

**ОТЗЫВ**

официального оппонента кандидата технических наук Онисовой О.А.  
на диссертационную работу **ИВАНОВА Игоря Евгеньевича**  
**«Совершенствование методов определения параметров воздушных линий  
электропередачи на основе синхронизированных векторных измерений»**,  
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

**Актуальность избранной темы**

Общепринятый в настоящее время подход к расчету параметров моделей воздушных линий электропередачи (ВЛ) заключается в использовании инженерных методик, основанных на ряде допущений и использующих обычно усредненные данные о конструктивных параметрах линий. Несмотря на то, что такой подход вполне достаточен для достижения большинства практических целей, использование уточненной информации о параметрах ВЛ позволило бы повысить качество решения многих актуальных задач электроэнергетики: оценивание состояния электроэнергетической системы, определение мест повреждений ВЛ, выбор параметров срабатывания релейной защиты (РЗ). Один из способов уточнения параметров ВЛ связан с использованием методов идентификации, позволяющих учитывать данные, которые сложно использовать в аналитических выражениях. Современный уровень развития техники делает возможным решение задачи уточнения параметров ВЛ методами идентификации за счёт создания информационной сети на базе устройств синхронизированных векторных измерений. При этом требуются разработка соответствующих методик, усовершенствование математического аппарата.

Таким образом, тематика работы, направленная на совершенствование методов определения параметров воздушных линий электропередачи на основе синхронизированных векторных измерений, является актуальной.

**Общая характеристика работы**

Общий объём диссертации составляет 275 страниц. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 148 источников (включая авторские) и восьми приложений.

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационных исследований; описывается степень разработанности темы исследований; формулируются цель работы и связанные с её достижением задачи; обозначаются объект и предмет исследования, методология и методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения работы, выносимые на защиту; приводятся сведения об апробации исследований, о публикациях и о личном вкладе автора.

**В первой главе** проведен анализ традиционных методов расчета параметров ВЛ:

– детально проанализированы расчетные выражения (аналитические), применяемые для расчета параметров схем замещения ВЛ, в том числе заложенные в современных программных средствах для моделирования электроэнергетических систем (EMTP, ATP, Simulink/SimScape Power Systems);

– реализованы в программном коде выражения для вычисления параметров ВЛ и выполнена верификация этих выражения путем сопоставления результатов расчета по ним с результатами, полученными с помощью систем математического моделирования в программных комплексах, основанных на ЕМТР-алгоритмах.

Выполнен анализ факторов, оказывающих наибольшее влияние на значения параметров ВЛ (геометрических характеристик и физических свойств системы проводников, включая контур возврата тока через землю). Для этого рассматривались одиннадцать различных сценариев, в каждом из которых оценивалось влияние отдельной или нескольких взаимосвязанных характеристик системы проводников ВЛ. На основе этого анализа выделены факторы, оказывающие наибольшее влияние на значения элементов матриц сопротивлений и проводимостей ВЛ: средняя (с учетом стрелы провеса) высота подвеса фазных проводов и грозозащитных тросов, удельное сопротивление грунта, удельное сопротивление материала провода ВЛ, относительная магнитная проницаемость грозозащитного троса.

Проведен анализ возможных вариаций сопротивлений и проводимостей ВЛ (по данным литературных источников и путем проведения собственных расчетов). Показано, что значения параметров ВЛ в зависимости от погодных условий и значения мощности, передаваемой по линии, могут существенно варьироваться (более 25-30%). В наибольшей степени подвержены изменению активные сопротивления прямой и нулевой последовательностей, индуктивное сопротивление нулевой последовательности, индуктивное сопротивление взаимоиндукции. Индуктивное сопротивление прямой последовательности от указанных факторов зависит незначительно.

Приведено краткое описание технологии синхронизированных векторных измерений напряжений и токов.

Выполнен подробный критический обзор опубликованных работ по теме идентификации параметров ВЛ на основе синхронизированных векторных измерений.

*Вторая глава* посвящена разработке методики подготовки массивов синхронизированных векторных измерений для решения задачи идентификации параметров ВЛ.

Приведена характеристика реальных массивов синхронизированных векторных измерений (СВИ) напряжений и токов. Отмечено, что СВИ содержат импульсные помехи и могут быть достаточно зашумленными.

Предложен и разработан метод обнаружения и фильтрации импульсных помех в СВИ напряжений и токов, основанный на анализе изменений значений обрабатываемого сигнала «от точки к точке». Метод реализован в виде функции в программном обеспечении MATLAB и апробирован на реальном массиве данных устройств синхронизированных векторных измерений.

Проанализированы статистические свойства шумов в синхронных векторных измерениях токов и напряжений в установившемся режиме. Показано, что погрешности СВИ имеют закон распределения близкий к нормальному. Приведено выражение для оценки среднеквадратического отклонения шума СВИ. Проанализированы количественные значения уровня шума в векторных измерениях, полученных от различных типов регистраторов.

Выявлены наиболее эффективные методы цифровой фильтрации массивов синхронных векторных измерений путём тестирования значительного количества фильтров (4285). Установлено, что наибольшей эффективностью обладают методы классического дискретного вейвлет-преобразования, использующие относительно длинные ортогональные вейвлеты с модификацией детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения сигнала.

*В третьей главе* рассматриваются вопросы моделирования установившихся режимов ВЛ и решается задача определения актуальных параметров линий на основе синхронных векторных измерений без учета погрешностей.

Разработан (с иллюстративной целью) алгоритм идентификации параметров однофазной линии с использованием СВИ токов и напряжений по концам линий, выполнена верификация разработанного алгоритма с использованием программного комплекса АТР; приведено аналитическое решение задачи определения параметров одноцепной трехфазной транспортированной линии, основанное на фазо-модальных преобразованиях.

Далее рассмотрено определение параметров нетранспортированной трехфазной ВЛ. Отмечено, что для достижения поставленной цели должна быть сформулирована и решена оптимизационная задача, в качестве целевой функции которой целесообразно принять сумму квадратов невязок рассчитанных и соответствующих им измеренных значений синхрофазоров напряжений и токов на одной стороне ВЛ. Приведены результаты нахождения параметров ВЛ указанным методом. Предложено выполнять решение оптимизационной задачи не напрямую относительно сопротивлений и проводимостей ВЛ, а (с учетом известных паспортных данных ВЛ) относительно переменных, связанных с геометрией и физическими свойствами проводников ВЛ (количество таких переменных при этом будет меньше).

Получено и верифицировано (с применением программных комплексов АТР и MATLAB) матричное описание неоднородной одноцепной трехфазной ВЛ в виде эквивалентного пассивного многополюсника. Отмечено, что полученное описание может быть использовано в задаче идентификации параметров ВЛ.

*В четвертой главе* анализируется влияние реальных погрешностей СВИ на определение параметров ВЛ, предлагаются методы компенсации погрешностей измерений.

Выполнены анализ несимметрии и характера изменений напряжений и токов в реальных массивах СВИ, оценка погрешностей измерений на качество идентификации параметров ВЛ. Совокупное влияние погрешностей СВИ рассматривалось на примере конкретного участка электрической сети, для которого с использованием среды моделирования MATLAB выполнялась серия из 10000 вычислительных экспериментов (для трансформаторов тока и напряжения разных классов точности). Показано, что наиболее чувствительными к погрешностям измерений оказываются значения активных сопротивлений прямой и нулевой последовательности. По результатам исследований сделан вывод о том, что ошибки измерений токов и напряжений оказывают существенное влияние на качество определения параметров ВЛ, причём погрешности расчета сопротивлений и проводимостей ВЛ практически линейно зависят от погрешностей измерительных трансформаторов.

Для компенсации погрешностей, вносимых измерительными трансформаторами тока и напряжения, предложено использование линейного метода наименьших квадратов (линейной регрессии), проиллюстрирована его эффективность. Отмечено, что другим возможным подходом может являться увеличение количества неизвестных переменных в системе уравнений ВЛ, относительно которых решается оптимизационная задача, однако такой способ требует более полной информации о характеристиках ВЛ и связан с вычислительными трудностями.

В конце главы приведены результаты функционирования разработанных методов идентификации параметров ВЛ с использованием реальных массивов СВИ. Показано, что методы обеспечивают достаточно точные оценки значений индуктивного сопротивления и емкостной проводимости ВЛ. Отмечено, что сделать объективные выводы относительно погрешностей определения активного сопротивления прямой последовательности сложно вследствие существенной вариации этого сопротивления, а также отсутствия его эталонного значения, соответствующего конкретному интервалу времени. В качестве варианта решения этой проблемы предлагается выполнить серию специально запланированных экспериментов на реальной ВЛ для определения её фактических эквивалентных параметров.

К достоинствам работы следует отнести:

- детальное изучение зарубежного опыта по теме диссертационного исследования;
- использование при выполнении исследований современных средств моделирования электроэнергетических систем.

Автореферат диссертации в достаточной мере раскрывает суть выполненной работы, её научные положения, выводы и рекомендации. Результаты исследований достаточно полно отражены в 24 печатных работах автора.

Содержание диссертационной работы соответствует формуле специальности 05.14.02 –Электрические станции и электроэнергетические системы, а также областям её исследования: п.6 («Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике») и п.13 («Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике»).

#### **Новизна сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций**

Научная новизна диссертационной работы заключается, прежде всего, в следующем:

- разработана методика подготовки массивов СВИ напряжений и токов для последующего их использования в задаче идентификации параметров ВЛ, обеспечивающая фильтрацию импульсных помех и шумовой составляющей;
- получено аналитическое решение задачи определения параметров транспонированной ВЛ на базе СВИ без учета погрешностей измерений, требующее только один комплект синхронизированных векторов по концам ВЛ;

– поставлена и решена (для уменьшенного размера вектора переменных) оптимизационная задача по определению параметров нетранспонированной ВЛ с использованием СВИ;

– предложен способ определения параметров ВЛ на основе линейной регрессии с использованием множества комплектов СВИ, существенно повышающий точность расчета параметров прямой последовательности по сравнению с аналитическим решением на базе одного комплекта СВИ.

### **Степень обоснованности сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверность**

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечиваются использованием общепринятых методов математического описания электроэнергетических систем, применением известных инструментов математического моделирования, совпадением результатов расчета по предложенным методам с соответствующими результатами, принятыми за эталон, качественной сходимостью результатов, полученных в работе, с опубликованными результатами исследований других авторов.

Приведенные в диссертационной работе положения, выводы и рекомендации были опубликованы, прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях.

### **Вопросы и замечания по диссертационной работе**

1. В работе (глава 1) излишне критикуются (как неподходящие для автоматизации расчета параметров ВЛ) «Руководящие указания по релейной защите», расчетные выражения из которых используются для вычисления параметров ВЛ в отечественной практике. Руководящие указания излагают прежде всего инженерную методику расчета параметров ВЛ и достаточно обстоятельно отражают существующие качественные закономерности. Руководящие указания исходно не были ориентированы на решение задач автоматизации расчета параметров ВЛ произвольной конфигурации. В то же время во многих зарубежных источниках, на которые делается упор, качественная сторона вопросов расчета параметров ВЛ отражена достаточно слабо.

2. Основной метод проведения диссертационных исследований основан на проведении большого количества вычислительных экспериментов. Представляется, что ряд выводов и заключений можно было сделать, основываясь на качественных характеристиках объекта исследования. Например, для выбора наилучшего способа фильтрации СВИ исследуются 4285 фильтров. Можно ли было изначально ограничить количество исследуемых фильтров, основываясь на их известных характеристиках?

3. В диссертации практически не описаны существующие методы фильтрации СВИ, в том числе уже используемые в релейной защите и автоматическом управлении.

4. В ряде работ авторов-релейщиков (Ю.Я. Лямец, В.А. Ефремов, А.О. Павлов) используется подход к представлению многопроводных линий электропередачи в виде каскадного соединения многополюсников с соответствующими матрицами передачи. Знаком ли автор с этими исследованиями? В чем преимущества предлагаемого им матричного описания установившегося режима ВЛ?

5. Могут ли предлагаемые автором методы идентификации параметров ВЛ быть применены к сложным многопроводным системам с параллельными линиями (в том числе с разными значениями взаимоиндукции на участках ВЛ)? Какие дополнительные данные/измерения, связанные с параллельной ВЛ, при этом могут потребоваться?

6. Сделанный в работе вывод, о том, что определение значений параметров нулевой последовательности ВЛ не может быть выполнено на базе СВИ нормального установившегося режима представляется достаточно очевидным. В то же время не вполне понятны требования к режиму работы ВЛ, пригодному для идентификации параметров нулевой последовательности с необходимой точностью.

7. Есть ли перспективы использования предлагаемой автором методики в «on-line» режиме с целью непрерывной корректировки параметров ВЛ в зависимости от температуры окружающей среды, текущей загрузки ВЛ и т.д.? Какие дополнительные исследования/доработки предлагаемых решений при этом потребуются?

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней**

Диссертационная работа ИВАНОВА Игоря Евгеньевича в полной мере соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с актуальными изменениями).

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний – электроэнергетики.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертационной работе приведены сведения о практическом использовании полученных автором научных результатов. Предложенные автором диссертации решения в достаточной степени аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях (три публикации).

На источники заимствования материалов, их авторов в диссертации корректно и в полном объёме приведены ссылки; автором указан личный вклад в выполненную научную работу.

#### **Выводы**

Диссертационная работа ИВАНОВА Игоря Евгеньевича «Совершенствование методов определения параметров воздушных линий электропередачи на основе синхронизированных векторных измерений», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития электроэнергетики.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы; работа удовлетворяет критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание учёной степени кандидата наук.

Считаю, что ИВАНОВ Игорь Евгеньевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент,  
кандидат технических наук,  
заведующий сектором НИОКР Центра  
моделирования электроэнергетических систем  
Департамента информационно-технологических  
систем ОАО «Всероссийский научно-  
исследовательский, проектно-конструкторский и  
технологический институт релестроения с  
опытным производством» (ОАО «ВНИИР»)  
428024, г. Чебоксары, пр-т Ивана Яковleva, д. 4  
Тел.: 8(8352)39-00-00; +7 919-671-27-70  
e-mail: [onisova@vniir.ru](mailto:onisova@vniir.ru) ; [onisova-vniir@yandex.ru](mailto:onisova-vniir@yandex.ru)

Онисова Ольга Александровна

25.11.2019

Подпись Онисовой О.А. заверяю:  
Генеральный директор ОАО «ВНИИР»

Иванов Валерьевич

