

3. Liang Z. Enhancement of green long lasting phosphorescence in $\text{CaSnO}_3 : \text{Tb}^{3+}$ by addition of alkali ions / Z. Liang, J. Zhang, J. Sun, X. Li, L. Cheng, H. Zhong, S. Fu, Y. Tian, B. Chen // *Physica B*. 2013. Vol. 412. P. 36–40.
4. Liu F., Liang Z., Pan Y. Detection of Up-converted Persistent Luminescence in the Near Infrared Emitted by the $\text{Zn}_3\text{Ga}_2\text{GeO}_8 - \text{Cr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ Phosphor // *Journal of Physical Review Letters*. 2014. Vol. 113 (17). 177401.1.
5. Liu Z., Liu Y. Synthesis and luminescent properties of a new green afterglow phosphor $\text{CaSnO}_3 : \text{Tb}$ // *Journal of Materials Chemistry and Physics*. 2005. Vol. 93. P. 129–132.
6. Liu F. Phonon-assisted upconversion charging in $\text{Zn}_3\text{Ga}_2\text{GeO}_8 : \text{Cr}^{3+}$ near-infrared persistent phosphor / F. Liu, Y. Chen, Y. Liang, Z. Pan // *Journal of Optics Letters*. 2016. Vol. 41. № 5. P. 954–957.
7. Pang T., Lu W., Shen W. Chromaticity modulation of upconversion luminescence in $\text{CaSnO}_3 : \text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}, \text{Li}^{+}$ phosphors through Yb^{3+} concentration, pumping power and temperature // *Physica B: Physics of Condensed Matter*. 2016. Vol. 502. P. 11–15.

УДК: 620.9 : 621.31

**Петров Антон Васильевич, Мартусенко Виталий Евгеньевич,
Дейникин Роберт Николаевич**

МЕТОД ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ СУММАРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В статье приведен метод оценки суммарного коэффициента гармонических составляющих, не требующий разложения периодического сигнала на высшие гармоники. Предложена формула расчета суммарного коэффициента гармонических составляющих для дискретных измерений напряжения электрической сети, не требующая использования Фурье-преобразования для выделения высших гармоник. Предлагаемый метод позволяет оценивать коэффициент гармонических составляющих как при анализе соответствия напряжения нормам качества электроэнергии, так и при оценке эмиссии высших гармоник тока в сеть со стороны нелинейных потребителей.

Ключевые слова: несинусоидальность токов и напряжений, спектральный анализ, Фурье-преобразование, основная гармоника, высшие гармоники.

Anton Petrov, Vitaly Martusenko, Robert Deinikin METHOD OF EXPRESS-EVALUATION OF THE TOTAL COEFFICIENTS OF HARMONIC COMPONENTS IN ELECTRIC NETWORKS

The method of estimating the total coefficient of harmonic components. The method does not require the decomposition of a periodic signal into higher harmonics. The formula for calculating the total coefficient of harmonic components for discrete measurements of the electrical network voltage does not require the use of Fourier transforms to extract higher harmonics. The method makes it possible to estimate the coefficient of harmonic components both in the analysis of the conformity of voltage to the energy quality standards and in the estimation of the emission of higher harmonics of current into the network from nonlinear consumers.

Key words: nonsinusoidal current and voltage, spectral analysis, Fourier transform, fundamental harmonic, higher harmonics.

Снижение качества электроэнергии – одна из основных тенденций развития мировой электроэнергетики в последние годы. Значительная доля электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками в электрических сетях общего назначения приводит к значительной эмиссии высших гармоник (ВГ) тока в сеть и, как следствие, к заметной несинусоидальности напряжений. Несинусоидальность токов и напряжений – фактор, негативно влияющий как на работу отдельных электроприемников, так и на работу самой электрической сети.

Следует отметить, что в спектре сигнала напряжений сети, как правило, отсутствуют четные ВГ вследствие симметричности полупериодов напряжения относительно оси времени. При этом спектральный состав напряжений в сетях общего назначения можно охарактеризовать также и отсутствием постоянной составляющей в спектре. Однако значительное количество однофазных электроприемников с импульсными блоками питания в сетях 0,4 кВ, работающих в режиме глухозаземленной нейтрали, влечет за собой появление в спектре потребляемых токов ВГ нулевой последовательности (с нечетными номерами, кратными трем). В результате, даже при относительно симметричной нагрузке фаз имеют место значительные токи в нулевом проводнике, что приводит не только к дополнительным потерям, но и может стать причиной нарушения режима нейтрали в сети из-за обрыва (перегорания) нулевого проводника.

В настоящее время нормы качества электроэнергии (в том числе и к гармоническим составляющим) устанавливает ГОСТ 32144-2013 [1]. Одним из показателей качества электроэнергии (ПКЭ), относящихся к несинусоидальности напряжения, является суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения. Расчет данного ПКЭ производится в соответствии с ГОСТ 30804.4.7-2013 [2] посредством спектрального анализа сигнала напряжения с использованием алгоритмов дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Формула расчета коэффициента выглядит следующим образом:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_i^2}}{U_1}, \quad (1)$$

где U_i – действующее значение i -й гармоники; U_1 – действующее значение 1-й (основной) гармоники.

Таким образом, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения представляет собой отношение действующего значения ВГ к действующему значению основной гармоники (ОГ). При этом оценка ограничена 40-й гармоникой.

Указанный метод оценки степени несинусоидальности напряжения предполагает проведения спектрального анализа периодического сигнала, что само по себе относительно трудоемкая задача. Применение алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) позволяет заметно облегчить ее, но в этом случае требуется применение специальных «оконных» функций для подавления несовершенства краевых условий. Помимо этого, для корректной работы алгоритма БПФ желательно, чтобы длина сигнала в дискретной выборке была степенью двойки, что не всегда возможно.

Проблема оценки суммарного коэффициента гармонических составляющих актуальна не только при исследовании соответствия напряжения регламентируемым нормам качества электроэнергии, но и при анализе эмиссии гармонических составляющих тока в сеть со стороны единичных потребителей. В данной области принят целый ряд стандартов, например [3, 4].

В настоящей работе предлагается подход к оценке суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, не требующий разложения периодического сигнала на ВГ. Метод предполагает выделение только ОГ. При этом суммарный коэффициент гармонических составляющих рассчитывается по формуле

$$K_U = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T [u(t) - u_1(t)]^2 dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T [u_1(t)]^2 dt}}, \quad (2)$$

где $u(t)$ – мгновенное значение сетевого напряжения; $u_1(t)$ – мгновенное значение ОГ; T – период ОГ.

Разность $u(t) - u_1(t)$ в числителе формулы (2) можно представить как сигнал искажения $u_{BF}(t)$ от действия ВГ. Таким образом, числитель в (2) представляет собой действующее значение сигнала $u_{BF}(t)$. Аналитически разложив сигнал сетевого напряжения $u(t)$ в ряд Фурье, формула для расчета действующего значения $u_{BF}(t)$ примет вид

$$U_{BF} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left[\sum_{i=1}^n (a_i \cdot \sin \omega_i \cdot t + b_i \cdot \cos \omega_i \cdot t) - a_1 \cdot \sin \omega_1 \cdot t - b_1 \cdot \cos \omega_1 \cdot t \right]^2 dt}, \quad (3)$$

где a_i и b_i – соответственно синусные и косинусные коэффициенты ряда Фурье.

После выделения ОГ из сигнала и разложения квадрата суммы подынтегральное выражение в формуле (3) примет вид

$$\begin{aligned} & \sum_{i=2}^n (a_i^2 \cdot \sin^2 \omega_i \cdot t + b_i^2 \cdot \cos^2 \omega_i \cdot t) + 2 \sum_{i=2}^n \sum_{\substack{j=2 \\ j \neq i}}^n \left(a_i \cdot \sin \omega_i \cdot t \cdot a_j \cdot \sin \omega_j \cdot t + \right. \\ & \left. + b_i \cdot \cos \omega_i \cdot t \cdot b_j \cdot \cos \omega_j \cdot t \right) + \\ & + 2 \sum_{i=2}^n \sum_{j=2}^n (a_i \cdot \sin \omega_i \cdot t \cdot b_j \cdot \cos \omega_j \cdot t). \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом ортогональности функций ВГ на периоде ОГ интегралы парных умножений в (4) будут нулевыми. Таким образом, формула (3) примет вид:

$$U_{BF} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \sum_{i=2}^n (a_i^2 \cdot \sin^2 \omega_i \cdot t + b_i^2 \cdot \cos^2 \omega_i \cdot t) dt}, \quad (5)$$

Разложив интеграл (5) на подынтегральные слагаемые получим

$$U_{BF} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \sum_{i=2}^n (a_i^2 \cdot \sin^2 \omega_i \cdot t) dt + \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \sum_{i=2}^n (b_i^2 \cdot \cos^2 \omega_i \cdot t) dt}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что действующее значение выделенного сигнала искажения представляет собой сумму среднеквадратичных значений ВГ на периоде, т. е. сумму квадратов действующих значений ВГ представленных в числителе формулы (1).

Для дискретных измерений сетевого напряжения формула (2) для расчета суммарного коэффициента гармонических составляющих будет выглядеть следующим образом:

$$K_U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N [U_i - U_{(1)i}]^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{(1)i}^2}}, \quad (7)$$

где N – количество дискретных отсчетов за период; U_i – сетевое напряжение в i -ом отсчете; $U_{(1)i}$ – напряжение ОГ в i -ом отсчете.

Предлагаемый метод оценки предполагает использование математического аппарата Фурье-преобразования только для выделения основной (первой) гармоники сигнала, что значительно сокращает количество необходимых вычислений. Однако даже выделение основной гармоники можно дополнительно облегчить при использовании некоторых алгоритмов, например алгоритма модифицированного синус-преобразования [5, 6].

Данный метод можно применять при оценке коэффициента несинусоидальности как напряжений, так и потребляемых токов при оценке уровня эмиссии ВГ тока в сеть со стороны потребителя. Следует отметить, что использование предлагаемого метода позволяет проводить оценку суммарного коэффициента гармонических составляющих с учетом гармоник с порядковым номером n больше 40-го. Максимальная частота ВГ, учитываемая в данном методе расчета, ограничивается частотой Найквиста и определяется частотой дискретизации при измерениях напряжения или тока.

Литература

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
2. ГОСТ 30804.4.7-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. М.: Стандартинформ, 2013.
3. ГОСТ 30804.3.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2014.
4. ГОСТ 30804.3.12-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2014.
5. Мамаев В. А., Кононова Н. Н. Определение параметров гармонического сигнала на основе скалярного произведения соответствующих векторов // Релейная защита. 2015. № 2.
6. Мамаев В. А., Кононова Н. Н. Определение параметров гармоник несинусоидального сигнала на основе модифицированного синус-преобразования // Известия вузов. Электромеханика. 2014. № 3.