

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Д.С. Осипова «Модели и методы вейвлет анализа несинусоидальных нестационарных режимов электрических сетей 0,4-110 кВ», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

1. Соответствие работы избранной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Исходя из анализа тематики выполненных исследований, поставленных и решенных автором задач, касающихся разработки принципов моделирования несинусоидальных, нестационарных режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) с помощью метода вейвлет преобразования мгновенных значений напряжений и токов, а также практических рекомендаций по их использованию для расчета интегральных характеристик, представленных в данной работе можно заключить, что диссертация Д.С. Осипова соответствует п. 6 и п. 12, паспорта специальности - 05.14.02 - Электрические станции и электроэнергетические системы.

2. Актуальность темы исследования и ее связь с запросами практики

Развитие электроэнергетических систем сопровождается существенным увеличением количества электроприемников, имеющих нелинейные вольт-амперные характеристики. Это обусловлено тем, что в системах электроснабжения различных промышленных производств, а также административно-хозяйственных зданий все в большей степени используются вентильные преобразователи, частотно-регулируемые электроприводы, импульсные блоки питания, светодиодные источники света и иные устройства, которые являются источниками высших гармоник, что в свою очередь ведет к возникновению несинусоидальных режимов. Известно, что несинусоидальные режимы оказывают негативное влияние на качество электрической энергии,

энергетическую эффективность функционирования и надежность, как отдельных электроприемников, так электроэнергетических систем в целом.

Диссертационная работа Д.С. Осипова посвящена исследованию и решению научных задач, связанных с влиянием высших гармонических составляющих на режимы работы распределительных электрических сетей 0,4–110 кВ.

Исходя из поставленных целей и решения приведенных научных задач, актуальность темы диссертационной работы Д.С. Осипова сомнений не вызывает.

3. Научная новизна, результатов и выводов, сформулированных в диссертации

Научная новизна основных положений и результатов работы заключаются в следующем:

3.1 Предложено развитие теории и методов математического моделирования ЭЭС при несинусоидальных режимах работы, которые создают методическую основу для совершенствования методов расчета дополнительных потерь от высших гармоник и анализа динамической устойчивости узлов нагрузки.

3.2 Предложена оригинальная идея согласования полосы пропускания вейвлет функции с шириной группы гармонических составляющих, определённой в соответствии с нормативными документами по средствам измерения гармоник и интергармоник на основе модели эффективного применения вейвлет преобразования для обработки и передачи цифрового потока мгновенных значений токов и напряжений.

3.3. Предложен критерий для выбора оптимального типа вейвлета в задачах расчета и моделирования несинусоидальных режимов электроэнергетических систем и сетей 0,4–110 кВ, отличающийся определением локальной энергетической плотности исследуемой гармонической группы и на возможности провести обратное вейвлет преобразование с наименьшей погрешностью.

3.4. Разработан метод анализа качества электроэнергии с помощью алгоритмов вейвлет преобразования, подтверждающий эффективность применения вейвлет преобразования для сжатия потока оцифрованных данных, характеризующих режимы работы электрических сетей и доказано, что высокочастотные детализирующие вейвлет коэффициенты следует использовать в устройствах релейной защиты и автоматики для сигнализации об изменениях в режимах работы электрической сети.

3.5. Проведена модернизация существующих математических алгоритмов определения поврежденной отходящей линии при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в сетях 6 – 35 кВ с применением теории вейвлет анализа для программной фильтрации высокочастотных компонент токов и напряжений нулевой последовательности.

3.6. Предложена методика расчета переходных процессов в электрических цепях, основанная на рекурсивном алгоритме и задании напряжения через вейвлет коэффициенты дискретного вейвлет преобразования и анализа динамической устойчивости узлов нагрузок электроэнергетических систем с учётом несинусоидальности формы кривой напряжения в узле подключения.

3.7. Выполнена адаптация методов расчета дополнительных потерь мощности в токоведущих частях от высших гармоник с учетом зависимости сопротивления от температуры на основе метода вейвлет преобразования, который позволяет определять потери активной мощности от отдельных гармоник с учетом нестационарных режимов электрических сетей.

4. Практическая значимость работы

4.1. Разработан метод, который позволяет значительно сократить объемы передаваемой информации о характеристиках режима электрической сети при реализации задач непрерывного мониторинга или развитии технологий Smart Grid и «Цифровая подстанция».

4.2. Реализован алгоритм для расчета дополнительных потерь в токоведущих частях от интергармоник для анализа, идентификации

интергармоник в электрических сетях 0,4–110 кВ на основе вейвлет преобразования.

4.3. Разработаны алгоритмы, позволяющие улучшить точность расчетов и анализа дополнительных потерь от высших гармоник, что позволяет осуществить выбор фильтрокомпенсирующих устройств для подавления гармоник и стать инструментом цифрового анализа параметров режима электроэнергетических систем и сетей.

4.4. Предложенные в диссертации алгоритмы и методы анализа электромагнитных переходных процессов при коротких замыканиях, и ОЗЗ с помощью коэффициентов пакетного вейвлет преобразования применены для разработки мероприятий по обеспечению допустимых параметров энергетического режима и динамической устойчивости сетей ООО «РН-Юганскнефтегаз» на подстанциях 110/35/6 кВ, что подтверждено актом внедрения.

Использование результатов диссертационной работы подтверждается соответствующими актами внедрения.

5. Оценка внутреннего единства и направленности полученных результатов на решение поставленных задач

Диссертационная работа, состоит из введения, шести глав основного текста, заключения, двух приложений и списка литературы, состоящего из 353 наименований библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 305 страниц.

Во введении приведены актуальность, цель и задачи работы, а также её научная и практическая значимости.

В первой главе представлены основные элементы теории вейвлет анализа и приводится обоснование перспективности применения данной теории к анализу электроэнергетических систем. Отличие вейвлет преобразования и оконного преобразования Фурье заключается в форме анализирующих функций. Все функции оконного преобразования Фурье состоят из одной и той же функции-оболочки, сдвинутой во времени и имеющей одинаковую ширину.

Функция вейвлет преобразования имеет переменную ширину во времени, зависящую от частоты. Вейвлет функции для высокочастотных составляющих сужаются, а для низкочастотных становятся шире. В итоге, вейвлет преобразования позволяет с высокой точностью анализировать высокочастотные возмущения, имеющие короткую продолжительность.

Вейвлет преобразование позволяет получить трехмерную интерпретацию сигнала в осях амплитуда – частота – время. Для решения ряда прикладных задач, в том числе для анализа несинусоидальных режимов систем электроснабжения непрерывное вейвлет преобразование в большинстве случаев оказывается избыточным. Для расчета высших гармоник и коэффициента гармонических искажений в работе предлагает использовать дискретное вейвлет преобразование.

Вторая глава посвящена разработке критерия выбора типа вейвлет функции для анализа качества электроэнергии. Разработаны методы расчета действующих значений токов и напряжений в электрических цепях по вейвлет коэффициентам. Представлены разработанные рекурсивные алгоритмы расчета переходных процессов в электрических сетях 0,4–110 кВ и в цепях постоянного тока. Разработаны методы анализа качества электроэнергии, цифрового сжатия потока данных, характеризующих режим электрических сетей.

Для анализа несинусоидальных режимов электрических сетей необходимо выбрать частоту дискретизации и схему вейвлет разложения таким образом, чтобы произошло совмещение полосы пропускания фильтра вейвлет функции и ширины гармонической группы, определённой по ГОСТ 30804.4.7–2013. В работе предложен метод расчета действующих величин параметров режима (токов, напряжений, э.д.с.) ЭЭС по вейвлет коэффициентам, определяющим различные гармонические группы.

Произведена разработка методики анализа качества электроэнергии с применением алгоритмов непрерывного, дискретного и пакетного вейвлет преобразования. Представлен анализ трехфазного короткого замыкания, бросков тока при коммутации батареи конденсаторов, импульсных

напряжений, несинусоидальных режимов, провалов и прерываний напряжения. Разработана методика разложения исследуемого сигнала и сжатия потока информации для реализации технологии «Цифровая подстанция». Доказано, что коэффициенты сжатия при использовании методов вейвлет преобразования составляют от 12 до 16. Представлена оценка точности вейвлет реконструкции на основе среднеквадратического отклонения, исходного и восстановленного сигналов. Произведена оценка эффективности применения 10 типов вейвлет функций для дискретного анализа качества электроэнергии.

В третьей главе произведен анализ проблемы нормирования и обеспечения качества электроэнергии. Проведены экспериментальные исследования и анализ высших гармоник систем электроснабжения предприятий нефтедобывающей отрасли (Роснефть-Юганскнефтегаз). Далее произведена разработка метода идентификации и расчета интергармонических составляющих по вейвлет коэффициентам. Интергамоники – это гармонические колебания с частотами, не кратными частоте питающей сети. В настоящее время в мире отсутствуют единые подходы к вопросам стандартизации интергармоник (ИГ). В ряде стран Европейского Союза, в соответствии с IEC 61000-4-7:2 ИГ напряжения не должны превышать 0,2% для всей шкалы номинальных значений напряжения. Отмечено, что в России процесс нормирования ИГ находится на стадии рассмотрения.

Представленный алгоритм дает возможность более точного расчета потерь при несинусоидальных режимах работы систем электроснабжения, вызванных высшими гармониками и ИГ в токоведущих частях.

В четвертой главе осуществлена модернизация известных алгоритмов защиты и сигнализации ОЗЗ для цифровых устройств релейной защиты относительного замера высших гармоник.

В соответствии с принятыми нормами в электроэнергетических системах России могут применяться различные режимы работы нейтрали. Электрические сети среднего напряжения (6–35 кВ) работают, как правило, в режиме изолированной или компенсированной нейтрали. Заземление нейтрали через

дугогасящий реактор позволяет снизить вероятность возникновения дуговых ОЗЗ и ограничения сопровождающих их перенапряжений. Вейвлет преобразование может быть применено для дополнения существующих методов идентификации ОЗЗ. Одним из видов защит от ОЗЗ в сетях с компенсированной нейтралью являются максимальные токовые защиты, основанные на абсолютном замере высших гармоник.

Далее в диссертации был разработан алгоритм управления дугогасящим реактором для автоматической компенсации ёмкостных токов. Дополнительно алгоритм предусматривает очистку напряжения от зашумления (высших гармоник) также на основе вейвлет преобразования.

В пятой главе разработана методика расчета дополнительных потерь мощности в токоведущих частях с учетом фактического нагрева при несинусоидальных нестационарных режимах электроприёмников. Разработанный алгоритм позволяет на стадии проектирования учесть при выборе сечения кабеля возможное увеличение токовой нагрузки, дополнительных потерь мощности и энергии, а также произвести предварительную оценку рабочей температуры жилы кабельной линии.

В шестой главе предложена методика анализа устойчивости узлов нагрузки с учётом несинусоидальности питающего напряжения. Приведены результаты анализа сетей ООО «РН-ЮНГ», обоснованы резонансные перенапряжения. Определена максимально возможная кратность перенапряжений – для сетей 35 кВ кратность составила 2,905; для сетей 6 кВ – 2,1, для сетей 0,4 кВ – 1,97 о.е. от значения номинального напряжения и определены резонансные частоты.

По каждой из глав представлены лаконичные и содержательные выводы. Исходя, из анализа содержания работы в разрезе ее структуры и последовательности изложения можно констатировать, что она является в достаточной мере полноценным законченным научным исследованием. Все это свидетельствует о внутреннем единстве, целостности и практической направленности работы.

6. Степень достоверности результатов и обоснованности выводов исследования

Достоверность и обоснованность выводов диссертационной работы подтверждаются широким использованием теоретических основ электротехники, теории электромагнитных процессов и устойчивости узлов нагрузки, которые хорошо апробированы и подтверждены экспериментально, а также достаточно хорошим совпадением результатов численного и имитационного моделирования с экспериментальными данными на физических объектах. При этом автор корректно использует передовой опыт применения математического аппарата вейвлет преобразования для частотного анализа нестационарных систем, в частности для электроэнергетических систем.

7. Апробация работы и подтверждение опубликования ее основных положений и результатов

Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских конференциях и научных семинарах.

По теме диссертации опубликовано 61 печатная работа, в том числе 29 из них в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ и 15 работ, индексируемых в наукометрической базе Scopus.

Автореферат диссертации и публикации достаточно полно отражают основное содержание диссертационной работы и полученные автором научные результаты.

8. Основные замечания по работе

В целом содержание диссертационной работы Д.С. Осипова, ее основные положения, выводы и результаты возражений не вызывают. Однако, можно сделать следующие замечания:

8.1. На странице 72 приведено утверждение: *«Проведенные исследования показали, что для определения действующих значений несинусоидальных величин при расчете режимов работы ЭЭС наиболее оптимальные*

результаты показывают вейвлеты семейства Добеши высоких порядков. На рис. 1.26 сплошной линией показана АЧХ вейвлета Добеши 44 порядка, наиболее близкая к идеальному фильтру». Сравнение с другими вейвлетами высоких порядков не приведено, на рис. 1.26 сравнение проведено лишь для 10-го и 44-го порядков вейвлета Добеши.

8.2. В табл. 2.1 и 2.2 указаны результаты сравнения нескольких материнских функций, однако Добеши в этой табл. уже не 44-го, а 42-го порядка. Почему сравнение не проведено, например, для 40 или 46? Выбраны порядки 10, 24 и 42 как будто произвольно. Странно, что вейвлеты Койфмана в этом сравнении используются только 5-го порядка. А учитывая, что койфлеты и симлеты являются частными случаями вейвлетов Добеши, возникает вопрос, почему из десяти приведенных вариантов восемь – это вейвлеты с компактным носителем, а сравнение с вейвлетами Гаусса и Морле не проводилось вообще?

8.3. Таблицы 2.1 и 2.2 имеют одинаковое название «Энергия спектра и среднеквадратичное отклонение при восстановлении тока КЗ различными типами вейвлетов». Но в одном случае наилучшим оказался Добеши 10-го порядка, в другом Добеши 42-го. Если нет рекомендаций по выбору материнского вейвлета и его порядка исходя из специфики задачи, то предложенный метод выбора сводится к простому перебору, причем непонятно по какому принципу формировать начальное множество вариантов.

8.4. На стр. 41 написано «Вейвлет функции для высокочастотных составляющих сужаются...», как будто вейвлет функция самостоятельно адаптируется под частоту, на самом деле, адаптируется вейвлет-преобразование в целом за счет масштабирования функции материнского вейвлета, и не автоматически, а только при правильной настройке параметров вейвлет-преобразования.

8.5. В работе указывается важные недостатки преобразования Фурье и оконного преобразования Фурье для решения рассматриваемых задач. Было бы уместно подтвердить это, применив Фурье преобразования для решения нескольких рассмотренных задач и сравнить полученные результаты с

результатами вейвлет-преобразований с точки зрения качества конечного продукта, принимая во внимание очень высокое быстродействие Фурье преобразования по сравнению с вейвлет преобразованием, особенно в случае применения предложенной процедуры выбора наилучшего материнского вейвлета.

8.6. Важным свойством вейвлет-преобразования является возможность определять не только наличие тех или иных гармоник, но и точно находить их локализацию по времени. В ряде задач автор это наглядно показал. Но в задачах определения линии ОЗЗ (глава 4), расчета дополнительных потерь мощности в токоведущих частях с учетом фактического нагрева (глава 5), анализа устойчивости узлов СЭС (глава 6) данное преимущество вейвлет-преобразования автором представляется уже не столь важным. Поэтому возникает вопрос, не дало бы оконное преобразование Фурье примерно таких же результатов с меньшими затратами сил на применение?

8.7. В заключении диссертации указано: *«проведен расчет среднеквадратического отклонения 10 типов вейвлет функций, интегрированных в систему MATLAB. Доказано, что минимальные среднеквадратические отклонения демонстрируют вейвлеты семейства Добеши (Добеши 10, Добеши 24)»*. На самом деле сравнение проведено для пяти типов (Хаар, Добеши, симлеты, койфлеты, Мейера). А результаты нескольких вычислительных экспериментов еще не является доказательством.

8.8. В третьем пункте заключения указано: *«Изложены доказательства эффективного применения детализирующих вейвлет коэффициентов, отвечающих за локализацию высокочастотных компонент, для идентификации изменения режимных параметров электрической системы (на примере анализа провалов и прерываний напряжения)»*. Однако, в диссертации вопросу идентификации провалов посвящено лишь три страницы и не проведено исследования точности на статистических данных. Рассматривая данную постановку, как задачу детектирования событий, можно было бы использовать вероятность корректной идентификации провала как true positive

rate, достоверность идентификации как positive precision value, и объединяющую эти показатели F-меру как итоговую оценку точности.

8.9. В тексте диссертации ЭДС обозначается по-разному: «ЭДС» (страница 236), «Э.Д.С.» (страницы 75, 87), «э.д.с.» (страницы 16, 92, 93, 95, 132, 236, 247) и кроме того, используемые на стр. 72 и 203 формулировка «наиболее оптимальные», является некорректной с точки зрения, как математики, так и русского языка.

Несмотря на приведенные замечания следует отметить, что несомненным достоинством работы является широкий охват практически ориентированных задач и стремление автора, извлечь из аппарата вейвлет-преобразования максимальную полезность применительно к проблематике электроэнергетике.

9. Общее заключение о соответствии диссертационной работы требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям

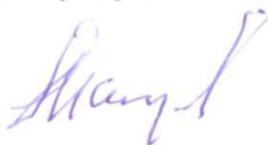
В целом результаты научных исследований и выводы, полученные Д.С. Осиповым, свидетельствуют, о том, что соискателем выполнена весьма передовая, современная работа, направленная на решение актуальной практической задачи, а именно – анализ частотных параметров нормальных, аварийных и послеаварийных несинусоидальных режимов в электрических сетях 0,4-110 кВ ЭЭС на основе вейвлет преобразования. Работа диссертанта отличается от ранее выполненных исследований в этой области, более глубокой проработкой структуры несинусоидальных режимов, обусловленных высшими гармоническими составляющими на основе современного математического аппарата вейвлет преобразования, который позволяет оценивать, не только частоту и амплитуду гармоник, но и их длительность.

Диссертация Д.С. Осипова представляет собой в достаточной мере законченную научно-квалификационную работу, в которой решена важная научно-практическая задача, повышения энергоэффективности и качества функционирования электрических сетей и электроэнергетических систем. Следует отметить, что работа написана хорошим слогом и прекрасно оформлена.

Диссертационная работа вполне отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842. Её автор Осипов Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Системы электроснабжения предприятий»
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

24.09.2019



Манусов Вадим Зиновьевич

630073, г. Новосибирск-73, пр. К. Маркса 20

тел: +7(383)-346-15-51

E-mail: manusov36@mail.ru

*Годится Манусова ВЗ
заверяю: начальник отдела кадров ИТТУ
Т. А. Жукова*

