

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТАБЛИЧНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ

И.А. Чалов, Л.Г. Сидельников*

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет,
*ООО «ТестСервис», г. Пермь, Россия

Описываются перспективы применения гармонического анализа для повышения эффективности диагностики электрооборудования по характеристикам разрядов в изоляции. Рассматриваются особенности применения спектрального анализа к данным электрических измерений. Приводятся основные теоретические положения разложения в ряд Фурье. Сравниваются две основные формы записи ряда Фурье. Приводятся основные сложности, связанные с построением амплитудных и фазовых спектров исходной функции. Представлена последовательность действий при гармоническом анализе табличных экспериментальных данных. Доказывается важная роль фазового спектра в анализе сигнала. Показывается потеря части информации о сигнале в случае использования для анализа только его амплитудного спектра. Демонстрируется влияние формы записи ряда Фурье при синтезе сигнала на полученный результат. Сравнивается возможность обнаружения ошибки в анализе с использованием различных выражений для синтеза. Показывается влияние диапазона значений начальной фазы гармоник на результат анализа. Демонстрируется потеря информации при определении начальной фазы в ограниченном диапазоне значений. Приводятся рекомендации по расширению области значений начальной фазы. Сравниваются спектры периодических и непериодических функций. Демонстрируется изменение результатов анализа Фурье при увеличении и уменьшении значения частоты основной гармоники относительно величины, обратной продолжительности отрезка времени, на котором задана функция. Приводятся рекомендации по выбору значения частоты основной гармоники. Демонстрируется влияние числа гармоник на точность гармонического анализа. Показано увеличение точности при увеличении числа гармоник; появление методических ошибок в анализе при повышении числа гармоник свыше определенного предела. Приводятся рекомендации по выбору числа гармоник.

Ключевые слова: диагностика электрооборудования, разряды в изоляции, гармонический анализ, спектральный анализ, преобразование Фурье, ряд Фурье, период функции, основная гармоника, амплитуда гармоник, начальная фаза гармоник, амплитудный спектр, фазовый спектр, область значений начальной фазы, синтез функции, спектр периодической и непериодической функций, частота основной гармоники, число гармоник.

FEATURES OF SPECTRAL ANALYSIS OF EXPERIMENTAL TABULAR DATA OBTAINED FROM THE ELECTRICAL MEASUREMENTS OF DISCHARGES IN INSULATION

I.A. Chalov, L.G. Sidel'nikov*

Perm National Research Polytechnic University,
*«Test service» LLC, Perm, Russian Federation

Describes the perspectives of harmonic analysis to improve diagnosis of electrical discharges in the characteristics of the insulation. The features of the spectral analysis of the data of electrical measurements. The basic theoretical concepts of Fourier series. Compares two basic forms of the Fourier series. Are the main difficulties associated with the construction of the amplitude and phase spectra of the original function. Outlines for the harmonic analysis of the experimental data table. Proved an important role in the analysis of the phase spectrum signal. Show a loss of signal information in the case of use for analysis only the amplitude spectrum. Demonstrates the influence of the shape of the Fourier series record in the synthesis signal to the result. Comparing the ability to detect errors in the analysis using different expressions for synthesis. Shows the effect of a range of values of the initial phase of harmonics on the analysis. Demonstrates the loss of information when determining the initial phase in a limited range. Makes recommendations to expand the range of the initial phase. Comparing the spectra of periodic and non-periodic functions. Shows how to change the results of Fourier analysis by increasing and decreasing the value of the fundamental frequency with respect to the inverse of the duration of the interval of time in which a given function. Recommendations are given for the choice of the frequency of the fundamental. Demonstrates the effect of harmonics on the accuracy of harmonic analysis. Shown to increase the accuracy by increasing the number of harmonics. Found the appearance of systematic errors in the analysis of an increase in the number of harmonics above a certain limit.

Recommendations are given for the choice of the harmonics.

Key-words: diagnosis of electrical discharges in isolation, harmonic analysis, spectral analysis, Fourier transform, Fourier series, period features, fundamental frequency, the amplitude of the harmonics, the initial phase of the harmonic amplitude spectrum, phase spectrum, the range of the initial phase, the synthesis of function, range of periodic and aperiodic functions, fundamental frequency, the number of harmonics.

Введение

При исследовании разрядов в изоляции электрооборудования возникает необходимость использовать дополнительные параметры сигнала. Для этого может быть использован спектральный анализ. Спектр характеризует форму импульса и в то же время его частотные свойства. Использование спектров может значительно повысить эффективность диагностики электрооборудования. Спектральный анализ позволяет определить частотный диапазон для регистрации тех или иных разрядов. На основе анализа формы спектров можно произвести классификацию разрядов различного типа.

При исследовании импульсов в кабельных линиях анализ спектров позволяет однозначно найти для прямого импульса соответствующий ему отраженный импульс. Это делает возможным более точное определение места дефекта. Спектральный анализ позволяет оценить характеристики затухания импульсов в кабеле, восстановить форму импульса в месте дефекта и более точно определить степень опасности дефекта. При регистрации разрядов в трансформаторном оборудовании с подключением аппаратуры к высоковольтным вводам спектральный анализ позволяет отделить разряды во вводах от разрядов внутри оборудования и разрядов из внешней цепи.

Спектральный анализ широко применяется в различных областях электротехники. Однако при практическом применении этого метода можно столкнуться с определенными сложностями, связанными с неполным его пониманием [1]. В данной статье рассматривается применение Фурье-анализа к табличным экспериментальным данным. Такие данные получают, например, при регистрации частичных разрядов в изоляции электрооборудования.

Основные теоретические положения. Роль фазового спектра в анализе сигнала

Существуют две тождественные формы записи ряда Фурье: через коэффициенты косинусов и синусов [2]:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^N (a_k \cos \omega_1 t + b_k \sin \omega_1 t) \quad (1)$$

и через амплитуды и начальные фазы гармоник:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^N A_k \cos(k\omega_1 t - \varphi_k). \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) $f(t)$ – функция времени; c_0 – постоянная составляющая (среднее значение функции на заданном интервале); k – номер гармоники; ω_1 – круговая частота первой гармоники; t – время; A_k – амплитуда гармоники с номером k ; φ_k – начальная фаза гармоники с номером k .

Часто экспериментальные данные представлены в форме таблицы значений исходной функции времени. В этом случае численное разложение в ряд Фурье заключается в нахождении коэффициентов ряда (1) по формулам [3, 4]

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} f_i \cos \omega_1 k i \Delta t, \quad (3)$$

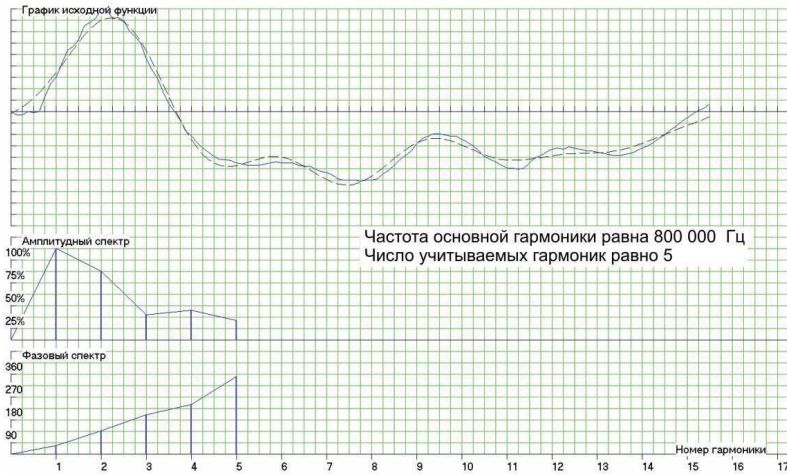
$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} f_i \sin \omega_1 k i \Delta t. \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) i – номер точки; N – число точек на заданном интервале; f_i – значение функции в точке с номером i ; Δt – временной интервал между точками.

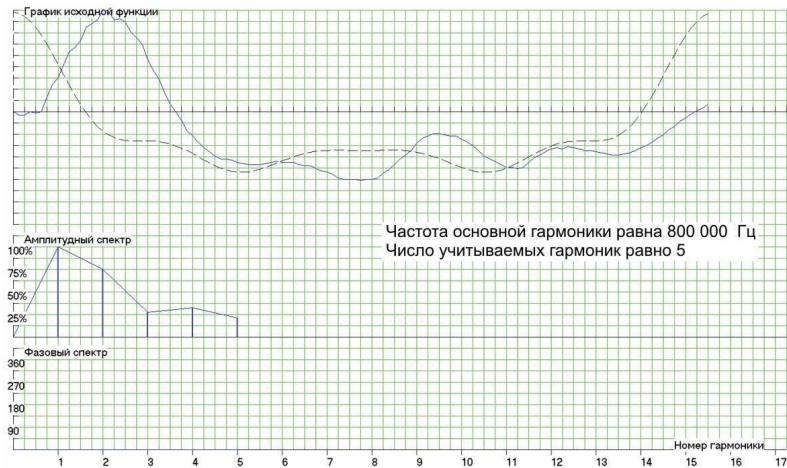
При этом амплитуды и фазы определяются по аналитическим формулам [2]:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad (5)$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}. \quad (6)$$



a



б

Рис. 1. Синтез функции по выражению (2) с учетом фазового спектра (*a*) и без учета фазового спектра (*б*)

Поскольку временное и спектральное представление сигнала равноправно и взаимозаменяемо, то спектр сигнала несет в себе полную информацию о сигнале [1]. Тем не менее это справедливо, только если учитывается два параметра (либо a и b , либо A и φ). Это означает, что при использовании для анализа сигнала только его амплитудного спектра часть информации, содержащейся в сигнале, будет потеряна. В этом случае необходимо, по крайней мере, учитывать

и фазовый спектр. Таким образом, исходный сигнал в виде функции времени $f(t)$ тождественен совокупности двух функций частоты: либо $a(f)$ и $b(f)$, либо $A(f)$ и $\varphi(f)$.

В любом случае критерием верности анализа является сопоставление исходного сигнала и функции, полученной при синтезе по найденным коэффициентам, причем чаще при анализе находят коэффициенты a и b , а потом строят амплитудный спектр $A(f)$. Последнее объясня-

ется тем, что зависимости $A(f)$ и $\varphi(f)$ более удобны для понимания, хотя содержат ту же самую информацию, что и $a(f)$ и $b(f)$, но в другой форме.

Рассмотрим особенности спектрального анализа импульсов частичных рядов, зарегистрированных в кабельной линии. Рис. 1, *a, б* показывает, как меняется синтезированный (при использовании выражения (2)) сигнал по сравнению с исходным импульсом, если не учитывать фазовый спектр. Сплошной линией показана исходная функция, штриховой линией – синтезированная. Очевидно, что во втором случае форма сигнала существенно искажается. Это подтверждает потерю части информации о сигнале.

Оптимальным является нахождение коэффициентов a и b с последующим вычислением A и φ с использованием зависимостей $A(f)$ и $\varphi(f)$ для анализа.

Определение начальных фаз гармоник. Спектры периодических и непериодических функций

При построении фазового спектра существенным является вопрос определения начальных фаз гармоник. Для расширения области значений фазы необходимо учитывать не только значения $\varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}$, но и знаки коэффициентов a и b , а также использовать тригонометрические формулы приведения:

$$\text{если } a \geq 0, \text{ то } \varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k};$$

$$\text{если } a < 0, \text{ то } \varphi_k = \pi - \arctg \frac{b_k}{a_k}; \quad (7)$$

$$\text{если } \varphi_k < 0, \text{ то } \varphi_k = 2\pi + \varphi_k$$

(если нужен диапазон от 0° до $+360^\circ$)

Рис. 2, *a* показывает, что без учета выражений (7) форма сигнала искажает-

ся и информация теряется. Искажение сигнала возникает только при использовании для синтеза выражения (2) (это и позволяет выявить потерю информации). При использовании выражения (1) искажения не возникает, однако фазовый спектр также получается неправильным (если не учитывать выражения (7)), но потерю информации выявить невозможно (рис. 2, *б*).

Особого внимания заслуживает вопрос о соотношении спектров периодических и непериодических функций. Это связано с тем, что часто исследуемые сигналы являются непериодическими. Известно, что периодические функции имеют дискретный спектр, а непериодические – сплошной. Существует мнение, что кривая, огибающая спектр периодической функции, совпадает со спектром непериодической функции такой же формы.

Спектр непериодической функции представляет собой бесконечную сумму бесконечно малых и близких по частоте слагаемых [5], т.е. он совпадает с осью абсцисс (в координатах частота/амплитуда). Этот спектр будет соответствовать по форме огибающей спектра соответствующей периодической функции в масштабе: амплитуда, умноженная на период, при периоде, стремящемся к бесконечности.

Таким образом, спектры периодических и непериодических функций трудно сопоставимы между собой, что может вызвать дополнительные сложности. Кроме того, на практике сплошной спектр получить невозможно – наблюдается дискретный спектр с малым шагом между гармониками.

Указанных сложностей в большинстве случаев можно избежать, если принять допущение, что исследуемая функция является периодической (например, при диагностике высоковольтной изоляции – с периодом испытательного напряжения). В этом случае она будет иметь дискретный спектр.



a



b

Рис. 2. Синтез функции без учета знаков коэффициентов a и b при определении начальных фаз: a – по выражению (2); b – по выражению (1)

Выбор частоты основной гармоники и числа гармоник

Важными параметрами при гармоническом анализе являются частота основной гармоники и число гармоник. Значения этих параметров существенно влияют как на внешний вид спектра, так и на точность метода. Теоретически чем больше число гармоник, тем выше точность анализа. Однако на практике (при хорошей сходимости ряда Фурье) может оказаться

достаточным вычисление сравнительно небольшого числа гармоник [6].

Существует единственное ограничение по числу гармоник. Оно определяется частотой дискретизации при измерении сигнала. При превышении этой частоты возникают методические погрешности и искажения сигнала.

В общем случае частота основной гармоники определяется как величина, обратная периоду функции. Если менять период функции относительно продол-

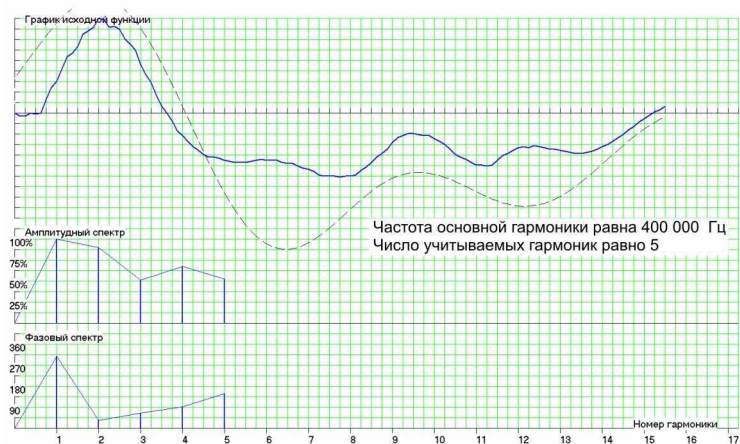


Рис. 3. Амплитудные искажения сигнала при уменьшении частоты основной гармоники

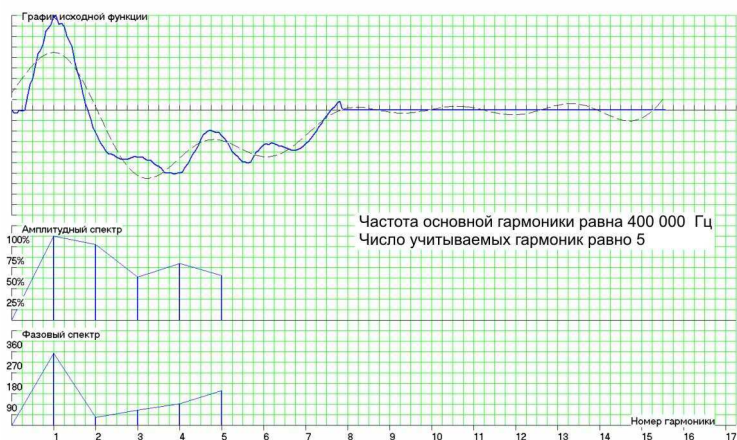


Рис. 4. Увеличение периода исходной функции добавлением нулевых значений

жительности интервала, на котором она задана, то можно столкнуться с определенными сложностями. При уменьшении периода относительно интервала, на котором задана функция (и соответствующем увеличении основной частоты), теряется низкочастотная часть исходной информации, следовательно, такое изменение основной частоты нецелесообразно. При увеличении периода (и соответствующем уменьшении основной частоты) произойдет сдвиг спектра вправо по

оси частот, уменьшится шаг между гармониками. В этом случае есть две особенности: во-первых, частоты гармоник изменятся и могут не совпасть с частотами исходного спектра [7]; во-вторых, амплитуда гармоник и синтезированного сигнала увеличится пропорционально увеличению периода (происходит амплитудное искажение сигнала без изменения его формы) (рис. 3).

Чтобы избежать искажений сигнала, нужно увеличить интервал задания функции

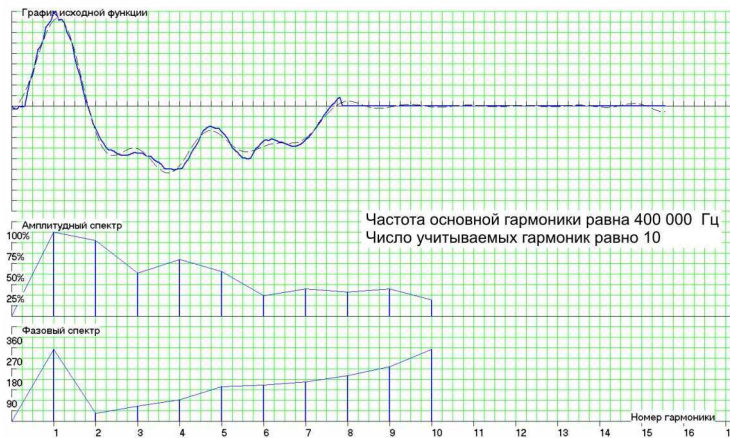


Рис. 5. Повышение точности за счет увеличения числа гармоник при увеличенном периоде исходной функции

за счет добавления нулевых значений. На рис. 4 показано увеличение таким способом периода исходной функции в 2 раза. В последнем случае увеличение числа гармоник позволяет значительно повысить точность – синтезированная функция с большей точностью повторяет исходную (рис. 5).

Заключение

Таким образом, для качественного гармонического анализа сигналов с получением полной информации необходимо:

- выполнять синтез функции через амплитуды и начальные фазы гармоник;
- проверять соответствие синтезированной и исходной функций друг другу;

– учитывать при анализе не только амплитудный, но и фазовый спектр;

– учитывать знаки коэффициентов a и b при определении начальных фаз гармоник;

– четко понимать разницу между спектрами периодических и непериодических функций;

– по возможности представлять исходную функцию в виде периодической;

– правильно выбирать частоту основной гармоники и число гармоник.

Анализ сигналов с учетом вышеперечисленных особенностей может существенно повысить эффективность диагностики электрооборудования по характеристикам разрядов в изоляции.

Список литературы

1. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа: справочное руководство: пер. с англ. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. – 524 с.
2. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1952. – 192 с.
3. Аксенов А.П. Математический анализ. Ряды Фурье. Интеграл Фурье. Суммирование расходящихся рядов. – СПб., 1999. – 85 с.
4. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. – М.: Наука, 1989. – 240 с.
5. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1969. – 424 с.
6. Федюков Ю.А., Фошкина С.В. Особенности применения рядов Фурье в экспериментальных исследованиях // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 5. – С. 74–79.
7. Гольдштейн Е.И., Радаев Е.В. Гармонический анализ токов (напряжений) при наличии в них интергармоник и неизвестном периоде результирующего сигнала // Электричество. – 2009. – № 12. – С. 86–88.
8. Залманзон Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. – М.: Наука, 1989. – 496 с.

9. Функциональный контроль и диагностика электротехнических систем и устройств по цифровым отчетам мгновенных значений тока и напряжения / под ред. Е.И. Гольдштейна. – Томск: Печатная мануфактура, 2003. – 240 с.

10. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1965. – 778 с.

11. Boashash B. Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference. – Oxford: Elsevier Science, 2003. – 771 p.

12. Bracewell R.N. The fourier transform and it's applications. – 3rd ed. – Boston: McGraw-Hill, 2000. – 640 p.

13. Grafakos L. Classical and modern fourier analysis. – Pearson: Prentice-Hall, 2004. – 859 p.

14. Katznelson Y. An introduction to harmonic analysis. – 3rd ed. – Cambridge University Press, 2004. – 430 p.

15. Zygmund A. Trigonometric series. – 3rd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2002. – 375 p.

References

1. Lancosh K. Prakticheskie metody prikladnogo analiza: spravocnoe rukovodstvo [Practical methods of applied analysis: reference guide]. Moscow: Gos. izd-vofiz.-mat. lit-ry, 1961. 524 s.

2. Harkevich A.A. Spektry i analiz [Spectra and analysis]. Moscow: Gos. izd-votehn.-teoret. lit-ry, 1952. 192 s

3. Aksenov A.P. Matematicheskij analiz. Rjady Fur'e. Integral Fur'e. Summirovanie rashodjajushsja rjadov [Mathematical analysis. Fourier series. Fourier integral. Summation of divergentseries]. Saint-Petersburg, 1999. 85 s.

4. D'jakonov V.P. Spravochnik po algoritmam i programmam na jazyke Bejsik dlja personal'nyh JeVM [Handbook of algorithms and programs in the language BASIC for personal computers]. Moscow: Nauka, 1989. 240 s.

5. Atabekov G.I. Osnovy teorii cepej [Fundamentals of circuit theory]. Moscow: Jenergija, 1969. 424 s.

6. Fedjukov Ju.A., Foshkina S.V. Osobennosti primeneniya rjadov Fur'e v jeksperimental'nyh issledovanijah [Features of the Fourier series application in experimental studies]. *Izvestija vuzov. Jeletromehhanika*, 2006, no. 5, pp. 74–79.

7. Gol'dshtejn E.I., Radaev E.V. Garmonicheskij analiz tokov (naprjazhenij) pri nalichii v nih intergarmonik i neizvestnom periode rezul'tirujuwego signala [Harmonic analysis of current (voltage) provided they interharmonics and unknown period of the resulting signal]. *Jelektrichestvo*, 2009, no. 12, pp. 86–88.

8. Zalmanzon L.A. Preobrazovanie Fur'e, Uolsha, Haaraiih primenenie v upravlenii, svjazi i drugih oblastjah [Transform of Fourier, Walsh, Haar, and their application in management, communications, and other areas]. Moscow: Nauka, 1989. 496 s.

9. Gol'dshtejn E.I. Funkcional'nyj kontrol' i diagnostika jelektrotehnicheskikh sistem i ustrojstv po cifrovym otchetam mgnovennyh znachenij toka i naprjazhenija [Functional testing and diagnostics of electrical systems and devices for digital records the instantaneous current and voltage]. Tomsk: Pечатnaja manufaktura, 2003. 240 s.

10. Anго A. Matematika dlja jelektro-iradioinzhenеров [Mathematics for Electrical and Radio Engineers]. Moscow: Nauka, 1965. 778 s.

11. Boashash B. Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference. Oxford: Elsevier Science, 2003. 771 p.

12. Bracewell R.N. The fourier transform and it's applications. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 2000. 640 p.

13. Grafakos L. Classical and modern fourier analysis. Pearson: Prentice-Hall, 2004. 859 p.

14. Katznelson Y. An introduction to harmonic analysis. 3rd ed. Cambridge University Press, 2004. 430 p.

15. Zygmund A. Trigonometric series. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 375 p.

Об авторах

Чалов Игорь Алексеевич (Пермь, Россия) – ассистент кафедры электрификации и автоматизации горных предприятий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29; e-mail: igorchalov@mail.ru).

Сидельников Леонид Григорьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, генеральный директор ООО «ТестСервис» (614025, г. Пермь, ул. Героев Хасана, 50; e-mail: lgs_test@eservice.perm.ru).

About the authors

Chalov Igor' Alekseevich (Perm, Russian Federation) – assistant, Department for electrification and mining company automation, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky ave., 29; e-mail: igorchalov@mail.ru).

Sidel'nikov Leonid Grigor'evich (Perm, Russian Federation) – candidate of technical sciences, CEO, «Test service» LLC (614025, Perm, ul. Geroev Hasana, 50; e-mail: lgs_test@eservice.perm.ru).

Получено 12.05.2012