



УДК 621.314

А. В. Волошко, канд. техн. наук
Ин-т энергосбережения и энергоменеджмента при НТУУ «КПИ»
(Украина, 03056, Киев, ул. Борщаговская, 115,
тел. (044) 4068036, e-mail: a-voloshko@yandex.ru)

Выполнение гармонического анализа с помощью вейвлет-преобразования

Рассмотрено применение вейвлет-преобразования для определения некоторых показателей качества электрической энергии (гармонических групп и интергармонических подгрупп).

Розглянуто застосування вейвлет-перетворення для визначення деяких показників якості електричної енергії (гармонічних груп та інтергармонічних підгруп).

К л ю ч е в ы е с л о в а: вейвлет-анализ, гармонический анализ, показатели качества электрической энергии.

Оценка эффективности существующих алгоритмов анализа формы волны тока и напряжения заключается в определении точности и быстродействия. Широко используемым методом проведения гармонического анализа является дискретное преобразование Фурье (ДПФ), в основе которого лежит представление о том, что любую периодическую функцию можно представить в виде суммы отдельных гармонических составляющих (синусоид и косинусоид с различными амплитудами и частотами), т.е. в виде разложения в ряд Фурье.

Для сокращения времени, необходимого для проведения ДПФ, разработан алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). В настоящее время этот алгоритм занимает почти монопольное положение не только среди алгоритмов спектрального оценивания, но и в других областях обработки информации. Однако алгоритмы Фурье имеют несколько источников методических погрешностей, которые приводят к снижению точности результатов гармонического анализа и к их качественному искажению.

Главными недостатками алгоритмов Фурье являются 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 обособлен-

ной гармонической компоненты. Для повышения точности проведения БПФ применяется ряд дополнительных математических операций. Так, для исключения эффекта рассеяния [1] (когда длина временной выборки не равна периоду анализируемой функции) выполняется синхронизация частоты дискретизации с частотой исследуемого сигнала, дополнение нулями исходной выборки анализируемого сигнала [2] либо применяются временные или спектральные окна [3]. Эффективным средством уменьшения спектральных утечек является также применение оконных функций в соответствии с интерполяционным алгоритмом [4].

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

Постановка задачи. В связи с постоянно возрастающим числом задач в области электроэнергетики, требующих решения с использованием современных математических методов и технических средств, достаточно актуальным представляется поиск путей усовершенствования существующих методов определения качественных характеристик электропотребления и гармонического анализа.

В работах [5, 6] представлена пространственно-временная модель определения амплитуды и фазы основной частоты и ее гармоник в реальном масштабе времени и несинусоидальных режимах. Получены эффективные результаты исследований по определению среднеквадратических значений гармоник [7]. Известно также применение фильтра Калмана для оценки гармонического состава сигнала. Метод, определяемый как модель в пространстве состояний для отслеживания амплитуды и фазы основной частоты и ее гармоник, описан в работах [8—10]. Широко известны такие подходы к проведению гармонического анализа, как метод наименьших квадратов (Singular Value Decomposition) [11], метод Прони [12], метод статистического анализа [13, 14], метод гребенчатых фильтров и др.

В настоящее время все более широкое распространение получает вейвлет-преобразование, в котором используются специальные функции аппроксимации, называемые материнскими вейвлетами. Вейвлет Ψ — это функция с нулевым средним значением,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0,$$

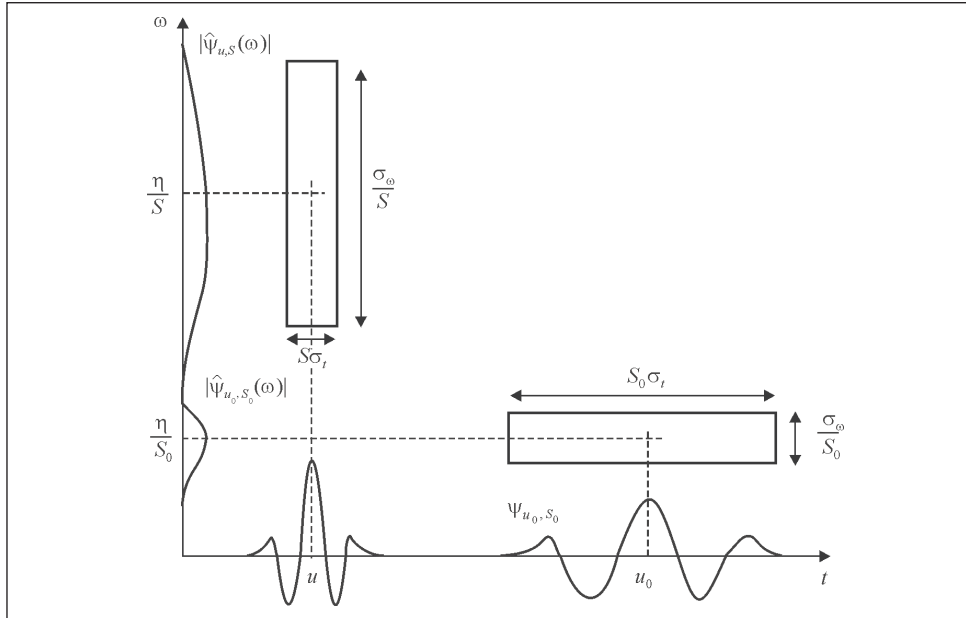


Рис. 1. Частотно-временной прямоугольник для вейвлетов $\Psi_{u,S}$ и Ψ_{u_0,S_0}

с параметром растяжения S и параметром сдвига u :

$$\Psi_{u,S} = \frac{1}{\sqrt{S}} \Psi\left(\frac{t-u}{S}\right).$$

Вейвлет-преобразование функции f с масштабом S и сдвигом u вычисляется корреляцией f с вейвлет-атомом:

$$Wf(u, S) = \langle f, \Psi_{u,S} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{S}} \Psi^*\left(\frac{t-u}{S}\right) dt, \quad (1)$$

где Ψ^* — комплексно сопряженный вейвлет. Применив формулу Парсеваля, выражение (1) запишем в виде интеграла по частоте:

$$Wf(u, S) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^* dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) \hat{\Psi}_{u,S}^* d\omega. \quad (2)$$

Как следует из (2), вейвлет-коэффициент $Wf(u, S)$ зависит от значений $f(t)$ и $\hat{f}(\omega)$ в частотно-временной области, где сосредоточены энергии $\Psi_{u,S}$ и $\hat{\Psi}_{u,S}^*$. Изменение во времени гармонических составляющих можно обнаружить по сдвигу и масштабу вейвлет-коэффициентов наибольшей амплитуды.

Из рис. 1 видно, что при уменьшении масштаба S носитель становится меньше по времени, но протяженность по частоте увеличивается, и прямо-

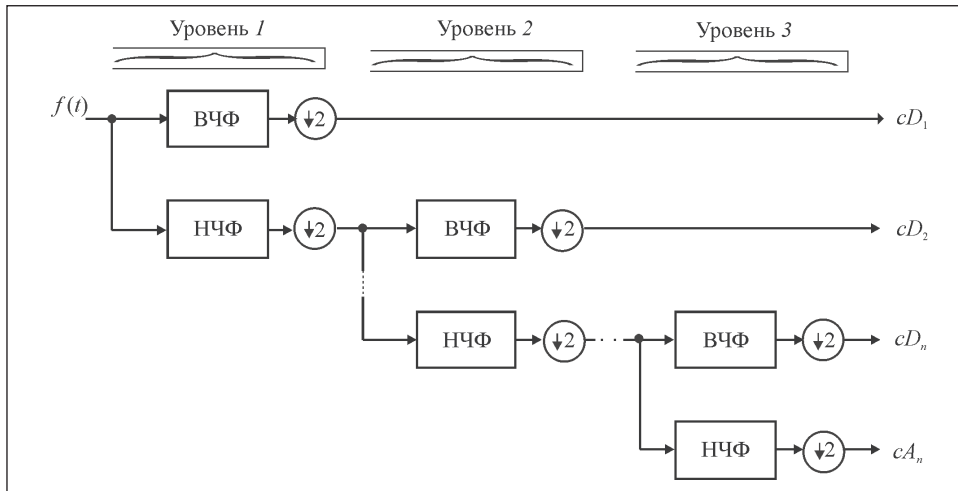


Рис. 2. Дерево вейвлет-разложения по алгоритму Малла: ВЧФ и НЧФ — высокочастотный и низкочастотный фильтры; $\downarrow 2$ — децимация (уменьшение числа коэффициентов в два раза)

угольник Гейзенберга* сдвигается в область высоких частот. При этом площадь прямоугольника остается постоянной. Теоретически непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) состоит из бесконечного числа различных вейвлетов, которые создаются в результате модификации коэффициентов по масштабу и времени оригинальным материнским вейвлетом. Следовательно, технология НВП приемлема для проведения анализа сигналов с высокой разрешающей способностью и является основой для определения их параметров.

Известны два основных подхода к определению гармоник и фликера с помощью вейвлет-анализа. Первый основан на кратномасштабном анализе (КМА) с использованием банка вейвлет-фильтров на первом шаге и применении НВП подгрупп на втором шаге, второй — на использовании комплексного вейвлет-преобразования или НВП.

Первый подход идентификации гармоник в электрических сетях на основе использования комбинации дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) и НВП относительно количественной оценки частотных гармоник, их амплитуды и фазы представлен в работе [6].

На первом шаге выполнена декомпозиция частотного спектра сигнала на два поддиапазона на основе ДВП с помощью функций Добеши высоких

* Согласно принципу неопределенности Гейзенберга невозможно одновременно измерить частоту и время с произвольно высокой точностью.

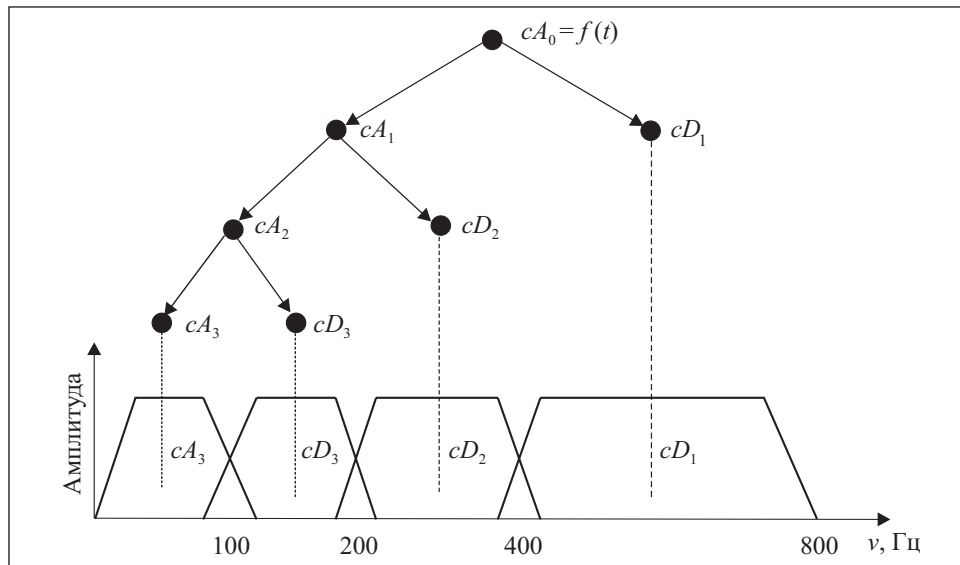


Рис. 3. Неравномерные частотные полосы КМА

порядков. На втором шаге применено НВП к ненулевым поддиапазнам. Данный метод успешно компенсирует частотные несовершенства фильтра при использовании банка вейвлет-фильтров.

В более поздних работах [15—25] описано применение вейвлет-анализа для усовершенствования АЧХ фильтров, анализа субгармоник, использования трапецидальной комплексной вейвлет-функции, различных видов материнских вейвлетов.

Быстрое вейвлет-преобразование по алгоритму Малла [26] представляет собой так называемый КМА (рис. 2). При переходе с уровня 0 на уровень 1 входная функция $f(t)$ с помощью ВЧФ и НЧФ разделяется на частотные полосы, характеризуемые аппроксимирующими cA_i и детализирующими cD_i коэффициентами. При переходе с уровня 1 на уровень 2 (и т.д.) аппроксимирующие коэффициенты в свою очередь разделяются с помощью фильтров на низкочастотные (аппроксимирующие) и высокочастотные (детализирующие) коэффициенты (рис. 3) [27].

По данному алгоритму можно определять среднеквадратические величины тока, напряжения и мощности [28, 29], однако он не позволяет определять среднеквадратические значения тока, напряжения и мощности отдельных гармонических компонент. Поэтому в настоящее время для проведения гармонического анализа используется пакетное вейвлет-преобразование [30], с помощью которого, в отличие от алгоритма Малла,

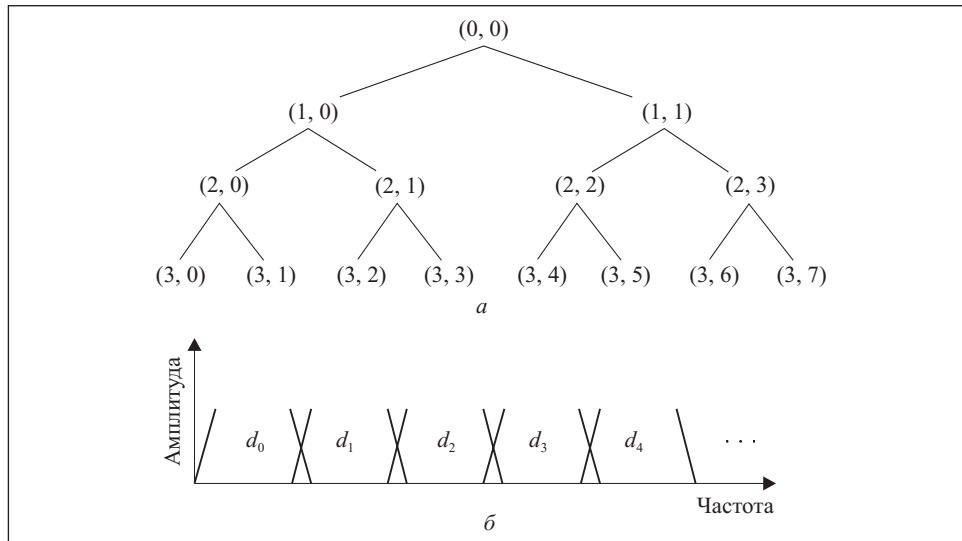


Рис. 4. Дерево декомпозиции (а) и частотные полосы (б)

декомпозиции на всех уровнях подвергаются и аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты (рис. 4).

Возможности применения пакетного вейвлет-преобразования для проведения время-частотного гармонического анализа показаны во многих работах. В частности, для повышения быстродействия, точности определения гармоник, исключения спектральных утечек используются различные способы, основанные на преобразовании Гильберта [31], применении различного рода фильтров [32], комбинации нескольких методов [33]. В [29] и [34] определена контрольно-измерительная аппаратура для измерения гармоник и интергармоник электрических токов и напряжений в системах электроснабжения. В качестве метода измерений предполагается использование ДПФ с применением временного окна Хэннинга при потере синхронизации. При этом длительность временного интервала измерения должна быть равна десяти периодам основной частоты при прямоугольном окне взвешивания. Не исключаются и другие принципы анализа, такие как применение банков цифровых фильтров или вейвлет-преобразования.

В отличие от преобразования Фурье вейвлет-анализ при измерении частотно-временных изменений спектральных компонент информационного сигнала имеет другое частотно-временное разрешение. В связи с этим проведем сравнительный анализ расчета гармонических компонент с помощью ДПФ и вейвлет-анализа в соответствии с требованиями, приведенными в [29].

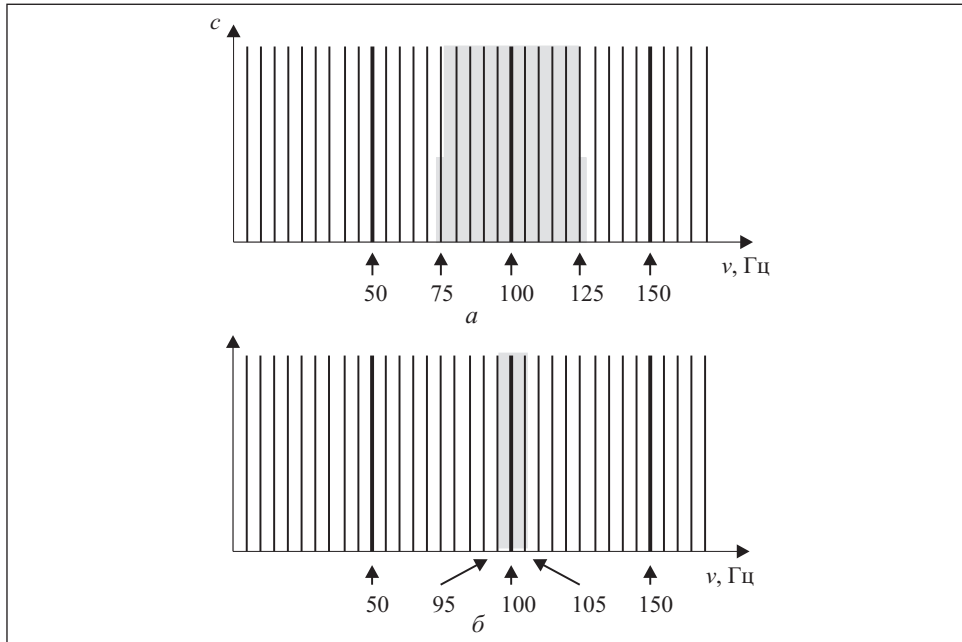


Рис. 5. Схема образования группы (а) и подгруппы (б) гармоник второго порядка

Практическая реализация. Как утверждается в [33, 34], для обеспечения более точного представления гармоник при наличии нелинейных нагрузок в системе электроснабжения в группы гармоник включаются промежуточные спектральные линии. При этом среднеквадратическое значение гармонической группы (рис. 5, а) равно корню квадратному из суммы квадратов среднеквадратических значений гармонической составляющей и примыкающих к ней спектральных составляющих, соответствующих данной длительности временного интервала измерения [29, 34]. Следовательно, для оценки гармоник результаты проведения ДПФ должны быть сгруппированы в соответствии с формулой

$$G_{g,n}^2 = \frac{G_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 G_{k+i}^2 + \frac{G_{k+5}^2}{2}, \quad (3)$$

где $G_{g,n}$ — среднеквадратическое значение гармонической группы порядка n ; G_{k+i} — среднеквадратическое значение спектральной составляющей, соответствующей частотной позиции ДПФ; n — порядок гармоники, k/n ; k — компонента Фурье; N — число периодов в окне времени измерений, $N = 10$. Суммирование квадратов действующих значений гармоник возможно, так как момент взаимной корреляции между гармониками равен нулю.

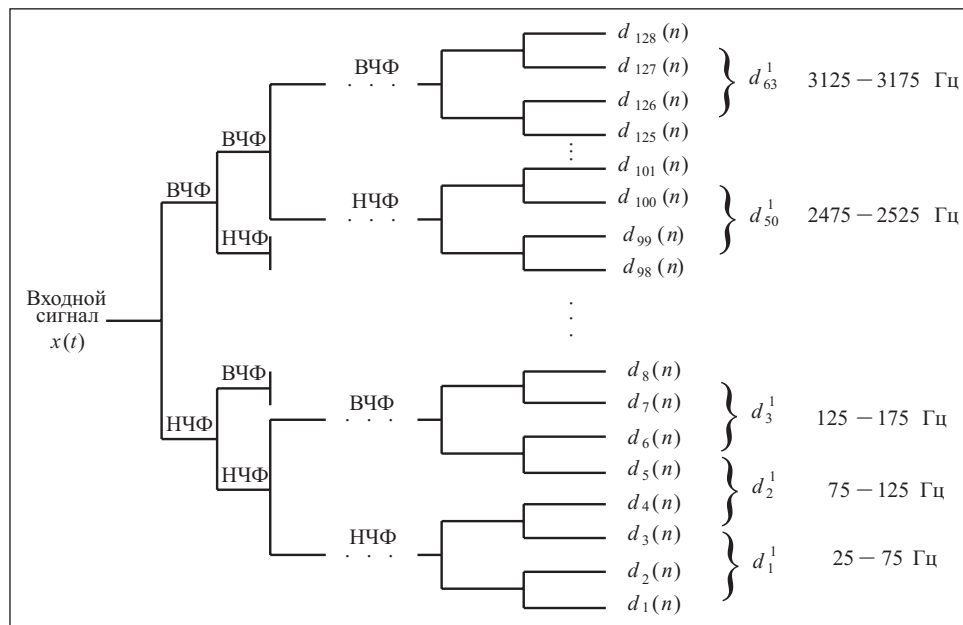


Рис. 6. Дерево вейвлет-пакетного разложения с группированием частотных полос: $d_1(n), \dots, d_{128}(n)$ — вейвлет-коэффициенты седьмого уровня разложения (ширина частотной полосы $3200/128=25$ Гц)

Среднеквадратическое значение гармонической подгруппы (рис. 5, б) равно корню квадратному из суммы квадратов среднеквадратических значений гармонической составляющей и двух непосредственно примыкающих к ней спектральных составляющих:

$$G_{Sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 G_{k+i}^2.$$

Алгоритм определения гармонических групп [30]. Согласно [29] гармонический анализ необходимо проводить до 50-й гармоники, что при временном окне 200 мс, частотном разрешении 5 Гц и необходимости выполнения условий теоремы Шеннона (Котельникова) обуславливает частоту дискретизации входного сигнала 6,4 кГц и вейвлет-разложение до уровня $j = 7$.

В соответствии с (3) сгруппируем вейвлет-коэффициенты седьмого уровня разложения в 63 группы ($d'_1 \dots d'_{63}$) с компонентом частоты гармоники (четным и нечетным) в центре каждой группы с интервалом 50 Гц (рис. 6). Определим среднеквадратическое значение каждой группы ($d'_1 \dots d'_{63}$) груп-

пируемой частоты как корень квадратный среднего квадрата коэффициентов двух подгрупп, входящих в каждую группу [8]:

$$x_{\text{ср. кв}}(1) = \sqrt{\frac{1}{2}(d'_1)^2} = \sqrt{\frac{1}{2}(d_2(n) + d_3(n))^2}.$$

В общем случае среднеквадратическое значение сигнала любого узла (j, p) определяем с помощью вейвлет-коэффициентов $d_{j, k}$:

$$x_{\text{ср. кв}}(j, p) = \sqrt{\sum_{k=0}^{2^j-1} (d_{j, k}^p)^2}.$$

Следовательно, среднеквадратическое значение всех гармонических групп сигнала на любом уровне вейвлет-декомпозиции определяем так:

$$x_{\text{ср. кв}}(j) = \sqrt{\sum_{p=0}^{2^j-1} (x_{\text{ср. кв}}(j, p))^2}.$$

В качестве исследуемого сигнала рассмотрена функция $x(t) = \sqrt{2}(220\sin(\omega t - 19,91^\circ) + 55\sin(3\omega t - 35^\circ) + 30\sin(5\omega t + 110^\circ) + 120\sin(7\omega t + 19^\circ))$, имеющая первую, третью, пятую и седьмую гармоники (рис. 7) [9].

Расчет гармонических групп проведен с помощью ДПФ [1] и вейвлет-анализа с различными типами вейвлетов. Результаты вычислений представлены в табл. 1. В качестве вейвлет-функции использованы вейвлеты Добеши, Хаара и Морле [35]. 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

Частотная полоса, Гц	Гармоническая группа	ДПФ	Вейвлет-анализ			
			Добеши		Хаара	Морле
			db2	db9		
25—75	1	220,001	220,0013	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
Сумарное значение		258,27	258,267	259,10	257,51	258,35
Погрешность, %		0,015	0,016	-0,3	0,309	-0,0155

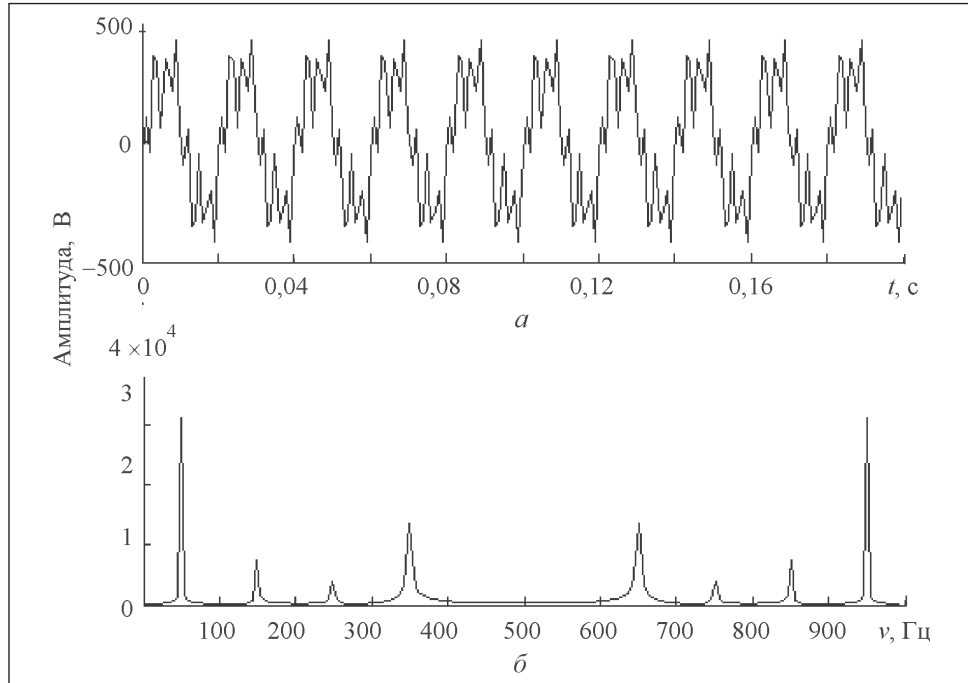


Рис. 7. Исследуемый сигнал (а) и его АЧХ (б): частота дискретизации 800 Гц (0,00125 с); уровень вейвлет-разложения $j = 4$ (16 отсчетов на период); временное окно — 10 периодов

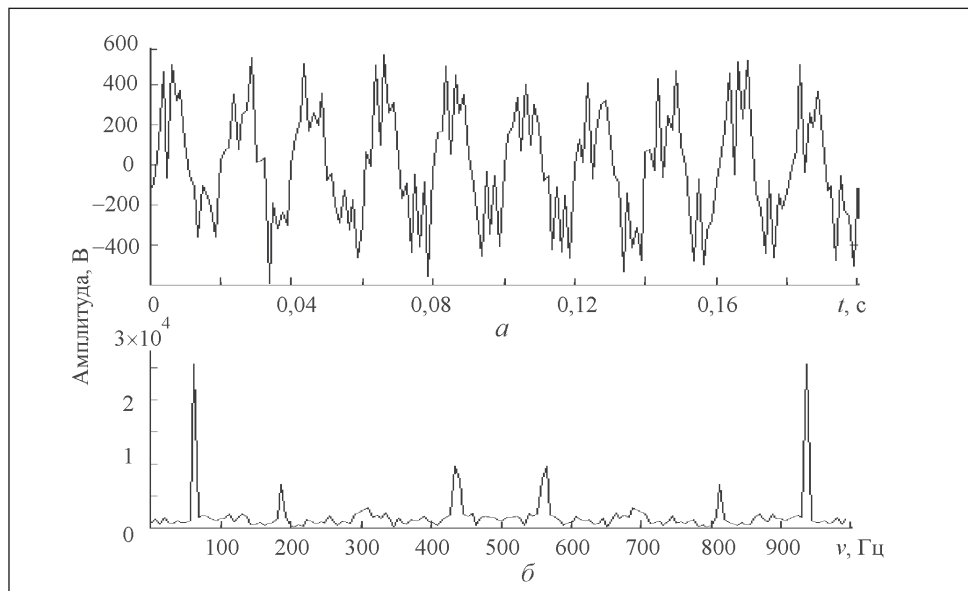


Рис. 8. Зашумленный сигнал (а) и его АЧХ (б)

Таблица 2

Частотная полоса, Гц	Гармоническая группа	ДПФ	Вейвлет-анализ			
			Добеши		Хаара	Морле
			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
Сумарное значение		259,89	258,48	259,10	260,84	258,35
Погрешность, %		-0,612	-0,0658	-0,306	-0,979	-0,058

Исследуем результаты определения гармонических групп при наличии искаженного сигнала в электрических сетях (рис. 8). Для этого в электрический сигнал $x(t)$ введем искажения. Характер АЧХ, определенной с помощью БПФ, свидетельствует о том, что шум вызывает 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 (см. рис. 7). Сравнивая полученные результаты видим, что применение пакетного вейвлет-преобразования для гармонического анализа искаженного сигнала в электрических сетях является более предпочтительным по сравнению с ДПФ.

В дальнейших исследованиях точности гармонического анализа при наличии шума в случае использования вейвлет-анализа высокочастотные составляющие (детализирующие вейвлет-коэффициенты) удалялись из спектра в результате ограничения их уровня некоторым его пороговым значением, а в случае ДПФ применялись окна. Более эффективным при подавлении влияния шума на результаты гармонического анализа оказался выбор жесткого порога [27, 36] ограничения величины детализирующих коэффициентов по сравнению с применением оконных функций.

Выводы

1. Результаты исследования подтвердили, что обеспечение более точного анализа гармонического состава исследуемого сигнала при наличии нелинейных нагрузок в системе электроснабжения требует включения в группы гармоник промежуточных спектральных линий.

2. При наличии нелинейных искажений в электрической сети наиболее точным методом определения гармонического состава напряжения и тока является вейвлет-анализ.

3. Эффективное повышение точности проведения гармонического анализа может быть достигнуто при предварительной очистке сигнала от шума с последующим вейвлет-анализом (в отличие от применения оконных функций с последующим ДПФ).

The use of the wavelet-transformation for determining some indices of electric power quality (harmonic groups and interharmonic subgroups) has been considered.

1. *Залмазон Л. А.* Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. — М. : Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1989. — 496 с.
2. *Марпл С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. — М. : Мир, 1990. — 584 с.
3. *Блейхут Р.* Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. — М. : Мир, 1989. — 448 с.
4. *Andria G., Savino H., Trotta A.* Windows and Interpolation Algorithms to Improve Electrical Measurement Accuracy // *Transactions on Instrumentation and Measurement*. — 1989. — Vol. 38, № 4. — P. 856—863.
5. *Girgis A., Chang B., Makram E.* A Digital Recursive Measurement for on Line Tracking of Power Systems Harmonics // *IEEE Trans. On Power Delivery*. — 1991. — Vol. 6, № 3. — P. 1153—1160.
6. *Dash P., Pradham A., Panda G.* Frequency Estimation of Distorted Power System Signals Using Extended Complex Kalman Filters // *IEEE Trans. On Power Delivery*. — 1999. — Vol. 14, № 3. — P. 761—766.
7. *Hart D., Uy D., Novosel D. et al* Improving Power Quality // *ABB Review*. — 2000. — Vol. 4, № 1. — P. 12—19.
8. *Girgis A. A., Chang W.B., Makram E. B.* A Digital Recursive Scheme for Online Tracking of Power System Harmonics // *IEEE Transactions on Power Delivery*. — 1991. — Vol. 6, № 3. — P. 1153—1160.
9. *Xaili Ma, Girgis F. F.* Identification and Tracking of Harmonic Sources in a Power System Using a Kalman Filter // *IEEE Transaction on Power Delivery*. — 1996. — Vol. 11, № 3. — P. 1659—1665.
10. *Dasha P. K., Shazia Hasana, Panigrahib B. K.* A Hybrid Unscented Filtering and Particle Swarm Optimization Technique for Harmonic Analysis of Nonstationary Signals // *India Institute of Technology*. — India, 2009.
11. *Kung S. Y., Arun K. S., Bhaskar Rao D. V.* State-space and Singular-value Decomposition-based Approximation Methods for the Harmonic Retrieval Problem // *JOSA*. — 1983. — Vol. 73, Issue 12. — P. 1799—1811.
12. *Osowski S.* SVD Technique for Estimation of Harmonic Components in a Power System: a Statistical Approach // *IEE Proceedings. Generation, Transmission and Distribution*. — 1994. — Vol. 141, Issue 5. — P. 473—479.
13. *Stoica P.* List of References on Spectral Line Analysis // *Signal Processing*. — 1993. Vol. 31, Issue 3. — P. 329—340.
14. *Cameron M. M.* Trends in Power Factor Correction with Harmonic Filtering // *IEEE Transactions on Industry Applications*. — 1993. — Vol. 29, Issue 1. — P. 60—65.

15. *Pham V. J., Wong K. P.* Antidistortion Method for Wavelet Transform Filter Banks and Non-stationary Power System Waveform // IEE Proc. of Generation, Transmission and Distribution. — 2001. — Vol. 148, № 2. — P. 117—122.
16. *Pham V. J., Wong K. P., Watson N., Arvilaga J.* Sub-harmonic State Estimation in Power Systems // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. — 2000. — Vol. 2. — P. 1168—1173.
17. *Zheg T., Makram E. M., Girgis A. A.* Power System Transient and Harmonic Studies Using Wavelet Transform // IEEE Transactions on Power Delivery. — 1999. — Vol. 14, № 4. — P. 1461—1468.
18. *Gu Y. H., Bollen M. H. J.* Time-frequency and Time-scale Domain Analysis of Voltage Disturbance // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2000. — Vol. 15, № 4. — P. 1279—1284.
19. *Driesen J., Graenenbroeck V., Reekmans R., Dommelen V.* Analysing Time-varying Power System Harmonics Using Wavelet Transform // Conf. Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Nechnology Conference. — 1999. — Vol. 1. — P. 474—479.
20. *Wang J., Qiwen R., Wang F., Yanchao J.* Time-varying Transient Harmonic Measurement Based on Wavelet Transform // Proc. International Conf. on Power System Technology. — 1998. — Vol. 2. — P. 1556—1559.
21. *Huang Sh.-J., Hsieh C. T.* Visualizing Time-varying Power System Harmonics Using a Morlet Wavelet Transform Approach // Electric Power Systems Research. — 2001. — Vol. 58, № 2. — P. 81—88.
22. *Zheng T., Makram E. B.* Wavelet Representation of Voltage Flicker // Ibid. — 1998. — Vol. 48, № 2. — P. 133—140.
23. *Zhen R., Qungu H., Lin G., Wenying H.* A New Method for Power Systems Frequency Tracking Based on Trapezoid Wavelet Transform // International Conf. on Advances in Power System Control, Operation and Management. — 2000. — Vol. 2. — P. 364—369.
24. *Huang S. J., Hsieh C. T.* Application of Continues Wavelet Transform for Study of Voltage Flicker-generated Signals // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2000. — Vol. 36, № 3. — P. 925—932.
25. *Chtn M. T., Meliopoulos S.* Wavelet-based Algorithm for Voltage Flicker Analysis // Proc. Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. — 2000. — Vol. 2. — P. 732—738.
26. *Mallat S. G.* Multiresolution Approximation and Wavelet Orthonormal Bases of L2 // Transaction of the American Mathematical Society. — 1989. — Vol. 315. — P. 69—87.
27. *Michalik M., Okraszewski T. M.* Application of the Wavelet Transform to Backup Protection of MV Networks — Wavelet Phase Comparison Method // IEEE Power Tech. Conference, 2003, June 23 — 26. — Bologna, Italy. — 2003. — P. 298—306.
28. *Diego R.J., Barros J.* Global Method for Time-frequency Analysis of Harmonic Distortion in Power Systems Using the Wavelet Packet Transform // Electric Power Systems Research. — 2009. — Vol. 79. — Issue 8. — P. 1226—1239.
29. ГОСТ Р 51317.4.30 — 2008 (МЭК 61000 — 4 — 30). Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.
30. *Vatansever F., Ozdewir A.* A New Approach for Measuring RMS Value and Phase Angle of Fundamental Harmonic Based on Wavelet Packet Transform // Electric Power Systems Research. — 2008. — Vol. 78. — P. 74—79.
31. *Hamid E. Y., Kawasaki Z.* Wavelet Packet Transform for RMS Values and Power Measurements // IEEE Power Eng. Rev. — 2001. — Vol. 21, № 9. — P. 49—51.
32. *Ahmed S. Yilmaz, Ahmed Alkan, Musa H.* Asyali Applications of Parametric Spectral Estimation Methods on Detection of Power System Harmonics // Electric Power Systems Research. — 2008. — Vol. 78. — P. 683—693.

33. *Driesen J., Gherasim G., Belmans R.* Comparison of Dynamic Harmonic Measurement Methods // Seventh Int. Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions.— Cagliari, 2006. — P. 110—116.
34. *ГОСТ Р 51317.4.7 — 2008.* Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств.
35. *Малла С.* Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. — М. : Мир, 2005. — 671 с.
36. *Barros J., Diego R. J.* Application of the Wavelet-Packet Transform to the Estimation of Harmonic Groups in Current and Voltage Waveforms // IEEE Trans. on Power Delivery. — 2006. — Vol. 21, № 1. — P. 533—535.

Поступила 23.01.12;
после доработки 16.03.12

ВОЛОШКО Анатолий Васильевич, канд. техн. наук, доцент Ин-та энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «КПИ». В 1983 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — информационные технологии, вейвлет-анализ.