

УДК 621.311

К ВОПРОСУ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Волошко Анатолий Васильевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения Института энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Украина, 03056, г. Киев, ул. Борщаговская, 115. E-mail: a-voloshko@yandex.ua

Харчук Андрей Леонидович,

аспирант кафедры электроснабжения Института энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Украина, 03056, г. Киев, ул. Борщаговская, 115. E-mail: Elselogin@yahoo.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения экономической эффективности и режимной безопасности функционирования электрических сетей путем улучшения качества электрической энергии. Одним из направлений решения данного вопроса является развитие существующих и разработка новых методов и средств проведения мониторинга показателей качества электрической энергии, что позволяет повысить эффективность использования энергоресурсов.

Цель исследования: разработка методов повышения эффективности проведения мониторинга показателей качества электрической энергии в электроэнергетических системах путём увеличения скорости и точности его проведения, а также усовершенствования анализа полученной информации.

Методы исследований: использование системного анализа, методов математического анализа, вейвлет-преобразования, преобразования Фурье, преобразования Гилберта, распределения Вигнера, преобразования Уолша для проведения анализа кривых напряжения с использованием программных пакетов MatLab, Simulink, компьютерного моделирования, проведение пороговой фильтрации кривых напряжения в случае наличия в кривых напряжения шумов и избыточных информационных сигналов, экспериментальные исследования.

Результаты. Разработан метод проведения мониторинга показателей качества электрической энергии путем контроля вейвлет-коэффициентов разложения кривой напряжения. Данный метод основан на том, что любые нарушения системы, в том числе и нарушение показателей качества электрической энергии, приводят к изменениям детализирующих вейвлет-коэффициентов разложения кривой напряжения на разных уровнях декомпозиции. Использование данного метода позволяет проводить мониторинг одновременно нескольких показателей качества электрической энергии в режиме реального времени, а также проводить своевременные мероприятия по обеспечению качества электроэнергии – в отличие от существующих на сегодня систем мониторинга, которые проводят контроль показателей качества электрической энергии путем обработки и анализа ранее зафиксированной информации.

Ключевые слова:

Качество электрической энергии, мониторинг, преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, идентификация отклонений показателей качества электрической энергии.

Актуальность работы

Обеспечение качества электрической энергии является одним из направлений повышения эффективности функционирования как всего энергетического комплекса страны, так и отдельных его энергетических систем.

Показатели и нормы качества электрической энергии установлены государственным стандартом ГОСТ Р 54149–2010. Нормы качества электроэнергии являются уровнями электромагнитной совместимости для кондуктивных электромагнитных помех в системах электроснабжения общего назначения. Основные показатели качества электроэнергии (ПКЭ): отклонение, колебание, синусоидальность, симметрия, провал, импульс напряжения и перенапряжение.

На сегодняшний день в Украине показатели качества электрической энергии почти не контролируются [1]. Электропередающие организации при выдаче технических условий на подключение потребителей электроэнергии и при заключении до-

говоров о поставках электроэнергии не включают в них требования по показателям качества электроэнергии, не определяют условия осуществления контроля ПКЭ. Если контроль и проводится, то только формальный, без применения каких-либо мер по приведению показателей качества электрической энергии к уровню, определенному Государственным стандартом.

Это приводит к необоснованным экономическим потерям многих потребителей электроэнергии, что является следствием снижения эффективности использования промышленного и бытового электрооборудования, выхода его из строя.

При этом снижается надежность электроснабжения за счет ложных срабатываний устройств релейной защиты и автоматики, становится невозможным использование батарей конденсаторов и синхронных компенсаторов. Недоучет электроэнергии, обусловленный погрешностями счетчиков не в пользу электропередающих организаций, составляет до 4–5 %, а согласно проведенным ис-

следованиям в реальных сетях погрешность измерения по отдельным счетчикам может составлять 20 % и более. По экспертным оценкам, прогнозируемый ущерб от снижения качества электрической энергии в целом по Украине составляет около 10 млрд грн. ежегодно и постоянно увеличивается.

К таким проблемам привело отсутствие нормативно-правовых и нормативно-технических актов, регламентирующих процедуру определения виновников ухудшения качества электрической энергии, определение объема такой энергии, порядок применения штрафных санкций и взаимной ответственности субъектов электроэнергетики и потребителей и т. п. [2].

При этом разработка мероприятий по обеспечению качества электроэнергии возможна только после оценки фактического состояния качества электроэнергии во всех узлах электрической сети. Поэтому в основе системы обеспечения качества электрической энергии должна быть система ее мониторинга [3].

Проведение мониторинга позволяет сформировать статистическую базу данных измерений, что в свою очередь позволяет прогнозировать процессы в электрической сети, определять ожидаемые уровни надежности электроснабжения и качества электроэнергии в будущем, планировать необходимые меры по обеспечению надежности электроснабжения и качества электроэнергии.

В настоящее время проведение мониторинга показателей качества электрической энергии происходит путем анализа накопленной статистической информации за определенный период времени. Это происходит потому, что процессы в электросети протекают мгновенно. Они могут быть только зафиксированы, а в дальнейшем может быть проведена их обработка и анализ. То есть показатели качества электрической энергии измеряются не напрямую, а путем обработки статистической информации.

Кроме этого, на сегодняшний день контроль качества электрической энергии носит кратковременный, периодический характер. В основном он выполняется при проведении периодических контрольных и других видов проверок с целью подтверждения соответствия показателей качества электрической энергии требованиям Государственного стандарта и договоров. Результаты таких кратковременных измерений не отражают реального состояния качества электроэнергии.

Кратковременный и периодический характер исследований существенно затрудняет разработку мероприятий, направленных на улучшение качества электроэнергии и повышение показателей надежности электроснабжения, и не позволяет в полной мере обеспечить качество электроэнергии в сети [4].

Для повышения надежности и информативности полученных результатов проведения мониторинга качества электроэнергии, а также для повышения оперативности управления качеством элек-

трической энергии контроль её показателей должен проводиться непрерывно [5]. Создание при этом системы мониторинга качества электрической энергии в режиме реального времени позволит проводить своевременный контроль её показателей и их отклонений и выполнять соответствующие мероприятия по приведению показателей качества электроэнергии в соответствии с требованиями Государственного стандарта.

Однако внедрение систем мониторинга сдерживается рядом методических и технических причин. С технической точки зрения проблема связана с недостатками существующей измерительной техники – средств измерения, а также трансформаторов тока и напряжения. Обработка данных при проведении мониторинга выполняется с применением цифровых методов, базирующихся на стандартном дискретном преобразовании Фурье (ДПФ). При этом для сокращения времени, необходимого для проведения ДПФ, разработан алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Передача данных на средства их хранения и обработки выполняется с применением оптоволоконных линий или каналов связи [6]. С методической стороны проблема измерения показателей качества и количества электроэнергии связана с реализацией цифровой обработки и передачи данных в масштабе реального времени.

Алгоритм БПФ занимает почти монопольное положение среди алгоритмов спектрального оценивания, применяемых в стандартных измерительных системах, находящихся в эксплуатации в настоящее время. Однако алгоритмы Фурье имеют несколько источников методических погрешностей, которые приводят к снижению точности результатов гармонического анализа и к их качественному искажению [6].

Главным недостатком алгоритмов Фурье является ограниченность частотного разрешения и недостаточная точность оценки частоты отдельных гармонических компонент. В первом случае – это разрешающая способность разделения двух спектральных составляющих с близкими частотами, а во втором – правильность определения частоты обособленной гармонической компоненты. Для повышения точности проведения БПФ применяется ряд дополнительных математических операций. Так, для исключения эффекта рассеяния выполняется синхронизация частоты дискретизации с частотой исследуемого сигнала, дополнение нулями исходной выборки анализируемого сигнала, либо применяются временные или спектральные окна. Эффективным средством уменьшения спектральных утечек является также применение оконных функций в соответствии с интерполяционным алгоритмом.

Однако эти способы не обеспечивают увеличения частотного разрешения. Применение временных или спектральных окон позволяет уменьшить эффект рассеяния вследствие ухудшения частотного разрешения (в связи с исключением части ин-

формации об анализируемой функции), а при дополнении исходной выборки нулями увеличивает избирательность оценивания частот узкополосных спектральных пиков вследствие уменьшения неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и, соответственно, погрешностей, связанных с ее неравномерностью.

Решение указанной проблемы заключается в совершенствовании математического аппарата для проведения контроля показателей качества электроэнергии и в дальнейшем его программной реализации.

Материалы и результаты исследований

Наиболее распространенными в электрических сетях являются гармонические колебания, наглядные, понятные, они легко генерируются и позволяют объяснить большое количество параметров. Поэтому представление электрических сигналов в системе гармонических колебаний (синусов и косинусов) и их анализ (традиционный Фурье или частотный анализ) получили наибольшее распространение [7].

Любой параметр сигнала напряжения может нести полезную информацию о его свойствах. Таким образом, задачей обработки сигнала напряжения и определения показателей качества электрической энергии является выбор этих параметров и оценка их величин.

Преобразование Фурье представляет напряжение электросети в виде суммы гармонических составляющих с коэффициентами долевого участия этих составляющих. При определении гармонических составляющих напряжения с использованием преобразования Фурье проводится декомпозиция сигнала напряжения на комплексные экспоненциальные функции различных частот [8]. Процесс декомпозиции задается двумя выражениями:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\pi ft} dt; \quad (1)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{j\pi ft} df. \quad (2)$$

В представленных формулах $x(t)$ – функция сигнала напряжения во времени, а $X(f)$ – спектральное представление сигнала напряжения. При этом выражение (1) называется прямым преобразованием Фурье, а (2) – обратным преобразованием Фурье. Для проведения анализа гармонических колебаний напряжения экспоненциальная часть в выражениях (1) и (2) представляется в виде суммы синусов и косинусов.

То есть при проведении гармонического анализа напряжения электрической сети с использованием преобразования Фурье мы можем определить, присутствуют ли в системе гармонические составляющие и их амплитуды. Однако, поскольку тригонометрические функции определены на временной оси от минус бесконечности до плюс

бесконечности, то время появления и период существования в системе высокочастотных составляющих остаются неизвестны. Кроме этого, два разных сигнала напряжения (стационарный и нестационарный) с одинаковыми спектрами высокочастотных компонент дают одинаковое преобразование Фурье.

Пример проведения гармонического анализа сигнала напряжения представлен на рис. 1. На рисунке представлен спектральный анализ сигнала напряжения, в котором кроме напряжения основной частоты (50 Гц) присутствуют высокочастотные компоненты 3 и 5 порядка (150 и 250 Гц соответственно). Из рисунка видно, что при проведении преобразования отсутствует временная информация о сигнале напряжения, т. е. нельзя определить, в какой момент времени в электрической сети появились высокочастотные компоненты, и продолжительность их существования [9].

Таким образом, применение преобразования Фурье для нестационарных сигналов, которым является сигнал напряжения, неэффективно. Преобразование Фурье может применяться для нестационарных сигналов напряжения, если нас интересует только частотная информация, а время существования спектральных составляющих неважно.

Для решения указанных недостатков при определении несинусоидальности напряжения можно использовать оконное преобразование Фурье (ОПФ). Его суть заключается в том, что нестационарный сигнал напряжения можно представить в виде частично-стационарного. При этом сигнал напряжения делится на определенные отрезки («окна») определенной длины T , в рамках которых его можно считать стационарным.

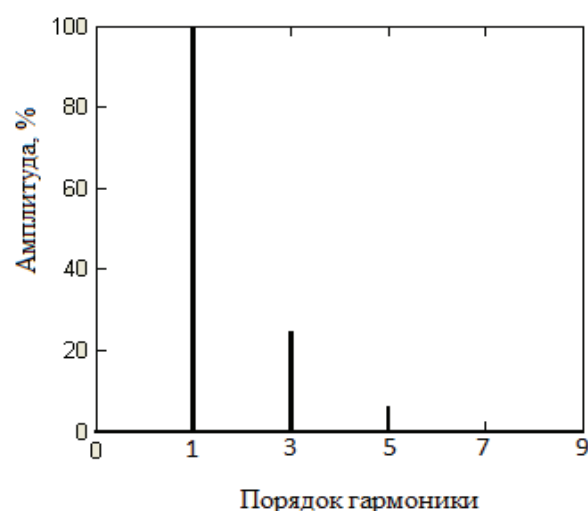


Рис. 1. Спектральный анализ напряжения с использованием преобразования Фурье

Fig. 1. Spectral analysis of voltage using Fourier transform

Данный метод дает нам не только частотное представление сигнала напряжения, как при преобразовании Фурье, но и определенное временное представление. Однако данный метод также имеет

свои недостатки. Проблемы ОПФ имеют свою основу в таком явлении, как принцип неопределенности Гейзенберга. Данный принцип при применении к частотно-временному представлению сигнала напряжения говорит, что нельзя получить произвольно точное частотно-временное представление сигнала, т. е. нельзя определить, для какого момента времени какие спектральные компоненты присутствуют в сигнале напряжения. Единственное, что мы можем знать, так это временные интервалы, в течение которых в сигнале напряжения существуют полосы частот. Эта проблема называется проблемой разрешения.

Проблема ОПФ связана с шириной оконной функции, которая применяется. Эта ширина называется носителем функции. При применении преобразования Фурье временная информация о сигнале напряжения отсутствует. При ОПФ окно имеет конечную длину, накрывает только часть сигнала, поэтому частотное представление ухудшается. Узкое окно обеспечивает лучшее временное представление, а более широко – частотное. Проблема в том, что необходимо выбрать одну ширину окна для всего интервала существования сигнала напряжения, тогда как различные его отрезки могут потребовать применения окон различной длины.

В современной практике для проведения оценки гармонического состава сигналов существует широкое многообразие методов: преобразование Гилберта, распределение Вигнера, преобразования Уолша, вейвлет-преобразования и др. [10].

Большинство привычных методов проведения гармонического анализа напряжения электросети разработаны для постоянных периодических значений напряжения и тока. К сожалению, на практике нагрузки всегда имеют динамический характер, и нарушения показателей качества электроэнергии происходит случайно.

На сегодняшний день все чаще для анализа нестационарных сигналов, в том числе и сигналов напряжения, применяется вейвлет-преобразование [11]. Это преобразование раскладывает первичный сигнал напряжения во времени на отдельные частотные диапазоны, и каждая из этих групп является частью выходного сигнала напряжения.

Проведение вейвлет-преобразования сигнала напряжения по сравнению с преобразованием Фурье позволяет получить не только информацию о гармоническом составе напряжения, но и определить, в какие моменты времени которые гармонические составляющие появляются в сети. Такой подход становится особенно эффективным, когда в системе существуют высокочастотные колебания короткой длины и достаточно широкие низкочастотные колебания. На практике электрические сигналы являются именно такими.

На сегодняшний день вейвлет-преобразование широко применяется для анализа нестационарных сигналов во многих областях науки и техники, в частности в медицине, сейсмологии, для обработки, анализа и кодирования радио- и электриче-

ских сигналов, изображений, при исследовании свойств поверхностей кристаллов и нано объектов и т. д. [12].

Весомый вклад в развитие вопроса применения вейвлет-анализа сигналов внесли И. Добеши, С. Малла, А. Гросман, В. Свелденс, А. Луис, В.П. Дьяконов, Н.К. Смоленцев, К. Чуи, А.М. Трахтман, Л.А. Залмазон, И.М. Дремина, А.В. Иванов, В.А. Нечитайло, А. Петров, Е. Бурнаева, В. Грибунин, С.В. Дворников, А.А. Аббакумов, С.В. Карпенко и др.

Аналогично преобразованию Фурье прямое вейвлет-преобразование определяется как сумма по всей длительности сигнала, умноженного на масштабируемые сдвинутые версии вейвлет-функции:

$$WT(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt, \quad (3)$$

где τ – коэффициент масштаба или параметр расширения; a – параметр сдвига или шаг сдвига; $\psi(t)$ – функция преобразования, которая называется материнским вейвлетом или базисной функцией.

При этом выражение (3) называется прямое вейвлет-преобразование.

На сегодняшний день существует достаточно широкое разнообразие функций, которые используются в качестве базисных, в частности вейвлеты Морле, Хаара, Добеши [13]. После выбора базисной функции проводятся расчеты, которые начинаются с масштаба $s=1$ и продолжаются при увеличении величины s , т. е. анализ начинается с более высоких частот и продолжается в сторону низких частот.

Однако полное превращение обычно не требуется, поскольку реальные сигналы напряжения имеют высокочастотные колебания ограниченной полосы частот [14]. В частности, ГОСТ Р 54149–2010 регламентирует проведение оценки гармонических составляющих напряжения электросети до 40-й гармоники. Поэтому число масштабов может быть ограничено.

Вейвлет перемещается в начало сигнала в точку $t=0$. Базисная функция с масштабом «1» перемножается с сигналом напряжения и интегрируется на всем часовом интервале. Интервал множится на константу $1/\sqrt{s}$ для нормализации, то есть для того, что бы сигнал напряжения на каждом масштабе имел одинаковую энергию.

Вейвлет масштаба $s=1$ потом сдвигается вдоль сигнала напряжения на величину τ до точки $t=\tau$, и процедура повторяется. Получаем еще одно значение, которое отвечает параметрам $t=\tau$, $s=1$.

Указанная процедура повторяется до тех пор, пока вейвлет-преобразование не достигнет конца сигнала напряжения. Таким образом, получаем набор коэффициентов представления для масштаба $s=1$.

Если в электросети присутствуют гармонические составляющие, которые отвечают поточному

значению масштаба s , то произведение базового вейвлета на сигнал напряжения в интервале, в котором эта гармоническая составляющая присутствует, дает относительно большое значение. В противном случае – произведение мало или равно нулю. После этого увеличиваем s на некоторое значение.

В качестве исследуемого сигнала рассмотрена функция

$$x(t) = \sqrt{2} \left(220 \sin(\omega t - 19,91^\circ) + 55 \sin(3\omega t - 35^\circ) + \right. \\ \left. + 30 \sin(5\omega t + 110^\circ) + 120 \sin(7\omega t + 19^\circ) \right),$$

имеющая первую, третью, пятую и седьмую гармоники.

Расчет гармонических групп проведен с помощью ДПФ и вейвлет-анализа с различными типами вейвлетов. Результаты вычислений представлены в табл. 1. В качестве вейвлет-функции использованы вейвлеты Добеши, Хаара и Морле. Как видно из табл. 1, результаты определения гармонических групп по алгоритму ДПФ и вейвлет-анализу сопоставимы в случае отсутствия шума и различного рода искажений.

Таблица 1. Результаты проведения гармонического анализа исследуемого сигнала

Table 1. Results of harmonic test for the signal under study

Частотная полоса, Гц Frequency band, Hz	Гармоническая группа Harmonic group	ДПФ DFT	Вейвлет-анализ Wavlet analysis			
			Добеши Daubechies		Хаара Haar	Морле Morlet
			db2	db9		
25–75	1	220,001	220,001	220,86	219,05	220,03
125–175	3	55,006	55,004	55,009	54,98	55,01
225–275	5	29,61	30,009	30,067	29,48	30,01
325–375	7	120,006	119,896	120,12	120,16	120,015
Суммарное значение Total value		258,27	258,267	259,10	257,51	258,35
Погрешность, % Error, %		0,015	0,016	–0,3	0,309	–0,0155

Исследуем результаты определения гармонических групп при наличии искаженного сигнала в электрических сетях. Для этого в электрический сигнал $x(t)$ введем искажения таким образом, что данный шум будет вызывать изменения частотного образа сигнала во всем интервале частот, которые распределяются по всей частотной оси. Следовательно, их обнаружение по спектру становится практически невозможным.

Результаты расчета гармонических групп зашумленного сигнала с помощью ДПФ (без применения оконных функций) и вейвлет-анализа приведены в табл. 2. Сравнивая полученные результаты, видим, что применение пакетного вейвлет-пре-

образования для гармонического анализа искаженного сигнала в электрических сетях является более предпочтительным по сравнению с ДПФ.

Таблица 2. Результаты проведения гармонического анализа зашумленного сигнала

Table 2. Results of harmonic test for noisy signal

Частотная полоса, Гц Frequency band, Hz	Гармоническая группа Harmonic group	ДПФ DFT	Вейвлет-анализ Wavlet analysis			
			Добеши Daubechies		Хаара Haar	Морле Morlet
			db2	db9		
25–75	1	220,9	220,13	221,00	221,65	220,09
125–175	3	56,08	55,09	56,40	56,48	55,10
225–275	5	30,61	30,1	30,67	31,45	30,21
325–375	7	121,1	120,06	121,19	121,36	120,055
Суммарное значение Total value		259,89	258,48	259,10	260,84	258,35
Погрешность, % Error, %		–0,612	–0,0658	–0,306	–0,979	–0,058

С целью дальнейшего развития вопроса применения вейвлет-преобразования для контроля показателей качества электрической энергии авторами статьи на основе анализа частотно-пространственных свойств электрических сигналов была разработана система идентификации нарушений показателей качества электрической энергии путем контроля коэффициентов детализации на различных уровнях вейвлет-преобразования сигнала напряжения.

Для выполнения указанного исследования было проведено компьютерное моделирование процессов в электрической сети в программном комплексе Simulink от Matlab [15]. При проведении моделирования была выполнена имитация отклонений различных показателей качества электрической энергии от нормируемых значений – создана несинусоидальность напряжения, отклонения и колебания напряжения, провал напряжения, импульс напряжения, перенапряжение.

С целью проведения дальнейшего анализа отклонения показателей качества электрической энергии от нормируемых значений была выполнена декомпозиция сигнала напряжения с использованием вейвлет-преобразования [16].

Результаты проведенного анализа в дальнейшем легли в основу разработанной системы идентификации нарушений показателей качества электрической энергии.

Так, было определено, что при появлении в системе колебания напряжения наибольшие значения имеют вейвлет-коэффициенты 3-го уровня разложения (рис. 2). При устойчивом отклонении напряжения от нормируемого значения максимальные значения вейвлет-коэффициентов наблюдаются также на 3-м уровне декомпозиции.

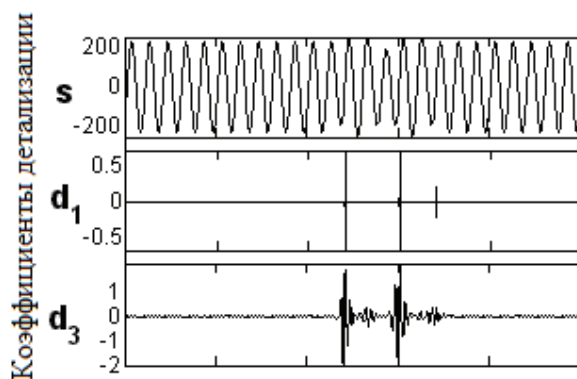


Рис. 2. Колебание напряжения

Fig. 2. Voltage fluctuation

Ухудшение синусоидальности напряжения в электросети проявляется на 4-м уровне декомпозиции сигнала напряжения (рис. 3).

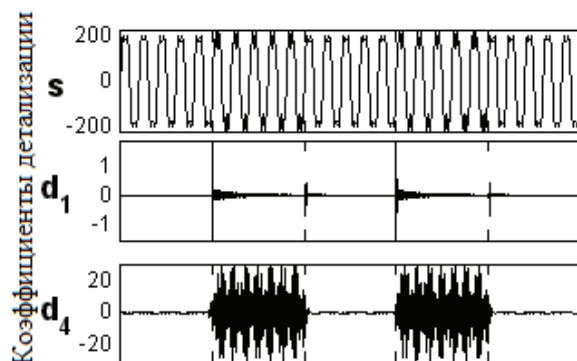


Рис. 3. Несинусоидальность напряжения

Fig. 3. Voltage unsinusoidality

Появление в сети провала напряжения или перенапряжения приводит к увеличению значения вейвлет-коэффициентов на 7-м и 8-м уровнях разложения (рис. 4, 5).

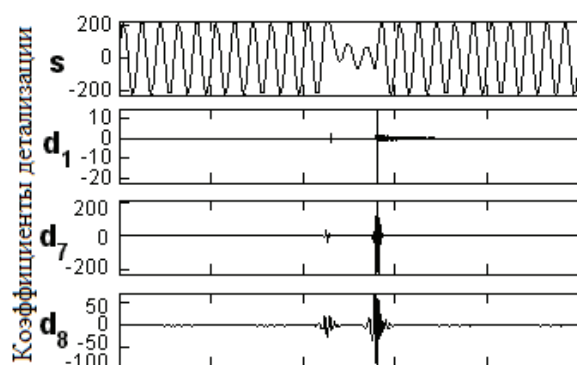


Рис. 4. Провал напряжения

Fig. 4. Power failure

При появлении в сети импульса напряжения наибольшие значения вейвлет-коэффициентов наблюдаются на 5-м уровне декомпозиции сигнала напряжения (рис. 6).

В результате проведенной работы были выполнены вейвлет-преобразования смоделированных

сигналов напряжения и показана возможность выявления искажений показателей качества электрической энергии, а также определения начала и конца искажения ПКЭ путем проведения анализа коэффициентов детализации на различных уровнях декомпозиции сигнала напряжения.

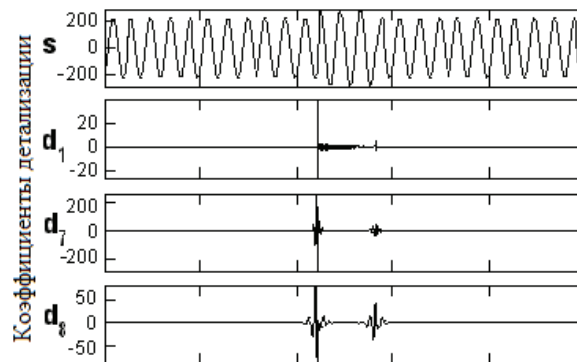


Рис. 5. Перенапряжение

Fig. 5. Overvoltage

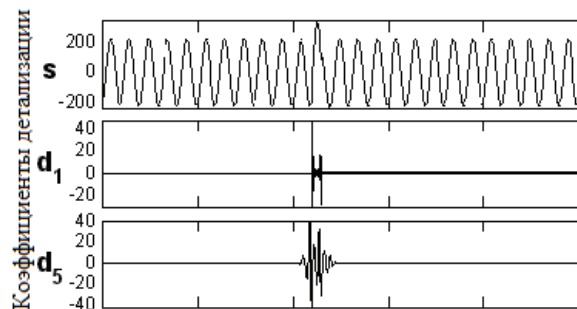


Рис. 6. Импульс напряжения

Fig. 6. Voltage pulse

При этом было обнаружено, что при наличии каких-либо искажений показателей качества электроэнергии происходит мгновенное изменение амплитуды коэффициента детализации первого уровня вейвлет-преобразования с последующим восстановлением её до нулевого уровня. Это дает возможность определять время появления и период существования искажения ПКЭ в сети.

При необходимости определения конкретного показателя качества, который ухудшился, нужно проводить дальнейшее разложение и анализ коэффициентов на других уровнях. Уровень детализации зависит от показателя качества электроэнергии, который ухудшается.

Как видно из проведенных расчетов, наиболее высокий уровень декомпозиции, на котором отображается информация о нарушении ПКЭ, – восьмой уровень. Нет необходимости выполнять декомпозицию на более высоких уровнях.

Кроме того, следует отметить, что на практике реальные сигналы напряжения в электросети, как правило, имеют в своем составе не только полезную информацию, но и остатки некоторых посторонних сигналов – шумы [17]. Поэтому при применении системы идентификации отклонений ПКЭ

предлагаем проводить предварительную очистку сигнала напряжения от шума, что является одной из наиболее актуальных задач цифровой обработки сигналов.

Очистка электрического сигнала от шума является типичной задачей предварительной обработки сигнала и подготовки данных к дальнейшей интерпретации – проведение его анализа и исследование свойств. Основной задачей на данном этапе является отсеивание остаточных (шумовых) компонент сигнала, которые не несут в себе полезной информации [18].

Зашумленный сигнал в общем виде можно представить следующим образом:

$$s(n) = f(n) + \sigma e(n), \quad (4)$$

где $f(n)$ – полезный сигнал; σ – уровень шума; $e(n)$ – белый шум – стационарная случайная последовательность, которая имеет постоянный спектр на всех частотах. Целью очистки электрического сигнала от шума есть уменьшение значения шума $e(n)$ и его влияния на сигнал $f(n)$.

При этом выражение (4) представляет общую формулу сигнала.

При проведении вейвлет-анализа сигнала напряжения удаление шума из сигнала выполняют путем обработки коэффициентов детализации, поскольку шумовая компонента, которая имеется в сигнале напряжения, лучше описана в коэффициентах детализации.

Шумовая компонента в сигнале напряжения представляет сигнал, меньший по модулю, чем основной [19]. Поэтому самый простой способ удаления шума из сигнала напряжения – сделать нулевыми значения коэффициентов детализации, которые ниже определенного предельного уровня. Эта процедура называется предельной обработкой коэффициентов.

На сегодняшний день вопрос проведения очистки сигнала от шума широко освещен не только в литературе, но и в современных технических средствах его проведения. В частности, Matlab позволяет при проведении вейвлет-анализа сигналов напряжения дополнительно проводить их очистку от шума [20].

Для этого в утилите Wavelet Toolbox можно выполнить вейвлет-анализ сигналов напряжения, в частности полученных в результате моделирования электрических сетей, или сигналов напряжения, полученных при проведении измерений в реальных электрических сетях.

Пример проведения очистки сигнала напряжения от шума представлен на рис. 7. Сигнал напряжения был получен при проведении измерений показателей качества электрической энергии в электрической сети бытового потребителя с использованием регистратора качества электрической энергии. То есть мощность шумов, информацион-

ных сигналов и различных искажений в такой электрической сети минимальна.

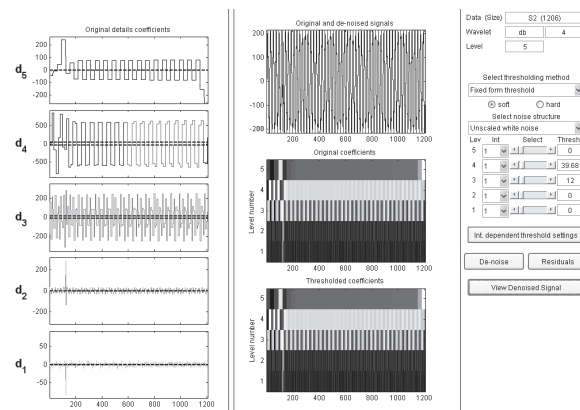


Рис. 7. Очистка от шума сигнала напряжения электросети бытового потребителя

Fig. 7. Voltage signal denoising in electrical supply network of a domestic consumer

Очистка на 1 и 2 уровнях детализации вообще не выполнялась, так как значения коэффициентов детализации на этих уровнях достаточно малы. На других уровнях очистка была проведена таким образом, чтобы оставить большую часть детализированной информации для проведения дальнейшего ее анализа.

Выводы

Поскольку большую часть времени показатели качества электрической энергии находятся в пределах нормируемых значений, проводить мониторинг ПКЭ мы можем путем контроля значений коэффициентов детализации 1-го уровня декомпозиции сигнала напряжения, которые большую часть времени имеют нулевые значения (с учетом очистки сигнала напряжения от шума). Это позволяет существенно увеличить скорость проведения контроля ПКЭ и уменьшить количество информации, необходимой для дальнейшего хранения.

Кроме этого, применение разработанной системы идентификации нарушений показателей качества электрической энергии при проведении мониторинга ПКЭ позволяет контролировать сразу несколько показателей качества электроэнергии в режиме реального времени. Это вызвано отсутствием необходимости проводить сначала сбор статистической информации, а лишь потом ее обработку и анализ, а также позволяет своевременно применять мероприятия для улучшения качества электрической энергии.

На основании представленной методологии выявления нарушений качества электрической энергии при проведении мониторинга ПКЭ в дальнейшем может быть разработана процедура определения виновников ухудшения качества электрической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топливо-энергетический комплекс Украины: настоящее и будущее. Проблемные вопросы обеспечения и контроля качества электрической энергии (методологическое обеспечение и приборы измерения параметров качества электроэнергии на современном этапе): матер. Круглого стола IX Междунар. форума. – Киев, 20–22 сентября 2011. – Министерство энергетики и угольной промышленности Украины: Изд-во ГП «Национальная энергетическая компания «Укрэнерго», 2011. – 31 с.
2. Праховник А.В., Денисенко Н.А., Волошко А.В., Харчук А.Л. К вопросу измерения и оценки показателей качества электрической энергии // Энергетика и электрификация. – 2012. – № 3. – С. 21–27.
3. Гендельман Б., Кричевский М. Обоснование выбора устройств и параметров для мониторинга, контроля и анализа качества электрической энергии в современной энергетике // SATEC LTD. 2012. URL: <http://www.satec-global.ru/upload/kachestvo-elektroenergii.pdf> (дата обращения: 12.01.2014).
4. Кузнецов Н.М., Семенов А.С. Разработка системы мониторинга для измерения показателей качества электроэнергии на горных предприятиях // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4 (Ч. 2). – С. 295–299.
5. Karaarslan I., Iskender A. DSP based power factor correction converter to reduce total harmonic distortion of input current for improvement of power quality // Electrical Engineering. – December 2011. – V. 93. – Iss. 4. – P. 247–257.
6. ARM and DSP Based Device for Power Quality Monitoring / Genghuang Yang, Feifei Wang, Shigang Cui, Li Zhao // Advances in Electronic Engineering, Communication and Management. V. 2. Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2012. – V. 140. – P. 163–168.
7. Волошко А.В. Выполнение гармонического анализа с помощью вейвлет-преобразования // Электронное моделирование. – 2012. – № 4. – С. 65–77.
8. Волошко А.В., Харчук А.Л., Вишнянская Ю.С. К вопросу использования кратно-масштабного анализа для формирования базы данных автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 5 (87). – С. 29–39.
9. Волошко А.В., Харчук А.Л. К вопросу использования вейвлет-преобразования для определения и оценки показателей качества электрической энергии // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2013. – № 1 (32). – С. 30–36.
10. Kaiser G. A Friendly Guide to Wavelets. – 2011. – 300 p.
11. Wong M.W. Wavelet Transforms and Filter Banks Discrete Fourier Analysis // Pseudo-Differential Operators. – 2011. – V. 5. – P. 61–66.
12. К вопросу применения кратно-масштабного анализа для сжатия и восстановления графика электрической нагрузки / А.В. Волошко, Д.О. Иванько, К.Ю. Гура, Д.К. Мищенко // Электроника и связь. – 2010. – № 4. – С. 59–64.
13. Asars E., Grab E. Petersons Analysis of wavelet estimation of self-similar traffic parameters in the Simulink model // Automatic Control and Computer Sciences. – 2013. – V. 47. – Iss. 3. – P. 132–138.
14. Анохин В., Ланнэ А. MATLAB для DSP. Ч. 1. Моделирование аналого-цифрового преобразования. URL: <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200002/3.html> (дата обращения: 26.02.2014).
15. Балаков Ю.Н. Значение новых стандартов ГОСТ Р 51317.4.30–2008 (МЭК 61000–4–30) и ГОСТ Р 51317.4.7–2008 (МЭК 61000–4–7:2002) для работ по оценке и мониторингу качества электрической энергии // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2009. – № 4. – С. 10–14.
16. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Mathlab. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с.
17. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171. – № 5. – С. 465–501.
18. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
19. Georgakaki D., Mitsas C.L., Polatoglou H.N. Spectral Analysis and Allan Variance in the Case of Phase Noise // Journal of concrete and applicable mathematics. – 2011. – V. 9. – № 3. – P. 270–277.
20. Damelin S.B., Miller W. (Jr.). The Mathematics of Signal Processing. 2012. URL: http://assets.cambridge.org/97811076/01048/frontmatter/9781107601048_frontmatter.pdf (дата обращения: 02.03.2014).

Поступила 26.03.2014 г.

ON THE ISSUE OF MONITORING POWER QUALITY

Anatoliy V. Voloshko,

Cand. Sc., National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,
115, Borshchagovskaya street, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: a-voloshko@yandex.ua

Andrei L. Kharchuk,

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», 115,
Borshchagovskaya street, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: Elselogin@yahoo.com

The relevance of the discussed issue is caused by the need to increase economic efficiency and regime security function in electric networks by improving the quality of electrical energy. One of the ways to solve this issue is the development of existing and new methods and tools for monitoring the quality of electric energy, which improves the efficiency of energy use.

The main aim of the study is to develop the methods to increase the effectiveness of monitoring the quality of electric energy in power systems by increasing the speed and accuracy of its implementation, as well as improvements in the analysis of the information received.

The methods used in the study: systems analysis, methods of mathematical analysis, wavelet transform, Fourier transform, Hilbert transform, Wigner distribution, Walsh transform to analyze the using the software package MatLab, Simulink, computer simulation, holding threshold filtering voltage curves if there are noise and redundant information signals in voltage curves, experiments.

The results. The authors have developed the method for monitoring the quality of electric energy by controlling the wavelet coefficients of voltage curve expansion. This method is based on the fact that any disturbance system, including violation of quality of electrical power, leads to changes in detailing wavelet expansion coefficients of the voltage curve at different decomposition levels. Use of this method allows you to monitor simultaneously several indicators of quality of electric energy in real time, as well as to conduct timely the measures to ensure the quality of electric power – in contrast to the existing monitoring systems that perform analysis of quality of electric energy by processing and analyzing previously recorded information.

Key words:

Quality of electrical energy, monitoring, Fourier-transform, wavelet-transform, identification of deviations of electrical energy quality indicators.

REFERENCES

1. *Toplivno-energeticheskii kompleks Ukrainy: nastoyashchee i budushchee. Problemye voprosy obespecheniya i kontrolya kachestva elektricheskoy energii (metodologicheskoe obespechenie i priory izmereniya parametrov kachestva elektroenergii na sovremennom etape). Materialy kruglogo stola IX Mezhdunarodnogo foruma «Toplivno-energeticheskii kompleks Ukrainy: nastoyashchee i budushchee»* [Proc. IX Int. Forum Fuel and Energy Complex of Ukraine: Present and Future]. Kiev, 2011. 31 p.
2. Prakhovnik A.V., Denisenko N.A., Voloshko A.V., Kharchuk A.L. K voprosu izmereniya i otsenki pokazateley kachestva elektricheskoy energii [On the issue of measurement and evaluation of quality of electric energy]. *Energetika i elektrofizika*, 2012, no. 3, pp. 21–27.
3. Gendelman B., Krichevskiy M. Obosnovanie vybora ustroystv i parametrov dlya monitoringa, kontrolya i analiza kachestva elektricheskoy energii v sovremennoy energetike [Justification of the choice of devices and parameters for monitoring, control and analysis of the quality of electricity in modern power]. *SATEC LTD*, 2012. Available at: <http://www.satec-global.ru/upload/kachestvo-elektroenergii.pdf> (accessed 12 January 2014).
4. Kuznetsov N.M., Semenov A.S. Razrabotka sistemy monitoringa dlya izmereniya pokazateley kachestva elektroenergii na gornyykh predpriyatiyakh [Development of a monitoring system to measure the quality of electricity in mines]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 4 (P. 2), pp. 295–299.
5. Karaarslan I., Iskender A. DSP based power factor correction converter to reduce total harmonic distortion of input current for improvement of power quality. *Electrical Engineering*, December 2011, vol. 93, Iss. 4, pp. 247–257.
6. Genghuang Yang, Feifei Wang, Shigang Cui, Li Zhao. ARM and DSP Based Device for Power Quality Monitoring. *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management*. Vol. 2. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, vol. 140, pp. 163–168.
7. Voloshko A.V. Vypolnenie garmonicheskogo analiza s pomoshchyu veyvlet-preobrazovaniya [Performing harmonic analysis using wavelet transform]. *Electronic modeling*, 2012, no. 4, pp. 65–77.
8. Voloshko A.V., Kharchuk A.L., Vishnyavskaya Yu.S. K voprosu ispolzovaniya kratno-masshtabnogo analiza dlya formirovaniya bazy dannykh avtomatizirovannoy sistemy kommercheskogo ucheta elektroenergii [On the issue of using multiresolution analysis for database automated system for commercial electricity metering]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2011, no. 5 (87), pp. 29–39.
9. Voloshko A.V., Kharchuk A.L. K voprosu ispolzovaniya veyvlet-preobrazovaniya dlya opredeleniya i otsenki pokazateley kachestva elektricheskoy energii [On the issue of using wavelet transform to identify and assess the quality of electric energy]. *Power engineering: economics, technique, ecology*, 2013, no. 1 (32), pp. 30–36.
10. Kaiser G. *A Friendly Guide to Wavelets*, 2011, 300 p.
11. Wong M.W. Wavelet Transforms and Filter Banks Discrete Fourier Analysis. *Pseudo-Differential Operators*, 2011, vol. 5, pp. 61–66.
12. Voloshko A.V., Ivanko D.O., Gura K.Yu., Mishchenko D.K. K voprosu primeneniya kratno-masshtabnogo analiza dlya szhatiya i vosstanovleniya grafika elektricheskoy nagruzki [Application of multiresolution analysis for compression and decompression schedule of electric load]. *Electronics and Communications*, 2010, no. 4, pp. 59–64.
13. Asars E., Grab E. Petersons Analysis of wavelet estimation of self-similar traffic parameters in the Simulink model. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2013, vol. 47, Iss. 3, pp. 132–138.

14. Anokhin V., Lanne A. *MATLAB dlya DSP. Chast 1. Modelirovaniye analogo-tsifrovogo preobrazovaniya* [MATLAB for DSP. P. 1. Modeling of analog-to-digital conversion]. Available at: <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200002/3.html> (accessed 26 February 2014).
15. Balakov Yu.N. Znachenie novykh standartov GOST R 51317.4.30-2008 (MEK 61000-4-30) i GOST R 51317.4.7-2008 (MEK 61000-4-7:2002) dlya rabot po otsenke i monitoringu kachestva elektricheskoy energii [The value of new GOST R 51317.4.30-2008 (IEC 61000-4-30) and GOST R 51317.4.7-2008 (IEC 61000-4-7: 2002) for the assessment and monitoring of quality of electric energy]. *Energobezopasnost i energosberezhenie*, 2009, no. 4, pp. 10–14.
16. Smolentsev N.K. *Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v Mathlab* [Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in Matlab]. Moscow, DKM Press, 2005. 304 p.
17. Dremine I.M., Ivanov O.V., Nechitaylo V.A. Veyvlety i ikh ispolzovanie [Wavelets and their uses]. *Advances in Physical Sciences*, 2001, vol. 171, no. 5, pp. 465–501.
18. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press, 2007. 288 p.
19. Georgakaki D., Mitsas C.L., Polatoglou H.N. Spectral Analysis and Allan Variance in the Case of Phase Noise. *Journal of concrete and applicable mathematics*, 2011, vol. 9, no. 3, pp. 270–277.
20. Damelin S.B., Miller W. (Jr.). *The Mathematics of Signal Processing*. 2012. Available at: http://assets.cambridge.org/97811076/01048/frontmatter/9781107601048_frontmatter.pdf (accessed 02 March 2014).

Received: 26 March 2014.