

УДК 621.316

О.Г. ГРИБ (д-р техн. наук, проф.), Р.В. ЖДАНОВ, Д.А. ГАПОН,

А.А. ЗУЕВ (канд. техн. наук)

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»omsroot@kpi.kharkov.ua**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Описан метод измерения параметров электрических сигналов промышленной сети, использующий аппроксимацию входного сигнала функцией специального вида с помощью метода наименьших квадратов. Приведены основные формулы и соотношения. Показаны результаты работы метода на выборочных тестовых сигналах.

Ключевые слова: электрические сети, качество электрической энергии, измерение параметров электропотребления, метод наименьших квадратов.

Постановка проблемы. Решение множества проблем, касающихся обеспечения качественного и бесперебойного питания потребителей электрической энергии, требует выполнения быстрого и точного измерения параметров электрических сигналов питающей сети. Множество разработок как отечественных, так и зарубежных ученых посвящено данному вопросу. При этом, как правило, каждая задача имеет ряд характерных особенностей и предъявляет особые требования к применяемым методам. Так, в задачах релейной защиты и противоаварийной автоматики наибольшее внимание уделяется быстрдействию, зачастую в ущерб другим характеристикам измерителя, а при выполнении учета и контроля на первое место выходит точность получаемых результатов. При выполнении наблюдений за качеством электрической энергии реализуется усреднение значений большинства параметров, полученных путем множественных измерений в течение значительных интервалов времени, что также способствует повышению точности получаемых результатов.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. Спектр применяемых на сегодняшний день алгоритмов для выполнения оценки качества электрической энергии достаточно широк. Наиболее распространенными являются дискретное преобразование Фурье [1-3], вычисление среднеквадратических значений [1-5], адаптивные фильтры и, в частности, фильтр Калмана [3], Вейвлет преобразование [4], Stockwell-преобразование [5, 6] и т.д. Существенным недостатком большинства существующих методов является то, что они не способны корректно учитывать различные искажения входного сигнала. Это может негативно отразиться на точности измерения и работоспособности устройства при возникновении различных переходных процессов.

Целью данной статьи является описание метода измерения основных параметров электрического сигнала, в основе которого лежит аппроксимация кривой входного сигнала специальной функцией с помощью метода наименьших квадратов. Такой подход позволяет получить достаточно гибкий алгоритм, который может быть успешно применен практически во всех приложениях требующих измерения параметров электрической сети.

Основная часть. Для того, чтобы получить как можно более полное описание сигнала применяется аппроксимирующая функция вида:

$$g(t) = r_0 + r_1(t - t_c) + (1 + k_1(t - t_c)) \times \left[c_{1s} \sin(\psi(t)) + c_{1c} \cos(\psi(t)) + \sum_j (c_{j,s} \sin(j\psi(t)) + c_{j,c} \cos(j\psi(t))) \right] \quad (1)$$

где t_c - время соответствующее моменту середины интервала аппроксимации; c_{1s} и c_{1c} - коэффициенты синусоидальной и косинусоидальной составляющих основной гармоник; $j = 2, 3, 4, \dots$ - номер высшей гармоник; $c_{j,s}$, $c_{j,c}$ коэффициенты синусоидальной и косинусоидальной составляющих j гармоник; k_1 - коэффициент зависящий от скорости изменения амплитуды; r_0 - постоянная составляющая сигнала; r_1 - линейная составляющая; $\psi(t)$ - фаза, описываемая выражением:

$$\psi(t) = \omega \cdot (t - t_c) + \frac{\nu \cdot (t - t_c)^2}{2}, \quad (2)$$

где ω - значение частоты в момент времени t_c ; ν - скорость изменения частоты.

Такое описание, кроме наличия высших гармоник, позволяет учитывать следующие виды искажений:

- линейно изменяющуюся частоту со скоростью ν ;

- линейно изменяющуюся амплитуду с скоростью k_1 ;

- наличие постоянной и аperiodической составляющих, аппроксимируемые линейной функцией $r_0 + r_1(t - t_c)$. Очевидно, что в общем случае закон изменения амплитуды, частоты и аperiodической составляющей несколько сложнее, однако при небольшой длительности интервала наблюдения линейная аппроксимация будет достаточно точной. Применение более сложных зависимостей увеличивает число неизвестных, что, в свою очередь, приводит к увеличению числа уравнений и, для сохранения той же точности, требует большего интервала наблюдения.

Целевая функция метода наименьших квадратов имеет вид:

$$M = \sum_i (y_i - g(t_i))^2. \quad (3)$$

Система уравнений получается из выражения (3) путем выделения частных производных по всем неизвестным и приравнованием их к нулю. Аналитическая запись этих уравнений является громоздкой и, поэтому, не приводится. Большинство уравнений являются линейными, что позволяет применять для решения системы метод Гаусса-Зейделя. Поиск корней трансцендентных уравнений относительно частоты и скорости ее изменения $\sum_i \left[(y_i - g(t_i)) \frac{\partial g(t_i)}{\partial \omega} \right] = 0$, $\sum_i \left[(y_i - g(t_i)) \frac{\partial g(t_i)}{\partial v} \right] = 0$ выполняется методом Ньютона. Для повышения быстродействия функции синуса и косинуса могут быть сохранены в табличной форме.

После нахождения коэффициентов (1) могут быть найдены параметры электрического сигнала, такие как амплитуда и фаза основной гармоники соответственно: $a_1 = \sqrt{c_{1s}^2 + c_{1c}^2}$, $\varphi_1 = \arctan\left(\frac{c_{1s}}{c_{1c}}\right)$. Аналогичным

образом могут быть найдены амплитуды и фазы высших гармонических составляющих: $a_j = \sqrt{c_{j,s}^2 + c_{j,c}^2}$,

$\varphi_j = \arctan\left(\frac{c_{j,s}}{c_{j,c}}\right)$. Значение частоты и скорости ее изменения находятся соответственно как: $f = \frac{\omega}{2\pi}$,

$v_f = \frac{v}{2\pi}$. Кроме того, метод позволяет выполнить оценку качества аппроксимации как среднеквадратическое отклонение аппроксимирующей кривой от исходного сигнала, приведенное к амплитуде основной гармоники

$$\delta = \frac{1}{a_1} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(y_i - g(t_i))^2]}. \quad (4)$$

В нормальном режиме работы величина δ будет стремиться к нулю, и определяться, в первую очередь, погрешностью квантования. В случае же, когда исходный сигнал содержит составляющие не входящие в аппроксимирующий полином, величина δ резко возрастает, что позволяет говорить о том, что результаты измерений могут значительно отличаться от истинных значений. Это свойство может быть с успехом применено, например, при принятии решения об отключении устройством релейной защиты или автоматики.

Описанный метод может быть с успехом применен в большинстве приложений, требующих измерения рассмотренных параметров электрического сигнала. Выгодной отличительной особенностью данного метода является возможность произвольного выбора интервала наблюдения, в том и числе с длительностью не кратной целому числу периодов основной гармоники исследуемого сигнала. Так, в зависимости от задачи, могут применяться выборки длительностью от 10 до 200 мс, что соответствует 0,5 - 10 периодам основной гармоники номинальной частоты 50 Гц. Следует отметить, что при длительностях времени наблюдения менее одного периода степень достоверности определенных значений k_1 , r_0 , r_1 , ω и v является низкой, вследствие чего, данные коэффициенты рекомендуется исключать. Значения k_1 , r_0 , r_1 и v следует принимать равными нулю, а значение ω принимать равным номинальному, либо измеренному дополнительно, например, с помощью большего интервала наблюдения. Второй вариант является более предпочтительным, так как способствует сохранению точности измерения независимо от отклонения значения частоты от номинального.

На рис. 1 показаны фрагменты измерений основных параметров при длительностях выборки, от $\frac{1}{2}$ периода (НК 0.5) до 3 периодов (НК 3.0). Измерение частоты проводилось по выборкам из 2-х, 3-х, 4-х и 5-и периодов основной гармоники.

Эффективность метода была проверена путем макетных испытаний, а также математического моделирования. В качестве исходных данных применялись как искусственно сгенерированные данные, так и кривые, полученные путем осциллографирования реальных токов и напряжений в промышленной сети с напряжениями от 0,4 до 110 КВ.

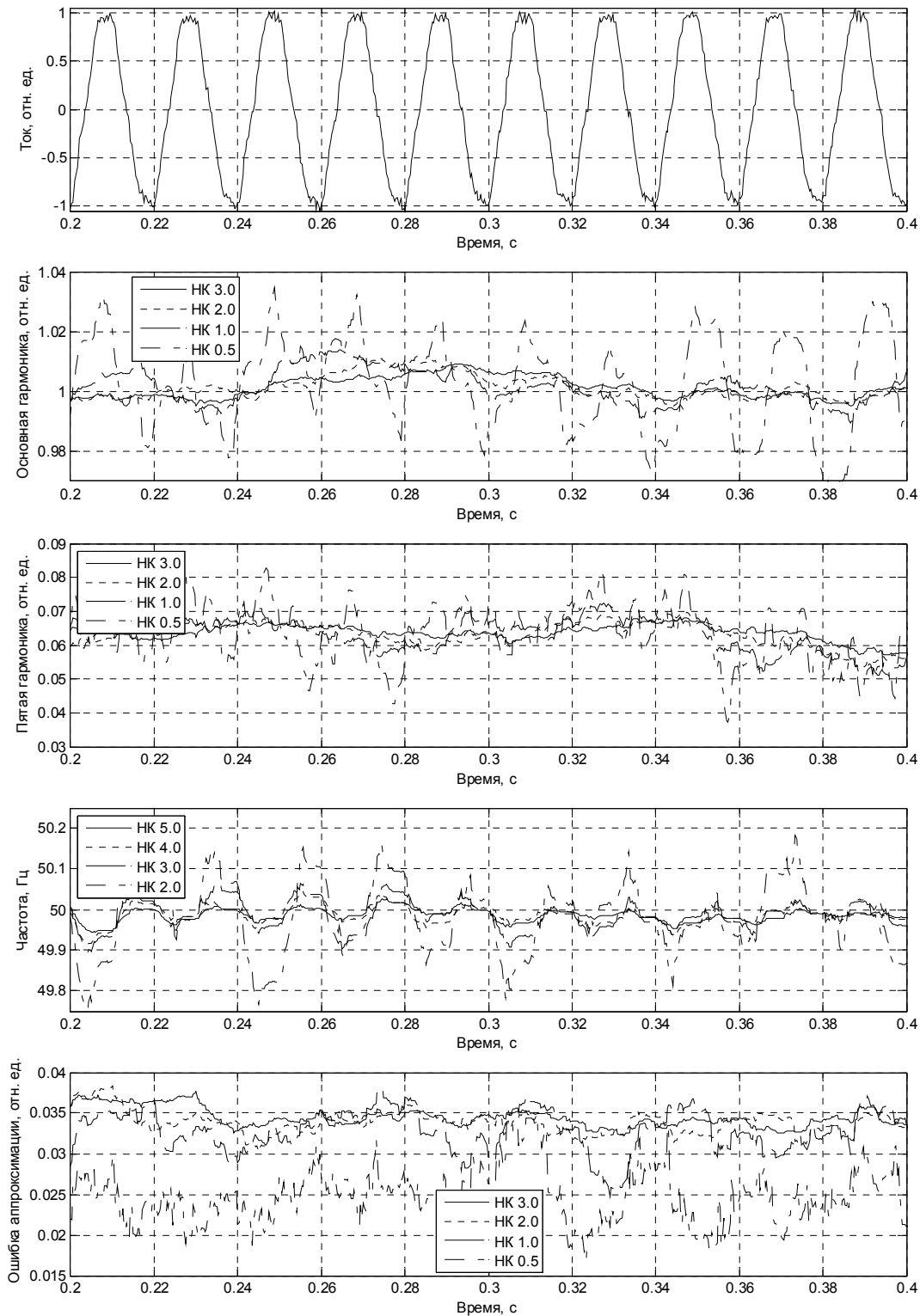


Рисунок 1 – Измерение основных параметров токового сигнала

В качестве исходного сигнала использовался токовый сигнал со значительным уровнем высших гармонических составляющих. При нахождении аппроксимации измерялись уровни основной и нечетных гармоник до 9-й включительно, а также значение частоты исходного сигнала.

Анализ результатов показывает, что длительность интервала наблюдения, соответствующая двум и более периодам основной гармоники позволяет измерять амплитуды гармонических составляющих с точность не хуже 1% без применения какой-либо предварительной фильтрации. Применение меньших интервалов наблюдения может применяться для обнаружения кратковременных возмущений в составе сигнала.

Для выполнения измерения частоты могут быть рекомендованы длительности интервала наблюдения от 2 до 5 периодов основной гармоники. Скорость изменения частоты, особенно при наличии существенных

нелинейных искажений входного сигнала, требует времени наблюдения, соответствующего не менее 5 периодов основной гармоник. Максимальная длительность интервала наблюдения ограничена, в первую очередь, диапазоном сходимости уравнения по частоте. Так, при времени наблюдения соответствующей 10 периодам основной гармоник обеспечивается сходимость при отклонении начального приближения частоты от ее действительного значения ± 10 Гц. Соответственно, при выборке из 5 периодов гарантирована сходимость в диапазоне ± 20 Гц, и т.д.

На рис. 2 показаны примеры аппроксимаций при различных длительностях выборки (а – 1/2 периода, б – 1 период, в – 2 периода и г – 3 периода основной гармоник).

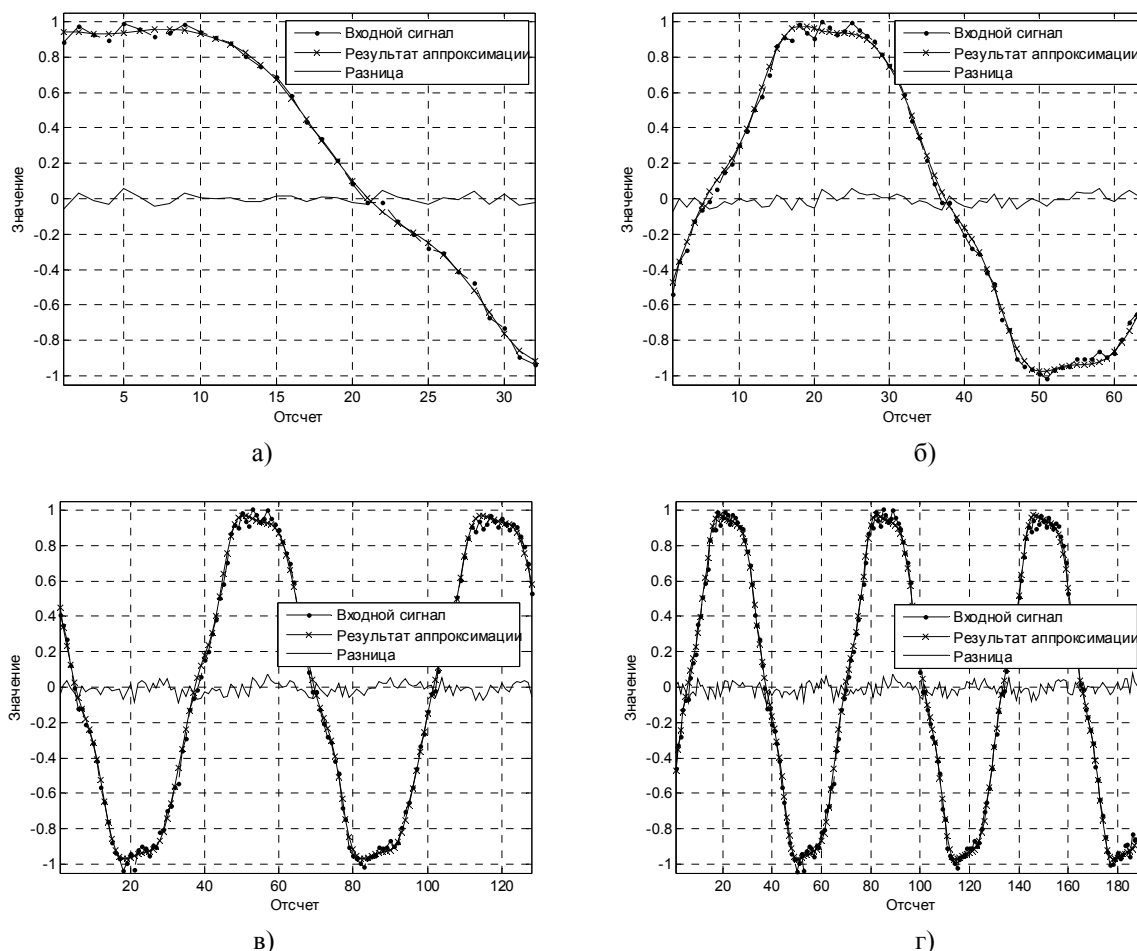


Рисунок 2 – Примеры аппроксимаций с различной длительностью интервала наблюдения

Из рисунков следует, что ошибка аппроксимации в первую очередь обусловлена наличием в сигнале высокочастотных составляющих, не учтенных при выборе аппроксимирующей функции. Повышение точности может быть достигнуто за счет введения указанных составляющих либо за счет подавления высших гармоник при помощи фильтра нижних частот. Первый способ предпочтительнее, но требует более значительного увеличения объема вычислений. Таким образом, выбор аппроксимирующей функции должен производиться с учетом производительности аппаратных средств, на которых будет выполняться измерение.

Выводы. Рассмотренный метод обладает высоким потенциалом и может с успехом применяться в самых разных задачах применительно к энергетике. Основными его достоинствами является его гибкость и высокая эффективность. Кроме того, применение оценки качества аппроксимации позволяет значительно расширить устойчивость функционирования измерительных органов к всевозможным возмущениям, вызванным переходными процессами в энергосистеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контроль и учет электроэнергии в современных системах электроснабжения / В.И. Васильченко, О.Г. Гриб, Г.А. Сендерович и др. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. – 204с.
2. Контроль потребления электроэнергии с учетом ее качества / О.Г. Гриб, В.И. Васильченко, Г.А. Сендерович, П.Г. Щербакова и др.; под ред. О.Г. Гриба. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – 444с.
3. Gu, I. Y. H.; Styvaktakis, E. "Bridge the gap: signal processing for power quality applications" Electric Power Systems Research, 2003, vol. 66, no. 1, pp. 83–96.

4. Wang, M.; Rowe, G. I.; Manishev, A. V. "Classification of power quality events using optimal time-frequency representations, theory and application" IEEE Trans. Power Del. 2004, vol. 19, no. 3, pp. 1496–1503.
5. Gargoom, A.M.; Ertugrul, N.; Soong, W.L. "A comparative study on effective signal processing tools for power quality monitoring" Power Electronics and Applications, European Conference, 2005, pp.10-20.
6. Panigrahi, B.K.; Sinha, S.K.; Mohapatra, A.; Dash, P.; Mallick, M.K. "A Comparative Study of Signal Processing and Pattern Recognition Approach for Power Quality Disturbance Classification" IETE J Res, 2011, no. 57, pp. 5-11.

REFERENCES

1. Vasilchenko V.I., Gryb O.G., Senderovich G.A. *Kontrol i uchet elektroenergii v sovremennih sistemah elektrosnabzhenia* [Control and accounting of electricity in a modern power] – Belgorod: Izd-vo BGTU, 2009. – 204 p.
2. Gryb O.G., Vasilchenko V.I., Senderovich G.A., Sherbakova P.G. *Kontrol potreblenia elektroenergii s uhetom jejo kachestva* [Control electricity consumption for its quality] – Kharkov: HNURE, 2010. – 444 p.
3. Gu I. Y. H., Styvaktakis E. Bridge the gap: signal processing for power quality applications. Electric Power Systems Research, 2003, vol. 66, no. 1, pp. 83–96.
4. Wang M., Rowe G. I., Manishev A.V. Classification of power quality events using optimal time-frequency representations, theory and application. IEEE Trans. Power Del. 2004, vol. 19, no. 3, pp. 1496–1503.
5. Gargoom A.M., Ertugrul N., Soong W.L. A comparative study on effective signal processing tools for power quality monitoring. Power Electronics and Applications, European Conference, 2005, pp.10-20.
6. Panigrahi B.K., Sinha S.K., Mohapatra A., Dash P., Mallick M.K. A Comparative Study of Signal Processing and Pattern Recognition Approach for Power Quality Disturbance Classification. IETE J Res, 2011, no. 57, pp. 5-11.

Надійшла до редакції 25.03.2013

Рецензент: Е.Г. Курінний

О.Г. ГРИБ, Р.В. ЖДАНОВ, Д.А. ГАПОН, А.О. ЗУСВ
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Метод вимірювання показників якості та енергоспоживання в електричних мережах. Описано метод вимірювання параметрів електричних сигналів промислової мережі, який використовує апроксимацію вхідного сигналу функцією спеціального виду за допомогою методу найменших квадратів. Наведено основні формули і співвідношення. Показані результати роботи методу на вибіркових тестових сигналах.

Ключові слова: електричні мережі, якість електричної енергії, вимірювання параметрів електроспоживання, метод найменших квадратів.

O. GRYB, R. ZHDANOV, D. GAPON, A. ZUEV
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Power Quality and Consumption Estimation Method. The most common methods, used in power solutions are discrete Fourier transform, calculation of RMS values, adaptive filters, wavelet transform, Stockwell-transform. A major shortcoming of existing methods is that they can not properly take into account the various input distortions. This may affect accuracy and efficiency of the device while the various transient events. The measurement method of power signals based on least square approximation is described in this paper. Curve fit function includes high harmonics, frequency, it's rate of change and linear components. Goals of method are good flexibility and performance. Measuring time can be chosen between half to ten periods of nominal frequency with no penalty while interval is not integer number of periods. Also, this method allows to assess the quality of approximation as the standard deviation of the curve fit of the original signal, referred to the amplitude of the fundamental harmonic. Application of quality assessment approximations can significantly enhance the sustainability of the measuring elements to all kinds of disturbances caused by transients in the system. On other hand, method demands powerful hardware for real time calculation. Simulation results on highly corrupted current signal are given. Simulation results confirm the high efficiency and stability of the method. For estimating amplitude of the harmonics enough two to three periods of the fundamental harmonic, while high accuracy measurements of frequency demands more than five periods. Described method can be successfully used in many applications that require measurement of the considered parameters of the electric signal.

Keywords: power system, power quality, measurement of electricity parameters, least squares method.