759
Разность в процентах:	-0,0336	0,0011	1,5982	0,9789

По результатам проведенных вычислительных экспериментов можно заключить следующее.

1. Все расчетные выражения (1.1)–(1.27) для вычисления параметров ВЛЭП традиционным способом корректно реализованы автором в

программном коде на языке MATLAB. Программное обеспечение ATP использует методику учета влияния земли, предложенную Карсоном [11], поэтому реализованный в MATLAB алгоритм на основе выражений (1.8)–(1.11) обеспечивает результаты, максимально близкие к аналогичным данным, полученным с помощью ATP (следует отметить, что столь же высокая точность достигается и при использовании Simulink/Simscapе Power Systems в качестве инструмента верификации).

2. При использовании альтернативной интегралу Карсона методики учета влияния земли, опирающейся на выражения (1.12)–(1.14), получаются значения сопротивлений, достаточно близкие к соответствующим величинам, рассчитанным с помощью (1.8)–(1.11). Максимально достигнутые расхождения для рассмотренных выше конфигураций ВЛЭП составляют немногим более 1,5 % (как для фазных сопротивлений, так и для симметричных составляющих). Таким образом, альтернативная методика, предложенная С. Gary, А. Dегі и др., обеспечивает достаточно хорошее совпадение результатов со значениями сопротивлений, полученными по методу Карсона (что согласуется с данными [10]), и может использоваться для расчета матрицы сопротивлений ВЛЭП, в т.ч. при идентификации актуальных параметров ВЛЭП.

1.2 Выявление основных факторов, влияющих на вариации параметров ВЛЭП, и возможных диапазонов изменения параметров

1.2.1 **Анализ факторов, оказывающих наибольшее влияние на значения параметров ВЛЭП.** Анализ выражений (1.1)–(1.27) свидетельствует о том, что параметры ВЛЭП – комплексные сопротивления и проводимости – зависят от множества различных факторов. При этом степень влияния отдельных геометрических характеристик и физических свойств системы проводников (включающей и контур возврата тока через землю) на конкретные численные значения параметров ВЛЭП не очевидна.

Вместе с тем в главе 4 автором предлагается метод определения фактических параметров линии, основанный 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 те, влиянием которых пренебречь нельзя.

Для решения поставленной задачи ниже рассматривается 11 различных сценариев, в каждом из которых оценивается влияние отдельной характеристики системы проводников ВЛЭП. 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»). Затем рассчитываются новые сопротивления и проводимости ВЛЭП отдельных последовательностей, а также – с использованием выражения (1.28) – процентные отличия этих новых параметров (C_i) от соответствующих «базовых» (R_i). При вариации всех характеристик системы проводников и анализе их влияния учтены возможные реальные диапазоны изменения этих характеристик.

В качестве объекта исследования выбрана модель двухцепной ВЛЭП напряжением 500 кВ, конфигурация которой представлена на рисунке А.1, а «базовые» значения всех характеристик – в таблице А.1 (Приложение А). Соответствующие «базовые» значения сопротивлений и проводимостей отдельных последовательностей сведены в таблицу 1.12. Учет влияния земли – как при расчете «базовых» параметров линии, так и при выполнении дальнейших вычислительных экспериментов – выполнялся с использованием выражений (1.12)–(1.14).

Таблица 1.12 – «Базовые» значения параметров ВЛЭП отдельных последовательностей

№	Параметр	Символ	Значение
1	Активное сопротивление прямой последовательности	R_1	0,0256 Ом/км

№	Параметр	Символ	Значение
2	Активное сопротивление нулевой последовательности	R_0	0,1776 Ом/км
3	Сопротивление взаимоиנדукции между двумя цепями (действительная часть)*	R_m	0,1351 Ом/км
4	Индуктивное сопротивление прямой последовательности	X_1	0,3018 Ом/км
5	Индуктивное сопротивление нулевой последовательности	X_0	0,665 Ом/км
6	Сопротивление взаимоиנדукции между двумя цепями (мнимая часть)	X_m	0,192 Ом/км
7	Емкостная проводимость прямой последовательности	B_1	$0,3813 \cdot 10^{-5}$ См/км
8	Емкостная проводимость нулевой последовательности	B_0	$0,2663 \cdot 10^{-5}$ См/км
9	Взаимная емкостная проводимость между двумя цепями	B_m	$-0,017 \cdot 10^{-5}$ См/км

ПРИМЕЧАНИЕ. * Присутствие действительной части в сопротивлении взаимоиנדукции между двумя цепями объясняется в [10].

Сценарий 1. В эксперименте несколько изменяется горизонтальное расположение фазных проводов: центральная расщепленная «фаза» каждой из двух параллельных цепей (рисунок А.1) остается на месте, тогда как крайние «фазы» одновременно приближаются к центру или удаляются от него, сохраняя симметрию расположения проводов. Результаты моделирования представлены на рисунках 1.2 и 1.3: по горизонтальной оси обозначено положение левой «фазы» в каждой из двух цепей относительно ее исходной позиции, а по вертикальной оси отложены процентные отличия параметров ВЛЭП от соответствующих «базовых» значений (таблица 1.12), рассчитанные по (1.28).

Из рисунков 1.2 и 1.3 очевидно, что активные сопротивления наименее зависимы от горизонтального расположения фазных проводов. Наибольшая же зависимость проявляется для взаимной емкостной проводимости между двумя цепями B_m . Это во многом объясняется тем, что абсолютное значение B_m очень мало; оно на порядок меньше значений B_1 и B_0 (таблица 1.12). Анализируя ситуацию в целом, отметим, что, несмотря на достаточно широкий диапазон рассмотренных позиций фазных проводов, на практике расстояния между проводами по горизонтали в среднем по ВЛЭП должны

быть известны с достаточно высокой точностью, если на большей части трассы ВЛЭП применяется одна и та же типовая опора, что обычно выполняется. В таком случае, как видно из рисунков 1.2 и 1.3, незначительные вариации в расстояниях между фазными проводами не влияют существенным образом на все параметры ВЛЭП, за исключением B_m . Если ограничить эти вариации в диапазоне $\pm 0,5$ м, восемь из девяти параметров линии будут находиться в пределах $\pm 1\%$ относительно соответствующих значений «по умолчанию» (таблица 1.12), что отмечено пунктирными прямоугольниками на рисунках 1.2 и 1.3.

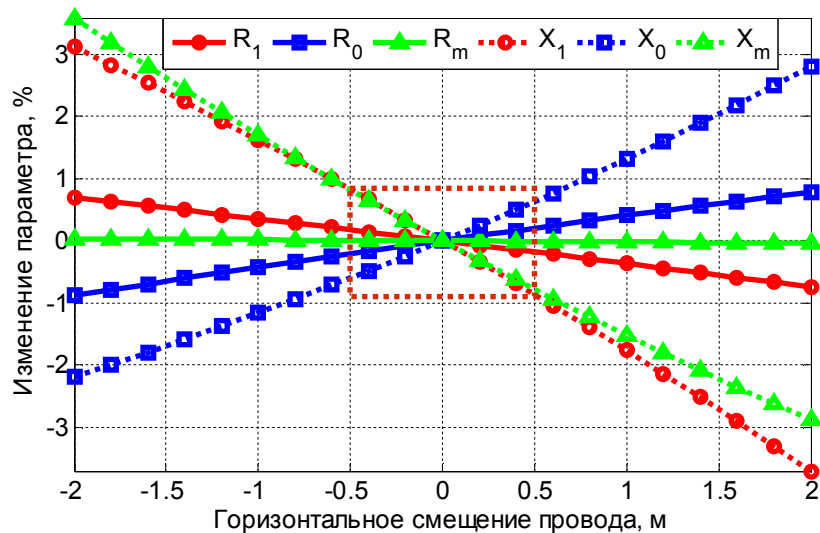


Рисунок 1.2 – Влияние горизонтального расположения фазных проводов на $[Z]$

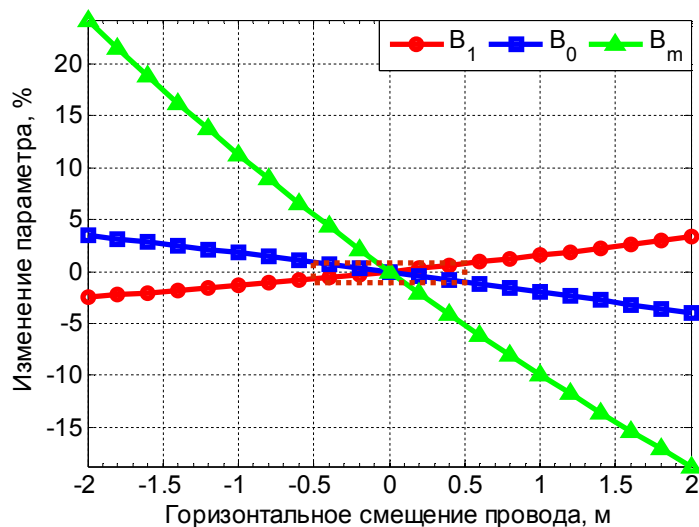


Рисунок 1.3 – Влияние горизонтального расположения фазных проводов на $[Y]$

Сценарий 2. В данном сценарии все фазные провода остаются на своих позициях, а грозозащитные тросы в каждой паре (в каждой из двух цепей ВЛЭП) сближаются или удаляются друг от друга, сохраняя при этом симметрию (рисунок А.1). В отличие от предыдущего эксперимента, данные манипуляции не приводят к сколь-либо значимым изменениям параметров ВЛЭП. Из таблицы 1.13 следует, что даже при смещении каждого из тросов на расстояние, несколько большее 1 м, вариации всех параметров ВЛЭП находятся в пределах 1 % (соответствующие строки данных выделены в таблице 1.13). Следовательно, при определении параметров ВЛЭП можно пренебречь влиянием некоторых неточностей в оценке расположения тросов.

Таблица 1.13 – Влияние горизонтального расположения грозозащитных тросов

Смещение троса, м	δR_1 , %	δR_0 , %	δR_m , %	δX_1 , %	δX_0 , %	δX_m , %	δB_1 , %	δB_0 , %	δB_m , %
-2	0,79	0,11	0,68	-0,09	0,17	-0,22	0,09	-0,27	-1,29
-1,6	0,64	0,12	0,57	-0,07	0,11	-0,24	0,07	-0,21	-1,06
-1,2	0,48	0,11	0,44	-0,05	0,07	-0,22	0,05	-0,15	-0,81
-0,8	0,33	0,09	0,31	-0,03	0,04	-0,18	0,04	-0,09	-0,55
-0,6	0,24	0,08	0,23	-0,03	0,02	-0,15	0,03	-0,07	-0,42
-0,4	0,16	0,06	0,16	-0,02	0,01	-0,11	0,02	-0,04	-0,28
-0,2	0,08	0,03	0,08	-0,01	0,00	-0,06	0,01	-0,02	-0,14
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	-0,08	-0,03	-0,08	0,01	0,00	0,07	-0,01	0,02	0,14
0,4	-0,16	-0,07	-0,17	0,02	0,00	0,14	-0,02	0,04	0,29
0,6	-0,25	-0,12	-0,26	0,03	0,00	0,22	-0,03	0,05	0,44
0,8	-0,33	-0,17	-0,35	0,03	0,01	0,31	-0,03	0,07	0,59
1,2	-0,49	-0,28	-0,55	0,05	0,04	0,53	-0,05	0,09	0,90
1,6	-0,65	-0,42	-0,76	0,07	0,08	0,78	-0,07	0,11	1,23
2	-0,81	-0,58	-0,99	0,08	0,13	1,07	-0,08	0,12	1,56

Сценарий 3. Данный эксперимент является комбинацией двух предыдущих. Только лишь центральная «фаза» в каждой из двух цепей ВЛЭП (рисунок А.1) остается на месте, а остальные провода симметрично приближаются к оси симметрии или удаляются от нее точно таким же образом, как и в двух предыдущих экспериментах. Эффект от подобных модификаций аналогичен выявленному в первом сценарии (в котором грозозащитные тросы оставались на своих местах). Таким образом,

горизонтальное расположение фазных проводов является гораздо более существенным фактором (по сравнению с расположением грозозащитных тросов) при вычислении элементов матриц сопротивлений и проводимостей.

Сценарий 4. В данном случае изменяются высоты расположения проводов ВЛЭП. Средняя высота подвеса провода над поверхностью земли обычно аппроксимируется следующей формулой [10]:

$$H = H_{mid} + \frac{1}{3} \cdot S, \quad (1.29)$$

где H – высота расположения провода (в среднем); H_{mid} – высота его расположения на середине пролета; S – стрела провеса, определяемая как разность между высотой подвеса провода на опоре и его высотой на середине пролета.

Стрела провеса зависит как от температуры окружающей среды (ТОС), так и от степени загрузки ВЛЭП. Как отмечено выше, в каждом сценарии варьируемым является лишь один параметр, поэтому ТОС можно принять приблизительно равной 20°C (таблица А.1), поскольку дополнительным нагревом проводов от тока в данном эксперименте можно пренебречь: ориентировочные расчеты показывают, что потребуется ток не менее 900 А, чтобы дополнительно нагреть фазный провод на 6°C , учитывая наличие трех проводников в каждой фазе (рисунок А.1). Таким образом, стрела провеса при предполагаемой ТОС, равной 20°C , будет главным образом зависеть от степени тяжения провода.

Для выяснения влияния стрелы провеса на вариации значений параметров ВЛЭП предположим, что высота фазного провода на середине пролета H_{mid} может находиться в диапазоне от 12 до 19 м. Минимальное удаление проводов от поверхности земли для данной ВЛЭП – никак не менее 9 м; при этом высота расположения «фазы» на опоре может быть принята равной 22 м. Трехметровая «отстройка» от верхней и нижней границ необходима для учета вариаций стрелы провеса в зависимости от ТОС, а также с целью исключения заведомо нереалистичных предположений.

Стрела провеса грозозащитного троса принята равной половине соответствующей величины для фазного провода, поскольку степень растяжения стальных проволок в сталеалюминиевых проводах приблизительно вдвое меньше по сравнению с алюминиевыми проволоками [13], а отношение сечений стальной и алюминиевой частей существенно выше для грозозащитного троса.

Результаты моделирования представлены на рисунках 1.4 и 1.5. Отметим, что «базовая» геометрия соответствует средней высоте положения фазного провода, равной 16 м (см. также таблицу А.1).

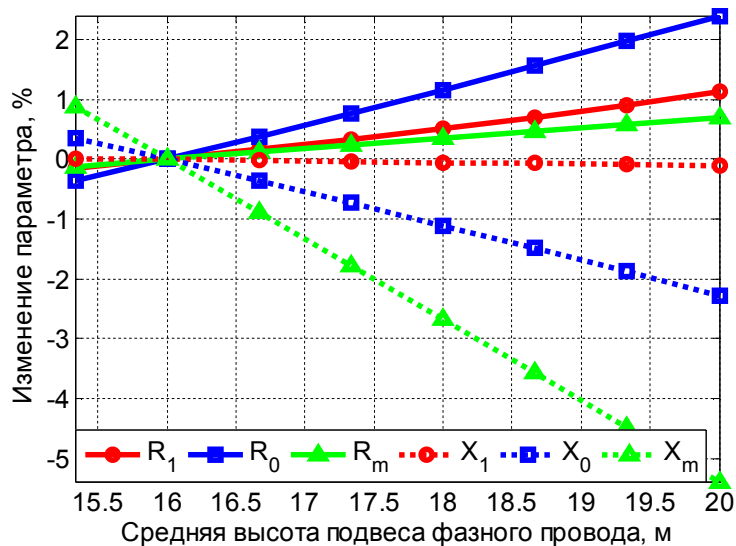


Рисунок 1.4 – Влияние вертикального расположения проводов на [Z]

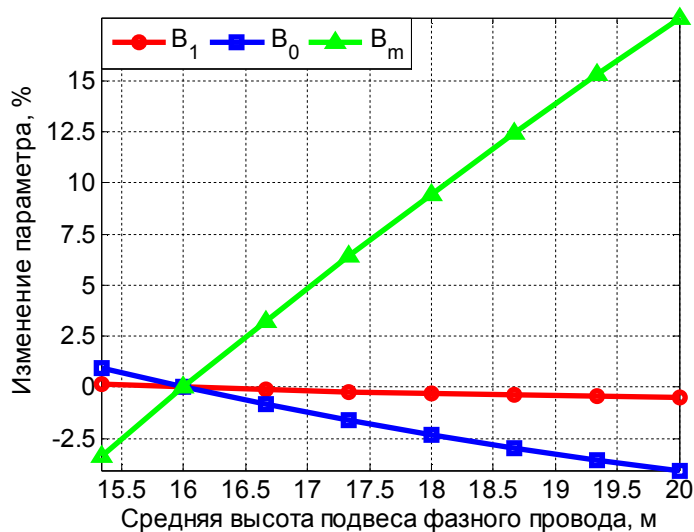


Рисунок 1.5 – Влияние вертикального расположения проводов на [Y]

Из рисунков 1.4 и 1.5 очевидно, что изменения большинства параметров ВЛЭП не являются пренебрежимо малыми. Кроме того, в отличие от ситуации с горизонтальным расположением проводов, маловероятно, что средние высоты их подвеса могут быть известны с достаточной точностью. Поэтому вертикальная геометрия является существенным фактором при вычислении элементов матриц $[Z]$ и $[Y]$.

Сценарий 5. В эксперименте варьируются радиусы фазных проводов и грозозащитных тросов с целью моделирования возможных неточностей их задания и оценки влияния подобных неточностей на значения параметров линии. Рассматриваемый диапазон изменений всех радиусов составляет $\pm 5\%$ от соответствующих «базовых» величин (таблица А.1), одновременно умножаемых на один и тот же коэффициент. Отметим, что при каждом новом изменении радиусов пересчитывается и удельное сопротивление материала проводов постоянному току, поскольку «погонные» сопротивления в Ом/км, указанные в примечании к таблице А.1, не изменяются.

Результаты эксперимента отражены на рисунках 1.6 и 1.7. Из анализа построенных графиков следует, что вариации всех параметров ВЛЭП составляют лишь доли процента, поэтому ими можно пренебречь.

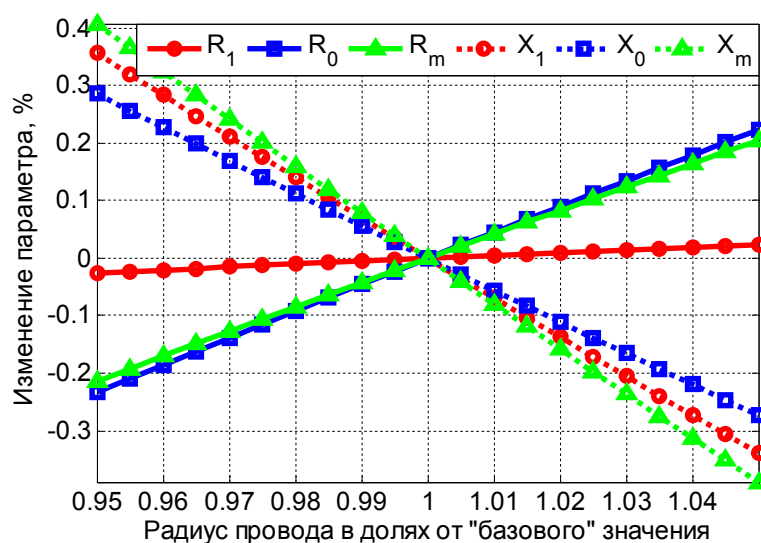


Рисунок 1.6 – Влияние неточностей в задании радиусов проводов на $[Z]$

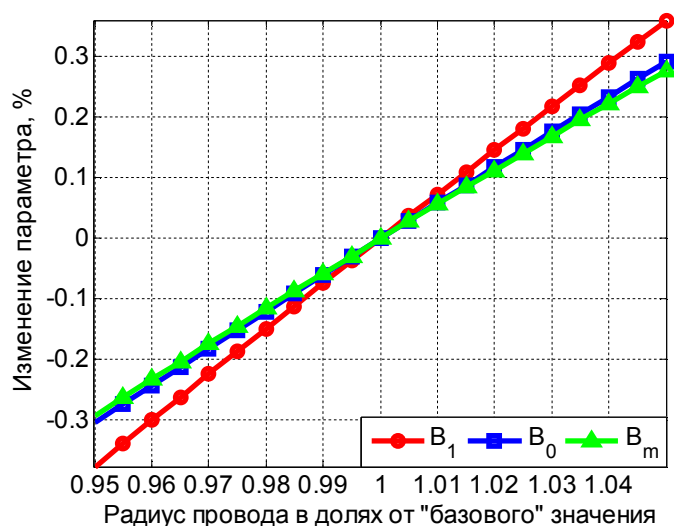


Рисунок 1.7 – Влияние неточностей в задании радиусов проводов на $[Y]$

Интересным представляется также изменять только внутренние радиусы, определяемые стальной частью провода, поскольку их значения не всегда присутствуют в технической документации. Вариации сопротивлений в подобном случае существенно меньше приведенных на рисунке 1.6, а значения емкостных проводимостей не изменяются.

Сценарий 6. В данном эксперименте нас интересует влияние величины удельного сопротивления постоянному току материала провода на значения сопротивлений ВЛЭП прямой и нулевой последовательностей. Несмотря на потенциально большой диапазон сезонных изменений температуры на территории Российской Федерации, лимитирующим фактором в данном сценарии является заданное значение удельного сопротивления грунта, равное 100 Ом·м (таблица А.1). Графические данные, представленные на рисунке 11.29 в [64], позволяют сделать вывод о том, что, в зависимости от степени влажности почвы, величина в 100 Ом·м может соответствовать различным температурам, образуя диапазон как минимум в 15 градусов. Необходимо также учесть дополнительный нагрев фазных проводов от протекающих по ним токов. Исходя из сказанного, для расчетов выбран температурный диапазон от -5°C до $+25^{\circ}\text{C}$. Результаты представлены на рисунке 1.8.

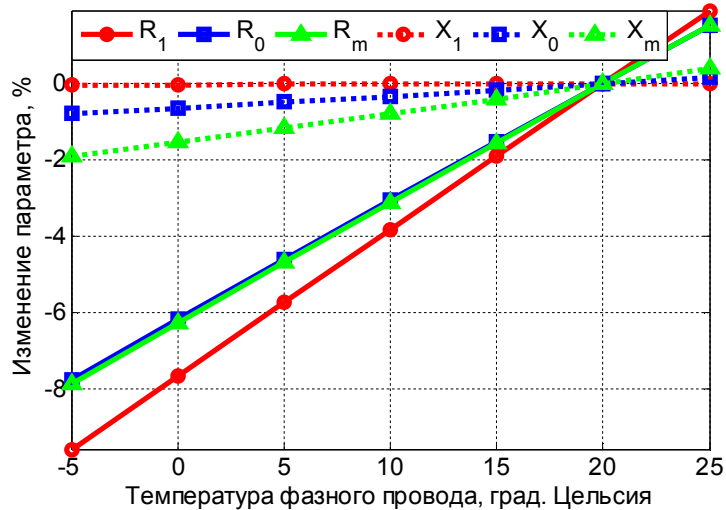


Рисунок 1.8 – Влияние температуры фазных проводов ВЛЭП на $[Z]$

Температурный эффект главным образом проявляется в отношении активных сопротивлений, что ожидаемо. Элементы матрицы емкостных проводимостей $[B]$ от температуры не зависят (по крайней мере – для анализируемого диапазона температур). В целом же можно заключить, что удельные сопротивления материала проводов оказывают существенное влияние на значения параметров ВЛЭП.

Сценарий 7. В данном сценарии рассматривается влияние значения удельной проводимости грунта. По регламенту выполнения экспериментов остальные характеристики системы проводников соответствуют «базовым», поэтому температура фазного провода равна 20°C (таблица А.1), а ТОС можно принять равной этому же значению. Анализируя вновь рисунок 11.29 в [64], представляется целесообразным рассмотреть диапазон удельного сопротивления земли от 10 до 100 Ом·м. Как видно из рисунка 1.9, наиболее существенные вариации в зависимости от состояния грунта претерпевают сопротивление нулевой последовательности каждой из двух цепей ВЛЭП, а также сопротивление взаимной индукции между цепями. Изменения этих параметров никоим образом нельзя считать пренебрежимо малыми. Емкостные проводимости ВЛЭП не являются функцией удельного сопротивления грунта.

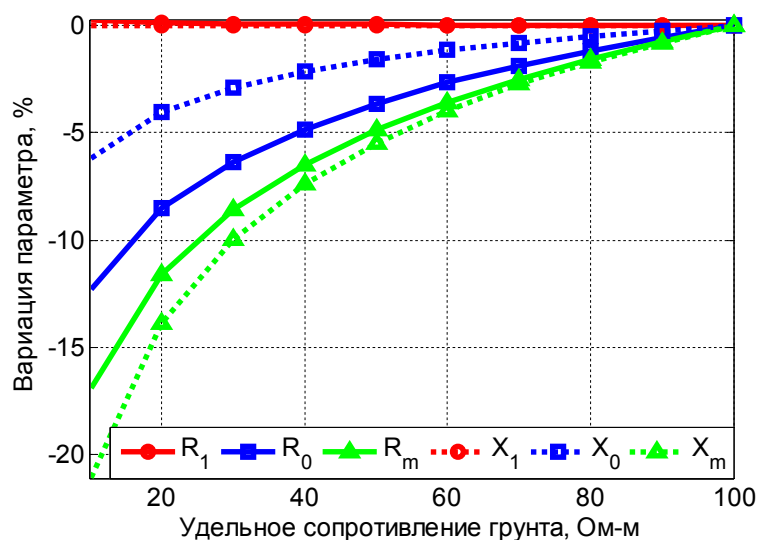


Рисунок 1.9 – Влияние удельного сопротивления грунта по трассе ВЛЭП на $[Z]$

Сценарий 8. В этом эксперименте анализируется зависимость параметров ВЛЭП от относительной диэлектрической проницаемости грунта. Принятое нами значение «по умолчанию», отраженное в таблице А.1, равно 10. Как указано в [64], для реальных почв значение «эпсилон» может находиться в диапазоне от 2 до 20. Несмотря на это, в проводимом эксперименте рассматривается существенно более широкий диапазон значений диэлектрической проницаемости – от 1 до 1000. В полученном массиве сопротивлений ВЛЭП максимальные значения отличаются от минимальных лишь на тысячные доли процента. Емкостные проводимости ВЛЭП от «эпсилон» грунта не зависят. Таким образом, влиянием неизвестного значения диэлектрической проницаемости земли можно полностью пренебречь при вычислении матриц параметров ВЛЭП.

Сценарий 9. Рассмотрим теперь влияние относительной магнитной проницаемости грунта. Как и в предыдущем эксперименте, величина «мю» варьируется нами от 1 до 1000. Результаты приведены на рисунке 1.10 с использованием логарифмического масштаба по оси абсцисс. Очевидно, что с теоретической точки зрения значение магнитной проницаемости грунта существенно влияет на $[Z]$ и $[Y]$. Однако осадочные породы (такие как песчаники, глины, известняки и т.д.) практически немагнитны [64]. Это

обстоятельство позволяет нам не учитывать зависимости, представленные на рисунке 1.10, и при практическом вычислении параметров ВЛЭП принимать значение «мю» грунта, равное 1.

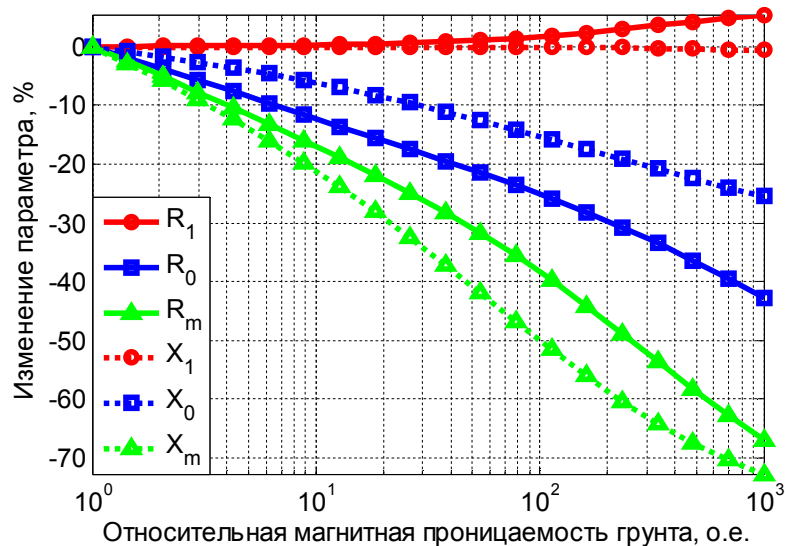


Рисунок 1.10 – Влияние значения «мю» грунта по трассе ВЛЭП на $[Z]$

Сценарий 10. Предположим теперь, что значение относительной магнитной проницаемости провода не известно с достаточной точностью. Зависимости, изображенные на рисунке 1.11, получены посредством изменения этого параметра от 1 до 1000.

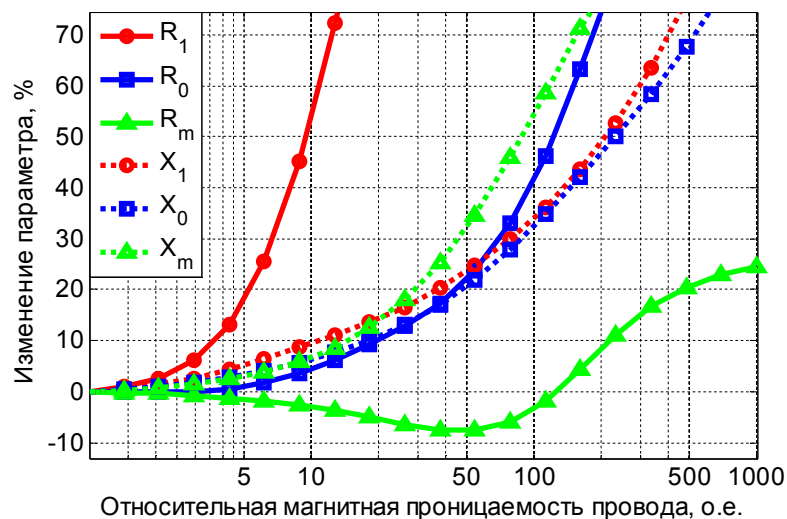


Рисунок 1.11 – Влияние значения «мю» проводов ВЛЭП на $[Z]$

Из рисунка 1.11 следует, что сопротивления ВЛЭП существенным образом зависят от значения «мю» фазных проводов и грозозащитных тросов. Поиск данных, в которых указывалось бы значение магнитной проницаемости для сталеалюминиевых проводов, сопряжен со значительными трудностями. Известно, что «мю» стали может существенно превышать единицу. В то же время влиянием стального сердечника можно пренебречь при четном количестве повивов из алюминиевых проволок [10]. Более того, выполненные автором вычислительные эксперименты с проводами «ACSR 54/7 Cardinal», некоторые характеристики которых представлены в таблице А.2, показали высокую степень совпадения вычисленных активных и индуктивных сопротивлений с соответствующими справочными данными. При этом проводники марки «ACSR 54/7 Cardinal» имеют три алюминиевых повива. Результаты данного анализа позволяют сделать вывод о целесообразности принятия допущения о немагнитном характере проводов с несколькими повивами из алюминия. Отметим, что в программном обеспечении ATP/ATPDraw отсутствует возможность задания величины «мю» провода, отличной от единицы¹ [11].

Вместе с тем в [65] рекомендуется принимать значение относительной магнитной проницаемости в диапазоне от 5 до 10 для сталеалюминиевых проводов с одним повивом из алюминия. Поскольку грозозащитный трос «АСУС-70/72» в нашей модели ВЛЭП имеет один повив из алюминиевых проволок [57], был выполнен дополнительный вычислительный эксперимент, в котором изменялась только магнитная проницаемость грозозащитных тросов. Результаты моделирования, представленные на рисунке 1.12, убеждают, что наличие информации о приблизительном значении «мю» троса может заметно повысить точность определения сопротивлений ВЛЭП.

¹ Данная возможность присутствует в Simulink/Simscape Power Systems [52], однако в этом программном обеспечении отсутствует опция задания схемы с разрезанием троса и искровыми промежутками, поэтому использование собственного кода в MATLAB, реализующего выражения (1.1)–(1.27), добавляет функциональность исследованиям, осуществляемым в диссертационной работе.

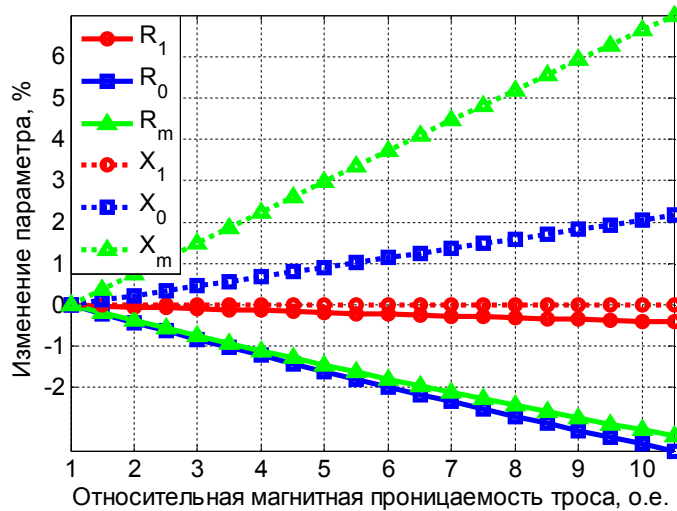


Рисунок 1.12 – Влияние значения «мю» грозозащитных тросов ВЛЭП на $[Z]$

Сценарий 11. В данном заключительном сценарии анализируется влияние на параметры ВЛЭП отклонений частоты от номинального значения. В ходе эксперимента частота варьировалась между 45 и 55 Гц, однако по оси абсцисс на рисунках 1.13 и 1.14 отложен диапазон $50 \pm 0,4$ Гц, поскольку в синхронизированных системах электроснабжения не допускается отклонение частоты свыше 0,4 Гц [66]. На практике девиации частоты в ЭЭС существенно меньше этого порогового значения, что, как следует из рисунков 1.13 и 1.14, позволяет пренебречь частотной зависимостью элементов матриц $[Z]$ и $[Y]$.

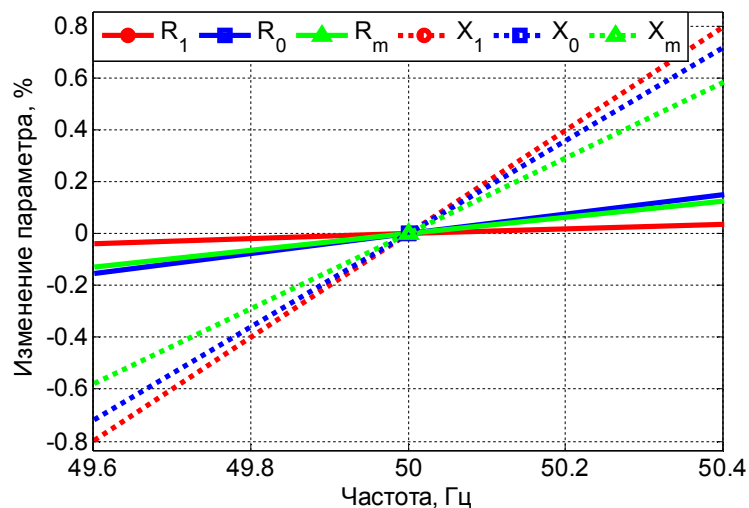


Рисунок 1.13 – Влияние фактического значения частоты в ЭЭС на $[Z]$

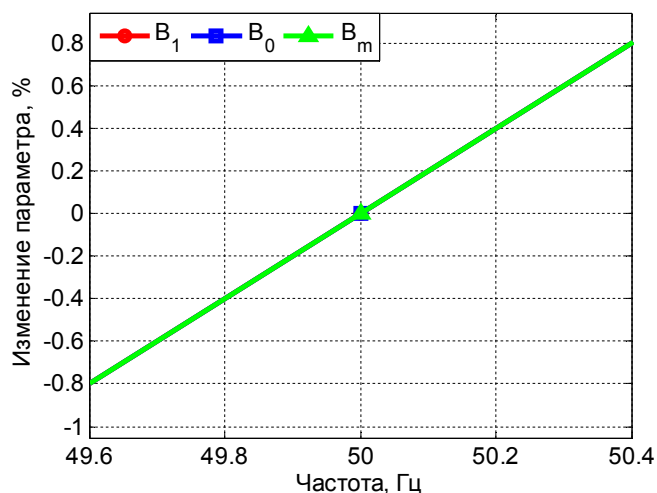


Рисунок 1.14 – Влияние фактического значения частоты в ЭЭС на [Y]

Выводы. Результаты вычислительных экспериментов позволяют идентифицировать совокупность факторов, влияние которых нельзя считать пренебрежимым при вычислении значений сопротивлений и проводимостей ВЛЭП на промышленной частоте. Эти факторы следующие:

- средняя высота подвеса фазного провода (с учетом стрелы провеса);
- средняя высота подвеса грозозащитного троса (с учетом стрелы провеса);
- удельная проводимость грунта;
- удельное сопротивление постоянному току материала проводов ВЛЭП;
- относительная магнитная проницаемость грозозащитного троса, если трос стальной либо сталеалюминиевый с одним повивом из алюминиевых проволок.

Таким образом, выявлены основные переменные, образующие многомерное пространство, каждой «точке» которого соответствуют определенные значения сопротивлений и проводимостей линии. Полученные результаты можно обобщить и на случай одноцепной ВЛЭП, в частности, американской ВЛЭП напряжением 345 кВ (рисунок А.3, таблица А.2),

модель которой использовалась при решении многих задач диссертационного исследования.

1.2.2 Анализ возможных вариаций сопротивлений и проводимостей ВЛЭП. Идентифицировав факторы, изменения каждого из которых в отдельности существенно сказываются на значениях сопротивлений и проводимостей ВЛЭП, целесообразно рассмотреть совокупное влияние этих факторов. Во многих работах, посвященных определению актуальных параметров ВЛЭП, отмечается, что параметры 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 [7, 16-18] (прежде всего, в [16]), 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 не зависимыми друг от друга. Поэтому было бы ошибочным генерировать произвольный вектор значений этих характеристик, если для каждой из них задать индивидуальный (но при этом постоянный) диапазон возможных принимаемых величин. Следовательно, необходимо рассмотреть несколько различных режимов ВЛЭП, задавая для каждого свои диапазоны значений указанных выше характеристик, описывающих геометрию и физические свойства системы проводников. Для анализа будем использовать ту же модель двухцепной ВЛЭП напряжением 500 кВ с параметрами, отраженными на рисунке А.1 и в таблице А.1 (Приложение А). Вычисления сопротивлений ВЛЭП выполним с привлечением выражений (1.12)–(1.14) для учета влияния земли.

Для того чтобы результаты осуществляемых экспериментов оказались достаточно достоверными, необходимо внимательно проанализировать не только возможные диапазоны изменения варьируемых характеристик линии, но и законы их изменения, а также корреляцию с различными влияющими факторами. Так, все без исключения выявленные в предыдущем разделе характеристики, наибольшим образом влияющие на параметры ВЛЭП, зависят от ТОС; удельные сопротивления материала фазных проводов и грозозащитных тросов, а также величина стрелы провеса являются функцией не только ТОС, но и протекающего по ВЛЭП тока.

Удельное сопротивление грунта крайне нелинейно зависит от температуры и процентного содержания влаги [64]. При этом, как следует из рисунка 11.29 в [64], крутизна графика зависимости сопротивления от температуры существенно варьируется, и зависимость имеет более пологий характер в области «плюсовых» температур. Кроме того, в районе «нуля» градусов имеется «скачок», связанный с переходом влаги, содержащейся в почве, из одного агрегатного состояния в другое [64, 67]. Указанные обстоятельства приводят к необходимости разделить принятый к рассмотрению температурный диапазон от -30°C до $+30^{\circ}\text{C}$ на множество участков (таблица 1.14). Выбор границ отдельных температурных интервалов и соответствующих значений удельного сопротивления грунта осуществлен на основе зависимостей, отраженных на рисунках 11.28 и 11.29 в [64]. Общий диапазон значений сопротивления – от 20 до 500 Ом·м – продиктован анализом данных для характерных типов почв (суглинок, глина, чернозем, глинистый песок), представленных в [64, 68, 69].

Зависимость удельного сопротивления постоянному току материала провода от температуры обычно с достаточной точностью аппроксимируется линейной функцией [26]

$$\rho_{T_1} = \rho_{T_0} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_1 - T_0)], \quad (1.30)$$

где ρ_{T_0} и ρ_{T_1} – соответственно удельные сопротивления (в Ом·м) провода

при температурах T_0 и T_1 ; α – температурный коэффициент сопротивления, принимаемый в наших экспериментах равным $0,004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$. «Базовая» температура T_0 в нашем случае составляет 20°C , а соответствующие значения ρ_{T_0} для фазных проводов и грозозащитных тросов приведены в таблице А.1.

Таблица 1.14 – Рассмотренные режимы двухцепной ВЛЭП напряжением 500 кВ, определяющие вариацию параметров ВЛЭП

№ режима	Общая характеристика режима	Диапазон ТОС	Диапазон значений удельного сопротивления грунта	Значение температуры фазного провода
1	Очень холодно; малая нагрузка ВЛЭП	от -30°C до -15°C	400..500 Ом·м	ТОС
2	Очень холодно; большая нагрузка ВЛЭП	от -30°C до -15°C	400..500 Ом·м	ТОС + $(10\div 15)^\circ\text{C}$
3	Достаточно холодно; малая нагрузка ВЛЭП	от -10°C до -5°C	230..450 Ом·м	ТОС
4	Достаточно холодно; большая нагрузка ВЛЭП	от -10°C до -5°C	230..450 Ом·м	ТОС + $(10\div 15)^\circ\text{C}$
5	Немного меньше «нуля»; малая нагрузка ВЛЭП	от -5°C до 0°C	100..170 Ом·м	ТОС
6	Немного меньше «нуля»; большая нагрузка ВЛЭП	от -5°C до 0°C	100..170 Ом·м	ТОС + $(10\div 15)^\circ\text{C}$
7	Немного больше «нуля»; малая нагрузка ВЛЭП	от 0°C до $+5^\circ\text{C}$	50..130 Ом·м	ТОС
8	Немного больше «нуля»; большая нагрузка ВЛЭП	от 0°C до $+5^\circ\text{C}$	50..130 Ом·м	ТОС + $(10\div 15)^\circ\text{C}$
9	Тепло или жарко; малая нагрузка ВЛЭП	от $+5^\circ\text{C}$ до $+30^\circ\text{C}$	20..50 Ом·м	ТОС
10	Тепло или жарко; большая нагрузка ВЛЭП	от $+5^\circ\text{C}$ до $+30^\circ\text{C}$	20..50 Ом·м	ТОС + $(10\div 15)^\circ\text{C}$
11	Холодно, налипание снега на проводах*; малая нагрузка ВЛЭП	от -5°C до 0°C	100..170 Ом·м	ТОС

ПРИМЕЧАНИЕ. * В этом случае учитываем дополнительный провес всех проводов, выбираемый из диапазона $(0,5\div 1)$ м.

Анализ зависимостей, представленных в [70], позволяет сделать вывод о том, что в отношении величины стрелы провеса провода также допустима линейная аппроксимация в функции температуры. При этом, обобщая графические данные из [70, 71], можно считать, что провес «фазы» в среднем

увеличивается на 0,4 м при повышении температуры провода на 10° С (и, соответственно, уменьшается на 0,4 м при ее снижении на 10° С). Кроме того, как указано в [13], степень растяжения повивов из стали с увеличением температуры приблизительно вдвое меньше аналогичной для провода с повивами из алюминиевых проволок. Учитывая этот факт, а также то, что отношение сечения стали к сечению алюминиевой части существенно меньше для фазных проводов в сравнении с грозозащитными тросами (таблица А.1), принимаем для последних изменение стрелы провеса в 0,2 м на каждые 10° С. Таким образом, с учетом выражения (1.29) можно записать следующие функциональные зависимости стрелы провеса от температуры:

$$H_{ph} = \left[22 - (S + 0,04 \cdot (T_{ph} - 20)) \right] + \frac{1}{3} \cdot (S + 0,04 \cdot (T_{ph} - 20)), \quad (1.31)$$

$$H_{gw} = \left[32 - (0,5 \cdot S + 0,02 \cdot (T - 20)) \right] + \frac{1}{3} \cdot (0,5 \cdot S + 0,02 \cdot (T - 20)), \quad (1.32)$$

где H_{ph} и H_{gw} – средние высоты подвеса фазного провода и грозозащитного троса соответственно; S – величина стрелы провеса фазного провода при 20° С, принятая для данной ВЛЭП равной 9 м; T_{ph} – температура фазного провода, определяемая ТОС и током по ВЛЭП; T – температура троса, определяемая атмосферными условиями. Нетрудно убедиться, что значения H_{ph} и H_{gw} при 20° С согласуются с данными, приведенными в таблице А.1.

Вычислительные эксперименты выполнялись следующим образом. Для каждого из режимов, перечисленных в таблице 1.14, генерировалось случайным образом 10000 значений ТОС и 10000 величин удельного сопротивления грунта из соответствующих диапазонов для этих параметров, обозначенных в таблице 1.14. Для каждого сгенерированного значения ТОС по (1.30) рассчитывались удельные сопротивления фазного провода и грозозащитного троса, а по (1.31) и (1.32) – средние высоты подвеса проводов по трассе линии. При этом для режимов, характеризующихся большой нагрузкой ВЛЭП, учитывался дополнительный нагрев «фазы» от протекающего тока, но не более чем на (10÷15)° С (конкретное значение

выбиралось случайным образом). Это обосновано выполненными автором предварительными расчетами с использованием [56, 72], свидетельствующими, что при наличии трех проводников в расщепленной фазе (таблица А.1) может потребоваться ток порядка 1000 А для нагрева проводников на 10° С, а при токах в 600–700 А дополнительным нагревом (по отношению к ТОС) можно и вовсе пренебречь. По результатам экспериментов получено 110000 значений для каждого из параметров ВЛЭП отдельных последовательностей, а затем определены отношения максимальных значений к соответствующим минимальным. Если все минимальные значения принять за «1», получаются гистограммы, изображенные на рисунках 1.15 и 1.16.

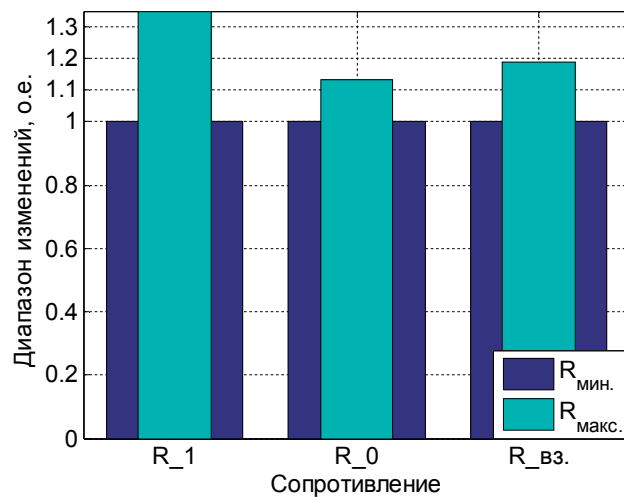


Рисунок 1.15 – Диапазон возможных вариаций активных сопротивлений для ВЛЭП 500 кВ

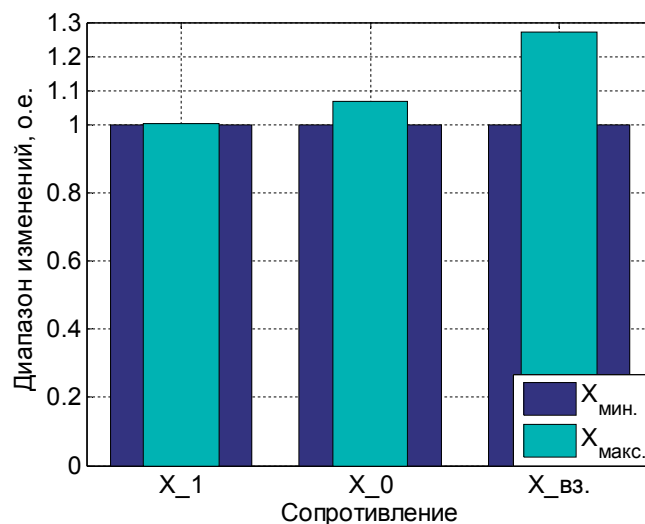


Рисунок 1.16 – Возможные вариации индуктивных сопротивлений для ВЛЭП 500 кВ

Таким образом, наиболее сильные вариации были выявлены для активного сопротивления прямой последовательности (около 35 %) и индуктивного сопротивления, отражающего магнитную связь между двумя цепями ВЛЭП (около 27 %). В целом диапазоны изменения всех активных сопротивлений составляют как минимум 13 %, а вариации индуктивного сопротивления нулевой последовательности достигают 7 %.

Аналогичные эксперименты были выполнены для модели одноцепной ВЛЭП напряжением 345 кВ, расположенной в США (рисунок А.3). Гистограммы, отражающие вариацию сопротивлений прямой и нулевой последовательностей, представлены на рисунках 1.17 и 1.18.

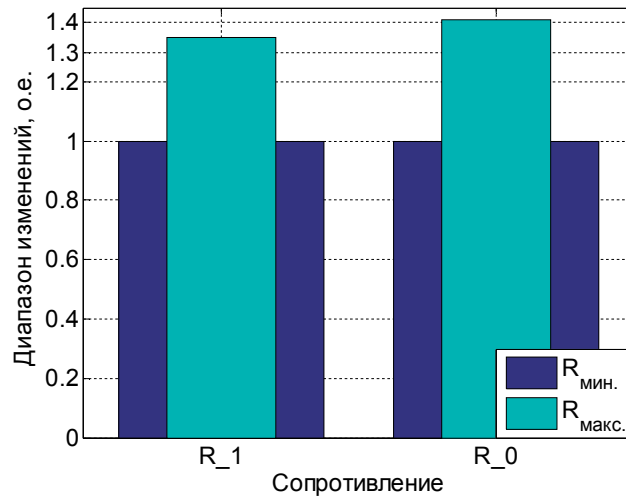


Рисунок 1.17 – Диапазон возможных вариаций активных сопротивлений для ВЛЭП 345 кВ

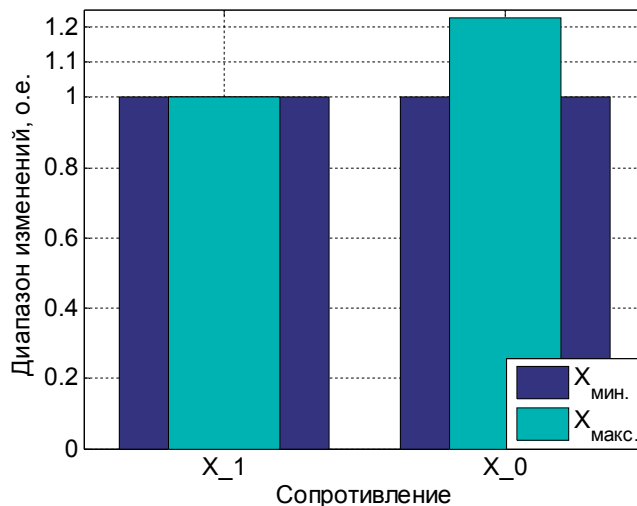


Рисунок 1.18 – Возможные вариации индуктивных сопротивлений для ВЛЭП 345 кВ

Как видно из рисунков 1.17 и 1.18, для моделируемой одноцепной линии были достигнуты очень значительные изменения всех сопротивлений, за исключением X_1 : вычисленные максимальные отношения величин составили соответственно 35 % и 41 % для активных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей, а вариации индуктивного сопротивления нулевой последовательности превысили 22 %.

Что касается емкостных проводимостей, выявленные диапазоны их изменения для обеих ВЛЭП в целом меньше представленных на рисунках 1.15–1.18. Вариациями B_1 можно пренебречь, а максимальные отношения значений B_0 в обоих случаях немного превышают 3 %. Емкостная проводимость между двумя цепями ВЛЭП напряжением 500 кВ изменялась в ходе экспериментов почти на 12 %. Следует, однако, учитывать, что значения проводимостей могли варьироваться только за счет средних высот подвеса проводов, отклонения которых от «базовых» (указанных в таблицах А.1 и А.2) определялись рассматриваемыми диапазонами температур (таблица 1.14), а также функциональными зависимостями (1.31) и (1.32). При этом в качестве «базовых» потенциально могли быть приняты совсем другие значения, поскольку, как отмечалось выше, маловероятно, что средние высоты подвеса проводов по трассе ВЛЭП могут быть известны с достаточной точностью. Поэтому возможный диапазон погрешностей в задании емкостных проводимостей шире по сравнению с достигнутым в ходе моделирования.

На основании полученных результатов можно заключить, что значения многих параметров ВЛЭП могут существенным образом варьироваться в зависимости от погодных условий и передаваемой по линии мощности. Данные, представленные на рисунках 1.15–1.18, в целом согласуются с оценками изменения параметров в [7, 16-18] и свидетельствуют о необходимости уточнения фактических характеристик ВЛЭП.

1.3 Описание технологии синхронизированных векторных измерений напряжений и токов

Современное направление развития ЭЭС, предполагающее, в частности, построение интеллектуальных электрических сетей *Smart Grids*, диктует необходимость полноценного мониторинга элементов ЭЭС и параметров электроэнергетических режимов практически в реальном времени. Эффективным инструментом для решения данной задачи могут стать синхронизированные векторные измерения (СВИ) напряжений и токов в различных географически удаленных узлах энергосистемы [48]. Технология СВИ развивается с 1980-х гг., а в последние годы число устанавливаемых устройств векторных измерений (УСВИ; англоязычный термин – «PMU», или «phasor measurement unit») в электрических сетях по всему миру неуклонно увеличивается [48, 73]. Помимо специализированных устройств PMU, функция СВИ часто интегрируется в терминалы РЗА, а также в цифровые регистраторы аварийных повреждений (ЦРАП) [74–76].

Типовая структура организации измерений и передачи массивов СВИ на верхний уровень иерархии изображена на рисунке 1.19. УСВИ оцифровывает входные аналоговые сигналы, поступающие от трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН), и присваивает дискретным выборкам временные метки посредством приема сигнала точного времени от GPS/GLONASS. Рассчитанные комплексные значения напряжений и токов, точно синхронизированные по фазе с аналогичными данными, вычисленными УСВИ в других узлах ЭЭС, передаются по каналам связи на более высокий уровень иерархии, в качестве которого обычно выступает концентратор СВИ («PDC», или «phasor data concentrator»). В свою очередь информация от нескольких устройств PDC транслируется на следующий уровень, что потенциально предоставляет возможность реализации сложных алгоритмов анализа и управления ЭЭС.

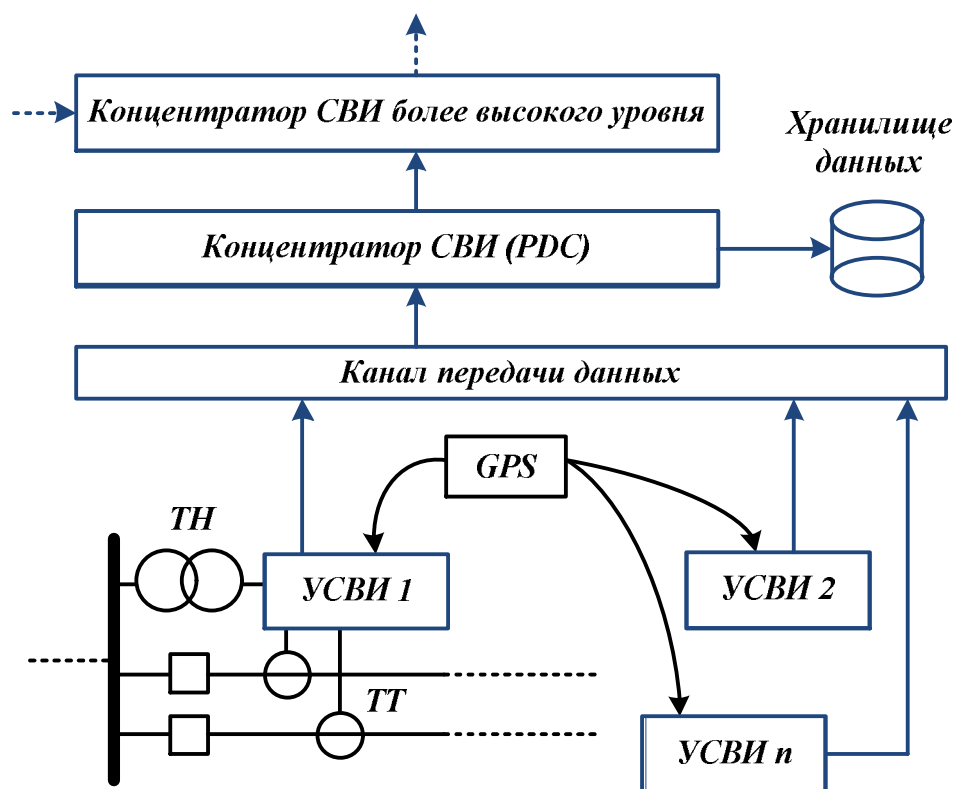


Рисунок 1.19 – Структурная схема организации СВИ и их передачи на верхний уровень иерархии

Международный стандарт, посвященный векторным измерениям, претерпел несколько редакций – начиная от принятого в 1995 г. *IEEE 1344* и заканчивая двумя самостоятельными стандартами, действующими в настоящее время: *IEEE Std C37.118.1-2011 «IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems»* и *IEEE Std C37.118.2-2011 «IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems»* [77–79]. Первый из указанных нормативных документов описывает минимальный состав функций PMU, основные понятия, относящие к СВИ, а также требования к измерениям комплексных значений токов и напряжений, частоты и скорости изменения частоты в установившихся и переходных режимах. Вторым стандартом посвящен описанию структуры сообщений различных типов, используемых для передачи информации от PMU устройствам верхнего уровня иерархии или в обратном направлении. В 2014 г. к первому из двух документов было выпущено дополнение – *IEEE Std C37.118.1a-2014*;

Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements, более четко формулирующее некоторые положения и смягчающее требования к погрешностям измерения частоты и скорости изменения частоты [80].

Круг задач, которые потенциально могут быть решены с помощью технологии СВИ, достаточно широк. К ним, среди прочих, относятся следующие [3, 48, 75]:

- визуализация режимных параметров и – в целом – обеспечение ситуационной осведомленности оперативно-диспетчерского персонала;
- ОС режима электрической сети;
- мониторинг частоты и выявление межзональных низкочастотных колебаний;
- идентификация параметров схем замещения элементов ЭЭС;
- быстрое и эффективное выявление неправильной фазировки во вторичных цепях;
- послеаварийный анализ предшествующего режима ЭЭС;
- построение алгоритмов адаптивной защиты.

Очевидно, что решение некоторых из перечисленных задач в масштабах крупного энергообъединения, такого как ЕЭС Российской Федерации, требует агрегации большого массива данных СВИ в единую информационную среду. С 2005 г. на территории нашей страны развивается Система мониторинга переходных режимов (СМПР), в рамках которой и осуществляется интеграция СВИ [49]. По состоянию на июнь 2015 г. в ЕЭС было внедрено около четырехсот УСВИ [49]. Несмотря на это, возможности, предоставляемые СМПР, не используются в должной степени, на что обращено внимание научно-технического сообщества [81]. Отметим, что в Северной Америке, где общее количество УСВИ в том же 2015 г. составляло около 2000, многие важные прикладные задачи на базе векторных измерений пока также остаются лишь проектом [82].

1.4 Аналитический обзор опубликованных работ по идентификации параметров ВЛЭП на основе синхронизированных векторных измерений

Проблемой определения параметров ВЛЭП с использованием СВИ занимались ранее и продолжают заниматься многие отечественные и зарубежные специалисты. Основной массив работ по обозначенной теме приходится на последние 10–15 лет; при этом материалы, подготовленные российскими специалистами, в целом начали появляться позднее аналогичных зарубежных. Интерес исследователей к актуализации параметров воздушных линий на базе СВИ по-прежнему большой, о чем наглядно свидетельствуют результаты поискового запроса «synchrophasor-based transmission line parameter estimation» в базе «IEEE Xplore», содержащие немало новых (от 2015–2017 гг.) статей на эту тему.

Несмотря на весомое количество публикаций по поставленной проблеме, автору не известны примеры полномасштабного тестирования предложенных методов в «полевых» условиях (в отличие от компьютерных и лабораторных экспериментов) и внедрения их на реальных энергообъектах. Помимо этого, допущения, принятые некоторыми исследователями при осуществлении вычислительных экспериментов на этапе верификации разработанных методов, имеют слабое обоснование. Наконец, автору известен лишь очень ограниченный круг работ, в которых не только был бы выполнен глубокий анализ систематических и случайных погрешностей СВИ, но также были бы предприняты попытки учета систематических погрешностей в математической модели, направленной на идентификацию параметров ВЛЭП, вместо простого моделирования деструктивного влияния этих погрешностей на результаты решения задачи.

В таблице 1.15 проанализированы некоторые, по мнению автора, ключевые отечественные и зарубежные работы по теме исследования

(отсортированные по дате публикации). В каждой из работ выделены следующие немаловажные аспекты:

- примерная суть исследования/метода;
- идентифицируемые параметры ВЛЭП (полные матрицы, составляющие отдельных последовательностей, сопротивления и проводимости однолинейной модели);
- оценка влияния систематических и случайных погрешностей СВИ;
- процедура верификации разработанного метода;
- полученные результаты;
- «плюсы» и «минусы» исследования в части определения параметров ВЛЭП.

Таблица 1.15 – Результаты анализа некоторых отечественных и зарубежных публикаций по тематике диссертационной работы

1.	
Авторы, название	1) J.-A. Jiang, J.-Z. Yang, Y.-H. Lin, C.-W. Liu, and J.-C. Ma, <i>“An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines – Part I: Theory and Algorithms”</i> [6]; 2) J.-A. Jiang, Y.-H. Lin, J.-Z. Yang, T.-M. Too, and C.-W. Liu, <i>“An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines – Part II: PMU Implementation and Performance Evaluation”</i> [83]
Язык и год публикации	Английский, 2000
Суть исследования (кратко)	Главная цель исследования – разработка алгоритмов и построение соответствующей аппаратной платформы для ОМП ВЛЭП на базе СВИ напряжений и токов с двух концов ВЛЭП. Уточнение фактических параметров ВЛЭП с применением СВИ рассматривается как частная задача, поскольку отмечается существенная деградация функционирования алгоритмов ОМП, в которых используются фиксированные значения параметров линии (погрешность ОМП может достигать 6,6 %). Алгоритм идентификации параметров ВЛЭП предполагает простое решение системы уравнений относительно постоянной распространения и характеристического сопротивления отдельно для каждой из трех модальных составляющих (0 , α , β) с использованием матрицы трансформации Clarke.

Суть исследования (кратко)	При компьютерном моделировании получено хорошее совпадение результатов с соответствующими «эталонными» данными (погрешности находятся в пределах $\pm 0,01$ %).
Искомые параметры	$R_1, L_1, C_1; R_0, L_0, C_0$ для однородной одноцепной транспонированной ВЛЭП.
Моделирование погрешностей СВИ	Ошибки СВИ моделируются при оценке функционирования предлагаемого авторами алгоритма вычисления синхрофазоров ¹ . Моделируются «шумы» и флуктуации частоты. Указывается необходимость наличия точной синхронизации измерений с двух концов ВЛЭП (при этом проблема возможной рассинхронизации даже при использовании GPS игнорируется). Что касается непосредственно верификации алгоритма определения параметров ВЛЭП, видимо, не учитываются ни «шумы» СВИ, ни систематические ошибки, и авторы декларируют точность, достигающую 99,99 %.
Верификация метода	Компьютерное моделирование. Данные сгенерированы в EMTP, но режим ВЛЭП не описан.
Результаты	Очень хорошие. Авторы заявляют о погрешностях в пределах $\pm 0,01$ %.
«Плюсы» и «минусы»	«+»: простой алгоритм; «+»: результаты функционирования алгоритма неразрывно сопряжены с важной практической задачей – повышением точности ОМП ВЛЭП; «-»: рассмотрена только транспонированная ВЛЭП; «-»: систематические ошибки измерений не рассматриваются. «Шумы» рассматриваются отдельно (при оценке функционирования алгоритмов вычисления синхрофазоров), однако, похоже, игнорируются при верификации методики определения Z и Y линии; «±»: значения комплексных напряжений и токов для оценки функционирования алгоритма идентификации параметров ВЛЭП сгенерированы в EMTP, при этом конкретный режим (значения \dot{U} и \dot{I}) не описан. Авторы также заявляют о практическом тестировании на ВЛЭП 161 кВ, однако это фактически ничем не подтверждено.
2.	
Авторы, название	C.-S. Chen, C.-W. Liu, and J.-A. Jiang, “A New Adaptive PMU Based Protection Scheme for Transposed/Untransposed Parallel Transmission Lines” [24]
Язык и год публикации	Английский, 2002
Суть исследования (кратко)	В исследовании поставлена задача моделирования алгоритма релейной защиты двухцепной ВЛЭП, использующего СВИ напряжений и токов с двух концов ВЛЭП. Кроме того, решаются задачи идентификации поврежденной цепи и ОМП. Указывается, что неучет вариаций параметров ВЛЭП может приводить к существенным погрешностям ОМП, и предлагается алгоритм определения фактических параметров двухцепной нетранспонированной ВЛЭП.

¹ Здесь и далее под «синхрофазорами» понимаются комплексные значения напряжений (токов), вычисляемые УСВИ и синхронизированные с аналогичными измерениями в других узлах ЭЭС.

Суть исследования (кратко)	Алгоритм основан на преобразовании Лапласа (для решения дифференциальных уравнений длинной линии) и применении нелинейной регрессии с использованием трех комплектов СВИ напряжений и токов. Авторы утверждают, что предложенный алгоритм обеспечивает «good capability» для определения фактических параметров ВЛЭП, однако в представленном материале это ничем не подтверждается.
Искомые параметры	Полные матрицы $[Z]$ и $[Y]$, содержащие фактические параметры двухцепной нетранспонированной ВЛЭП (63 неизвестных при разделении элементов матрицы $[Z]$ на действительную и мнимую части).
Моделирование погрешностей СВИ	Судя по всему, не учитываются ни «шумы» СВИ, ни систематические ошибки; при этом декларируется высокая точность ОМП (до 99,9 %).
Верификация метода	Сценарии для анализа функционирования алгоритмов релейной защиты параллельной ВЛЭП и ОМП были сгенерированы в EMTP. Что касается непосредственно верификации алгоритма определения параметров ВЛЭП, процедура тестирования не описана.
Результаты	Авторы заявляют о высокой точности всех алгоритмов (в частности, направленного на определение актуальных параметров линии). Однако практическая ценность подобных заключений вызывает сомнения, поскольку ошибки СВИ при моделировании игнорируются.
«Плюсы» и «минусы»	«+»: представлен алгоритм оценки актуальных параметров двухцепной нетранспонированной ВЛЭП (общий случай); «+»: решение задачи рассматривается в контексте его реального применения; «-»: отсутствуют детальные данные о процедуре верификации алгоритма (параметры ВЛЭП, режимы электрической сети для получения независимых комплектов СВИ); «-»: погрешности СВИ, судя по всему, полностью игнорируются.
3.	
Авторы, название	И-D. Kim and R.K. Aggarwal, “A study on the on-line measurement of transmission line impedances for improved relaying protection” [8]
Язык и год публикации	Английский, 2006
Суть исследования (кратко)	Предлагаются алгоритмы определения актуальных сопротивлений ВЛЭП прямой и нулевой последовательностей. Значение Z_1 вычисляется путем нахождения параметров A, B, C, D эквивалентного четырехполюсника по данным трех комплектов СВИ напряжений и токов по концам ВЛЭП. При этом отмечается, что для относительно коротких ВЛЭП можно считать $Z \approx B$, а для длинных линий выведено точное соотношение, позволяющее получить искомое сопротивление. Значение Z_0 предлагается вычислять на базе измерений напряжений и токов нулевой последовательности при различных внешних коротких замыканиях (КЗ); при этом число подобных измерений тем больше, чем больше параллельных линий, связанных взаимной индукцией. Решение получается с помощью линейного метода наименьших квадратов (МНК).

Искомые параметры	Значения сопротивлений прямой (Z_1) и нулевой (Z_0) последовательностей (последнее – для общего случая с несколькими параллельными ВЛЭП).
Моделирование погрешностей СВИ	Отсутствует. Отмечается лишь, что «the error in measurement ... can be restorable», однако никаких вариантов для коррекции погрешностей СВИ не предложено.
Верификация метода	Компьютерное моделирование участка электрической сети, содержащего несколько ВЛЭП, в программном комплексе EMTDC. При определении R_1 и X_1 требуются несколько режимов, однако не обсуждается, каким образом варьировались режимы для получения независимых комплектов СВИ.
Результаты	Процедура верификации алгоритма определения Z_1 из статьи до конца не ясна. Возникают вопросы, каким образом погрешность по X_1 может превышать 7 %. В отношении Z_0 результаты в целом хорошие, однако предлагаемый алгоритм идентификации сопротивлений нулевой последовательности не представляется сколь-либо осуществимым на практике.
«Плюсы» и «минусы»	<p>«+»: простая и понятная методика определения Z_1, которая может быть легко интегрирована в информационные системы, оперирующие параметрами ВЛЭП;</p> <p>«+»: проанализировано, каковым должно быть число обусловленности матрицы для успешного решения линейной задачи по определению вектора $[Z_0]$;</p> <p>«-»: недостаточно четко обозначенная процедура верификации алгоритмов (приводящая, в частности, к наличию расхождения по X_1 почти в 8 % по отношению к данным, используемым энергокомпанией, что вызывает серьезные вопросы);</p> <p>«-»: систематические и случайные погрешности измерений не учтены;</p> <p>«-»: процедура вычисления сопротивлений нулевой последовательности трудно осуществима на практике: необходимо зафиксировать несколько внешних КЗ, за интервал времени между которыми сами идентифицируемые параметры ВЛЭП могут существенно измениться.</p>
4.	
Авторы, название	C.S. Indulkar and K. Ramalingam, “ <i>Estimation of transmission line parameters from measurements</i> ” [29]
Язык и год публикации	Английский, 2008
Суть исследования (кратко)	Рассматривается проблема идентификации параметров ВЛЭП с использованием СВИ. За основу взята «exact PI network» (модель ВЛЭП в виде четырехполюсника, описываемого уравнениями с распределенными параметрами). Авторы идентифицируют R, X, B, G для однолинейной модели ВЛЭП, используя метод Ньютона-Рафсона для решения системы уравнений на базе одного комплекта СВИ. Получены очень точные результаты идентификации параметров ВЛЭП.
Искомые параметры	R, X, B, G для однолинейной модели ВЛЭП с распределенными параметрами.

Моделирование погрешностей СВИ	Отсутствует. При этом в заключении указана важность моделирования ошибок СВИ и – в целом – предварительной подготовки данных СВИ.
Верификация метода	Только математическое моделирование на однолинейной схеме замещения линии без учета ошибок СВИ. Используемые нагрузочные режимы в ряде экспериментов имеют слабое обоснование в части того, насколько они могут иметь место в реальных условиях эксплуатации.
Результаты	Очень хорошие. Погрешности по всем параметрам, кроме G , не превышают 1 %. При этом погрешность по G не определена.
«Плюсы» и «минусы»	«+»: используется модель ВЛЭП с распределенными параметрами; «+»: получено аналитическое решение, связывающее параметры эквивалентного четырехполюсника с «погонными» параметрами линии; «-»: модель линии – однолинейная (хотя при этом подчеркивается важность решения для параллельных линий); «-»: погрешности СВИ не учтены; «-»: значения напряжений по концам ВЛЭП (при верификации алгоритма) не выглядят реалистичными.
5.	
Авторы, название	D. Shi, D.J. Tylavsky, N. Logic, and K.M. Koellner, <i>“Identification of Short Transmission-Line Parameters from Synchrophasor Measurements”</i> [30]
Язык и год публикации	Английский, 2008
Суть исследования (кратко)	Рассматриваются четыре метода определения фактических параметров коротких ВЛЭП на базе СВИ: 1) решение системы уравнений с использованием только одного комплекта СВИ; 2) решение системы уравнений с использованием двух комплектов СВИ; 3) применение линейной регрессии на базе множества комплектов измерений; 4) нелинейная регрессия с использованием множества комплектов СВИ. Моделирование осуществляется относительно параметров прямой последовательности (R_1 , X_1 , B_1) ВЛЭП длиной 11,97 миль и напряжением 230 кВ. Различные алгоритмы сравниваются путем сопоставления погрешностей идентификации Z_1 и B_1 при добавлении к синхрофазорам систематических и случайных ошибок. Авторы приходят к выводу о превосходстве третьего алгоритма (на основе линейной регрессии).
Искомые параметры	R_1 , X_1 , B_1 для достаточно коротких ВЛЭП. При этом отмечено, что если линия является нетранспонированной, возникают дополнительные существенные погрешности идентификации ее параметров.
Моделирование погрешностей СВИ	При верификации всех четырех рассматриваемых алгоритмов моделируются и систематические, и случайные погрешности СВИ. Однако выбранные диапазоны погрешностей вызывают вопросы (вероятно, они не вполне реалистичны).

Моделирование погрешностей СВИ	Кроме того, совокупное влияние и «шумов», и систематических погрешностей, судя по всему, не рассматривается.
Верификация метода	Выполнено компьютерное моделирование участка сети, содержащего короткую ВЛЭП, в ATP/ATPDraw с целью получения необходимых синхрофазоров по концам ВЛЭП. Затем «эталонные» синхрофазоры искажаются систематическими погрешностями или «шумами», рассчитываются искомые параметры (R_1 , X_1 , B_1) и вычисляются погрешности идентификации этих параметров относительно принятых «эталонных». Для получения нескольких комплектов СВИ моделируется изменение нагрузки в конце ВЛЭП, аппроксимируемое синусоидой с периодом в 24 часа (что вызывает вопросы в части реалистичности подобного подхода).
Результаты	Практически идеальные, если предполагать «идеально транспонированную» ВЛЭП и отсутствие погрешностей СВИ. При наличии погрешностей ни один метод не обеспечивает корректного определения всех без исключения параметров (R_1 , X_1 , B_1). При этом погрешности идентификации в ряде случаев существенно превышают возможные на практике вариации параметров ВЛЭП.
«Плюсы» и «минусы»	<p>«+»: моделируются как систематические ошибки, так и «шумы» СВИ;</p> <p>«+»: рассматриваются и сопоставляются различные алгоритмы определения параметров коротких ВЛЭП;</p> <p>«+»: все предлагаемые методы просты и могут быть достаточно легко реализованы в любом программном обеспечении, оперирующем параметрами ВЛЭП;</p> <p>«-»: идентифицируются только параметры прямой последовательности; при этом отмечается, что результаты функционирования алгоритмов заметно деградируют при моделировании нетранспонированных ВЛЭП с небалансом по токам в 10 %;</p> <p>«-»: при моделировании систематических ошибок погрешность по амплитуде принимается на уровне 1 % (возможно, слишком оптимистический сценарий), тогда как СКО «шумов» СВИ также принимается равным 1 % (возможно, слишком пессимистический сценарий). Кроме того, два вида погрешностей, судя по всему, моделируются отдельно друг от друга;</p> <p>«-»: вариация нагрузки в течение суток (для получения множества комплектов СВИ) принимается синусоидальной, что может являться не вполне реалистичным.</p>
6.	
Авторы, название	Yuan Liao and Mladen Kezunovic, “Online Optimal Transmission Line Parameter Estimation for Relaying Applications” [4]
Язык и год публикации	Английский, 2009
Суть исследования (кратко)	Представлен алгоритм определения актуальных параметров ВЛЭП на базе нескольких комплектов СВИ (при верификации алгоритма авторами рассматриваются $N = 3$ комплекта). Методика основана на итеративном решении переопределенной системы нелинейных

Суть исследования (кратко)	уравнений методом Ньютона-Рафсона. Решением является вектор, содержащий не только искомые параметры ВЛЭП, но и «оптимальные» значения синхрофазоров, а также угла δ , моделирующего погрешности синхронизации измерений по концам ВЛЭП. Далее применяется критерий «хи-квадрат» («chi-square test») для выявления и отбраковки «плохих» данных, если таковые имеются, после чего процедура решения повторяется без учета отброшенных данных. В целом – очень грамотная статья по сравнению со многими материалами по теме, в т.ч. зарубежными, с которыми ознакомился автор диссертации.
Искомые параметры	Параметры прямой последовательности (R_1, X_1, B_1). Используемая модель ВЛЭП – транспонированная с распределенными параметрами. При этом отмечается, что R_0, X_0, B_0 также могут быть определены при наличии достаточных по величине напряжений и токов нулевой последовательности (небаланс нагрузки, внешние КЗ и др.).
Моделирование погрешностей СВИ	Ко всем рассчитанным при моделировании синхрофазорам добавляется нормально распределенный «шум» СВИ. Разработанный алгоритм способен обнаружить и исключить из рассмотрения «плохие» измерения токов и напряжений, а также нивелировать погрешности синхронизации. Однако типичные систематические ошибки измерений (которые обнаружить и ликвидировать сложнее) не учтены.
Верификация метода	Выполнено компьютерное моделирование в MATLAB. Модель ВЛЭП (500 кВ, 200 км) и значения параметров схемы замещения описаны. Для получения нескольких независимых комплектов СВИ варьируется фазовый угол между двумя эквивалентными источниками по концам ВЛЭП. Остается вопросом, насколько используемые авторами вариации угла могут соответствовать реальной картине.
Результаты	Хорошие. Авторами не приводятся конкретные погрешности определения параметров ВЛЭП в процентах, однако все значения в относительных единицах сведены в таблицы для каждого вычислительного эксперимента. Авторы оценивают результаты как «quite encouraging» (достаточно оптимистичные, обнадеживающие).
«Плюсы» и «минусы»	<p>«+»: алгоритм на базе модели линии с распределенными параметрами, с обнаружением и устранением «плохих» измерений, нивелированием неточностей синхронизации, а также моделированием «шума» СВИ;</p> <p>«+»: четкий критерий определения недостоверных входных данных («chi-square test»);</p> <p>«+»: относительно простой и быстрый алгоритм решения (сходимость, по словам авторов, достигается приблизительно за пять итераций);</p> <p>«-»: рассматриваются только транспонированная линия и только параметры прямой последовательности (вариации которых относительно малы по сравнению с вариациями параметров нулевой последовательности, как показано в разделе 1.2 настоящей работы);</p> <p>«-»: учтены «шумы» СВИ, однако, судя по всему, не учтены систематические ошибки измерений; специально моделируются только «плохие» данные в каком-либо комплекте измерений;</p> <p>«-»: оценить дисперсии ошибок, требуемые алгоритму, на практике может быть нелегко.</p>

7.	
Авторы, название	M. Kato, T. Hisakado, H. Takani, H. Umezaki, and K. Sekiguchi, "Live Line Measurement of Untransposed Three Phase Transmission Line Parameters for Relay Settings" [5]
Язык и год публикации	Английский, 2010
Суть исследования (кратко)	Предлагается алгоритм определения параметров трехфазной нетранспонированной ВЛЭП – одноцепной и двухцепной – на базе СВИ. Рассматриваются П-образная модель линии и модель с распределенными параметрами. В первом случае решается линейная система, а во втором используется метод Гаусса-Ньютона для решения нелинейной системы уравнений.
Искомые параметры	Полные матрицы $[Z]$ и $[Y]$.
Моделирование погрешностей СВИ	Не моделируются ни систематические, ни случайные погрешности СВИ. Результаты вычисления искомых параметров получаются нереально точными. Авторы отмечают необходимость оценки чувствительности алгоритма к погрешностям измерений.
Верификация метода	Математическое моделирование (компьютерные эксперименты).
Результаты	Для одноцепной ВЛЭП: потрясающе точные результаты (до 10^{-10} %). При этом никакие погрешности измерений не учитываются. Для двухцепной ВЛЭП: схожая картина.
«Плюсы» и «минусы»	«+»: простые модели; определяется минимальное количество рассматриваемых режимов для нахождения $[Z]$ и $[Y]$, однако моделирование отличий этих режимов друг от друга имеет слабое обоснование; «-»: ошибки СВИ не моделируются, при этом точность определения параметров линии получается невероятной; «-»: разность фаз напряжений по концам ВЛЭП ($\pi/12$ и $\pi/6$) при ее длине в 100 км, вероятно, слишком велика и не отражает реалии, как и столь существенная вариация этой разности, особенно за относительно небольшой промежуток времени; «-»: для идентификации всех параметров двухцепной ВЛЭП необходимо рассмотреть режимы с обрывом отдельных фаз ВЛЭП.
8.	
Авторы, название	А.А. Небера, «Прикладные вопросы применения векторных измерений параметров электрического режима» [3]
Язык и год публикации	Русский, 2011
Суть исследования (кратко)	Идентификация параметров схем замещения элементов сети рассматривается как одна из важных задач, базирующихся на технологии СВИ. В работе доказывается актуальность определения фактических значений параметров ВЛЭП, а также обозначаются преимущества использования для этой цели УСВИ по сравнению с РАС. Выполнены эксперименты на физической модели линии, в которых пофазно идентифицировались ее параметры – R, L, C – с использованием измерений, полученных от «МИП-02».

Суть исследования (кратко)	Алгоритм не описан вообще, но, очевидно, он схож с первым алгоритмом в [7], т.к. используется один «срез» параметров электрического режима, поэтому можно предположить «прямое» решение уравнения по аналогии с выражениями (4) в [7].
Искомые параметры	Пофазные значения R , L , C . При проведении экспериментов взаимоиנדукция между фазами, возможно, отсутствовала либо специально не задавалась.
Моделирование погрешностей СВИ	Ошибки СВИ специально не моделировались, однако выполнению экспериментов на физической модели, очевидно, могли сопутствовать погрешности блоков, имитирующих ВЛЭП (в плане несоответствия реальных \underline{Z} и \underline{Y} заданным), а также погрешности в каналах аналого-цифрового преобразования напряжений и токов, погрешности синхронизации и погрешности непосредственно УСВИ.
Верификация метода	Верификация выполнена на физической модели линии с использованием реальных УСВИ.
Результаты	Результаты моделирования в целом положительные, однако использован, вероятно, простейший подход к моделированию ВЛЭП (без учета взаимоиנדукции). Значения СКО погрешностей для отдельных параметров линии следующие: по R – 4,9 %; по L – 0,555 %; по C – 1,958 %.
«Плюсы» и «минусы»	«+»: эксперименты выполнены на физической модели линии с использованием реальных УСВИ; «+»: судя по всему, простой алгоритм вычисления R , L , C ; «-»: вероятно, взаимоиנדукция между отдельными фазами (как у реальной ВЛЭП) игнорировалась; «-»: аналоговые сигналы со стенда, вероятно, напрямую поступали в измерительные цепи «МИП-02», что не отражает ситуацию на реальной подстанции с ТТ, ТН и кабельной разводкой.
9.	
Авторы, название	А.С. Бердин, П.Ю. Коваленко, Е.А. Плесняев, «Влияние погрешности измерений РМУ при определении параметров схемы замещения ЛЭП» [84]
Язык и год публикации	Русский, 2012
Суть исследования (кратко)	В статье предлагается методика вычисления фактических параметров ВЛЭП на базе СВИ, а также оценивается влияние погрешностей измерений токов и напряжений по концам линии (как по модулю, так и по фазе). Предлагаемый алгоритм расчета продольного сопротивления \underline{Z} и поперечной проводимости \underline{Y} базируется на П-образной схеме замещения ВЛЭП и измеренных синхрофазорах трех фаз по концам линии («прямое» решение с использованием одного комплекта СВИ). При этом авторы не выделяют отдельные симметричные составляющие, а осуществляют расчет «пофазно», по-видимому, полностью игнорируя влияние взаимоиנדукции и взаимной емкостной проводимости между фазами. В этих условиях даже при отсутствии погрешностей измерений получаются ошибки в значениях искомых параметров линии до 9 %, которые авторы объясняют «невысокой точностью» расчета в Simulink, что вызывает вопросы в части обоснованности подобных заявлений.

Суть исследования (кратко)	При оценке погрешностей СВИ авторы отмечают, что основную лепту вносят ТТ, ТН и вторичные цепи, а не УСВИ, что можно признать справедливым. Авторы заключают, что уменьшение погрешностей измерительного тракта является ключевым вопросом для практической реализации алгоритмов расчета параметров схем замещения на основе СВИ.
Искомые параметры	Продольное сопротивление $\underline{Z} = R + jX$ и поперечная проводимость $\underline{Y} = G + jB$ П-образной схемы замещения ВЛЭП. Авторы рассчитывают эти параметры «пофазно», но, очевидно, методика может быть применена к вычислению параметров прямой последовательности.
Моделирование погрешностей СВИ	Систематические ошибки измерений отсутствуют в модели как дополнительные неизвестные, но выполнен комплекс вычислительных экспериментов с целью оценки влияния погрешностей СВИ на качество решения задачи. При этом погрешности СВИ на практике могут оказаться больше, нежели рассматриваемые авторами максимальные значения. Кроме того, необходима оценка влияния всех погрешностей в совокупности, а не по отдельности.
Верификация метода	Осуществлено математическое моделирование с применением MATLAB/Simulink. Использовалась модель линии напряжением 500 кВ. Кроме того, выполнены «пофазные» расчеты параметров действующей ВЛЭП 500 кВ (длиной около 200 км) с привлечением десятиминутного массива измерений.
Результаты	Выполненный анализ влияния погрешностей СВИ свидетельствует о том, что некоторые искомые параметры линии (прежде всего, G и R) практически не поддаются корректному вычислению даже при относительно небольших погрешностях измерений. Определение параметров по «паспортным» данным ВЛЭП может оказаться точнее. Приведенные в статье рассчитанные значения параметров реальной линии 500 кВ свидетельствуют об удовлетворительном качестве идентификации лишь некоторых из них.
«Плюсы» и «минусы»	<p>«+»: предложен простой алгоритм определения параметров ВЛЭП;</p> <p>«+»: произведена наглядная оценка влияния погрешностей СВИ (как по модулю, так и по фазе) на качество идентификации искомых параметров линии;</p> <p>«-»: авторы осуществляют т.н. «пофазную» оценку параметров ВЛЭП, видимо, игнорируя наличие электромагнитной связи между фазами;</p> <p>«-»: пределы моделируемых погрешностей измерений (например, угловых по напряжению) в ряде случаев малы и могут оказаться выше на практике;</p> <p>«-»: все погрешности измерений рассматриваются по отдельности друг от друга, а не в совокупности. Механизмов нивелирования влияния погрешностей не предложено.</p>
10.	
Авторы, название	P.I. Bartolomey, S.A. Eroshenko, E.M. Lebedev, and A.A. Suvorov, "New Information Technologies for State Estimation of Power Systems With FACTS" [2]
Язык и год публикации	Английский, 2012

Суть исследования (кратко)	<p>Описывается алгоритм идентификации параметров ВЛЭП по данным СВИ с помощью простых выражений. Статья по сути своей является более подробным изложением идей, описанных в [7] (следующая проанализированная работа в таблице 1.15).</p> <p>Параметры ВЛЭП, рассчитанные на базе СВИ, используются также для «априорной» фильтрации некорректных телеизмерений перед запуском алгоритма ОС электрической сети.</p>
Искомые параметры	В статье не упоминаются составляющие отдельных последовательностей. Видимо, речь идет об однолинейной модели.
Моделирование погрешностей СВИ	<p>Моделируется влияние погрешностей и по модулю, и по фазе. Показано, что R и G наиболее чувствительны к погрешностям измерений (рисунок 3 в статье). Угловая погрешность даже в $0,5^\circ$ оказывает заметное деструктивное влияние на результаты решения задачи (таблица 1 в статье).</p> <p>При этом не до конца ясно, каким образом моделировались ошибки (сразу на двух концах ВЛЭП или нет), а также оценивалось ли их совокупное влияние. Кроме того, реальные погрешности СВИ могут оказаться больше принятых в статье.</p>
Верификация метода	Выполнены вычислительные эксперименты с применением различных моделей ВЛЭП (однолинейных) – с сосредоточенными и распределенными параметрами. Коммерческое программное обеспечение «KOSMOS» использовано, чтобы показать, что качество решения задачи ОС во многом зависит от точности задания параметров элементов электрической сети.
Результаты	<p>Хорошие, если отсутствуют погрешности СВИ (или малы фазовые погрешности).</p> <p>Представлены также интересные результаты с точки зрения отбраковки «плохих» данных до ОС.</p>
«Плюсы» и «минусы»	<p>«+»: простой алгоритм идентификации параметров ВЛЭП на основе СВИ;</p> <p>«+»: рассмотрены модели ВЛЭП с сосредоточенными и распределенными параметрами, а также устройствами FACTS («Flexible Alternating Current Transmission Systems»);</p> <p>«-»: только однолинейная модель линии;</p> <p>«-»: большие ошибки расчета параметров ВЛЭП при наличии погрешностей СВИ.</p>
11.	
Авторы, название	П.И. Бартоломей, С.А. Ерошенко, Е.М. Лебедев, А.А. Суворов, «Новые информационные технологии обеспечения наблюдаемости FACTS на основе измерений PMU» [7]
Язык и год публикации	Русский, 2012
Суть исследования (кратко)	<p>Рассматривается задача идентификации продольных и поперечных параметров ВЛЭП (в т.ч. с FACTS) в контексте решения задачи ОС электрической сети.</p> <p>ВЛЭП представляется пассивным четырехполюсником, параметры которого идентифицируются по одному комплекту синхрофазоров по концам ВЛЭП (при наличии несимметрии или FACTS – по двум комплектам). Выведены соответствующие простые уравнения как для линии с сосредоточенными параметрами, так и с распределенными.</p>

Искомые параметры	Из статьи не ясно, какие конкретно параметры идентифицируются (не упоминаются симметричные или модальные составляющие). Видимо, речь идет об однолинейной модели.
Моделирование погрешностей СВИ	Осуществлено моделирование влияния погрешностей СВИ. Показано, что даже при наличии фазовой погрешности в 1° результаты не приемлемы (рисунок 3 в статье).
Верификация метода	Осуществлены вычислительные эксперименты с различными моделями ВЛЭП – с сосредоточенными и распределенными параметрами (все модели – однолинейные). С помощью программного обеспечения «КОСМОС» показано, что при решении задачи ОС важно не только отбраковывать «плохие» измерения, но и обеспечивать как можно более точную информацию о параметрах схем замещения элементов электрической сети.
Результаты	Хорошие при отсутствии систематических погрешностей СВИ; в противном случае – неудовлетворительные (рисунок 3 в статье).
«Плюсы» и «минусы»	<p>«+»: расчет значений параметров ВЛЭП с использованием простых уравнений;</p> <p>«+»: рассмотрена модель линии с FACTS;</p> <p>«-»: рассмотрена лишь однолинейная модель линии;</p> <p>«-»: наличие систематических ошибок СВИ приводит к большим погрешностям идентификации параметров линии. При этом проблема нивелирования влияния погрешностей СВИ не решается.</p>
12.	
Авторы, название	М.В. Хохлов, <i>«Погрешность определения параметров схемы замещения ЛЭП по синхронизированным векторным измерениям»</i> [85]
Язык и год публикации	Русский, 2013
Суть исследования (кратко)	<p>Исследуется влияние неслучайных (систематических) погрешностей СВИ на качество идентификации параметров ВЛЭП. Получена математическая модель, позволяющая определить предельные оценки погрешностей расчета параметров ВЛЭП на основе информации о классе точности измерительных трансформаторов. Выявлены закономерности, определяющие характер влияния угловых и амплитудных погрешностей измерения токов и напряжений на ошибки определения конкретных параметров ВЛЭП.</p> <p>Вычислительные эксперименты выполнены на базе однолинейной модели линии 500 кВ и свидетельствуют о том, что учет систематических ошибок СВИ может привести к более далеким от истины оценкам параметров линии, нежели при использовании справочных данных.</p> <p>В статье предлагаются также некоторые варианты повышения точности расчета искомых параметров.</p>
Искомые параметры	R, X, B, G однолинейной модели ВЛЭП с учетом предельных систематических погрешностей СВИ, определяемых классом точности измерительных трансформаторов.
Моделирование погрешностей СВИ	Моделирование и оценка влияния систематических погрешностей СВИ является основной целью работы. При этом уже при использовании измерительных трансформаторов класса точности 0,5 делается вывод о том, что уточнение параметров ВЛЭП на базе СВИ может оказаться

Моделирование погрешностей СВИ	нецелесообразным. В отношении случайных ошибок указывается, что они существенно меньше систематических и могут быть устранены на основе статистических методов.
Верификация метода	Вычислительные эксперименты на основе однолинейной модели ВЛЭП 500 кВ (детальная информация отсутствует). Линия представлена симметричной П-образной схемой замещения. Рассмотрено несколько различных режимов (от утяжеленного до близкого к холостому ходу).
Результаты	Даже при использовании измерительных трансформаторов класса точности 0,5 предельные значения погрешностей идентификации параметров ВЛЭП могут оказаться неприемлемыми. Предлагаются следующие варианты повышения точности расчета параметров: 1) использование измерительных трансформаторов более высокого класса точности; 2) обеспечение избыточности измерительной информации; 3) получение функциональных зависимостей погрешностей измерительных трансформаторов от контролируемых факторов и учет данных зависимостей в расчетной модели.
«Плюсы» и «минусы»	«+»: детально проанализирован характер влияния систематических погрешностей СВИ, которыми иногда пренебрегают авторы работ по тематике настоящей диссертации; «+»: выявлены закономерности, определяющие характер влияния отдельных систематических погрешностей (по амплитуде и фазовому углу) на ошибки идентификации конкретных параметров ВЛЭП; «-»: рассмотрена только однолинейная модель ВЛЭП, а также отсутствуют детальные сведения о значениях синхрофазоров по концам линии, использованных при получении численных результатов.
13.	
Авторы, название	Степанова А.А., <i>«Совершенствование моделей расчета и анализа потерь мощности и энергии в линиях электропередачи»</i> [40]
Язык и год публикации	Русский, 2014
Суть исследования (кратко)	Одна из глав диссертационного исследования Степановой А.А. посвящена разработке и тестированию алгоритма идентификации удельных параметров ВЛЭП на основе точных уравнений для потерь мощности и энергии. Искомые параметры ВЛЭП (r_0 , x_0 , g_0 , b_0) вычисляются посредством решения системы нелинейных уравнений с использованием метода Ньютона, обеспечивающего, как отмечается, быстрое решение задачи (максимальное число итераций – 5). Для решения необходимы следующие режимные параметры, предоставляемые УСВИ: потоки активной и реактивной мощности по концам ВЛЭП; модули напряжений; угол между векторами напряжений. В работе также проанализировано влияние погрешностей измерений на погрешности идентификации параметров ВЛЭП.

Искомые параметры	«Погонные» параметры прямой последовательности – r_0 , x_0 , g_0 , b_0 . При этом значение активной проводимости g_0 определяется с колоссальными погрешностями, в ряде случаев достигающими нескольких сот процентов. Очевидно также, что параметры x_0 и b_0 при наличии погрешностей могут быть заведомо точнее рассчитаны по традиционной методике, основанной на предполагаемых геометрических характеристиках и физических свойствах системы проводников ВЛЭП.
Моделирование погрешностей СВИ	Систематические погрешности СВИ не учтены в модели, однако всесторонне проанализирован характер влияния некоторых «предельных» погрешностей измерения мощностей, а также модуля и фазы напряжения на качество идентификации искомых параметров линии. При этом выбранный предельный диапазон погрешностей может оказаться недостаточным с практической точки зрения. Кроме того, необходимо комплексное моделирование погрешностей, тогда как в работе рассмотрено их влияние по отдельности.
Верификация метода	Предложенный алгоритм реализован в программном обеспечении Mathcad. Листинг программы представлен в приложении к рассматриваемой диссертационной работе. Моделирование влияния погрешностей измерений выполнено для нескольких моделей линий одновременно.
Результаты	Анализ представленных в работе результатов свидетельствует о том, что погрешности по некоторым каналам измерений оказывают крайне деструктивное влияние на качество идентификации отдельных параметров ВЛЭП. С учетом того, что определяются лишь параметры прямой последовательности, их вычисление по традиционной методике с использованием справочных данных может привести к заведомо более точному результату. Помимо этого, значения ошибок СВИ, рассматриваемые автором работы в качестве «предельных» (например, по углу в $\pm 0,1^\circ$), на практике могут оказаться отнюдь не максимальными.
«Плюсы» и «минусы»	<p>«+»: предлагается относительно простой алгоритм определения параметров ВЛЭП;</p> <p>«+»: происследовано влияние «предельных» погрешностей измерений на качество идентификации параметров ВЛЭП для линий различных классов напряжения (от 220 до 750 кВ), а также проанализированы зависимости погрешностей определения искомых параметров от длины линии и степени ее загрузки;</p> <p>«-»: судя по всему, идентифицируются только параметры прямой последовательности (рисунок 3.1 в работе);</p> <p>«-»: принятые максимально допустимые погрешности измерений малы и могут не отражать реальной практической ситуации. Кроме того, исследуется влияние погрешностей измерений по отдельности (по активной мощности, реактивной мощности, модулю напряжения, углу сдвига фаз δ), а не в совокупности, что лучше имитировало бы реальную картину. Какие-либо варианты нивелирования погрешностей СВИ не предлагаются, а вывод об их относительно небольшом влиянии на качество идентификации параметров ВЛЭП можно считать ошибочным.</p>

14.	
Авторы, название	Z. Wu, L.T. Zora, and A.G. Phadke, “Simultaneous Transmission Line Parameter and PMU Measurement Calibration” [38]
Язык и год публикации	Английский, 2015
Суть исследования (кратко)	Изложен алгоритм, направленный на определение матриц параметров ВЛЭП ($[Z]$ и $[Y]$) одновременно с вычислением калибровочных коэффициентов по токам и напряжениям с целью автоматической коррекции систематических погрешностей СВИ. Алгоритм основан на решении переопределенной системы уравнений и базируется на следующих основных допущениях: 1) на одной из подстанций установлено высокоточное (откалиброванное) УСВИ, снабжаемое высокоточными сигналами от откалиброванных ТТ и ТН; 2) систематические погрешности СВИ не изменяются при вариации перетоков мощности по ВЛЭП.
Искомые параметры	Все элементы матриц $[R]$, $[X]$, $[G]$, $[B]$; при этом ВЛЭП могут быть нетранспонированными. Параметры многих ВЛЭП участка сети могут быть определены одновременно.
Моделирование погрешностей СВИ	Погрешности СВИ моделируются и, более того, корректируются по результатам работы предложенного алгоритма. Рассматриваемый диапазон систематических погрешностей СВИ соответствует возможным практическим ситуациям на энергообъектах ($[-10\%, 10\%]$ по амплитуде; $[-5^\circ, 5^\circ]$ по фазе). Для функционирования алгоритма необходимо наличие высокоточных измерений от одного УСВИ.
Верификация метода	Компьютерное моделирование участка электрической сети, содержащего 30 шин и 36 ветвей, в MATLAB. Для формирования переопределенной системы уравнений рассматривается ряд различных нагрузочных режимов на протяжении нескольких часов. Нагрузка варьируется от 32 % до 98 % по отношению к своему пиковому значению. Столь широкий диапазон может поставить под сомнение принятое допущение об абсолютном постоянстве систематических погрешностей СВИ.
Результаты	Результаты определения всех параметров ВЛЭП можно считать очень точными (с максимальными погрешностями не более 3 %).
«Плюсы» и «минусы»	«+»: простой алгоритм определения всех элементов матриц параметров ВЛЭП; «+»: учитывается активная проводимость G ; «+»: одновременная с вычислением элементов $[Z]$ и $[Y]$ коррекция систематических погрешностей СВИ; «+»: на этапе верификации алгоритма учтены и систематические ошибки СВИ, и «шумы»; «-»: наличие высокоточных (пользующихся абсолютным доверием) СВИ даже на одной подстанции может быть труднодостижимым на практике; «-»: не учтено, что при вариации нагрузки от 32 % до 98 % по отношению к пиковому значению (как в экспериментах, приведенных

«Плюсы» и «минусы»	в статье) систематические погрешности СВИ могут несколько изменяться; «—»: принимаемая модель ВЛЭП, очевидно, считается абсолютно достоверной.
15.	
Авторы, название	S.K. Kakovskii, A.A. Nebera, M.A. Rabinovich, and P.N. Kazakov, "Estimation of the transmission line parameters using a grid model" [86]
Язык и год публикации	Английский, 2016
Суть исследования (кратко)	<p>В работе рассматривается проблема определения фактических параметров ВЛЭП на базе СВИ в присутствии систематических и случайных погрешностей измерений. Линия представлена П-образной схемой замещения с сосредоточенными параметрами $\underline{Z} = R + jX$ и $\underline{Y} = G + jB$, алгоритм идентификации которых аналогичен представленному в [7].</p> <p>Отмечается, что при отсутствии ошибок СВИ алгоритм обеспечивает корректное определение параметров модели вне зависимости от режима ЭЭС, используемого для их вычисления.</p> <p>В статье детально исследуется влияние некоторых систематических погрешностей СВИ на качество идентификации отдельных параметров ВЛЭП в зависимости от степени ее загрузки. Авторы приводят аналитические и экспериментальные зависимости, отражающие взаимосвязи между погрешностями вычисления параметров линии (как по величине, так и по знаку) и конкретными погрешностями СВИ (например, амплитудной или угловой по напряжению на одном конце ВЛЭП). При этом отмечается, что реальная картина зависимостей гораздо сложнее, поскольку ошибки присутствуют во всех измеряемых величинах, однако в статье не приводятся оценки погрешностей вычислений при наличии ошибок во всех модулях и фазах напряжений и токов по концам ВЛЭП.</p> <p>Анализ численных данных, приведенных в статье, свидетельствует о возможной низкой точности идентификации параметров ВЛЭП в присутствии систематических ошибок в отдельных измерениях. При этом вызывает вопросы обоснованность вывода авторов о том, что представленный алгоритм функционирует должным образом. Авторы отмечают необходимость дальнейших исследований.</p>
Искомые параметры	R, X, B, G эквивалентной П-образной схемы замещения ВЛЭП с сосредоточенными параметрами. За основу взята модель реальной линии 500 кВ, а в качестве «базовых», очевидно, приняты ее параметры прямой последовательности.
Моделирование погрешностей СВИ	<p>Детальным образом анализируется влияние отдельных систематических и случайных погрешностей СВИ на качество решения задачи. Однако отсутствуют (либо не описаны в статье) какие-либо результаты комплексного исследования, позволяющего судить о совокупном влиянии погрешностей во всех без исключения токах и напряжениях, необходимых для вычисления продольных и поперечных параметров ВЛЭП.</p> <p>Кроме того, отмечено, что эффективным методом борьбы с «шумами» СВИ является усреднение вычисленных параметров, однако</p>

Моделирование погрешностей СВИ	механизмов уменьшения влияния систематических погрешностей не предложено.
Верификация метода	<p>Вычисления осуществлялись с использованием компьютерной модели ЕЭС России, включающей 1964 узла и 3300 линий и трансформаторов. В качестве моделируемой ВЛЭП выбрана линия напряжением 500 кВ между Костромской ГРЭС и Загорской ГАЭС со следующими параметрами, принятыми за «эталонные»: $R = 5,82 \text{ Ом}$; $X = 66,75 \text{ Ом}$; $G = 9,8 \text{ мкСм}$; $B = 983 \text{ мкСм}$.</p> <p>Влияние различных погрешностей СВИ на качество идентификации параметров линии исследовано для различных вариантов загрузки ВЛЭП, а в качестве некоторого средства достоверизации сделанных выводов использованы экспериментальные данные, полученные от УСВИ, установленных на данной ВЛЭП.</p>
Результаты	<p>Предлагаемый алгоритм определения R, X, B, G обеспечивает корректные результаты при отсутствии погрешностей СВИ. Характер влияния конкретных погрешностей измерений на отдельные искомые параметры линии крайне различен. В целом авторы отмечают, что наиболее критичными являются систематические погрешности СВИ, а точность расчета R существенно уступает точности вычисления X.</p> <p>Влияние случайных ошибок СВИ можно несколько нивелировать посредством усреднения множества различных оценок параметров линии на некотором интервале времени (авторы предлагают интервал в 10 с).</p>
«Плюсы» и «минусы»	<p>«+»: простой алгоритм определения параметров ВЛЭП; «+»: проведен глубокий анализ по оценке влияния отдельных погрешностей измерений на качество идентификации искомых параметров линии; «-»: как и во многих других отечественных работах, вся идентификация осуществляется лишь относительно параметров ВЛЭП прямой последовательности, вариации которых и так невелики (за исключением R, однако этот параметр вычисляется с существенными погрешностями по предложенному алгоритму при наличии ошибок СВИ); «-»: задаваемые авторами пределы систематических погрешностей измерений могут оказаться слишком оптимистическими с практической точки зрения.</p>

1.5 Систематизация результатов анализа публикаций и формулировка связанных с этим задач исследования

Обобщение сведений, изложенных в таблице 1.15, а также результатов, представленных в некоторых других статьях, позволяет выделить

характерные особенности опубликованных исследований по идентификации параметров ВЛЭП на базе СВИ, требующие тщательного критического анализа с целью совершенствования методов решения поставленной задачи и методик верификации предложенных алгоритмов. Из этих особенностей логично вытекают задачи диссертационного исследования, перечисленные ниже в каждом из пунктов.

1. Модель ВЛЭП, используемая для осуществления вычислительных экспериментов, часто является однолинейной. Это, очевидно, не только позволяет получить аналитическое решение задачи, но и – как в [85] – оценить предельные ошибки расчета искомых параметров линии при заданных максимальных погрешностях тракта измерений. Вместе с тем практическая ценность подобных моделей ограничена. Трехфазная ВЛЭП характеризуется взаимоиндукцией и взаимной проводимостью между фазами (что существенно осложняет получение строгого аналитического решения), а применение аппарата симметричных составляющих к нетранспонированной линии и вовсе является не вполне корректным [51]. Однолинейная модель ВЛЭП может применяться для идентификации параметров прямой последовательности (как, например, в [4, 30]), что более всего актуально в отношении продольных активных сопротивлений (как следует из раздела 1.2 настоящей работы) и, вероятно, поперечных активных проводимостей. Вместе с тем именно эти параметры оказываются наиболее чувствительными к погрешностям измерений [84, 86].

Задача: разработка отдельных моделей для транспонированной и нетранспонированной ВЛЭП, а также отдельных методов идентификации актуальных параметров этих ВЛЭП.

2. Во многих работах выполнены вычислительные эксперименты, позволяющие оценить влияние различных ошибок СВИ на качество функционирования предлагаемых методов определения параметров ВЛЭП. При этом все эти ошибки, как правило, рассматриваются по отдельности (как, например, в [40, 84]). Это может оказаться полезным для выявления

корреляционных зависимостей, т.е. выяснения влияния отдельной амплитудной или угловой погрешности на качество идентификации конкретного параметра ВЛЭП. На практике же погрешности, очевидно, присутствуют одновременно во всех без исключения измерительных трактах токов и напряжений по обоим концам ВЛЭП, поэтому актуальным представляется моделирование совокупного влияния ошибок СВИ.

Более того, рассмотренные максимальные диапазоны погрешностей измерений в ряде случаев слишком оптимистические (например, в работах [40, 84]). Следует также отметить, что в отдельных публикациях декларируется высокая точность вычисления параметров ВЛЭП, но при этом погрешности СВИ, судя по всему, вообще не рассматриваются [5, 24].

Задача: выполнение комплексного анализа влияния систематических погрешностей измерений, одновременно присутствующих во всех без исключения векторах напряжения и тока, на качество определения параметров ВЛЭП на основе СВИ.

3. Как следует из [40, 84–86], систематические погрешности СВИ оказывают существенное деструктивное влияние на качество решения задачи, поэтому логичной представляется попытка нивелирования этого влияния вместо простой констатации факта. Автору известен очень ограниченный круг публикаций, в которых предпринималась бы подобная попытка. Так, в [38] одновременно с вычислением матриц параметров линии определяются и калибровочные коэффициенты по токам и напряжениям. Однако функционирование предлагаемого метода возможно при наличии на одной из подстанций откалиброванного УСВИ, снабжаемого сигналами тока и напряжения от откалиброванных ТТ и ТН, что лимитирует внедрение метода в эксплуатацию. В [87] наличие «идеальных» ТТ, ТН и УСВИ не требуется, а в оптимизационную задачу по поиску неизвестных параметров линии интегрированы все без исключения систематические погрешности СВИ по обоим концам ВЛЭП (число которых составляет 24 для одноцепной трехфазной ВЛЭП). Подобный подход сам по себе требует серьезного

критического анализа относительно того, всегда ли в этом случае возможно получение уникального решения задачи, но еще больше вопросов вызывает процедура тестирования соответствующего алгоритма. Измерения токов и напряжений осуществлялись на реальной линии в течение целой недели, а вариация по току составила $10 \div 270$ А. При этом не только параметры ВЛЭП, но и все систематические ошибки СВИ предполагались неизменными. В этих условиях рассчитанные авторами значения параметров линии могут не иметь никакого отношения к реальности. Наконец, в одной из наиболее «свежих» публикаций по теме – [88] – представлен достаточно сложный метод расчета корректирующих коэффициентов, учитывающих систематические погрешности СВИ, и определения фактических параметров линии. Предложенный метод протестирован пока лишь на однофазной модели ВЛЭП.

Задача: разработка методов идентификации параметров ВЛЭП, направленных на максимальную компенсацию систематических погрешностей измерений и при этом исключающих описанные недостатки.

4. Практически во всех проанализированных работах задача идентификации параметров ВЛЭП решается непосредственно относительно искомых сопротивлений и проводимостей. Вместе с тем выводы, представленные в разделе 1.2 настоящего диссертационного исследования, свидетельствуют о том, что можно выделить относительно небольшую группу факторов (таких как средние высоты подвеса проводов по трассе ВЛЭП и проводимость грунта), существенным образом влияющих на параметры ВЛЭП. Решение оптимизационной задачи относительно этой группы характеристик позволило бы существенно сократить размер вектора неизвестных при идентификации полных матриц $[Z]$ и $[Y]$, а также учесть некоторую взаимосвязь между элементами этих матриц, поскольку они во многом определяются одними и теми же геометрическими параметрами системы проводников ВЛЭП.

В диссертации Шульгина М.С. [89] представлен многоступенчатый

алгоритм определения параметров ВЛЭП, который можно назвать «гибридным», поскольку он предполагает использование как некоторых геометрических характеристик ВЛЭП, так и измеренных синхрофазоров. Для функционирования алгоритма должны быть известны координаты проводников с учетом стрелы провеса, а также длина линии. Кроме того, погрешности СВИ, как отмечается, не должны превышать 0,5 %. Наконец, вызывает вопросы механизм верификации предложенной методики.

Задача: формулировка оптимизационной задачи по идентификации параметров ВЛЭП таким образом, чтобы учитывалась зависимость сопротивлений и проводимостей ВЛЭП от нескольких факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на их изменения.

5. Многие разработанные методы решения задачи требуют больше одного комплекта синхрофазоров (как, например, в [4, 30, 38]). Поэтому возникает закономерный вопрос, каким образом при тестировании этих методов следует моделировать изменения электроэнергетического режима так, чтобы они корректно воспроизводили реальные процессы в ЭЭС. По мнению автора настоящей работы, наиболее целесообразно для этой цели использовать реальные массивы СВИ, поскольку воспроизвести характер изменения напряжений и токов на ВЛЭП в течение определенного периода времени сложно (в частности, моделирование изменения нагрузки в конце ВЛЭП синусоидой, как это сделано в [30], может не являться подходящей аппроксимацией).

Задача: верификация разработанных методов идентификации параметров ВЛЭП с привлечением реальных архивов СВИ по концам ВЛЭП.

Таким образом, необходима проработка новых методов и принципов их верификации, обеспечивающих как можно более полный учет характеристик ВЛЭП и всего тракта измерений, используемых в задаче идентификации актуальных параметров ВЛЭП.

1.6 Выводы по главе 1

1. Проанализированы современные методики вычисления продольных и поперечных параметров ВЛЭП различной конфигурации на основе информации о геометрических характеристиках и физических свойствах системы проводников. Расчетные выражения реализованы в программном коде на языке MATLAB, а результаты вычислений практически идеально совпадают с соответствующими данными, полученными средствами ATP/ATPDraw, при учете влияния грунта с помощью аппроксимации интеграла Карсона.

2. Выяснено, что применение альтернативного метода, предложенного C. Gary, A. Deri и др., обеспечивает значения сопротивлений линии, достаточно близкие к полученным по методу Карсона. Это означает, что альтернативный метод может быть использован для вычисления матрицы сопротивлений ВЛЭП, в т.ч. и при определении фактических параметров ВЛЭП на базе СВИ.

3. 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 сталеалюминиевый с одним повивом из алюминиевых проволок).

4. Выполнены вычислительные эксперименты, свидетельствующие о том, что значения многих 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.

5. Проанализировано большое количество отечественных и зарубежных публикаций по идентификации фактических параметров ВЛЭП на базе СВИ, в результате чего выяснено, что многие предложенные методы и/или способы их верификации нуждаются в переосмыслении и доработке с целью максимально корректного воспроизведения характера реальных процессов в ЭЭС и погрешностей СВИ.

Результаты исследований, изложенных в главе 1, опубликованы в работах [131, 136, 147].

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОДГОТОВКИ МАССИВОВ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЛЭП

2.1 Характеристика реальных массивов СВИ напряжений и токов

Результаты решения задачи по идентификации параметров ВЛЭП на базе СВИ существенным образом зависят от качества исходных данных, используемых в расчетных выражениях по определению искомым сопротивлений и проводимостей. Требования, предъявляемые к составу исходных данных, можно разделить на две основные группы: 1) возможно более полная и актуальная информация о «паспортных» характеристиках моделируемой ВЛЭП (приблизительная длина ВЛЭП, схема транспозиции проводов, геометрия типовой опоры, марки используемых проводников, данные о характере заземления грозозащитных тросов и т.д.); 2) как можно более достоверный состав измерительной информации – массивов СВИ напряжений и токов по концам ВЛЭП. «Паспортные» характеристики линии требуют тщательного анализа и корректного перенесения в модель ВЛЭП на этапе ее создания, после чего изменять их фактически не требуется. Измерительная же информация, напротив, вариативна и, следовательно, требует постоянного контроля качества перед непосредственным ее использованием в основных алгоритмах. В данной главе проанализируем некоторые особенности, которые могут быть присущи реальным векторным измерениям, а также опишем методы обработки агрегированных массивов СВИ перед задействованием этих СВИ в решении задачи определения параметров ВЛЭП.

СВИ, как и многие другие реальные измерения, могут содержать заведомо недостоверные точки данных (импульсные помехи), а также быть достаточно «зашумленными». Под *импульсными помехами* здесь и далее будем понимать отдельные точки данных (или группы точек данных,

соответствующие множеству последовательных измерений), резко выделяющиеся на фоне смежных измерений – предыдущих («слева») и последующих («справа»). На рисунке 2.1 в качестве иллюстрации представлены графики изменения фазовых углов¹ векторов тока, рассчитанных УСВИ на одной стороне ВЛЭП напряжением 345 кВ в США. На графиках можно наблюдать характерные импульсные помехи в виде «всплесков», иногда называемых также «выбросами» [90]. Отметим, что подобные «выбросы» очень сложно детектировать на графиках изменения модулей соответствующих векторов – действующих значений токов трех фаз (рисунок 2.2). Данное обстоятельство свидетельствует о том, что импульсные помехи могут в данном случае быть обусловлены погрешностями GPS-синхронизации. В ходе обсуждения подобного поведения измеренных величин специалисты компании «АТС» (США) подтвердили наличие некоторых проблем с GPS-синхронизацией на отдельных подстанциях. Очевидно, «выбросы» необходимо отфильтровать перед передачей массива СВИ алгоритму оценивания фактических параметров ВЛЭП.

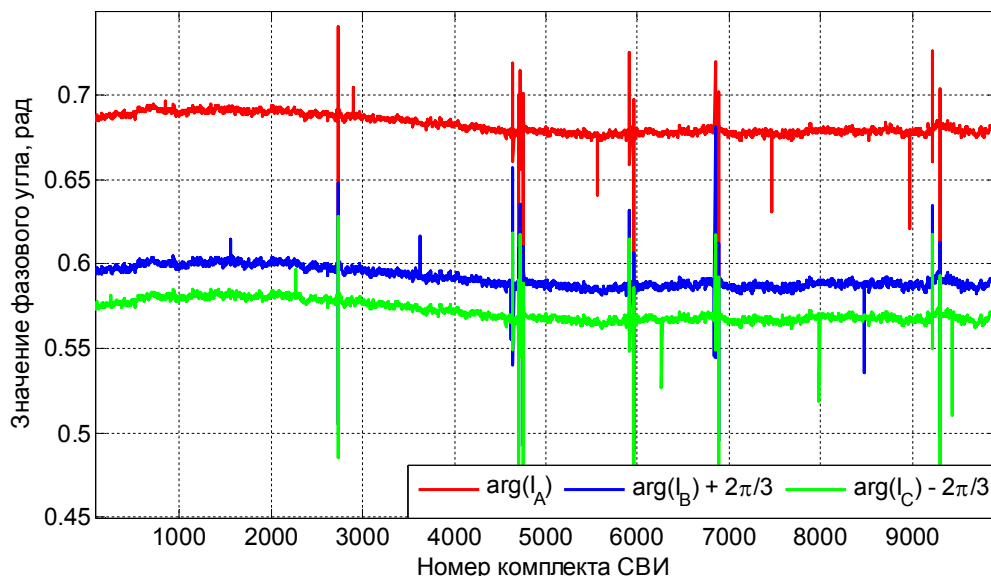


Рисунок 2.1 – Иллюстрация наличия импульсных помех на графиках изменения фазовых углов синхрофазоров тока на ВЛЭП 345 кВ

¹ С целью более наглядного графического представления значений фазовых углов исходные вектора тока, рассчитанные УСВИ, повернуты на определенные углы в комплексной плоскости, что не искажает сути анализа.

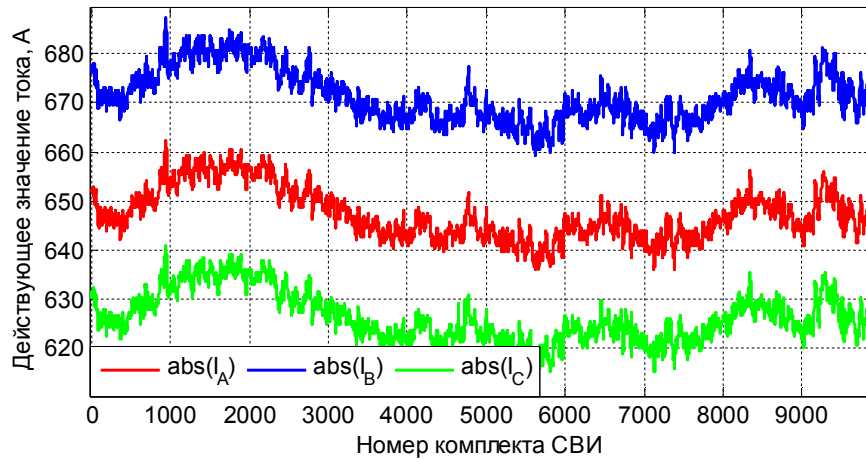


Рисунок 2.2 – Графики изменения действующих значений токов трех фаз ВЛЭП 345 кВ, для которых на рисунке 2.1 изображены изменения фазовых углов

Помимо наличия импульсных помех, СВИ сопровождаются «шумом», под которым здесь и далее будем понимать совокупность *несистематических*, или *случайных погрешностей*, неизбежно присущих реальным измерениям и характеризующих *прецизионность* этих измерений [91]. В качестве примера на рисунке 2.3 сопоставлены два графика изменения действующих значений токов одной и той же фазы по концам сравнительно короткой ВЛЭП напряжением 345 кВ. Значения синхрофазоров в начале ВЛЭП рассчитаны УСВИ одного типа, а в конце ВЛЭП – другого. Из рисунка 2.3 виден более «шумный» характер рассчитанных значений тока в начале ВЛЭП, что можно несколько исправить посредством цифровой фильтрации.

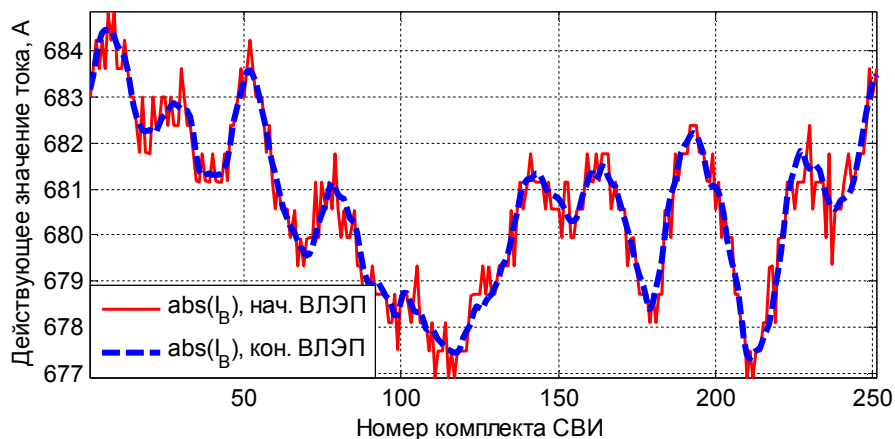


Рисунок 2.3 – Иллюстрация наличия «шума» в СВИ тока на ВЛЭП 345 кВ

Таким образом, необходимо освободить массивы СВИ от импульсных помех, удалив соответствующие «подозрительные» комплекты измерений, а также проанализировать возможность уменьшения «шума» с целью формирования «максимально корректной» совокупности синхрофазоров по концам линии, используемой далее при вычислении актуальных параметров этой линии. Помимо отмеченных проблем, подробное обсуждение которых осуществляется в нижеследующих разделах данной главы, исходные массивы СВИ могут обладать и другими особенностями. Так, файлы данных, содержащие векторные измерения, могут иметь пропуски; в них может наблюдаться несоответствие маркировки фаз реальной картине (на линиях с транспозицией). Устранение подобных дефектов является достаточно рутинной задачей и не рассматривается в настоящей работе.

2.2 Разработка и исследование метода обнаружения и фильтрации импульсных помех в СВИ напряжений и токов

2.2.1 Описание метода. Идея предлагаемого метода обнаружения импульсных помех заключается в вычислении всех изменений сигнала¹ от точки к точке с последующей оценкой того, можно ли считать конкретное изменение «недостаточно достоверным» – вызванным ошибкой синхронизации или другими проблемами, а не изменением режима электрической сети. Напряжения и токи в установившемся режиме обычно изменяются достаточно плавно, без внезапных «скачков» в уровне сигнала. Например, на рисунке 2.4 большая часть точек данных сконцентрирована около значения $1,6 \cdot 10^5$ В. Это означает, что изменения значений от точки к точке, т.е. разности между каждыми двумя смежными точками данных (которые будем также называть «флуктуациями»), в большинстве случаев не должны выходить за пределы достаточно узкого диапазона величин. Чтобы

¹ Под «сигналом» здесь будем понимать совокупность последовательных значений амплитуды, фазового угла, действительной части или мнимой части одного и того же синхрофазора напряжения или тока.

отделить «достоверные» флуктуации сигнала от «недостоверных», необходим определенный критерий, в качестве которого можно предложить использовать среднее арифметическое или медианное значение модулей всех вычисленных флуктуаций. Обе эти оценочные функции достаточно часто используются при выяснении статистических свойств массива данных. Среднее арифметическое или медиану необходимо умножить на коэффициент, больший единицы, и таким образом задать уставку, отделяющую «подозрительные» флуктуации от большинства других.

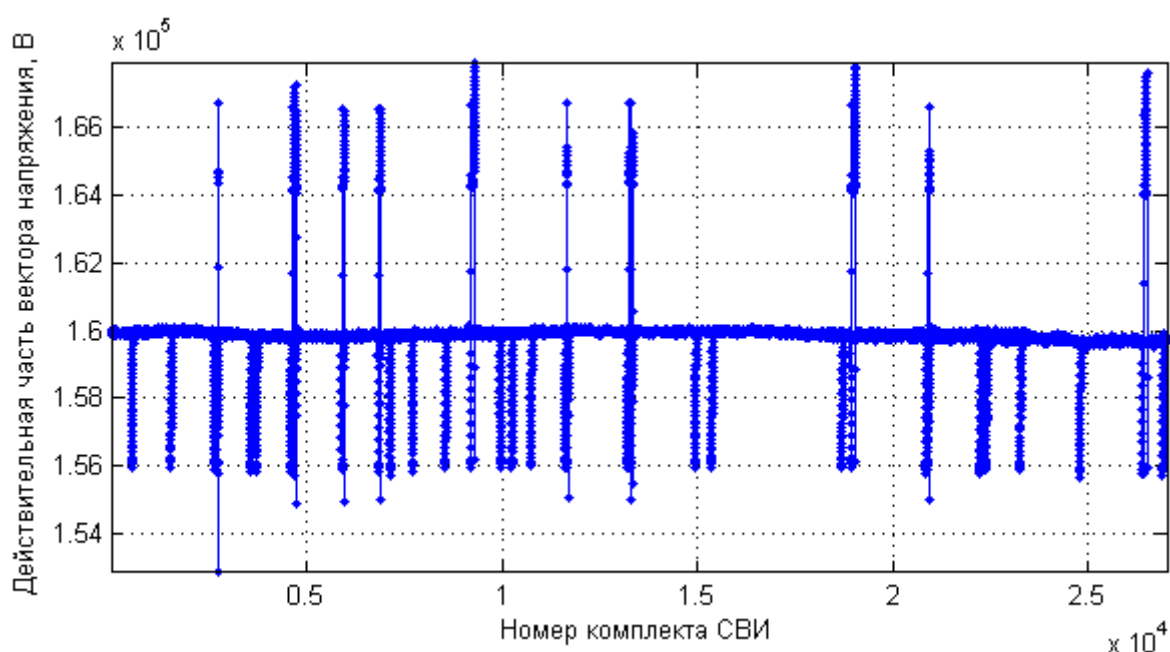


Рисунок 2.4 – Сигнал напряжения, содержащий множество импульсных помех

Чтобы получить достаточно хорошую оценку того, что можно считать «типичной» флуктуацией, необходимо обработать достаточно большой массив измерений (по меньшей мере – несколько тысяч точек данных). В противном же случае статистический анализ может оказаться недостаточно корректным, и в результате либо импульсные помехи будут не полностью отфильтрованы, либо будет удалено слишком много нормальных точек данных, не связанных с помехами. Отметим, однако, что даже при обработке большого массива измерений нет никакой гарантии, что все помехи будут

обнаружены и удалены со стопроцентной точностью: для этого необходимо, чтобы все подобные «выбросы» явно выделялись среди прочих значений сигнала, главным образом, с математической точки зрения. Тем не менее, разработанная методика, основные элементы которой можно описать блок-схемой на рисунке 2.5, позволяет удалить большинство помех при правильно заданной уставке (о том, каким образом ее выбирать, речь пойдет ниже).

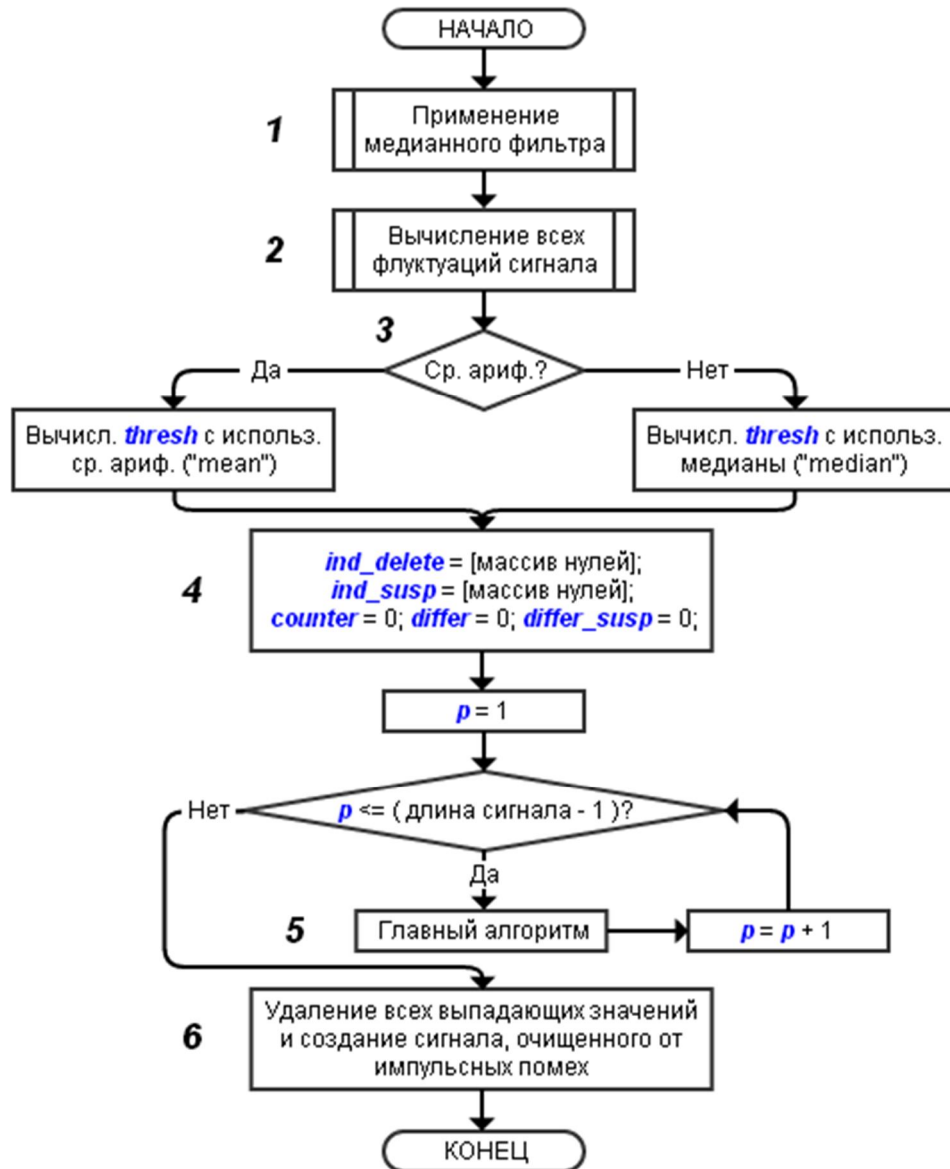


Рисунок 2.5 – Блок-схема, отражающая основные этапы цифровой обработки сигнала с целью обнаружения и удаления импульсных помех

На первом шаге (**блок 1** на рисунке 2.5) сигнал пропускается через медианный фильтр с целью удаления самой первой импульсной помехи, если

таковая имеется в начале обрабатываемого массива измерений. Дело в том, что главному алгоритму (**блок 5** на рисунке 2.5) требуется корректное «опорное» значение с самого начала, поэтому первая точка данных не должна быть «выбросом». Поскольку невозможно гарантировать, что так оно и будет, «опорное» значение можно задать, сглаживая начальную порцию данных посредством медианного фильтра. Такие фильтры часто используются для удаления резко отклоняющихся значений из экспериментальных данных [92, 93]. Заметим, что просто пропустить весь сигнал через медианный фильтр для решения поставленной задачи – очистки его от импульсных помех – нельзя, поскольку, наряду с удалением «выбросов», будут несколько изменены значения и остальных («нормальных») элементов. Таким образом, необходимо выполнить следующее:

- пропустить весь сигнал через достаточно длинный медианный фильтр. Длина фильтра должна равняться $(2 \cdot N + 1)$, где N – максимально возможная длительность типичной помехи;
- заменить первые $(N + 1)$ точек исходного сигнала соответствующими выходными значениями медианного фильтра. В результате первая точка нового сигнала должна быть «безопасной» для использования ее в качестве «опорной» при старте главного алгоритма (**блок 5** на рисунке 2.5);
- отсечь первые $(N + 1)$ точек после обработки всего сигнала, поскольку эти точки не принадлежали исходному сигналу.

Итак, определенная начальная порция данных в любом случае отбрасывается, чтобы гарантировать корректное функционирование разработанного метода удаления помех. На основании анализа большого массива реальных СВИ, использованных для тестирования метода, можно заключить, что длительность импульсных помех для этих СВИ обычно не превосходит 200 последовательных точек данных, что соответствует нескольким секундам измерений при частоте регистрации данных в 30

кадров в секунду. Исследуемые сигналы содержат более 20000 элементов, поэтому объемы потерь исходной информации в любом случае невелики.

В **блоке 2** на рисунке 2.5 осуществляется вызов подпрограммы вычисления всех флуктуаций сигнала. В **блоке 3** на основании заданных пользователем данных выбирается вид оценочной функции для анализа каждой флуктуации на предмет того, можно ли ее считать «нормальной», т.е. отражающей реальный процесс в ЭЭС. Уставка «*thresh*» (рисунок 2.5) – либо среднее арифметическое, либо медианное значение модулей всех вычисленных флуктуаций, умноженное на коэффициент, больший единицы. Предпочтительным вариантом является медиана: этот вид оценки известен устойчивостью к присутствию «выбросов» в экспериментальных данных, поэтому наличие множества импульсных помех в СВИ не слишком повлияет на значение уставки «*thresh*».

В **блоке 4** инициализируются некоторые переменные, используемые далее в главном алгоритме (**блок 5**). Ниже опишем, какую информацию несут эти переменные.

Наличие изменения в значении сигнала, превышающего «*thresh*», не обязательно связано с присутствием импульсной помехи. Изменения напряжений и токов обычно достаточно плавные, однако возможны «скачки» при переходе к новому уровню сигнала, после чего СВИ вновь продолжают плавные изменения (иллюстрация подобного поведения измерений представлена на рисунке 2.6). В связи с этим необходимо уметь отличать настоящую помеху от изменений значений СВИ, отражающих реальные процессы в ЭЭС. В разработанном методе анализируется длина «подозрительной» порции данных. Если она достаточно велика (превышает длительность типичной помехи), из сигнала она не удаляется. Здесь необходимо учесть еще одну возможную ситуацию: внутри «подозрительной» порции сигнала также могут быть «выбросы». Если эта порция в итоге не будет удалена, все помехи внутри нее должны быть отфильтрованы. Данное обстоятельство обуславливает необходимость

контролировать два типа индексов элементов: «*ind_delete*» для элементов, подлежащих безусловному отбрасыванию, и «*ind_susp*» для точек данных, которые необходимо удалить из «подозрительной» порции сигнала, если таковая в итоге не будет расценена как импульсная помеха в связи с большой длительностью. Переменная «*counter*» подсчитывает количество следующих друг за другом «подозрительных» элементов. Две другие переменные в **блоке 4** (рисунок 2.5) имеют следующий смысл: «*differ*» – разность между измерением внутри «подозрительной» группы и последней принятой точкой данных, не принадлежащей «подозрительной» группе («глобальная» разность); «*differ_susp*» – разность между точкой внутри «подозрительной» группы и последней «нормальной» точкой в этой группе, которая будет сохранена, если «подозрительная» группа не будет вырезана из сигнала целиком («локальная» разность).

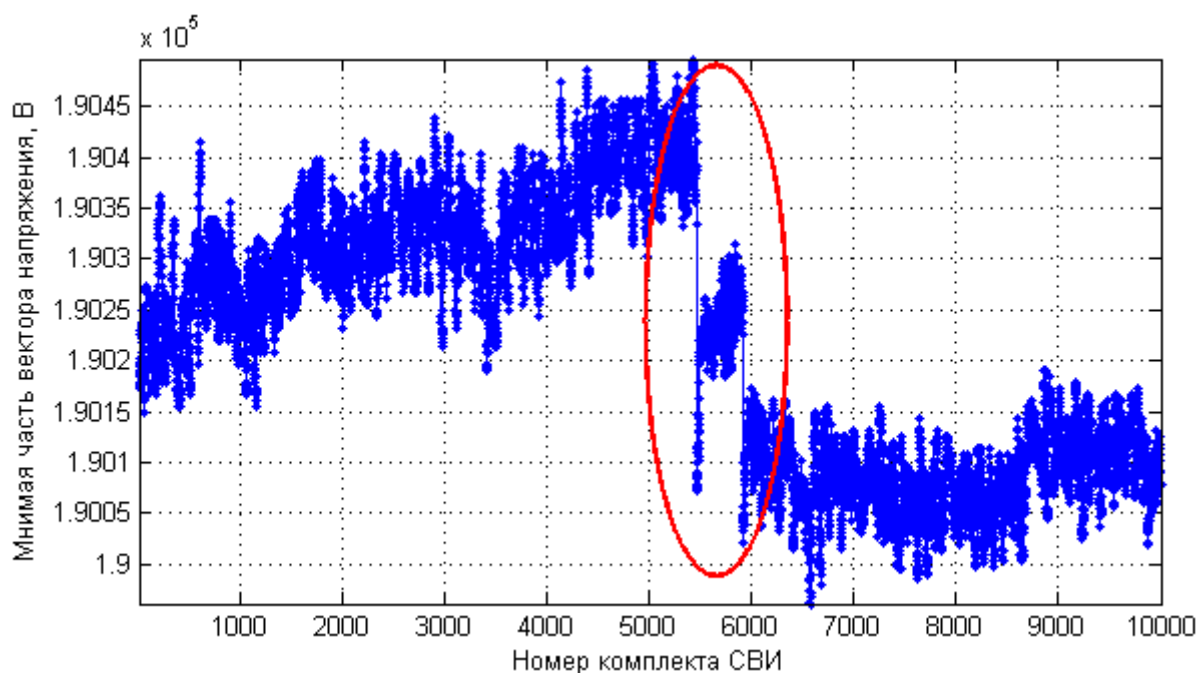


Рисунок 2.6 – Иллюстрация скачкообразного изменения в сигнале напряжения, не связанного с наличием импульсной помехи

В **блоке 6** (рисунок 2.5) все детектированные алгоритмом помехи вырезаются из сигнала наряду с первыми ($N+1$) точками, в результате чего

генерируется очищенный от помех массив СВИ (длина которого в любом случае короче по сравнению с длиной оригинального массива).

Рассмотрим теперь, что происходит в главном блоке алгоритма (блок 5 на рисунке 2.5). Последовательность операций, сокрытых блоком 5, представлена на рисунке 2.7.

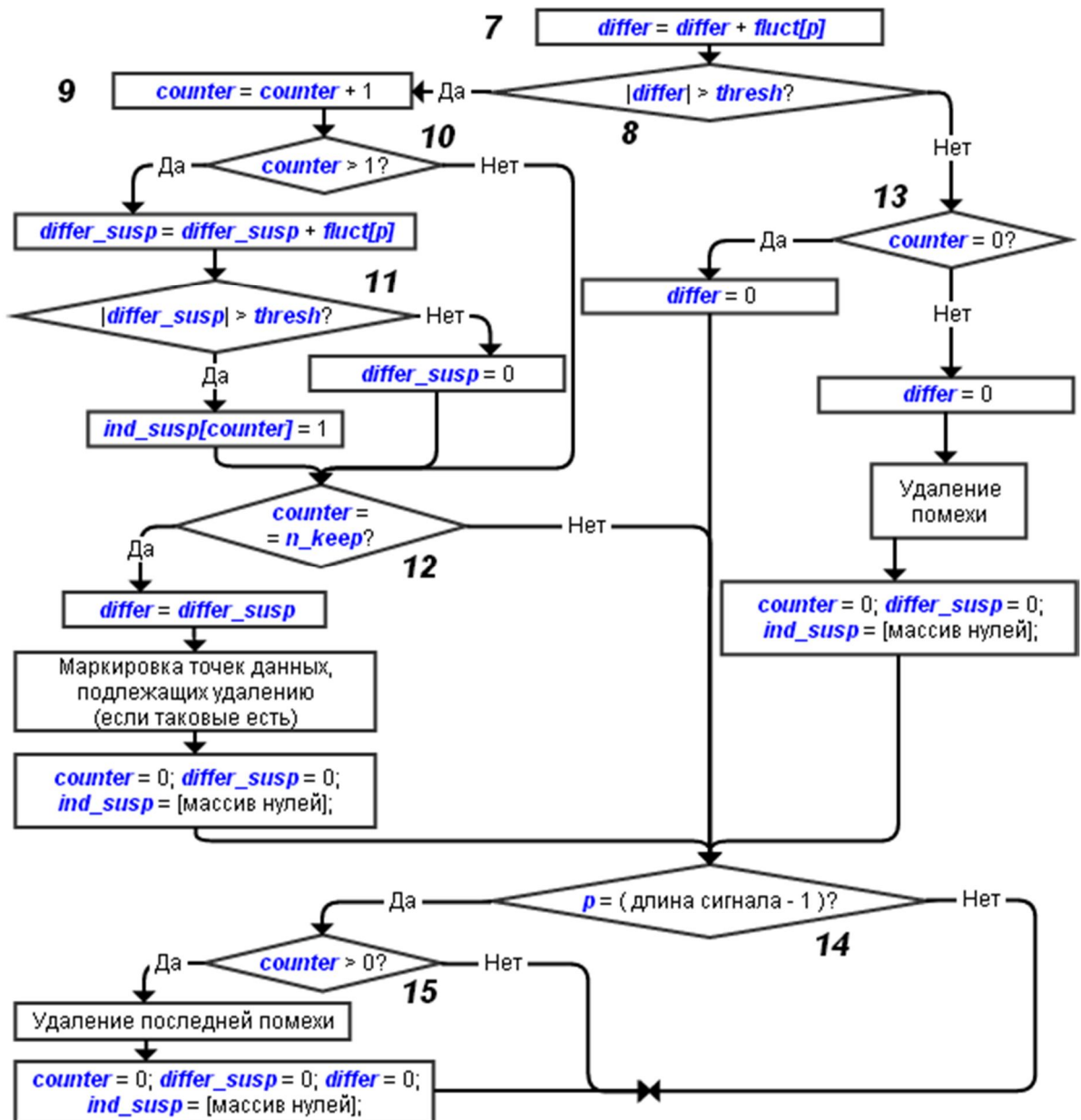


Рисунок 2.7 – Блок-схема главного этапа цифровой обработки массива СВИ с целью обнаружения и удаления импульсных помех

В блоке 7 (рисунок 2.7) осуществляется обновление «глобальной» разности, что позволяет определить отличие между текущей точкой и

последним принятым значением.

В **блоке условного оператора 8** выполняется сравнение модуля «глобальной» разности с уставкой «*thresh*». Превышение уставки свидетельствует о том, что обрабатываемая точка принадлежит к «подозрительной» группе. После обновления счетчика «*counter*» в **блоке 9** осуществляется следующее ветвление алгоритма: если «*counter*» больше 1 (**блок 10**), «подозрительная» группа точек была обнаружена на более ранней итерации, поэтому требуется обновлять «локальную» разность «*differ_susp*» и детектировать «выбросы» внутри этой группы. Если значение «*differ_susp*» превышает уставку (**блок условного оператора 11**), конечная точка рассматриваемой флуктуации «*fluct[p]*» точно будет удалена из сигнала, а если нет – «локальная» разность обнуляется, а конечная точка флуктуации, напротив, становится новым «опорным» значением на следующей итерации (если алгоритмом будут выбраны те же ветвления).

В **блоке 12** проверяется, достиг ли счетчик значения «*n_keep*» – минимально допустимого количества последовательных элементов сигнала, при котором текущая «подозрительная» группа не будет считаться «выбросом». Задаваемая величина «*n_keep*», очевидно, должна превышать длительность типичной помехи. Если соотношение в **блоке 12** выполняется, обновляется «глобальная» разность, отмечаются (для последующего удаления) помехи, обнаруженные в пределах «подозрительной» группы, а также обнуляются значения «*counter*», «*differ_susp*» и «*ind_susp*». Значение «глобальной» разности «*differ*» в этом случае не обнуляется, поскольку возможна ситуация, при которой один или более последних элементов «подозрительной» группы окажутся «выбросами», т.е. будут в итоге удалены из сигнала при сохранении всех остальных элементов группы. Значение «*differ*» при этом должно унаследовать последнее значение «локальной» разности.

Условие в **блоке 13** проверяется в том случае, если текущая «глобальная» разность не превышает заданную уставку (**блок 8**). Последнее

означает либо то, что новая «подозрительная» группа точек пока не обнаружена, либо то, что детектирован конечный элемент очередной импульсной помехи. В первом случае («*counter*» равен нулю) достаточно обнулить «глобальную» разность перед обработкой очередной флуктуации. Если же значение «*counter*» больше нуля, последняя «подозрительная» группа точек и в самом деле оказалась импульсной помехой, поэтому запоминаются индексы элементов, образующих эту помеху, с целью ее последующего удаления из обрабатываемого массива данных. Параметры «*counter*», «*differ*», «*differ_susp*» и «*ind_susp*» при этом обнуляются.

Самая последняя флуктуация сигнала требует отдельного анализа (**блок 14**), иначе последняя найденная помеха может быть в итоге не отфильтрована. Если значение счетчика «*counter*» больше нуля (**блок 15**), справедливы следующие утверждения: 1) алгоритм обрабатывал «подозрительную» группу точек; 2) счетчик не достиг значения «*n_keep*». «Подозрительная» группа соответственно рассматривается как помеха, подлежащая удалению при формировании итогового массива СВИ.

2.2.2 Результаты вычислительных экспериментов. Изложенный выше метод, направленный на детектирование и удаление импульсных помех из массивов СВИ, реализован в виде функции в программном обеспечении MATLAB. Перед применением функции к массивам векторных измерений она была успешно протестирована на специально сгенерированных тестовых сигналах, содержащих «выбросы». Результаты соответствующих экспериментов изложены в [94].

Рассмотрим результаты верификации метода на массиве реальных данных, образованных мнимыми частями векторов тока фазы А, рассчитанными УСВИ на ВЛЭП напряжением 345 кВ. Исходный сигнал состоит из 26772 элементов. На основе анализа большого массива разнотипных СВИ для той же ВЛЭП можно заключить, что продолжительность импульсной помехи не превышает 200 последовательных точек данных, поэтому значение «*n_keep*» (**блок 12** на рисунке 2.7) было

задано равным 200.

Тот факт, что обрабатываемый сигнал достаточно длинный, позволяет нам получить достаточно достоверные статистические характеристики. Выяснено, что совокупность разностей между каждыми двумя смежными точками данных – флуктуаций – для этого сигнала (и для многих других массивов, получаемых от УСВИ) имеет распределение, близкое к гауссовому, если пренебречь небольшим процентом наибольших по величине флуктуаций. СКО нормально распределенных данных можно оценить с использованием медианного абсолютного отклонения (МАО), умноженного на константу, равную 1,4826 [95]. С использованием этой оценочной функции, известной своей устойчивостью к «выбросам» в массиве данных, было рассчитано СКО флуктуаций для исследуемого сигнала тока. Если затем отбросить все флуктуации, превышающие величину, равную трем СКО, оставшиеся (составляющие 96,3 % от общего количества флуктуаций) будут распределены практически нормально (рисунок 2.8).

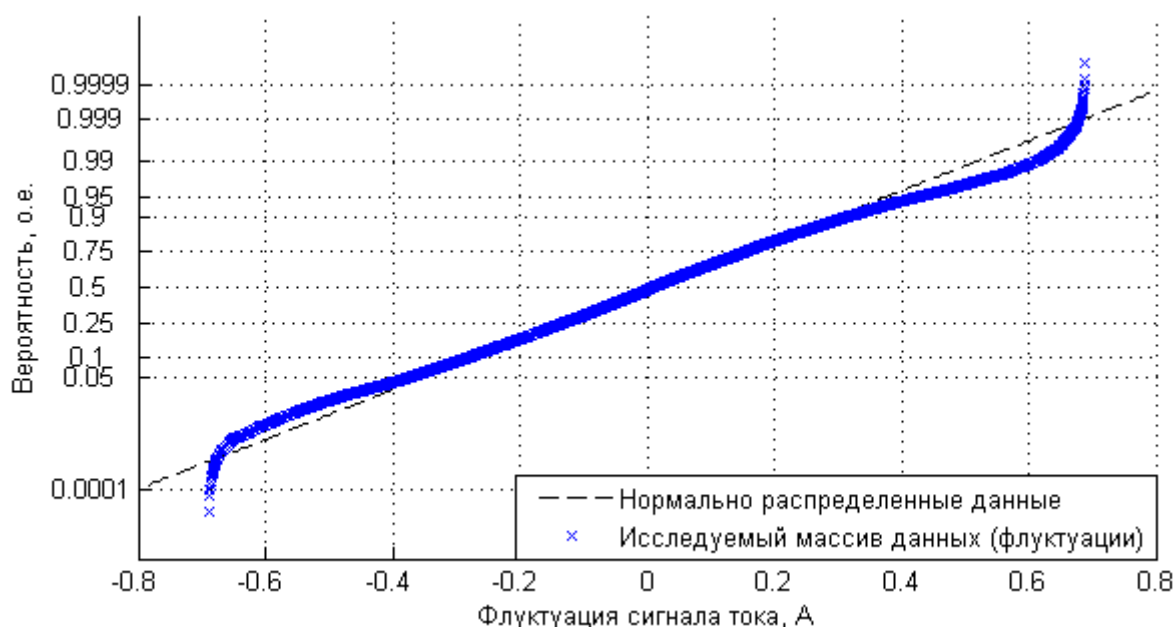


Рисунок 2.8 – Статистический характер распределения большинства флуктуаций для реального сигнала тока в сравнении с гауссовым распределением

Таким образом, можно считать, что совокупность разностей между

каждыми двумя смежными элементами массива СВИ (отдельно по действительной и мнимой частям синхрофазоров) в установившемся режиме имеет распределение, достаточно близкое к нормальному. Это обуславливает простой способ задания уставки для функционирования описанного выше метода фильтрации импульсных помех. Уставку, равную ($5 \times 1,4826 \times \text{МАО}$), можно считать целесообразной, поскольку отдельная точка, взятая из нормально распределенных данных, редко оказывается удаленной от математического ожидания более чем на несколько СКО. Данный подход к выбору уставки был применен к исследуемому сигналу, состоящему из 26772 элементов, в результате чего многочисленные импульсные помехи были успешно детектированы (выделенные другим цветом соединения точек на рисунке 2.9). Очищенный от помех сигнал, полученный после удаления 2994 элементов исходного массива данных, отличается существенно более плавным характером изменения (рисунок 2.10).

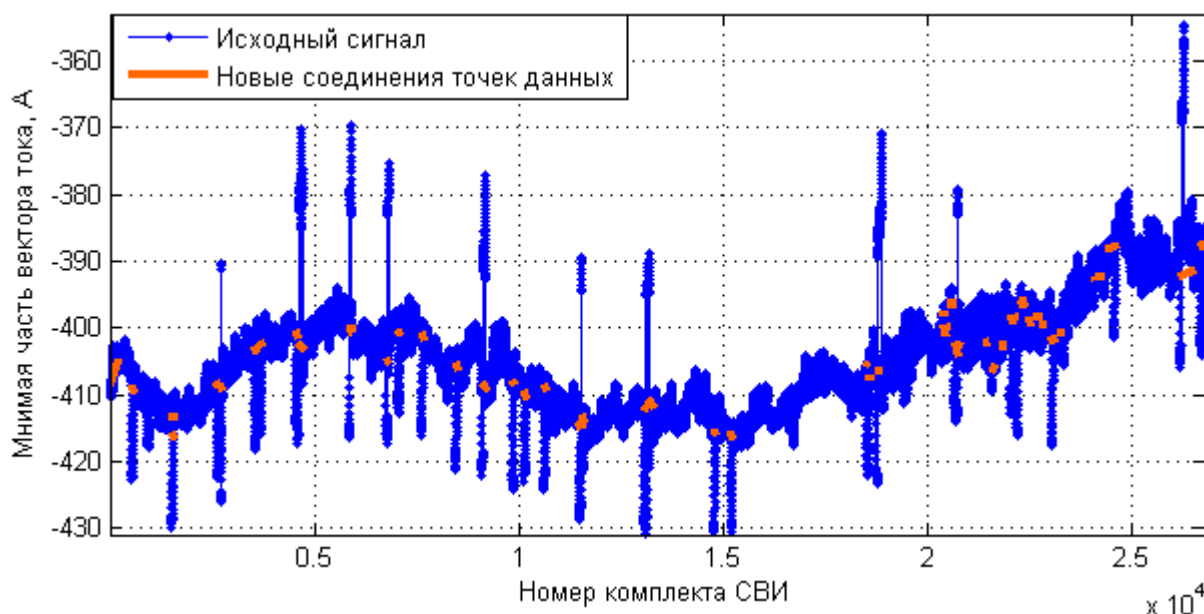


Рисунок 2.9 – Иллюстрация функционирования метода устранения импульсных помех на базе реального сигнала СВИ

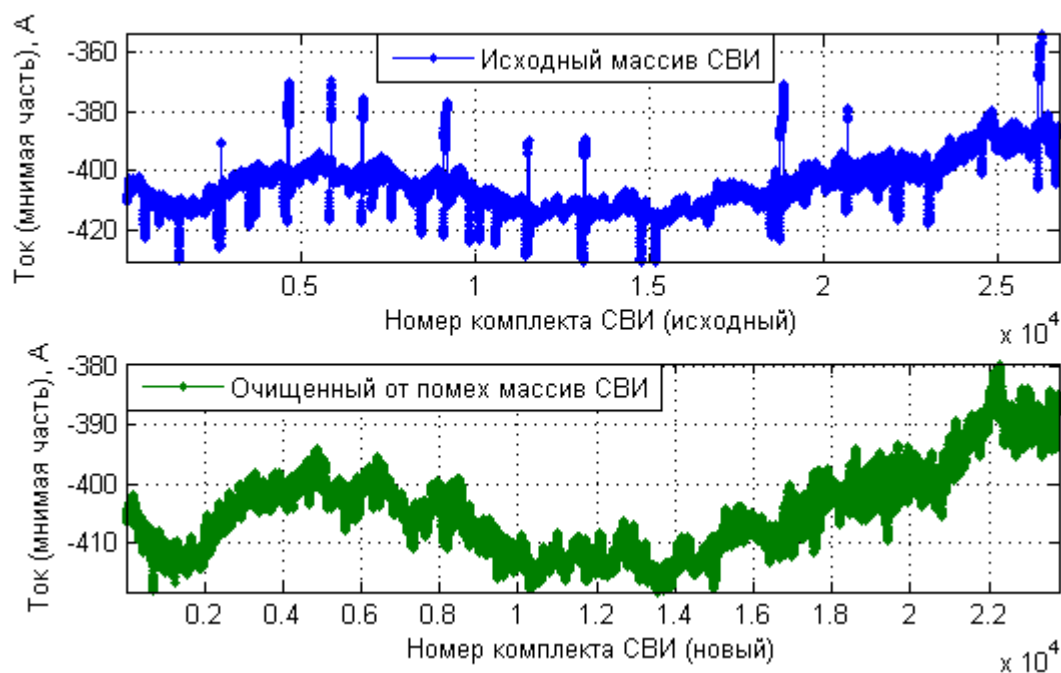


Рисунок 2.10 – Исходный сигнал тока, содержащий импульсные помехи (сверху), и очищенный от импульсных помех сигнал (снизу)

Таким образом, описанный метод детектирования и фильтрации «выбросов» в массивах СВИ хорошо справляется со своей задачей. Разумеется, отделить все импульсные помехи от «нормальных» данных со стопроцентной точностью возможно только в случае, если все эти помехи заметным образом выделяются на фоне всего остального сигнала (примерно так, как это выглядит на рисунке 2.10). В любом случае следует грамотно подходить к заданию уставки «*thresh*», отделяющей «подозрительные» порции сигнала: очевидно, при меньшем значении этого параметра помехи будут удалены с большей гарантией, однако будет больше отфильтровано и «нормальных» измерений. Уставка на уровне $(4 \div 5)$ СКО всех флуктуаций, вероятно, является оптимальным вариантом, как следует из изложенного выше статистического анализа. Необходимо также оценить требуемую алгоритму типичную продолжительность импульсной помехи для СВИ конкретного энергообъекта. Этого можно добиться посредством статистической обработки большого массива однотипных сигналов, регистрируемых УСВИ на протяжении длительного периода времени.

2.3 Определение статистических свойств «шумов», сопровождающих СВИ напряжений и токов в установившемся режиме

2.3.1 **Выяснение характера распределения вероятностей «шума» СВИ.** Как отмечено выше, СВИ, как и любые реальные измерения, сопровождаются случайными погрешностями, или «шумами». На рисунке 2.3 в качестве примера наглядно проиллюстрирован «шумный» характер изменения действующих значений тока, рассчитанных УСВИ. Задача идентификации актуальных параметров ВЛЭП на основе СВИ в установившемся режиме является «чувствительной» к наличию как систематических, так и случайных погрешностей векторных измерений [30]. В связи с этим важно понимать характер вероятностного распределения случайных погрешностей СВИ, а также иметь представление об уровне «шума» – хотя бы приблизительном – в конкретном массиве СВИ. Владение подобной информацией позволяет, во-первых, корректно моделировать случайные погрешности при тестировании методов идентификации параметров ВЛЭП, а во-вторых, исследовать варианты уменьшения «шума» (и, следовательно, его деструктивного влияния) с помощью различных цифровых фильтров.

Измерение тока или напряжения на выходе УСВИ можно описать следующим выражением [45, 96]:

$$\underline{A}_n = \underline{A}_t \cdot \underline{K} + \underline{\varepsilon}, \quad (2.1)$$

где \underline{A}_t – истинное (или «эталонное») значение синхрофазора напряжения или тока (всегда неизвестная величина); \underline{A}_n – значение того же синхрофазора, рассчитанное УСВИ; \underline{K} – комплексный коэффициент коррекции, учитывающий систематическую погрешность; $\underline{\varepsilon}$ – несистематическая (случайная) погрешность, иначе говоря – «шум» измерений.

Переменные в выражении (2.1) являются комплексными в связи с наличием погрешностей как по амплитуде, так и по фазе. Коэффициентом \underline{K}

учитываются, прежде всего, погрешности измерительных трансформаторов. В установившемся режиме, характеризуемом малыми вариациями напряжений и токов, эти погрешности можно считать приблизительно постоянными [97]. В отличие от систематических погрешностей, величина ε , отражающая прецизионность измерений [91], существенным образом изменяется от одного измерения к другому и по величине, и по знаку. Можно считать, что *случайные погрешности измерений имеют закон распределения, близкий к нормальному (гауссовому)*. Одним из оснований для подобного вывода является *центральная предельная теорема* [98, 99], утверждающая, что сумма достаточно большого количества независимых случайных величин будет иметь распределение вероятностей, близкое к гауссовому. На подстанции с УСВИ можно выделить несколько относительно независимых источников «шума» СВИ, позволяющих сделать заключение о правомерности применения теоремы:

- аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и прочие элементы УСВИ;
- аппаратура синхронизации по GPS/GLONASS;
- измерительные трансформаторы;
- иные источники «шума», связанные с кабельной разводкой и различными соединениями, через которые измеряемый вторичный сигнал передается с открытого распределительного устройства в общеподстанционный пункт управления.

Помимо центральной предельной теоремы, существуют и более практические основания считать случайные ошибки СВИ нормально распределенными. Для выделения «шумовой» составляющей сигнала можно воспользоваться *вейвлетным анализом*. Дело в том, что свойство ортогональности, присущее многим вейвлетам, приводит к тому, что гауссов «шум» остается таковым и после вейвлет-преобразования [95]. Более того, СКО «шума» можно оценить по СКО детализирующих коэффициентов на первом уровне разложения, используя значение MAO (см. п. 2.2.2 настоящей

диссертационной работы). На практике подобная оценка должна хорошо работать, если истинный сигнал («зашумленная» версия которого анализируется) достаточно «гладкий», а интервал его дискретизация (в нашем случае – интервал времени между двумя смежными синхрофазорами, выдаваемыми УСВИ) достаточно мал. Идея, таким образом, заключается в том, что истинные значения «зашумленного» сигнала просто не успевают существенно изменяться за малый отрезок времени между каждыми двумя смежными точками данных. Поэтому детализирующие коэффициенты на первом уровне вейвлет-разложения сигнала (представляющие наиболее высокочастотную его часть [100]) должны в основном содержать именно его «шумовую» составляющую.

Как отмечено выше (см. рисунок 2.3), прецизионность СВИ, получаемых от различных типов оборудования, может существенным образом различаться. В ходе исследования было выяснено (результаты соответствующего анализа подробно обсуждаются ниже), что СВИ токов, полученные от ЦРАП, в целом существенно более «шумные» по сравнению с аналогичными измерениями, сформированными терминалами РЗА с функцией СВИ. Визуально разница в прецизионности между двумя обозначенными типами оборудования может выглядеть приблизительно так, как это отражено на рисунке 2.3, а соответствующие оценки СКО «шума» отличаются в несколько раз. Если разложить «шумный» (от ЦРАП) сигнал тока с помощью одного из ортогональных вейвлетов – дискретного вейвлета Мейера («*dmey*» в MATLAB), то коэффициенты детализации на первом уровне разложения будут распределены практически нормально (рисунок 2.11). Более того, эти коэффициенты в целом существенно больше по модулю по сравнению с аналогичными коэффициентами, получаемыми при разложении более «гладкого» сигнала (от терминала РЗА с функцией СВИ), что является следствием значительно большей «зашумленности». Если бы совокупный «шум» СВИ не был гауссов, очевидно, распределение коэффициентов на рисунке 2.11 отличалось бы от нормального.

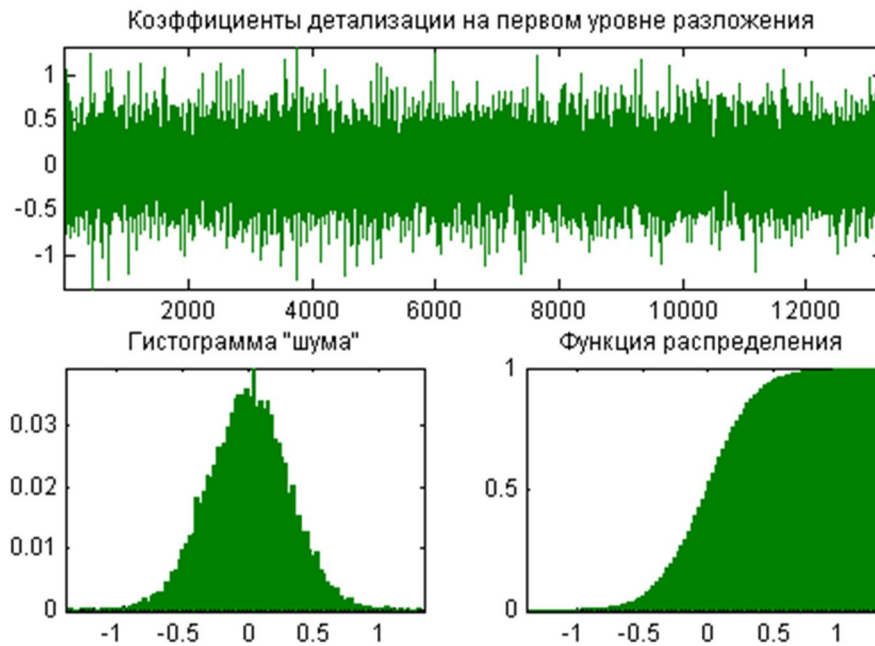


Рисунок 2.11 – Иллюстрация близкого к нормальному распределению детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения массива СВИ тока

Еще одним косвенным свидетельством гауссовой природы «шума» СВИ служат результаты следующего вычислительного эксперимента. На рисунке 2.12 представлен характер изменения действующих значений токов по концам короткой ВЛЭП (порядка 13 км), рассчитанных разнотипными УСВИ – ЦРАП в начале линии и терминалом РЗА с функцией СВИ в конце. Разница в прецизионности СВИ визуально прослеживается на рисунке 2.12 (в увеличенном масштабе картина схожа с представленной на рисунке 2.3); при этом очевидна высокая корреляция токов одноименных фаз (вследствие малой длины ВЛЭП): линейные коэффициенты корреляции составляют 0,9994, 0,9990 и 0,9993 для фаз А, В и С соответственно. Разности между токами по концам линии, вычисленные отдельно по каждой фазе, фактически распределены нормально (таблица 2.1), о чем свидетельствуют значения коэффициентов эксцесса (для нормального распределения равного трем при использовании стандартной функции «*kurtosis*» в MATLAB) и асимметрии (для нормального распределения равного нулю). При этом распределение для каждого из рассматриваемых массивов данных (например, для действующих значений тока фазы В в начале ВЛЭП) далеко от нормального. Таким

образом, можно полагать, что «шум» СВИ, главным образом исходящий от ЦРАП с функцией СВИ в начале линии и имеющий весомый вклад в значения разностей токов, имеет распределение, близкое к гауссовому.

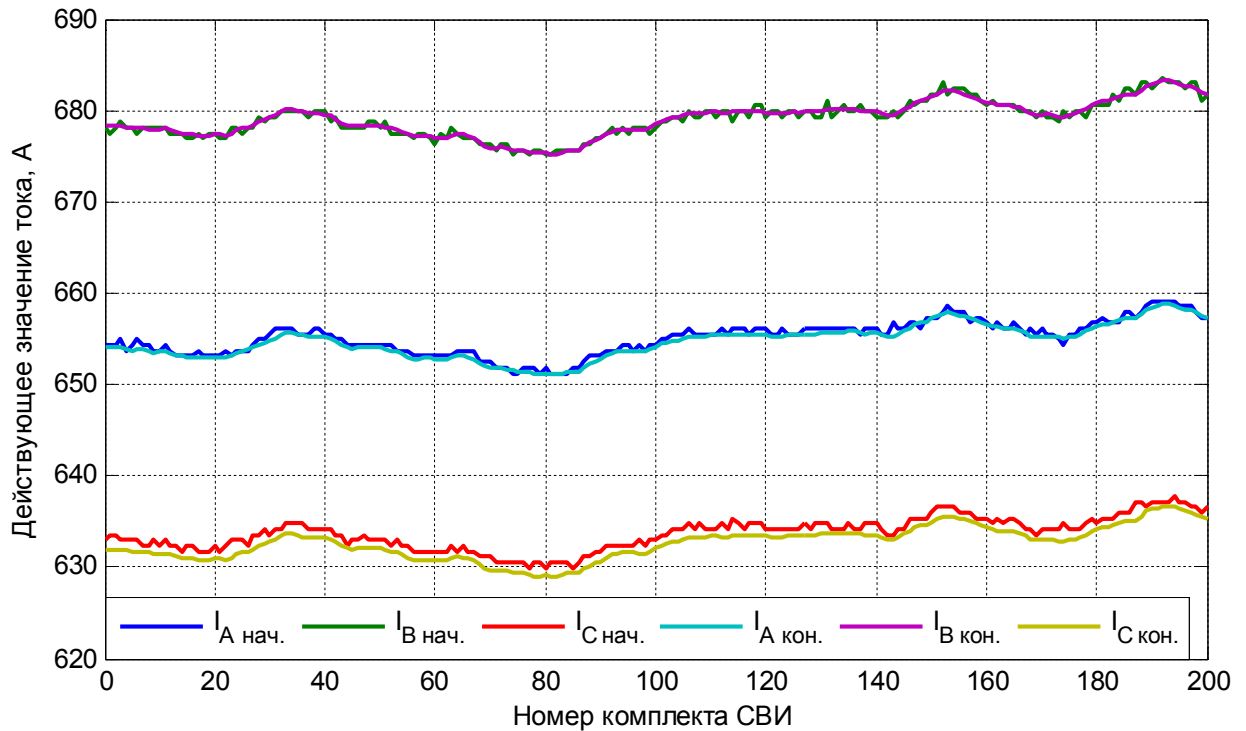


Рисунок 2.12 – Характер изменения действующих значений токов на короткой ВЛЭП, отражающий высокую корреляцию измерений и различную прецизионность УСВИ

Таблица 2.1 – Некоторые статистические характеристики разностей действующих значений токов, измеренных разнотипными УСВИ на двух сторонах короткой ВЛЭП

Сигнал (разность токов)	СКО, А	Коэффициент эксцесса	Коэффициент асимметрии
$ \dot{I} _{A \text{ нач.}} - \dot{I} _{A \text{ кон.}}$	0,3233	3,1776	-0,0342
$ \dot{I} _{B \text{ нач.}} - \dot{I} _{B \text{ кон.}}$	0,4211	2,9415	-0,0084
$ \dot{I} _{C \text{ нач.}} - \dot{I} _{C \text{ кон.}}$	0,3255	3,1414	-0,0172

2.3.2 Приблизительная оценка СКО «шума» СВИ: теоретические положения. Выяснив, что распределение вероятностей случайных ошибок СВИ имеет характер, близкий к нормальному, необходимо оценить СКО этих ошибок (или – альтернативно – их дисперсию). Этот параметр является

основным, позволяющим судить о «величине» случайных ошибок, а также количественно сравнивать «шумы» векторных измерений, выполненных различными типами регистраторов, например, ЦРАП и цифровыми устройствами РЗА (см. рисунки 2.3 и 2.12). Отметим, что для корректности математического анализа при определении СКО «шумов» необходимо выполнение следующих двух условий. Во-первых, необходимо обработать достаточно большой массив СВИ (несколько тысяч или десятки тысяч измерений) с целью получения достоверных статистических данных. Во-вторых, анализ необходимо проводить для действительных чисел: тождество, аналогичное уравнению (2.1), можно записать для амплитуды и фазового угла синхрофазора, а также для его вещественной и мнимой частей. Будем подразумевать, что приводимые ниже выражения для оценки СКО «шумов», а также алгоритмы цифровой фильтрации «шумов» оперируют вещественными числами.

Используя (2.1), разность двух смежных измерений в массиве данных можно записать в общем виде следующим образом:

$$A_{n,i+1} - A_{n,i} = (A_{t,i+1} - A_{t,i}) \cdot K + (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i), \quad (2.2)$$

или

$$\Delta A_{n,j} = \Delta A_{c,j} + (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i), \quad (2.3)$$

где $\Delta A_{n,j} = A_{n,i+1} - A_{n,i}$ – общее изменение сигнала (отражающее совокупный вклад истинных флуктуаций и ошибок измерений); $\Delta A_{c,j} = (A_{t,i+1} - A_{t,i}) \cdot K$ – истинное изменение сигнала, умноженное на коэффициент коррекции, учитывающий систематические погрешности; $(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)$ – слагаемое, вносимое случайными погрешностями – «шумами» – в измерениях $(i+1)$ и i соответственно.

Если имеются N комплектов СВИ (где N – четное), и из каждого четного измерения (2-го, 4-го, 6-го и т.д.) вычитается следующее непосредственно перед ним нечетное (1-е, 3-е, 5-е и т.д.), на основании (2.3)

получаем следующее:

$$\sum_{j=1}^{N/2} (\Delta A_{n,j})^2 = \sum_{j=1}^{N/2} \left[\Delta A_{c,j} + (\varepsilon_{2 \cdot j} - \varepsilon_{2 \cdot j-1}) \right]^2. \quad (2.4)$$

Для того чтобы выделить СКО случайных погрешностей, необходимо разложить на составляющие правую часть (2.4) и принять ряд допущений (аппроксимаций), справедливых при достаточно большом N . Детали соответствующего анализа подробно изложены в [96]. В итоге получается следующее соотношение для СКО флуктуаций сигнала $\Delta A_{n,j}$, образованных разностями всех смежных четных и нечетных измерений:

$$\sigma(\Delta A_n) \approx \sqrt{\frac{1}{\frac{N}{2}-1} \sum_{j=1}^{N/2} (\Delta A_{c,j})^2 + 2 \cdot \sigma^2(\varepsilon)}, \quad (2.5)$$

откуда непосредственно следует

$$\sigma(\varepsilon) < \frac{\sigma(\Delta A_n)}{\sqrt{2}}. \quad (2.6)$$

Выражение (2.6) позволяет получить предельные оценки СКО «шума» СВИ: СКО не может превышать значения в правой части неравенства (2.6), поскольку $\sigma(\Delta A_n)$ неизбежно включает в себя истинные флуктуации сигнала.

Помимо описанной выше методики, СКО случайных погрешностей СВИ можно оценить с применением вейвлет-анализа. Очевидность подобного подхода логично следует из отмеченного в п. 2.3.1 свойства вейвлетного преобразования, позволяющего «увидеть» наиболее высокочастотную порцию сигнала, во многом ассоциируемую с «шумом», на первом уровне вейвлет-разложения. Опыт анализа реальных массивов СВИ свидетельствует о том, что достаточно большое количество ортогональных вейвлетов способны успешно справиться с задачей определения СКО случайных погрешностей СВИ (методика оценки функционирования вейвлетов на предмет их способности оценивать уровень «шума» в сигнале

изложена в [101]). Поэтому в настоящем исследовании были использованы пять различных вейвлет-функций, имеющих в составе программного обеспечения MATLAB/Wavelet Toolbox и показавших хорошие результаты в ходе предварительного анализа (в частности, «*dmeu*», «*bior 4.4*», «*sym5*»), а затем пять вычисленных значений СКО усреднялись. В каждом случае значение СКО рассчитывалось с помощью МАО, умноженного на константу, равную 1,4826 (см. п. 2.2.2 настоящей диссертации).

2.3.3 Приблизительная оценка СКО «шума» СВИ: результаты расчетов. Для осуществления вычислительных экспериментов автору исследования были доступны массивы СВИ с двух сторон трех различных ВЛЭП напряжением 345 кВ. Одна из линий (которую будем условно обозначать «Л1») характеризуется тем, что по обоим ее концам установлены однотипные УСВИ, а именно – функция СВИ «защита» в терминал РЗА (рисунок 2.13). Организация векторных измерений на двух других ВЛЭП следующая: на одной стороне линии СВИ выполняются устройством РЗА, а на противоположной – ЦРАП (рисунок 2.14). Будем обозначать ВЛЭП с подобной конфигурацией СВИ «Л2» и «Л3».

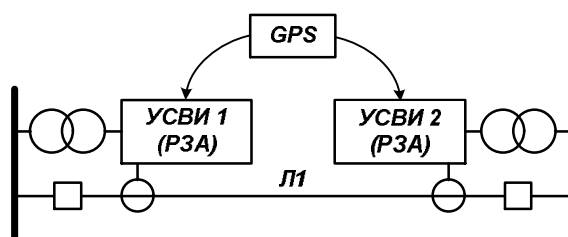


Рисунок 2.13 – Общая идеология организации СВИ по концам линии «Л1»

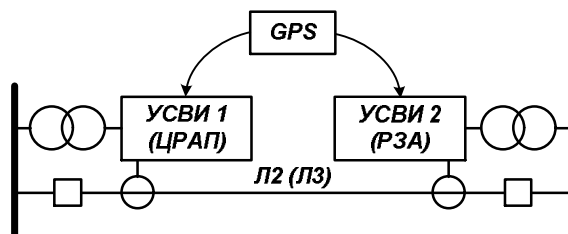


Рисунок 2.14 – Общая идеология организации СВИ по концам линии «Л2» («Л3»)

Поскольку для реализации СВИ на рассматриваемых ВЛЭП

используются различные типы регистраторов, интересным представляется не только соотнести результаты определения СКО случайных погрешностей по двум методикам, рассмотренным в п. 2.3.2, но и количественно сравнить оценки уровней «шума» для случаев с ЦРАП и с терминалом РЗА. В таблицах 2.2–2.4 отражены значения СКО «шума», рассчитанные с помощью вейвлет-анализа, предельные оценки СКО, полученные на основе выражения (2.6), а также – в последних двух столбцах каждой из таблиц – отношения двух соответствующих значений СКО и средние значения этих отношений по отдельным группам сигналов.

Таблица 2.2 – Приблизительные оценки СКО случайных погрешностей СВИ для линии «Л1» (рисунок 2.13) по двум различным методикам

Сигнал	СКО «шума» через вейвлетный анализ		СКО «шума» на основе выражения (2.6), менее чем		Отношение оценок СКО «шума» по выражению (2.6) и посредством вейвлетного анализа	
	По отдельным сигналам	В среднем	По отдельным сигналам	В среднем	По отдельным сигналам	В среднем
$Re(U_B)$, нач., В	12,707	10,930	26,128	22,976	2,056	2,107
$Im(U_B)$, нач., В	10,303		21,825		2,118	
$Re(U_C)$, нач., В	11,304		23,419		2,072	
$Im(U_C)$, нач., В	9,404		20,531		2,183	
$Re(U_A)$, кон., В	3,589	7,908	8,562	17,648	2,386	2,256
$Im(U_A)$, кон., В	7,903		20,277		2,566	
$Re(U_B)$, кон., В	10,650		22,147		2,080	
$Im(U_B)$, кон., В	8,485		17,847		2,103	
$Re(U_C)$, кон., В	7,905		16,890		2,137	
$Im(U_C)$, кон., В	8,914		20,164		2,262	
$Re(I_A)$, нач., А	0,039	0,037	0,111	0,131	2,828	3,629
$Im(I_A)$, нач., А	0,029		0,156		5,337	
$Re(I_B)$, нач., А	0,036		0,134		3,746	
$Im(I_B)$, нач., А	0,041		0,131		3,187	
$Re(I_C)$, нач., А	0,037		0,156		4,248	
$Im(I_C)$, нач., А	0,040		0,098		2,426	
$Re(I_A)$, кон., А	0,040	0,041	0,117	0,138	2,958	3,394
$Im(I_A)$, кон., А	0,038		0,164		4,314	
$Re(I_B)$, кон., А	0,042		0,139		3,295	
$Im(I_B)$, кон., А	0,044		0,139		3,149	
$Re(I_C)$, кон., А	0,040		0,168		4,196	
$Im(I_C)$, кон., А	0,041		0,101		2,451	

Таблица 2.3 – Приблизительные оценки СКО случайных погрешностей СВИ для линии «Л2» (рисунок 2.14) по двум различным методикам

Сигнал	СКО «шума» через вейвлетный анализ		СКО «шума» на основе выражения (2.6), менее чем		Отношение оценок СКО «шума» по выражению (2.6) и посредством вейвлетного анализа	
	По отдельным сигналам	В среднем	По отдельным сигналам	В среднем	По отдельным сигналам	В среднем
$Re(U_B)$, нач., В	23,702	16,472	30,310	22,422	1,279	1,416
$Im(U_B)$, нач., В	9,897		15,844			
$Re(U_C)$, нач., В	8,693		12,902			
$Im(U_C)$, нач., В	23,598		30,631			
$Re(U_A)$, кон., В	8,923	9,861	12,434	13,754	1,394	1,525
$Im(U_A)$, кон., В	11,862		15,480			
$Re(U_B)$, кон., В	14,303		17,397			
$Im(U_B)$, кон., В	4,200		9,704			
$Re(U_C)$, кон., В	6,698		11,422			
$Im(U_C)$, кон., В	13,181		16,087			
$Re(I_A)$, нач., А	0,285	0,355	0,325	0,387	1,140	1,105
$Im(I_A)$, нач., А	0,303		0,352			
$Re(I_B)$, нач., А	0,484		0,484			
$Im(I_B)$, нач., А	0,453		0,472			
$Re(I_C)$, нач., А	0,312		0,363			
$Im(I_C)$, нач., А	0,292		0,328			
$Re(I_A)$, кон., А	0,049	0,053	0,148	0,159	3,011	3,045
$Im(I_A)$, кон., А	0,056		0,170			
$Re(I_B)$, кон., А	0,062		0,142			
$Im(I_B)$, кон., А	0,048		0,187			
$Re(I_C)$, кон., А	0,049		0,181			
$Im(I_C)$, кон., А	0,054		0,124			

Таблица 2.4 – Приблизительные оценки СКО случайных погрешностей СВИ для линии «Л3» (рисунок 2.14) по двум различным методикам

Сигнал	СКО «шума» через вейвлетный анализ		СКО «шума» на основе выражения (2.6), менее чем		Отношение оценок СКО «шума» по выражению (2.6) и посредством вейвлетного анализа	
	По отдельным сигналам	В среднем	По отдельным сигналам	В среднем	По отдельным сигналам	В среднем
$Re(U_B)$, нач., В	8,803	9,593	13,055	12,028	1,483	1,261
$Im(U_B)$, нач., В	9,981		10,774			
$Re(U_C)$, нач., В	9,673		12,314			
$Im(U_C)$, нач., В	9,917		11,969			

Сигнал	СКО «шума» через вейвлетный анализ		СКО «шума» на основе выражения (2.6), менее чем		Отношение оценок СКО «шума» по выражению (2.6) и посредством вейвлетного анализа	
	По отдельным сигналам	В среднем	По отдельным сигналам	В среднем	По отдельным сигналам	В среднем
$Re(U_A)$, кон., В	9,655	10,579	13,226	14,958	1,370	1,540
$Im(U_A)$, кон., В	12,805		17,440		1,362	
$Re(U_B)$, кон., В	15,521		19,505		1,257	
$Im(U_B)$, кон., В	4,101		9,276		2,262	
$Re(U_C)$, кон., В	7,115		12,263		1,724	
$Im(U_C)$, кон., В	14,278		18,037		1,263	
$Re(I_A)$, нач., А	0,287	0,320	0,303	0,336	1,059	1,050
$Im(I_A)$, нач., А	0,344		0,357		1,038	
$Re(I_B)$, нач., А	0,328		0,351		1,070	
$Im(I_B)$, нач., А	0,297		0,309		1,039	
$Re(I_C)$, нач., А	0,341		0,355		1,042	
$Im(I_C)$, нач., А	0,327		0,344		1,053	
$Re(I_A)$, кон., А	0,027	0,031	0,062	0,066	2,262	2,095
$Im(I_A)$, кон., А	0,034		0,070		2,059	
$Re(I_B)$, кон., А	0,031		0,056		1,788	
$Im(I_B)$, кон., А	0,031		0,075		2,395	
$Re(I_C)$, кон., А	0,038		0,088		2,340	
$Im(I_C)$, кон., А	0,028		0,048		1,726	

ПРИМЕЧАНИЕ 1. Обозначение сигнала в первом столбце каждой из таблиц (таблицы 2.2–2.4) означает вещественную или мнимую часть синхрофазора напряжения или тока в начале или конце ВЛЭП. Примеры: « $Re(U_C)$, кон., В» – вещественная часть вектора напряжения фазы С в конце ВЛЭП (в вольтах); « $Im(I_A)$, нач., А» – мнимая часть вектора тока фазы А в начале ВЛЭП (в амперах).

ПРИМЕЧАНИЕ 2. В таблицах 2.2–2.4 отсутствуют сигналы « $Re(U_A)$, нач., В» и « $Im(U_A)$, нач., В». Это обстоятельство обусловлено тем, что вектор напряжения фазы А в начале линии был принят в качестве «опорного», относительно которого рассматривалось расположение всех других векторов напряжения и тока на комплексной плоскости (подробности изложены в [96]).

Анализ числовых данных, представленных в таблицах 2.2–2.4, позволяет заключить следующее. Во-первых, оценки уровней «шумов», выполненные посредством вейвлетного анализа, в целом существенно ниже соответствующих оценок, полученных на основе выражения (2.6). Это легко объясняется тем, что, как отмечено выше, результаты вычислений по (2.6) – предельные оценки СКО случайных погрешностей (поэтому в

соответствующем столбце каждой из трех таблиц указано «менее чем»). *В-вторых*, для линии «Л1», характеризуемой тем, что функция СВИ интегрирована в терминалы РЗА по обеим сторонам ВЛЭП (рисунок 2.13), получены близкие оценки СКО «шума» в токовых сигналах в начале и в конце линии вне зависимости от методики (таблица 2.2). Этого нельзя сказать про ВЛЭП «Л2» и «Л3», на каждой из которых используются два различных типа регистраторов (рисунок 2.14): векторные измерения токов в начале ВЛЭП, осуществляемые ЦРАП, – существенно более «шумные» по сравнению с аналогичными измерениями в конце линии, выполняемыми терминалом РЗА (таблицы 2.3 и 2.4). *В-третьих*, оценки СКО случайных погрешностей для векторов тока, полученных от ЦРАП, фактически одинаковы по обеим методикам, на что указывает отношение результатов, близкое к единице (предпоследнее число крайнего правого столбца в таблицах 2.3 и 2.4). Очевидно, это связано с тем, что флуктуации сигнала, используемые в выражении (2.6), во многом обусловлены именно «шумовой» составляющей. Данный тезис наглядно подтверждается характером детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения (рисунок 2.11), а также поведением графиков изменения действующих значений тока (рисунок 2.3), из которых видно, что измерения тока в начале линии (выполняемые ЦРАП) – значительно более «шумные», нежели на другой ее стороне. Соответствующие оценки СКО, полученные путем вейвлетного анализа, фактически отличаются на порядок (последние два числа третьего столбца в таблицах 2.3 и 2.4).

2.4 Выявление наиболее эффективных методов цифровой фильтрации СВИ токов

2.4.1 Постановка задачи. Результаты, представленные в п. 2.3, приводят к необходимости проанализировать, возможно ли несколько откорректировать существенно менее прецизионные СВИ токов (те, что

получены от ЦРАП с функцией СВИ) посредством цифровой фильтрации, а также выяснить, какие именно типы фильтров следует применять для этой цели. Слишком «шумные» векторные измерения могут являться серьезным препятствием для корректного функционирования методов определения параметров ВЛЭП [30].

Поставленная задача, по мнению автора, недостаточно проработана в литературных источниках. Известны несколько публикаций, в которых используются фильтры скользящего среднего и медианные фильтры для сглаживания высокочастотных колебаний и выявления т.н. «тренда» в массиве данных, полученных от УСВИ [102, 103]. Однако в нашем случае целью является не просто сглаживание сигнала: необходимо подавить осцилляции, связанные с «шумом», сохраняя при этом максимум истинной информации, содержащейся в обрабатываемом сигнале.

2.4.2 Краткий обзор рассматриваемых методов цифровой фильтрации массивов СВИ. 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. Общее количество протестированных фильтров составило 4285. Краткая сводка по проанализированным методам фильтрации представлена ниже.

Скользящее среднее и треугольные фильтры. Скользящее среднее представляет собой среднее арифметическое группы последовательных дискретных значений сигнала [103]. В исследовании были рассмотрены фильтры скользящего среднего следующих порядков¹: 3, 5, 7, 9, 11 и 13. Результаты предварительного анализа показали, что использование более длинных окон заведомо лишено смысла. Причина этого, очевидно, заключается во все более существенном сглаживании сигнала и, следовательно, в потере все большего количества истинной информации

¹ Под «порядком» здесь подразумевается размер окна данных (иначе говоря – количество последовательных дискретных значений сигнала).

наряду с уменьшением уровня «шума».

В отличие от обычного скользящего среднего, в треугольном фильтре каждой дискретной выборке сигнала, входящей в текущее окно данных, присваивается определенный вес; при этом наибольшим весом обладает центральная точка окна. Как и для скользящего среднего, в исследовании были задействованы окна размером от 3 до 13 (только нечетные числа).

Дополнительный «прогон» сигнала через фильтр с конечной импульсной характеристикой иногда способен обеспечить более качественный результат, поэтому в вычислительных экспериментах также анализировались результаты фильтрации сигнала при использовании одного и того же варианта окна дважды или три раза подряд.

Медианные фильтры. Данный тип фильтра является нелинейным и часто применяется в цифровой обработке сигналов, поскольку позволяет избежать искажения граничных точек данных [93]. Метод фильтрации прост: если окно данных содержит нечетное количество элементов, величина на выходе фильтра соответствует срединному элементу после сортировки всех значений в окне по возрастанию (убыванию). В исследовании были рассмотрены окна размерами от 3 до 13, а также несколько каскадов, каждый из которых состоит из медианного фильтра и следующего за ним фильтра скользящего среднего.

Фильтры Savitzky-Golay (SG). Данные цифровые фильтры обычно применяются для сглаживания сигналов, содержащих достаточно широкий диапазон частот. Они были спроектированы с целью реализации эффективного способа удаления «шума» при одновременном сохранении высокочастотных составляющих, соответствующих истинной информации [104]. Идея метода основана на подборе полиномиальной зависимости для группы последовательных значений сигнала с помощью МНК. Конкретный фильтр SG задается двумя параметрами: длиной окна « f » и порядком полинома « k ». При этом значение « k » должно быть меньше « f », а « f » может быть только нечетным. Кроме того, если $k = f - 1$, никакого сглаживания не

осуществляется. Принимая в расчет все эти особенности, в вычислительных экспериментах использовались следующие сочетания « k » и « f »: $\{k = 0, f = 3, 5, 7, 9, 11, 13\}$; $\{k = 1, f = 3, 5, 7, 9, 11, 13\}$; $\{k = 2, f = 5, 7, 9, 11, 13\}$; $\{k = 3, f = 5, 7, 9, 11, 13\}$; $\{k = 4, f = 7, 9, 11, 13\}$; $\{k = 5, f = 7, 9, 11, 13\}$.

Быстрое преобразование Фурье (БПФ). Этот способ цифровой обработки сигнала широко используется для нахождения его частотного спектра. Данный вид преобразования особенно эффективен для достаточно «гладких» синусоидальных сигналов, чего нельзя сказать про применение его к сигналам, описывающим переходные процессы [105]. Одним из способов удаления «шума» из сигнала с помощью БПФ является обнуление части компонентов частотного спектра и применении инверсного БПФ к модифицированному спектру. Предварительный анализ доступных массивов, полученных с УСВИ, показал, что спектры, полученные с помощью БПФ, являются достаточно сложными для анализа. Энергия, соответствующая многим частотным компонентам исходного сигнала, будет распределена по всему спектру, что представляет сложности при выборе порогового значения, отделяющего элементы спектра, подлежащие обнулению. Основываясь на результатах предварительного «прогона» имеющихся массивов СВИ через БПФ, было решено оставлять в спектре до 20 % элементов (10 % в левой части спектра и столько же справа). При этом в ходе вычислительных экспериментов было протестировано 20 различных уставок, заданных с равным шагом от 1 % до 20 %.

Дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). Вейвлетный анализ часто оказывается достаточно эффективным для сигналов, описывающих переходные процессы, благодаря способности вейвлетов масштабироваться и выделять информацию на множестве различных уровней разложения. ДВП является достаточно мощным средством удаления «шума» из сигнала. Основные этапы данной процедуры можно описать следующим образом [106, 107]:

- вейвлет-разложение исходного массива данных с выделением т.н.

коэффициентов аппроксимации и детализирующих коэффициентов;

- отсечение (обнуление) детализирующих коэффициентов, не удовлетворяющих определенному «порогу»;
- формирование нового сигнала на основе оригинальных коэффициентов аппроксимации и модифицированных детализирующих коэффициентов.

В выполненных вычислительных экспериментах задействовано несколько групп вейвлетов с различными вариантами длины фильтра для каждой из этих групп, рассмотрены уровни разложения от 1 до 5, а также использованы различные методы задания пороговых значений для детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения. Семейства вейвлетов, вовлеченные в анализ, следующие: Добеши (*Daubechies*), симлеты (*symlet*), койфлеты (*coiflet*), биортогональные (*biorthogonal*), обратные биортогональные (*reverse biorthogonal*), а также вейвлеты Мейера (*Meyer wavelets*). При формировании модифицированных детализирующих коэффициентов были протестированы оба пороговых метода – «гибкий» и «жесткий» (англоязычные эквиваленты – «soft thresholding» и «hard thresholding» соответственно) – в сочетании со следующими методами задания пороговых значений:

- принцип Штейна несмещенной оценки риска («*rigrsure*»);
- универсальный «порог» («*sqtwolog*»);
- комбинация двух вышеперечисленных вариантов («*heursure*»);
- минимаксная оценка («*minimaxi*»).

Дополнительные сведения относительно вышеперечисленных семейств вейвлетов и вариантов отсечения детализирующих коэффициентов доступны в [106]. Всего в вычислительных экспериментах было задействовано 2080 уникальных фильтров на основе ДВП: 52 типа фильтров × 5 уровней разложения × 8 вариантов задания пороговых значений (каждый из перечисленных выше алгоритмов – «*rigrsure*», «*sqtwolog*», «*heursure*» и

«*minimaxi*» – в комбинации и с «soft thresholding», и с «hard thresholding»).

Стационарное вейвлет-преобразование (СВП). Основным применением данного вида вейвлет-преобразования сигнала, именуемого в англоязычной литературе «stationary wavelet transform» (либо – вместо «stationary» – «undecimated», «redundant» или «shift-invariant»), является очистка сигнала от «шума». Описание соответствующего алгоритма изложено в [106]. В выполненных вычислительных экспериментах рассмотрены те же группы вейвлетов и уровни разложения сигнала, что и для ДВП. При анализе детализирующих коэффициентов также использованы «гибкий» и «жесткий» пороговые методы, однако сами значения «порогов» заданы без применения специальных критериев типа «*rigrsure*». Вместо этого использованы несколько уставок, равных 2, 3, 4 и 4,5 СКО гауссова «шума», присутствующего в оригинальном сигнале (методы оценки уровня «шума» в СВИ токов подробно обсуждаются в пп. 2.3.2 и 2.3.3 настоящей работы). Общее количество уникальных фильтров на основе СВП в итоге получается таким же, как и на базе ДВП, – 2080 (52 типа фильтров × 5 уровней разложения × 8 вариантов задания пороговых значений).

2.4.3 Методика сравнения цифровых фильтров. Как показано в п. 2.3.3, измерения тока, полученные от терминалов РЗА с функцией СВИ, являются существенно менее «шумными» по сравнению с аналогичными измерениями, выполняемыми ЦРАП с той же функцией (таблицы 2.3 и 2.4). Это обстоятельство обусловило выбор подхода к сравнению эффективности применения описанных выше методик цифровой фильтрации. Поскольку в распоряжении автора имелись данные векторных измерений с трех различных ВЛЭП 345 кВ, был скомпонован большой массив комплексных значений тока, полученных от трех цифровых реле с функцией СВИ, мониторящих эти ВЛЭП. В результате получилось 18 сигналов (3 ВЛЭП × 3 фазы тока × 2 части комплексного числа), каждый из которых состоит из $2^{13} = 8192$ действительных чисел (что обусловлено задействованием фильтров на базе СВП, требующего, чтобы количество точек было кратным

$2^5 = 32$ при вейвлет-разложении исходного сигнала вплоть до 5-го уровня).

Все отобранные сигналы достаточно «гладкие» (см. кривую изменения тока, выполненную штриховой линией на рисунке 2.3) и поэтому принимались за «эталонные» данные. К каждому из сигналов затем добавлялся гауссов «шум» с тремя различными СКО, равными 0,35 А, 0,45 А и 0,55 А. Первая из указанных величин – 0,35 А – достаточно близко воспроизводит типичное поведение ЦРАП с функцией СВИ (таблицы 2.3 и 2.4). Кроме того, как следует из таблиц 2.3 и 2.4, СКО добавленного «шума» на порядок превосходят уровень «шума» в исходных «эталонных» сигналах, что фактически позволяет пренебречь исходным «шумом» и просто использовать измерения тока от цифровых реле в качестве реальных данных, описывающих изменение режима ВЛЭП, вместо моделирования характера вариации тока по линии с течением времени, что является сложной задачей.

Наиболее эффективные фильтры были определены по соревновательному принципу. При этом предполагалось, что в каждом конкретном эксперименте (для конкретного «эталонного» сигнала и уровня «шума») наилучшим является фильтр, обеспечивающий наименьшее СКО ошибки – разности между сигналом на выходе фильтра и соответствующим «эталонным» сигналом. Каждому фильтру, в зависимости от величины ошибки, присваивалось определенное количество «штрафных» очков – тем меньшее, чем меньше обеспечиваемое им значение СКО ошибки. Все набранные очки суммировались, что позволило отсортировать фильтры по способности очищать массив СВИ от «шума». Обобщенная блок-схема алгоритма сравнения методов цифровой фильтрации СВИ токов изображена на рисунке 2.15.

2.4.4 Результаты анализа эффективности цифровых фильтров.

Прежде всего, интересным представляется ответить на вопрос, можно ли (и, если да, в какой степени) частично удалить гауссов «шум» из подготовленных «зашумленных» сигналов. Для ответа на поставленный

вопрос было вычислено среднее значение СКО ошибки для десяти лучших результатов по каждому исходному сигналу и уровню «шума», что позволило оценить, насколько уменьшается СКО «шума» в результате фильтрации. Как видно из графиков, представленных на рисунке 2.16, результат удаления «шума» для УСВИ на одной из ВЛЭП (условно обозначенной «№ 3») заметно лучше по сравнению с двумя другими. Тем не менее, во всех случаях достигнуто по меньшей мере двукратное уменьшение СКО «шума» векторных измерений. Это означает, что *массивы СВИ токов с аналогичным уровнем «шума», полученные от ЦРАП, могут быть откорректированы посредством цифровой фильтрации.*



Рисунок 2.15 – Обобщенная блок-схема алгоритма сравнения методов цифровой фильтрации СВИ токов

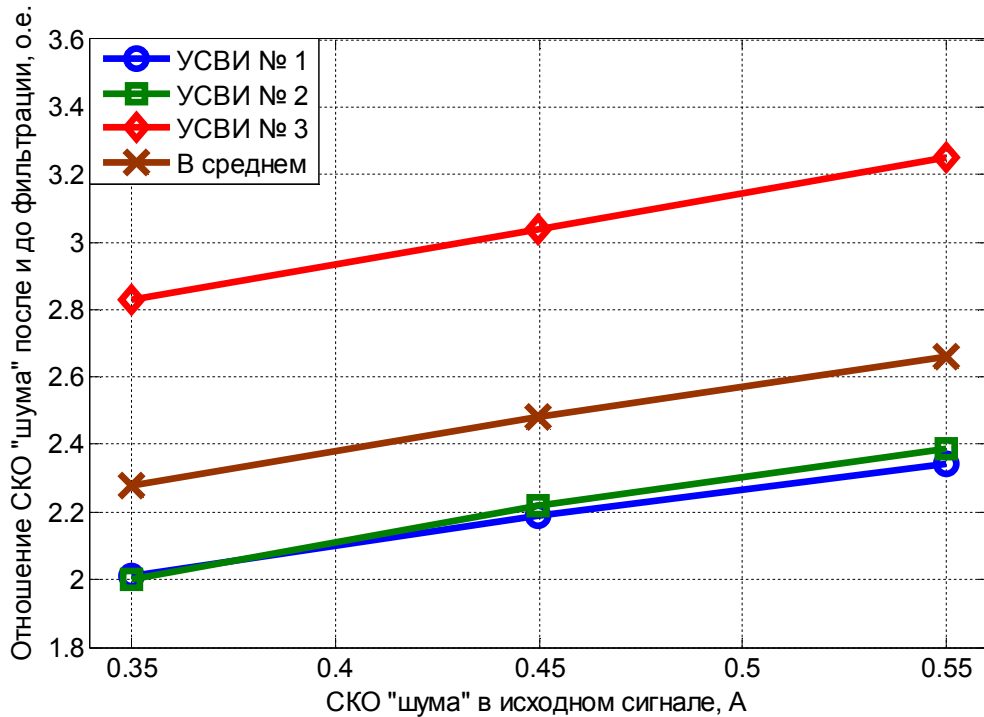


Рисунок 2.16 – Коэффициенты, отражающие уменьшение СКО «шума» СВИ токов после цифровой фильтрации по сравнению со СКО «шума» в исходных данных

В таблице 2.5 отражены результаты статистической обработки данных, полученных в ходе вычислительных экспериментов. В первой графе представлены «места», занятые фильтрами в соответствии с набранными ими «штрафными» очками (информация о количестве которых размещена в третьей графе). Во втором столбце таблицы 2.5 изложены краткие сведения по использованным фильтрам (краткое описание методов цифровой фильтрации приведено выше в п. 2.4.2 диссертации): для фильтров на базе вейвлетов – имя вейвлета, принятое в MATLAB/Wavelet Toolbox, уровень разложения и примененное пороговое значение (см. п. 2.4.2); для всех других фильтров – тип и порядок (длина окна) фильтра, а также количество «прогонов» сигнала через фильтр. В четвертом столбце таблицы 2.5 представлены процентные разности, каждая из которых показывает, насколько результат, достигнутый конкретным фильтром, – СКО «шума» после фильтрации – отличается от наилучшего результата (в среднем), выявленного после обработки конкретного сигнала всеми анализируемыми

фильтрами. В пятой графе приведены наихудшие процентные разности, каждая из которых представляет собой наибольшее отличие между результатом, достигнутым рассматриваемым фильтром, и наилучшим результатом, полученным при обработке одного и того же сигнала. Наконец, шестая и седьмая колонки таблицы 2.5 содержат соответственно средние значения коэффициентов эксцесса (для нормального распределения равного трем при использовании стандартной функции «*kurtosis*» в MATLAB) и асимметрии (для нормального распределения равного нулю) для «шума», оставшегося в сигнале после фильтрации. Поскольку количество протестированных цифровых фильтров очень велико, в таблице 2.5 отражены лишь некоторые характерные результаты для нескольких категорий фильтров.

Таблица 2.5 – Некоторые статистические данные, полученные в результате экспериментов по уменьшению «шума» СВИ с помощью наилучших фильтров в различных категориях

Занятое фильтром «место»	Тип фильтра и конкретные опции фильтрации	Сумма «штрафных» очков	Разница в среднем, %	Наихудшая разность, %	Коэффициент эксцесса, в среднем	Коэффициент асимметрии, в среднем
Фильтры на базе СВП						
1	<i>bior 1.3</i> ; уровень = 3; СКО × 3; «гибкий»	7318	4,3	20,46	3,51	0,07
2	<i>db2</i> ; уровень = 3; СКО × 2; «гибкий»	7861	4,7	24,8	3,48	0,06
3	<i>coif1</i> ; уровень = 3; СКО × 2; «гибкий»	7910	4,67	25,04	3,48	0,06
4	<i>sym2</i> ; уровень = 3; СКО × 2; «гибкий»	7915	4,7	24,8	3,48	0,06
5	<i>bior 1.5</i> ; уровень = 3; СКО × 3; «гибкий»	8183	4,97	23,56	3,48	0,07
6	<i>bior 2.2</i> ; уровень = 3; СКО × 4; «жесткий»	8242	4,71	21,84	3,61	0,06
7	<i>bior 2.4</i> ; уровень = 3; СКО × 4; «жесткий»	8858	5,28	24,55	3,57	0,06
8	<i>bior 2.2</i> ; уровень = 3; СКО × 2; «гибкий»	9197	4,72	27,45	3,49	0,06
9	<i>rbio 1.3</i> ; уровень = 3; СКО × 2; «гибкий»	9334	5,19	25,09	3,51	0,06
10	<i>coif1</i> ; уровень = 3; СКО × 4; «жесткий»	9454	4,89	20,86	3,62	0,06
Фильтры на базе ДВП						
27	<i>dmey</i> ; уровень = 5; «rigsure»; «гибкий»	10893	5,39	9,955	3,28	0,05
38	<i>dmey</i> ; уровень = 4; «rigsure»; «гибкий»	11761	5,8	11,91	3,28	0,05
59	<i>coif5</i> ; уровень = 5; «rigsure»; «гибкий»	12904	6,06	9,454	3,28	0,06

Занятое фильтром «место»	Тип фильтра и конкретные опции фильтрации			Сумма «штрафных» очков	Разница в среднем, %	Наихудшая разница, %	Коэффициент эксцесса, в среднем	Коэффициент асимметрии, в среднем	
Фильтры на базе ДВП									
73	<i>coif5</i> ;	уровень = 4;	«rigrsure»;	«гибкий»	13738	6,44	13,78	3,28	0,06
83	<i>coif4</i> ;	уровень = 5;	«rigrsure»;	«гибкий»	14370	6,58	10,74	3,25	0,05
86	<i>sym8</i> ;	уровень = 5;	«rigrsure»;	«гибкий»	14664	6,74	13,08	3,24	0,05
95	<i>db8</i> ;	уровень = 5;	«rigrsure»;	«гибкий»	15336	6,8	11,32	3,27	0,05
100	<i>coif4</i> ;	уровень = 4;	«rigrsure»;	«гибкий»	15570	7,01	14,54	3,25	0,05
110	<i>sym8</i> ;	уровень = 4;	«rigrsure»;	«гибкий»	15790	7,12	14,34	3,24	0,05
119	<i>db8</i> ;	уровень = 4;	«rigrsure»;	«гибкий»	16209	7,14	17,04	3,25	0,04
Прочие фильтры									
98	треуг. фильтр;	размер окна = 11;	один раз		15474	6,39	26,04	3,48	0,08
116	ск. среднее;	размер окна = 5;	трижды		16007	6,54	25,64	3,49	0,08
120	треуг. фильтр;	размер окна = 7;	дважды		16231	6,59	31,12	3,42	0,07
168	ск. среднее;	размер окна = 5;	дважды		18446	7,6	36,96	3,35	0,07
169	треуг. фильтр;	размер окна = 9;	один раз		18461	7,61	37,02	3,35	0,07
183	треуг. фильтр;	размер окна = 5;	трижды		19163	7,82	38,25	3,33	0,06
201	треуг. фильтр;	размер окна = 7;	трижды		19708	7,36	24,79	3,52	0,09
268	треуг. фильтр;	размер окна = 9;	дважды		22378	7,95	28,45	3,54	0,09
284	треуг. фильтр;	размер окна = 13;	один раз		23376	8,08	29,4	3,54	0,09
287	ск. среднее;	размер окна = 7;	дважды		23415	8,07	29,41	3,54	0,09

Анализируя результаты, представленные в таблице 2.5, можно заключить, что СВП с определенными вейвлетами и опциями задания «порога» в целом обеспечивает наилучшие результаты, если оценивать набранное количество «штрафных» очков, а также среднюю разницу в процентах, отражающую, как указано выше, насколько СКО «шума» после фильтрации отличается от наилучшего достигнутого результата (в среднем). Однако, как видно из таблицы 2.5, выбор оптимального «порога» при использовании СВП (в отличие от ДВП) не очевиден. Ясно лишь то, что следует использовать третий уровень вейвлет-разложения сигнала.

Результаты фильтрации с помощью ДВП мало чем отличаются от результатов, полученных посредством СВП, с точки зрения средней разницы

в процентах (четвертый столбец таблицы 2.5). В то же время значения наихудших процентных разностей (пятый столбец таблицы 2.5) для ДВП существенно меньше, что означает, что фильтрация на базе ДВП – более предсказуемая при обработке различных массивов СВИ тока. Кроме того, в случае ДВП наиболее выигрышная методика формирования модифицированных детализирующих коэффициентов четко определена: это принцип *«rigrsure»* в сочетании с «гибким» пороговым методом (таблица 2.5), что – в отличие от СВП – исключает необходимость дополнительно анализировать, каким же образом следует изменять коэффициенты детализации. Наконец, средние значения коэффициента эксцесса для ДВП значительно ближе к трем (шестая колонка таблицы 2.5). Это означает, что «шум», оставшийся в сигналах после их обработки фильтрами на основе ДВП, ближе к гауссовому, что может иметь значение для последующей обработки массивов СВИ. Следует также отметить, что количество точек данных для ДВП не обязательно должно быть кратным 2^N при вейвлет-разложении исходного сигнала до уровня « N », что удобнее с практической точки зрения.

Обобщая изложенные выше доводы, для уменьшения уровня гауссова «шума», содержащегося в векторных измерениях тока, полученных от ЦРАП, можно рекомендовать использование относительно длинных ортогональных вейвлетов в сочетании с «классическим» ДВП. Модификация детализирующих коэффициентов при этом должна осуществляться, как следует из таблицы 2.5, на четвертом или пятом уровне разложения сигнала с применением принципа *«rigrsure»* в сочетании с «гибким» пороговым методом. Дискретные вейвлеты Мейера (*«dmeu»*) оказываются особенно эффективными. В качестве примера на рисунке 2.17 изображены три сигнала: относительно «чистый» (обозначенный как «Исходный»), тот же сигнал после добавления гауссова «шума» с СКО, равным 0,35 А («Шумный»), и сигнал на выходе фильтра *«dmeu»* («Восстановленный»). В качестве «Исходного» использована действительная часть массива СВИ тока в фазе А,

полученного от цифрового реле с функцией СВИ на одной из ВЛЭП 345 кВ. Очевидно, что «Восстановленный» сигнал «чище», чем «Шумный», и имеет более «гладкий» характер изменения от точки к точке.

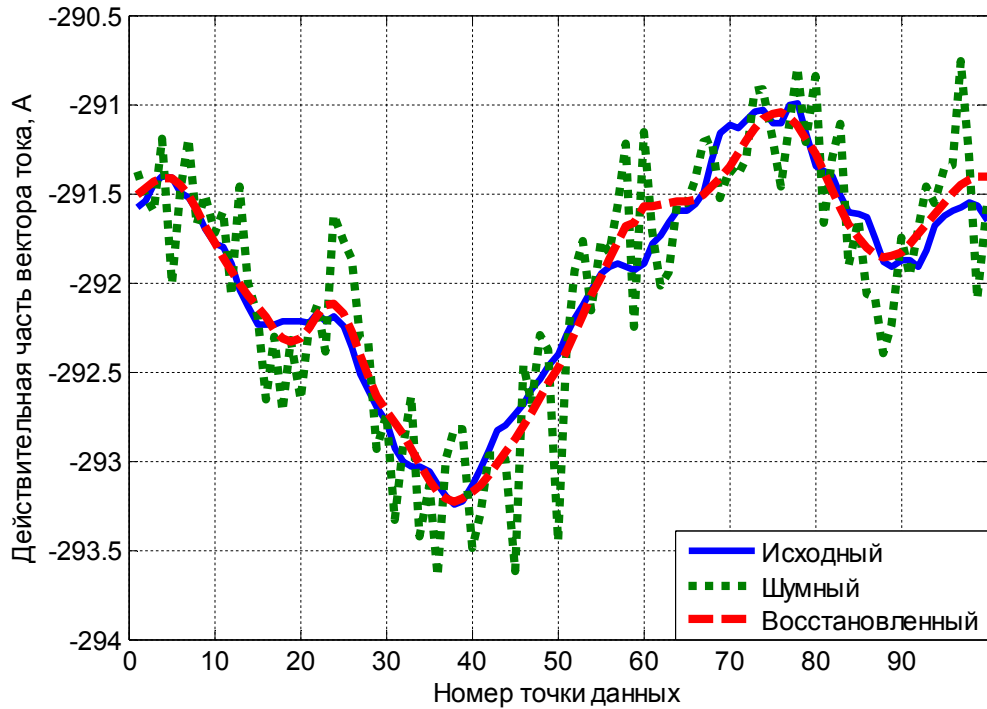


Рисунок 2.17 – Иллюстрация, отражающая результат применения цифрового фильтра на основе ДВП к «зашумленному» сигналу тока

Среди методов цифровой фильтрации, не использующих вейвлеты, удовлетворительные результаты были достигнуты только некоторыми фильтрами скользящего среднего и треугольными фильтрами. Как видно из таблицы 2.5, полученные величины не слишком уступают аналогичным данным для вейвлет-преобразований сигналов. Кроме того, скользящее среднее и треугольные фильтры просты в понимании и программной реализации. Следовательно, их также можно рекомендовать для очистки от «шума» массивов СВИ токов, полученных от ЦРАП.

Отметим, что попытки фильтрации «шума», содержащегося в доступных автору векторных измерениях тока, сформированных терминалами РЗА с функцией СВИ, фактически не имели никакого положительного эффекта. В подобных экспериментах сигналы на входе и

выходе фильтра отличались очень незначительно. Это можно объяснить как относительно малым количеством «шума» в исходных массивах СВИ (таблица 2.2, оценка СКО «шума» через вейвлетный анализ), так и относительно низкой частотой (30 кадров в секунду), с которой данные от цифрового устройства защиты передавались на верхний уровень иерархии. Для повышения эффективности вейвлетного анализа в этой ситуации потребуется более высокая скорость регистрации данных. Векторные измерения, агрегированные, например, с частотой 60 Гц, автору не доступны. Несмотря на это, на базе имеющихся в распоряжении массивов СВИ были выполнены дополнительные вычислительные эксперименты с использованием искусственного увеличения разрешения и интерполяции, что позволило сделать вывод о том, что СКО «шума» СВИ было бы уменьшено в большее количество раз по сравнению с рисунком 2.16, тогда как оптимальные методы фильтрации фактически остаются теми же.

Результаты проведенного анализа позволяют заключить следующее:

- массивы СВИ токов, полученные от ЦРАП, могут быть существенно откорректированы с помощью цифровой фильтрации (рисунки 2.16 и 2.17);
- для уменьшения уровня «шума» СВИ можно использовать большое количество альтернативных вариантов цифровой фильтрации, фактически эквивалентных по достигаемым результатам (таблица 2.5). Однако наиболее эффективными можно считать методы «классического» ДВП, использующие относительно длинные ортогональные вейвлеты и указанные выше принципы модификации детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения сигнала;
- качество фильтрации «шума» СВИ токов, вероятно, можно повысить при увеличении частоты, с которой регистрируются массивы СВИ.

2.5 Выводы по главе 2

1. Проанализирован большой массив реальных векторных измерений напряжений и токов, в результате чего выявлено, что СВИ могут содержать заведомо недостоверные точки данных (импульсные помехи), а также быть сильно «зашумленными».

2. Разработан оригинальный метод обнаружения и фильтрации импульсных помех в СВИ напряжений и токов. Функционирование метода основано на выделении «подозрительных» порций данных в анализируемом сигнале с использованием МАО. Метод успешно протестирован и на специально сгенерированных сигналах, содержащих «выбросы», и на массиве векторных измерений, полученном от УСВИ на ВЛЭП напряжением 345 кВ.

3. Обосновано, что случайные погрешности («шум») СВИ имеют закон распределения, близкий к нормальному (гауссовому). Выяснено, что прецизионность СВИ, получаемых от различных типов оборудования, может существенно отличаться: векторные измерения токов, сформированные ЦРАП с функцией СВИ, в целом являются значительно более «шумными» по сравнению с аналогичными измерениями, полученными от цифровых устройств релейной защиты.

4. Выведено компактное выражение, позволяющее получить предельные оценки СКО «шума» СВИ. С использованием данного выражения 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. Результаты подробно проанализированы как с точки зрения сопоставления двух методик оценки СКО «шума», так и в плане сравнения прецизионности измерений, выполненных ЦРАП и терминалами РЗА.

5. Выполнена серия вычислительных экспериментов, позволивших

выяснить, что СКО «шума» в векторных измерениях тока, полученных от ЦРАП с функцией СВИ, может быть существенно уменьшено посредством цифровой фильтрации. Выявлены наиболее эффективные варианты цифровой фильтрации, прежде всего, методы «классического» ДВП, использующие относительно длинные ортогональные вейвлеты и определенные принципы модификации детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения сигнала.

Результаты исследований, изложенных в главе 2, опубликованы в работах [94, 96, 101, 140, 142].

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ВЛЭП И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛЭП НА ОСНОВЕ СВИ БЕЗ УЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1 Аналитическое решение задачи определения параметров однофазной ВЛЭП

Несмотря на то, что практический интерес представляет оценка фактических параметров ВЛЭП с тремя фазами, основные математические соотношения для решения задачи целесообразно вывести и верифицировать, в первую очередь, для однолинейной модели (тем более что полученные выражения будут справедливы и при выделении симметричной составляющей – прямой, обратной или нулевой последовательности – в случае с трехфазной ВЛЭП).

Уравнения однофазной длинной линии в комплексной форме, разрешенные относительно тока и напряжения в конце ВЛЭП (рисунок 3.1), хорошо известны и выглядят следующим образом [108]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{I}_1 \cdot Z \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l); \\ \dot{I}_2 &= -\frac{\dot{U}_1}{Z} \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l) + \dot{I}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где \dot{U}_1 и \dot{I}_1 – соответственно напряжение и ток в начале ВЛЭП; \dot{U}_2 и \dot{I}_2 – напряжение и ток в конце ВЛЭП; γ и Z – соответственно *постоянная распространения* и *характеристическое (волновое) сопротивление* ВЛЭП; l – длина линии.

Постоянная распространения γ и волновое сопротивление Z вычисляются следующим образом:

$$\gamma = \sqrt{(r + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (g + j \cdot \omega \cdot C)} = \alpha + j \cdot \beta;$$

$$Z = \sqrt{\frac{r + j \cdot \omega \cdot L}{g + j \cdot \omega \cdot C}}, \quad (3.2)$$

где r , L , g и C – соответственно активное сопротивление, индуктивность, активная проводимость и емкость линии на единицу ее длины; ω – угловая частота; α – действительная часть постоянной распространения, называемая *коэффициентом затухания*; β – мнимая часть постоянной распространения, называемая *коэффициентом фазы*.

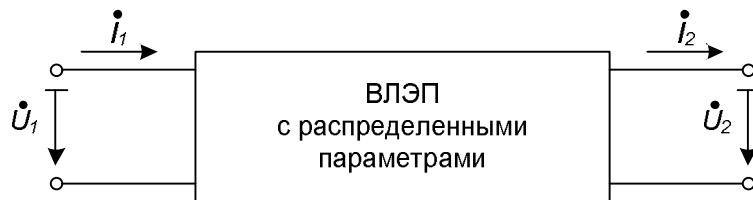


Рисунок 3.1 – Поясняющая иллюстрация к системе уравнений (3.1) с указанием принятых положительных направлений токов

Из системы (3.2) следуют очевидные соотношения:

$$\underline{z} = r + j \cdot \omega \cdot L = \gamma \cdot Z;$$

$$\underline{y} = g + j \cdot \omega \cdot C = \frac{\gamma}{Z}, \quad (3.3)$$

где \underline{z} и \underline{y} – полное сопротивление и проводимость линии на единицу ее длины, являющиеся искомыми удельными параметрами ВЛЭП.

Таким образом, чтобы на основании уравнений (3.3) рассчитать \underline{z} и \underline{y} , необходимо сначала определить параметры γ и Z , разрешив относительно них систему уравнений (3.1). Этапы решения данной задачи детально описаны в Приложении Б, а на рисунке 3.2 представлена блок-схема полученного алгоритма вычислений. Отметим, что длина линии l не всегда может быть известна с достаточной степенью точности (в т.ч. вследствие наличия стрелы провеса). Однако это обстоятельство не накладывает серьезных ограничений на функционирование алгоритма: если на шаге 3

(рисунок 3.2) определять сразу $(\alpha \cdot l)$ и $(\beta \cdot l)$ вместо α и β , то на шаге 4 получим $(\gamma \cdot l)$ вместо γ при том же самом Z , и в итоге на шаге 5 вместо удельных параметров ВЛЭП (на единицу длины) можно сразу получить полное сопротивление и проводимость линии.

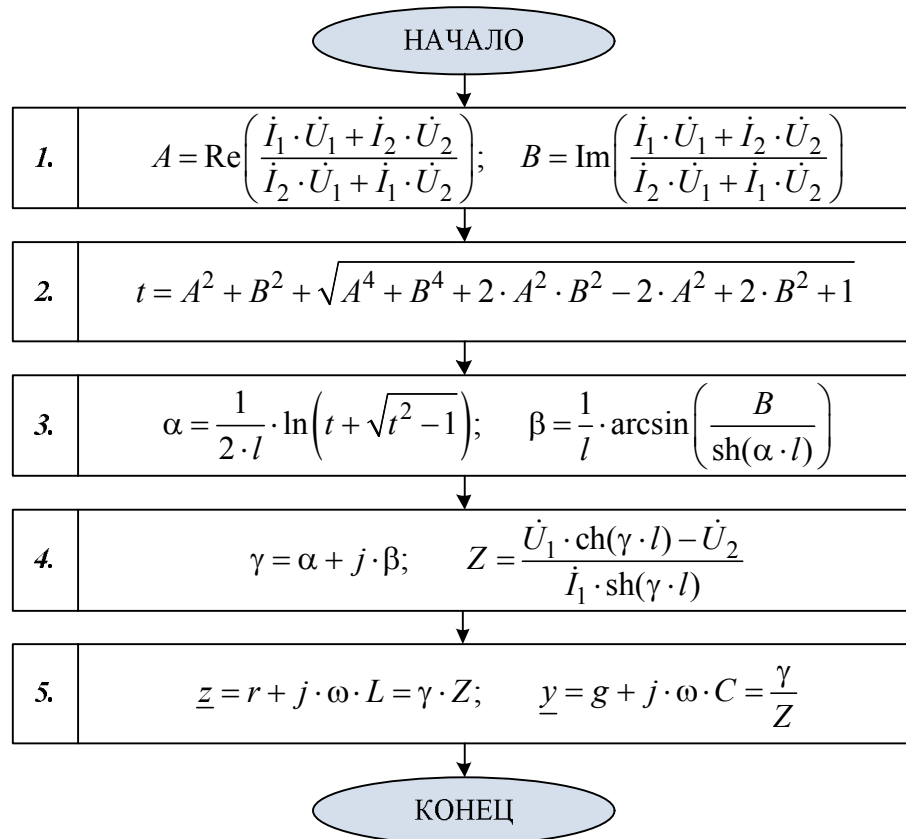


Рисунок 3.2 – Блок-схема разработанного алгоритма идентификации фактических параметров однофазной линии на базе СВИ напряжений и токов по концам линии

С целью тестирования предлагаемого метода определения параметров ВЛЭП в специализированном программном комплексе АТР/АТРDraw смоделирована простейшая схема участка электрической сети, состоящей из эквивалентированной системы напряжением 330 кВ, ВЛЭП длиной 200 км и узла активно-индуктивной нагрузки (рисунок 3.3). Все элементы сети на схеме рисунка 3.3, б, представлены в трехфазном исполнении, однако ВЛЭП моделируется как «идеально транспонированная» (что соответствовало бы непрерывной транспозиции фаз на реальной ВЛЭП), поэтому от трехфазного

варианта можно перейти к однолинейному, просто выделив компоненты прямой последовательности.

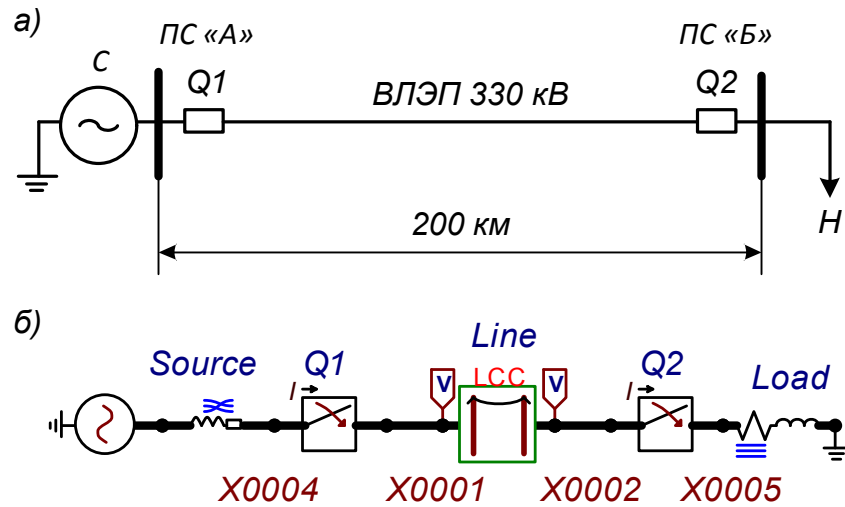


Рисунок 3.3 – Схема простейшей электрической сети (а) и ее модель в программе ATPDraw (б), используемая для тестирования разработанного метода определения фактических параметров однофазной линии (рисунок 3.2)

Комплексные значения напряжений трех фаз, измеряемые в узлах «X0001» и «X0002» (рисунок 3.3, б), соответствуют СВИ напряжений на ПС «А» и ПС «Б» (рисунок 3.3, а), а комплексные значения фазных токов через выключатели «Q1» и «Q2» (рисунок 3.3, б) соответствуют СВИ токов по концам линии (при этом направления токов, принятые за положительные, согласуются с изображенными на рисунке 3.1).

В таблице 3.1 приведены значения синхрофазоров напряжений и токов прямой последовательности, измеренных по концам моделируемой линии, а в таблицу 3.2 сведены истинные («эталонные») значения сопротивлений и проводимостей прямой последовательности ВЛЭП, а также соответствующие им значения, рассчитанные по алгоритму рисунка 3.2, и их процентные отличия от «эталонов». Анализируя данные, представленные в таблице 3.2, можно заключить, что *в отсутствие систематических и случайных погрешностей СВИ предложенный метод обеспечивает высокую точность*

идентификации фактических параметров однофазной линии либо параметров прямой последовательности «идеально транспонированной» трехфазной линии. Небольшие отклонения рассчитанных значений от соответствующих им «эталонных» (таблица 3.2), вероятно, вызваны лишь ошибками округления, имевшими место при верификации алгоритма.

Таблица 3.1 – Значения синхрофазоров напряжений и токов прямой последовательности по концам моделируемой ВЛЭП (рисунок 3.3)

$\dot{U}_{(1)}$, начало ВЛЭП (ПС «А», рисунок 3.3, а)	$\dot{U}_{(1)}$, конец ВЛЭП (ПС «Б», рисунок 3.3, а)	$\dot{I}_{(1)}$, начало ВЛЭП	$\dot{I}_{(1)}$, конец ВЛЭП
$189,15 \cdot e^{-j \cdot 1,79^\circ}$ кВ	$178,83 \cdot e^{-j \cdot 8,68^\circ}$ кВ	$378,56 \cdot e^{-j \cdot 11,07^\circ}$ А	$415,79 \cdot e^{-j \cdot 30,27^\circ}$ А

Таблица 3.2 – Сравнение результатов вычисления параметров прямой последовательности ВЛЭП по предлагаемому методу с соответствующими «эталонными» данными

Параметр	«Эталонное» значение	Расчетное значение	Отличие двух значений в процентах*
R_1 , Ом/км	0,0489	0,0489	0,0078
X_1 , Ом/км	0,3064	0,3064	0,002
G_1 , См/км	0	$2,1702 \cdot 10^{-12}$	–
B_1 , См/км	$3,7283 \cdot 10^{-6}$	$3,7284 \cdot 10^{-6}$	0,0013

ПРИМЕЧАНИЕ. * При расчете указанных процентных расхождений учитывалось большее количество знаков после запятой, нежели отражено во втором и третьем столбцах таблицы.

3.2 Аналитическое решение задачи определения параметров одноцепной трехфазной транспонированной ВЛЭП

Решение задачи относительно искомых сопротивлений и проводимостей трехфазной транспонированной ВЛЭП наиболее просто осуществляется при переходе от фазных координат к *симметричным* либо *модальным составляющим*. Это связано с тем, что дифференциальные уравнения в фазных координатах, представленные ниже в матричной форме записи, содержат напряжения и токи всех трех фаз, т.е. каждая из фаз испытывает влияние двух соседних:

$$\begin{bmatrix} -\frac{d\dot{U}_A}{dx} \\ -\frac{d\dot{U}_B}{dx} \\ -\frac{d\dot{U}_C}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{z}_s & \underline{z}_m & \underline{z}_m \\ \underline{z}_m & \underline{z}_s & \underline{z}_m \\ \underline{z}_m & \underline{z}_m & \underline{z}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}; \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{d\dot{I}_A}{dx} \\ -\frac{d\dot{I}_B}{dx} \\ -\frac{d\dot{I}_C}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_s & \underline{y}_m & \underline{y}_m \\ \underline{y}_m & \underline{y}_s & \underline{y}_m \\ \underline{y}_m & \underline{y}_m & \underline{y}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

В уравнениях (3.4) и (3.5) \dot{U}_A , \dot{U}_B и \dot{U}_C – фазные напряжения; \dot{I}_A , \dot{I}_B и \dot{I}_C – фазные токи; \underline{z}_s , \underline{z}_m , \underline{y}_s и \underline{y}_m – собственное сопротивление фазы, взаимное сопротивление, собственная проводимость фазы и взаимная проводимость соответственно.

Представив матрицы фазных напряжений и токов в виде

$$[\dot{\mathbf{U}}] = [\mathbf{T}][\dot{\mathbf{U}}_{symm}]; \quad (3.6)$$

$$[\dot{\mathbf{I}}] = [\mathbf{T}][\dot{\mathbf{I}}_{symm}], \quad (3.7)$$

где $[\dot{\mathbf{U}}_{symm}]$ и $[\dot{\mathbf{I}}_{symm}]$ – матрицы симметричных либо модальных составляющих синхрофазоров напряжений и токов, а $[\mathbf{T}]$ – специальная матрица преобразования, с учетом (3.4) и (3.5) получаем следующие матричные уравнения:

$$-[\mathbf{T}]\left[\frac{d\dot{\mathbf{U}}_{symm}}{dx}\right] = [\underline{\mathbf{z}}][\mathbf{T}][\dot{\mathbf{I}}_{symm}]; \quad (3.8)$$

$$-[\mathbf{T}]\left[\frac{d\dot{\mathbf{I}}_{symm}}{dx}\right] = [\underline{\mathbf{y}}][\mathbf{T}][\dot{\mathbf{U}}_{symm}], \quad (3.9)$$

или

$$-\left[\frac{d\dot{\mathbf{U}}_{symm}}{dx}\right] = [\mathbf{T}]^{-1}[\underline{\mathbf{z}}][\mathbf{T}][\dot{\mathbf{i}}_{symm}]; \quad (3.10)$$

$$-\left[\frac{d\dot{\mathbf{i}}_{symm}}{dx}\right] = [\mathbf{T}]^{-1}[\underline{\mathbf{y}}][\mathbf{T}][\dot{\mathbf{U}}_{symm}]. \quad (3.11)$$

Если выбрать матрицу преобразования $[\mathbf{T}]$ таким образом, что в результате произведений $[\mathbf{T}]^{-1}[\underline{\mathbf{z}}][\mathbf{T}]$ и $[\mathbf{T}]^{-1}[\underline{\mathbf{y}}][\mathbf{T}]$ получатся диагональные матрицы, то систему уравнений (3.10) и (3.11) можно разделить на три независимые системы, каждая из которых решается относительно одной симметричной (либо модальной) составляющей, в отличие от уравнений (3.4) и (3.5), не разделяемых на три независимые координаты. В итоге решение каждой из трех систем можно получить таким же образом, как и для однопроводной линии.

Метод *симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей* хорошо известен и широко применяется в инженерной практике. Матрица преобразования в этом случае является комплексной [10]:

$$[\mathbf{T}] = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

где $a = e^{j \cdot 120^\circ}$.

Нетрудно убедиться, что матрица $[\mathbf{T}]$ вида (3.12) диагонализует произведение $[\mathbf{T}]^{-1}[\underline{\mathbf{z}}][\mathbf{T}]$ следующим образом (матрица $[\underline{\mathbf{y}}_{symm}]$ выглядит аналогично):

$$[\underline{\mathbf{z}}_{symm}] = [\mathbf{T}]^{-1}[\underline{\mathbf{z}}][\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} \underline{z}_s + 2 \cdot \underline{z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_s - \underline{z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_s - \underline{z}_m \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Элемент $\underline{z}_s + 2 \cdot \underline{z}_m$ полученной матрицы $[\underline{\mathbf{z}}_{symm}]$ является

сопротивлением нулевой последовательности, тогда как элементы $\underline{z}_s - \underline{z}_m$ представляют равные между собой сопротивления прямой и обратной последовательностей.

Основным недостатком системы симметричных составляющих является то, что значения фазных величин и отдельных последовательностей связаны между собой комплексными, а не действительными коэффициентами. Поэтому при исследовании переходных процессов в ЕМТР-подобных программах симметричные составляющие как таковые не используются [10]. Трехфазные ВЛЭП описываются с применением т.н. *модальных составляющих*. Для транспонированных линий систему модальных составляющих также часто именуют $(\alpha, \beta, 0)$. Элементы матрицы преобразования в этом случае являются вещественными числами, однако вид матрицы в разных литературных источниках может отличаться. Так, в [10] матрица $[\mathbf{T}]$ представлена в следующей форме:

$$[\mathbf{T}] = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

тогда как в [109] элементы этой матрицы иные:

$$[\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{2}{\sqrt{6}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

Каждая из матриц (3.14) и (3.15) диагонализует произведения $[\mathbf{T}]^{-1}[\underline{z}][\mathbf{T}]$ и $[\mathbf{T}]^{-1}[\underline{y}][\mathbf{T}]$, но порядок следования отдельных *волновых каналов (мод)* отличен. Так, вид $[\underline{z}_{symm}]$ при использовании $[\mathbf{T}]$ в виде

(3.14) будет соответствовать (3.13), а при применении $[\mathbf{T}]$ в форме (3.15) получим следующую матрицу модальных сопротивлений:

$$[\mathbf{z}_{symm}] = \begin{bmatrix} \underline{z}_s - \underline{z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_s - \underline{z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_s + 2 \cdot \underline{z}_m \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

С позиций строгого математического анализа изложенный аппарат перехода к отдельным симметричным составляющим или волновым каналам возможен только для несуществующей «идеально транспонированной» линии. Однако применение методики для реальных ВЛЭП не вносит существенной погрешности при выполнении следующих условий [11]:

1) расстояния между точками, в которых осуществляется транспозиция (т.е. длины участков без перестановки фазных проводов), приблизительно равны между собой;

2) длина полного цикла транспозиции (три секции, в каждой из которых расположение проводов друг относительно друга различно, как изображено на рисунке 3.4) пренебрежимо мала по сравнению с длиной волны гармонического сигнала наибольшей частоты в исследуемом процессе.

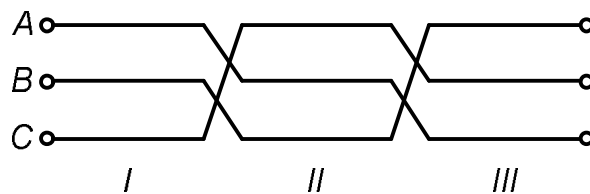


Рисунок 3.4 – Схема транспозиции фаз одноцепной трехфазной ВЛЭП

На основании вышеизложенного можно заключить, что для определения актуальных параметров одноцепной трехфазной транспонированной линии без отпаек можно воспользоваться тем же методом, что и для однопроводной линии. При этом вместо фазных токов и напряжений, полученных от УСВИ по концам ВЛЭП, следует предварительно выделить составляющие прямой (или нулевой)

последовательности, воспользовавшись выражениями (3.6), (3.7) и (3.12), что позволит записать уравнения длинной линии в форме (3.1) для параметров прямой (или нулевой) последовательности. Далее решение осуществляется в соответствии с выражениями, представленными на рисунке 3.2. Таким образом, указанным способом можно рассчитать сопротивления и проводимости линии отдельно по прямой последовательности и отдельно – по нулевой. Альтернативой является определение сразу всех искомым параметров линии в рамках единой процедуры, для чего можно воспользоваться следующей методикой.

1. Формирование матриц модальных составляющих напряжений и токов на основании выражений (3.6) и (3.7) по данным СВИ с двух сторон ВЛЭП (при этом за «1» условно обозначим начало линии, а за «2» – конец):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_{0_1} \\ \dot{U}_{\alpha_1} \\ \dot{U}_{\beta_1} \end{bmatrix} &= [\mathbf{T}]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_{A_1} \\ \dot{U}_{B_1} \\ \dot{U}_{C_1} \end{bmatrix}; & \begin{bmatrix} \dot{U}_{0_2} \\ \dot{U}_{\alpha_2} \\ \dot{U}_{\beta_2} \end{bmatrix} &= [\mathbf{T}]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_{A_2} \\ \dot{U}_{B_2} \\ \dot{U}_{C_2} \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} \dot{I}_{0_1} \\ \dot{I}_{\alpha_1} \\ \dot{I}_{\beta_1} \end{bmatrix} &= [\mathbf{T}]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_{A_1} \\ \dot{I}_{B_1} \\ \dot{I}_{C_1} \end{bmatrix}; & \begin{bmatrix} \dot{I}_{0_2} \\ \dot{I}_{\alpha_2} \\ \dot{I}_{\beta_2} \end{bmatrix} &= [\mathbf{T}]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_{A_2} \\ \dot{I}_{B_2} \\ \dot{I}_{C_2} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

где $[\mathbf{T}]$ – матрица преобразования в форме (3.14).

2. Решение системы матричных уравнений, записываемых на основании выражений (3.10) и (3.11), а также следующих за ними комментариев:

$$\begin{aligned} -\left[\frac{d\dot{\mathbf{U}}_{0\alpha\beta}}{dx} \right] &= [\underline{\mathbf{z}}_{0\alpha\beta}] [\dot{\mathbf{I}}_{0\alpha\beta}]; \\ -\left[\frac{d\dot{\mathbf{I}}_{0\alpha\beta}}{dx} \right] &= [\underline{\mathbf{y}}_{0\alpha\beta}] [\dot{\mathbf{U}}_{0\alpha\beta}], \end{aligned} \quad (3.18)$$

что эквивалентно трем независимым системам уравнений, каждая из которых записывается точно таким же образом, что и система (3.1) для однофазной линии:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{mode_2} &= \dot{U}_{mode_1} \cdot \text{ch}(\gamma_{mode} \cdot l) - \dot{I}_{mode_1} \cdot Z_{mode} \cdot \text{sh}(\gamma_{mode} \cdot l); \\ \dot{I}_{mode_2} &= -\frac{\dot{U}_{mode_1}}{Z_{mode}} \cdot \text{sh}(\gamma_{mode} \cdot l) + \dot{I}_{mode_1} \cdot \text{ch}(\gamma_{mode} \cdot l), \end{aligned} \quad (3.19)$$

где слово «mode» служит для обозначения отдельного волнового канала $(\alpha, \beta, 0)$.

Решение системы (3.19) относительно γ_{mode} и Z_{mode} с последующим расчетом \underline{z}_{mode} и \underline{y}_{mode} осуществляется в полном соответствии с разработанной методикой для однофазной ВЛЭП (рисунок 3.2).

3. Формирование матриц модальных сопротивлений и проводимостей линии:

$$\begin{aligned} [\underline{z}_{0\alpha\beta}] &= \begin{bmatrix} \underline{z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_\beta \end{bmatrix}; \\ [\underline{y}_{0\alpha\beta}] &= \begin{bmatrix} \underline{y}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{y}_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \underline{y}_\beta \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

4. Расчет матриц сопротивлений и проводимостей в фазных координатах на основании выражения (3.13):

$$\begin{aligned} [\underline{z}] &= [\mathbf{T}][\underline{z}_{0\alpha\beta}][\mathbf{T}]^{-1}; \\ [\underline{y}] &= [\mathbf{T}][\underline{y}_{0\alpha\beta}][\mathbf{T}]^{-1}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

а затем определение искоемых параметров прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП. Так, для сопротивлений получаем следующее (для проводимостей все аналогично):

$$\begin{aligned} \underline{z}_1 &= \underline{z}_s - \underline{z}_m; \\ \underline{z}_0 &= \underline{z}_s + 2 \cdot \underline{z}_m, \end{aligned} \quad (3.22)$$

где \underline{z}_s и \underline{z}_m – элементы полученной в (3.21) матрицы $[\underline{z}]$: \underline{z}_s – по главной

диагонали, а \underline{z}_m – любой недиагональный элемент¹.

Перед обсуждением результатов тестирования предлагаемого метода необходимо сделать несколько важных замечаний.

1. Определение параметров прямой и нулевой последовательностей (соответственно \underline{z}_1 и \underline{z}_0 для сопротивлений, \underline{y}_1 и \underline{y}_0 для проводимостей) следует осуществлять именно после нахождения матриц $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$ по (3.21), что и реализовано в программном коде. Теоретически, матрицы $[\underline{z}_{0\alpha\beta}]$ и $[\underline{y}_{0\alpha\beta}]$, структура которых описывается (3.20), уже содержат искомые параметры ВЛЭП, поскольку на основании изложенного в [10] можно заключить, что

$$\begin{aligned} [\underline{z}_{0\alpha\beta}] &= \begin{bmatrix} \underline{z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_1 \end{bmatrix}; \\ [\underline{y}_{0\alpha\beta}] &= \begin{bmatrix} \underline{y}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{y}_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \underline{y}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{y}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{y}_1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Однако тождества $\underline{z}_1 = \underline{z}_\alpha = \underline{z}_\beta$ и $\underline{y}_1 = \underline{y}_\alpha = \underline{y}_\beta$ выполняются лишь для идеализированного случая отсутствия погрешностей СВИ и стопроцентного соответствия модели линии реальной картине. При практическом же применении алгоритма необходимо некое «усреднение», обеспечиваемое формулами (3.21) и (3.22).

2. Модальные компоненты $(\alpha, \beta, 0)$ обеспечивают не только более простой (не содержащий комплексных чисел) вид преобразований уравнений (3.4) и (3.5) по сравнению с симметричными составляющими, но и в целом

¹ Матрица сопротивлений ВЛЭП, рассчитанная по первому выражению в (3.21), будет содержать лишь два отличных элемента, при этом ее структура будет в точности соответствовать квадратной матрице сопротивлений из (3.4). Тем не менее, предлагаемый метод реализован автором в MATLAB таким образом, что в качестве \underline{z}_s в (3.22) берется среднее из всех элементов на главной диагонали матрицы $[\underline{z}]$, а в качестве \underline{z}_m – среднее из всех недиагональных значений (для проводимостей – все по аналогии).

более точные результаты идентификации искомых параметров ВЛЭП при наличии погрешностей СВИ¹, всегда присутствующих на практике. Причина этого, вероятно, кроется в том, что в нормальном нагрузочном режиме, характеризуемом симметричными (или близкими к ним) системами фазных напряжений и токов, имеем $|\dot{U}_\alpha| \approx |\dot{U}_\beta| \gg |\dot{U}_0|$ и $|\dot{I}_\alpha| \approx |\dot{I}_\beta| \gg |\dot{I}_0|$. Для симметричных же составляющих лишь одна компонента – прямой последовательности – существенно доминирует над двумя другими, что доставляет вычислительные трудности при сколь-нибудь существенных ошибках измерений. Исходя из этого, при расчете сопротивлений и проводимостей в фазных координатах в качестве матрицы преобразования рекомендуется использовать матрицу вида (3.14).

3. Для определения параметров нулевой последовательности линии обязательно наличие некоторой несимметрии в электрической сети. В «абсолютно симметричном» режиме вычисление сопротивлений и проводимостей нулевой последовательности не представляется возможным. С математической точки зрения очевидность данного утверждения следует, например, из выражений для расчета коэффициентов A и B на первом шаге алгоритма для однофазной ВЛЭП (рисунок 3.2). При применении этих выражений к токам и напряжениям нулевой последовательности (или, что то же самое, к токам и напряжениям модального канала «0») теоретически получим неопределенность вида $\frac{0}{0}$, а практически – случайную величину, обусловленную особенностями организации вычислений и погрешностями СВИ. Указанное обстоятельство не ограничивает возможность использования описанного метода вычислений по (3.17)–(3.22) даже в «идеально симметричном» режиме, если требуется определить только параметры прямой последовательности линии (осуществленные вычислительные эксперименты свидетельствуют, что они будут рассчитаны

¹ Влияние систематических погрешностей СВИ на предлагаемые методы, сопряженные с аналитическим решением уравнений линии, обсуждается в разделе 4.2 настоящей работы.

корректно). Вместе с тем даже для установившихся режимов ЭЭС (и тем более – для переходных) характерно наличие некоторого уровня несимметрии по фазам (например, из-за несбалансированности нагрузок), что потенциально позволяет применить описанную методику и для достоверизации параметров нулевой последовательности ВЛЭП. Очевидно, существенным препятствием здесь является деструктивное влияние погрешностей СВИ, поэтому с практической точки зрения необходимо, чтобы систематические погрешности измерений были малы по отношению к абсолютным значениям напряжений и токов (в идеале разница должна составлять несколько порядков).

Верификация предложенного метода определения параметров трехфазной транспонированной ВЛЭП осуществлена на базе той же модели электрической сети, что и ранее (рисунок 3.3). Несимметрия по фазам, требуемая для расчета сопротивления и проводимости нулевой последовательности, внесена за счет небольшой вариации параметров активно-индуктивной нагрузки «Н» (рисунок 3.3, а), соответствующей блоку «Load» (рисунок 3.3, б). Иллюстрацией полученного режима служит рисунок 3.5, отражающий небаланс токов трех фаз в конце ВЛЭП – токов через выключатель «Q2» (рисунок 3.3, б). В отсутствие погрешностей СВИ этого небаланса вполне достаточно для идентификации параметров не только прямой, но и нулевой последовательности (таблица 3.3). Таким образом, *предложенный метод определения параметров транспонированной линии, основанный на фазо-модальных преобразованиях и аналитическом решении задачи для каждой из модальных составляющих в точности как для одной фазы (рисунок 3.2), функционирует корректно, если не учитывать погрешности измерений напряжений и токов по концам линии.*

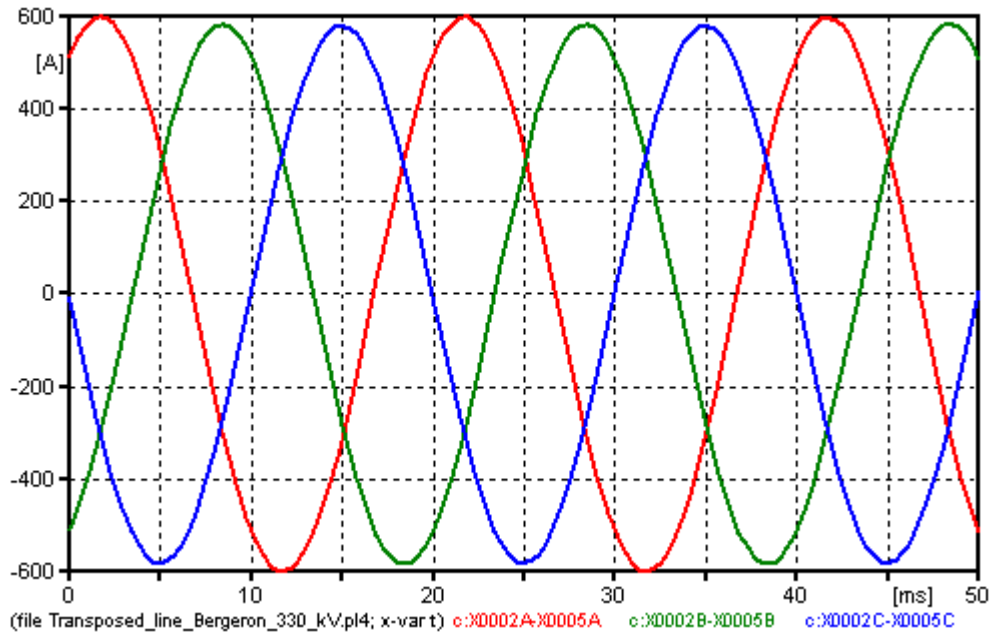


Рисунок 3.5 – Характер изменения нагрузочных токов (рисунок 3.3) при осуществлении вычислительного эксперимента по идентификации параметров транспонированной ВЛЭП

Таблица 3.3 – Сравнение результатов вычисления параметров прямой и нулевой последовательностей трехфазной транспонированной ВЛЭП по предлагаемому методу с соответствующими «эталонными» данными

Параметр	«Эталонное» значение	Расчетное значение	Отличие двух значений в процентах*
R_1 , Ом/км	0,0489	0,0489	0,0078
X_1 , Ом/км	0,3064	0,3064	-0,002
G_1 , См/км	0	$2,1726 \cdot 10^{-12}$	–
B_1 , См/км	$3,7283 \cdot 10^{-6}$	$3,7284 \cdot 10^{-6}$	0,0013
R_0 , Ом/км	0,3188	0,3188	0,0018
X_0 , Ом/км	1,0044	1,0044	-0,002
G_0 , См/км	0	$-1,1992 \cdot 10^{-9}$	–
B_0 , См/км	$2,0569 \cdot 10^{-6}$	$2,0587 \cdot 10^{-6}$	0,0861

ПРИМЕЧАНИЕ. * При расчете указанных процентных расхождений учитывалось большее количество знаков после запятой, нежели отражено во втором и третьем столбцах таблицы.

3.3 Постановка и решение задачи определения параметров одноцепной трехфазной нетранспонированной ВЛЭП

ВЛЭП могут быть нетранспонированными, что приводит к различиям в значениях собственных сопротивлений трех фаз (диагональные элементы

матрицы $[\underline{z}]$), а также к отличающимся по величине взаимным сопротивлениям (недиагональные элементы матрицы $[\underline{z}]$). То же справедливо и для матрицы проводимостей $[\underline{y}]$. Наличие в ЭЭС нетранспонированных ВЛЭП приводит к тому, что даже в случае нагрузок, идеально сбалансированных по фазам, в токах и напряжениях будут присутствовать составляющие обратной и нулевой последовательностей. При этом логично предположить, что длина нетранспонированной ВЛЭП оказывает прямое влияние на уровни вносимой несимметрии. С целью подтверждения этого предположения в программном комплексе MATLAB произведена серия вычислительных экспериментов, в которых использовалась та же модель ВЛЭП, что и ранее (с параметрами, отраженными в таблице 3.3), но имитация перестановки фазных проводов вдоль трассы ВЛЭП отсутствовала. Матрицы удельных параметров линии при этом выглядят следующим образом¹ (для сопротивлений – в Ом/км, для проводимостей – в См/км):

$$[\underline{z}] = \begin{bmatrix} 0,1344 + 0,5450 \cdot j & 0,0851 + 0,2264 \cdot j & 0,0929 + 0,2210 \cdot j \\ 0,0851 + 0,2264 \cdot j & 0,1326 + 0,5474 \cdot j & 0,0919 + 0,2506 \cdot j \\ 0,0929 + 0,2210 \cdot j & 0,0919 + 0,2506 \cdot j & 0,1495 + 0,5248 \cdot j \end{bmatrix};$$

$$[\underline{y}] = 10^{-5} \cdot \begin{bmatrix} 0,3080 \cdot j & -0,0427 \cdot j & -0,0473 \cdot j \\ -0,0427 \cdot j & 0,3181 \cdot j & -0,0771 \cdot j \\ -0,0473 \cdot j & -0,0771 \cdot j & 0,3252 \cdot j \end{bmatrix},$$

а коэффициенты несимметрии² по любому компоненту (току или напряжению обратной либо нулевой последовательности в начале или в конце ВЛЭП) изменяются практически линейно с увеличением длины ВЛЭП (рисунки 3.6 и 3.7).

¹ Нетрудно убедиться, что сопротивления прямой и нулевой последовательностей, которые можно получить, воспользовавшись выражениями (3.12) и (3.13), при этом будут в точности совпадать с соответствующими «эталонными» параметрами, представленными в таблице 3.3.

² Коэффициенты несимметрии представлены в виде процентных соотношений модулей токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей с соответствующими величинами прямой последовательности.

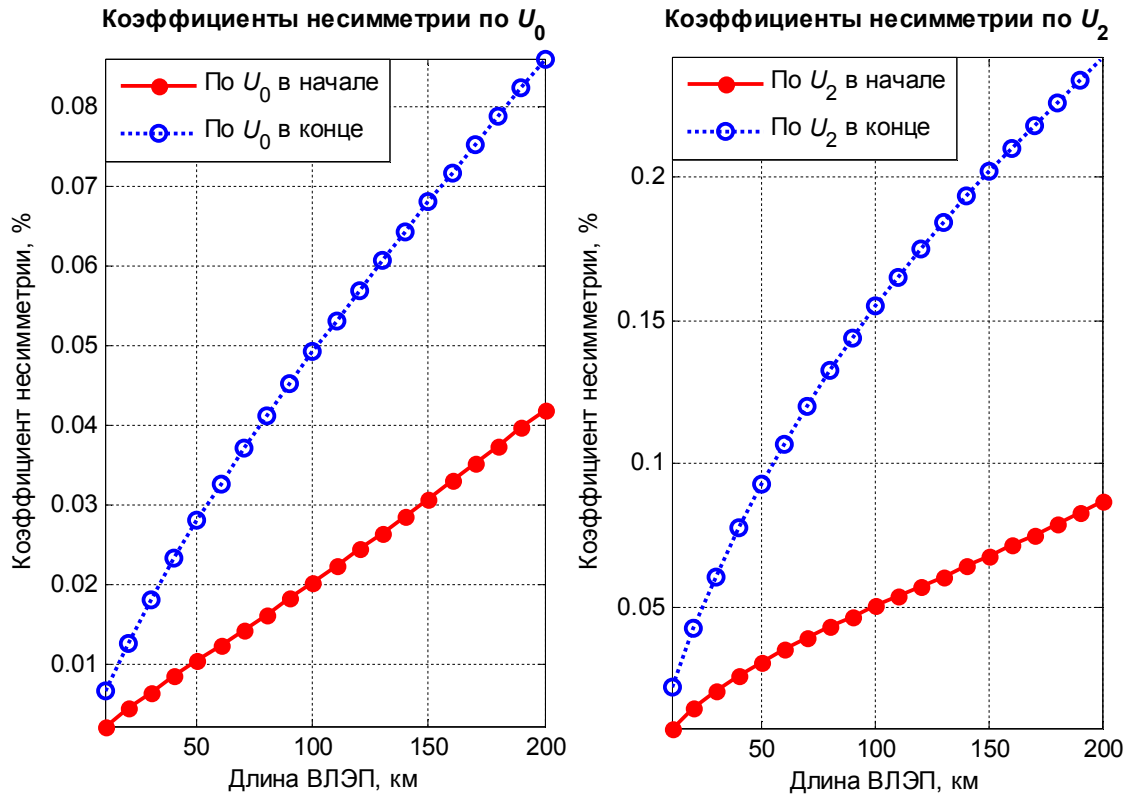


Рисунок 3.6 – Изменение степени несимметрии напряжений при увеличении длины нетранспонированной ВЛЭП

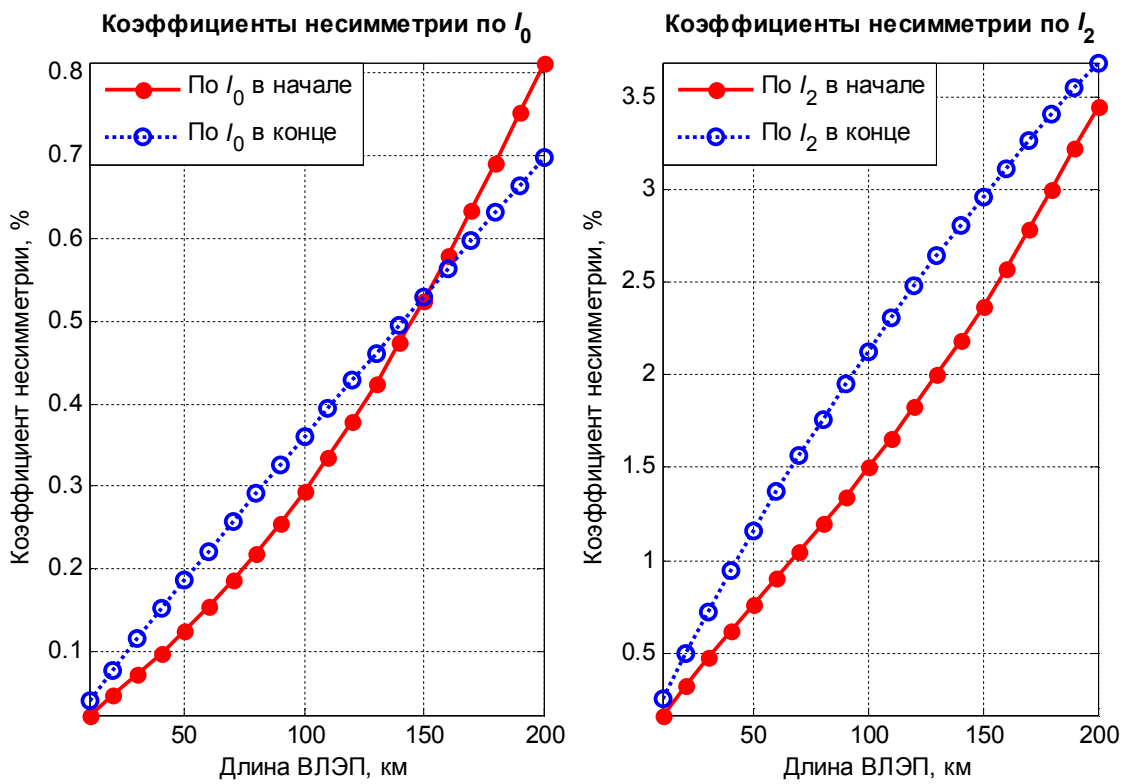


Рисунок 3.7 – Изменение степени несимметрии токов при увеличении длины нетранспонированной ВЛЭП

Анализируя графические зависимости, представленные на рисунках 3.6 и 3.7, можно сделать вывод о том, что отсутствие транспозиции на ВЛЭП вызывает несимметрию режимных параметров, которую нельзя считать пренебрежимо малой (особенно по фазным токам). В этой связи вполне оправдано требование «Правил устройств электроустановок» о необходимости выполнения полного цикла транспозиции на ВЛЭП напряжением 110 кВ и выше и длиной более 100 км [110]. Вместе с тем в том же нормативном документе отмечено, что допускаются увеличение длины нетранспонированной ВЛЭП, выполнение неполных циклов транспозиции, а также различные длины участков в цикле. Все это обуславливает необходимость разработки методики определения актуальных параметров для общего случая – нетранспонированных ВЛЭП.

Рассмотрим возможные подходы к решению поставленной задачи, проанализированные в ходе диссертационного исследования.

3.3.1 Пренебрежение несимметрией параметров ВЛЭП по фазам и использование модели для транспонированной ВЛЭП. Наиболее простой и очевидный подход заключается в проверке гипотезы о том, что эквивалентные параметры прямой и нулевой последовательностей нетранспонированной линии можно вычислить, условно считая ее в модели транспонированной. Таким образом, несимметрия моделируемого объекта, неизбежно отражаемая в синхрофазорах токов и напряжений по его концам (рисунки 3.6 и 3.7), игнорируется на этапе идентификации параметров объекта.

Прежде чем привести результаты соответствующих вычислительных экспериментов, следует сделать два важных замечания относительно корректности применяемой терминологии.

Во-первых, при актуализации параметров нетранспонированной ВЛЭП нас, в конечном счете, интересует то же, что и в случае транспонированной ВЛЭП, – сопротивления и проводимости прямой и нулевой последовательностей (а вовсе не отдельные диагональные и недиагональные

элементы матриц $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$). В сложившейся инженерной практике, например, при расчетах токов КЗ и уставок устройств РЗА, оперируют именно параметрами отдельных последовательностей. Поскольку концепция симметричных составляющих, строго говоря, применима лишь для «идеально симметричных» объектов, в случае с нетранспонированной линией можно вести речь только о т.н. «эквивалентных» параметрах прямой и нулевой последовательностей, которые всегда можно рассчитать, зная элементы матриц $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$ в фазных координатах.

Во-вторых, матрица преобразования $[\mathbf{T}]$ в форме (3.12) всегда обеспечивает такой результат произведения $[\mathbf{T}]^{-1}[\underline{z}][\mathbf{T}]$, что диагональные элементы матрицы симметричных составляющих одинаковы независимо от того, транспонирована линия или нет [11]. Так, в нашем случае для транспонированной ВЛЭП имеем следующие матрицы сопротивлений в фазных координатах и симметричных составляющих:

$$[\underline{z}] = \begin{bmatrix} 0,1388 + 0,5391 \cdot j & 0,0900 + 0,2327 \cdot j & 0,0900 + 0,2327 \cdot j \\ 0,0900 + 0,2327 \cdot j & 0,1388 + 0,5391 \cdot j & 0,0900 + 0,2327 \cdot j \\ 0,0900 + 0,2327 \cdot j & 0,0900 + 0,2327 \cdot j & 0,1388 + 0,5391 \cdot j \end{bmatrix};$$

$$[\underline{z}_{symm}] = \begin{bmatrix} 0,3188 + 1,0044 \cdot j & 0 & 0 \\ 0 & 0,0489 + 0,3064 \cdot j & 0 \\ 0 & 0 & 0,0489 + 0,3064 \cdot j \end{bmatrix},$$

а для нетранспонированной ВЛЭП получаем

$$[\underline{z}] = \begin{bmatrix} 0,1344 + 0,5450 \cdot j & 0,0851 + 0,2264 \cdot j & 0,0929 + 0,2210 \cdot j \\ 0,0851 + 0,2264 \cdot j & 0,1326 + 0,5474 \cdot j & 0,0919 + 0,2506 \cdot j \\ 0,0929 + 0,2210 \cdot j & 0,0919 + 0,2506 \cdot j & 0,1495 + 0,5248 \cdot j \end{bmatrix};$$

$$[\underline{z}_{symm}] = \begin{bmatrix} 0,3188 + 1,0044 \cdot j & 0,0049 + 0,0011 \cdot j & -0,0113 - 0,0132 \cdot j \\ -0,0113 - 0,0132 \cdot j & 0,0489 + 0,3064 \cdot j & 0,0030 + 0,0212 \cdot j \\ 0,0049 + 0,0011 \cdot j & -0,0036 + 0,0205 \cdot j & 0,0489 + 0,3064 \cdot j \end{bmatrix}.$$

Таким образом, использование сопротивлений и проводимостей прямой и нулевой последовательностей в качестве искоемых параметров можно считать оправданным и для случая нетранспонированной ВЛЭП.

На рисунках 3.8 и 3.9 представлены модели электрической сети в программном комплексе ATP/ATPDraw, используемые при осуществлении вычислительных экспериментов. Эти модели несколько сложнее приведенной на рисунке 3.3, но основные элементы (эквивалентированные системы напряжением 330 кВ, ВЛЭП, узел активно-индуктивной нагрузки) – все те же и поэтому не нуждаются в дополнительном описании. Моделируемая нетранспонированная ВЛЭП имеет длину 100 км, а ее параметры отдельных последовательностей соответствуют «эталонным» параметрам, отраженным в таблице 3.3; она обозначена «LINE» и выделена прямоугольником на каждом из рисунков 3.8 и 3.9. Линия связана с двумя эквивалентированными системами («Source_1» и «Source_2») через две другие линии – «L_1» (слева) и «L_2» (справа).

Режим на рисунке 3.8 характеризуется слабой несимметрией, вызванной как самим моделируемым объектом – нетранспонированной ВЛЭП «LINE», так и небольшой несбалансированностью нагрузки «Load», заданной следующей матрицей сопротивлений:

$$\left[\underline{z}_{Load} \right] = \begin{bmatrix} 390 + 157,0796 \cdot j & 0 & 0 \\ 0 & 400 + 163,3628 \cdot j & 0 \\ 0 & 0 & 410 + 153,938 \cdot j \end{bmatrix}.$$

Режим на рисунке 3.9 резко несимметричен вследствие наличия однофазного КЗ фазы А через малое переходное сопротивление «R» (соответствующая часть схемы выделена овалом). Удаленность КЗ от конца анализируемой линии «LINE» (узел «X0005» на рисунке 3.9) изменялась в ходе экспериментов до 40 км, т.е. точка КЗ располагалась электрически близко к нетранспонированной ВЛЭП, обеспечивая высокие коэффициенты несимметрии по току нулевой последовательности (порядка 70 %) и напряжению нулевой последовательности в конце линии (около 50–60 %).

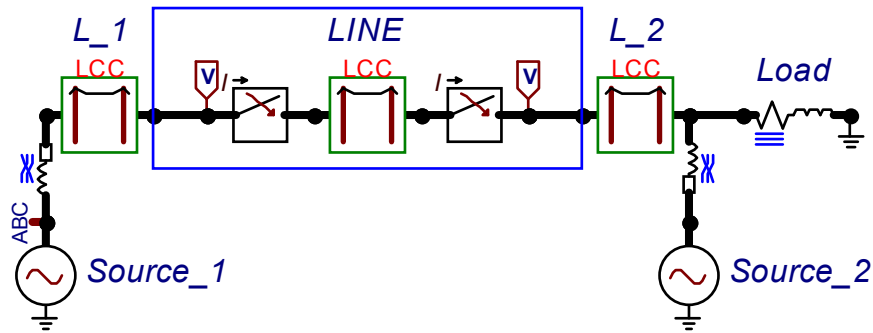


Рисунок 3.8 – Модель электрической сети в программе ATPDraw с нетранспонированной линией «LINE», актуальные параметры которой подлежат идентификации

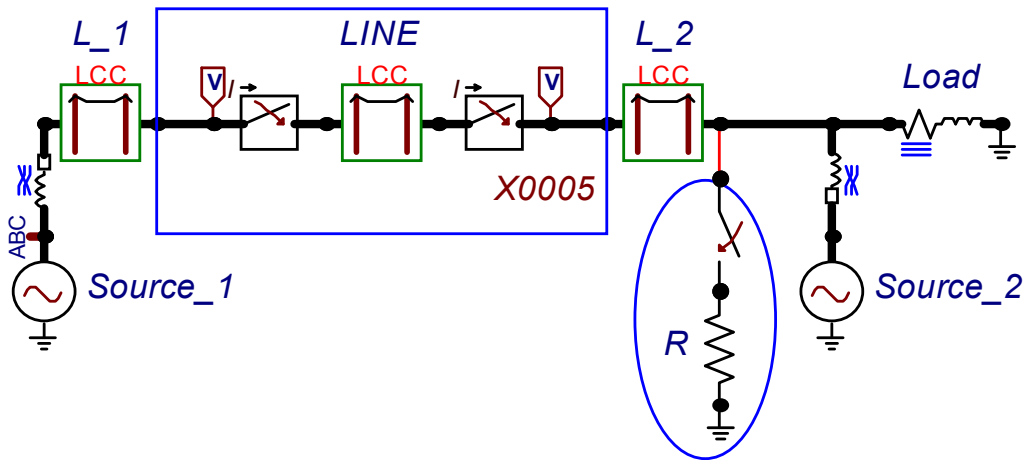


Рисунок 3.9 – Модель электрической сети в программе ATPDraw с нетранспонированной линией «LINE» и однофазным КЗ фазы А через малое переходное сопротивление «R»

Анализ двух существенно отличающихся режимов ВЛЭП – нормального со слабой несимметрией (рисунок 3.8) и установившегося аварийного с выраженной несимметрией (рисунок 3.9) – позволяет сделать достаточно объективные выводы. В таблице 3.4 представлены результаты идентификации параметров ВЛЭП «LINE» (рисунки 3.8 и 3.9) в полном соответствии с методом, изложенным в разделе 3.2 настоящей диссертационной работы, т.е. точно так же, как если бы линия была транспонированной. Как видно из таблицы 3.4, в нормальном установившемся режиме (рисунок 3.8) точно определяются параметры прямой последовательности, однако оценки всех параметров нулевой последовательности некорректны (проводимость нулевой

последовательности B_0 даже отрицательна, что априори неверно). Это вполне логично: параметры R_0 , X_0 и B_0 в этом режиме рассчитаны при очень малых уровнях токов и напряжений нулевой последовательности, а потому очень чувствительны как к погрешностям измерений (которые в данных экспериментах игнорировались), так и к погрешностям, вносимым самой моделью (замена реальной нетранспонированной линии «аналогичной» ей транспонированной). В установившемся режиме внешнего КЗ (рисунок 3.9) параметры R_0 , X_0 и B_0 определяются фактически на порядки точнее, как следует из сравнения четвертого и шестого столбцов таблицы 3.4; их рассчитанные значения близки к «эталонным». Однако, во-первых, погрешность вычисления сопротивления R_1 велика (возможно, во многом из-за его малой величины), а во-вторых, систематическое возникновение столь благоприятных (с точки зрения идентификации параметров ВЛЭП) режимов на практике гарантировать довольно сложно. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности рассмотрения более сложных подходов к расчету значений сопротивлений и проводимостей нетранспонированной ВЛЭП на базе СВИ.

Таблица 3.4 – Результаты вычисления параметров отдельных последовательностей нетранспонированной ВЛЭП «LINE» (рисунки 3.8 и 3.9) по упрощенной методике – с использованием разработанного метода для транспонированной ВЛЭП

Параметр	«Эталонное» значение	Нормальный режим ВЛЭП (рисунок 3.8)		Режим с КЗ, удаленным от конца линии «LINE» на 40 км (рисунок 3.9)	
		Расчетное значение	Погрешность в процентах	Расчетное значение	Погрешность в процентах
R_1 , Ом/км	0,0489	0,0487	-0,2434	0,0628	28,5075
X_1 , Ом/км	0,3064	0,3064	-0,0124	0,2918	-4,7469
B_1 , См/км	$3,7283 \cdot 10^{-6}$	$3,7283 \cdot 10^{-6}$	0,0011	$3,7054 \cdot 10^{-6}$	-0,6143
R_0 , Ом/км	0,3188	0,7053	121,2506	0,312	-2,1096
X_0 , Ом/км	1,0044	0,2854	-71,5866	0,9875	-1,6803
B_0 , См/км	$2,0569 \cdot 10^{-6}$	$-1,1823 \cdot 10^{-4}$	-5848	$1,9091 \cdot 10^{-6}$	-7,1849

3.3.2 Формулировка и решение оптимизационной задачи относительно искомых значений сопротивлений и проводимостей

ВЛЭП. Дифференциальные уравнения в фазных координатах, представленные ниже для трехфазной нетранспонированной ВЛЭП в матричной форме, выглядят следующим образом:

$$\begin{bmatrix} -\frac{d\dot{U}_A}{dx} \\ -\frac{d\dot{U}_B}{dx} \\ -\frac{d\dot{U}_C}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{z}_{s1} & \underline{z}_{m12} & \underline{z}_{m13} \\ \underline{z}_{m12} & \underline{z}_{s2} & \underline{z}_{m23} \\ \underline{z}_{m13} & \underline{z}_{m23} & \underline{z}_{s3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}; \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{d\dot{I}_A}{dx} \\ -\frac{d\dot{I}_B}{dx} \\ -\frac{d\dot{I}_C}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{s1} & \underline{y}_{m12} & \underline{y}_{m13} \\ \underline{y}_{m12} & \underline{y}_{s2} & \underline{y}_{m23} \\ \underline{y}_{m13} & \underline{y}_{m23} & \underline{y}_{s3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}. \quad (3.24)$$

Матрицы сопротивлений и проводимостей сохраняют симметричную структуру, но каждая из них, в отличие от случая транспонированной ВЛЭП, содержит не две, а шесть комплексных неизвестных – три собственных и три взаимных сопротивления (проводимости).

Концепция фазо-модальных преобразований, описанная уравнениями (3.6)–(3.11) для транспонированных ВЛЭП, является эффективным средством и при моделировании нетранспонированных линий, однако в последнем случае можно отметить две особенности, существенным образом усложняющие моделирование линии, в т.ч. и с точки зрения оценки ее актуальных параметров:

- 1) матрица фазо-модальных преобразований для напряжений $[\mathbf{T}_u]$ отлична от матрицы фазо-модальных преобразований для токов $[\mathbf{T}_i]$;
- 2) элементы обеих матриц фазо-модальных преобразований, в отличие от матриц вида (3.14) и (3.15), заведомо неизвестны, иными словами – уникальны для конкретной конфигурации ВЛЭП.

Представив матрицы фазных напряжений и токов в виде

$$[\dot{\mathbf{U}}] = [\mathbf{T}_u][\dot{\mathbf{U}}_{mode}]; \quad (3.25)$$

$$[\dot{\mathbf{I}}] = [\mathbf{T}_i][\dot{\mathbf{I}}_{mode}], \quad (3.26)$$

где $[\dot{\mathbf{U}}_{mode}]$ и $[\dot{\mathbf{I}}_{mode}]$ – матрицы модальных составляющих напряжений и токов соответственно, с учетом (3.23) и (3.24) получаем следующие матричные уравнения:

$$-[\mathbf{T}_u] \left[\frac{d\dot{\mathbf{U}}_{mode}}{dx} \right] = [\underline{\mathbf{z}}][\mathbf{T}_i][\dot{\mathbf{I}}_{mode}]; \quad (3.27)$$

$$-[\mathbf{T}_i] \left[\frac{d\dot{\mathbf{I}}_{mode}}{dx} \right] = [\underline{\mathbf{y}}][\mathbf{T}_u][\dot{\mathbf{U}}_{mode}], \quad (3.28)$$

или

$$-\left[\frac{d\dot{\mathbf{U}}_{mode}}{dx} \right] = [\mathbf{T}_u]^{-1} [\underline{\mathbf{z}}][\mathbf{T}_i][\dot{\mathbf{I}}_{mode}]; \quad (3.29)$$

$$-\left[\frac{d\dot{\mathbf{I}}_{mode}}{dx} \right] = [\mathbf{T}_i]^{-1} [\underline{\mathbf{y}}][\mathbf{T}_u][\dot{\mathbf{U}}_{mode}]. \quad (3.30)$$

Дифференцируя обе части уравнения (3.29), с учетом (3.30) получаем

$$\left[\frac{d^2\dot{\mathbf{U}}_{mode}}{dx^2} \right] = [\mathbf{T}_u]^{-1} [\underline{\mathbf{z}}][\underline{\mathbf{y}}][\mathbf{T}_u][\dot{\mathbf{U}}_{mode}]. \quad (3.31)$$

Для того чтобы дифференциальное уравнение для каждой из модальных составляющих имело такое же решение, как и для однопроводной линии, необходимо подобрать матрицу преобразования $[\mathbf{T}_u]$ так, чтобы произведение $[\mathbf{T}_u]^{-1} [\underline{\mathbf{z}}][\underline{\mathbf{y}}][\mathbf{T}_u]$ являлось диагональной матрицей (на практике – чтобы значения недиагональных элементов были пренебрежимо малы):

$$[\mathbf{\Lambda}] = [\mathbf{T}_u]^{-1} [\underline{\mathbf{z}}][\underline{\mathbf{y}}][\mathbf{T}_u] \cong \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}. \quad (3.32)$$

Поиск матрицы $[\mathbf{\Lambda}]$ со структурой, описываемой (3.32), представляет

собой известную задачу матричной алгебры¹, сводящуюся к определению *собственных значений* и *собственных векторов матрицы*. В качестве такой матрицы в нашем случае выступает матричное произведение $[\underline{z}][\underline{y}]$. В Приложении В более подробно разъясняется правомерность данного утверждения.

Дифференцируя обе части уравнения (3.30), с учетом (3.29) можно записать следующее:

$$\left[\frac{d^2 \dot{\mathbf{i}}_{mode}}{dx^2} \right] = [\mathbf{T}_i]^{-1} [\underline{y}][\underline{z}][\mathbf{T}_i] [\dot{\mathbf{i}}_{mode}]. \quad (3.33)$$

Сравнивая структуру правых частей уравнений (3.31) и (3.33), можно сделать вывод, что нахождение элементов матрицы $[\mathbf{T}_i]$ также должно осуществляться на основании теории собственных значений и векторов матрицы (в данном случае – матричного произведения $[\underline{y}][\underline{z}]$). В действительности достаточно вычислить элементы одной из матриц $[\mathbf{T}_u]$ или $[\mathbf{T}_i]$, поскольку они связаны следующим соотношением [10]:

$$[\mathbf{T}_i] = [\mathbf{T}_u]^{-T}, \quad (3.34)$$

доказательство которого представлено в Приложении В.

Таким образом, подобрав элементы $[\mathbf{T}_u]$ и $[\mathbf{T}_i]$ специальным образом, каждая из систем дифференциальных уравнений (3.31) и (3.33) может быть разделена на три независимых уравнения:

$$\left[\frac{d^2 \dot{\mathbf{U}}_{mode}}{dx^2} \right] = [\mathbf{T}_u]^{-1} [\underline{z}][\underline{y}][\mathbf{T}_u] [\dot{\mathbf{U}}_{mode}] = [\mathbf{\Lambda}_U] [\dot{\mathbf{U}}_{mode}]; \quad (3.35)$$

$$\left[\frac{d^2 \dot{\mathbf{i}}_{mode}}{dx^2} \right] = [\mathbf{T}_i]^{-1} [\underline{y}][\underline{z}][\mathbf{T}_i] [\dot{\mathbf{i}}_{mode}] = [\mathbf{\Lambda}_I] [\dot{\mathbf{i}}_{mode}], \quad (3.36)$$

причем в Приложении В показано, что

¹ Для решения этой стандартной задачи существует достаточное количество программных средств (как коммерческих, так и свободно распространяемых), поэтому в рамках диссертационного исследования использовались штатные функции MATLAB (в частности, «eigs»).

$$[\Lambda_U] = [\Lambda_I] = [\Lambda] \cong \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}, \quad (3.37)$$

где λ_1 , λ_2 и λ_3 – собственные значения матричного произведения $[\underline{z}][\underline{y}]$, а столбцы матрицы преобразования $[\mathbf{T}_u]$ суть собственные вектора матрицы $[\underline{z}][\underline{y}]$.

Систему дифференциальных уравнений (3.29) и (3.30) при этом также можно разделить на три независимые системы (по два уравнения в каждой) аналогично тому, как это записано для транспонированной линии в форме (3.18):

$$-\left[\frac{d\dot{\mathbf{U}}_{mode}}{dx}\right] = [\underline{\mathbf{z}}_{mode}][\dot{\mathbf{i}}_{mode}] = \begin{bmatrix} \underline{z}_{mode 1} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_{mode 2} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_{mode 3} \end{bmatrix} [\dot{\mathbf{i}}_{mode}]; \quad (3.38)$$

$$-\left[\frac{d\dot{\mathbf{i}}_{mode}}{dx}\right] = [\underline{\mathbf{y}}_{mode}][\dot{\mathbf{U}}_{mode}] = \begin{bmatrix} \underline{y}_{mode 1} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{y}_{mode 2} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{y}_{mode 3} \end{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}_{mode}], \quad (3.39)$$

только вместо волновых каналов $(\alpha, \beta, 0)$ отдельные модальные составляющие и соответствующие им пары дифференциальных уравнений проиндексированы просто «*mode 1*», «*mode 2*» и «*mode 3*».

Тот факт, что матричные произведения $[\mathbf{T}_u]^{-1}[\underline{z}][\mathbf{T}_i]$ и $[\mathbf{T}_i]^{-1}[\underline{y}][\mathbf{T}_u]$ в (3.29) и (3.30) действительно являются диагональными матрицами – соответственно $[\underline{\mathbf{z}}_{mode}]$ в (3.38) и $[\underline{\mathbf{y}}_{mode}]$ в (3.39), обосновывается в работе [111]:

$$\underbrace{[\mathbf{T}_u]^{-1}[\underline{z}][\mathbf{T}_i]}_{[\underline{\mathbf{z}}_{mode}]} \underbrace{[\mathbf{T}_i]^{-1}[\underline{y}][\mathbf{T}_u]}_{[\underline{\mathbf{y}}_{mode}]} = [\mathbf{T}_u]^{-1}[\underline{z}][\underline{y}][\mathbf{T}_u] = [\Lambda], \quad (3.40)$$

и, в силу диагональности матрицы $[\Lambda]$, обе матрицы $[\underline{\mathbf{z}}_{mode}]$ и $[\underline{\mathbf{y}}_{mode}]$ в

(3.40) также должны быть диагональными.

Таким образом, если известны матрицы преобразования $[\mathbf{T}_u]$ и $[\mathbf{T}_i]$, систему дифференциальных уравнений в фазных координатах (3.23) и (3.24) всегда можно свести к эквивалентной системе (3.38) и (3.39) для трех независимых волновых каналов. Проблема заключается в том, что, в отличие от случая с транспонированной ВЛЭП, элементы $[\mathbf{T}_u]$ и $[\mathbf{T}_i]$ зависят от элементов матриц $[\mathbf{z}]$ и $[\mathbf{y}]$, а это суть искомые параметры – подлежащие актуализации сопротивления и проводимости ВЛЭП. Учитывая, к тому же, сложную взаимосвязь между этими четырьмя матрицами (выраженную в необходимости определения собственных значений и векторов матричного произведения $[\mathbf{z}][\mathbf{y}]$ либо $[\mathbf{y}][\mathbf{z}]$), для идентификации параметров нетранспонированной ВЛЭП требуется сформулировать и решить оптимизационную задачу.

Оптимизация обычно предполагает наличие целевой функции (ЦФ), зависящей от искомым параметров. В нашем случае получить эту зависимость в явном виде исключительно сложно либо вообще невозможно. Вместо этого ЦФ может быть выражена неявно как сумма квадратов разностей («невязок») рассчитанных и соответствующих им измеренных значений синхрофазоров напряжений и токов на одной стороне ВЛЭП (например, условно принятой за «конец»):

$$\begin{aligned}
 F = & \left(\operatorname{Re} \left(\dot{U}_A^{m(1)} - \dot{U}_A^{c(1)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Re} \left(\dot{U}_B^{m(1)} - \dot{U}_B^{c(1)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Re} \left(\dot{U}_C^{m(1)} - \dot{U}_C^{c(1)} \right) \right)^2 + \\
 & + \left(\operatorname{Re} \left(\dot{I}_A^{m(1)} - \dot{I}_A^{c(1)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Re} \left(\dot{I}_B^{m(1)} - \dot{I}_B^{c(1)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Re} \left(\dot{I}_C^{m(1)} - \dot{I}_C^{c(1)} \right) \right)^2 + \\
 & + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{U}_A^{m(1)} - \dot{U}_A^{c(1)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{U}_B^{m(1)} - \dot{U}_B^{c(1)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{U}_C^{m(1)} - \dot{U}_C^{c(1)} \right) \right)^2 + \quad (3.41) \\
 & + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{I}_A^{m(1)} - \dot{I}_A^{c(1)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{I}_B^{m(1)} - \dot{I}_B^{c(1)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{I}_C^{m(1)} - \dot{I}_C^{c(1)} \right) \right)^2 + \\
 & + \dots +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\operatorname{Re} \left(\dot{U}_A^{m(N)} - \dot{U}_A^{c(N)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Re} \left(\dot{U}_B^{m(N)} - \dot{U}_B^{c(N)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Re} \left(\dot{U}_C^{m(N)} - \dot{U}_C^{c(N)} \right) \right)^2 + \\
& + \left(\operatorname{Re} \left(\dot{I}_A^{m(N)} - \dot{I}_A^{c(N)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Re} \left(\dot{I}_B^{m(N)} - \dot{I}_B^{c(N)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Re} \left(\dot{I}_C^{m(N)} - \dot{I}_C^{c(N)} \right) \right)^2 + \\
& + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{U}_A^{m(N)} - \dot{U}_A^{c(N)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{U}_B^{m(N)} - \dot{U}_B^{c(N)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{U}_C^{m(N)} - \dot{U}_C^{c(N)} \right) \right)^2 + \\
& + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{I}_A^{m(N)} - \dot{I}_A^{c(N)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{I}_B^{m(N)} - \dot{I}_B^{c(N)} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{Im} \left(\dot{I}_C^{m(N)} - \dot{I}_C^{c(N)} \right) \right)^2.
\end{aligned}$$

В выражении (3.41) F – условное обозначение ЦФ, подлежащей минимизации¹; напряжения и токи с индексом « m » («measured») – измеренные синхрофазоры в конце линии; напряжения и токи с индексом « c » («computed») – рассчитанные синхрофазоры, соответствующие измеренным; верхние индексы в скобках – от «(1)» до «(N)» – номер комплекта СВИ. Все комплексные разности разделены на вещественную и мнимую части.

Необходимость использования более одного комплекта СВИ вызвана тем, что в противном случае задача неразрешима: матрицы $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$ в (3.23) и (3.24) содержат в совокупности 18 вещественных неизвестных², тогда как один комплект СВИ позволяет записать только 12 уравнений в действительных числах. При использовании двух независимых комплектов СВИ число уравнений, которые можно использовать для анализа, увеличивается до 24-х, и задача становится переопределенной, т.е. потенциально разрешимой. При этом принимается, что изменения искомых параметров ВЛЭП на интервале времени получения двух (или, в общем случае, нескольких) комплектов СВИ отсутствуют (пренебрежимо малы). Это допущение будет тем более справедливым, чем «ближе» друг к другу используемые комплекты СВИ, однако с вычислительной точки зрения, напротив, желательно иметь как можно более «непохожие» комплекты,

¹ Конкретное значение функции F в (3.41) – скалярная величина, однако в зависимости от используемого алгоритма оптимизации ЦФ может быть также задана в виде вектора, элементы которого представляют собой «невязки», квадраты которых суммируются в (3.41).

² Неизвестными являются три диагональных и три недиагональных элемента матрицы сопротивлений, разделенные на действительную и мнимую части (итого – 12), а также аналогичные элементы матрицы проводимостей, в которых учитывается только мнимая часть (итого – 6).

иначе задача оказывается математически плохо обусловленной. Этот немаловажный практический аспект будет обсуждаться в главе 4 диссертационной работы, а пока отложим этот вопрос и сконцентрируемся на математическом описании задачи. Этапы ее решения, приблизительно соответствующие тому, как это реализовано в виде функции в MATLAB (Приложение Г)¹, сведены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Основные вычислительные процедуры, выполняемые на каждой итерации оптимизационного алгоритма для расчета ЦФ (3.41) с целью определения параметров нетранспонированной ВЛЭП без учета погрешностей СВИ

Шаг	Описание вычислений
I	<p>Вспомогательные действия:</p> <p>а) масштабирование вектора неизвестных x, состоящего из 19-ти элементов (18 действительных величин, образующих матрицы сопротивлений и проводимостей, а также длина линии l^2);</p> <p>б) формирование матриц удельных сопротивлений и проводимостей ВЛЭП.</p>
II	<p>Определение элементов матриц фазо-модальных преобразований для токов $[\mathbf{T}_i]$ и напряжений $[\mathbf{T}_u]$: столбцы $[\mathbf{T}_i]$ формируются как собственные вектора матричного произведения $[\underline{\mathbf{y}}][\underline{\mathbf{z}}]$, а элементы $[\mathbf{T}_u]$ рассчитываются на основе (3.34):</p> $[\mathbf{T}_u] = [\mathbf{T}_i]^{-T}. \quad (3.42)$
III	<p>Расчет параметров трех волновых каналов (сопротивлений и проводимостей, постоянных распространения и волновых сопротивлений) на основании (3.3) и (3.40):</p> $[\underline{\mathbf{z}}_{mode}] = [\mathbf{T}_u]^{-1} [\underline{\mathbf{z}}] [\mathbf{T}_i] = \begin{bmatrix} \underline{z}_{mode 1} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_{mode 2} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_{mode 3} \end{bmatrix}; \quad (3.43)$ $[\underline{\mathbf{y}}_{mode}] = [\mathbf{T}_i]^{-1} [\underline{\mathbf{y}}] [\mathbf{T}_u] = \begin{bmatrix} \underline{y}_{mode 1} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{y}_{mode 2} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{y}_{mode 3} \end{bmatrix}; \quad (3.44)$ $[\underline{\gamma}_{mode}] = \left[\sqrt{\underline{z}_{mode 1} \cdot \underline{y}_{mode 1}} \quad \sqrt{\underline{z}_{mode 2} \cdot \underline{y}_{mode 2}} \quad \sqrt{\underline{z}_{mode 3} \cdot \underline{y}_{mode 3}} \right]^T; \quad (3.45)$ $[\underline{\mathbf{Z}}_{mode}] = \left[\sqrt{\underline{z}_{mode 1} / \underline{y}_{mode 1}} \quad \sqrt{\underline{z}_{mode 2} / \underline{y}_{mode 2}} \quad \sqrt{\underline{z}_{mode 3} / \underline{y}_{mode 3}} \right]^T. \quad (3.46)$

¹ В Приложении Г представлен программный код, в основе которого – обобщенная матричная версия выражений, используемых на стадиях IV и V в таблице 3.5. Формирование этой компактной матричной записи обсуждается в разделе 3.4 настоящей работы.

² Фактическая длина ВЛЭП является одним из параметров оптимизации, поскольку ее значение известно лишь ориентировочно и, более того, изменяется в силу наличия стрелы провеса проводов ВЛЭП.

Шаг	Описание вычислений
IV	<p>1. Расчет модальных составляющих напряжений и токов в начале линии на основании (3.25) и (3.26):</p> $\left[\dot{\mathbf{U}}_{mode} \right]_0 = [\mathbf{T}_u]^{-1} \left[\dot{\mathbf{U}} \right]_0; \quad (3.47)$ $\left[\dot{\mathbf{I}}_{mode} \right]_0 = [\mathbf{T}_i]^{-1} \left[\dot{\mathbf{I}} \right]_0, \quad (3.48)$ <p>где все вектора с индексом «0» обозначают СВИ в начале ВЛЭП: без подстрочного знака «mode» – фазные величины, а с таковым – модальные составляющие.</p>
	<p>2. Вычисление модальных составляющих напряжений и токов в конце линии по уравнениям вида (3.19), в точности соответствующим случаю однофазной длинной линии:</p> $\dot{U}_{mode\ i} \Big _l = \dot{U}_{mode\ i} \Big _0 \cdot \operatorname{ch}(\gamma_{mode\ i} \cdot l) - \dot{I}_{mode\ i} \Big _0 \cdot Z_{mode\ i} \cdot \operatorname{sh}(\gamma_{mode\ i} \cdot l);$ $\dot{I}_{mode\ i} \Big _l = -\frac{\dot{U}_{mode\ i} \Big _0}{Z_{mode\ i}} \cdot \operatorname{sh}(\gamma_{mode\ i} \cdot l) + \dot{I}_{mode\ i} \Big _0 \cdot \operatorname{ch}(\gamma_{mode\ i} \cdot l), \quad (3.49)$ <p>где левые части (с индексом «l», отражающим полную длину ВЛЭП) соответствуют СВИ в конце ВЛЭП. Индекс «i» обозначает при этом один из трех волновых каналов: например, при $i=1$ в правые части уравнений (3.49) подставляются постоянная распространения $\gamma_{mode\ 1} = \sqrt{Z_{mode\ 1} \cdot \underline{y}_{mode\ 1}}$ из (3.45), волновое сопротивление $Z_{mode\ 1} = \sqrt{Z_{mode\ 1} / \underline{y}_{mode\ 1}}$ из (3.46), а также первые элементы векторов $\left[\dot{\mathbf{U}}_{mode} \right]_0$ из (3.47) и $\left[\dot{\mathbf{I}}_{mode} \right]_0$ из (3.48).</p>
	<p>3. Формирование векторов модальных составляющих напряжений и токов в конце линии $\left[\dot{\mathbf{U}}_{mode} \right]_l$ и $\left[\dot{\mathbf{I}}_{mode} \right]_l$, а также расчет напряжений и токов в фазных координатах на основе (3.25) и (3.26):</p> $\left[\dot{\mathbf{U}} \right]_l = [\mathbf{T}_u] \left[\dot{\mathbf{U}}_{mode} \right]_l; \quad (3.50)$ $\left[\dot{\mathbf{I}} \right]_l = [\mathbf{T}_i] \left[\dot{\mathbf{I}}_{mode} \right]_l. \quad (3.51)$
V	<p>Выделение вычисленных напряжений и токов в конце линии, их поэлементное сравнение с соответствующими измеренными величинами и формирование ЦФ F по (3.41).</p>

Масштабирование (шаг I в таблице 3.5) требуется с целью преобразования элементов вектора неизвестных x , поставляемых оптимизатору в отмасштабированном виде (таком, что все параметры оптимизации принадлежат отрезку $[0, 1]$), к их значениям в реальных единицах измерения, из которых формируются матрицы сопротивлений и проводимостей линии. Применение масштабирования не только удобно, но и

оправдано с вычислительной точки зрения, поскольку значения элементов в матрицах $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$, выраженные соответственно в Ом/км и См/км, отличаются на порядки. Алгоритм масштабирования, реализованный в виде функции в MATLAB, представлен как «ЛОКАЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ 1» в Приложении Г.

Наряду с масштабированием целесообразно переводить все электрические величины в относительные единицы (о.е.), поскольку модули напряжений (в кВ) отличаются от модулей токов (в А) также на порядки. При «уровнивании» напряжений и токов с применением о.е. получается, что слагаемые ЦФ в форме (3.41) вносят более или менее равный вклад в значение ЦФ без использования весовых коэффициентов¹. Перевод СВИ, а также параметров ВЛЭП в о.е. осуществляется по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{pu} &= \frac{\dot{U}_{kV}}{U_{base} \cdot 1000}; \\ \dot{I}_{pu} &= \dot{I}_{Amp} \cdot \frac{U_{base}}{S_{base} \cdot 1000}; \\ \underline{z}_{pu} &= \underline{z}_{Ohm} \cdot \frac{S_{base}}{U_{base}^2}; \\ \underline{y}_{pu} &= \underline{y}_S \cdot \frac{U_{base}^2}{S_{base}}, \end{aligned} \quad (3.52)$$

где U_{base} – базисное напряжение (в кВ); S_{base} – базисная мощность (в МВА); \dot{U}_{pu} , \dot{I}_{pu} , \underline{z}_{pu} и \underline{y}_{pu} – соответственно напряжение, ток, сопротивление и проводимость в о.е.; \dot{U}_{kV} , \dot{I}_{Amp} , \underline{z}_{Ohm} и \underline{y}_S – соответственно напряжение (в кВ), ток (в А), сопротивление (в Ом/км) и проводимость (в См/км).

При использовании алгоритма вычисления ЦФ в соответствии с описанием, систематизированным в таблице 3.5 и Приложении Г, перевод электрических величин в о.е. целесообразно выполнять однократно – до

¹ Весовые коэффициенты могут все же использоваться, чтобы, например, отразить различную прецизионность измерений по отдельным каналам. В настоящем исследовании подобная дифференциация измерений отсутствует.

выполнения оптимизации, т.е. осуществлять поиск искомых сопротивлений и проводимостей линии непосредственно в о.е. Возвращенный оптимизатором вектор оптимального решения («оптимальных» параметров) затем можно преобразовать в истинные единицы измерения по (3.52).

Обобщая сказанное и учитывая ряд специфических особенностей оптимизационной задачи, ее решение «на верхнем уровне» можно описать в виде таблицы 3.6.

Таблица 3.6 – Основные шаги решения оптимизационной задачи по определению параметров нетранспонированной ВЛЭП без учета погрешностей СВИ

Однократно	До запуска оптимизатора	I.1	Подготовка массивов СВИ напряжений и токов; преобразование СВИ в о.е. по (3.52)
		I.2	Задание нижнего и верхнего ограничений на элементы вектора параметров оптимизации, а также генерация вектора начального приближения («initial guess»)
		I.3	Масштабирование заданных ограничений, а также вектора начального приближения (все элементы вектора параметров оптимизации удобно ограничить на отрезке $[0, 1]$)
		I.4	Задание настроек используемого оптимизатора
Итеративно	Во время оптимизации	II.1	Расчет ЦФ в соответствии с алгоритмом, описанным в таблице 3.5
		II.2	Расчет производных ЦФ, а также другие операции в зависимости от используемого оптимизационного алгоритма
		II.3	Модификация вектора неизвестных x на основе алгоритма, используемого конкретным оптимизатором
Однократно	По окончании оптимизации	III.1	Анализ условия, по которому завершены итерации оптимизационного алгоритма
		III.2	Преобразование элементов вектора оптимального решения, возвращаемого оптимизатором в отмасштабированном виде (например, таком, что все элементы вектора принадлежат отрезку $[0, 1]$), к их значениям в используемых единицах измерения (например, о.е.)

Таким образом, алгоритм вычисления подлежащей минимизации ЦФ, систематизированный в таблице 3.5, является лишь одним, хотя и очень важным, этапом (обозначенным как «II.1» в таблице 3.6) решения задачи в целом.

Выбор оптимизатора представляет собой отдельную нетривиальную проблему. Решаемая задача имеет следующие характеристики, важные с

точки зрения корректного выбора оптимизационного алгоритма:

- принадлежит к классу задач нелинейного программирования;
- требует для своего решения минимизации суммы квадратов «невязок», формирующих ЦФ в виде (3.41), и, следовательно, нелинейного МНК (задача на нелинейную регрессию);
- относится к классу задач условной оптимизации (имеет верхние и нижние ограничения, накладываемые на вектор неизвестных);
- содержит большое количество (19) искоемых переменных, поэтому применение алгоритмов, не использующих информацию о производных ЦФ, априори не столь эффективно¹;
- математически плохо обусловлена: как отмечено выше, для решения задачи необходимы минимум два комплекта СВИ; при этом комплекты СВИ, полученные в нормальном режиме ЭЭС, как правило, маловариативны.

Поскольку базовый алгоритм вычисления ЦФ, описанный в таблице 3.5, реализован в MATLAB (Приложение Г), были проанализированы, главным образом, варианты применения оптимизаторов, доступных в этой программной среде, в т.ч. имеющихся в составе пакета расширения «Optimization Toolbox» [112]. В руководстве [112] представлена таблица выбора оптимизаторов, отраженная в оригинале (без перевода) в виде таблицы 3.7. Единственным значимым отличием является цветовое выделение строки «Bound» (оптимизация с ограничениями) и столбца «Least Squares» (МНК), пересечение которых определяет группу рекомендуемых функций. Среди них, в свою очередь, выбрана функция «*lsqnonlin*» (сокращение от «nonlinear least-squares»), нацеленная на решение нелинейных задач в требуемой нам форме.

В функцию «*lsqnonlin*» встроено два алгоритма: «*trust-region-*

¹ В ходе диссертационного исследования, тем не менее, было протестировано достаточное количество подобных оптимизаторов (большинство из которых присутствуют в пакете расширения «Global Optimization Toolbox» среды MATLAB). По результатам вычислительных экспериментов можно заключить, что задействованные алгоритмы действительно оказались менее эффективными с вычислительной точки зрения (во многих случаях достичь оптимума ЦФ за разумное время оказалось и вовсе невозможным).

reflective», применяемый «по умолчанию», и «*levenberg-marquardt*». Первый из них можно приблизительно перевести как «метод доверительной области с отражением»; его реализация в MATLAB основана на материале публикаций [113, 114], а соответствующее описание в русскоязычной технической литературе отсутствует либо труднодоступно. Вторым алгоритмом – «*levenberg-marquardt*» (метод Левенберга–Марквардта) – описан в [115–117] и достаточно известен, однако в базовом варианте алгоритма (в т.ч. и в функции «*lsqnonlin*») не поддерживаются простые ограничения («*bound constraints*»), накладываемые на вектор параметров оптимизации. Отметим, что существуют модифицированные версии метода Левенберга–Марквардта – с поддержкой ограничений [118].

Таблица 3.7 – Таблица выбора алгоритма оптимизации в зависимости от типа решаемой задачи (воспроизведение оригинала из руководства [112])

Constraint Type	Objective Type				
	Linear	Quadratic	Least Squares	Smooth Nonlinear	Nonsmooth
None	n/a ($f = \text{const}$, or $\text{min} = -\infty$)	quadprog, Information	mldivide, lsqcurvefit, lsqnonlin, Information	fminsearch, fminunc, Information	fminsearch, *
Bound	linprog, Information	quadprog, Information	lsqcurvefit, lsqlin, lsqnonlin , lsqnonneg, Information	fminbnd, fmincon, fseminf, Information	fminbnd, *
Linear	linprog, Information	quadprog, Information	lsqlin, Information	fmincon, fseminf, Information	*
General Smooth	fmincon, Information	fmincon, Information	fmincon, Information	fmincon, fseminf, Information	*
Discrete, with Bound or Linear	intlinprog, Information	*	*	*	*

Анализируя изложенное выше, среди оптимизаторов, сведенных в таблицу 3.7, в нашем случае наиболее целесообразно выбирать функцию

«*lsqnonlin*» с алгоритмом «*trust-region-reflective*». При этом в [112] отмечается, что функция «*fmincon*» (таблица 3.7) может применяться к большинству задач с «гладкой» ЦФ и «гладкими» ограничениями, однако ее отсутствие в списке предпочтительных для МНК вызвано тем, что перечисленные методы для задач в такой форме обычно более эффективны.

Результаты множества вычислительных экспериментов, выполненных автором диссертации, полностью согласуются с выводами, сделанными на основе анализа типа решаемой задачи и документации по «Optimization Toolbox». Функция «*lsqnonlin*» (с «*trust-region-reflective*») оказалась в целом наиболее эффективной, тогда как «*fmincon*» (с алгоритмом «*interior-point*») вполне можно рассматривать в качестве альтернативного варианта.

Подытоживая сказанное и учитывая результаты большого объема вычислений (отразить которые в рамках диссертации не представляется возможным), выбор в пользу оптимизатора «*lsqnonlin*» можно обосновать следующими положениями:

- функция «*lsqnonlin*» является рекомендуемой для нашей задачи (таблица 3.7);
- сходимость к решению достигается относительно быстро (если сравнивать с другими оптимизаторами из пакетов «Optimization Toolbox» и, тем более, «Global Optimization Toolbox»);
- работа алгоритма отличается устойчивостью к выбору вектора начального приближения;
- алгоритм выдает такой вектор решения, что ошибки определения искомых сопротивлений и проводимостей ВЛЭП оказываются наименьшими (в сравнении со многими другими алгоритмами).

Помимо оптимизаторов, обсуждаемых выше, к настоящему времени появилось большое количество свободно распространяемых¹ библиотек и пакетов расширения, содержащих функции для решения оптимизационных задач различных классов. В ходе диссертационного исследования были

¹ В рамках соответствующих лицензий.

протестированы алгоритмы из пакета расширения «OPTI Toolbox» [119], интегрируемого с MATLAB и существенно расширяющего функционал MATLAB в плане решения оптимизационных задач. Среди рассмотренных оптимизаторов, подходящих для решения поставленной задачи нелинейной регрессии при наличии ограничений, наилучшим образом проявил себя «NL2SOL». Детали алгоритма представлены в публикации [120]. Производительность функции «NL2SOL», а также качество выдаваемых результатов для протестированных задач в целом как минимум не уступают получаемым с помощью «lsqnonlin». Таким образом, «NL2SOL» можно рассматривать в качестве полноценной альтернативы функции «lsqnonlin».

Верификация методики определения параметров нетранспонированной ВЛЭП, описанной в таблицах 3.5 и 3.6, а также сопутствующих теоретических выкладках и комментариях, выполнена на основе той же модели ВЛЭП и прилегающего участка электрической сети, что и ранее в п. 3.3.1 (рисунок 3.8). Для получения двух независимых комплектов СВИ, требуемых для решения оптимизационной задачи, несколько варьировались параметры нагрузки «Load» (рисунок 3.8). В таблице 3.8 (столбцы 2 и 3) представлены погрешности идентификации отдельных параметров ВЛЭП с использованием обоих отмеченных выше оптимизационных алгоритмов, зарекомендовавших себя наилучшим образом. Как видно из приведенных данных, точность расчета сопротивлений и проводимостей ВЛЭП в целом высокая. При наличии не двух, а пяти отдельных комплектов СВИ (соответствующие данные не отражены в таблице 3.8) точность решения получается еще выше (погрешности фактически отсутствуют). Таким образом, степень математической переопределенности задачи имеет важное значение: при двух комплектах СВИ из (3.41) получаем 24 уравнения при 19-ти неизвестных, тогда как при пяти – 60 уравнений при том же количестве оптимизируемых параметров.

В столбцах 4–7 таблицы 3.8 приведены результаты экспериментов с использованием реальных массивов СВИ, полученных с линии 345 кВ и

предоставленных компанией «АТС». Вместо моделирования изменений режима электрической сети (рисунок 3.8) в этом случае применяется следующий подход:

– из массива¹, содержащего СВИ напряжений и токов с двух сторон ВЛЭП 345 кВ (имеющей конфигурацию, отличную от моделируемой ВЛЭП 330 кВ), выбираем необходимое количество комплектов СВИ, например, два (столбцы 4 и 5 в таблице 3.8) или пять (столбцы 6 и 7);

– в выбранных комплектах СВИ оставляем только синхрофазоры напряжений и токов в начале линии (половина всех данных), которые далее считаем «эталонными» (в действительности они, конечно, содержат и систематические погрешности измерений, и «шумы»);

– имея отобранные комплекты СВИ в начале ВЛЭП и задавшись «эталонными» матрицами $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$ (теми же, что и ранее), получаем «эталонные» СВИ в конце моделируемой ВЛЭП 330 кВ. Расчеты осуществляем в матричном виде (сразу для всех комплектов СВИ) в соответствии с методикой, описанной в разделе 3.4 настоящей работы.

Таблица 3.8 – Результаты вычисления параметров отдельных последовательностей нетранспонированной ВЛЭП 330 кВ посредством решения оптимизационной задачи относительно искомым сопротивлений и проводимостей ВЛЭП (все погрешности СВИ игнорируются)

Параметр	Погрешности идентификации параметров (в процентах)					
	2 комплекта СВИ (модель на рисунке 3.8)		2 комплекта СВИ (на основе реальных массивов СВИ)		5 комплектов СВИ (на основе реальных массивов СВИ)	
	<i>lsqnonlin</i>	<i>NL2SOL</i>	<i>lsqnonlin</i>	<i>NL2SOL</i>	<i>lsqnonlin</i>	<i>NL2SOL</i>
<i>I</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
R_1	0,0115	-0,0490	-0,0466	-0,0029	$1,0183 \cdot 10^{-11}$	$4,2722 \cdot 10^{-7}$
X_1	-0,0020	0,0033	$2,5958 \cdot 10^{-4}$	$1,8664 \cdot 10^{-5}$	$2,4663 \cdot 10^{-12}$	$1,0677 \cdot 10^{-7}$
B_1	$1,9850 \cdot 10^{-6}$	$-5,4132 \cdot 10^{-6}$	$-5,9621 \cdot 10^{-6}$	$-3,3060 \cdot 10^{-7}$	$4,1017 \cdot 10^{-14}$	$-1,0793 \cdot 10^{-9}$
R_0	1,2580	-5,0326	5,5510	0,3502	$-5,3062 \cdot 10^{-10}$	$-1,8970 \cdot 10^{-5}$
X_0	-0,4264	0,6920	-0,3355	-0,0211	$-1,1227 \cdot 10^{-10}$	$-1,5948 \cdot 10^{-6}$
B_0	0,0010	0,0439	$6,4785 \cdot 10^{-4}$	$4,6624 \cdot 10^{-4}$	$5,4046 \cdot 10^{-10}$	$2,7677 \cdot 10^{-5}$

¹ Используемый массив СВИ может являться не оригинальным, а предварительно обработанным (в частности, с использованием методов, описанных в главе 2 диссертации).

Результаты экспериментов на основе реальных массивов векторных измерений (столбцы 4–7 в таблице 3.8) в целом хорошо коррелируются с соответствующими данными, полученными на базе модели электрической сети, приведенной на рисунке 3.8 (столбцы 2 и 3). Анализируя полученные данные, можно заключить, что *описанная выше формулировка задачи по определению параметров нетранспонированной ВЛЭП корректна, и в отсутствие погрешностей измерений обеспечиваются фактически идеальные результаты.*

3.3.3 Формулировка и решение оптимизационной задачи относительно меньшего числа неизвестных, описывающих ВЛЭП. Как отмечено выше, матрицы $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$, структура которых отражена в (3.23) и (3.24), содержат в совокупности 18 неизвестных (в действительных числах). Количество параметров оптимизации можно значительно сократить, если учесть, что элементы матриц $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$ зависят от геометрических характеристик и физических свойств системы проводников ВЛЭП (фазных проводов, грозозащитных тросов и контура возврата тока через землю). Поэтому результаты расчета актуальных параметров ВЛЭП на базе СВИ должны согласовываться с результатами их расчета по традиционным методикам, подробно описанным в п. 1.1.1 диссертации, если используется корректная информация о «геометрии» и физических свойствах проводников. Исследование, результаты которого систематизированы в п. 1.2.1 настоящей работы, позволило выявить совокупность факторов, влияние которых на вариации элементов матриц $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$ нельзя считать пренебрежимо малым. Это следующие основные влияющие факторы (ОВФ):

- средние высоты подвеса (с учетом стрел провеса) фазных проводов и грозозащитных тросов;
- удельное сопротивление постоянному току материала проводов ВЛЭП (и соответствующее ему сопротивление переменному току на промышленной частоте);

- удельное сопротивление грунта вдоль трассы ВЛЭП;
- относительная магнитная проницаемость грозозащитного троса, если трос стальной либо сталеалюминиевый с одним повивом из алюминиевых проволок.

Кроме того, полную длину ВЛЭП (как и длины отдельных участков при наличии частичной транспозиции проводов) также целесообразно считать неизвестной, как и в п. 3.3.2. 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 зависят искомые сопротивления и проводимости ВЛЭП, либо являются константами, либо имеют такие диапазоны неопределенности, в пределах которых их влиянием на вариации элементов матриц $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$ 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 $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$. Выданные оптимизатором оценки этих неизвестных (оптимальное решение), соответствующие минимуму ЦФ (3.41), позволяют затем рассчитать искомые сопротивления и проводимости по методикам, изложенным в п. 1.1.1 диссертации. Помимо уменьшения размера вектора неизвестных, данный подход обладает еще одним преимуществом: одна и та же характеристика (например, фактическая усредненная высота фазного провода с учетом стрелы провеса) может одновременно оказывать влияние на различные элементы и $[\underline{z}]$, и $[\underline{y}]$. Это означает, что при выполнении оптимизации искомые сопротивления и проводимости не будут являться полностью не зависимыми друг от друга, в отличие от формулировки оптимизационной задачи, описанной в п. 3.3.2.

Отметим, что первые три из четырех выделенных выше ОВФ могут

изменяться в зависимости от текущего режима ВЛЭП и погодных условий, тогда как «мю» троса, даже если фактически является константой, может просто отсутствовать в «паспортных» данных о ВЛЭП. Вместе с тем, как показано на рисунке 1.12 в п. 1.2.1, влиянием этого фактора на значения сопротивлений ВЛЭП в целом пренебрегать не следует. В этой связи на практике можно рекомендовать включать «мю» троса в состав вектора неизвестных.

Верификация предлагаемого подхода к оценке актуальных параметров нетранспонированной ВЛЭП выполнялась с использованием модели одноцепной линии 345 кВ, расположенной в США (рисунок 3.10). Это вызвано тем, что для данной ВЛЭП имеются подробные «паспортные» данные, а также реальные массивы СВИ напряжений и токов. Как видно из рисунка 3.10, ВЛЭП «разбита» на два участка с разным чередованием фаз: А-В-С на протяжении 18,89 км (левый сегмент ВЛЭП) и В-С-А на протяжении 62,47 км (правый сегмент ВЛЭП). Это обстоятельство не вносит существенных препятствий в процесс решения задачи по оценке параметров линии. Каждый из участков рассматривается как нетранспонированная ВЛЭП (с одним и тем же составом искомых характеристик), а ротация фаз учитывается специальной матрицей поворота [121]:

$$\begin{aligned} [\underline{\mathbf{z}}_{CAB}] &= [\mathbf{R}][\underline{\mathbf{z}}_{ABC}][\mathbf{R}]^{-1}; \\ [\mathbf{R}] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3.53)$$

где $[\underline{\mathbf{z}}_{ABC}]$ – матрица сопротивлений, соответствующая чередованию фаз А-В-С; $[\underline{\mathbf{z}}_{CAB}]$ – матрица сопротивлений, соответствующая чередованию фаз В-С-А (пояснения приведены на рисунке 3.11); $[\mathbf{R}]$ – матрица поворота.

Оптимизация осуществляется относительно следующих семи неизвестных (против 19-ти при решении задачи в п. 3.3.2):

– средняя высота подвеса фазного провода;

- средняя высота подвеса грозозащитного троса;
- удельное сопротивление материала фазного провода;
- удельное сопротивление материала грозозащитного троса;
- удельное сопротивление грунта по трассе ВЛЭП;
- фактическая длина участка ВЛЭП с чередованием фаз А-В-С;
- фактическая длина участка ВЛЭП с чередованием фаз В-С-А.

Значения первых четырех из этих характеристик, принятые за «эталонные», приведены в таблице А.2. «Эталонное» удельное сопротивление грунта принято равным 50 Ом·м. «Эталонные» длины двух сегментов ВЛЭП отражены на рисунке 3.10.

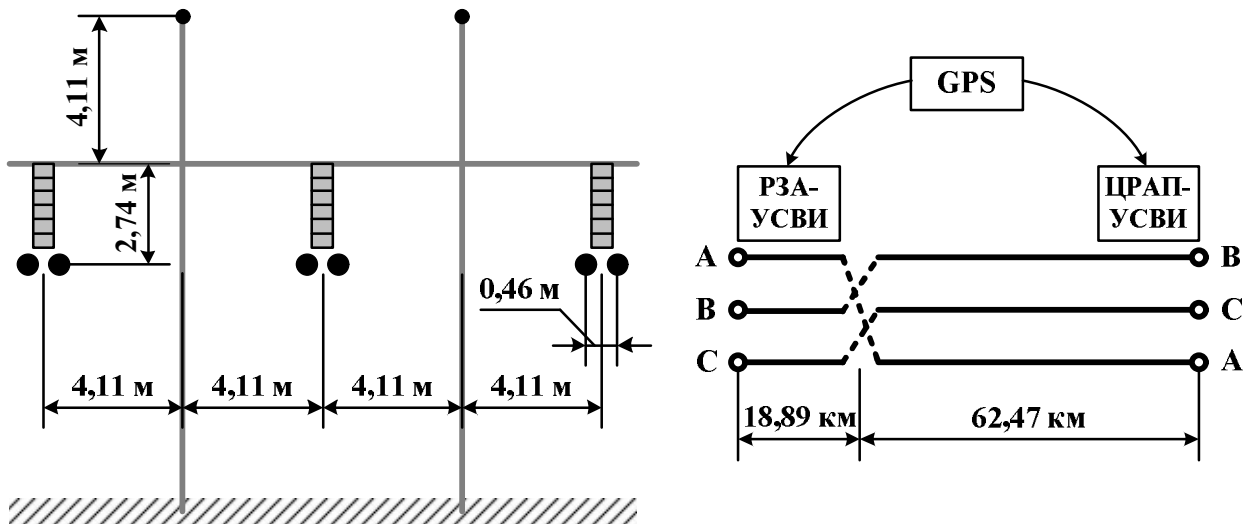


Рисунок 3.10 – Конфигурация ВЛЭП напряжением 345 кВ, используемая для выполнения вычислительных экспериментов по оценке параметров нетранспонированной линии

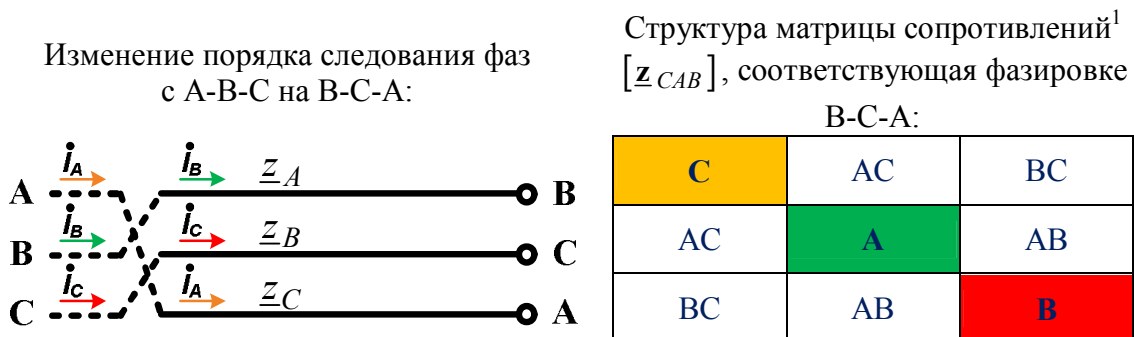


Рисунок 3.11 – Поясняющая иллюстрация к изменению структуры матрицы сопротивлений при транспозиции фазных проводов на моделируемой ВЛЭП 345 кВ

¹ Аналогично выглядит и структура матрицы проводимостей [\underline{y}_{CAB}].

В таблицу 3.9 сведены «эталонные» значения сопротивлений и проводимостей отдельных последовательностей, а также погрешности их расчета с использованием предлагаемого выше подхода. Комплекты измерений по концам ВЛЭП получены на основе реального массива СВИ так же, как описано в п. 3.3.2 (с соответствующими результатами в столбцах 4–7 таблицы 3.8). В качестве оптимизаторов применены оба отобранных выше алгоритма: «*lsqnonlin*» (с опцией «*trust-region-reflective*») и «*NL2SOL*»; при этом результаты идентичны (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Результаты вычисления параметров отдельных последовательностей частично транспонированной ВЛЭП 345 кВ (рисунок 3.10) посредством решения оптимизационной задачи относительно нескольких характеристик ВЛЭП (все погрешности СВИ игнорируются)

Параметр	«Эталонное» значение	Погрешности идентификации параметров ВЛЭП (в процентах)			
		С одним комплектом СВИ		С пятью комплектами СВИ	
		<i>lsqnonlin</i>	<i>NL2SOL</i>	<i>lsqnonlin</i>	<i>NL2SOL</i>
<i>I</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
R_1 , Ом/км	0,0301	-0,0023	-0,0023	-0,0022	-0,0022
X_1 , Ом/км	0,3713	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
B_1 , См/км	$4,4535 \cdot 10^{-6}$	$-1,8712 \cdot 10^{-4}$	$-1,8712 \cdot 10^{-4}$	$-1,8807 \cdot 10^{-4}$	$-1,8807 \cdot 10^{-4}$
R_0 , Ом/км	0,3114	1,1459	1,1459	1,1646	1,1646
X_0 , Ом/км	1,2026	-0,3181	-0,3181	-0,3189	-0,3189
B_0 , См/км	$2,8499 \cdot 10^{-6}$	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012

Как отмечалось выше, один комплект СВИ позволяет записать 12 уравнений в действительных числах, иными словами, привносит 12 слагаемых в ЦФ (3.41). В отличие от формулировки оптимизационной задачи, описанной в п. 3.3.2 (где количество неизвестных равнялось 19-ти), здесь – при поиске значений семи неизвестных – оказывается достаточным задействование всего одного комплекта синхрофазоров. Это подтверждается результатами экспериментов в таблице 3.9, из которых видно, что погрешности вычисления искомых параметров ВЛЭП при наличии лишь одного комплекта СВИ (столбцы 3 и 4) – фактически те же, что и при пяти комплектах СВИ (столбцы 5 и 6). Данное свойство рассматриваемого

алгоритма особенно ценно. Дело в том, что применяемые комплекты измерений должны быть как можно более «непохожими», чтобы улучшить обусловленность задачи, что особенно актуально в реальных практических условиях, в которых СВИ сопровождаются систематическими и случайными погрешностями. Вместе с тем изменения электрических величин по концам ВЛЭП в нормальном установившемся режиме ЭЭС обычно характеризуются выраженной корреляцией (рисунки 2.2 и 2.12). В этих условиях использование в ЦФ дополнительных комплектов СВИ является малоинформативным. Данная проблема более детально обсуждается в главе 4.

Из таблицы 3.9 следует, что *предлагаемый метод оценки параметров нетранспонированной (частично транспонированной) ВЛЭП, основанный на выполнении оптимизации относительно меньшего числа неизвестных, обеспечивает достаточно точные результаты в отсутствие погрешностей СВИ*. Следует также аргументировать, почему при использовании пяти комплектов СВИ и предыдущего алгоритма (п. 3.3.2) получаются фактически идеальные результаты (столбцы 6 и 7 в таблице 3.8), чего нельзя сказать о новом алгоритме (столбцы 5 и 6 в таблице 3.9). «Эталонные» матрицы $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$ рассчитаны на основе методики, в которой учет влияния земли осуществляется с помощью интеграла Карсона, как описывается выражениями (1.8)–(1.11). Эти «эталонные» матрицы затем применяются для вычисления СВИ по концам ВЛЭП. Далее, при решении оптимизационной задачи в новой формулировке с использованием полученных СВИ, расчет $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$ производится на базе формул (1.12)–(1.14) для учета влияния земли (С. Gary, А. Deri, G. Tevan, А. Semlyen и А. Castanheira). Таким образом, «прямая» задача (получение «эталонных» $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$, а также СВИ) решается по одной методике, а «обратная» (оценка параметров ВЛЭП) – по другой. Это несоответствие не следует считать некорректным; напротив, оно

призвано имитировать тот факт, что ни одна модель не воспроизводит реальные процессы на ВЛЭП со стопроцентной точностью. В нашем случае выражения (1.12)–(1.14) условно соответствуют «модели», а выражения (1.8)–(1.11) – «реальным процессам».

3.4 Методика моделирования установившихся режимов однородных и неоднородных ВЛЭП произвольной конфигурации

3.4.1 Матричное описание трехфазной ВЛЭП как многополюсника.

Метод оценки параметров произвольной нетранспонированной ВЛЭП, представленный в п. 3.3.2 диссертации, требует решения оптимизационной задачи. Для этого, в свою очередь, необходимо воспользоваться достаточно громоздкими выражениями, позволяющими вычислить ЦФ в форме (3.41), как отражено в таблице 3.5. Кроме того, для разрешимости задачи, как отмечено выше, требуются как минимум два независимых комплекта СВИ по концам линии, что обуславливает необходимость повторения всей вычислительной процедуры (таблица 3.5) для каждого нового комплекта измерений. Наконец, моделируемая ВЛЭП может быть неоднородной: в наиболее простом случае эта «неоднородность» может выражаться в наличии двух (рисунок 3.10) или более участков с различным чередованием фаз. Связь фазных напряжений и токов по концам каждого однородного участка при этом должна описываться отдельно (по тем же выражениям, что и в таблице 3.5), а «соединение» участков подчиняется граничным условиям в виде равенства соответствующих фазных величин.

Учитывая вышеизложенное, целесообразно вывести более компактное математическое описание, связывающее СВИ напряжений и токов по концам анализируемой ВЛЭП произвольной конфигурации. Задачу можно сформулировать следующим образом: имея N полукомплектов¹ СВИ в начале

¹ Под «полукомплексом» будем понимать совокупность синхрофазоров с одной меткой времени, полученных на одном конце моделируемой ВЛЭП (три фазных напряжения и три фазных тока).

ВЛЭП с заданными характеристиками (содержащей произвольное число участков с различными параметрами), получить недостающие N полукомплектов СВИ в конце ВЛЭП (рисунок 3.12, а). При этом расчеты требуется выполнить в максимально компактном матричном виде (в наилучшем варианте – с помощью единого матричного уравнения сразу для всех комплектов СВИ). Помимо визуального упрощения структуры вычислений, требуемых предложенным выше методикам и алгоритмам, это позволит отказаться от лишних циклов «for» (например, с числом итераций N – по количеству комплектов СВИ) при выполнении оптимизации, что существенно сэкономит вычислительные ресурсы.

Анализ выражений (3.47)–(3.51), приведенных в таблице 3.5, позволяет выразить вектора напряжений и токов в конце нетранспонированной линии через соответствующие вектора в начале линии следующим образом:

$$\begin{aligned} [\dot{\mathbf{U}}_e] &= [\mathbf{K}][\dot{\mathbf{U}}_b] + [\mathbf{L}][\dot{\mathbf{I}}_b]; \\ [\dot{\mathbf{I}}_e] &= [\mathbf{M}][\dot{\mathbf{U}}_b] + [\mathbf{N}][\dot{\mathbf{I}}_b], \end{aligned} \quad (3.54)$$

где $[\dot{\mathbf{U}}_b]$ и $[\dot{\mathbf{I}}_b]$ – вектора-столбцы напряжений и токов в начале линии; $[\dot{\mathbf{U}}_e]$ и $[\dot{\mathbf{I}}_e]$ – аналогичные величины в конце линии (рисунок 3.12):

$$\begin{aligned} [\dot{\mathbf{U}}_b] &= (\dot{U}_{bA} \quad \dot{U}_{bB} \quad \dot{U}_{bC})^T; \\ [\dot{\mathbf{I}}_b] &= (\dot{I}_{bA} \quad \dot{I}_{bB} \quad \dot{I}_{bC})^T; \\ [\dot{\mathbf{U}}_e] &= (\dot{U}_{eA} \quad \dot{U}_{eB} \quad \dot{U}_{eC})^T; \\ [\dot{\mathbf{I}}_e] &= (\dot{I}_{eA} \quad \dot{I}_{eB} \quad \dot{I}_{eC})^T, \end{aligned} \quad (3.55)$$

а $[\mathbf{K}]$, $[\mathbf{L}]$, $[\mathbf{M}]$ и $[\mathbf{N}]$ – квадратные матрицы:

$$[\mathbf{K}] = [\mathbf{T}_u] \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma_{m1}l) & 0 & 0 \\ 0 & \text{ch}(\gamma_{m2}l) & 0 \\ 0 & 0 & \text{ch}(\gamma_{m3}l) \end{bmatrix} [\mathbf{T}_u]^{-1}; \quad (3.56)$$

$$[\underline{\mathbf{L}}] = -[\underline{\mathbf{T}}_u] \begin{bmatrix} Z_{m1} \cdot \text{sh}(\gamma_{m1}l) & 0 & 0 \\ 0 & Z_{m2} \cdot \text{sh}(\gamma_{m2}l) & 0 \\ 0 & 0 & Z_{m3} \cdot \text{sh}(\gamma_{m3}l) \end{bmatrix} [\underline{\mathbf{T}}_i]^{-1}; \quad (3.57)$$

$$[\underline{\mathbf{M}}] = -[\underline{\mathbf{T}}_i] \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{m1}} \cdot \text{sh}(\gamma_{m1}l) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_{m2}} \cdot \text{sh}(\gamma_{m2}l) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_{m3}} \cdot \text{sh}(\gamma_{m3}l) \end{bmatrix} [\underline{\mathbf{T}}_u]^{-1}; \quad (3.58)$$

$$[\underline{\mathbf{N}}] = [\underline{\mathbf{T}}_i] \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma_{m1}l) & 0 & 0 \\ 0 & \text{ch}(\gamma_{m2}l) & 0 \\ 0 & 0 & \text{ch}(\gamma_{m3}l) \end{bmatrix} [\underline{\mathbf{T}}_i]^{-1}. \quad (3.59)$$

В выражениях (3.56)–(3.59) приняты те же обозначения, что и ранее. Отдельно отметим лишь то, что « $m1$ », « $m2$ » и « $m3$ » обозначают одну из трех модальных составляющих, характеристики которых – постоянная распространения γ и волновое сопротивление Z – определяются на основании формул (3.43)–(3.46).

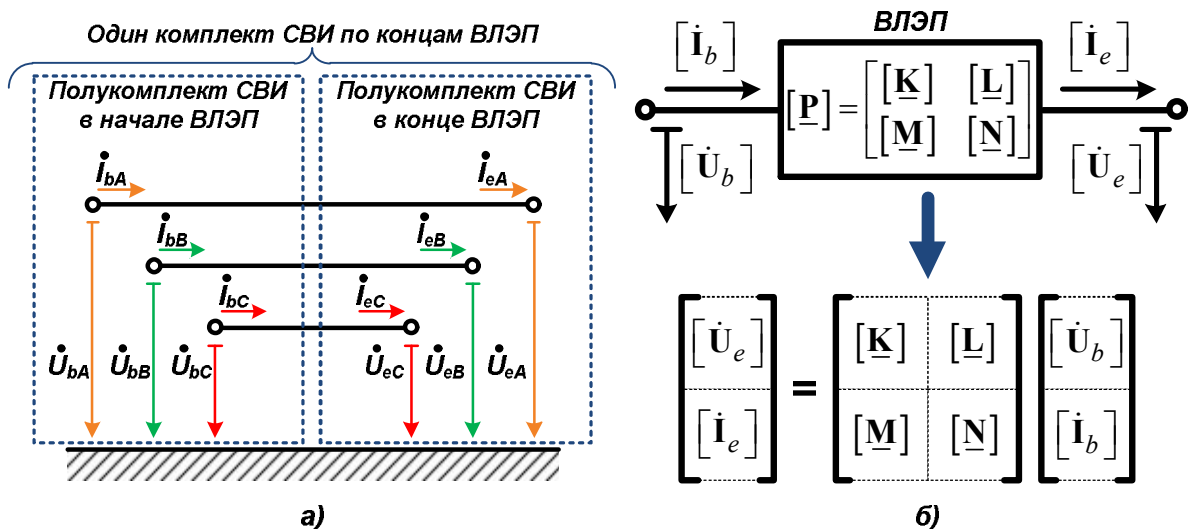


Рисунок 3.12 – Схематическое изображение ВЛЭП с обозначением всех измерений, формирующих вектора-столбцы по (3.55), и указанием принятых положительных направлений токов (а); условное изображение той же ВЛЭП в однолинейном варианте, отражающее связь между измерениями по концам ВЛЭП в матричном виде (б)

Систему из двух матричных уравнений (3.54) можно заменить одним уравнением:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_e \\ \dot{\mathbf{i}}_e \end{bmatrix}}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} \underbrace{[\mathbf{K}]}_{3 \times 3} & \underbrace{[\mathbf{L}]}_{3 \times 3} \\ \underbrace{[\mathbf{M}]}_{3 \times 3} & \underbrace{[\mathbf{N}]}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_b \\ \dot{\mathbf{i}}_b \end{bmatrix}}_{6 \times 1} = \underbrace{[\mathbf{P}]}_{6 \times 6} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_b \\ \dot{\mathbf{i}}_b \end{bmatrix}}_{6 \times 1}, \quad (3.60)$$

где матрица

$$[\mathbf{P}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{K}] & [\mathbf{L}] \\ [\mathbf{M}] & [\mathbf{N}] \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

полностью заменяет собой все параметры ВЛЭП, соответствующие текущему режиму и фактическим погодным условиям, а также включает все необходимые фазо-модальные преобразования, требуемые для связи электрических величин по концам ВЛЭП непосредственно в фазных координатах. Это позволяет представить моделируемую ВЛЭП в виде пассивного многополюсника, условное изображение которого в однолинейном варианте приведено на рисунке 3.12, б.

Реальная ВЛЭП, как уже отмечалось, может состоять из нескольких участков (секций) с различным порядком следования фаз. В более общем случае участки линии, вероятно, могут отличаться и характеристиками системы проводников (например, при переходах через крупные водные преграды), что по возможности требует учета с целью как можно более точного моделирования ВЛЭП в целом. В связи с этим возникает задача представления сложной неоднородной линии в виде эквивалента, аналогичного (3.61).

Рассмотрим неоднородную линию, состоящую из M секций (рисунок 3.13). Напряжения и токи в конце первой секции – $[\dot{\mathbf{U}}_{e1}]$ и $[\dot{\mathbf{i}}_{e1}]$ – выражаются через напряжения и токи в начале секции – $[\dot{\mathbf{U}}_{b1}]$ и $[\dot{\mathbf{i}}_{b1}]$ – согласно (3.60):

$$\begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}_{e1}] \\ [\dot{\mathbf{I}}_{e1}] \end{bmatrix} = [\mathbf{P}_1] \begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}_{b1}] \\ [\dot{\mathbf{I}}_{b1}] \end{bmatrix}, \quad (3.62)$$

где $[\mathbf{P}_1]$ – матричный эквивалент для первой секции, который, как в (3.61), можно разделить на четыре квадратные подматрицы $[\mathbf{K}_1]$, $[\mathbf{L}_1]$, $[\mathbf{M}_1]$ и $[\mathbf{N}_1]$.

Аналогично для второй секции ВЛЭП имеем

$$\begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}_{e2}] \\ [\dot{\mathbf{I}}_{e2}] \end{bmatrix} = [\mathbf{P}_2] \begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}_{b2}] \\ [\dot{\mathbf{I}}_{b2}] \end{bmatrix}, \quad (3.63)$$

что с учетом граничных условий (рисунок 3.13) и соотношения (3.62) можно переписать как

$$\begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}_{e2}] \\ [\dot{\mathbf{I}}_{e2}] \end{bmatrix} = [\mathbf{P}_2][\mathbf{P}_1] \begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}_{b1}] \\ [\dot{\mathbf{I}}_{b1}] \end{bmatrix}. \quad (3.64)$$

Проводя идентичные преобразования вплоть до секции с номером M (рисунок 3.13), получаем следующее:

$$\begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}_{eM}] \\ [\dot{\mathbf{I}}_{eM}] \end{bmatrix} = [\mathbf{P}_M][\mathbf{P}_{M-1}] \dots [\mathbf{P}_2][\mathbf{P}_1] \begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}_{b1}] \\ [\dot{\mathbf{I}}_{b1}] \end{bmatrix}, \quad (3.65)$$

или

$$\begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}_e] \\ [\dot{\mathbf{I}}_e] \end{bmatrix} = [\mathbf{P}_{eq}] \begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}_b] \\ [\dot{\mathbf{I}}_b] \end{bmatrix}. \quad (3.66)$$

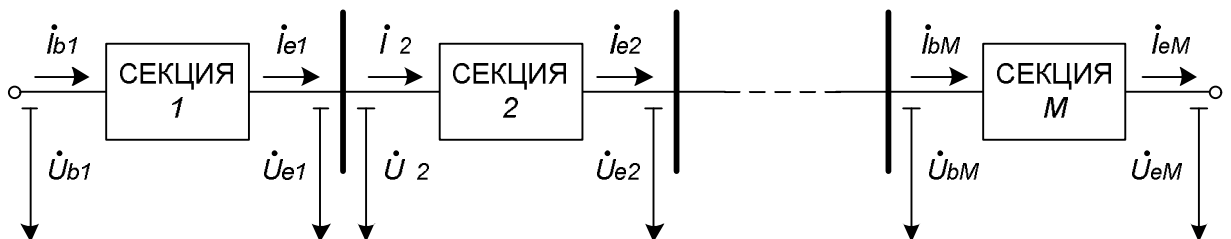


Рисунок 3.13 – Схема, изображающая неоднородную ВЛЭП в однолинейном варианте

Таким образом, рассчитав матрицы $[\mathbf{P}]$ для каждой из M однородных

секций линии и затем перемножив эти матрицы так, как показано в (3.65), можно получить эквивалентное описание неоднородной ВЛЭП в виде (3.66). Поэтому неоднородную линию можно также представить в виде эквивалентного пассивного многополюсника (рисунок 3.12, б). Отметим, что многополюсник в общем случае будет несимметричным и, следовательно, характеризуем тремя независимыми «А»-параметрами [122].

Функционал выражения (3.66) нетрудно расширить и на случай с N комплектами векторных измерений напряжений и токов. Для этого достаточно вектора-столбцы СВИ в левой и правой частях (3.66) превратить в матрицы, в которых каждый столбец будет соответствовать одному из N комплектов СВИ:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{U}_{eA(1)} & \cdot & \cdot & \dot{U}_{eA(N)} \\ \dot{U}_{eB(1)} & \cdot & \cdot & \dot{U}_{eB(N)} \\ \dot{U}_{eC(1)} & \cdot & \cdot & \dot{U}_{eC(N)} \\ \dot{I}_{eA(1)} & \cdot & \cdot & \dot{I}_{eA(N)} \\ \dot{I}_{eB(1)} & \cdot & \cdot & \dot{I}_{eB(N)} \\ \dot{I}_{eC(1)} & \cdot & \cdot & \dot{I}_{eC(N)} \end{bmatrix}}_{6 \times N} = \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{U}_{bA(1)} & \cdot & \cdot & \dot{U}_{bA(N)} \\ \dot{U}_{bB(1)} & \cdot & \cdot & \dot{U}_{bB(N)} \\ \dot{U}_{bC(1)} & \cdot & \cdot & \dot{U}_{bC(N)} \\ \dot{I}_{bA(1)} & \cdot & \cdot & \dot{I}_{bA(N)} \\ \dot{I}_{bB(1)} & \cdot & \cdot & \dot{I}_{bB(N)} \\ \dot{I}_{bC(1)} & \cdot & \cdot & \dot{I}_{bC(N)} \end{bmatrix}}_{6 \times N} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{eq} \\ \mathbf{P}_{eq} \\ \mathbf{P}_{eq} \\ \mathbf{P}_{eq} \\ \mathbf{P}_{eq} \\ \mathbf{P}_{eq} \end{bmatrix}}_{6 \times 6}. \quad (3.67)$$

Матричное уравнение (3.67) является решением поставленной задачи: *получено компактное математическое описание ВЛЭП произвольной конфигурации, позволяющее рассчитать синхрофазоры установившегося режима (нормального, аварийного, послеаварийного) в конце линии, соответствующие таковым в начале линии.*

Верификация описанного выше подхода к эквивалентированию сложной линии осуществлена с помощью программных комплексов АТР/АТРDraw и MATLAB. На рисунке 3.14, а, схематично изображена трехфазная ЭЭС с моделируемой ВЛЭП «L1», состоящей из трех участков: «L1.1», «L1.2» и «L1.3» (рисунок 3.14, б). Участки отличаются длиной, а также порядком следования фаз: А-В-С для «L1.1» и «L1.3»; В-С-А для «L1.2» (рисунок 3.14, б). Геометрические характеристики и физические

свойства системы проводников, образующих ВЛЭП «L1», в точности соответствуют описанным в п. 3.3.3 (и, в частности, отраженным на рисунке 3.10).

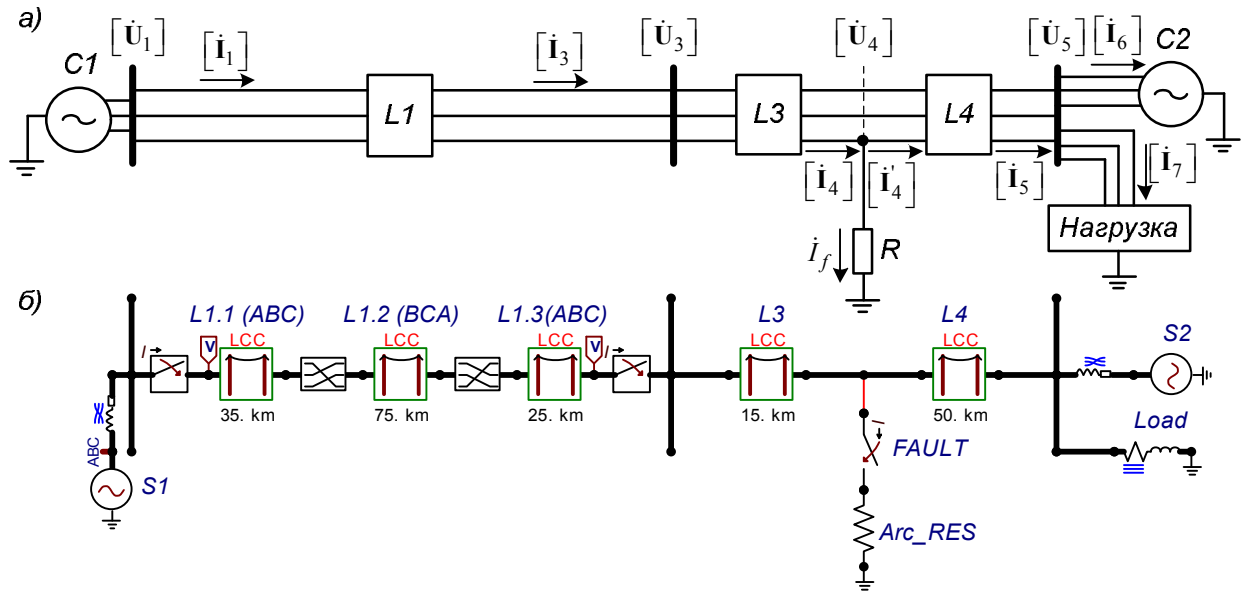


Рисунок 3.14 – Условное изображение схемы ЭЭС с моделируемой ВЛЭП «L1» (а) и соответствующая модель в программе ATPDraw (б)

В программе ATP были рассчитаны все фазные токи и напряжения по концам линии «L1» в установившемся режиме внешнего КЗ фазы А (через малое переходное сопротивление) в конце смежной линии «L3» (рисунок 3.14). Шесть векторов (соответствующие напряжениям и токам в начале «L1») затем использовались в MATLAB для расчета векторов в конце «L1» по (3.66) с целью их сопоставления с результатами, выданными ATP. Матрица $[\underline{P}_{eq}]$ в (3.66) при этом формировалась по (3.65) как произведение трех матриц $[\underline{P}_{1,3}][\underline{P}_{1,2}][\underline{P}_{1,1}]$, соответствующих трем сегментам линии «L1» (рисунок 3.14, б). Изменение порядка следования фаз с А-В-С на В-С-А учитывалось матрицей поворота $[\underline{R}]$ по (3.53). Наконец, все сопротивления и проводимости в фазных координатах $[\underline{z}]$ и $[\underline{y}]$ были вычислены по формулам, представленным в п. 1.1.1. При этом учет влияния земли был осуществлен с помощью интеграла Карсона, как описывается выражениями

(1.8)–(1.11), поскольку та же методика используется и в программном обеспечении АТР.

В таблице 3.10 приведены результаты расчетов напряжений и токов в конце моделируемой ВЛЭП «L1» (соответствующих векторам-столбцам $[\dot{U}_3]$ и $[\dot{I}_3]$ на рисунке 3.14, а). Из анализа числовых данных, отраженных в таблице 3.10, следует, что изложенное выше компактное матричное описание ВЛЭП в установившемся режиме корректно: расхождение с АТР составляет сотые доли процента (по амплитудным значениям) и тысячные доли градусов (по фазовым углам).

Таблица 3.10 – Результаты верификации выражения (3.66) с помощью расчета напряжений и токов на ВЛЭП «L1» (рисунок 3.14) в установившемся режиме внешнего КЗ

Параметр	Амплитудное значение (В – для напряжений; А – для токов)			Фазовый угол (град.)		
	МАТЛАВ	АТР	Отличие (%)	МАТЛАВ	АТР	Разность (град.)
\dot{U}_{3A}	$0,1862 \cdot 10^5$	$0,1863 \cdot 10^5$	-0,0556	-2,1439	-2,1377	-0,0062
\dot{U}_{3B}	$3,0876 \cdot 10^5$	$3,0877 \cdot 10^5$	-0,0036	-130,5834	-130,5851	0,0016
\dot{U}_{3C}	$3,2730 \cdot 10^5$	$3,2730 \cdot 10^5$	-0,0015	134,8744	134,8760	-0,0016
\dot{I}_{3A}	$1,9955 \cdot 10^3$	$1,9955 \cdot 10^3$	-0,0016	-84,0821	-84,0822	0,0001
\dot{I}_{3B}	$0,3164 \cdot 10^3$	$0,3165 \cdot 10^3$	-0,0043	97,0431	97,0501	-0,0070
\dot{I}_{3C}	$0,1962 \cdot 10^3$	$0,1963 \cdot 10^3$	-0,0193	-8,4029	-8,3977	-0,0052

Таким образом, если известны N полукомплектов СВИ в начале ВЛЭП с заданной конфигурацией, можно легко рассчитать соответствующие N полукомплектов СВИ в конце ВЛЭП по (3.67). Именно такой подход использовался при верификации метода определения параметров ВЛЭП, изложенного в п. 3.3.2, на основе реальных массивов СВИ (с соответствующими результатами в столбцах 4–7 таблицы 3.8).

3.4.2 Моделирование установившегося режима ЭЭС, содержащей анализируемую ВЛЭП. Компактное описание ВЛЭП, представленное в п. 3.4.1, позволяет автоматизировать расчет установившихся режимов ЭЭС с

целью получения множества комплектов СВИ по концам анализируемой ВЛЭП без использования ATP/ATPDraw. Это способствует более удобному выполнению исследований по актуализации параметров ВЛЭП, поскольку программная реализация всех алгоритмов осуществляется в рамках единой среды (в данном случае – в MATLAB в виде связанных друг с другом m-файлов). Необходимость многократного копирования результатов, полученных в ATP, при этом отсутствует. Комплекс ATP/ATPDraw требуется использовать лишь на этапе верификации функций, созданных в MATLAB, чтобы убедиться в корректности реализации программного кода.

Рассмотрим модель электрической сети, отраженную на рисунке 3.14, с однофазным КЗ фазы А между линиями «L3» и «L4». Используя законы Ома и Кирхгофа, а также опираясь на матричные соотношения (3.54), можно записать следующую систему уравнений (с обозначениями напряжений и токов согласно рисунку 3.14, а):

$$[\dot{U}_1] = [\dot{E}_1] - [z_{s1}][\dot{I}_1]; \quad (3.68-а)$$

$$[\dot{U}_3] = [K_1][\dot{U}_1] + [L_1][\dot{I}_1]; \quad (3.68-б)$$

$$[\dot{I}_3] = [M_1][\dot{U}_1] + [N_1][\dot{I}_1]; \quad (3.68-в)$$

$$[\dot{U}_4] = [K_3][\dot{U}_3] + [L_3][\dot{I}_3]; \quad (3.68-г)$$

$$[\dot{I}_4] = [M_3][\dot{U}_3] + [N_3][\dot{I}_3]; \quad (3.68-д)$$

$$[\dot{U}_5] = [K_4][\dot{U}_4] + [L_4][\dot{I}'_4]; \quad (3.68-е)$$

$$[\dot{I}_5] = [M_4][\dot{U}_4] + [N_4][\dot{I}'_4]; \quad (3.68-ж)$$

$$[\dot{U}_5] = [\dot{E}_2] + [z_{s2}][\dot{I}_6]; \quad (3.68-з)$$

$$[\dot{U}_5] = [z_{load}][\dot{I}_7]; \quad (3.68-и)$$

$$[\dot{I}_5] = [\dot{I}_6] + [\dot{I}_7]; \quad (3.68-к)$$

$$\dot{U}_{4A} = \dot{I}_f \cdot R; \quad (3.68-л)$$

$$\dot{I}_{4A} - \dot{I}_f = \dot{I}'_{4A}; \quad (3.68-м)$$

$$\dot{I}_{4B} = \dot{I}'_{4B}; \quad (3.68-н)$$

$$\dot{I}_{4C} = \dot{I}'_{4C}. \quad (3.68-о)$$

В системе уравнений (3.68) приняты следующие обозначения (помимо описанных выше или отсутствующих в явном виде на рисунке 3.14, а): $[\dot{\mathbf{E}}_1]$ – вектор-столбец электродвижущих сил (ЭДС) трех фаз эквивалентированной системы «С1» (рисунок 3.14, а); $[\dot{\mathbf{E}}_2]$ – аналогичный вектор-столбец ЭДС системы «С2»; $[\mathbf{z}_{s1}]$ – матрица сопротивлений системы «С1» размером 3×3 ; $[\mathbf{z}_{s2}]$ – аналогичная матрица для системы С2; $[\mathbf{z}_{load}]$ – матрица сопротивлений активно-индуктивной нагрузки, обозначенной как «Нагрузка» на рисунке 3.14, а, и «Load» на рисунке 3.14, б. Неизвестные напряжения и токи, входящие в (3.68), отмечены на рисунке 3.14, а: например, \dot{I}_f – полный ток КЗ через переходное сопротивление R ; $[\dot{\mathbf{I}}_7]$ – вектор-столбец токов нагрузки; и т.д.

Первые 10 уравнений системы (3.68) – с (3.68-а) по (3.68-к) – матричные, что эквивалентно 30-ти уравнениям в скалярных величинах. Общее же количество уравнений составляет 34, что соответствует числу неизвестных, выделенных цветом в (3.68). При этом система – линейная, поэтому ее решение не составляет труда и может быть легко автоматизировано, что и было выполнено в MATLAB (Приложение Д).

С целью оценки достоверности результатов, выдаваемых функцией, представленной в Приложении Д, в программе ATP был выполнен расчет установившегося режима КЗ для той же схемы ЭЭС, отраженной на рисунке 3.14, с те же параметрами элементов. В результате были получены синхрофазоры по концам анализируемой ВЛЭП «L1», обозначенные как $[\dot{\mathbf{U}}_1]$, $[\dot{\mathbf{I}}_1]$, $[\dot{\mathbf{U}}_3]$ и $[\dot{\mathbf{I}}_3]$ (рисунок 3.14, а). Сравнение соответствующих амплитуд и фазовых углов векторов, рассчитанных в ATP и MATLAB

(таблица 3.11), позволяет убедиться в корректности системы уравнений (3.68), а также кода функции, приведенной в Приложении Д.

Некоторая вариация режима ЭЭС (изображенной на рисунке 3.14 или аналогичных, схожих с ней по структуре) позволяет получить несколько независимых комплектов СВИ по концам моделируемой ВЛЭП. Подобный подход использовался при тестировании метода идентификации параметров ВЛЭП, изложенного в п. 3.3.2, для получения двух комплектов СВИ (с соответствующими результатами в столбцах 2 и 3 таблицы 3.8). В целом же решение в MATLAB систем уравнений, аналогичных (3.68), наиболее целесообразно для расчета одного или нескольких комплектов «эталонных» СВИ в «нестандартных» режимах, для которых массивы реальных СВИ получить проблематично (внешние КЗ, режимы с малой корреляцией синхрофазоров и пр.).

Таблица 3.11 – Результаты верификации системы уравнений (3.68) и программного кода для решения этой системы в MATLAB, представленного в Приложении Д

Параметр	Амплитудное значение (В – для напряжений; А – для токов)			Фазовый угол (град.)		
	MATLAB	АТР	Отличие (%)	MATLAB	АТР	Разность (град.)
<i>СВИ в начале моделируемой линии «L1» (рисунок 3.14, а)</i>						
\dot{U}_{1A}	$1,8837 \cdot 10^5$	$1,8837 \cdot 10^5$	0,0020	-2,0141	-2,0144	0,0003
\dot{U}_{1B}	$2,8154 \cdot 10^5$	$2,8154 \cdot 10^5$	0,0000	-121,4446	-121,4443	-0,0003
\dot{U}_{1C}	$2,7837 \cdot 10^5$	$2,7837 \cdot 10^5$	-0,0002	124,6394	124,6393	0,0001
\dot{I}_{1A}	1919,3	1919,4	-0,0057	-83,7508	-83,7503	-0,0005
\dot{I}_{1B}	257,3826	257,4374	-0,0213	64,9388	64,9409	-0,0020
\dot{I}_{1C}	132,0720	132,0458	0,0198	-68,5854	-68,5947	0,0093
<i>СВИ в конце моделируемой линии «L1» (рисунок 3.14, а)</i>						
\dot{U}_{3A}	$0,1863 \cdot 10^5$	$0,1863 \cdot 10^5$	0,0021	-2,1373	-2,1377	0,0004
\dot{U}_{3B}	$3,0876 \cdot 10^5$	$3,0877 \cdot 10^5$	-0,0035	-130,5840	-130,5851	0,0011
\dot{U}_{3C}	$3,2730 \cdot 10^5$	$3,2730 \cdot 10^5$	-0,0020	134,8747	134,8760	-0,0013
\dot{I}_{3A}	1995,4	1995,5	-0,0069	-84,0825	-84,0822	-0,0003
\dot{I}_{3B}	316,3878	316,4513	-0,0201	97,0468	97,0501	-0,0032
\dot{I}_{3C}	196,2697	196,2770	-0,0037	-8,4063	-8,3977	-0,0087

3.5 Выводы по главе 3

1. Получено аналитическое решение задачи определения фактических параметров однофазной ВЛЭП (либо параметров прямой последовательности трехфазной транспонированной ВЛЭП) на базе одного комплекта СВИ по концам ВЛЭП.

2. Опираясь на решение задачи для однофазной линии, разработан метод идентификации параметров трехфазной транспонированной ВЛЭП. Этот метод, требующий один комплект СВИ и использующий фазомодальные преобразования, потенциально позволяет определить сопротивления и проводимости не только прямой, но и нулевой последовательности. Тестирование метода с помощью ATP/ATPDraw и MATLAB позволило выяснить, что в отсутствие погрешностей СВИ обеспечиваются фактически «эталонные» результаты.

3. Рассмотрены три различных подхода к идентификации актуальных параметров нетранспонированных (или частично транспонированных) ВЛЭП. Показано, что для точной оценки параметров линии в данном случае требуется сформулировать и решить оптимизационную задачу. При этом, если имеются подробные «паспортные» характеристики ВЛЭП (типы опор, сечения проводников и т.п.), целесообразно выполнять оптимизацию относительно вектора неизвестных существенно меньшей размерности. Тестирование представленных методов, выполненное в том числе с привлечением реальных архивов СВИ, свидетельствует об их работоспособности при неучете погрешностей измерений.

4. Систематизированы важные аспекты подготовки и решения оптимизационной задачи для оценки параметров нетранспонированных линий (в частности, обоснован выбор в пользу оптимизаторов «*lsqnonlin*» и «*NL2SOL*»).

5. Получено компактное матричное описание одноцепной трехфазной ВЛЭП произвольной конфигурации как многополюсника. Это позволяет

упростить и ускорить процесс вычисления векторов напряжений и токов по концам ВЛЭП, а также автоматизировать расчеты установившихся режимов ЭЭС в MATLAB (оставляя специализированным программным средствам наподобие ATP/ATPDraw функцию однократной верификации программного кода).

Результаты исследований, изложенных в главе 3, опубликованы в работах [130, 135, 137–139].

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛЭП НА ОСНОВЕ СВИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1 Анализ несимметрии и характера изменений напряжений и токов посредством обработки реальных массивов СВИ

Как отмечалось в главе 3, задача оценивания параметров ВЛЭП на базе векторных измерений, полученных в нормальном режиме ЭЭС, математически плохо обусловлена: комплекты СВИ, как правило, маловариативны и отличаются значительной корреляцией измерений по отдельным фазам, а также с двух сторон линии. Данное утверждение наглядно иллюстрируется графическими зависимостями, представленными в Приложении Е для двух различных одноцепных ВЛЭП: американской напряжением 345 кВ (с конфигурацией, отраженной на рисунке А.3) и российской напряжением 500 кВ (с конфигурацией, соответствующей одной из двух идентичных цепей на рисунке А.1). Графики на рисунках Е.1–Е.3 построены по 108002 точкам данных для каждой величины напряжения, тока и фазового угла, что приблизительно соответствует одному часу измерений при частоте получения СВИ в 30 кадров за секунду. Каждая из кривых на рисунках Е.4–Е.7 содержит 30000 точек, что эквивалентно десяти минутам измерений при частоте сбора синхрофазоров в 50 Гц, типичной для российской электроэнергетики.

Как видно из рисунков Е.4 и Е.5, диапазоны изменения действующих значений и фазовых углов токов даже на непродолжительном временном отрезке могут оказаться достаточно большими. Вместе с тем, как следует из тех же графиков, все эти вариации обычно слишком сильно коррелированы. С точки зрения задачи идентификации параметров линии это означает, что дополнительные комплекты СВИ, требуемые для формирования переопределенной системы уравнений (как описано в главе 3), фактически не

привносят новой информации в математическую модель. *Этим обстоятельством обусловлена принципиальная сложность определения параметров ВЛЭП на базе СВИ установившегося режима ЭЭС.* Отметим, что использование множества независимых комплектов измерений (даже очень «похожих» друг на друга) все же является оправданным: тем самым нивелируется влияние «шумов» и недостоверных точек данных¹ на результаты расчета.

Интересной представляется также оценка типичных уровней несимметрии по напряжениям и токам для отдельных комплектов СВИ нормального режима ЭЭС. Как отмечалось в главе 3, наличие некоторой несимметрии в электрической сети является принципиально необходимым условием для определения параметров нулевой последовательности транспонированной линии. Очевидно, чем выше несимметрия, тем благоприятнее условия для функционирования методов оценивания параметров ВЛЭП, особенно с учетом реальных погрешностей СВИ.

В таблице 4.1 представлены результаты оценки несимметрии по напряжениям и токам на обоих концах американской линии 345 кВ, а в таблице 4.2 сведены аналогичные результаты для российской ВЛЭП 500 кВ. Анализ выполнен на базе тех же архивов СВИ, которым соответствуют графические зависимости, отраженные на рисунках Е.1–Е.7. Подстрочные индексы «0» в таблицах 4.1 и 4.2 обозначают нулевую последовательность, «2» – обратную последовательность; индексы «нач» обозначают условное начало линии, «кон» – ее конец.

Из таблиц 4.1 и 4.2 можно видеть, что несимметрия по напряжениям (три первых строки, четыре первых столбца с числовыми данными), хотя и присутствует, выражена очень слабо: ни один из коэффициентов не превышает 1 %. Аналогичные результаты, не отраженные здесь, получены при анализе массива СВИ установившегося режима с еще одной российской

¹ Наиболее «грубые» недостоверные измерения могут быть отбракованы, например, по алгоритму, описанному в п. 2.2 диссертации.

Таблица 4.2 – Коэффициенты несимметрии по напряжениям и токам нулевой и обратной последовательностей в процентном выражении (по отношению к соответствующим величинам прямой последовательности) для ВЛЭП напряжением 500 кВ

Сводная статистика относительно несимметрии по всем комплектам СВИ								
	U_0 нач	U_0 кон	U_2 нач	U_2 кон	I_0 нач	I_0 кон	I_2 нач	I_2 кон
Мин.	0,4229	0,7907	0,5349	0,6188	0,0912	0,8630	5,7093	7,1861
Среднее	0,5055	0,8677	0,6572	0,7194	0,2474	1,0450	6,5654	8,5924
Макс.	0,5754	0,9493	0,7424	0,8546	0,3878	1,1988	7,5483	10,3113
Показатели несимметрии, удовлетворяющие различным критериям								
Процент всех измерений, для которых напряжение U_0 превышает:								
	0,05 %	0,1 %	0,5 %	1 %	2 %			
U_0 нач	100	100	65,14	0	0			
U_0 кон	100	100	100	0	0			
Процент всех измерений, для которых напряжение U_2 превышает:								
	0,1 %	0,2 %	0,4 %	0,5 %	1 %			
U_2 нач	100	100	100	100	0			
U_2 кон	100	100	100	100	0			
Процент всех измерений, для которых ток I_0 превышает:								
	0,3 %	0,5 %	0,7 %	1 %	2 %			
I_0 нач	9,73	0	0	0	0			
I_0 кон	100	100	100	81,99	0			
Процент всех измерений, для которых ток I_2 превышает:								
	0,5 %	1 %	1,5 %	2 %	2,5 %			
I_2 нач	100	100	100	100	100			
I_2 кон	100	100	100	100	100			

Таким образом, вполне различимая (хотя и еще более слабая в ряде других случаев, здесь не отраженных) несимметрия по фазам для токовых сигналов характерна даже для линий 500 кВ. В теории это обстоятельство определяет принципиальную возможность идентификации актуальных значений всех параметров ВЛЭП даже по данным СВИ, полученных в нормальных режимах ЭЭС. Однако уровни небалансов малы, особенно по напряжениям и токам нулевой последовательности, а характер динамики изменений режимных параметров по концам линии эквивалентен (рисунки Е.1–Е.5). В этой ситуации погрешности СВИ (достоверно не известные и отличные в разных каналах) вкуче с неточностью самой модели ВЛЭП (таблица 3.4) могут оказывать резко негативное влияние на качество решения поставленной задачи.

Исходя из сказанного, целесообразно выполнить следующие

исследования:

- 1) оценить комплексное влияние погрешностей СВИ напряжений и токов по концам ВЛЭП на возможность определения ее параметров;
- 2) предложить и протестировать методики, направленные на максимальную компенсацию влияния погрешностей измерений;
- 3) проанализировать функционирование разработанных методов на базе реальных архивов СВИ в режиме «черный ящик»: при отсутствии каких-либо смоделированных измерений по концам ВЛЭП, т.е. путем применения только векторов с реальных УСВИ, установленных на моделируемой ВЛЭП.

Оставшаяся часть главы посвящена проработке поставленных задач.

4.2 Оценка влияния погрешностей измерений на качество идентификации параметров ВЛЭП

4.2.1 Постановка проблемы. Согласно выражению (2.1) вектор напряжения или тока, получаемый с выхода УСВИ, отличается от соответствующего ему «эталона» наличием систематической погрешности и «шумовой» составляющей. Последняя, как обосновано в п. 2.3.1, имеет закон распределения, близкий к нормальному, что потенциально позволяет существенно уменьшить ее деструктивное влияние, например, посредством процедуры усреднения [86].

В то же время наличие систематических ошибок СВИ представляет собой серьезную проблему для корректного функционирования алгоритмов расчета параметров ВЛЭП, поскольку подобные ошибки не устраняются статистической обработкой [85]. В каждом канале измерений в общем случае присутствуют свои, отличные от других каналов систематические погрешности – как амплитудная, так и угловая. Для трехфазной одноцепной линии с УСВИ по обоим ее концам (как на рисунке 2.13) это выражается в наличии 24-х неизвестных в действительных числах.

Влияние ошибок СВИ на качество расчета параметров ВЛЭП подробно

анализируется в ряде отечественных и зарубежных работ, например, [30, 40, 84–86]. Как отмечено в главе 1 диссертации, систематические погрешности при этом, как правило, рассматриваются по отдельности, что может оказаться полезным только для выявления некоторых корреляционных зависимостей и предварительного тестирования работоспособности методов идентификации параметров линии. Очевидно, на практике погрешности действуют все сразу (во всех измерительных трактах напряжений и токов по обоим концам ВЛЭП), поэтому необходимо моделирование их совокупного влияния. Среди отечественных исследователей подобные эксперименты были осуществлены Хохловым М.В. [85], однако в его публикации отражена лишь однолинейная модель ВЛЭП, тогда как с практической точки зрения интереснее проанализировать возможность корректного определения параметров прямой и нулевой последовательностей.

4.2.2 Описание методики осуществления экспериментов. Для решения поставленной задачи рассматриваются два различных режима: нормальный установившийся с небольшой несимметрией по фазам (далее – «РЕЖИМ 1») и режим с резкой несимметрией, имитирующий отключение одной фазы линии (далее – «РЕЖИМ 2»). На рисунке 4.1 изображена схема трехфазной ЭЭС с транспонированной ВЛЭП «KGRES500», собранная в ATPDraw. За основу взят «паспорт» линии 500 кВ «Костромская ГРЭС – Загорская ГАЭС» (с конфигурацией, соответствующей одной из двух идентичных цепей на рисунке А.1). «Эталонные» сопротивления и проводимости ВЛЭП, подлежащие идентификации, сведены в таблицу 4.3.

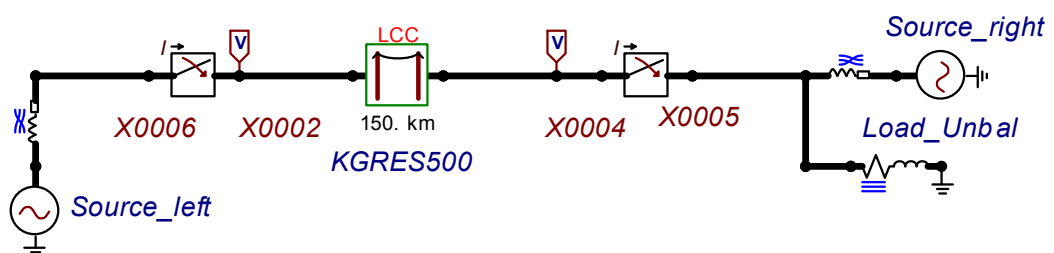


Рисунок 4.1 – Модель ЭЭС с транспонированной ВЛЭП «KGRES500», параметры которой подлежат идентификации, в программе ATPDraw

Несимметрия в «РЕЖИМЕ 1» создается несбалансированной по фазам нагрузкой «Load_Unbal» (рисунок 4.1); она достаточно слабая (столбцы 3–5 таблицы 4.3) и в целом отражает типичный установившийся режим в реальных ЭЭС (таблицы 4.1 и 4.2). «РЕЖИМ 2», обеспечивающий резкую несимметрию (столбцы 6–8 таблицы 4.3), имитирует бестоковую паузу в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Если при этом данные о напряжениях по концам ВЛЭП поступают в УСВИ от линейных ТН, получается картина, отраженная на рисунке 4.2: в поврежденной фазе наводится довольно значительное по модулю напряжение (при полном отсутствии соответствующего фазного тока).

Таблица 4.3 – «Эталонные» параметры моделируемой ВЛЭП «KGRES500» (рисунок 4.1) и уровни несимметрии в СВИ по концам линии в двух рассматриваемых режимах

«Эталонные» параметры ВЛЭП		Несимметрия в «РЕЖИМЕ 1»			Несимметрия в «РЕЖИМЕ 2»		
		Параметр	Начало ВЛЭП	Конец ВЛЭП	Параметр	Начало ВЛЭП	Конец ВЛЭП
1	2	3	4	5	6	7	8
R_1 , Ом/км	0,0247	U_0 , %	0,0386	0,1378	U_0 , %	59,4325	58,8099
X_1 , Ом/км	0,3031						
G_1 , См/км	0	I_0 , %	0,3961	0,3294	I_0 , %	27,274	29,4673
B_1 , См/км	$3,8065 \cdot 10^{-6}$						
R_0 , Ом/км	0,1674	U_2 , %	0,0639	0,1563	U_2 , %	59,1151	58,941
X_0 , Ом/км	1,0855						
G_0 , См/км	0	I_2 , %	1,31	1,1194	I_2 , %	72,7669	70,768
B_0 , См/км	$2,6332 \cdot 10^{-6}$						

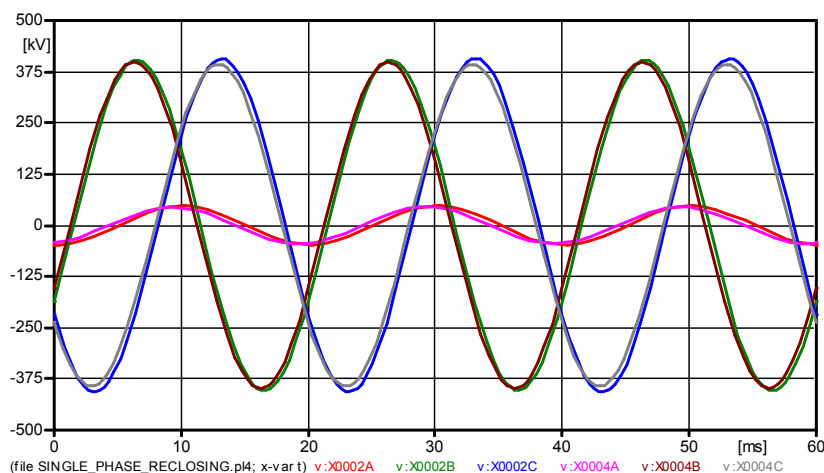


Рисунок 4.2 – Изменения мгновенных значений напряжений по концам ВЛЭП «KGRES500» (рисунок 4.1) во время бестоковой паузы в цикле ОАПВ («РЕЖИМ 2»)

Та же схема ЭЭС (рисунок 4.1) используется и для расчета двух аналогичных режимов в случае нетранспонированной линии «KGRES500». При этом снимается флажок «Transposed» в окне ввода характеристик линии; кроме того, малая несимметрия в нормальном режиме («РЕЖИМ 1») вносится самой ВЛЭП, поэтому в конце линии вместо «Load_Unbal» (рисунок 4.1) задается симметричная по фазам нагрузка.

Для расчета параметров ВЛЭП на базе векторных измерений, полученных в ATP/ATPDraw по схеме рисунка 4.1, используется метод, основанный на переходе к модальным составляющим $(\alpha, \beta, 0)$ и описанный в п. 3.2 диссертации. Нетранспонированная линия при этом условно заменяется транспонированной, что вносит ошибку даже при отсутствии погрешностей СВИ (таблица 4.4), однако позволяет решать более простую задачу вместо выполнения оптимизации (п. 3.3.2), а также сравнивать результаты для двух моделей ВЛЭП при наличии погрешностей СВИ.

Таблица 4.4 – Результаты вычисления параметров отдельных последовательностей¹ ВЛЭП «KGRES500» (рисунок 4.1) при отсутствии погрешностей измерений

Параметр	«Эталонное» значение	Модель ВЛЭП: транспонированная		Модель ВЛЭП: нетранспонированная	
		Расчетное значение	Погрешность в процентах	Расчетное значение	Погрешность в процентах
R_1 , Ом/км	0,0247	0,0247	$-2,2843 \cdot 10^{-4}$	0,0255	3,3418
X_1 , Ом/км	0,3031	0,3031	$-2,369 \cdot 10^{-5}$	0,3017	-0,45
B_1 , См/км	$3,8065 \cdot 10^{-6}$	$3,8065 \cdot 10^{-6}$	$-1,3562 \cdot 10^{-5}$	$3,8071 \cdot 10^{-6}$	0,0169
R_0 , Ом/км	0,1674	0,1674	$-1,3188 \cdot 10^{-5}$	0,0906	-45,8684
X_0 , Ом/км	1,0855	1,0855	$5,1363 \cdot 10^{-4}$	1,0967	1,0369
B_0 , См/км	$2,6332 \cdot 10^{-6}$	$2,6332 \cdot 10^{-6}$	$8,7195 \cdot 10^{-5}$	$2,5791 \cdot 10^{-6}$	-2,0556

С целью моделирования систематических погрешностей СВИ рассматриваются следующие классы измерительных трансформаторов согласно стандартам IEC 60044-1 и IEC 60044-2 [123, 124]: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0. Для каждого класса точности стандартами регламентированы предельные погрешности – амплитудные и угловые, на основании чего можно получить

¹ Параметры прямой последовательности для обеих моделей ВЛЭП рассчитаны из «РЕЖИМА 1», нулевой – из «РЕЖИМА 2».

значение коэффициента \underline{K} в формуле (2.1), отражающего взаимосвязь двух векторов – «эталонного» и рассчитанного. «Шумовую» составляющую $\underline{\varepsilon}$ в (2.1) при этом игнорируем в силу ее малости относительно систематических ошибок. Погрешностями самих УСВИ по концам ВЛЭП также пренебрегаем: будем считать, что погрешности ТТ и ТН в любом случае преобладают, и коэффициент \underline{K} , таким образом, учитывает совокупную погрешность конкретного канала измерений.

Сценарии моделирования идентичны для «РЕЖИМА 1» и «РЕЖИМА 2». Для объективной оценки влияния погрешностей СВИ используется метод Монте-Карло, широко применяемый при изучении случайных процессов, в т.ч. в электроэнергетике [73]. Для каждого из четырех рассматриваемых классов точности ТН и ТТ выполняется серия из 10000 вычислительных экспериментов в MATLAB. Эксперименты отличаются конкретными величинами погрешностей, сгенерированных случайным образом (в пределах заданных диапазонов) отдельно для каждого из 12 «эталонных» векторов, образующих комплект СВИ по концам линии. Таким образом, всего получаем 40000 реализаций «эталонного» вектора (10000 вариантов погрешности \underline{K} × четыре различных класса точности измерительного трансформатора). Осуществление столь большого количества экспериментов позволяет получить объективную статистику относительно ошибок определения отдельных параметров ВЛЭП. Иерархия организации вычислений отражена в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Иерархия организации вычислительных экспериментов для анализа влияния систематических погрешностей СВИ на качество идентификации параметров ВЛЭП «KGRES500» (рисунок 4.1)

УРОВЕНЬ 1	Задание модели ВЛЭП «KGRES500» (рисунок 4.1)	Транспонированная
		Нетранспонированная
УРОВЕНЬ 2	Задание установившегося режима, в котором получены «эталонные» вектора	«РЕЖИМ 1» (таблица 4.3, столбцы 3–5)
		«РЕЖИМ 2» (таблица 4.3, столбцы 6–8)

УРОВЕНЬ 3	Задание класса точности измерительных трансформаторов по <i>IEC 60044-1</i> (для ТТ) и <i>IEC 60044-2</i> (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
		Расчет параметров прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП

4.2.3 Результаты и их анализ. На рисунках 4.3–4.5 представлены средние значения модулей погрешностей¹ (в процентах), полученные в результате выполнения описанных вычислительных экспериментов. Погрешности идентификации параметров прямой последовательности во всех случаях определены из «РЕЖИМА 1», нулевой – из «РЕЖИМА 2».

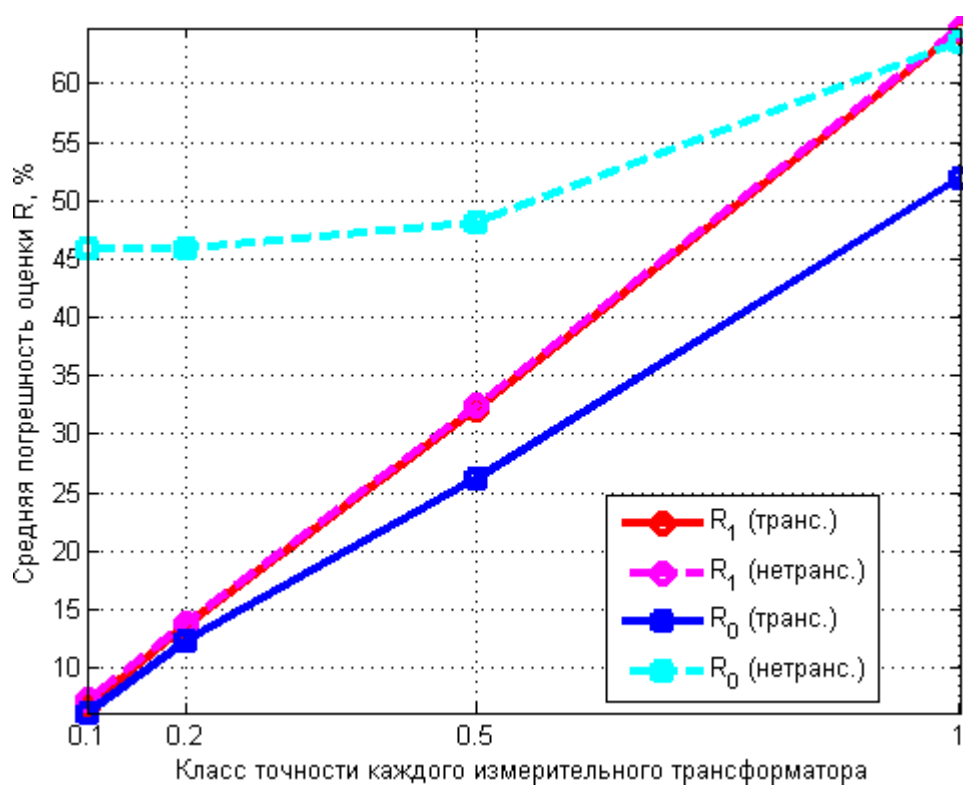


Рисунок 4.3 – Средние значения погрешностей идентификации активных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП

¹ Использование именно этого показателя в данном случае более наглядно по сравнению со СКО погрешностей, которые фактически идентичны для обеих моделей ВЛЭП – транспонированной и нетранспонированной (неодинаковый характер распределения для двух моделей обусловлен только отличиями в математических ожиданиях погрешностей).

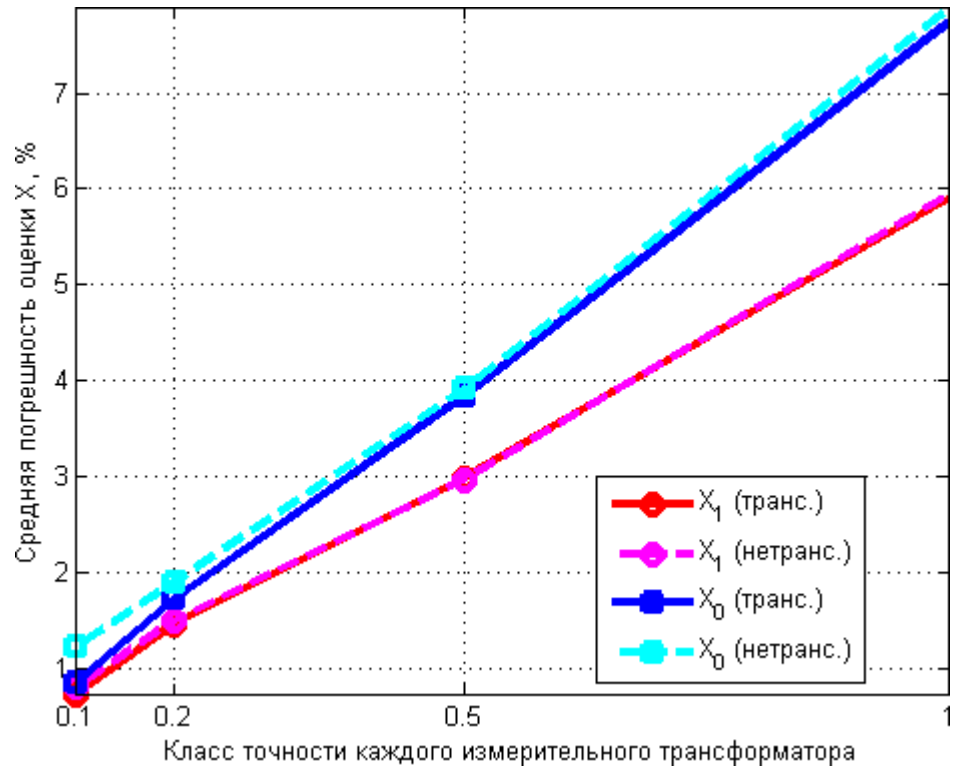


Рисунок 4.4 – Средние значения погрешностей идентификации индуктивных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП

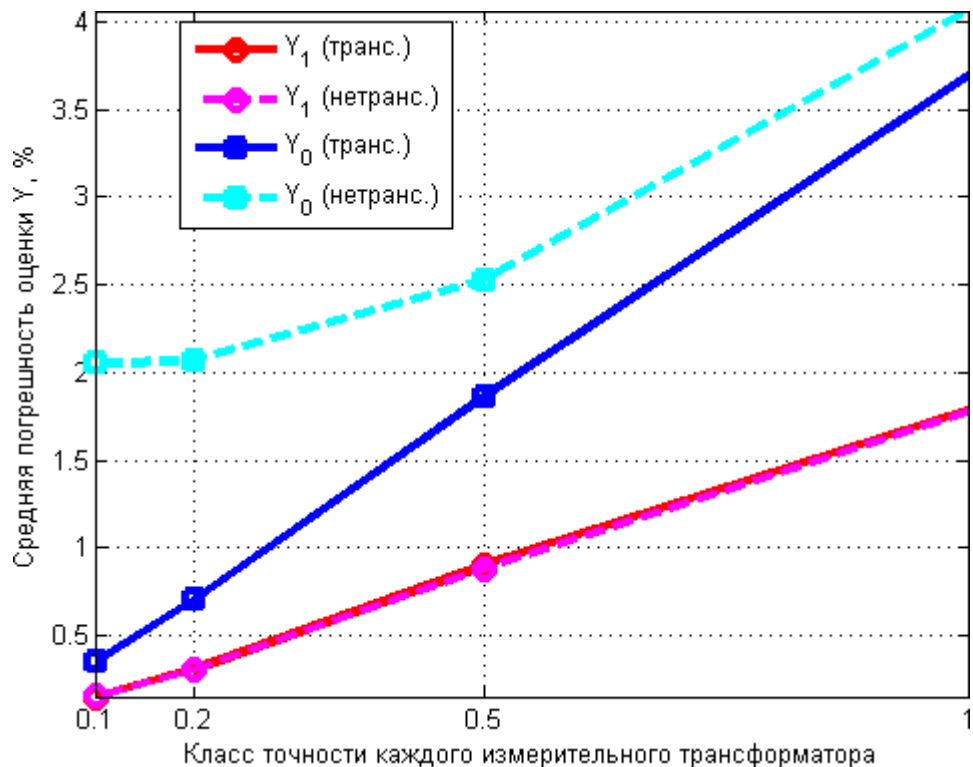


Рисунок 4.5 – Средние значения погрешностей идентификации емкостных проводимостей прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП

Анализируя зависимости, приведенные на рисунках 4.3–4.5, можно

заклучить следующее.

1. Сопротивления R_1 и R_0 оказываются наиболее чувствительными к наличию погрешностей СВИ, что хорошо коррелируется с результатами исследований других авторов, например, [84]. Даже использование трансформаторов класса 0,2 ставит под сомнение возможность корректной оценки активных сопротивлений линии (рисунок 4.3). Абсолютная погрешность по R_1 при этом относительно мала, поскольку «эталонное» значение этого сопротивления составляет всего 0,0247 Ом/км (таблица 4.4). Для приемлемой оценки R_0 в случае транспонированной ВЛЭП, вероятно, требуются более существенные уровни токов нулевой последовательности, чем те, что приведены в таблице 4.3 (порядка 30 % по отношению к токам прямой последовательности). Альтернативой является использование высокоточных СВИ, что возможно лишь в комбинации с инновационными решениями в области измерительных трансформаторов [125, 126]. Корректная оценка R_0 для нетранспонированной линии оказалась фактически невозможной (рисунок 4.3). Следует, однако, отметить, что речь идет о линии без ротации фазных проводов на протяжении 150 км (рисунок 4.1), что на практике не должно иметь места.

2. Что касается погрешностей расчета индуктивных сопротивлений X_1 и X_0 , а также емкостных проводимостей Y_1 и Y_0 , их можно считать вполне приемлемыми как минимум для случая применения трансформаторов класса 0,2 (рисунки 4.4 и 4.5). При формировании СВИ с помощью ТТ и ТН класса 0,5 параметр X_1 будет точнее рассчитан традиционным способом – из «паспорта» ВЛЭП: чтобы убедиться в этом, достаточно сопоставить данные на рисунках 1.16 и 4.4. В то же время вычисление X_0 и Y_0 на базе СВИ не лишено смысла для трансформаторов класса 0,5: потенциальный диапазон вариации параметров нулевой последовательности достаточно высок (что видно, например, на рисунке 1.18).

3. Оценки параметров прямой последовательности фактически идентичны для обеих моделей ВЛЭП. Это означает, что упрощенный подход

(когда нетранспонированная линия условно заменяется транспонированной на этапе определения ее параметров по векторным измерениям) вполне справедлив в реальных практических условиях (по меньшей мере – для параметров прямой последовательности). При отсутствии погрешностей СВИ, что возможно лишь в теории, разница для двух моделей ВЛЭП была существенной (первые три строки данных в таблице 4.4).

4. Кривые, описывающие изменения погрешностей по параметрам нулевой последовательности для двух моделей линии, все более сближаются с уменьшением точности измерений (рисунки 4.3–4.5). Чем «грубее» СВИ, тем меньшее влияние оказывают погрешности самой модели ВЛЭП, что вполне логично. Различия в конфигурациях ВЛЭП (транспонированная, нетранспонированная) фактически перестают иметь существенное значение для ТТ и ТН класса 1,0 (рисунки 4.3–4.5).

Таким образом, *систематические ошибки измерений оказывают в целом значительное влияние на качество (и даже саму возможность) определения параметров ВЛЭП.* Анализируя зависимости на рисунках 4.3–4.5, можно заключить, что *погрешности расчета сопротивлений и проводимостей ВЛЭП практически линейно зависят от погрешностей, вносимых измерительными трансформаторами.* В связи с этим актуальными представляются следующие направления исследований:

- создание (и последующее применение для целей СВИ) как можно более точных измерительных трансформаторов;
- разработка методов, направленных на максимальную компенсацию влияния погрешностей СВИ, а также алгоритмов, учитывающих систематические погрешности измерений в самой модели как дополнительные неизвестные.

Решение первой задачи сопряжено с отдельными фундаментальными исследованиями. В этом направлении сделаны важные шаги, отраженные, в частности, в диссертации Яблокова А.А. [127]. В следующем разделе главы предпринимается попытка решения второй задачи.

4.3 Разработка методов компенсации систематических погрешностей СВИ

4.3.1 Модель с использованием линейной регрессии на базе множества комплектов СВИ. Система уравнений длинной линии (3.1), записанная для одной фазы либо одной симметричной составляющей, может быть представлена в следующем матричном виде:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{U}_2^{(1)} & \dot{U}_2^{(2)} & \dots & \dot{U}_2^{(N)} \\ \dot{I}_2^{(1)} & \dot{I}_2^{(2)} & \dots & \dot{I}_2^{(N)} \end{bmatrix}}_{[\mathbf{C}]} = \underbrace{\begin{bmatrix} \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) & -Z \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l) \\ -\frac{\operatorname{sh}(\gamma \cdot l)}{Z} & \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) \end{bmatrix}}_{[\mathbf{A}]} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(1)} & \dot{U}_1^{(2)} & \dots & \dot{U}_1^{(N)} \\ \dot{I}_1^{(1)} & \dot{I}_1^{(2)} & \dots & \dot{I}_1^{(N)} \end{bmatrix}}_{[\mathbf{B}]}, \quad (4.1)$$

где N – количество независимых комплектов СВИ по концам линии.

Элементы матриц $[\mathbf{B}]$ и $[\mathbf{C}]$ в (4.1) известны (это фактические измерения), а элементы матрицы $[\mathbf{A}]$ представляют собой неизвестные величины, связанные с искомыми удельными параметрами ВЛЭП \underline{z} и \underline{y} через (3.3).

Если систему (4.1) переписать как

$$[\mathbf{C}] = \underbrace{\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}}_{[\mathbf{A}]} [\mathbf{B}], \quad (4.2)$$

она оказывается линейной относительно неизвестных a, b, c, d , связанных с постоянной распространения γ и волновым сопротивлением Z следующим образом:

$$\begin{aligned} a &= \operatorname{ch}(\gamma \cdot l); & b &= -Z \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l); \\ c &= -\frac{\operatorname{sh}(\gamma \cdot l)}{Z}; & d &= \operatorname{ch}(\gamma \cdot l). \end{aligned} \quad (4.3)$$

Сразу оговоримся, что все переменные в (4.3) лучше рассматривать как

не зависимые друг от друга. Несмотря на то, что, казалось бы, $a \equiv d$, это справедливо только для симметричного пассивного четырехполюсника (в нашем случае – для «идеально транспонированной» ВЛЭП при отсутствии каких-либо погрешностей СВИ). В реальных же условиях на различие значений a, b, c, d , получаемых при решении (4.2), влияют несколько факторов:

- ВЛЭП с частичной транспозицией является несимметричным многополюсником и, следовательно, характеризуется тремя (а не двумя) независимыми параметрами [122];
- как показано в п. 3.3.1, применение симметричных составляющих к нетранспонированной (частично транспонированной) ВЛЭП не позволяет получить три полностью независимых однолинейных модели, следовательно, сама формулировка задачи в виде (4.1) для таких ВЛЭП является упрощенной (но тем более точной, чем более «похожа» моделируемая ВЛЭП на транспонированную). Три независимых параметра для нетранспонированной линии получились бы в случае точного разложения (уникального в каждом конкретном случае) фазных величин на модальные (а не симметричные) составляющие;
- наличие погрешностей измерений, проявляющихся в элементах матриц $[\mathbf{B}]$ и $[\mathbf{C}]$, неизбежно отразится и на оценках значений a, b, c, d при их расчете на основе (4.2).

Для решения переопределенной системы уравнений (4.2) можно использовать линейный МНК. Для системы вида

$$\underbrace{[\mathbf{R}]}_{N \times 1} = \underbrace{[\mathbf{U}]}_{N \times S} \underbrace{[\mathbf{V}]}_{S \times 1}, \quad (4.4)$$

где $[\mathbf{V}]$ – вектор S неизвестных, решение по МНК хорошо известно [73]:

$$\underbrace{[\mathbf{V}]}_{S \times 1} = \underbrace{([\mathbf{U}]^T [\mathbf{U}])^{-1}}_{S \times S} \underbrace{[\mathbf{U}]^T}_{S \times N} \underbrace{[\mathbf{R}]}_{N \times 1}. \quad (4.5)$$

В нашем же случае – в тождестве (4.2) – неизвестными являются элементы не одностробцового вектора, а матрицы $[A]$ размером 2×2 . Поэтому необходимо выполнить ряд преобразований, чтобы воспользоваться компактным решением в форме (4.5). Эти преобразования изложены в Приложении Ж. В результате получено следующее матричное равенство:

$$\underbrace{[A]}_{2 \times 2} = \underbrace{[C]}_{2 \times N} \underbrace{[B]^T [B]}_{N \times 2}^{-1}. \quad (4.6)$$

Вернемся теперь к соотношениям (4.3), которые, по сути, представляют собой четыре уравнения с двумя неизвестными γ и Z . При этом все четыре значения a , b , c , d в общем случае различны (в силу причин, указанных выше). В связи с этим возникает вопрос, каким образом следует рассчитывать γ и Z . В ходе работы для этого были предложены и протестированы два следующих способа:

$$\gamma = \frac{\text{arch}(\sqrt{a \cdot d})}{l}; \quad Z = \sqrt{\frac{b}{c}} \quad (4.7)$$

и

$$\gamma = \frac{\text{arsh}(\sqrt{b \cdot c})}{l}; \quad Z = -\frac{b}{\text{sh}(\gamma \cdot l)}, \quad (4.8)$$

где l – длина ВЛЭП.

Многочисленные вычислительные эксперименты позволили выяснить, что расчет по (4.8) обеспечивает существенно более качественные результаты по сравнению с (4.7)¹, поэтому именно он был в итоге выбран в качестве основного способа определения искомых параметров линии.

Возможная причина неточности (4.7) при применении этих выражений для нетранспонированной (частично транспонированной) линии заключается в том, что тождество $a \equiv d \equiv \text{ch}(\gamma \cdot l)$ для такой ВЛЭП не выполняется даже в отсутствие погрешностей СВИ. Выражения (4.8) полностью исключают

¹ Вычисления для «идеально транспонированной» линии без погрешностей СВИ показали, что оба способа фактически равнозначны, поэтому ошибку реализации выражений на языке MATLAB можно исключить.

значения a и d , оперируя лишь величинами b и c , что положительно сказывается на результатах расчета.

Верификация методики расчета параметров линии с использованием линейной регрессии – по (4.1), (4.6) и (4.8) – выполнялась на базе той же модели ВЛЭП длиной 150 км (рисунок 4.1). Если ВЛЭП – транспонированная, а погрешности СВИ отсутствуют (не моделируются), то два независимых комплекта СВИ обеспечивают фактически идеальные результаты (и по прямой, и по нулевой последовательности), что свидетельствует о корректности математической модели и программной реализации соответствующего алгоритма.

Поскольку для осуществления линейной регрессии на практике желательно задействовать множество независимых комплектов СВИ, для анализа функционирования метода за основу был взят реальный архив, содержащий 30000 комплектов векторных измерений для ВЛЭП 500 кВ «Костромская ГРЭС – Загорская ГАЭС». В качестве «эталонных» СВИ в начале линии были приняты СВИ со стороны Загорской ГАЭС, а в качестве «эталонных» СВИ на противоположном конце – соответствующие измерения, полученные расчетным путем через используемую модель ВЛЭП¹ (рисунок 4.1). Вычисления осуществлялись в матричном виде согласно методике, изложенной в разделе 3.4 диссертации.

На рисунках 4.6–4.8 представлены результаты определения параметров прямой последовательности линии по новому методу – на основе линейной регрессии – в сравнении с ранее достигнутыми результатами, полученными при использовании лишь одного комплекта СВИ («N = 1» на рисунках 4.6–4.8) и отраженными на рисунках 4.3–4.5. В обоих случаях применялась одна и та же модель нетранспонированной ВЛЭП. Моделирование влияния погрешностей измерений осуществлялось также аналогично – по методу Монте-Карло, как описано в п. 4.2.2.

¹ Данный подход к моделированию – с привлечением реальных архивов СВИ – подробно описан в п. 3.3.2 данной работы.

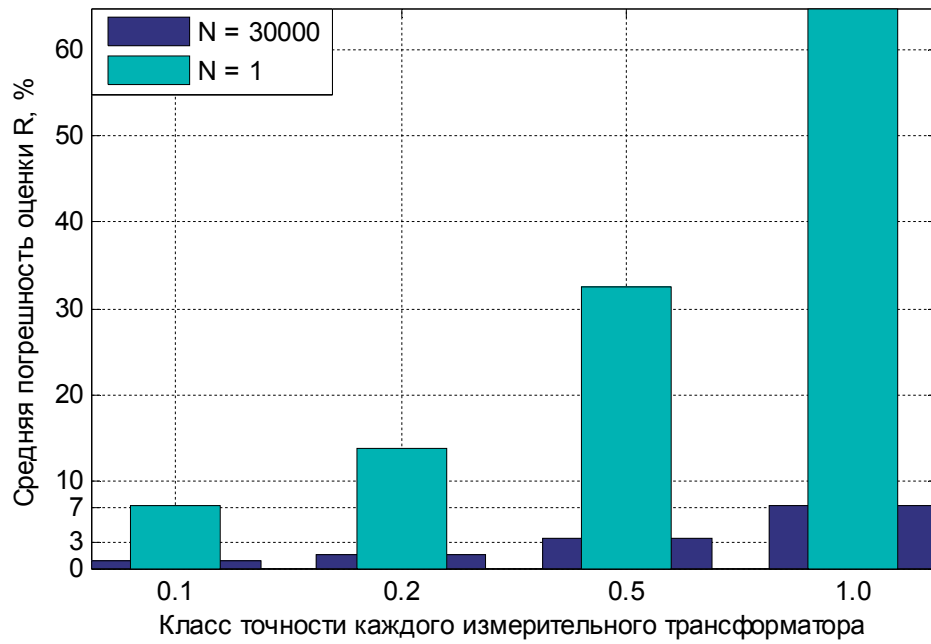


Рисунок 4.6 – Средние значения погрешностей идентификации активного сопротивления прямой последовательности ВЛЭП для двух методов: на основе одного комплекта СВИ («N = 1») и на основе 30000 комплектов СВИ с линейной регрессией («N = 30000»)

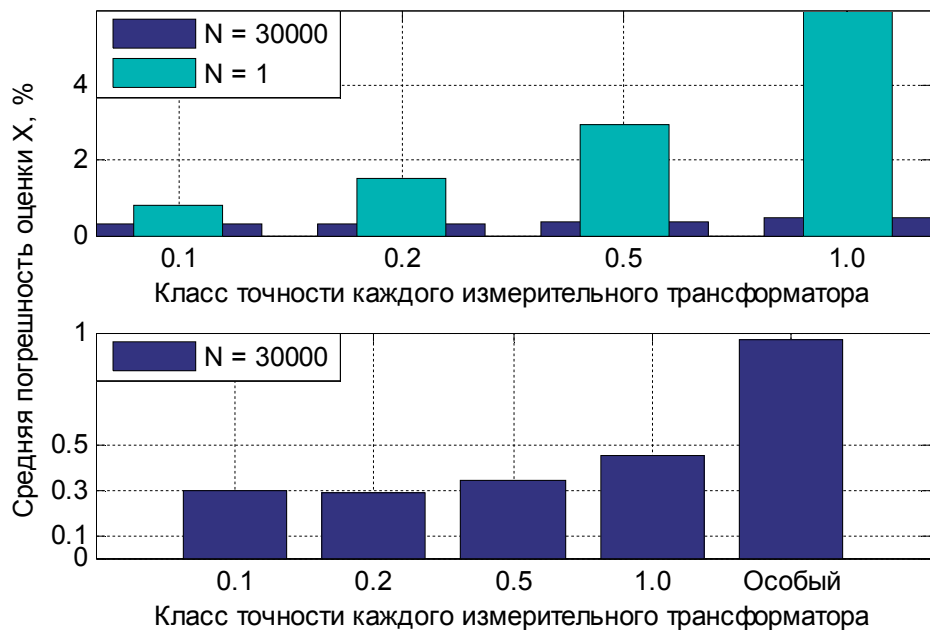


Рисунок 4.7 – Средние значения погрешностей расчета индуктивного сопротивления прямой последовательности ВЛЭП для двух методов: на основе одного комплекта СВИ («N = 1») и на основе 30000 комплектов СВИ с линейной регрессией («N = 30000»)

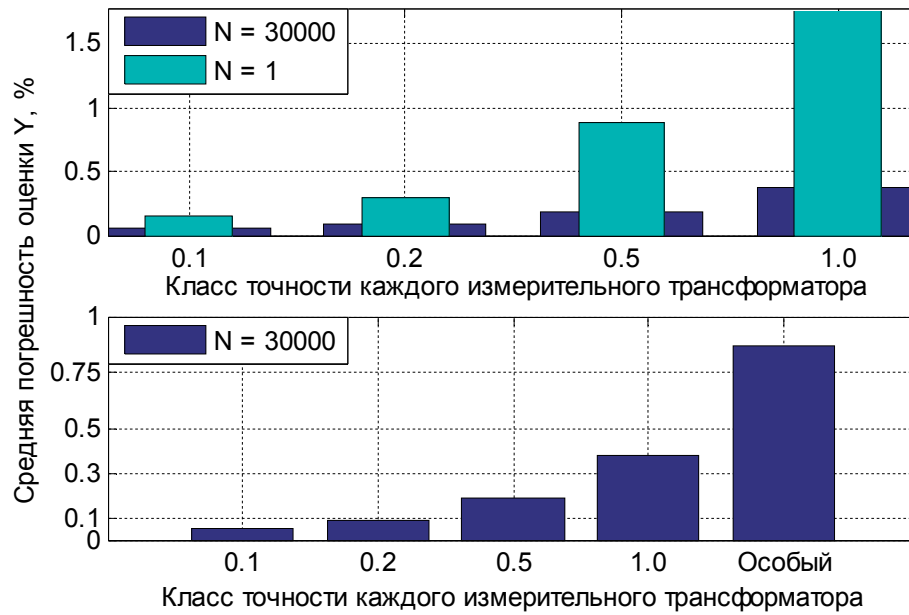


Рисунок 4.8 – Средние значения погрешностей идентификации емкостной проводимости прямой последовательности ВЛЭП для двух методов: на основе одного комплекта СВИ («N = 1») и на основе 30000 комплектов СВИ с линейной регрессией («N = 30000»)

Из данных, представленных на рисунках 4.6–4.8, совершенно очевидно, что *новый метод (с использованием линейного МНК) обеспечивает существенно более качественные (вплоть до одного порядка) результаты идентификации параметров ВЛЭП*. Оценки по X_1 и Y_1 при этом становятся достаточно резистивными даже к более грубым измерениям (класс «Особый» на рисунках 4.7 и 4.8, под которым подразумеваются измерения от ТН класса 3 и ТТ класса 5). На рисунках 4.6–4.8 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 .

Наиболее явственным допущением, принятым при моделировании, вероятно, следует рассматривать следующее: конкретная реализация погрешностей СВИ, хотя и была различной на каждой итерации по методу Монте-Карло, принималась строго одинаковой для всех $N = 30000$ комплектов СВИ (т.е. никакие «шумы» и иные отклонения величин погрешностей от комплекта к комплекту не имитировались). Учитывая, что

действующие значения токов и, особенно, напряжений в нормальном режиме ЭЭС изменяются мало, подобное допущение не должно исказить результаты анализа. Более того, использование реальных архивов СВИ не с одной, а сразу с обеих сторон ВЛЭП (оценка параметров линии как «черного ящика», п. 4.4 диссертации) фактически снимает все вопросы относительно преимуществ новой модели для расчета параметров прямой последовательности ВЛЭП.

4.3.2 Решение оптимизационной задачи, содержащей неизвестные коэффициенты коррекции. Систематические погрешности измерений, как было выяснено ранее, оказывают в целом существенное влияние на качество оценки параметров ВЛЭП, особенно по нулевой последовательности (рисунки 4.3–4.5). В связи с этим представляется целесообразным попытаться реализовать алгоритм, который учитывал бы систематические погрешности СВИ как дополнительные идентифицируемые неизвестные. Очевидно, воплощение этой идеи возможно лишь в рамках решения модифицированной оптимизационной задачи, базовая версия которой подробно изложена в п. 3.3.3 данной работы.

Состав вектора параметров оптимизации при этом дополняется коэффициентами коррекции (разделенными на вещественную и мнимую части), каждый из которых связывает «эталонное» значение синхрофазора и соответствующее ему значение на выходе УСВИ:

$$\dot{U}_{bA} = \underline{C}_{UbA} \cdot \tilde{U}_{bA}, \quad (4.9)$$

где \dot{U}_{bA} – «эталонный» вектор напряжения фазы А в начале ВЛЭП (неизвестная величина); \tilde{U}_{bA} – соответствующий вектор, рассчитанный УСВИ (известен); \underline{C}_{bA} – комплексный коэффициент коррекции (не известен).

Выражения, аналогичные (4.9), можно записать и для остальных 11-ти синхрофазоров, входящих в один комплект СВИ. Учитывая (3.60), в матричном виде получим следующее:

$$\begin{aligned}
[\underline{\mathbf{C}}_{beg}] &= \begin{bmatrix} \underline{C}_{UbA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{C}_{UbB} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{C}_{UbC} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{C}_{IbA} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{C}_{IbB} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{C}_{IbC} \end{bmatrix}; \\
[\underline{\mathbf{C}}_{end}] &= \begin{bmatrix} \underline{C}_{UeA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{C}_{UeB} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{C}_{UeC} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{C}_{IeA} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{C}_{IeB} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{C}_{IeC} \end{bmatrix}; \\
[\underline{\mathbf{C}}_{end}] \begin{bmatrix} \tilde{U}_{eA} \\ \tilde{U}_{eB} \\ \tilde{U}_{eC} \\ \tilde{I}_{eA} \\ \tilde{I}_{eB} \\ \tilde{I}_{eC} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [\underline{\mathbf{K}}] & [\underline{\mathbf{L}}] \\ [\underline{\mathbf{M}}] & [\underline{\mathbf{N}}] \end{bmatrix} [\underline{\mathbf{C}}_{beg}] \begin{bmatrix} \tilde{U}_{bA} \\ \tilde{U}_{bB} \\ \tilde{U}_{bC} \\ \tilde{I}_{bA} \\ \tilde{I}_{bB} \\ \tilde{I}_{bC} \end{bmatrix}. \tag{4.10}
\end{aligned}$$

Поскольку точная оценка коэффициентов коррекции не является целью решения задачи (напротив, мы заинтересованы в максимальном сокращении количества переменных оптимизации), можно разделить все уравнения в системе (4.10) на один из коэффициентов, например, \underline{C}_{UbA} . После этого уравнения связи измерений с двух сторон ВЛЭП можно записать в следующем окончательном виде (матрицы коэффициентов коррекции – по-прежнему диагональные):

$$\begin{aligned}
[\underline{\mathbf{C}}'_{beg}]_{\cdot\cdot} &= [1 \quad \underline{C}'_{UbB} \quad \underline{C}'_{UbC} \quad \underline{C}'_{IbA} \quad \underline{C}'_{IbB} \quad \underline{C}'_{IbC}]; \\
[\underline{\mathbf{C}}'_{end}]_{\cdot\cdot} &= [\underline{C}'_{UeA} \quad \underline{C}'_{UeB} \quad \underline{C}'_{UeC} \quad \underline{C}'_{IeA} \quad \underline{C}'_{IeB} \quad \underline{C}'_{IeC}];
\end{aligned}$$

$$[\underline{\mathbf{C}}'_{end}] \begin{bmatrix} \tilde{U}_{eA} \\ \tilde{U}_{eB} \\ \tilde{U}_{eC} \\ \tilde{I}_{eA} \\ \tilde{I}_{eB} \\ \tilde{I}_{eC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\underline{\mathbf{K}}] & [\underline{\mathbf{L}}] \\ [\underline{\mathbf{M}}] & [\underline{\mathbf{N}}] \end{bmatrix} [\underline{\mathbf{C}}'_{beg}] \begin{bmatrix} \tilde{U}_{bA} \\ \tilde{U}_{bB} \\ \tilde{U}_{bC} \\ \tilde{I}_{bA} \\ \tilde{I}_{bB} \\ \tilde{I}_{bC} \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

Таким образом, в модели (4.11), помимо искоемых параметров ВЛЭП, скрытых за элементами матриц $[\underline{\mathbf{K}}]$, $[\underline{\mathbf{L}}]$, $[\underline{\mathbf{M}}]$ и $[\underline{\mathbf{N}}]$, описываемых выражениями (3.56)–(3.59), содержатся 22 дополнительных вещественных неизвестных, учитывающих комплексные коэффициенты коррекции. Помня о том, что один комплект СВИ позволяет записать только 12 уравнений в действительных числах, для получения переопределенности задачи требуются как минимум три независимых комплекта измерений (при формулировке задачи оптимизации так, как это сделано в п. 3.3.3 диссертации). В [128] показано, что фактическое количество параметров оптимизации можно сократить, решая линейную подзадачу относительно шести из 11-ти комплексных коэффициентов коррекции на каждой итерации оптимизационного алгоритма. Однако это никоим образом не избавляет от необходимости задействования нескольких комплектов СВИ, в отличие от аналогичной задачи без «встроенных» коэффициентов коррекции, где получение уникального решения было возможно даже на базе одного комплекта СВИ (таблица 3.9).

Основные этапы предложенного алгоритма иллюстрируются блок-схемой на рисунке 4.9. Все указанные действия выполняются на каждом шаге оптимизатора, минимизирующего заданную ЦФ. При этом оптимизатор осуществляет также «внутренние» операции (например, численное дифференцирование ЦФ), не отраженные на рисунке 4.9. По этой причине концевыми элементами блок-схемы на рисунке 4.9 являются не «Начало» и «Конец», а «Точка входа в функцию» и «Точка выхода из функции».

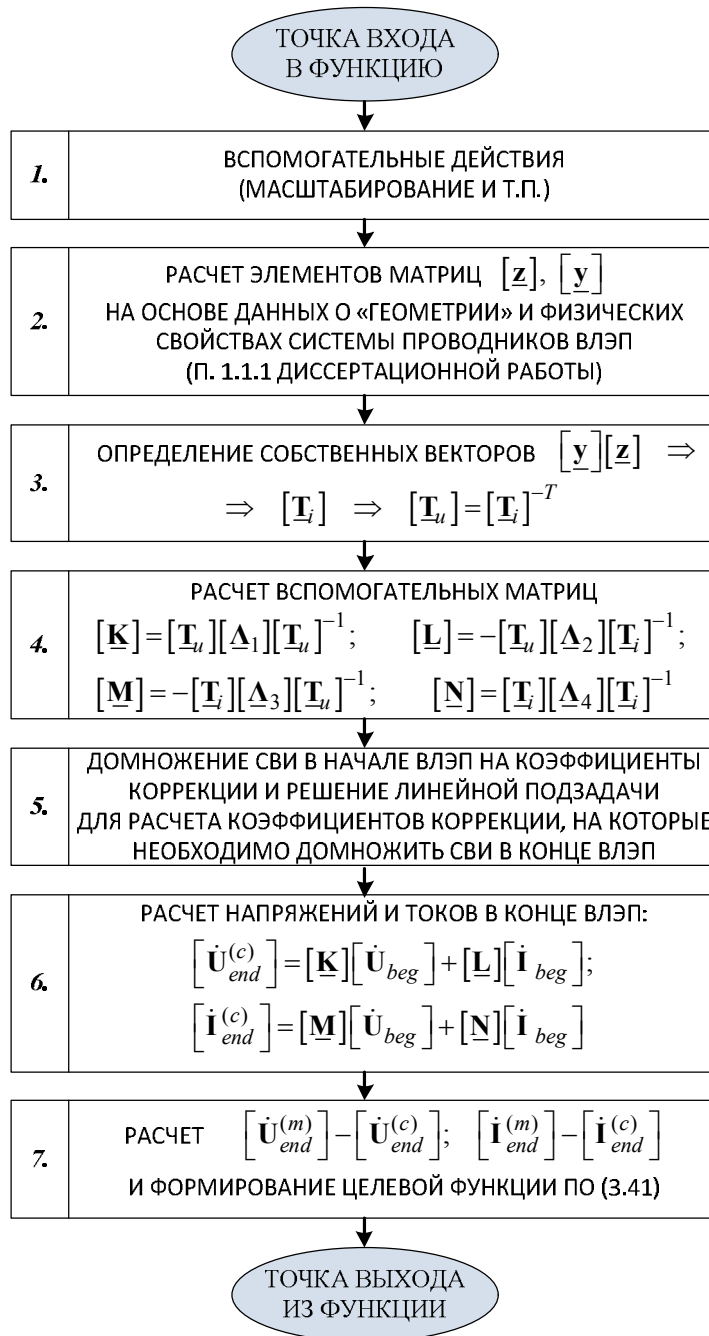


Рисунок 4.9 – Блок-схема, иллюстрирующая основные этапы алгоритма оценки параметров ВЛЭП на базе СВИ, основанного на решении оптимизационной задачи с компенсацией систематических погрешностей измерений напряжения и тока

Корректность теоретических положений предложенного метода, а вместе с тем и программной реализации алгоритма в MATLAB, была многократно верифицирована на базе различных массивов СВИ. Для тестирования во всех случаях использовалась та же модель ВЛЭП, что и в п. 3.3.3 диссертации, – одноцепной ВЛЭП 345 кВ, расположенной в США

(рисунок 3.10), для которой имеется подробный «паспорт». На основе «эталонных» измерений предварительно формировались СВИ, искаженные систематическими погрешностями, что соответствует векторам, обозначаемых знаком «~» в (4.11). Конкретные погрешности по каждому синхрофазору (одинаковые для всех комплектов СВИ) выбирались случайным образом из следующих диапазонов: 5 % по действующему значению, 5 градусов по фазовому углу. Истинные величины комплексных коэффициентов коррекции, полагаемые затем не известными для оптимизационного алгоритма, при этом можно рассчитать на основании (4.9):

$$\underline{C}_{UbA} = \dot{U}_{bA} / \tilde{U}_{bA}. \quad (4.12)$$

В таблицу 4.6 сведены результаты верификации разработанного метода (рисунок 4.9), условно обозначенного «Алгоритм 2», с использованием тех же пяти комплектов СВИ, что и ранее для аналогичного метода без коэффициентов коррекции («Алгоритм 1»). При этом «Алгоритм 1» обрабатывал «эталонные» СВИ, а «Алгоритм 2» – СВИ с систематическими погрешностями, сформированными, как описано выше. «Алгоритм 1» не содержит инструментов для восстановления «эталонных» векторов (при наличии СВИ с погрешностями он принципиально не может обеспечить приемлемых результатов по большинству искомым параметрам линии).

Таблица 4.6 – Результаты расчета параметров ВЛЭП 345 кВ (рисунок 3.10) путем решения оптимизационной задачи относительно нескольких характеристик ВЛЭП («Алгоритм 1» и «Алгоритм 2»), а также коэффициентов коррекции (только «Алгоритм 2»)

Параметр	Погрешности идентификации параметров (в процентах)			
	Алгоритм 1		Алгоритм 2	
	1 комплект СВИ	5 комплектов СВИ	3 комплекта СВИ	5 комплектов СВИ
R_1	-0,0023	-0,0022	0,0086	0,0129
X_1	0,0012	0,0012	0,0017	$1,9389 \cdot 10^{-4}$
B_1	$-1,8712 \cdot 10^{-4}$	$-1,8807 \cdot 10^{-4}$	-0,0019	-0,0031
R_0	1,1459	1,1646	-0,3065	0,0245
X_0	-0,3181	-0,3189	0,2934	0,0108
B_0	0,0012	0,0012	-0,0035	0,0189

Как видно из таблицы 4.6, «Алгоритм 2», хотя и обрабатывал СВИ со значительными систематическими погрешностями, обеспечил не менее качественную оценку параметров линии в сравнении с «Алгоритмом 1», оперировавшем «эталонными» синхрофазорами. Вместе с тем «Алгоритму 2», как отмечалось выше, необходимо по меньшей мере три комплекта СВИ. Кроме того, как свидетельствуют данные таблицы 4.6, количество задействованных комплектов влияет на качество решения задачи по этому алгоритму, в чем и заключается его «узкое место». Как проанализировано в п. 4.1 диссертации, комплекты векторных измерений в нормальном установившемся режиме ЭЭС обычно слишком «похожи» друг на друга. Поэтому, если даже пренебречь малыми вариациями систематических погрешностей (и, соответственно, требуемых для их компенсации коэффициентов коррекции) от измерения к измерению, математическая модель является плохо обусловленной в силу выраженной корреляции между отдельными комплектами СВИ, призванными обеспечить избыточность входной информации и, тем самым, уникальность решения. В этой ситуации любой «шум» (неизбежно присутствующий на практике) окажет заметное негативное влияние, фактически «уводя» оптимизатор от желаемого нами решения. Чтобы убедиться в справедливости данного вывода, достаточно проанализировать обусловленность якобиана¹ ЦФ нашей задачи командой «*cond*» в MATLAB: она вполне может быть, в зависимости от точки взятия якобиана, порядка 10^4 .

Для подтверждения сказанного в таблице 4.7 сопоставлены результаты двух вычислительных экспериментов с использованием «Алгоритма 2»: в каждом из них использовались одни и те же комплекты СВИ с одними и теми же систематическими погрешностями, однако во втором эксперименте все вектора были дополнительно «зашумлены» случайными ошибками с гауссовым распределением. СКО «шумов», добавляемых к вещественным и

¹ Матрица Якоби в данном случае состоит из 60-ти строк (по числу уравнений: пять комплектов измерений, 12 уравнений на один комплект) и 17-ти столбцов (по числу переменных, оптимальные значения которых подбирает оптимизатор).

мнимым частям векторов, были приняты следующими: 40 В для напряжений и 0,1 А для токов.

Таблица 4.7 – Результаты расчета параметров ВЛЭП 345 кВ (рисунок 3.10) путем решения оптимизационной задачи относительно характеристик ВЛЭП и коэффициентов коррекции («Алгоритм 2») на базе СВИ нормального установившегося режима ЭЭС

Параметр	Погрешности идентификации параметров (в процентах)	
	5 комплектов СВИ; только систематические погрешности	Те же 5 комплектов СВИ; те же систематические погрешности и, дополнительно, случайные погрешности («шумы»)
R_1	0,0129	-57,8237
X_1	$1,9425 \cdot 10^{-4}$	0,6299
B_1	-0,0031	1,1341
R_0	0,0244	100,7204
X_0	0,0108	25,0109
B_0	0,0189	-17,6251

Как следует из таблицы 4.7, наличие «шума» измерений резко отрицательно сказывается, в первую очередь, на оценке параметров нулевой последовательности, из чего можно заключить, что их определение на базе «Алгоритма 2» невозможно, если использованы столь коррелированные комплекты СВИ установившегося режима ЭЭС. Параметр R_1 мал, поэтому ошибка приблизительно в 58 % (таблица 4.7), хотя и не может считаться приемлемой, не столь велика в абсолютном выражении. Значение R_1 , вероятно, лучше пытаться рассчитывать посредством линейной регрессии (рисунок 4.6); однако необходимо понимать, что на практике для ВЛЭП 500 кВ все равно достаточно сложно обеспечить качественную оценку R_1 , и для этого потребуются высокоточные СВИ (рисунок 4.6).

Что касается параметров X_1 и B_1 , их вычисление по «Алгоритму 2» можно считать целесообразным (таблица 4.7). То же самое подтверждается и результатами «слепых» экспериментов с архивами СВИ для различных ВЛЭП (оценка параметров линии как «черного ящика», п. 4.4 диссертации). Поэтому «Алгоритм 2» (объективно самый сложный метод определения

параметров линии из всех предложенных в данной диссертации) можно использовать, по меньшей мере, в качестве дополнительного средства валидации оценок X_1 и V_1 , получаемых посредством линейной регрессии (п. 4.3.1 диссертации, рисунки 4.7 и 4.8).

Представить обоснованные выводы относительно того, применим ли «Алгоритм 2» для идентификации R_0 , X_0 и Y_0 (или хотя бы части из этих параметров) в других, особых режимах ЭЭС¹, фактически невозможно без вычислительных экспериментов с реальными векторными измерениями, зафиксированными УСВИ в этих режимах. На момент написания работы подобные архивы СВИ в распоряжении автора отсутствуют. В целом же можно считать, что задача идентификации параметров нулевой последовательности ВЛЭП по данным СВИ достаточно сложна. Лишь немногие публикации по теме исследования затрагивают эту проблему, и сам подход к ее решению в некоторых из них, например, [5], вызывает серьезные сомнения в плане практической применимости.

4.4 Анализ функционирования разработанных методов на реальных архивах СВИ с обеих сторон ВЛЭП (тестирование в режиме «черный ящик»)

Таблично-графические результаты верификации методов оценки параметров ВЛЭП на основе СВИ, представленные в предыдущих разделах работы, были получены либо с помощью смоделированных синхрофазоров, либо с привлечением реальных СВИ, но только с одной стороны линии. В данном разделе диссертации представлены некоторые результаты функционирования нескольких разработанных методов, когда все без исключения вектора напряжений и токов извлекаются из реальных архивов СВИ, т.е. выполняется, по сути, идентификация параметров анализируемой

¹ Под «особыми» режимами здесь подразумеваются такие, в которых имеются достаточно выраженные напряжения и токи нулевой последовательности (близкие внешние КЗ, бестоковая пауза при ОАПВ на данной либо смежной линии и т.п.).

линии как «черного ящика». Для алгоритмов, не связанных с решением нелинейной оптимизационной задачи и не требующих детальный «портрет» линии (п. 3.1, п. 3.2, п. 4.3.1), при этом необходимо лишь указание ее «паспортной» длины.

Поскольку попытка оценки параметров нулевой последовательности ВЛЭП, как отмечено в п. 4.3.2, на практике возможна лишь в особых режимах, сопровождаемых выраженной несимметрией по фазам, ниже приводятся только результаты вычислений по прямой последовательности. В отличие от всех вышеописанных процедур тестирования разработанных методов, в нижеследующих «слепых» экспериментах точные значения «эталонных» параметров ВЛЭП отсутствуют. В этом заключается одно из препятствий для наискорейшего практического внедрения методик определения параметров ВЛЭП на базе векторных измерений¹. Данная проблема более подробно обсуждается в п. 4.5 диссертации. Сейчас же достаточно отметить, что в качестве «эталонных» параметров ВЛЭП могут использоваться следующие:

- параметры «по умолчанию», используемые в программных комплексах, эксплуатируемых электросетевыми компаниями;

- параметры, рассчитанные на основании информации о типовой опоре и марках проводов ВЛЭП, предполагаемом сопротивлении грунта вдоль трассы линии и т.д. В п. 1.2.1 выявлены основные факторы, определяющие вариацию параметров ВЛЭП, и показано, что для приблизительной оценки X_1 и B_1 может быть достаточно корректных данных о горизонтальном расположении всех проводников, а также о радиусах фазных проводов и тросов. Для трех ВЛЭП, обсуждаемых ниже, состав этих данных практически полный, что позволяет ориентировочно рассчитать X_1 и B_1 в каждом случае.

4.4.1 Результаты экспериментов для американской ВЛЭП 345 кВ.

Для одноцепной линии 345 кВ, расположенной в США (рисунок 3.10),

¹ Сказанное, очевидно, относится не только к линиям электропередачи, но также к генераторам и трансформаторам, фактические параметры которых подлежат оценке с использованием СВИ.

известен детальный «портрет» (рисунок А.3 и таблица А.2), что дает возможность проанализировать поведение фактически всех методов расчета параметров, изложенных в диссертации. Более того, имеются значения «паспортных» сопротивлений и проводимостей линии, которыми оперируют специалисты компании «АТС». Именно эти значения и были приняты в качестве «эталонных» и затем сопоставлены с соответствующими выходными данными разработанных алгоритмов, использовавших массивы измерений от УСВИ с обеих сторон ВЛЭП.

В таблицу 4.8 сведены результаты оценки R_1 , X_1 и B_1 для исследуемой ВЛЭП 345 кВ на базе различных массивов СВИ, имеющих в распоряжении.

Таблица 4.8 – Результаты идентификации параметров прямой последовательности ВЛЭП 345 кВ (рисунок 3.10) на базе СВИ нормального установившегося режима ЭЭС с применением нескольких разработанных методов

Параметр	«Эталонное» значение	Отличие «эталонного» и расчетного значений (в процентах)			
		Аналитическое решение (п. 3.2)	Линейная регрессия (п. 4.3.1)	Оптимизация без учета коэффициентов коррекции (п. 3.3.3)	Оптимизация с учетом коэффициентов коррекции (п. 4.3.2)
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<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	-1,1225	-41,2782	0,7889
B_1	$4,4535 \cdot 10^{-6}$ См/км	-14,6512	1,9005	-14,5997	1,8264
<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	1,9595	-35,3223	1,9833
B_1	$4,4535 \cdot 10^{-6}$ См/км	-14,8023	3,0743	-15,1012	1,7137
<i>Архив СВИ 3; количество комплектов СВИ: 108002</i>					
R_1	0,0351 Ом/км	–	19,1847	–	–
X_1	0,3715 Ом/км	–	1,2711	–	–
B_1	$4,4535 \cdot 10^{-6}$ См/км	–	0,0704	–	–

Данные, полученные по каждому из методов (за исключением линейной регрессии) на базе массива измерений, обозначенного «Архив СВИ 1» (таблица 4.8), представляют собой результаты усреднения ста экспериментов с различным составом комплектов СВИ. В этом смысле их

следует считать достаточно объективными. То же справедливо и в отношении «Архива СВИ 2». Что касается метода на основе линейной регрессии (столбец 4 в таблице 4.8), соответствующие данные получены с привлечением сразу всех имеющихся комплектов СВИ (в количестве 108001 или 108002), поэтому их тоже можно считать репрезентативными. Знак «—» в последних трех строках таблицы 4.8 означает, что три метода идентификации параметров линии (столбцы 3, 5 и 6) не тестировались должным образом с «Архивом СВИ 3».

Из анализа числовых значений, приведенных в таблице 4.8, можно заключить следующее.

1. Два из четырех разработанных в диссертационном исследовании методов обеспечивают достаточно точные оценки «погонных» значений индуктивного сопротивления и емкостной проводимости ВЛЭП (выделенные цифры данных в таблице 4.8). При этом, как уже отмечалось, «эталонное» значение X_1 (или B_1), относительно которого вычислены погрешности в процентах, не обязательно отражает реальную эксплуатационную картину. Вместе с тем, поскольку вариация X_1 и B_1 мала (п. 1.2.2 диссертации), а результаты расчетов в режиме «черный ящик» (таблица 4.8, столбцы 4 и 6) фактически идентичны принятым энергокомпанией «эталонным» значениям, можно считать, что эти «эталонные» значения корректны. Верно и обратное: хорошее совпадение X_1 и B_1 , оцененных через СВИ в режиме «черный ящик», с соответствующими данными «по умолчанию», свидетельствует о корректности математических моделей, разработанных в диссертации.

2. Из сопоставления результатов по двум наиболее «успешным» методам (таблица 4.8, столбцы 4 и 6) можно видеть, что линейная регрессия обеспечивает в целом столь же качественное решение по X_1 и B_1 , что и оптимизация с учетом коэффициентов коррекции. При этом *алгоритм линейной регрессии существенно проще в плане программной реализации, обеспечивая, к тому же, детерминированный результат. Поэтому именно его следует рекомендовать в качестве алгоритма «по умолчанию» для*

практической оценки параметров прямой последовательности ВЛЭП на основе СВИ, если только систематические погрешности измерений (не учитываемые в этом алгоритме специальным образом) не слишком велики.

3. Выполнить достаточно точный расчет истинного значения активного сопротивления R_1 сложно (если вообще возможно) по любому из рассмотренных методов. Прежде всего, отметим, что величина этого параметра для ВЛЭП 500 кВ очень мала по сравнению с X_1 (столбец 2 в таблице 4.8), поэтому большая относительная погрешность не означает существенную ошибку, выраженную в Ом/км. Кроме того, в отличие от X_1 и B_1 , активное сопротивление подвержено значительной вариации (рисунки 1.15 и 1.17), поэтому, в силу отсутствия реального «эталоны», нельзя уверенно утверждать, что большие процентные отличия от принятого «эталонного» значения в 0,0351 Ом/км действительно свидетельствуют о некорректных оценках R_1 . С другой стороны, на практике в любом случае должны ожидать более заметные погрешности по R_1 в сравнении с X_1 и B_1 (рисунки 4.6–4.8).

4. Имеется хорошее совпадение результатов, пусть и неточных, по двум совершенно различным методам (таблица 4.8, столбцы 3 и 5). Это свидетельствует о корректной математической формулировке и программной реализации соответствующих алгоритмов. Более успешное функционирование этих алгоритмов возможно в случае уменьшения систематических погрешностей СВИ (рисунки 4.3–4.5), а также при использовании менее коррелированных СВИ. Сейчас же имеем следующую картину: для «Архива СВИ 2» (таблица 4.8), если собрать все вектора токов и напряжений в начале линии в единую матрицу размера 6×108002 , получим число обусловленности матрицы (рассчитанное командой «*cond*» в MATLAB), равное $6,1188 \cdot 10^6$. Это свидетельствует о значительной «схожести» комплектов СВИ.

Наконец, отметим, что оценки по активной проводимости прямой последовательности линии G_1 , полученные по методу на основе линейной

регрессии, оказались малы (в 22–167 раз ниже соответствующих оценок по B_1), что вполне объяснимо: при сухой погоде, отсутствии «короны» и нормальном состоянии изоляторов активной проводимостью линии можно пренебречь [12].

4.4.2 Результаты экспериментов для ВЛЭП 500 кВ «Костромская ГРЭС – Загорская ГАЭС». Для данной линии 500 кВ, как и для ВЛЭП 345 кВ, рассмотренной в п. 4.4.1, известен детальный «портрет» (схематическое изображение одной цепи на рисунке А.1, а также основные характеристики в таблице А.1). Следовательно, теоретически вновь возможно проанализировать поведение тех же методов определения параметров ВЛЭП, что и в таблице 4.8. Однако рассматриваемая линия 500 кВ плотно «соседствует» с другой на протяжении 11,8 км (т.е. не является в строгом смысле одноцепной), а также имеет довольно сложную схему чередования фаз. Поэтому построение достаточно точной ее модели для решения оптимизационной задачи сопряжено с существенными трудностями и временными затратами. Кроме того, использование методик на основе оптимизации для американской ВЛЭП 345 кВ фактически не принесло преимуществ по сравнению с аналитическими методами (таблица 4.8). Исходя из этого, ниже приводятся результаты вычислительных экспериментов только для метода на базе линейной регрессии (п. 4.3.1 диссертации).

Как и ранее, истинные сопротивления и проводимости ВЛЭП, соответствующие интервалам времени, в течение которых фиксировались векторные измерения по концам ВЛЭП, не известны. Поэтому сравнение результатов вычислений осуществлялось с двумя различными группами параметров, которые ориентировочно можно считать за «эталонные» (таблица 4.9). Первая группа (условно «ЭТАЛОН 1») – это параметры, полученные от АО «СО ЕЭС» (и, очевидно, используемые специалистами «Системного Оператора» в качестве параметров «по умолчанию» для рассматриваемой линии). Вторая группа (условно «ЭТАЛОН 2») –

параметры, рассчитанные в АТР/АТРDraw на основе информации о типовой опоре, марках проводов ВЛЭП и т.п. Как отмечалось выше, этого должно быть достаточно для ориентировочной оценки X_1 и B_1 .

Таблица 4.9 – Две группы параметров прямой последовательности, рассматриваемых в качестве «эталонных» для ВЛЭП 500 кВ «Костромская ГРЭС – Загорская ГАЭС»

Параметр	Значение	
	«ЭТАЛОН 1» (АО «СО ЕЭС»)	«ЭТАЛОН 2» (АТР/АТРDraw)
R_1	0,0244 Ом/км	0,0247 Ом/км
X_1	0,3067 Ом/км	0,3031 Ом/км
B_1	$3,63 \cdot 10^{-6}$ См/км	$3,806 \cdot 10^{-6}$ См/км
G_1	$2,016 \cdot 10^{-8}$ См/км	0

В таблице 4.10 представлены результаты расчетов R_1 , X_1 и B_1 для анализируемой линии на базе четырех различных архивов векторных измерений, каждый из которых содержит порядка 30000 комплектов СВИ.

Таблица 4.10 – Результаты оценки параметров прямой последовательности ВЛЭП 500 кВ «Костромская ГРЭС – Загорская ГАЭС» на базе СВИ нормального установившегося режима ЭЭС с применением метода на основе линейной регрессии (п. 4.3.1)

Принятый «эталон»	Отличие «эталонного» и расчетного значений (в процентах):		
	по R_1	по X_1	по B_1
<i>Архив СВИ 1</i>			
«ЭТАЛОН 1»	1,6102	0,1053	6,8656
«ЭТАЛОН 2»	0,3761	1,2943	1,9133
<i>Архив СВИ 2</i>			
«ЭТАЛОН 1»	-64,5644	6,8258	6,5546
«ЭТАЛОН 2»	-64,9948	8,0946	1,6166
<i>Архив СВИ 3</i>			
«ЭТАЛОН 1»	-4,9005	2,4014	7,2157
«ЭТАЛОН 2»	-6,0555	3,6176	2,2472
<i>Архив СВИ 4</i>			
«ЭТАЛОН 1»	-24,9443	-0,0355	7,2802
«ЭТАЛОН 2»	-25,8559	1,1518	2,3086

Как следует из таблицы 4.10, метод на базе линейной регрессии обеспечивает в целом достаточно точные результаты идентификации X_1 и B_1 . При этом рассчитанное значение B_1 по всем архивам СВИ существенно

ближе к соответствующему «эталонному» значению из второй группы, чем из первой. Учитывая относительно малую вариацию параметра B_1 в нормальных условиях функционирования линии, это может свидетельствовать о необходимости корректировки «паспортного» B_1 , принятого в АО «СО ЕЭС».

Результаты расчета R_1 (таблица 4.10) отражают существенную вариацию этого параметра в зависимости от погодных условий и мощности, передаваемой по линии (рисунки 1.15 и 1.17), а также тот факт, что R_1 сложнее идентифицировать на основе СВИ (рисунки 4.6–4.8). Обратим также внимание, что в абсолютном выражении этот параметр более чем на порядок меньше X_1 (таблица 4.9). Таким образом, определить его точное и актуальное значение сложно. Удовлетворительным результатом можно считать уже то, что ни для одного из четырех рассмотренных архивов СВИ разработанный алгоритм не выдал отрицательного значения для R_1 , что было бы априори некорректно.

4.4.3 Результаты экспериментов для ВЛЭП 500 кВ «Тамань – Кубанская». Для данной линии 500 кВ полноценный «паспорт» в распоряжении автора отсутствует. Несмотря на это, известны основные характеристики (преобладающий тип опор, марки проводов, длина линии), позволяющие сформировать приблизительную модель ВЛЭП в ATPDraw и рассчитать ее погонные «параметры». Поэтому, как и ранее для ВЛЭП «Костромская ГРЭС – Загорская ГАЭС», будем оперировать сразу двумя группами «эталонных» параметров (таблица 4.11). Как видно из таблицы 4.11, в данном случае «эталонные» группы достаточно близки, однако это по-прежнему не означает, что хотя бы одна из них соответствует действительности (особенно в отношении параметров R_1 и G_1).

В таблице 4.12 отражены результаты расчетов R_1 , X_1 и B_1 для рассматриваемой линии на основе трех архивов СВИ, каждый из которых содержит около 30000 комплектов измерений.

Таблица 4.11 – Две группы параметров прямой последовательности, рассматриваемых в качестве «эталонных» для ВЛЭП 500 кВ «Тамань – Кубанская»

Параметр	Значение	
	«ЭТАЛОН 1» (АО «СО ЕЭС»)	«ЭТАЛОН 2» (АТР/АТРDraw)
R_1	0,031 Ом/км	0,0335 Ом/км
X_1	0,2989 Ом/км	0,3073 Ом/км
B_1	$3,738 \cdot 10^{-6}$ См/км	$3,711 \cdot 10^{-6}$ См/км
G_1	$3,598 \cdot 10^{-8}$ См/км	0

Таблица 4.12 – Результаты определения параметров прямой последовательности ВЛЭП 500 кВ «Тамань – Кубанская» на базе СВИ с применением метода на основе линейной регрессии (п. 4.3.1)

Принятый «эталон»	Отличие «эталонного» и расчетного значений (в процентах):		
	по R_1	по X_1	по B_1
<i>Архив СВИ 1</i>			
«ЭТАЛОН 1»	-66,6826	3,9685	5,5486
«ЭТАЛОН 2»	-69,1690	1,1265	6,3193
<i>Архив СВИ 2</i>			
«ЭТАЛОН 1»	323,4730	-4,5574	-0,5359
«ЭТАЛОН 2»	291,8705	-7,1663	0,1904
<i>Архив СВИ 3</i>			
«ЭТАЛОН 1»	316,4555	-5,3875	-0,1429
«ЭТАЛОН 2»	285,3768	-7,9737	0,5863

Анализируя таблицу 4.12, можно видеть, что метод на основе линейной регрессии обеспечивает относительно неплохие результаты по X_1 и B_1 . Эти результаты в целом несколько уступают по точности соответствующим данным, полученным для двух предыдущих ВЛЭП (пп. 4.4.1 и 4.4.2). Причинами могут быть меньшая точность СВИ, неучет влияния параллельных линий (если оно в данном случае существенное), более выраженный разброс систематических погрешностей СВИ при изменении уровня тока и, возможно, другие факторы. Кроме того, «эталон», относительно которых рассчитаны погрешности в таблице 4.12, по-прежнему лишь приблизительно отражает точные значения искомым параметров ВЛЭП. Несмотря на все эти особенности, оценка X_1 и B_1 на базе СВИ для этой линии, как и для двух предыдущих, позволяет хотя бы приближенно верифицировать значения «погонных» параметров, закладываемых в

программные комплексы, используемые электросетевыми компаниями.

4.5 Методика анализа функционирования и принципы использования методов определения параметров ВЛЭП в эксплуатационной практике

4.5.1 Возможные способы анализа функционирования методов определения параметров ВЛЭП на базе СВИ. Как отмечено выше, несмотря на большое количество публикаций по определению параметров воздушных линий с использованием векторных измерений, успешные практические внедрения предложенных методов с высокой вероятностью отсутствуют (возможно, некоторые методы проходят стадию тестирования, планирования «пилотных» проектов и т.п.). Одной из очевидных причин этой ситуации является неработоспособность (либо слабая работоспособность) представленных алгоритмов, если их входными данными являются реальные, а не смоделированные архивы СВИ с двух сторон ВЛЭП (режим «черный ящик»). Слишком высокая корреляция измерений от точки к точке (п. 4.1 диссертации) вкупе с деструктивным влиянием погрешностей СВИ (рисунки 4.3–4.8) приводят к тому, что информационная составляющая, требуемая алгоритмам оценки параметров ВЛЭП, практически полностью «перекрывается». Определить параметры нулевой последовательности ВЛЭП в нормальном режиме ЭЭС, характеризуемом малой несимметрией, в этих условиях фактически невозможно. Актуальное значение R_1 также рассчитать достаточно сложно (рисунки 4.3 и 4.6, таблицы 4.8, 4.10 и 4.12).

Другой причиной, препятствующей наискорейшему внедрению методов расчета параметров линии на базе СВИ, является сложность верификации результатов расчета в «полевых» условиях. Очевидно, что перед практическим использованием предлагаемых алгоритмов потребуются многократная достоверизация выдаваемых ими результатов. При этом вычисления, осуществляемые даже на базе реальных массивов СВИ на работающей линии, не позволят сделать однозначных выводов о качестве

функционирования алгоритмов. Простое сопоставление результатов расчетов параметров ВЛЭП с соответствующими данными, принятыми «по умолчанию» (усредненными, «паспортными»), нельзя рассматривать подходящим критерием: отсутствует «эталон», которым в общем случае не является ни расчетное значение, ни соответствующее «паспортное». Отметим также, что «паспортные» значения сопротивлений нулевой последовательности вообще не могут рассматриваться в качестве «эталонных» в силу высокой вариативности R_0 и X_0 (рисунки 1.15–1.18).

В этой связи представляется целесообразным 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, позволят сделать действительно объективные выводы в части применимости предлагаемых методик оценки параметров ВЛЭП на основе СВИ.

С практической точки зрения задача не выглядит неосуществимой: за один «сеанс» вывода из работы конкретной линии можно протестировать множество различных сценариев (с разными соотношениями напряжений и токов), а также запустить одновременно несколько алгоритмов расчета параметров ВЛЭП. При этом результаты, которые можно получить в ходе подобных экспериментов, трудно переоценить: они должны быть существенно более объективными по сравнению с моделированием режимов в программных продуктах, симуляторах типа RTDS, а также с вычислениями на базе реальных массивов СВИ, но в отсутствие «эталонных» сопротивлений и проводимостей ВЛЭП, как это выполнено в п. 4.4 диссертации.

Помимо экспериментов на временно выведенной из эксплуатации

ВЛЭП, теоретически возможно обеспечить тестирование методов и при возникновении аварийных событий. При несимметричном КЗ на рассматриваемой линии, зная расстояние до места повреждения, можно сопоставить точность вычисления сопротивлений ВЛЭП традиционным способом и с помощью СВИ [129].

4.5.2 Приблизительная методика выбора оптимального способа расчета параметров ВЛЭП на базе СВИ. Комплексный анализ разработанных в диссертации методов определения актуальных параметров ВЛЭП, в т.ч. с использованием реальных архивов СВИ с двух сторон линии (п. 4.4 работы), позволяет сформулировать предварительные рекомендации по выбору того или иного метода.

Из анализа данных, представленных в таблице 4.8, достаточно очевидно, что параметры прямой последовательности R_1 , X_1 и B_1 лучше рассчитывать либо с помощью метода на основе линейной регрессии (п. 4.3.1 диссертации), либо путем решения оптимизационной задачи с дополнительными неизвестными – коэффициентами коррекции (п. 4.3.2). Второй из этих вариантов существенно более сложен с точки зрения программной реализации и, кроме того, требует детального «паспорта» линии, однако при наличии всех необходимых данных может быть востребован в качестве дополнительного контрольного средства. *Метод на базе линейной регрессии прост в части программной реализации и, к тому же, универсален, поэтому может быть рекомендован в качестве главного метода (алгоритма «по умолчанию») для практической оценки параметров прямой последовательности одноцепной ВЛЭП.* Обоим алгоритмам требуется множество независимых комплектов СВИ нормального установившегося режима, что не является проблемой: в российской практике УСВИ обычно формируют 3000 комплектов измерений каждую минуту.

Параметры нулевой последовательности R_0 , X_0 и B_0 , как отмечалось выше, фактически невозможно корректно рассчитать с задействованием лишь СВИ нормального режима (таблица 4.7). Задача потенциально

разрешима при использовании СВИ, полученных в аварийных режимах, например, при КЗ на участке сети, непосредственно примыкающем к анализируемой ВЛЭП [130]. Для ВЛЭП 500 кВ и выше также актуальным выглядит применение СВИ, собранных во время бестоковой паузы в цикле ОАПВ (п. 4.2.2 диссертации). В рассматриваемых режимах (близкое внешнее КЗ, ОАПВ) может возникать значительная несимметрия по фазам, что благоприятствует идентификации параметров ВЛЭП. В то же время длительность существования подобных режимов ограничена, что, вероятно, не позволит сформировать несколько комплектов СВИ, достаточно не «похожих» друг на друга. Это обстоятельство лимитирует применение двух отмеченных выше методов, «успешных» с точки зрения расчета X_1 и B_1 в нормальном режиме ЭЭС. Возможность же комбинации СВИ из доаварийного и аварийного режимов можно фактически исключить, поскольку несложно предположить, что аварийному режиму будут сопутствовать иные, достаточно отличающиеся от доаварийных, систематические погрешности СВИ.

Учитывая вышеизложенное, для оценки R_0 , X_0 и B_0 целесообразным представляется задействование методов, которым достаточно даже одного комплекта СВИ: аналитическое решение системы уравнений (п. 3.2 диссертации) и решение оптимизационной задачи без учета коэффициентов коррекции (п. 3.3.3). Эти методы оказались не столь «успешны» при вычислении параметров прямой последовательности ВЛЭП на базе СВИ нормального установившегося режима ЭЭС (столбцы 3 и 5 в таблице 4.8). Вместе с тем в [130] показано, что при КЗ на смежной линии обеспечивается приемлемое решение относительно R_0 и X_0 , если используется метод из п. 3.2. Окончательные выводы относительно возможности применения этого метода с векторными измерениями, полученными в «ненормальных» режимах, можно будет сделать только на основе реальных данных СВИ, зафиксированных во время близкого внешнего КЗ (либо во время бестоковой паузы при ОАПВ). К настоящему времени соответствующие архивы СВИ в

распоряжении автора отсутствуют.

На рисунке 4.10 приведена блок-схема, отражающая возможный способ выбора метода, направленного на решение главной задачи, поставленной в диссертации.

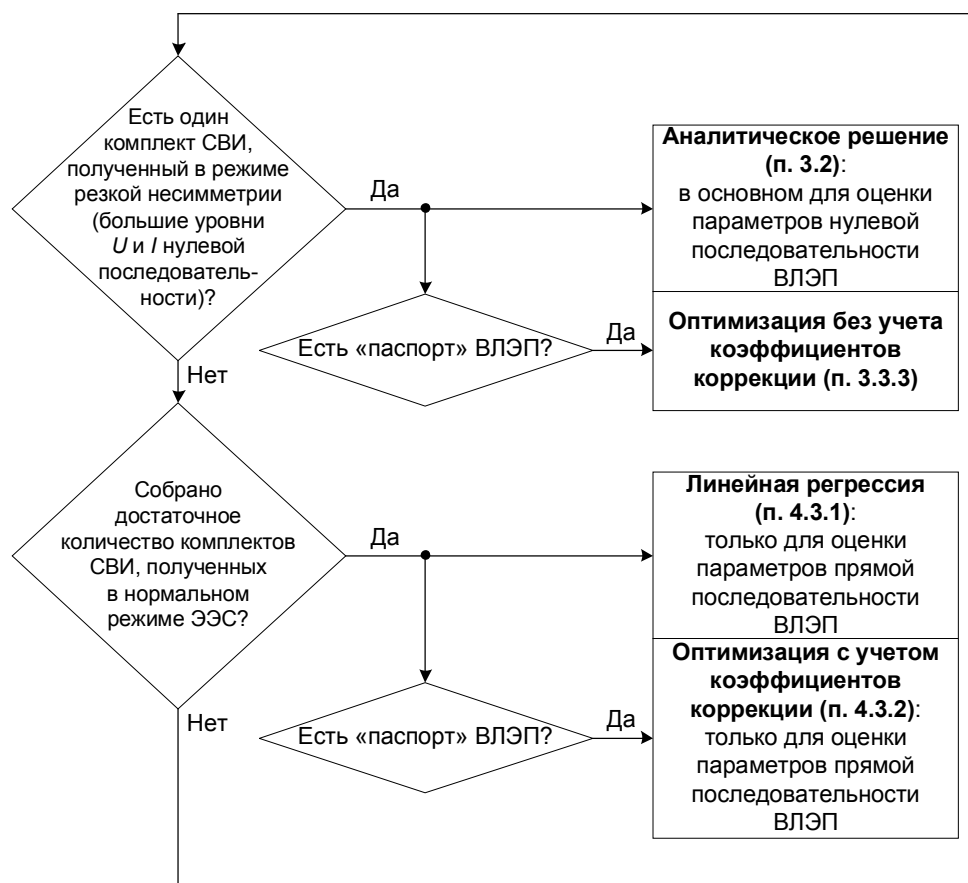


Рисунок 4.10 – Методика, отражающая возможный способ выбора метода, направленного на актуализацию параметров ВЛЭП с использованием СВИ

Важно отметить и тот факт, что точность идентификации параметров ВЛЭП по данным СВИ, сформированных и в нормальных, и в аварийных режимах ЭЭС, существенно зависит от качества входной информации, требуемой алгоритмам, обозначенным на рисунке 4.10. Для наглядной иллюстрации сказанного достаточно обратиться к графическим зависимостям на рисунках 4.3–4.8. Исходя из этого, наряду с совершенствованием математической базы, используемой методами определения параметров ВЛЭП, необходимо применение как можно более

точных измерительных трансформаторов (что, вероятно, приобретает особую актуальность в режимах с резкой несимметрией, необходимых для идентификации сопротивлений нулевой последовательности линии). Как уже отмечалось, в этом направлении исследований сделаны важные шаги, частично отраженные в диссертации Яблокова А.А. [127].

Неясным и требующим дальнейших исследований остается также вопрос, в какой степени актуализация параметров ВЛЭП по данным СВИ может повысить точность решения каждой из задач, перечисленных во введении к работе (ОМП на ВЛЭП, ОС режима электрической сети и т.п.). Максимально обоснованный ответ на этот вопрос можно получить только после серии натурных экспериментов, обсуждаемых выше, которые позволили бы окончательно определить диапазоны погрешностей расчета параметров ВЛЭП на базе СВИ.

4.6 Выводы по главе 4

1. Детальным образом проанализированы различные реальные архивы векторных измерений, полученные от УСВИ с двух одноцепных ВЛЭП, и выяснено, что в нормальном режиме ЭЭС все измерения отличаются высокой корреляцией, что является серьезным препятствием для функционирования алгоритмов идентификации параметров ВЛЭП.

2. Осуществлена серия вычислительных экспериментов, наглядно иллюстрирующих характер совокупного влияния систематических погрешностей СВИ на качество решения задачи по оценке параметров линии. Показано, что ошибки расчета сопротивлений и проводимостей ВЛЭП на базе СВИ практически линейно зависят от класса точности измерительных трансформаторов тока и напряжения для УСВИ.

3. Разработаны и апробированы (в т.ч. на реальных данных) подходы, направленные на компенсацию влияния погрешностей СВИ: метод на основе линейной регрессии, а также метод, требующий решения оптимизационной

задачи, содержащей дополнительные неизвестные для учета систематических ошибок измерений – коэффициенты коррекции. Выяснено, что метод с использованием линейной регрессии, будучи простым в реализации, обеспечивает существенно более качественные (вплоть до одного порядка) результаты определения параметров ВЛЭП в сравнении с аналитическим решением на базе одного комплекта СВИ.

4. Проанализировано функционирование разработанных методов, направленных на идентификацию параметров ВЛЭП, с использованием реальных архивов СВИ в режиме «черный ящик». Соответствующие вычислительные эксперименты выполнены для трех одноцепных ВЛЭП (в каждом случае – с несколькими различными архивами СВИ). Выяснено, что два из четырех разработанных в диссертационном исследовании методов обеспечивают достаточно точные оценки значений индуктивного сопротивления X_1 и емкостной проводимости B_1 . Сделать объективные выводы относительно погрешностей определения R_1 сложно в силу существенной вариации этого сопротивления вкупе с отсутствием его «эталонного» значения, соответствующего конкретному интервалу времени.

5. Рассмотрена проблема достоверизации результатов определения параметров ВЛЭП на основе СВИ в реальных практических условиях, а также предложена приблизительная методика выбора оптимального способа расчета параметров ВЛЭП в зависимости от доступных архивов СВИ и имеющихся данных о конфигурации ВЛЭП.

Результаты исследований, изложенных в главе 4, опубликованы в работах [128, 130, 143, 144, 146, 148].

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 практически 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» применяемые 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Sollecito L. Smart Grid: The Road Ahead // Protection & Control Journal. – 2009. – no. 8. – Pp. 15–19.

2 Bartolomey P.I., Eroshenko S.A., Lebedev E.M., Suvorov A.A. New information technologies for state estimation of power systems with FACTS // Proc. 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). – Berlin, Germany. – October 14–17, 2012.

3 Небера А.А. Прикладные вопросы применения векторных измерений параметров электрического режима // Сборник докладов 3-й Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Санкт-Петербург. – 2011.

4 Liao Y., Kezunovic M. Online optimal transmission line parameter estimation for relaying applications // IEEE Trans. Power Delivery. – 2009. – vol. 24, no. 1. – Pp. 96–102.

5 Kato M., Hisakado T., Takani H., Umezaki H., Sekiguchi K. Live line measurement of untransposed three phase transmission line parameters for relay settings // Proc. 2010 IEEE PES General Meeting. – Minneapolis, MN, USA. – July 25–29, 2010.

6 Jiang J.-A., Yang J.-Z., Lin Y.-H., Liu C.-W., Ma J.-C. An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines. Part I: Theory and Algorithms // IEEE Trans. Power Delivery. – 2000. – vol. 15, no. 2. – Pp. 486–493.

7 Бартоломей П.И., Ерошенко С.А., Лебедев Е.М., Суворов А.А. Новые информационные технологии обеспечения наблюдаемости FACTS на основе измерений PMU // Электроэнергетика глазами молодёжи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – Т. 2. – С. 17–23.

8 Kim Il-D., Aggarwal R.K. A study on the on-line measurement of

transmission line impedances for improved relaying protection // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2006. – vol. 28, no. 6. – Pp. 359–366.

9 Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчёты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

10 Dommel H.W. Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book. – Portland, OR, USA: Bonneville Power Administration, 1986.

11 ATP Rule Book. (*Источник доступен онлайн только для зарегистрированных пользователей программы «АТР»*).

12 Martinez-Velasco J.A., Ramirez A.I., Davila M. Overhead lines // Power System Transients: Parameter Determination, J.A. Martinez-Velasco, Ed. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. – Pp. 17–135.

13 Douglass D.A., Thrash F.R. Sag and tension of conductor // Electric Power Generation, Transmission, and Distribution, 3rd ed., L.L. Grigsby, Ed. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.

14 Watson N., Arrillaga J. Power Systems Electromagnetic Transients Simulation. – The Institution of Engineering and Technology, 2007.

15 Electromagnetic Field Interaction with Transmission Lines: From classical theory to HF radiation effects, Edited by F Rachidi & S Tkachenko. – WIT Press, 2008.

16 Шелюг С.Н. Методы адаптивной идентификации параметров схем замещения элементов электрической сети: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Шелюг Станислав Николаевич. – Екатеринбург, 2000. – 181 с.

17 Суворов А.А. Адаптивная идентификация параметров элементов электрической сети для задач оперативного и противоаварийного управления: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Суворов Антон Алексеевич. – Екатеринбург, 2003. – 208 с.

18 Kusic G.L., Garrison D.L. Measurement of Transmission Line Parameters from SCADA Data // Proc. IEEE PES Power Systems Conference and

Exposition. – New York, NY, USA. – October 10–13, 2004.

19 Davis K.R., Dutta S., Overbye T.J., Gronquist J. Estimation of Transmission Line Parameters from Historical Data // Proc. 46th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS 2013. – Maui, HI, USA. – January 7–10, 2013.

20 Бердин А.С., Крючков П.А., Суворов А.А., Шелюг С.Н. Адаптивные методы определения параметров схемы замещения линий электропередачи // Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния: Труды международной научно-технической конференции. – Новосибирск: СИБНИИЭ, 2003. – Т. 2. – С. 91-95.

21 Хрущев Ю.В., Бацева Н.Л., Абрамочкина Л.В. Идентификация погонных параметров протяженной линии электропередачи с использованием регистраторов аварийных сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – № 4. – С. 118–122.

22 Джумик Д.В. Определение параметров схем замещения линий электропередачи, силовых конденсаторов и резисторов, реакторов по массивам мгновенных значений токов и напряжений в рабочих режимах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Джумик Дмитрий Валерьевич. – Томск, 2008. – 21 с.

23 Borda C., Olarte A., Diaz H. PMU-based Line and Transformer Parameter Estimation // Proc. 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. – Seattle, WA, USA. – March 15–18, 2009.

24 Chen C.-S., Liu C.-W., Jiang J.-A. A New Adaptive PMU Based Protection Scheme for Transposed/Untransposed Parallel Transmission Lines // IEEE Trans. Power Delivery. – 2002. – vol. 17, no. 2. – Pp. 395–404.

25 Klapper U., Vandiver B., Welton D., Apostolov A. Why we should measure line impedance? [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.pacw.org/fileadmin/doc/ImpedanceMeasurements.pdf> (дата обращения 30.07.2019).

26 Bockarjova M., Andersson G. Transmission Line Conductor Temperature

Impact on State Estimation Accuracy // Proc. 2007 IEEE Lausanne Powertech. – Lausanne, Switzerland. – July 1–5, 2007.

27 Kurokawa S., Pissolato J., Tavares M.C., Portela C.M., Prado A.J. A New Procedure to Derive Transmission-Line Parameters: Applications and Restrictions // IEEE Trans. Power Delivery. – 2006. – vol. 21, no. 1. – Pp. 492–498.

28 Wilson R.E., Zevenbergen G.A., Mah D.L., Murphy A.J. Calculation of Transmission Line Parameters From Synchronized Measurements // Electric Machines & Power Systems. – 1999. – vol. 27, no. 12. – Pp. 1269–1278.

29 Indulkar C.S., Ramalingam K. Estimation of transmission line parameters from measurements // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2008. – vol. 30, no. 5. – Pp. 337–342.

30 Shi D., Tylavsky D.J., Logic N., Koellner K.M. Identification of short transmission-line parameters from synchrophasor measurements // Proc. 40th North American Power Symposium. – Calgary, AB, Canada. – September 28–30, 2008.

31 Asti G.A., da Silva R.C., Kurokawa S., da Costa E.C.M. Identification of transmission line parameters from temporal measurements of currents and voltages in their terminals: Influence on the length line // Proc. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. – San Diego, CA, USA. – July 22–26, 2012.

32 Asprou M., Kyriakides E. Estimation of Transmission Line Parameters Using PMU Measurements // Proc. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. – Denver, CO, USA. – July 26–30, 2015.

33 Schulze R., Schegner P., Stachel P. Parameter Identification of Unsymmetrical Transmission Lines Using Accurately Re-Synchronised Fault Records // Proc. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. – Calgary, AB, Canada. – July 26–30, 2009.

34 Schulze R., Schegner P., Zivanovic R. Parameter Identification of Unsymmetrical Transmission Lines Using Fault Records Obtained From Protective Relays // IEEE Trans. Power Delivery. – 2011. – vol. 26, no. 2. – Pp. 1265–1272.

35 Bi T., Chen J., Wu J., Yang Q. Synchronized Phasor based On-line Parameter Identification of Overhead Transmission Line // Proc. 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. – Nanjing, China. – April 6–9, 2008.

36 Janecek E., Hering P., Janecek P., Popelka A. Transmission line identification using PMUs // Proc. 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. – Rome, Italy. – May 8–11, 2011.

37 Ding L., Bi T., Zhang D. Transmission Line Parameters Identification Based on Moving-Window TLS and PMU data // Proc. 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. – Beijing, China. – October 16–20, 2011.

38 Wu Z., Zora L.T., Phadke A.G. Simultaneous transmission line parameter and PMU measurement calibration // Proc. 2015 IEEE PES General Meeting. – Denver, CO, USA. – July 26–30, 2015.

39 Shi D., Tylavsky D.J., Koellner K.M., Logic N., Wheeler D.E. Transmission line parameter identification using PMU measurements // Euro. Trans. Electr. Power. – 2011. – vol. 21, no. 4. – Pp. 1574–1588.

40 Степанова А.А. Совершенствование моделей расчета и анализа потерь мощности и энергии в линиях электропередачи: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Степанова Анна Александровна. – Ставрополь, 2014. – 190 с.

41 Шульгин М.С. Параметрическая идентификация линий электропередачи и трансформаторов для целей управления технологическими процессами в электроэнергетике: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Шульгин Максим Сергеевич. – Иркутск, 2013. – 20 с.

42 Заславская Т.Е., Ирлахман М.Я., Ловягин В.Ф. Пределы вариации электрических параметров симметричной линии электропередачи // Режим и устойчивость электроэнергетических систем: Труды СибНИИЭ. – Вып. 17. – М.: Энергия, 1970.

43 Регистратор электрических процессов цифровой «Парма РП4.08». Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – URL: <https://npp->

tp.ru/images/pdf/Parma/Parma_RP4.08.pdf (дата обращения 30.07.2019).

44 R.F. Nuqui. State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurements. PhD dissertation. – Blacksburg, VA, USA, 2001.

45 M. Zhou. Advanced System Monitoring with Phasor Measurements. PhD dissertation. – Blacksburg, VA, USA, 2008.

46 Q. Huang. Distributed State Estimation with Phasor Measurement Units (PMU) for Power Systems. PhD dissertation. – Mississippi, MS, USA, 2010.

47 Vicol B. On-line overhead transmission line And transformer parameters identification based on PMU measurements // Proc. 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). – Iasi, Romania. – October 16–18, 2014.

48 Chakrabarti S., Kyriakides E., Bi T., Cai D., Terzija V. Measurements get together // IEEE Power and Energy Magazine, Jan.–Feb. 2009. Reprinted in Special Issue: Smart Grid – Putting it All Together, a 2010 reprint journal from PES. – Pp. 15–23.

49 Жуков А.В., Сацук Е.И., Дубинин Д.М., Опалев О.Л., Уткин Д.Н. Опыт разработки, внедрения и эксплуатации системы мониторинга переходных режимов в ЕЭС России // Сборник докладов 5-й Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Сочи, 2015.

50 Развитие устройств синхронизированных векторных измерений / С.Г. Попов [и др.] // Энергоэксперт. – 2011. – № 5. – С. 54–55.

51 Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. – В 3 т. – Т. 1. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003.

52 Simscape Power Systems Reference (Specialized Technology). – Natick, MA, USA: The MathWorks, Inc., March 2017.

53 Ramirez A., Uribe F. A Broad Range Algorithm for the Evaluation of Carson's Integral // IEEE Trans. Power Delivery. – 2007. – vol. 22, no. 2. –

Рр. 1188–1193.

54 Carson J.R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return // Bell Systems Technical Journal. – 1926. – vol. 5. – Pp. 539–554.

55 Deri A., Tevan G., Semlyen A., Castanheira A. The Complex Ground Return Plane. A Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1981. – vol. PAS-100, no. 8. – Pp. 3686–3693.

56 Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

57 ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. Введ. 1981–01–01.

58 Расчетные данные проводов марок АС, АСКП, АСКС, АСК, АлС, АпСКП, АпСК [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ntfnt.ru/refer/lep.htm> (дата обращения 30.07.2019).

59 Длина пути утечки внешней изоляции электроустановок переменного тока классов напряжения 6-750 кВ. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2011. СТО 56947007-29.240.068-2011.

60 Каталог кабельной продукции «Aluminum Conductor Steel Reinforced (ACSR) Cables». – Atlanta, GA, USA: Alcan Cable.

61 Graham R.E., Bond C.R. Radio-influence testing on 70 miles of 345-kv horizontal bundle conductor // Electrical Engineering. – 1961. – vol. 80, no. 11. – Pp. 854–859.

62 Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above, 2nd ed. – Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute, 1982.

63 ECE 476: Power System Analysis. Lecture notes by Tom Overbye [Электронный ресурс]. – URL: <https://courses.engr.illinois.edu/ece476/fa2016/> (дата обращения 30.07.2019).

64 Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Физика почвы. – М.: Наука, 1967.

65 Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F., Kaintzyk U. Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction (Power Systems). – Springer, 2003.

66 ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2010–12–21.

67 Higgs P.J. An investigation of earthing resistances // Journal of the Institution of Electrical Engineers. – 1930. – vol. 68, no. 402. – Pp. 736–750.

68 Тарасов А., Цилько В. Гамма-съёмка. Новый метод оценки коррозионных свойств грунта на трассах ВЛ // Новости электротехники. – 2005. – № 2 (32).

69 Peck R.B., Hanson W.E., Thornburn T.H. Foundation engineering, 2nd ed. – John Wiley & Sons, 1974.

70 Du Yan, Liao Y. Online estimation of power transmission line parameters, temperature and sag // Proc. 43rd North American Power Symposium (NAPS). – Boston, MA, USA. – August 4–6, 2011.

71 Slegers J.M. Design of resource to backbone transmission for a high wind penetration future (master's thesis). – Iowa State University, 2013.

72 Глушкин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. – В 2 т. – Т. 1. – М.: Знак, 2009.

73 Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. – Springer, 2008.

74 Adamiak M., Kasztenny B. Implementation and performance of synchrophasor function within microprocessor based relays // GE Multilin, Protection and Control Journal. – 2007. – Pp. 35–45.

75 Schweitzer E.O., Whitehead D.E. Real-world synchrophasor solutions // Proc. 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers. – March 30–April 2, 2009.

76 Kleitsch J., Mehta H., Hackett J. Using Digital Fault Recorders As Phasor Measurement Unit Devices. Notes from Mehta Tech field installations [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mehtatech.com/pdfs/naspi-june-2012-presentation-using-dfrs-as-pmus.pdf> (дата обращения 30.07.2019).

77 Synchrophasor Measurements Under the IEEE Standard C37.118.1-2011

With Amendment C37.118.1a / K.E. Martin [и др.] // IEEE Trans. Power Delivery. – 2015. – vol. 30, no. 3. – Pp. 1514–1522.

78 IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, IEEE Std. C37.118.1-2011. – New York, NY, USA: IEEE, 2011.

79 IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems, IEEE Std. C37.118.2-2011. – New York, NY, USA: IEEE, 2011.

80 IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements, IEEE Std. C37.118.1a-2014. – New York, NY, USA: IEEE, 2014.

81 Объединенный семинар исследовательских комитетов B5 и D2 РНК СИГРЕ / Российский национальный комитет СИГРЭ [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cigre.ru/news/industry/2149/> (дата обращения 20.12.2016).

82 NASPI 2014 Survey of Synchrophasor System Networks – Results and Findings, NASPI Technical Report. – NASPI Data and Network Management Task Team, Network Systems Group, July 2015.

83 Jiang J.-A., Lin Y.-H., Yang J.-Z., Too T.-M., Liu C.-W. An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines – Part II: PMU Implementation and Performance Evaluation // IEEE Trans. Power Delivery. – 2000. – vol. 15, no. 4. – Pp. 1136–1146.

84 Бердин А.С., Коваленко П.Ю., Плесняев Е.А. Влияние погрешности измерений PMU при определении параметров схемы замещения ЛЭП // Известия НТЦ Единой Энергетической Системы. – 2012. – № 66 (1). – С. 29–38.

85 Хохлов М.В. Погрешность определения параметров схемы замещения ЛЭП по синхронизированным векторным измерениям // Электроэнергетика глазами молодёжи: научные труды IV международной научно-технической конференции: сборник статей. – Новочеркасск: Лик, 2013. – Т. 1. – С. 579–583.

86 Kakovskii S.K., Nebera A.A., Rabinovich M.A., Kazakov P.N. Estimation of the transmission line parameters using a grid model // Power

Technology and Engineering. – 2016. – vol. 50, no. 2. – Pp. 224–234.

87 Dan A.M., Raisz D. Estimation of transmission line parameters using wide-area measurement method // Proc. 2011 IEEE Trondheim PowerTech. – Trondheim, Norway. – June 19–23, 2011.

88 Ritzmann D., Wright P.S., Holderbaum W., Potter B. A method for accurate transmission line impedance parameter estimation // IEEE Trans. Instrumentation and Measurement. – 2016. – vol. 65, no. 10. – Pp. 2204–2213.

89 Шульгин М.С. Параметрическая идентификация линий электропередачи и трансформаторов для целей управления технологическими процессами в электроэнергетике: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Шульгин Максим Сергеевич. – Иркутск, 2013. – 157 с.

90 Коваленко П.Ю. Методы анализа низкочастотных колебаний и синхронизирующего действия генератора на базе векторных измерений: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Коваленко Павел Юрьевич. – Екатеринбург, 2016. – 188 с.

91 ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Введ. 2002–11–01.

92 Stone D.C. Application of median filtering to noisy data // Canadian Journal of Chemistry. – 1995. – vol. 73, no. 10. – Pp. 1573–1581.

93 Micek J., Kapitulik J. Median filter // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2003. – vol. 1, no. 2. – Pp. 51–56.

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

95 Walker J.S. A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications, 2nd ed. – Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group, 2008.

96 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Определение статистических свойств случайной ошибки, сопровождающей синхронизированные векторные измерения токов и напряжений в установившемся режиме // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 3. – С. 29–38.

97 Doig P., Gunn C., Durante L., Burns C., Cochrane M. Reclassification of

relay-class current transformers for revenue metering applications // Proc. 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. – Dallas, TX, USA. – May 21–24, 2006.

98 Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – 4-е изд., стереотипное. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

99 Weisstein E.W. The CRC Encyclopedia of Mathematics, 3rd ed. – Chapman and Hall/CRC, 2009.

100 Fugal D.L. Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing. – Space & Signals Technical Publishing, 2009.

101 Ivanov I., Murzin A. Optimal filtering of synchronized current phasor measurements in a steady state // Proc. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – Seville, Spain. – March 17–19, 2015.

102 Tate J.E., Overbye T.J. Extracting steady state values from phasor measurement unit data using FIR and median filters // Proc. 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. – Seattle, WA, USA. – March 15–18, 2009.

103 Glavic M., Van Cutsem T. Wide-Area detection of voltage instability from synchronized phasor measurements. Part II: Simulation results // IEEE Trans. Power Syst. – 2009. – vol. 24, no. 3. – Pp. 1417–1425.

104 Signal Processing Toolbox User's Guide. – Natick, MA, USA: The MathWorks, Inc., October 2014.

105 Walker J.S. Fourier analysis and wavelet analysis // Notices Amer. Math. Soc. – 1997. – vol. 44, no. 6. – Pp. 658–670.

106 Wavelet Toolbox User's Guide. – Natick, MA, USA: The MathWorks, Inc., October 2014.

107 Donoho D.L., Johnstone I.M. Ideal denoising in an orthonormal basis chosen from a library of bases // CRAS Paris. – 1994. – Ser I, t. 319. – Pp. 1317–1322.

108 Grainger J.J., Stevenson W.D., Jr. Power System Analysis. – New York McGraw-Hill – McGrawHill series in electrical and computer engineering, 1994.

109 Phase-mode transformation matrix application for transmission line and

electromagnetic transient analyses / A.J. do Prado et al. – Nova Science Pub Inc; UK ed. edition, 2011.

110 Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.

111 Wedepohl L.M. Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems // Proc. IEE. – 1963. – vol. 110, no. 12. – Pp. 2200–2212.

112 Optimization Toolbox User's Guide. – Natick, MA, USA: The MathWorks, Inc., September 2018.

113 Coleman T.F, Li Y. An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds // SIAM Journal on Optimization. – 1996. – vol. 6. – Pp. 418–445.

114 Coleman T.F., Li Y. On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds // Mathematical Programming. – 1994. – vol. 67, no. 2. – Pp. 189–224.

115 Levenberg K. A Method for the Solution of Certain Problems in Least-Squares // Quarterly Applied Mathematics. – 1944. – no. 2. – Pp. 164–168.

116 Marquardt D. An Algorithm for Least-squares Estimation of Nonlinear Parameters // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1963. – vol. 11, no. 2. – Pp. 431–441.

117 More J.J. The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory Numerical Analysis // Lecture Notes in Mathematics 630, G.A. Watson, Ed. – Springer Verlag, 1977. – Pp. 105–116.

118 Shan S. A Levenberg-Marquardt Method For Large-Scale Bound-Constrained Nonlinear Least-Squares (master's thesis). – The University of British Columbia, Vancouver, 2008.

119 OPTI Toolbox [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/jonathancurrie/OPTI> (дата обращения 27.12.2018).

120 Dennis J.E., Gay D.M., Walsh R.E. An Adaptive Nonlinear Least-Squares Algorithm // ACM Transactions on Mathematical Software. – 1981. –

vol. 7, no. 3. – Pp. 348–368.

121 Anderson P.M. *Analysis of Faulted Power Systems*. – Wiley-IEEE Press, 1995.

122 Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.

123 IEC 60044-1. *Instrument transformers – Part 1: Current transformers*. Edition 1.2. – IEC, 2003.

124 IEC 60044-2. *Instrument transformers – Part 2: Inductive voltage transformers*. Edition 1.2. – IEC, 2003.

125 Lebedev V., Yablokov A., Makarov A. // *Mathematical and physical models development for study the high-voltage resistive dividers of digital voltage transformers* // Proc. CIGRE 2016. – Paris, France. – August 21–26, 2016.

126 Lebedev V., Yablokov A., Ivanov I., Litvinov S. *Development of a high accuracy digital voltage transformer and a test bed supporting IEC 61850 and IEEE C37.118* // Proc. 2017 IEEE Manchester PowerTech. – Manchester, UK. – June 18–22, 2017.

127 Яблоков А.А. Разработка и исследование первичного преобразователя напряжения измерительного трансформатора для цифровой подстанции 110-220 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Яблоков Андрей Анатольевич. – Иваново, 2016. – 237 с.

128 Ivanov I., Murzin A. *Synchrophasor-based transmission line parameter estimation algorithm taking into account measurement errors* // Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). – Ljubljana, Slovenia. – October 9–12, 2016.

129 Johnson B.K., Wong C., Jadid S. *Validation of transmission line relay parameters using synchrophasors* // Proc. 41st Annual Western Protective Relay Conference. – Spokane, WA, USA. – October 14–16, 2014.

130 Иванов И.Е. Аналитическое определение параметров транспонированной линии электропередачи на базе синхронизированных векторных измерений // Вестник ИГЭУ. – 2019. – № 1. – С. 30–42.

131 Иванов И.Е. Оценка влияния различных факторов на значения

сопротивлений и проводимостей высоковольтной воздушной линии электропередачи // Вестник ИГЭУ. – 2017. – № 3. – С. 30–39.

132 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Исследование возможностей программного комплекса ATPDraw для моделирования воздушных линий электропередачи в целях релейной защиты // 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.

133 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Исследование моделей воздушных линий электропередачи в программном комплексе ATP-EMTP в целях релейной защиты // 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.

134 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Моделирование воздушных линий электропередачи в целях совершенствования функционирования микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики этих линий // Инновационные проекты молодых ученых за 2011 г.: сборник отчетов. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2012. – Т. 1. – С. 154–158.

135 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Определение актуальных параметров воздушных ЛЭП по данным двустороннего замера токов и напряжений // 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.

136 Иванов И.Е. К проблеме определения актуальных параметров высоковольтных воздушных линий электропередачи // Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – № 4. – С. 11–13.

137 Иванов И.Е., Токарев С.Ю., Мурзин А.Ю. Моделирование установившегося режима одноцепных транспонированных и

нетранспонированных линий электропередачи на языке MATLAB // 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.

138 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Разработка алгоритма идентификации актуальных параметров одноцепных нетранспонированных линий электропередачи на основе технологии синхронизированных векторных измерений // 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. 325–329.

139 Иванов И.Е. Моделирование установившегося режима неоднородных воздушных линий электропередачи в программном комплексе MATLAB // 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.

140 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Оценка статистических свойств несистематической ошибки устройств синхронизированных векторных измерений // 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.

141 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Разработка алгоритма идентификации актуальных параметров линий электропередачи, учитывающего ошибки измерений // 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.

142 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Обнаружение и фильтрация импульсных помех в синхронизированных векторных измерениях токов и напряжений // 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.

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

144 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Определение актуальных параметров неоднородной линии электропередачи на основе технологии синхронизированных векторных измерений // 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.

145 Новиков В.А., Виноградова Д.С., Иванов И.Е. Определение параметров трёхфазных двухцепных линий электропередачи на базе синхронизированных векторных измерений // 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.

146 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Особенности практической реализации алгоритма определения параметров воздушных линий электропередачи на

основе синхронизированных векторных измерений // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения): материалы Международной научно-технической конференции. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2017. – Т. 1. – С. 369–373.

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

148 Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Обобщенная методология определения параметров нетранспонированной линии электропередачи с использованием векторных измерений // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Модели ВЛЭП, используемые для выполнения вычислительных экспериментов

На рисунке А.1 изображена конфигурация двухцепной ВЛЭП напряжением 500 кВ, базирующаяся на параметрах реальной двухцепной линии, расположенной на территории Российской Федерации и образованной двумя ВЛЭП, отходящими от шин Загорской ГАЭС: «Костромская ГРЭС – Загорская ГАЭС» и «Костромская ГРЭС – Трубино». Расположение проводников в горизонтальной плоскости (как и высота их подвеса на опоре) основано на характеристиках преобладающего типа опор для данной ВЛЭП. В технической документации по ВЛЭП перечислены и несколько других типов опор, однако их совокупное количество значительно меньше по сравнению с теми, которые схематически изображены на рисунке А.1. Длина гирлянды изоляторов находится в диапазоне от 3,2 до 5,7 м [59].

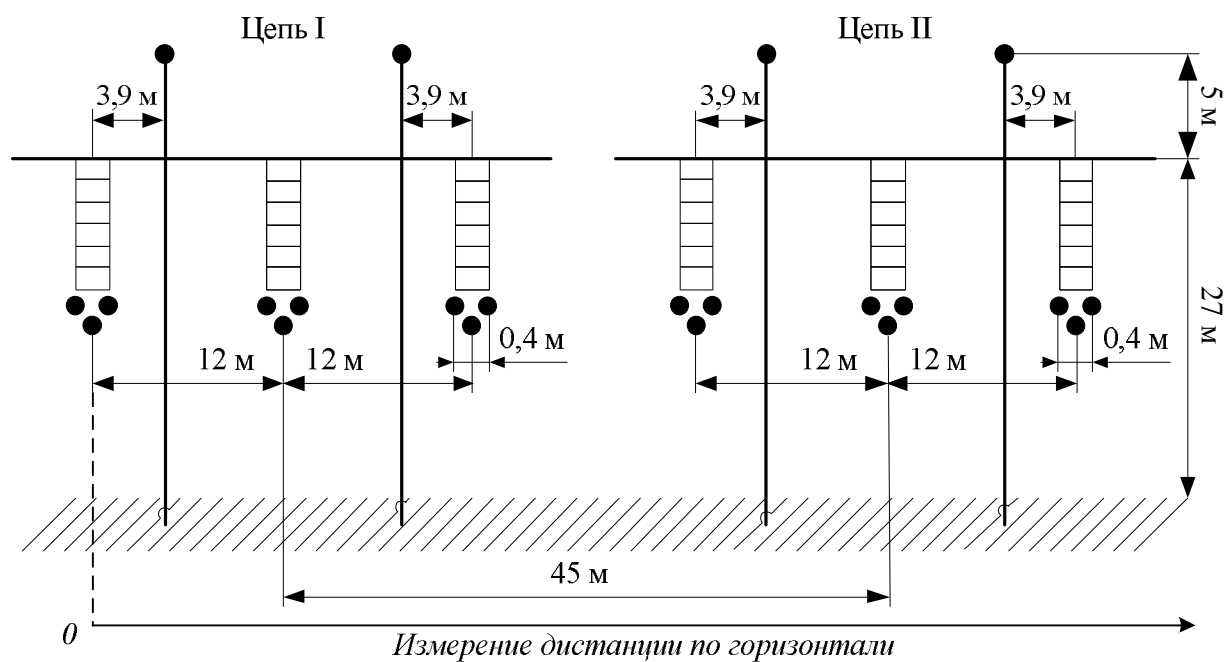


Рисунок А.1 – Конфигурация российской ВЛЭП напряжением 500 кВ,
используемая для выполнения вычислительных экспериментов

В таблицу А.1 сведены все геометрические характеристики и физические свойства системы проводников ВЛЭП, необходимые для вычисления матриц параметров ВЛЭП по выражениям, изложенным в главе 1.

Таблица А.1 – Значения параметров российской ВЛЭП напряжением 500 кВ, необходимых для вычисления элементов матриц сопротивлений и проводимостей

Параметр	Значение	СИ
Горизонтальное расположение фазных проводников (см. рисунок А.1)	[0, 12, 24, 45, 57, 69]	м
Горизонтальное расположение грозозащитных тросов (см. рисунок А.1)	[3,9, 20,1, 48,9, 65,1]	м
Вертикальное расположение фазных проводников*	[16, 16, 16, 16, 16, 16]	м
Вертикальное расположение грозозащитных тросов*	[29, 29, 29, 29]	м
Внутренний радиус фазного проводника**	$0,46 \cdot 10^{-2}$	м
Внешний радиус фазного проводника**	$1,375 \cdot 10^{-2}$	м
Внутренний радиус грозозащитного троса**	$0,55 \cdot 10^{-2}$	м
Внешний радиус грозозащитного троса**	$0,77 \cdot 10^{-2}$	м
Относительная магнитная проницаемость фазных проводников и грозозащитных тросов	1	о.е.
Удельное сопротивление постоянному току материала фазных проводников (при 20° С)***	$3,8664/10^8$	Ом·м
Удельное сопротивление постоянному току материала грозозащитных тросов (при 20° С)***	$3,9047/10^8$	Ом·м
Удельная проводимость грунта	0,01	См/м
Относительная магнитная проницаемость грунта	1	о.е.
Относительная диэлектрическая проницаемость грунта	10	о.е.
Частота	50	Гц
Количество проводников в расщепленной фазе	3	–
Радиус расщепления	$23,094 \cdot 10^{-2}$	м
<i>Дополнительная информация</i>		
Грозозащитные тросы непрерывно заземлены (т.е. они учитываются при вычислении элементов обеих матриц – [Z] и [Y])		

ПРИМЕЧАНИЯ. * Средние высоты подвеса проводов по трассе ВЛЭП ниже по сравнению с соответствующими высотами подвеса на опоре (см. рисунок А.1) из-за наличия стрелы провеса.

** Марка фазного провода – «АС-400/51», а марка грозозащитного троса – «АСУС-70/72».

*** Удельные сопротивления материала в Ом·м были рассчитаны на основе данных о радиусах проводов, а также их погонном активном сопротивлении, равном 0,0733 Ом/км для фазных проводников и 0,428 Ом/км для грозозащитных тросов.

На рисунке А.2 приведены скриншоты из программы ATPDraw, на которых изображена модель ВЛЭП и отражены все ее характеристики,

соответствующие представленным в таблице А.1.

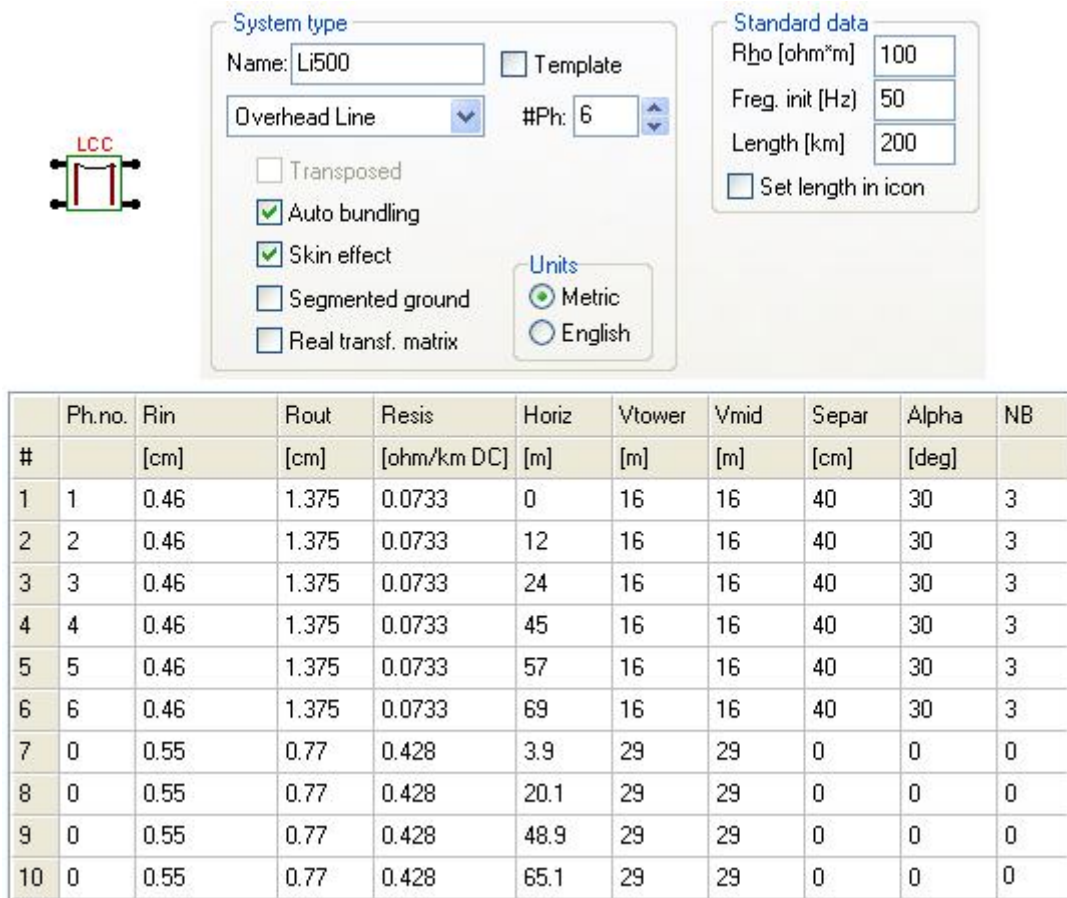


Рисунок А.2 – Конфигурация российской ВЛЭП 500 кВ, заданная в ATPDraw

На рисунке А.3 изображена конфигурация одноцепной ВЛЭП напряжением 345 кВ, расположенной на территории США.

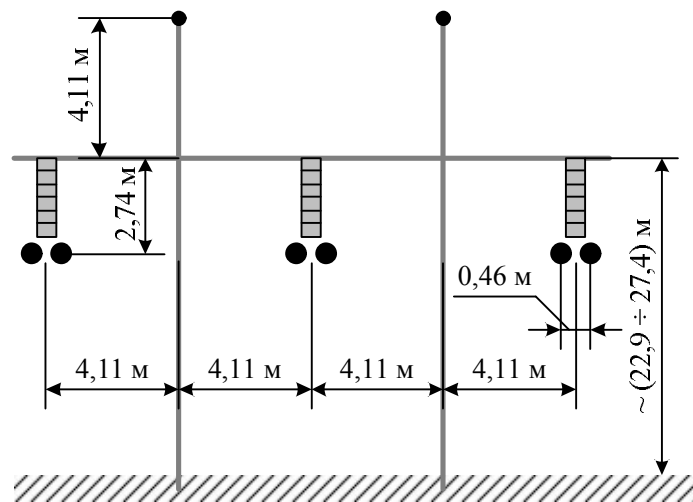


Рисунок А.3 – Конфигурация американской ВЛЭП напряжением 345 кВ, используемая для выполнения вычислительных экспериментов

В таблице А.2 отражены все геометрические характеристики и физические свойства системы проводников ВЛЭП, необходимые для вычисления сопротивлений и проводимостей линии по выражениям, приведенным в главе 1.

Таблица А.2 – Значения параметров американской ВЛЭП напряжением 345 кВ, необходимых для вычисления элементов матриц сопротивлений и проводимостей

Параметр	Значение	СИ
Горизонтальное расположение фазных проводников (см. рисунок А.3)	[-8,2296, 0, 8,2296]	м
Горизонтальное расположение грозозащитных тросов (см. рисунок А.3)	[-4,1148, 4,1148]	м
Вертикальное расположение фазных проводников*	[15, 15, 15]	м
Вертикальное расположение грозозащитных тросов*	[25, 25]	м
Внутренний радиус фазного проводника**	$0,5067 \cdot 10^{-2}$	м
Внешний радиус фазного проводника**	$1,5189 \cdot 10^{-2}$	м
Внутренний радиус грозозащитного троса**	0	м
Внешний радиус грозозащитного троса**	$0,4602 \cdot 10^{-2}$	м
Относительная магнитная проницаемость фазных проводников и грозозащитных тросов	1	о.е.
Удельное сопротивление постоянному току материала фазных проводников (при 20° С)***	$3,7828/10^8$	Ом·м
Удельное сопротивление постоянному току материала грозозащитных тросов (при 20° С)***	$2,2445/10^7$	Ом·м
Удельная проводимость грунта	0,01	См/м
Относительная магнитная проницаемость грунта	1	о.е.
Относительная диэлектрическая проницаемость грунта	10	о.е.
Частота	60	Гц
Количество проводников в расщепленной фазе	2	–
Радиус расщепления	$22,86 \cdot 10^{-2}$	м
<i>Дополнительная информация</i>		
Грозозащитные тросы непрерывно заземлены (т.е. они учитываются при вычислении элементов обеих матриц – [Z] и [Y])		

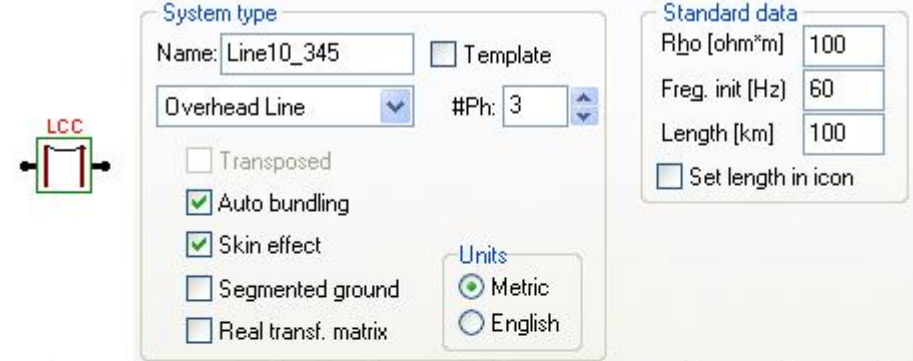
ПРИМЕЧАНИЯ. * Средние высоты подвеса проводов по трассе ВЛЭП ниже по сравнению с соответствующими высотами подвеса на опоре (см. рисунок А.3) из-за наличия стрелы провеса.

** Марка фазного провода – «ACSR 54/7 Cardinal» (сталеалюминиевый провод), а марка грозозащитного троса – «3/8'' EHS» (стальной провод повышенной прочности).

*** Удельные сопротивления материала в Ом·м были рассчитаны на основе данных о радиусах проводов, а также их погонном активном сопротивлении, равном 0,0587 Ом/км для фазных проводников и приблизительно равном 3,37 Ом/км для грозозащитных тросов.

На рисунке А.4 представлена конфигурация моделируемой ВЛЭП,

заданная в программе ATPDraw. Все характеристики ВЛЭП соответствуют приведенным в таблице А.2.



#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.50673	1.51892	0.058727	-8.2296	15	15	45.72	0	2
2	2	0.50673	1.51892	0.058727	0	15	15	45.72	0	2
3	3	0.50673	1.51892	0.058727	8.2296	15	15	45.72	0	2
4	0	0	0.46016	3.374054	-4.1148	25	25	0	0	0
5	0	0	0.46016	3.374054	4.1148	25	25	0	0	0

Рисунок А.4 – Конфигурация американской ВЛЭП напряжением 345 кВ, заданная в программе ATPDraw

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Аналитическое решение системы уравнений для определения
удельных параметров однофазной длинной линии

Система уравнений, описывающих моделируемую однофазную линию, выглядит следующим образом (все обозначения расшифрованы в основном тексте работы):

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{I}_1 \cdot Z \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l); \\ \dot{I}_2 &= -\frac{\dot{U}_1}{Z} \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l) + \dot{I}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l). \end{aligned} \quad (\text{Б.1})$$

Задача заключается в решении системы (Б.1) относительно постоянной распространения γ и характеристического сопротивления Z .

Выразим Z из первого уравнения системы (Б.1) и затем подставим его во второе уравнение:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{\dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{U}_2}{\dot{I}_1 \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l)}; \\ \dot{I}_2 &= -\frac{\dot{U}_1 \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l)}{\dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{U}_2} \cdot \dot{I}_1 \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l) + \dot{I}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l). \end{aligned} \quad (\text{Б.2})$$

Второе уравнение в системе (Б.2) не содержит Z , и его можно разрешить относительно $\operatorname{ch}(\gamma \cdot l)$, для чего необходимо воспользоваться следующим известным тождеством:

$$\operatorname{sh}^2(\gamma \cdot l) = \operatorname{ch}^2(\gamma \cdot l) - 1. \quad (\text{Б.3})$$

Распишем последовательно цепь преобразований (Б.2) с учетом (Б.3):

$$\dot{I}_2 = \frac{-\dot{U}_1 \cdot \operatorname{sh}^2(\gamma \cdot l) \cdot \dot{I}_1 + \dot{I}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) \cdot (\dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{U}_2)}{\dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{U}_2};$$

$$\dot{I}_2 \cdot \dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{I}_2 \cdot \dot{U}_2 = -\dot{I}_1 \cdot \dot{U}_1 \cdot \operatorname{sh}^2(\gamma \cdot l) + \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}^2(\gamma \cdot l) - \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_2 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l);$$

$$\dot{I}_2 \cdot \dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{I}_2 \cdot \dot{U}_2 = \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_1 - \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_2 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l);$$

$$\operatorname{ch}(\gamma \cdot l) \cdot (\dot{I}_2 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_2) = \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_2 \cdot \dot{U}_2;$$

$$\operatorname{ch}(\gamma \cdot l) = \frac{\dot{I}_1 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_2 \cdot \dot{U}_2}{\dot{I}_2 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_2}.$$

В результате преобразований получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) &= \frac{\dot{I}_1 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_2 \cdot \dot{U}_2}{\dot{I}_2 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_2}; \\ Z &= \frac{\dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{U}_2}{\dot{I}_1 \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l)}. \end{aligned} \quad (\text{Б.4})$$

Поскольку для вычисления искомых удельных параметров ВЛЭП с использованием системы (3.3) необходимо получить γ и Z в явном виде, систему (Б.4) можно считать лишь промежуточным результатом.

В справочной математической литературе приводится следующая формула для вычисления гиперболического арккосинуса:

$$\operatorname{Arch} x = \pm \ln \left(x + \sqrt{x^2 - 1} \right). \quad (\text{Б.5})$$

В нашем случае аргумент x является комплексным числом, а под знаком логарифма в выражении (Б.5) производится операция извлечения квадратного корня, поэтому применить (Б.5) напрямую к вычислению произведения $(\gamma \cdot l)$ проблематично. Следовательно, необходимо найти аналитическое решение первого из уравнений системы (Б.4), удовлетворяющее условиям задачи. Перепишем его в следующем виде:

$$\frac{e^{\gamma \cdot l} + e^{-\gamma \cdot l}}{2} = A + j \cdot B, \quad (\text{Б.6})$$

где параметры A и B определяются по данным СВИ напряжений и токов по концам линии:

$$\begin{aligned} A &= \operatorname{Re} \left(\frac{\dot{I}_1 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_2 \cdot \dot{U}_2}{\dot{I}_2 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_2} \right); \\ B &= \operatorname{Im} \left(\frac{\dot{I}_1 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_2 \cdot \dot{U}_2}{\dot{I}_2 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_2} \right). \end{aligned}$$

Учитывая, что $\gamma = \alpha + j \cdot \beta$, применим математические преобразования

к уравнению (Б.6):

$$\frac{e^{\alpha \cdot l} \cdot e^{j \cdot \beta \cdot l} + e^{-\alpha \cdot l} \cdot e^{-j \cdot \beta \cdot l}}{2} = A + j \cdot B;$$

$$\frac{e^{\alpha \cdot l} \cdot [\cos(\beta \cdot l) + j \cdot \sin(\beta \cdot l)] + e^{-\alpha \cdot l} \cdot [\cos(\beta \cdot l) - j \cdot \sin(\beta \cdot l)]}{2} = A + j \cdot B;$$

$$\left(\frac{e^{\alpha \cdot l} + e^{-\alpha \cdot l}}{2} \right) \cdot \cos(\beta \cdot l) + \left(\frac{e^{\alpha \cdot l} - e^{-\alpha \cdot l}}{2} \right) \cdot j \cdot \sin(\beta \cdot l) = A + j \cdot B,$$

в результате чего приходим к системе из двух уравнений с действительными числами:

$$\begin{aligned} \cos(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{ch}(\alpha \cdot l) &= A; \\ \sin(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{sh}(\alpha \cdot l) &= B. \end{aligned} \quad (\text{Б.7})$$

Возведем оба уравнения системы (Б.7) в квадрат:

$$\begin{aligned} \cos^2(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{ch}^2(\alpha \cdot l) &= A^2; \\ \sin^2(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{sh}^2(\alpha \cdot l) &= B^2, \end{aligned}$$

получим из первого уравнения $\sin^2(\beta \cdot l)$, используя известное тригонометрическое тождество, и выполним подстановку во второе уравнение:

$$\begin{aligned} \sin^2(\beta \cdot l) &= 1 - \frac{A^2}{\operatorname{ch}^2(\alpha \cdot l)}; \\ \frac{\operatorname{ch}^2(\alpha \cdot l) - A^2}{\operatorname{ch}^2(\alpha \cdot l)} \cdot \operatorname{sh}^2(\alpha \cdot l) &= B^2. \end{aligned} \quad (\text{Б.8})$$

Второе уравнение системы (Б.8) можно записать как

$$(\operatorname{ch}^2(\alpha \cdot l) - A^2) \cdot \operatorname{th}^2(\alpha \cdot l) = B^2,$$

или

$$\left(\frac{e^{2 \cdot \alpha \cdot l} + e^{-2 \cdot \alpha \cdot l} + 2}{4} - A^2 \right) \cdot \frac{e^{2 \cdot \alpha \cdot l} + e^{-2 \cdot \alpha \cdot l} - 2}{e^{2 \cdot \alpha \cdot l} + e^{-2 \cdot \alpha \cdot l} + 2} = B^2.$$

Введем обозначение

$$t = \frac{e^{2 \cdot \alpha \cdot l} + e^{-2 \cdot \alpha \cdot l}}{2} = \operatorname{ch}(2 \cdot \alpha \cdot l)$$

и продолжим преобразования:

$$\left(\frac{2 \cdot t + 2}{4} - A^2 \right) \cdot \frac{2 \cdot t - 2}{2 \cdot t + 2} = B^2;$$

$$8 \cdot t \cdot B^2 + 8 \cdot B^2 = 4 \cdot t^2 + 4 \cdot t - 8 \cdot A^2 \cdot t - 4 \cdot t - 4 + 8 \cdot A^2;$$

$$t^2 - 2 \cdot (A^2 + B^2) \cdot t + 2 \cdot (A^2 - B^2) - 1 = 0. \quad (\text{Б.9})$$

Корни полученного квадратного уравнения (Б.9) вычисляются следующим образом:

$$t_{1,2} = A^2 + B^2 \pm \sqrt{A^4 + B^4 + 2 \cdot A^2 \cdot B^2 - 2 \cdot A^2 + 2 \cdot B^2 + 1}.$$

Обозначив подкоренное выражение D_1 и выделив в этом многочлене полный квадрат, получаем

$$D_1 = (A^2 - 1)^2 + B^4 + 2 \cdot A^2 \cdot B^2 + 2 \cdot B^2 \geq 0. \quad (\text{Б.10})$$

Неотрицательность выражения для D_1 в (Б.10) свидетельствует о том, что уравнение (Б.9) всегда имеет действительные корни. Для того чтобы определить расположение этих корней на оси действительных чисел, проведем исследование функции, определяемой выражением в левой части уравнения (Б.9). График данной функции является параболой, две симметричные ветви которой направлены вверх, в сторону увеличения ординаты (рисунок Б.1). Поскольку полиномиальная функция в (Б.10) всюду неотрицательна, парабола пересекает ось абсцисс как минимум в одной точке (в этом предельном случае корни уравнения (Б.9) t_1 и t_2 будут равными).

Применив аппарат теории пределов к исследуемой функции, получим следующие результаты:

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} \left[t^2 - 2 \cdot (A^2 + B^2) \cdot t + 2 \cdot (A^2 - B^2) - 1 \right] = \infty;$$

$$\lim_{t \rightarrow -1} \left[t^2 - 2 \cdot (A^2 + B^2) \cdot t + 2 \cdot (A^2 - B^2) - 1 \right] = 4 \cdot A^2; \quad (\text{Б.11})$$

$$\lim_{t \rightarrow 1} [t^2 - 2 \cdot (A^2 + B^2) \cdot t + 2 \cdot (A^2 - B^2) - 1] = -4 \cdot B^2; \quad (\text{Б.12})$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [t^2 - 2 \cdot (A^2 + B^2) \cdot t + 2 \cdot (A^2 - B^2) - 1] = \infty. \quad (\text{Б.13})$$

Из (Б.11) и (Б.12) очевидно, что на отрезке $[-1, 1]$ происходит смена знака функции, поэтому ее график должен пересекать ось абсцисс. Следовательно, на данном отрезке всегда находится один из корней уравнения (Б.9). Из (Б.12) и (Б.13) также следует, что второй корень всегда располагается на полуинтервале $[1, \infty)$. Итак, уравнение (Б.9) имеет следующие решения:

$$\begin{aligned} t_1 &= A^2 + B^2 - \sqrt{A^4 + B^4 + 2 \cdot A^2 \cdot B^2 - 2 \cdot A^2 + 2 \cdot B^2 + 1}, & t_1 &\in [-1, 1]; \\ t_2 &= A^2 + B^2 + \sqrt{A^4 + B^4 + 2 \cdot A^2 \cdot B^2 - 2 \cdot A^2 + 2 \cdot B^2 + 1}, & t_2 &\in [1, \infty). \end{aligned} \quad (\text{Б.14})$$

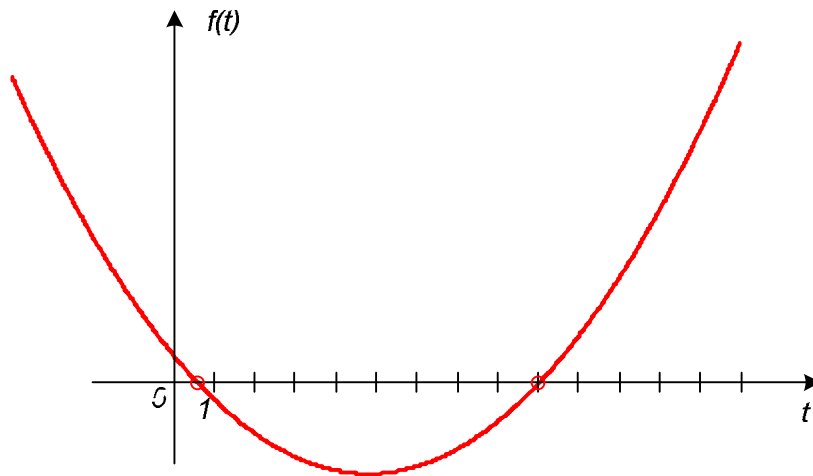


Рисунок Б.1 – Поясняющая иллюстрация к определению области расположения корней квадратного уравнения (Б.9)

Решим теперь уравнение

$$t = \frac{e^{2 \cdot \alpha \cdot l} + e^{-2 \cdot \alpha \cdot l}}{2} = \text{ch}(2 \cdot \alpha \cdot l)$$

относительно α . Для этого преобразуем его к виду

$$t = \frac{e^{2 \cdot \alpha \cdot l} + \frac{1}{e^{2 \cdot \alpha \cdot l}}}{2},$$

произведем замену

$$s = e^{2 \cdot \alpha \cdot l} \tag{Б.15}$$

и получим следующее квадратное уравнение:

$$s^2 - 2 \cdot t \cdot s + 1 = 0. \tag{Б.16}$$

Корни уравнения (Б.16) рассчитываются как

$$\begin{aligned} s_1 &= t - \sqrt{t^2 - 1}; \\ s_2 &= t + \sqrt{t^2 - 1}. \end{aligned} \tag{Б.17}$$

Из (Б.15) следует, что s – положительное действительное число, поэтому, на основании выражений (Б.17), параметр t должен соответствовать следующему требованию:

$$|t| \geq 1,$$

из чего получаем, что только корень t_2 в выражениях (Б.14) удовлетворяет условиям задачи. Следует отметить, что в частном случае $t = 1$ оба корня t_1 и t_2 должны быть одинаковыми, т.е. $t_1 = t_2 = 1$, что легко доказуемо. Кроме того, в этом случае, во-первых, $\alpha = 0$ согласно (Б.15) и (Б.17), а во-вторых, $B = 0$ в соответствии, например, с (Б.12). И то, и другое является крайне маловероятным с практической точки зрения. Итак, в особом случае (являющемся чисто теоретическим), соответствующем $\alpha = 0$, имеем $t_1 = t_2 = 1$ и $s_1 = s_2 = 1$, т.е. все корни, рассчитанные по выражениям (Б.14) и (Б.17), удовлетворяют условиям задачи. Во всех остальных случаях из двух корней, определяемых (Б.14), только t_2 является «истинным». Теперь необходимо устранить «лишний» корень s_1 или s_2 .

Задавшись $\alpha > 0$, на основании (Б.15) получаем $s > 1$. Из двух корней s_1 и s_2 только второй – s_2 – удовлетворяет данному критерию. Это следует из того, что функция $f(t) = t - \sqrt{t^2 - 1}$ достигает максимального значения,

равного единице, при $t = 1$, и монотонно убывает. Задавшись $\alpha < 0$, из (Б.15) получаем $s < 1$. Этому критерию удовлетворяет только корень s_1 , поскольку другой корень соответствует монотонно возрастающей функции $f(t) = t + \sqrt{t^2 - 1}$, достигающей минимального значения, равного единице, при $t = 1$. Таким образом, оба корня s_1 и s_2 формально удовлетворяют условиям задачи.

Выразим теперь искомое значение α из выражения (Б.15) с учетом (Б.14) и (Б.17):

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \ln \left(t \pm \sqrt{t^2 - 1} \right), \quad (\text{Б.18})$$

где $t = A^2 + B^2 + \sqrt{A^4 + B^4 + 2 \cdot A^2 \cdot B^2 - 2 \cdot A^2 + 2 \cdot B^2 + 1}$.

Получаем, что одному значению t , вычисляемому на основе СВИ токов и напряжений по концам линии, соответствуют два значения α . Принимая во внимание, что $t = \text{ch}(2 \cdot \alpha \cdot l)$, можно заключить, что это является следствием четности функции гиперболического косинуса. Следовательно, оба значения α , рассчитанные по (Б.18), должны быть равны по модулю и противоположны по знаку. Это подтверждается графическими зависимостями, представленными на рисунке Б.2, где функции $f_1(t)$ и $f_2(t)$ соответствуют следующим выражениям:

$$f_1(t) = \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \ln \left(t + \sqrt{t^2 - 1} \right);$$

$$f_2(t) = \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \ln \left(t - \sqrt{t^2 - 1} \right).$$

Очевидно, решение относительно α можно также записать в виде

$$\alpha = \pm \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \ln \left(t + \sqrt{t^2 - 1} \right). \quad (\text{Б.19})$$

Выражение (Б.19) аналогично формуле (Б.5) для вычисления гиперболического арккосинуса действительного числа, представленной в справочной литературе.

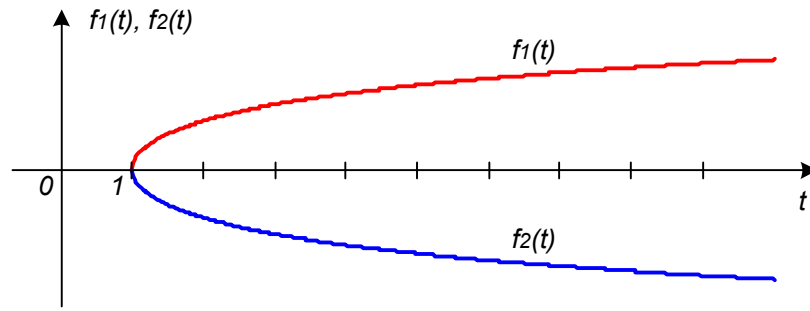


Рисунок Б.2 – Иллюстрация симметричности двух решений по (Б.18)

При известном значении α из второго уравнения системы (Б.7) получим

$$\beta = \frac{1}{l} \cdot \arcsin\left(\frac{B}{\text{sh}(\alpha \cdot l)}\right). \quad (\text{Б.20})$$

В силу свойств математических функций, входящих в выражение (Б.20), при изменении знака α знак β также изменяется на противоположный,

$$\beta(-\alpha) = -\frac{1}{l} \cdot \arcsin\left(\frac{B}{\text{sh}(\alpha \cdot l)}\right) = -\beta(\alpha),$$

а следовательно, изменится и знак постоянной распространения $\gamma = \alpha + j \cdot \beta$. Характеристическое сопротивление Z , определяемое вторым уравнением системы (Б.4), при этом получится следующим:

$$Z(-\gamma) = \frac{\dot{U}_1 \cdot \text{ch}(-\gamma \cdot l) - \dot{U}_2}{\dot{I}_1 \cdot \text{sh}(-\gamma \cdot l)} = -Z(\gamma).$$

Таким образом, знаки γ и Z одновременно изменяются на противоположные, поэтому на вычисление искомых параметров ВЛЭП \underline{z} и \underline{y} по (3.3) принятый знак α в (Б.19) никак не влияет. Следует, тем не менее, отметить, что постоянная распространения однофазной линии всегда имеет положительные вещественную и мнимую части, т.е. $\alpha > 0$ и $\beta > 0$. Доказательство этого факта можно найти в вузовском учебнике по теоретическим основам электротехники.

Итак, получив комплект СВИ напряжений и токов по концам

однофазной воздушной линии (рисунок 3.1), можно определить актуальные параметры этой линии по нижеследующим выражениям:

$$A = \operatorname{Re} \left(\frac{\dot{I}_1 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_2 \cdot \dot{U}_2}{\dot{I}_2 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_2} \right);$$

$$B = \operatorname{Im} \left(\frac{\dot{I}_1 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_2 \cdot \dot{U}_2}{\dot{I}_2 \cdot \dot{U}_1 + \dot{I}_1 \cdot \dot{U}_2} \right);$$

$$t = A^2 + B^2 + \sqrt{A^4 + B^4 + 2 \cdot A^2 \cdot B^2 - 2 \cdot A^2 + 2 \cdot B^2 + 1};$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \ln \left(t + \sqrt{t^2 - 1} \right);$$

$$\beta = \frac{1}{l} \cdot \arcsin \left(\frac{B}{\operatorname{sh}(\alpha \cdot l)} \right);$$

$$\gamma = \alpha + j \cdot \beta;$$

$$Z = \frac{\dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{U}_2}{\dot{I}_1 \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l)};$$

$$\underline{z} = r + j \cdot \omega \cdot L = \gamma \cdot Z;$$

$$\underline{y} = g + j \cdot \omega \cdot C = \frac{\gamma}{Z}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Пояснения к методике диагонализации дифференциальных уравнений,
описывающих одноцепную трехфазную нетранспонированную ВЛЭП

По определению [99], если существует ненулевой вектор $[\mathbf{X}]$, такой, что

$$[\mathbf{A}][\mathbf{X}] = \lambda[\mathbf{X}] \quad (\text{B.1})$$

для некоторой скалярной величины λ , то λ – *собственное значение матрицы* $[\mathbf{A}]$, которому соответствует *собственный вектор* $[\mathbf{X}]$.

Если $[\mathbf{A}] = [\underline{\mathbf{z}}][\underline{\mathbf{y}}]$, с учетом (3.32) получаем

$$[\mathbf{T}_u][\mathbf{\Lambda}] = [\mathbf{A}][\mathbf{T}_u], \quad (\text{B.2})$$

или

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \lambda_1 \cdot T_{u11} & \lambda_2 \cdot T_{u12} & \lambda_3 \cdot T_{u13} \\ \lambda_1 \cdot T_{u21} & \lambda_2 \cdot T_{u22} & \lambda_3 \cdot T_{u23} \\ \lambda_1 \cdot T_{u31} & \lambda_2 \cdot T_{u32} & \lambda_3 \cdot T_{u33} \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{u11} & T_{u12} & T_{u13} \\ T_{u21} & T_{u22} & T_{u23} \\ T_{u31} & T_{u32} & T_{u33} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

что также можно записать как

$$\begin{aligned} & \left[\lambda_1 [\mathbf{T}_{u1}] \quad \lambda_2 [\mathbf{T}_{u2}] \quad \lambda_3 [\mathbf{T}_{u3}] \right] = \\ & = \left[[\mathbf{A}][\mathbf{T}_{u1}] \quad [\mathbf{A}][\mathbf{T}_{u2}] \quad [\mathbf{A}][\mathbf{T}_{u3}] \right], \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

где вектора $[\mathbf{T}_{u1}]$, $[\mathbf{T}_{u2}]$ и $[\mathbf{T}_{u3}]$ представляют собой столбцы матрицы преобразования $[\mathbf{T}_u]$.

Сравнивая выражения (B.1) и (B.4), становится очевидным, что элементы матрицы $[\mathbf{\Lambda}]$ являются собственными значениями матрицы $[\mathbf{A}]$, а

столбцы матрицы $[\mathbf{T}_u]$ – соответствующими этим значениям собственными векторами. Следует отметить, что, в отличие от собственных значений, элементы собственных векторов не могут быть определены однозначно, и каждому собственному значению λ соответствует бесконечное число собственных векторов $k[\mathbf{X}]$, где k – произвольно выбранный ненулевой скаляр. Этим объясняется тот факт, что матрицы фазо-модальных преобразований, определенные средствами ATP и MATLAB, имеют, как правило, разный вид.

Итак, столбцы матрицы преобразования $[\mathbf{T}_u]$ суть собственные вектора матрицы $[\mathbf{A}] = [\underline{\mathbf{z}}][\underline{\mathbf{y}}]$. Аналогичным образом, имея в виду уравнение (3.33), можно прийти к выводу, что столбцы матрицы фазо-модальных преобразований для токов $[\mathbf{T}_i]$ должны быть собственными векторами матрицы $[\mathbf{B}] = [\underline{\mathbf{y}}][\underline{\mathbf{z}}]$. Покажем, что матрицу $[\mathbf{T}_u]$ можно использовать для расчета элементов матрицы $[\mathbf{T}_i]$; иначе говоря, операции поиска собственных значений и векторов достаточно применить только к одной из двух матриц $[\mathbf{T}_u]$ либо $[\mathbf{T}_i]$.

Произведя транспонирование диагональной матрицы $[\mathbf{\Lambda}]$, заданной выражением (3.32), получим

$$[\mathbf{\Lambda}]^T = [\mathbf{T}_u]^T ([\underline{\mathbf{z}}][\underline{\mathbf{y}}])^T [\mathbf{T}_u]^{-T} = [\mathbf{\Lambda}]. \quad (\text{B.5})$$

Для ВЛЭП произвольной конфигурации в силу симметричности матриц $[\underline{\mathbf{z}}]$ и $[\underline{\mathbf{y}}]$ всегда справедливо следующее соотношение:

$$([\underline{\mathbf{z}}][\underline{\mathbf{y}}])^T = [\underline{\mathbf{y}}][\underline{\mathbf{z}}]. \quad (\text{B.6})$$

В силу тождества (B.6) собственные значения матриц $[\mathbf{A}] = [\underline{\mathbf{z}}][\underline{\mathbf{y}}]$ и $[\mathbf{B}] = [\underline{\mathbf{y}}][\underline{\mathbf{z}}]$ одинаковы. Это следует из того, что детерминант, являющийся левой частью характеристического уравнения, записываемого для

определения собственных значений матрицы $[\mathbf{A}]$, в виде

$$\|[\mathbf{A}] - \lambda[\mathbf{I}]\| = 0, \quad (\text{B.7})$$

где $[\mathbf{I}]$ – единичная матрица, в силу известных свойств матричной алгебры не изменяется при транспонировании матрицы $[\mathbf{A}]$.

С учетом этого диагонализация матричного произведения $[\mathbf{T}_i]^{-1}[\underline{\mathbf{y}}][\underline{\mathbf{z}}][\mathbf{T}_i]$ в (3.33) неизбежно обеспечит ту же матрицу собственных значений $[\mathbf{\Lambda}]$, что и в (3.32):

$$[\mathbf{\Lambda}] = [\mathbf{T}_i]^{-1}[\underline{\mathbf{y}}][\underline{\mathbf{z}}][\mathbf{T}_i] \cong \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.8})$$

Сравнивая теперь (B.5) и (B.8), с учетом (B.6) можно записать:

$$[\mathbf{T}_i] = [\mathbf{T}_u]^{-T}. \quad (\text{B.9})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Базовый код на языке MATLAB, используемый в ходе оптимизации для идентификации параметров нетранспонированной ВЛЭП

Ниже представлен текст функции на языке MATLAB, используемой алгоритмом оптимизации для определения параметров нетранспонированной ВЛЭП без учета погрешностей измерений. Этапы вычислений приблизительно соответствуют описанию и расчетным выражениям, отраженным в п. 3.3.2 диссертации.

```

-----

% функция для отыскания параметров нетранспонированной линии в общем
% виде (т.е. без "привязки" к конкретной конфигурации в плане
% физико-геометрических свойств проводников линии).
%
% Неизвестными являются элементы матриц сопротивлений и проводимостей, а
% также длина ВЛЭП.
%
% Активные составляющие матрицы проводимостей ("G") не учитываются.

%% ГЛАВНАЯ ФУНКЦИЯ: -----
function Obj = UNTRANSDPOSED_LINE_GENERAL_CASE ...
( x, UbA, UbB, UbC, UeA, UeB, UeC, IbA, IbB, IbC, IeA, IeB, IeC, ...
lb_true, ub_true, lb, ub )
% -----
% ---> ВАЖНОЕ ПРИМЕЧАНИЕ. Вспомогательные функции
% ("Rescale_initial_guess" и "SUPERNEW_UNTRANSDPOSED_Create_ZY_from_x"),
% вызываемые в теле главной функции "UNTRANSDPOSED_LINE_GENERAL_CASE",
% декларированы в этом же файле после главной функции.
% -----

%% ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ: -----
%
%
% "x" - вектор из 19-ти неизвестных, относительно которых будет "гадать"
% оптимизатор при итеративном решении задачи.
% Структура вектора:
% x(1) = r_A;      | активные сопротивления
% x(2) = r_B;      | -----
% x(3) = r_C;      | -----
% x(4) = r_AB;     | -----
% x(5) = r_AC;     | -----
% x(6) = r_BC;     | -----

```

```

% x(7) = x_A; | индуктивные сопротивления
% x(8) = x_B; | -----
% x(9) = x_C; | -----
% x(10) = x_AB; | -----
% x(11) = x_AC; | -----
% x(12) = x_BC; | -----
% x(13) = b_A (= y_A, т.к. g_A не учитываем); | ёмкостные проводимости
% x(14) = b_B; | -----
% x(15) = b_C; | -----
% x(16) = b_AB; | -----
% x(17) = b_AC; | -----
% x(18) = b_BC; | -----
% x(19) = len (длина ВЛЭП тоже предполагается неизвестной);
%
%
% "UbA, UbB, UbC, UeA, UeB, UeC, IbA, IbB, IbC, IeA, IeB, IeC" - вектора,
% содержащие СВИ с двух концов ВЛЭП: индекс "b" (от английского
% "beginning") означает начало ВЛЭП, индекс "e" ("end") - конец ВЛЭП;
% -----
% ---> ВАЖНОЕ ПРИМЕЧАНИЕ. Каждый из векторов СВИ "UbA, UbB, UbC, UeA, UeB,
% UeC, IbA, IbB, IbC, IeA, IeB, IeC" должен быть вектор-строкой, а не
% вектор-столбцом.
% -----
%
%
% "lb_true, ub_true" - соответственно нижняя и верхняя границы изменения
% переменных вектора "x" ("истинные" границы для этих переменных, к которым
% вернёмся, воспользовавшись функцией "Rescale_initial_guess");
%
%
% "lb, ub" - соответственно нижняя и верхняя границы изменения переменных
% вектора "x", поставляемые оптимизатору (например, все переменные могут
% изменяться только в диапазоне [0 1] для получения равного
% масштабирования, т.е. lb = zeros(size(x)), ub = ones(size(x))).

%% ВЫХОДНОЙ ПАРАМЕТР: -----
%
%
% "Obj" - вектор "невязок", образующий целевую функцию.

%% ШАГ I: -----

% Небольшое дополнение, если предполагается использование оптимизаторов из
% пакета "ОРТИ Toolbox":
x = x(:);
x = x.';

% Масштабируем элементы вектора "x" и, таким образом, узнаём, каковы их
% "истинные" значения (т.е. в принятых единицах измерения) на текущей
% итерации:
x = Rescale_initial_guess(x, lb_true, ub_true, lb, ub);
% -----
% ---> ВАЖНОЕ ПРИМЕЧАНИЕ. Предполагаем, что дополнительного масштабирования
% не требуется, т.е. если используются относительные единицы, границы
% "lb_true, ub_true" уже это учитывают, а все СВИ "UbA, UbB, UbC, UeA, UeB,
% UeC, IbA, IbB, IbC, IeA, IeB, IeC" поставляются в функцию также в о.е.
% -----

```

```

% Длина ВЛЭП:
len = x(19);

% Формируем матрицы удельных сопротивлений и проводимостей ВЛЭП:
[Z, Y] = SUPERNEW_UNTRANSPOSED_Create_ZY_from_x(x);

%% ШАГ II: -----

% Матрицы преобразования в модальные координаты:
[T_i, ~] = eigs(Y * Z);
[T_v] = ( inv(T_i) ) .';

%% ШАГ III: -----

% Модальные параметры (сопротивления и проводимости в модальных
% координатах, постоянные распространения и волновые сопротивления):
Zmod = diag (T_v \ (Z * T_i));
Ymod = diag (T_i \ (Y * T_v));
gamma = sqrt(Zmod .* Ymod);
Z_s = sqrt(Zmod ./ Ymod);

%% ШАГ IV: -----

% Матрицы, выражающие напряжения и токи в конце ВЛЭП через таковые в начале
% ВЛЭП:
K = T_v * diag( cosh(gamma * len) ) / T_v;
L = -T_v * diag( Z_s .* sinh(gamma * len) ) / T_i;
M = -T_i * diag( sinh(gamma * len) ./ Z_s ) / T_v;
N = T_i * diag( cosh(gamma * len) ) / T_i;
P = [K, L; M, N];

% Рассчитываем напряжения и токи в конце ВЛЭП в фазных координатах:
Right_obj = P * [ Ua; Ub; Uc; Ia; Ib; Ic ];

%% ШАГ V: -----

% Формируем целевую функцию.
%
% Левые части уравнений (фактические измерения) известны. Это поставляемые
% в функцию вектора "UeA, UeB, UeC, IeA, IeB, IeC":
Left_obj = [ UeA; UeB; UeC; IeA; IeB; IeC ];
%

```

```

% Правые части уравнений рассчитаны: это "Right_obj" на шаге IV.
%
% Функция "невязок":
Obj = Left_obj - Right_obj;
%
% Итоговая целевая функция:
Obj = [ real(Obj(:)); imag(Obj(:)) ];

% Если требуется использовать оптимизатор, которому необходима скалярная
% величина (вместо вектора "невязок") в качестве целевой функции:
% Obj = ( norm(Obj) )^2;

end % Конец главной функции -----

%% ЛОКАЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ 1: -----
function x_old = Rescale_initial_guess ...
( x_new, lb_old, ub_old, lb_new, ub_new )

%% ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ: -----
%
%
% "x_new" - вектор, каждый элемент которого должен быть преобразован
% ("отмасштабирован обратно"). Этот вектор - очередное приближение к
% итоговому решению, полученное оптимизатором на конкретной итерации;
%
%
% "lb_old" - вектор, содержащий принятые нижние границы для всех элементов
% искомого вектора "x_old" (выходного параметра данной функции), к которому
% будет преобразован входной вектор "x_new";
%
%
% "ub_old" - вектор, содержащий принятые верхние границы для всех элементов
% искомого вектора "x_old";
%
%
% "lb_new" - вектор, содержащий принятые нижние границы для всех элементов
% входного вектора "x_new" (элементы "x_new" должны находиться между
% "lb_new" и "ub_new");
%
%
% "ub_new" - вектор, содержащий принятые верхние границы для всех элементов
% входного вектора "x_new".

%% ВЫХОДНОЙ ПАРАМЕТР: -----
%
%
% "x_old" - вектор преобразованных ("отмасштабированных обратно") величин.
% В данном контексте это "истинные" значения (т.е. в принятых единицах
% измерения) входных параметров "x" главной функции
% "UNTRANSPOSED_LINE_GENERAL_CASE".

```

```

%% АЛГОРИТМ: -----

% Поскольку преобразование ("масштабирование обратно") - линейное (как и
% "прямое" масштабирование), достаточно двух точек для описания линейной
% функции "y = k * x + b". Этими двумя точками являются нижняя и верхняя
% границы для каждого искомого элемента вектора.

if all(ub_new ~= lb_new)
    % Коэффициент "k":
    k = ( ub_old - lb_old ) ./ ( ub_new - lb_new );
    %
    % Коэффициент "b":
    b = ( lb_old .* ub_new - ub_old .* lb_new ) ./ (ub_new - lb_new );
else
    k = 1;
    b = 0;
end

size_x = size(x_new);
if size_x(1) > 1
    x_old = k .* x_new.' + b;
else
    x_old = k .* x_new + b;
end

end % Конец локальной функции 1 -----

%% ЛОКАЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ 2: -----
function [Z, Y] = SUPERNEW_UNTRANSPOSED_Create_ZY_from_x (x)

% Полагаем, что структура вектора "x" аналогична используемой в главной
% функции "UNTRANSPOSED_LINE_GENERAL_CASE".

% Формируем матрицу удельных сопротивлений ВЛЭП:
Z = diag( x(1:3) + 1i * x(7:9) );
Z([2, 3, 6]) = x(4:6) + 1i * x(10:12);
Z = Z + ( tril(Z, -1) ).';

% Формируем матрицу удельных проводимостей ВЛЭП:
Y = diag(x(13:15));
Y([2, 3, 6]) = x(16:18);
Y = Y + ( tril(Y, -1) ).';
Y = 1i * Y;

end % Конец локальной функции 2 -----

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

Код на языке MATLAB для моделирования установившегося режима ЭЭС

Ниже представлен текст одной из функций на языке MATLAB, разработанных для вычисления векторов напряжений и токов по концам анализируемой ВЛЭП произвольной конфигурации. Схема ЭЭС и сформированная система уравнений подробно описаны в п. 3.4.1 и п. 3.4.2 диссертации.

```

-----
% Вычисление напряжений и токов по концам моделируемой ВЛЭП, представленной
% обобщённой матрицей "P", в установившемся режиме с однофазным КЗ в фазе А
% на смежной ВЛЭП.

% -----
%
% МОДЕЛЬ:
% эквивалентированная ЭЭС с "z1" и "z0", отличными друг от друга - ...
% моделируемая ВЛЭП (условно обозначаемая "L1"), состоящая из скольких
% угодно частей (все они "защиты" в обобщённую матрицу "P") - ...
% часть 1 (условно обозначаемая "L3") смежной ВЛЭП (до КЗ) - ...
% КЗ в фазе А через переходное сопротивление "R" - ...
% часть 2 (условно обозначаемая "L4") смежной ВЛЭП (после КЗ) - ...
% другая эквивалентированная ЭЭС с "z1" и "z0", отличными друг от друга,
% параллельно с активно-индуктивной нагрузкой.
%
% Требуется, главным образом, рассчитать напряжения и токи в начале
% моделируемой ВЛЭП (начало "L1") и в конце моделируемой ВЛЭП (конец "L1"),
% для чего будем решать систему линейных уравнений в матричном виде.
%
% -----

function [ VbA VbB VbC VeA VeB VeC IbA IbB IbC IeA IeB IeC I_fault ] = ...
GET_LINE_PHASORS_GENERAL_FAULT_OUTSIDE ...
( VsA1, VsB1, VsC1, zs1, VsA2, VsB2, VsC2, zs2, z_load, ...
  P_equiv_L1, z3, y3, len3, z4, y4, len4, R )

% ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ: -----
%
% 1) VsA1, VsB1, VsC1 - ЭДС эквивалентированной ЭЭС слева;
%
% 2) zs1 - матрица сопротивлений этой эквивалентированной ЭЭС (3-на-3); при
% этом должны быть ненулевые недиагональные элементы, чтобы были разные

```



```

% "z1" и "z0";
%
% 3)-4) VsA2, VsB2, VsC2, zs2 - аналогично для эквивалентированной ЭЭС
% справа;
%
% 5) z_load - матрица сопротивлений активно-индуктивной нагрузки (3-на-3);
% здесь тоже допустимо иметь ненулевые недиагональные элементы;
%
% 6) P_equiv_L1 - обобщённая матрица "P" нашей моделируемой линии (имеющей
% произвольную конфигурацию); это эквивалентная матрица, позволяющая
% получить все напряжения и токи в конце линии, зная напряжения и токи в её
% начале:
% [ VeA_L1; VeB_L1; VeC_L1; IeA_L1; IeB_L1; IeC_L1 ] = ...
% P_equiv_L1 * [ VbA_L1; VbB_L1; VbC_L1; IbA_L1; IbB_L1; IbC_L1 ];
%
% 7) z3 - матрица сопротивлений ВЛЭП (3-на-3) для части 1 ("L3") смежной
% ВЛЭП (до КЗ);
%
% 8) y3 - матрица проводимостей ВЛЭП (3-на-3) для части 1 ("L3") смежной
% ВЛЭП (до КЗ);
%
% 9) len3 - длина "L3";
%
% 10) z4 - матрица сопротивлений ВЛЭП (3-на-3) для части 2 ("L4") смежной
% ВЛЭП (после КЗ);
%
% 11) y4 - матрица проводимостей ВЛЭП (3-на-3) для части 2 ("L4") смежной
% ВЛЭП (после КЗ);
%
% 12) len4 - длина "L4";
%
% 13) R - переходное сопротивление, через которое устраиваем КЗ в фазе А.

% ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ: -----
%
% VbA VbB VbC - напряжения в начале моделируемой ВЛЭП (начало "L1");
% VeA VeB VeC - напряжения в конце моделируемой ВЛЭП (конец "L1");
% IbA IbB IbC - токи в начале моделируемой ВЛЭП;
% IeA IeB IeC - токи в конце моделируемой ВЛЭП;
% I_fault - полный ток КЗ.

% -----
% I. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ДЕЙСТВИЯ.
% -----

% ЭДС источников:
Vs1 = [VsA1 VsB1 VsC1].';
Vs2 = [VsA2 VsB2 VsC2].';

% Матрицы "K", "L", "M" и "N" для моделируемой ВЛЭП ("L1"):
%
K1 = P_equiv_L1(1:3, 1:3);
L1 = P_equiv_L1(1:3, 4:6);
M1 = P_equiv_L1(4:6, 1:3);
N1 = P_equiv_L1(4:6, 4:6);

% Матрицы "K", "L", "M" и "N" для части 1 ("L3") смежной ВЛЭП (до КЗ):

```

```

%
[T_i_3, ~] = eigs(y3 * z3);
[T_v_3, ~] = eigs(z3 * y3);
%
Zmod_3 = diag (T_v_3 \ (z3 * T_i_3));
Ymod_3 = diag (T_i_3 \ (y3 * T_v_3));
gamma_3 = sqrt(Zmod_3 .* Ymod_3);
Z_s_3 = sqrt(Zmod_3 ./ Ymod_3);
%
K3 = T_v_3 * diag( cosh(gamma_3 * len3) ) / T_v_3;
L3 = -T_v_3 * diag( Z_s_3 .* sinh(gamma_3 * len3) ) / T_i_3;
M3 = -T_i_3 * diag( sinh(gamma_3 * len3) ./ Z_s_3 ) / T_v_3;
N3 = T_i_3 * diag( cosh(gamma_3 * len3) ) / T_i_3;

% Матрицы "K", "L", "M" и "N" для части 2 ("L4") смежной ВЛЭП (после K3):
%
[T_i_4, ~] = eigs(y4 * z4);
[T_v_4, ~] = eigs(z4 * y4);
%
Zmod_4 = diag (T_v_4 \ (z4 * T_i_4));
Ymod_4 = diag (T_i_4 \ (y4 * T_v_4));
gamma_4 = sqrt(Zmod_4 .* Ymod_4);
Z_s_4 = sqrt(Zmod_4 ./ Ymod_4);
%
K4 = T_v_4 * diag( cosh(gamma_4 * len4) ) / T_v_4;
L4 = -T_v_4 * diag( Z_s_4 .* sinh(gamma_4 * len4) ) / T_i_4;
M4 = -T_i_4 * diag( sinh(gamma_4 * len4) ./ Z_s_4 ) / T_v_4;
N4 = T_i_4 * diag( cosh(gamma_4 * len4) ) / T_i_4;

% -----
% II. РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ.
% -----

m1 = eye(3);
m0 = zeros(3);
v0 = zeros(1, 3);
%
A = zeros(34, 34);
%
A(1:3, :) = [ m1, m0, m0, m0, zs1, m0, m0, m0, m0, m0, m0, v0' ];
A(4:6, :) = [ -K1, m1, m0, m0, -L1, m0, m0, m0, m0, m0, m0, v0' ];
A(7:9, :) = [ -M1, m0, m0, m0, -N1, m1, m0, m0, m0, m0, m0, v0' ];
A(10:12, :) = [ m0, -K3, m1, m0, m0, -L3, m0, m0, m0, m0, m0, v0' ];
A(13:15, :) = [ m0, -M3, m0, m0, m0, -N3, m1, m0, m0, m0, m0, v0' ];
A(16:18, :) = [ m0, m0, -K4, m1, m0, m0, m0, m0, m0, m0, -L4, v0' ];
A(19:21, :) = [ m0, m0, -M4, m0, m0, m0, m0, m1, m0, m0, -N4, v0' ];
A(22:24, :) = [ m0, m0, m0, m1, m0, m0, m0, m0, -zs2, m0, m0, v0' ];
A(25:27, :) = [ m0, m0, m0, m1, m0, m0, m0, m0, m0, -z_load, m0, v0' ];
A(28:30, :) = [ m0, m0, m0, m0, m0, m0, m0, m1, -m1, -m1, m0, v0' ];
A(31, :) = [ v0, v0, [1 0 0], v0, v0, v0, v0, v0, v0, v0, v0, -R ];
A(32, :) = [ repmat(v0, 1, 6), [1 0 0], v0, v0, v0, [-1 0 0], -1 ];
A(33, :) = [ repmat(v0, 1, 6), [0 1 0], v0, v0, v0, [0 -1 0], 0 ];
A(34, :) = [ repmat(v0, 1, 6), [0 0 1], v0, v0, v0, [0 0 -1], 0 ];
%
B_vector = [ Vs1; v0'; v0'; v0'; v0'; v0'; v0'; Vs2; v0'; v0'; v0'; 0 ];
%
X_solution = A \ B_vector;

```

```
V1 = X_solution(1:3);  
I1 = X_solution(13:15);  
%  
V3 = X_solution(4:6);  
I3 = X_solution(16:18);
```

```
% -----  
% III. ФОРМИРОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ.  
% -----
```

```
% Напряжения и токи по концам моделируемой ВЛЭП:
```

```
%  
VbA = V1(1);  
VbB = V1(2);  
VbC = V1(3);
```

```
%  
VeA = V3(1);  
VeB = V3(2);  
VeC = V3(3);
```

```
%  
IbA = I1(1);  
IbB = I1(2);  
IbC = I1(3);
```

```
%  
IeA = I3(1);  
IeB = I3(2);  
IeC = I3(3);
```

```
% Полный ток КЗ:
```

```
I_fault = X_solution(end);
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(обязательное)

Иллюстрации к характеру изменения напряжений и токов установившегося режима ЭЭС по данным анализа реальных массивов СВИ

На рисунках Е.1–Е.3 отражены некоторые графические зависимости, позволяющие проанализировать типичный характер изменения напряжений и токов установившегося режима ЭЭС для американской одноцепной ВЛЭП 345 кВ. На рисунках Е.4–Е.7 представлены аналогичные иллюстрации для российской одноцепной линии 500 кВ. В легенде графика «нач» обозначает условное начало линии, а «кон» – ее конец. Перед построением графиков фазовых углов векторов (например, рисунок Е.2) учитывалось, что они претерпевают «скачки» в районе $\pm 180^\circ$, поэтому в MATLAB была написана функция, позволяющая корректно интерпретировать информацию о фазе вектора и, как результат, получить плавный характер кривой на графике.

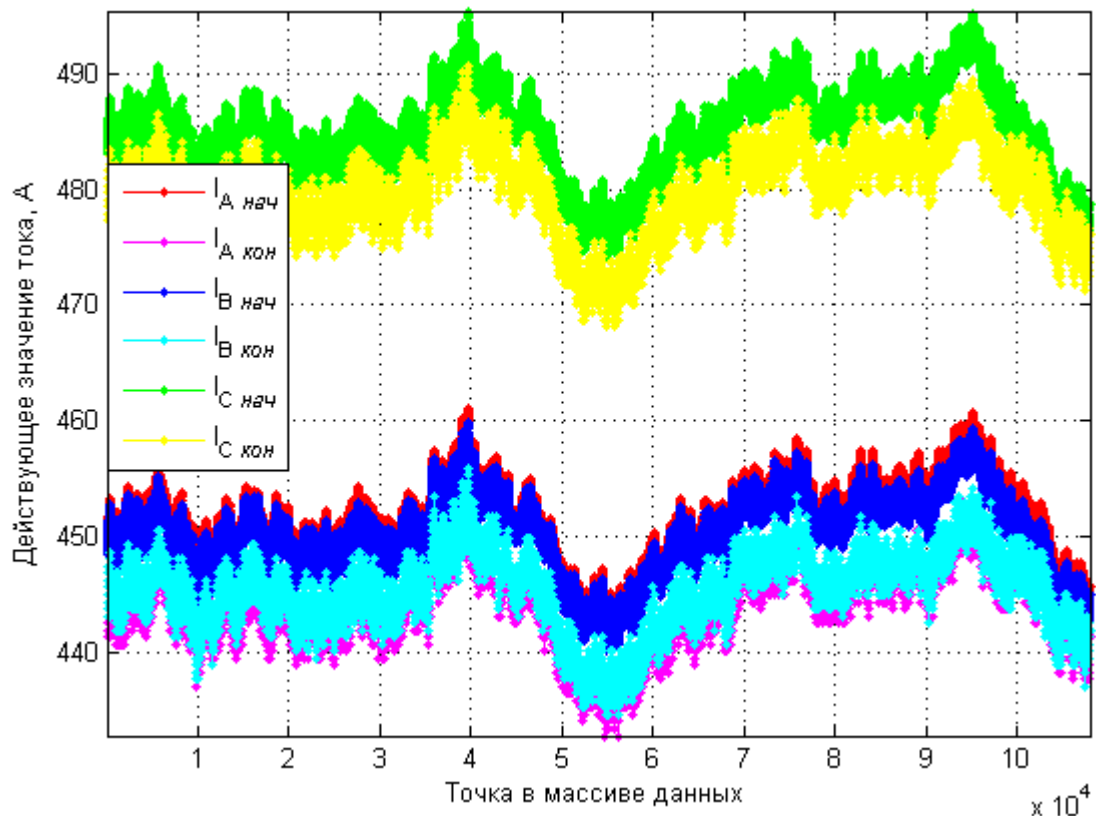


Рисунок Е.1 – Изменения действующих значений токов по концам линии 345 кВ

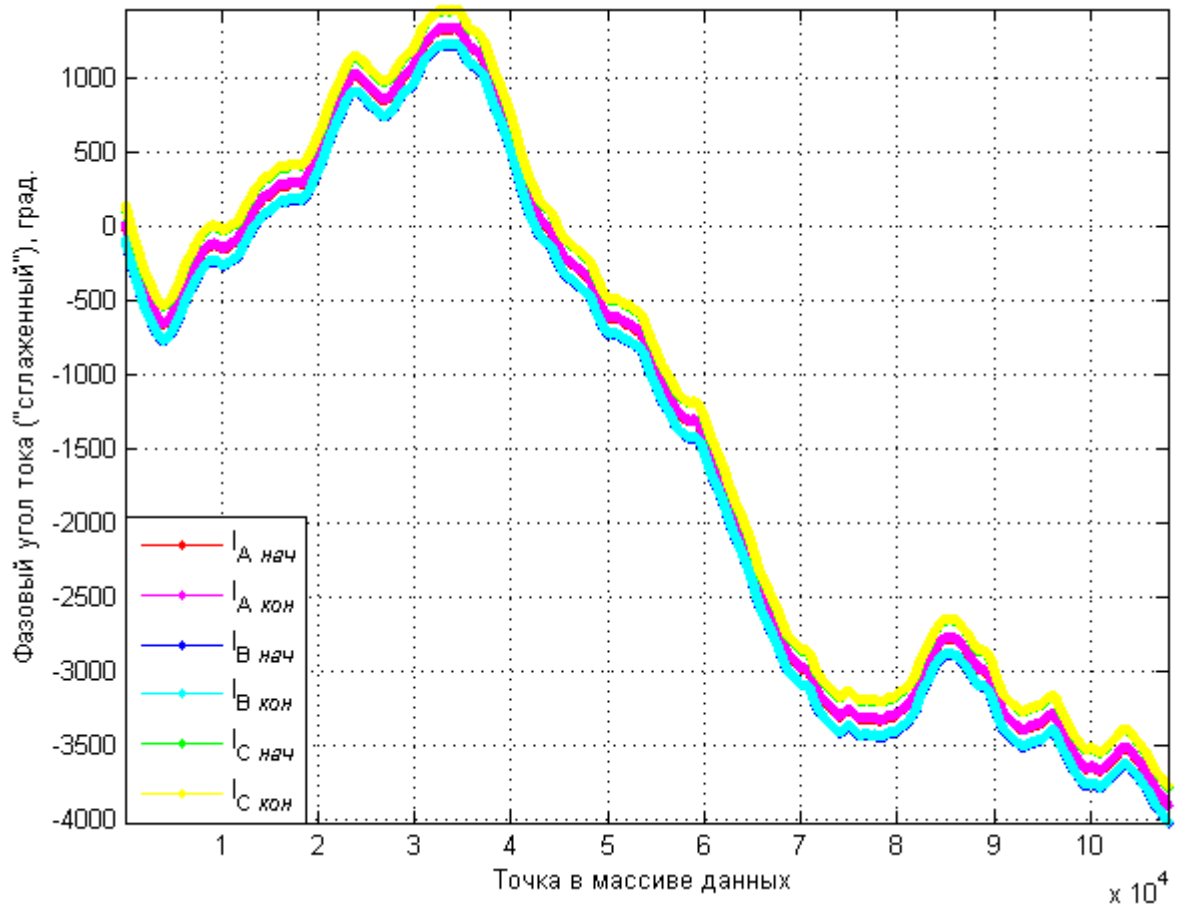


Рисунок Е.2 – Изменения фазовых углов векторов тока по концам линии 345 кВ

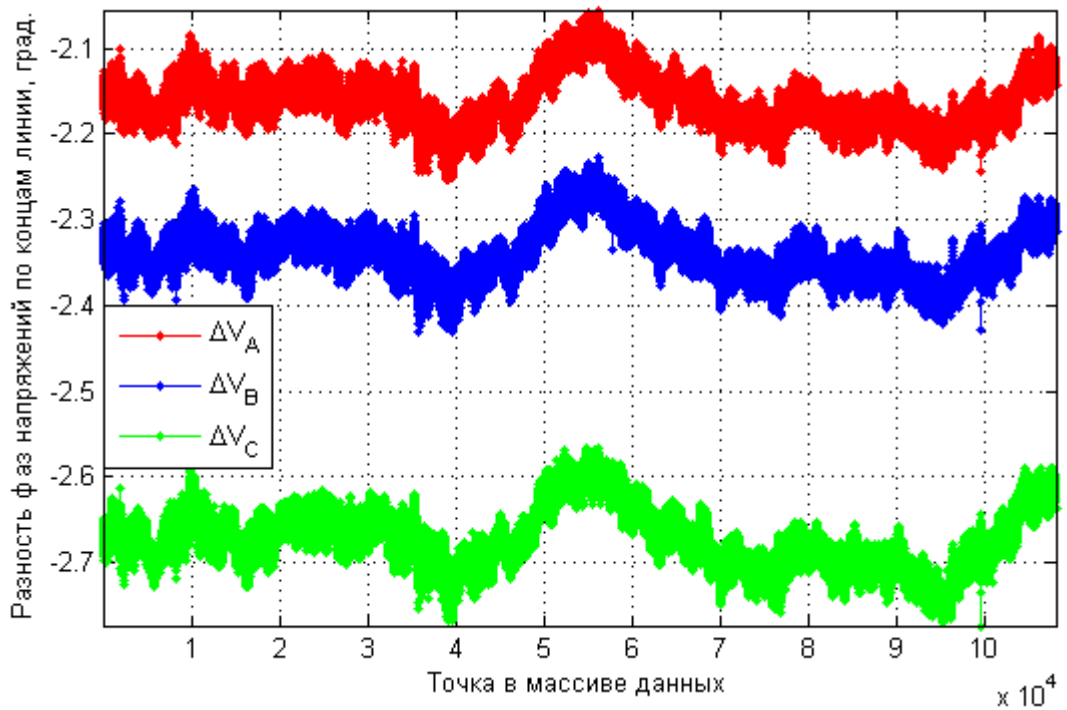


Рисунок Е.3 – Изменения разностей фазовых углов векторов напряжения, измеренных по концам линии 345 кВ

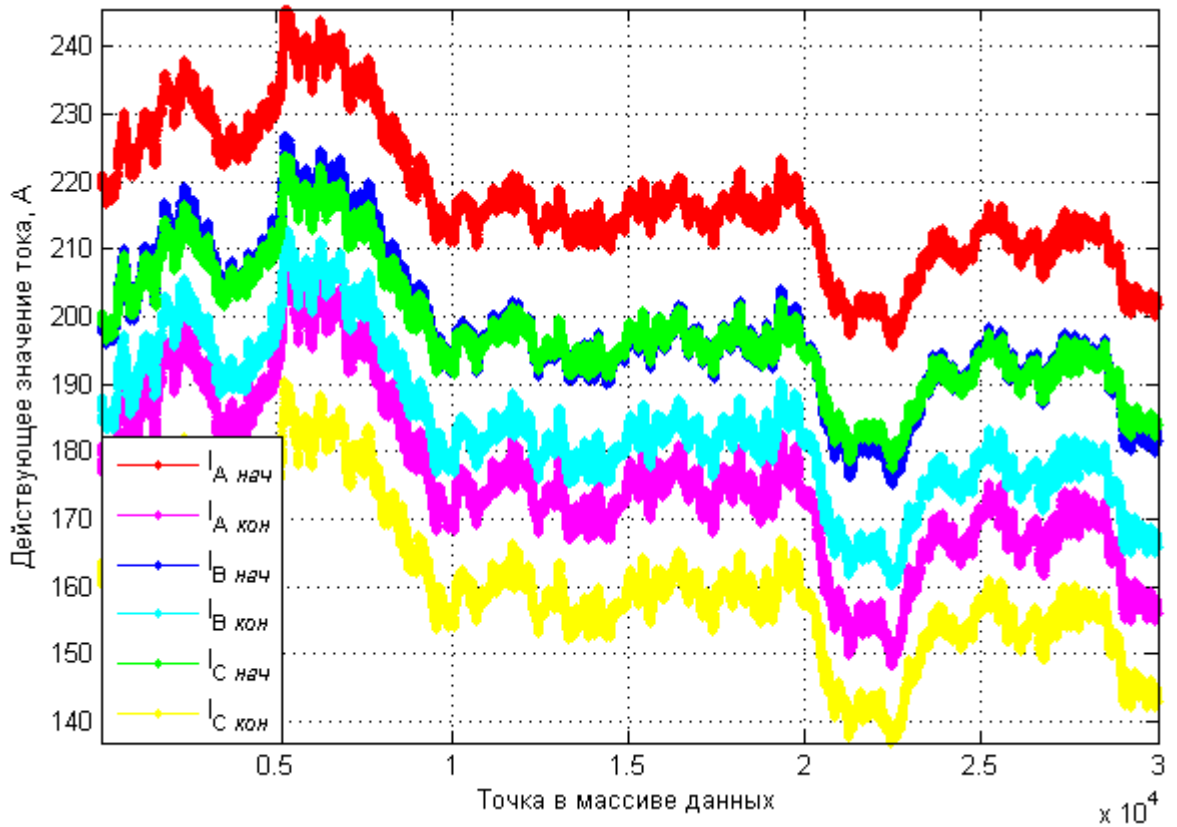


Рисунок Е.4 – Изменения действующих значений токов по концам линии 500 кВ

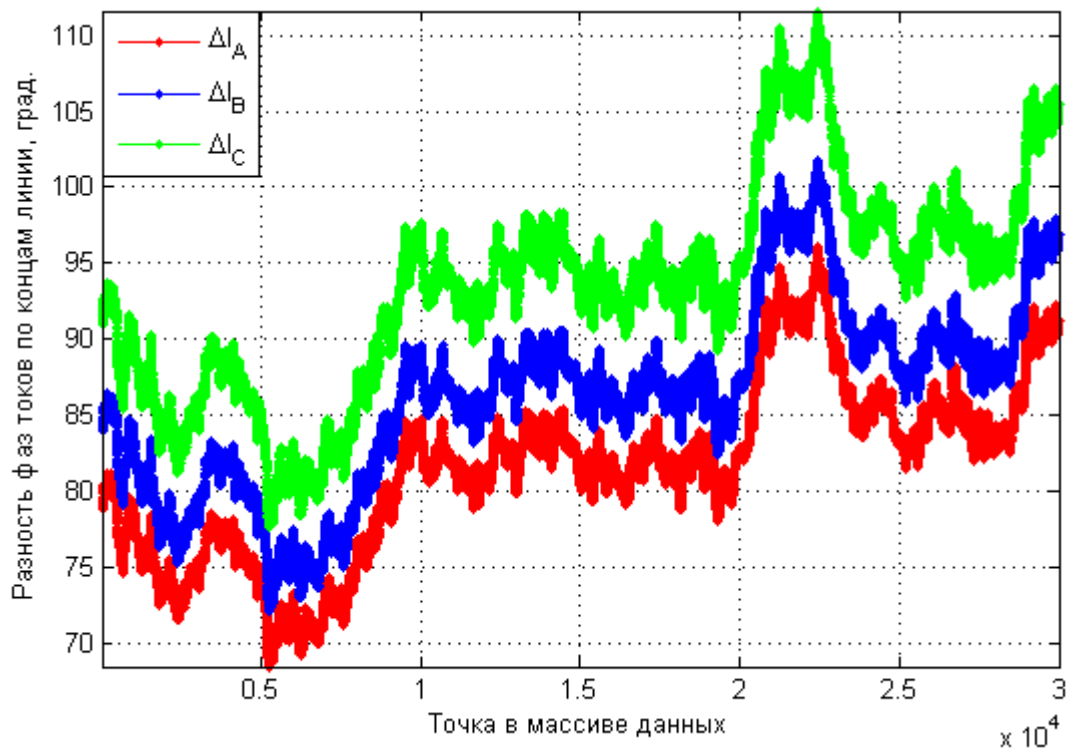


Рисунок Е.5 – Изменения разностей фазовых углов векторов тока, измеренных по концам линии 500 кВ

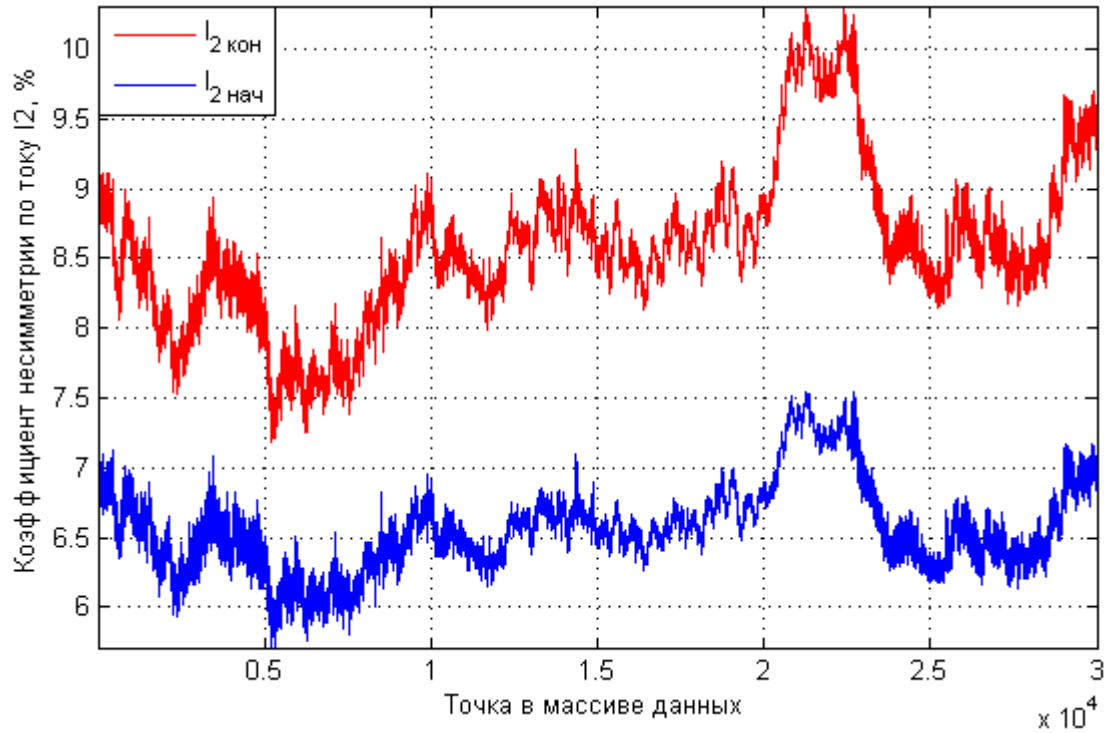


Рисунок Е.6 – Иллюстрация изменения уровня несимметрии по току обратной последовательности по концам линии 500 кВ

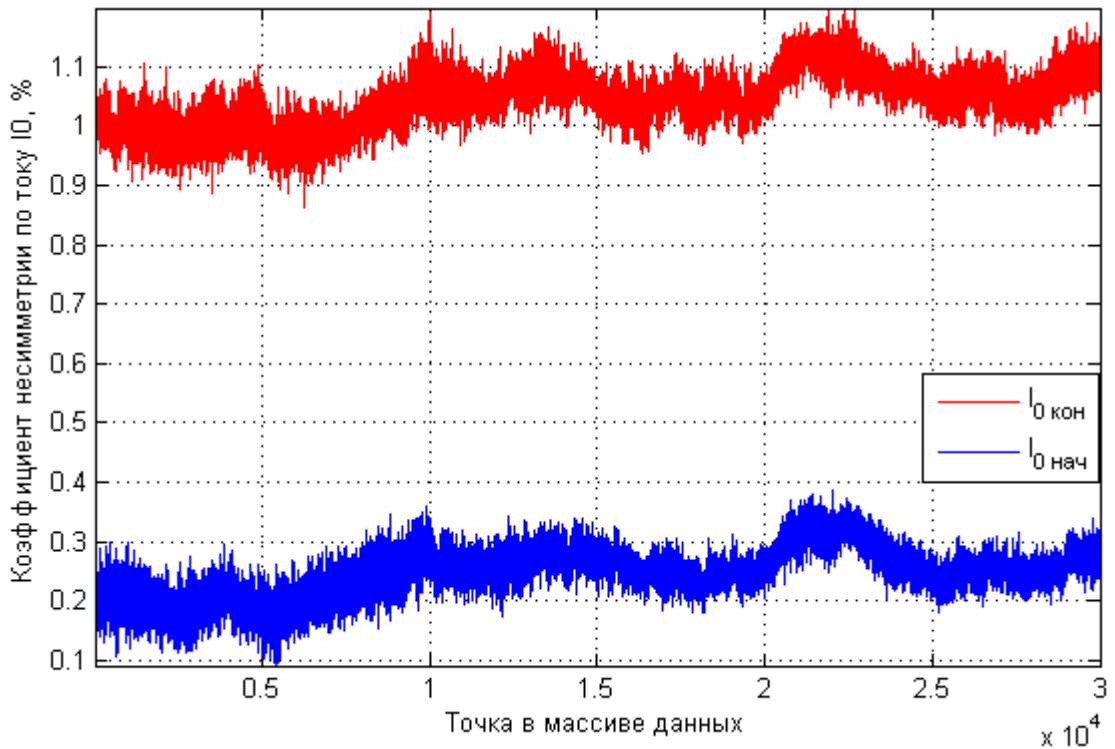


Рисунок Е.7 – Иллюстрация изменения уровня несимметрии по току нулевой последовательности по концам линии 500 кВ

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

(обязательное)

Решение матричных уравнений для метода идентификации параметров ВЛЭП с использованием линейной регрессии

Задача заключается в том, чтобы решить линейную систему уравнений

$$\underbrace{[\mathbf{C}]}_{2 \times N} = \underbrace{[\mathbf{A}]}_{2 \times 2} \underbrace{[\mathbf{B}]}_{2 \times N} \quad (\text{Ж.1})$$

относительно элементов матрицы

$$[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}, \quad (\text{Ж.2})$$

через которые затем можно вычислить характеристики ВЛЭП на основе равенств (4.3).

Если система (Ж.1) переопределена (количество уравнений превышает число неизвестных), оптимальное решение находится посредством линейной регрессии. В стандартной формулировке типа (4.4), представленной, например, в [73], неизвестными являются элементы вектора-столбца (а не матрицы). Исходя из этого, требуется привести нашу задачу к виду (4.4), чтобы воспользоваться готовым аналитическим решением (4.5). Будем при этом внимательно следить за размером каждой из матриц, чтобы контролировать корректность выполняемых преобразований.

Учитывая (Ж.2), систему (Ж.1) можно разделить на две:

$$\underbrace{[\mathbf{C}_1]}_{1 \times N} = \underbrace{[a \quad b]}_{1 \times 2} \underbrace{[\mathbf{B}]}_{2 \times N}; \quad (\text{Ж.3})$$

$$\underbrace{[\mathbf{C}_2]}_{1 \times N} = \underbrace{[c \quad d]}_{1 \times 2} \underbrace{[\mathbf{B}]}_{2 \times N}. \quad (\text{Ж.4})$$

Транспонируя левую и правую части каждого из тождеств (Ж.3) и (Ж.4), получим

$$\underbrace{[\mathbf{C}_1]}_{N \times 1}^T = \underbrace{[\mathbf{B}]}_{N \times 2}^T \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}}_{2 \times 1}; \quad (\text{Ж.5})$$

$$\underbrace{[\mathbf{C}_2]}_{N \times 1}^T = \underbrace{[\mathbf{B}]}_{N \times 2}^T \underbrace{\begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix}}_{2 \times 1}. \quad (\text{Ж.6})$$

В результате каждое из равенств (Ж.5) и (Ж.6) приведено к форме (4.4), что позволяет воспользоваться линейным МНК и рассчитать искомые a , b , c , d с помощью (4.5).

Сопоставляя (4.4) и (Ж.5), запишем

$$\underbrace{[\mathbf{R}]}_{N \times 1} = \underbrace{[\mathbf{C}_1]}_{N \times 1}^T; \quad \underbrace{[\mathbf{U}]}_{N \times S} = \underbrace{[\mathbf{B}]}_{N \times 2}^T; \quad \underbrace{[\mathbf{V}]}_{S \times 1} = \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}}_{2 \times 1},$$

откуда, ориентируясь на (4.5), получаем

$$\underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}}_{2 \times 1} = \underbrace{[\mathbf{B}][\mathbf{B}]^T}_{2 \times 2}^{-1} \underbrace{[\mathbf{B}]}_{2 \times N} \underbrace{[\mathbf{C}_1]}_{N \times 1}^T. \quad (\text{Ж.7})$$

Сопоставив (4.4) и (Ж.6), совершенно аналогично записываем

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix}}_{2 \times 1} = \underbrace{[\mathbf{B}][\mathbf{B}]^T}_{2 \times 2}^{-1} \underbrace{[\mathbf{B}]}_{2 \times N} \underbrace{[\mathbf{C}_2]}_{N \times 1}^T. \quad (\text{Ж.8})$$

Транспонируя теперь левую и правую части (Ж.7), имеем

$$\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} a & b \end{bmatrix}}_{1 \times 2} &= \underbrace{[\mathbf{C}_1]}_{1 \times N} \underbrace{[\mathbf{B}]^T}_{N \times 2} \underbrace{[\mathbf{B}][\mathbf{B}]^T}_{2 \times 2}^{-T}, \\ \underbrace{\begin{bmatrix} a & b \end{bmatrix}}_{1 \times 2} &= \underbrace{[\mathbf{C}_1]}_{1 \times N} \underbrace{[\mathbf{B}]^T}_{N \times 2} \underbrace{\left[[\mathbf{B}][\mathbf{B}]^T \right]^T}_{2 \times 2}^{-1}, \\ \underbrace{\begin{bmatrix} a & b \end{bmatrix}}_{1 \times 2} &= \underbrace{[\mathbf{C}_1]}_{1 \times N} \underbrace{[\mathbf{B}]^T}_{N \times 2} \underbrace{\left[[\mathbf{B}][\mathbf{B}]^T \right]^{-1}}_{\substack{2 \times 2 \\ N \times 2}}. \end{aligned} \quad (\text{Ж.9})$$

Аналогичным образом поступим и с (Ж.8):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c & d \end{bmatrix}}_{1 \times 2} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{C}_2 \end{bmatrix}}_{1 \times N} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix}^T}_{N \times 2} \underbrace{\left[\begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix}^T \right]^{-1}}_{2 \times 2}. \quad (\text{Ж.10})$$

Объединяя (Ж.9) и (Ж.10), записываем одно матричное уравнение:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}}_{2 \times 2} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \end{bmatrix}}_{2 \times N} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix}^T}_{N \times 2} \underbrace{\left[\begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix}^T \right]^{-1}}_{2 \times 2}.$$

Учитывая теперь (Ж.2), получаем искомое решение в окончательном виде:

$$\underbrace{\mathbf{A}}_{2 \times 2} = \underbrace{\mathbf{C}}_{2 \times N} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix}^T \left[\begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix}^T \right]^{-1}}_{N \times 2}. \quad (\text{Ж.11})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ И

(обязательное)

Акт внедрения результатов диссертации

ЦИФРОВЫЕ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ТРАНСФОРМАТОРЫ

ООО НПО «ЦИТ»

Общество с ограниченной ответственностью
научно-производственное объединение
«Цифровые измерительные трансформаторы»
Большая Воробьевская ул., д. 26, оф. 27,
г. Иваново, 153000
Тел.: +7-910-691-97-76
E-mail: info@digitrans.ru, http://www.digitrans.ru
ОКПО 46181142 ОГРН 1153702002497
ИНН 3702100763 КПП 370201001

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Иванова И.Е.
«Совершенствование методов определения параметров воздушных линий
электропередачи на основе синхронизированных векторных измерений»

Настоящим актом подтверждается внедрение в научно-исследовательскую и производственную деятельность ООО научно-производственное объединение «Цифровые измерительные трансформаторы» результатов диссертационной работы Иванова Игоря Евгеньевича, а именно методов актуализации значений параметров воздушных линий электропередачи, используемых при усовершенствовании алгоритмов определения места повреждения на воздушных линиях с информационными сигналами от цифровых трансформаторов напряжения и тока.

Генеральный директор ООО НПО «ЦИТ»,

к.т.н.



В.Д. Лебедев

«01» августа 2019 г.