

УДК 621.317.1

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**Лютаревич А.Г., Лейнерт В.В., Соколов Д.С.***ФГОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск,
e-mail: l.alexander@inbox.ru*

Проблемы, связанные с качеством электрической энергии в энергетической сети, не теряют своей актуальности в настоящее время. Требования к качеству электроэнергии постоянно возрастают в связи с усовершенствованием электроприёмников и увеличением их чувствительности к искажениям и помехам. Для контроля и мониторинга качества электрической энергии требуется использование различных методов измерения. Актуальность работ в области повышения качества электроэнергии подтверждается на государственном уровне. Целью данного исследования является проведение обзора методов контроля показателей качества электроэнергии, используемых в современных средствах измерения. В данной работе была проведена классификация методов, которая разделяет их на четыре основные категории: контроль амплитуды напряжения, контроль частоты питающей сети, контроль несимметрии и контроль несинусоидальности. В процессе исследования были рассмотрены работы учёных, описывающих различные методы, а также их математическое представление и преимущества по сравнению с аналогичными методами. По результатам данного исследования был сделан вывод о том, что наиболее оптимальным методом контроля можно считать методы, основанные на вейвлет-преобразовании, так как они позволяют значительно сократить объём передаваемой информации о параметрах режима электроэнергетической системы. Что в значительной степени удовлетворяет принципам построения системы мониторинга качества электрической энергии в рамках реализации интеллектуальных энергосистем.

Ключевые слова: качество электроэнергии, методы контроля, несимметрия, несинусоидальность, частота, амплитуда

ANALYSIS OF METHODS OF POWER QUALITY CONTROL**Lyutarevich A.G., Leynert V.V., Sokolov D.S.***Omsk State Technical University, Omsk, e-mail: l.alexander@inbox.ru*

Problems related to the quality of electric energy in the energy network do not lose their relevance at the present time. Requirements for the quality of electricity are constantly increasing due to the improvement of power receivers and an increase in their sensitivity to distortion and interference. To control and monitor the quality of electrical energy requires the use of various measurement methods. The relevance of work in the field of improving the quality of electricity is confirmed at the state level. The purpose of this study is to conduct a review of methods for monitoring electric power quality indicators used in modern measuring instruments. In this paper, a classification of methods has been given, which divides them into four main categories: voltage amplitude control, power supply frequency control, asymmetry control, and non-sinusoidality control. During the study, the work of scientists describing various methods, as well as their mathematical representation and advantages compared to similar methods, were examined. Based on the results of this study, it was concluded that the methods based on the wavelet transform can be considered the most optimal control methods, since they can significantly reduce the amount of information transmitted about the parameters of the regime of the electric power system. That largely satisfies the principles of building a system for monitoring the quality of electric energy in the implementation of smart grid.

Keywords: power quality, control methods, asymmetry, non-sinusoidality, frequency, amplitude

Ежегодно количество потребляемой электроэнергии стремительно увеличивается. Электрическая энергия на данный момент оказывает непосредственное влияние на повседневную жизнь, так как является наиболее универсальным видом энергии, которую можно преобразовать в механическую, тепловую, химическую и другие виды энергии. Рост потребляемой электроэнергии прямо пропорционально связан с увеличением числа электроприёмников. Современные технологические процессы, разрабатываемые и уже используемые электроприёмники обладают повышенной чувствительностью к искажениям и помехам в электрической сети. Требования, предъявляемые к качеству электрической энергии, регулируются государственными стандартами, принятыми в нашей стране [1–3].

Обеспечение потребителей качественной электрической энергией является одной из приоритетных целей развития науки Российской Федерации [4, 5]. Таким образом, вопросы контроля и мониторинга качества электрической энергии становятся наиболее актуальными. В настоящее время контроль качества электроэнергии осуществляется с помощью специальных стационарных и портативных приборов – анализаторов качества электроэнергии, установленных в пунктах контроля. Работа анализаторов основана на существующих методах контроля показателей качества электрической энергии. Совершенствование уже существующих и нахождение новых методов контроля качества на данный момент является актуальным направлением исследования в электроэнергетике, так как

имеется постоянная необходимость в повышении точности получаемых результатов при проведении контроля и мониторинга, что, в свою очередь, является основой для внедрения современных инновационных технологий и создания интеллектуальных энергосистем [4].

Цель исследования: выбор наиболее оптимального метода контроля показателей для построения системы мониторинга качества электрической энергии в рамках реализации интеллектуальных энергосистем на основе метода сравнения.

Результаты исследования и их обсуждение

Выбор необходимого метода в том или ином случае является одним из основополагающих моментов в процессе контроля и мониторинга качества электроэнергии. Исследованиями методов контроля качества электроэнергии занимались С.В. Ершов, В.М. Артюшенко, Д.Е. Дулепов и многие другие учёные [6–8]. Кроме того, подробная классификация методов контроля показателей качества электрической энергии рассмотрена в [9]. Данные методы контроля показателей качества электроэнергии можно разделить на четыре основные группы: контроля амплитуды напряжения, контроля частоты, контроля несинусоидальности, контроля несимметрии. Пол-

ная классификация методов представлена на рисунке.

Методы контроля показателей качества электроэнергии основаны на математических вычислениях разного вида, таких как вейвлет-преобразование, преобразование Фурье, интегральные вычисления и т.д. Рассмотрим подробнее методы, приведённые выше.

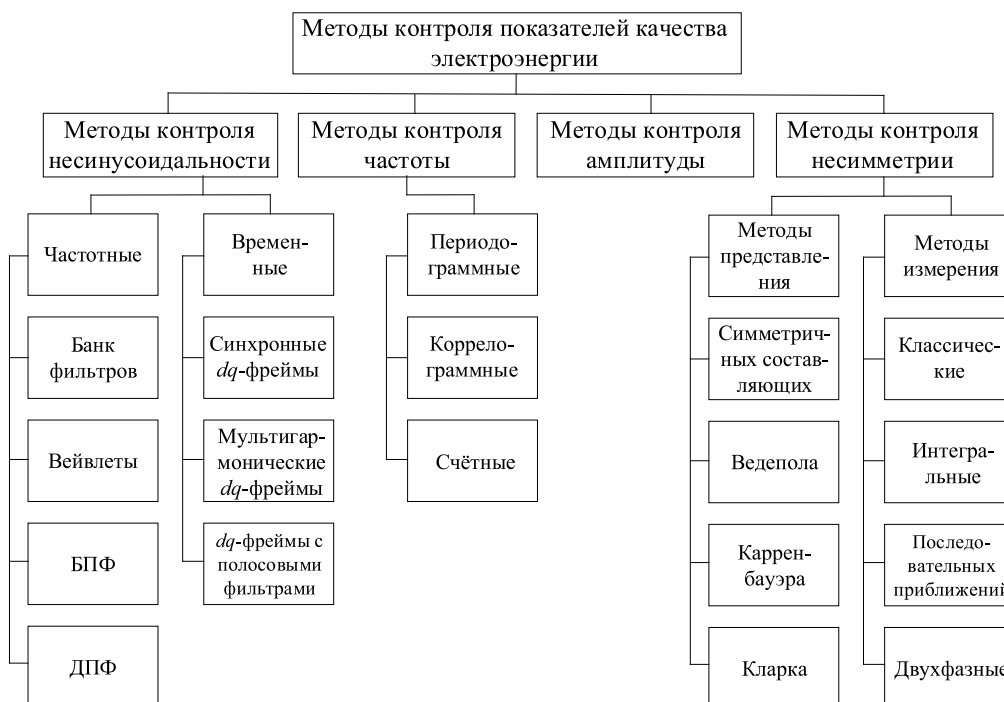
Метод контроля амплитуды напряжения заключается в определении амплитуды напряжения. Под амплитудным значением напряжения подразумевается максимальное, мгновенное значение напряжения, то есть в том случае, когда синусоида переменного напряжения достигает наибольшего значения. Амплитудное значение напряжения U_m определяется по следующей формуле

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U, \quad (1)$$

где U – действующее значение напряжения, которое можно определить как

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (2)$$

Измерение амплитуды напряжения даёт нам возможность оценить отклонения напряжения в тот или иной момент времени.



Классификация методов контроля показателей качества электроэнергии

Методы контроля частоты

Контроль частоты питающего напряжения осуществляется с помощью трех основных методов: периодограммный метод, коррелограммный метод и счётный метод.

Периодограммный и коррелограммный методы представляют собой методы спектрального анализа, благодаря которым можно описать частотный состав измеряемого сигнала. Указанные методы относятся к классическим методам оценки спектральной плотности мощности [10]. Работа каждого из них основана на преобразовании Фурье, связывающем временной или пространственный сигнал с его представлением в частотной области.

Периодограммный метод (прямой метод) представляет собой преобразование Фурье отсчетов сигнала, а оценка частоты основной гармоники определяется местоположением максимума амплитудного спектра. В основе его вычисления лежит квадрат модуля преобразования Фурье для бесконечной последовательности данных

$$S(f) = \frac{T}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp(-j2\pi fnT) \right|^2, \quad (3)$$

где N – количество отсчетов, T – интервал отсчетов.

В коррелограммном методе (косвенном методе) сначала находят автокорреляционные функции сигнала, её преобразование Фурье и оценку частоты основной гармоники производят по расположению максимума амплитудного спектра автокорреляционной функции. Расчет производится по следующей формуле:

$$S(f) = T \sum_{m=-\infty}^{\infty} r[m] \exp(-j2\pi fmT), \quad (4)$$

где $r[m]$ – автокорреляционная функция сигнала.

Оба вышеперечисленных метода являются сложными с вычислительной точки зрения и обладают высокой загруженностью. Загруженность показывает количество математических операций и характеризуется выражением $2 \log 2N$, где N – это количество обрабатываемых отсчетов. Стоит отметить, что при равных условиях наблюдения, точность коррелограммного метода в два раза выше, чем периодограммного.

Счётный метод является менее универсальным по сравнению с коррелограммным и периодограммными методами, так как он применим к узкому диапазону частот, но обладает меньшей вычислительной сложностью и загруженностью. Реализация

данного метода построена на этапах фильтрации и поиска переходов с дальнейшей оценкой. Для фильтрации применяются цифровые фильтры, благодаря которым уменьшается сложность вычислений и загруженность метода. В этом случае точность метода определяется качеством (порядком) фильтра и размером окна наблюдения. Один из таких методов приведён в [11].

Методы контроля несинусоидальности имеют большую разновидность. В первую очередь они делятся на частотные и временные методы. К частотным относятся такие методы, как вейвлет-преобразование, банк фильтров и разновидности преобразования Фурье: быстрое и дискретное. Временные методы делятся на синхронные dq -фреймы, мультигармонические dq -фреймы и dq -фреймы с полосовыми фильтрами.

Метод банка фильтров [12] применяется для обеспечения быстрой работы с большими массивами данных. В основе метода лежит применение цифровых фильтров, представляющих собой частотно-избирательную цепь из однотипных полосовых фильтров. Эти фильтры разбивают входной сигнал на несколько подканалов и производят выборку цифровых сигналов по частоте, тем самым осуществляя фильтрацию. Полосовые фильтры получают благодаря набору фильтров низких частот со сдвигом их входного сигнала. Это позволяет получить дискретное преобразование Фурье, на котором основана работа банка фильтров

$$X(k, t) = \sum_{i=0}^{K-1} x(t-i) \exp\left(-\frac{-j2\pi k}{K} i\right). \quad (5)$$

Но данный метод имеет некоторые недостатки, например растекание амплитудно-частотной характеристики в боковые лепестки, наложение соседних каналов и «эффект частотокола».

Вейвлет-преобразование представляет собой разложение сигнала по системе вейвлетов – функций, каждая из которых является сдвинутой и масштабируемой (сжатой или растянутой) копией порождающего вейвлета [13]. Фундаментальными (классическими) вейвлет-преобразованиями являются непрерывное и дискретное преобразования. В свою очередь они делятся на прямые и обратные. В общем виде формула вейвлет-преобразования имеет вид

$$F(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \Psi_{a,b}^*(x) dx. \quad (6)$$

Главным преимуществом по сравнению с преобразование Фурье для вейвлетов является то, что вейвлет-преобразование

представляет собой частотно-пространственный анализ сигнала, тогда как преобразование Фурье представляет сигнал только в виде синусов и косинусов, являясь частотным анализом. Например, с помощью вейвлетов можно определить особенность сигнала и точку, в которой эта особенность расположена.

Кроме того, математический аппарат вейвлет-преобразования наилучшим образом подходит для анализа и мониторинга качества электрической энергии в динамических режимах работы электроэнергетических систем.

Под преобразованием Фурье [14] подразумевается операция, которая сопоставляет функции одной вещественной переменной к другой функции вещественной переменной. Эта новая функция описывает коэффициенты («амплитуды») при разложении исходной функции на элементарные составляющие – гармонические колебания с разными частотами. В практическом применении наибольшей популярностью пользуется быстрое преобразование Фурье. С помощью быстрого преобразования Фурье происходит реализация дискретного преобразования Фурье. Формула прямого дискретного преобразования Фурье выглядит следующим образом

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right), k = 0 \dots N-1. \quad (7)$$

Дискретное преобразование Фурье применяется для вычисления спектра функций, заданных таблицей либо графиком. Также оно применяется для нахождения выходного сигнала фильтра по известному входному сигналу с заданной частотной характеристикой.

Временные методы контроля несинусоидальности представляют собой преобразование трёхфазной системы координат abc в двухфазную ортогональную (прямоугольную) систему координат dq , вращающейся с угловой скоростью. Один из таких методов, а именно метод синхронных dq -фреймов представлен в [15].

Методы контроля несимметрии

Методы представления несимметрии описываются методом симметричных составляющих и различными преобразованиями, такими как преобразование Кларка, преобразование Ведыпола, преобразование Карренбауэра и другими. Наиболее популярным является метод симметричных составляющих [16], так как симметричные режимы электрооборудования представлены только вектором прямой последовательно-

сти, тогда как обратный и нулевой векторы имеют нулевое значение. В случае, если обратный и нулевой векторы имеют ненулевое значение, тогда речь идёт о несимметричном режиме. Например, преобразование Кларка [17], которое осуществляет переход от трёхфазной системы координат к двухфазной ($abc-\alpha\beta$), является более простым по сравнению с методом симметричных составляющих, так как оно даёт возможность проводить измерения при изменении частоты сети, легко идентифицировать вид короткого замыкания, а также позволяет достаточно просто определять симметричные составляющие, сформированные высшими гармониками. К методам измерения несимметрии относятся классический и интегральный методы, метод последовательных приближений и двухфазный метод.

Некоторые из вышеперечисленных методов контроля показателей качества электроэнергии успешно реализованы в программном обеспечении современных стационарных и переносных средствах измерения показателей качества электроэнергии. Другие методы применяются для реализации систем управления различных технических средств [18, 19].

В связи с растущей ролью электроэнергии в нашей жизни и ужесточением требований к качеству электрической энергии, потребляемой электроприёмниками, необходимо принимать меры по контролю параметров электроэнергии. Одной из таких мер является совершенствование и создание методов контроля показателей качества электрической энергии. В данной статье была рассмотрена классификация методов, которая наиболее полным образом отображает текущее состояние исследуемого вопроса о методах контроля качества электроэнергии. Можно утверждать, что существующие на данный момент методы позволяют в полной мере оценить качество электрической энергии.

Также в связи с постоянно растущим интересом к цифровым подстанциям в последние годы активно ведутся разработки новых методов анализа электрических сигналов на основе перспективных математических аппаратов. Поэтому и возникает необходимость в разработке новых алгоритмов, которые могли бы осуществлять цифровую обработку электрических сигналов именно программными способами, без применения дополнительных аппаратных средств.

Заключение

Таким образом, в результате проведенного исследования определено, что наибо-

лее оптимальными методами контроля можно считать методы, основанные на вейвлет преобразовании, так как они позволяют значительно сократить объем передаваемой информации о параметрах режима электроэнергетической системы. Что в значительной степени удовлетворяет принципам построения системы мониторинга качества электрической энергии в рамках реализации интеллектуальных энергосистем.

Список литературы

- ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. [Электронный ресурс]. URL: <http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=184246> (дата обращения: 11.11.2019).
- ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2015. 41 с.
- ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. М.: Стандартинформ, 2014. 51 с.
- Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 3 апреля 2013 г. № 511-р; в ред. постановления Правительства Рос. Федерации от 29 ноября 2017 г. № 2664-р // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2017. № 49, ст. 7526. С. 21027–21029.
- Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики» : утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 15 апреля 2014 г. № 321; в ред. постановления Правительства Рос. Федерации от 30 марта 2018 г. № 371 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2018. № 15 (часть III), ст. 2138. С. 6673–6760
- Ершов С.В., Шалимов Д.В. Методы и средства контроля нелинейных искажений в электрических сетях // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 88–92.
- Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. On-line расчет показателей качества электроэнергии // Мир транспорта. 2013. № 2. С. 18–23.
- Дулепов Д.Е., Тюндина Т.Е. Расчет несимметрии напряжений СЭС // Вестник НГИЭИ. 2015. № 4. С. 35–42.
- Чижма С.Н. Совершенствование методов и средств контроля качества электроэнергии и составляющих мощности в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02. Омск, 2014. 367 с.
- Какора В.А., Гринкевич А.В. Комбинированный метод спектрального оценивания при получении сверхразрешения по частоте // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2018. № 8. С. 63–70.
- Куликов А.Л., Фальшина В.А. Упрощенная адаптивная цифровая фильтрация электрических сигналов в условиях изменения частоты // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 1–2. С. 57–68.
- Каплун Д., Канатов И., Азаренков Л. Банк цифровых фильтров // Компоненты и технологии. 2007. № 10 (75). С. 156–161.
- Osipov D.S., Lyutarevich A.G., Gapirov R.A., Gorunov V.N., Bubenichikov A.A. Applications of wavelet transform for analysis of electrical transients in power systems: The review. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2016. Vol. 92. Issue 4. P. 162–165. DOI: 10.15199/48.2016.04.35.
- Блейхут Р. Алгоритмы быстрой обработки сигнала. М.: Мир, 1989. 448 с.
- Suru C.V., Patrascu C.A., Linca M. The Synchronous-fundamental dq frame theory implementation and adaptation for the active filtering. 2014 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE). Conference Paper. 2014. DOI: 10.1109/ICATE.2014.6972654.
- Губский А.Б., Камарзаев Т.Р. О некоторых особенностях метода симметричных составляющих // Международная научно-техническая конференция молодых ученых им. В.Г. Шухова (Белгород, 01–20 мая 2017 г.). Белгород: Издательство Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2017. С. 4872–4976.
- Clarke E. *Circuit Analysis of A-C, Power Systems, Volume I Symmetrical and Related Components*. John Wiley and Sons, 1943.
- Лютаревич А.Г., Долингер С.Ю., Панкрац Т.В., Жданова В.А. Основные подходы реализации системы управления устройствами FACTS с учетом оптимизации режима электрической системы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 11–2. С. 203–206.
- Долингер С.Ю., Лютаревич А.Г. Применение вейвлет-анализа для определения показателей качества электрической энергии // Омский научный вестник. 2010. № 1 (87). С. 136–140.