

УДК 004.424

DOI: 10.30987/conferencearticle\_5c19e5fbf19926.94126870

Т.В. Васеева, Е.А. Альтман, Д.А. Елизаров  
(г. Омск, Омский государственный университет путей сообщения)

## **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА ГАРМОНИК СИГНАЛА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

*Приведен обзор государственных стандартов в области контроля качества электрической энергии, описаны устройства для измерения гармоник, предложен новый метод определения гармоник в электрических сетях систем электроснабжения.*

*The review of state standards in the field of quality control of electric energy is made, devices for measurement of harmonicas are described, the new method of definition of harmonicas in electrical networks of systems of power supply is offered.*

*Ключевые слова: дискретное преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье, разреженное быстрое преобразование Фурье, передискретизация, качество электрической энергии.*

*Keywords: discrete transformation of Fourier, fast transformation of Fourier, the Rarefied fast transformation of Fourier, resampling, quality of electric energy.*

Задача исследования – улучшить показатели качества электрической энергии (КЭ) в электрических сетях систем электроснабжения, совершенствуя средства измерительных устройств для определения гармоник. При разработке технического устройства должны учитываться показатели качества электрической энергии (ПКЭ) согласно действующим нормативам.

Введен целый ряд нормативных документов (МЭК, ГОСТ) [3-6]. Изменение стандартов в области измерений электрической энергии показано на рис. 1. Основополагающим нормативным документом стал ГОСТ Р 32144-2013 [7], действующий с 2014 года. Российский стандарт соответствует европейскому EN 50160:2010 «Характеристики напряжения электричества, поставляемого общественными распределительными сетями». Некоторые принципиальные отличия от предыдущих стандартов:

– отличие по интервалам усреднения показателям качества электроэнергии (отклонение частоты – 10 сек., вместо 20 сек. в ГОСТ 13109-97; не симметрия напряжения – интервал усреднения 10 мин., вместо 3 сек. в ГОСТ 13109-97; гармонические составляющие напряжения – 10 мин., вместо 3 сек. в ГОСТ 13109-97) с интервалом периода в одну неделю, вместо суток в ГОСТ 13109-97;

- измерения согласно ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000 4 30:2008) и ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000 4 7:2009);
- для медленных изменений напряжения исключены режимы наименьших и наибольших нагрузок;
- добавлены таблицы классификации провалов напряжения по остаточному напряжению.

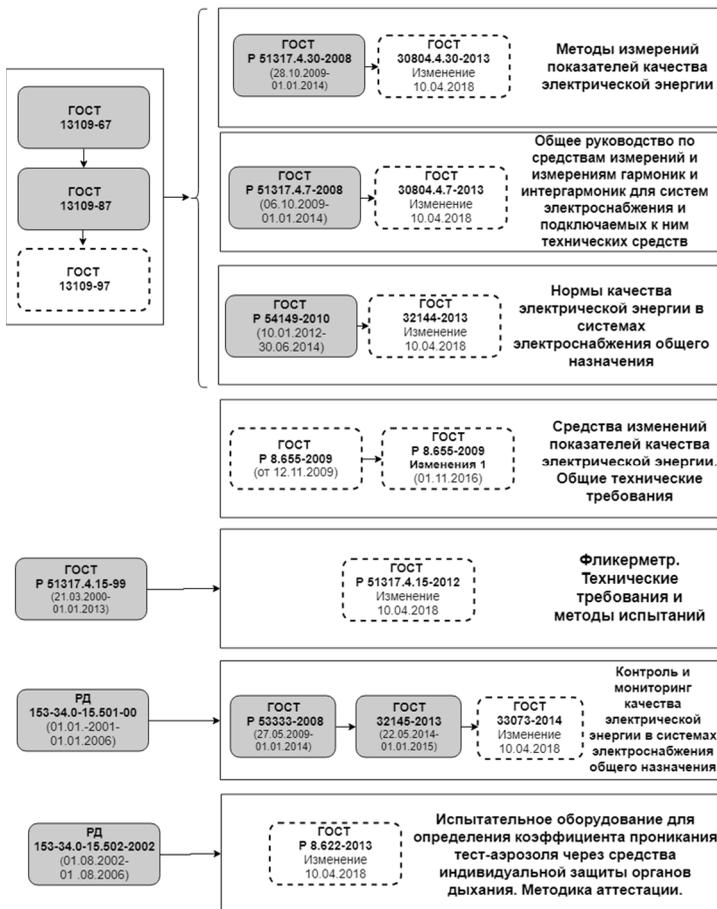


Рис. 1. Развитие государственных стандартов в области контроля КЭ

На рис. 1 действующие ГОСТы изображены пунктирными блоками.

В новых стандартах ГОСТ Р 51317.4.30–2008 и ГОСТ Р 51317.4.7– 2008 введены требования к группированию составляющих спектра на гармонических частотах с соседними спектральными составляющими (гармонические подгруппы), отделенными частотным интервалом  $Df = 1/T$ , где  $T$  – ширина измерительного окна, для образования гармонических подгрупп.

Основным направлением в применении цифровой обработки сигналов является спектральный анализ. Каждый сигнал, который изменяется во времени, имеет частотный спектр. Электрические сигналы можно анализировать в частотной области с помощью анализаторов спектра, во временной области с помощью осциллографов. К анализатору спектра предъявляют различные требования измерений по максимальной частоте входного сигнала. Ряд Фурье представляет разложение несинусоидальной периодической функции на синусоидальные компоненты и позволяет рассматривать сигналы из временной области в частотной.

На практике сигнал подвергают анализу, дискретизации (взятие выборки), квантованию по амплитуде с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП, AD Converter). Для выборки сигналов, прошедших через фильтр низких частот, где минимальная частота выборки определяется максимальной частотой сигнала (теорема В. А. Колельникова):

$$f_s \geq 2f_{\text{ex\_макс}}, \quad (1)$$

где  $f_s$  – частота выборки, Гц;

$f_{\text{ex\_макс}}$  – максимальная частота сигнала, Гц.

Для преобразования Фурье используют лишь некоторую часть сигнала с ограниченным числом выборок  $N$ . Этот процесс называется «оконой выборкой».

Расчет спектра сигнала на основе выборок во временной области обычно называют дискретным преобразованием Фурье (ДПФ, Discrete Fourier Transform – DFT). Востребованность данного метода заключается в том, что сигнал легче обработать, когда он представлен в частотной области.

$$\underline{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_s) \cdot e^{-j2\pi kn/N}, \quad (2)$$

где  $T_s$  – период выборок, с;

$\underline{X}(k)$  – значение спектра в точке  $kf_s / N$ ;

$k$  – номер частотного отчета ( $k = 0, 1, 2, \dots, m$ );

$N$  – длина DFT.

Число вычислительных операций зависит от используемого алгоритма. Быстрое преобразование Фурье (БПФ, FFT – Fast Fourier Transform) оптимизирует число операций. Анализаторы спектра, которые работают по данному алгоритму, называют БПФ-анализаторы. В его состав входят фильтр нижних частот (ФНЧ), АЦП, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ, RAM – Random Access Memory), БПФ и дисплей (рис. 2).

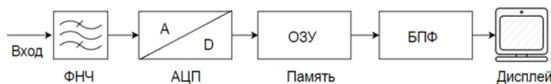


Рис. 2. Структурная схема БПФ-анализатора

Однако данный анализатор обладает низкой точностью измерения гармоник входного сигнала [1].

При ограничении числа точек в цифровом сигнале образуются пробелы между отчетами в спектре сигнала.

Предлагаемый анализатор измерения гармоник включает в себе объединение двух операций (Resampling и SFFT) и изображен на рис. 3.

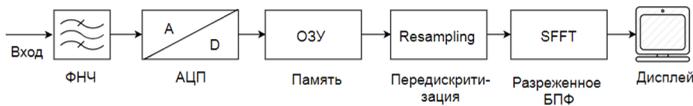


Рис. 3. Структурная схема Анализатора SFFT и Resampling

Анализатор гармоник, или спектр сигнала электрической сети содержит блок ФНЧ, вход, которого соединен с анализатором, а выход соединен с АЦП. Частота среза фильтр равна максимальной частоте сигнала  $f_{сф} = f_{вх\_макс}$ . Вход управления АЦП соединен с блоком памяти ОЗУ, а выход – с блоком «Передискретизация» (Resampling). Значения выборки сохраняются в памяти после разбиения диапазона отчетных значений сигнала на конечное число уровней и округление этих значений (квантование – quantization). Вход управления «Передискретизации» соединен с блоком «SFFT» (Sparse Fast Fourier Transform), а выход – с дисплеем. Блок дисплея показывает частотный спектр сигнала.

Блок «Передискретизация» позволяет точнее определять значения частоты основной гармоники [9]. Передискретизация – это операция, которая изменяет частоту дискретизации. При ограничении частоты дискретизации образуются пробелы в спектре сигнала, поэтому необходимо добавить нулевые отчеты в напряжение гармонических составляющих. При увеличении числа точек во временной области спектр сигнала не меняется в интересующий нас области.

Передискретизация приводит к тому, что БПФ не будет справляться из-за ограничения вычислительных ресурсов. Поэтому увеличение числа точек на современных устройствах служит причиной того, что алгоритм БПФ не выполняется. Следовательно, для нахождения спектра сигнала лучше использовать SFFT.

Блок «SFFT» – это алгоритм, разработанный Н. Hassanieh, Р. Indyk, D. Katabi, Е. Price для вычисления дискретных преобразований Фурье по сигналам с разреженной частотной областью (число ненулевых гармоник). Алгоритм улучшает асимптотическое время по сравнению с предыдущими

методами [2,8]. При определенных условиях, алгоритм SFFT быстрее, чем современные библиотеки FFT (Fast Fourier Transform) в тысячи раз [10,11]. Асимптотическое время автономной работы SFFT не является линейным по размеру сигнала, как в БПФ. Время работы увеличивается медленнее: для SFFT –  $N$ , для БПФ –  $N \log N$ .

Предлагаемый анализатор измерения гармоник заключается в использовании двух операций (Resampling и SFFT). Он позволит усовершенствовать средства измерительных устройств в электрических сетях для измерения гармоник. Новый анализатор учитывает ПКЭ согласно действующим нормативным документам. Алгоритм SFFT быстрее, чем БПФ, поэтому увеличится вычислительная способность. SFFT точнее при подобных вычислительных затратах.

### Список литературы

1. Раушер, К. Основы спектрального анализа/ К. Раушер, Ф. Йанссен, Р. Минихольд. – М.: Горячая линия–Телеком. – 2006.
2. Hassanieh H. et al. Nearly optimal sparse fourier transform //Proceedings of the forty-fourth annual ACM symposium on Theory of computing. – ACM, 2012. – С. 563-578.
3. ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЭК 61000-4-30:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – Введ. 2010-01-01. – М., 2008. – Ч.4-30. – 122 с.
4. ГОСТ Р 51317.4.7-2008 (МЭК 61000-4-30:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. – Введ. 2010-01-01. – М., 2008. – Ч.4-7. – 122 с.
5. ГОСТ Р 53333-2008. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
6. ГОСТ Р 54149-2012. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2010-01-01. – М., 2010. – 36 с.
7. ГОСТ Р 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-07-01. – М., 2014. – 39 с.
8. Gilbert A. C. et al. Near-optimal sparse Fourier representations via sampling //Proceedings of the thirty-fourth annual ACM symposium on Theory of computing. – ACM, 2002. – С. 152-161.
9. Томаси, У. Электронные системы связи/ У. Томаси. – Litres, 2017.
10. Schumacher J. High-performance sparse fast Fourier transforms / J. Schumacher, M. Puschel // Signal Processing Systems (SiPS), 2014 IEEE Workshop on. – IEEE. 2014. – С. 1-6.
11. Spiral Home page. – URL: <http://www.spiral.net/> (дата обращения 01.09.2018).

*Материал поступил в редколлегию 12.10.18.*