

**МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ГЕНЕРИРУЮЩИХ В СЕТЯХ ОБЩЕГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОМЕХИ, ПРЕВЫШАЮЩИЕ
НОРМИРОВАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА**

С. Н. Медведева, М. В. Чернецов, М. М. Чернецова

**THE METHOD OF IDENTIFYING CONSUMERS
OF ELECTRICITY, GENERATION IN THE PUBLIC
ELECTRICITY SUPPLY DISTURBANCE IN EXCESS
OF NORMALIZED VALUES OF INDICATORS OF QUALITY**

S. N. Medvedeva, M. V. Chernetsov, M. M. Chernetsova

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Объектом исследования являются анализ и выявление признаков, характеризующих потребителей, электрооборудование которых ухудшает качество электроэнергии в сетях электроснабжения общего назначения и, как следствие, влияет на технологические процессы производства остальных потребителей, подключенных к данной сети. Целью работы является разработка методики выявления нарушителей качества электроэнергии на основе аналитического исследования и анализа распределения модулей комплексных напряжений гармонических составляющих спектра, характеризующего режимы работы электрооборудования. *Методы.* Приведенные в работе исследования базируются на анализе и обобщении научных трудов в области методов повышения точности измерения электрических величин, методах классической теории электрических цепей, дифференциальном и интегральном исчислении, теории разложения сигналов в системе базисных функций. Исследования проводились с использованием пакета программ MathCAD. *Результаты и выводы.* Исследованы наиболее сложные режимы (изменение нагрузки в одном и каждом полупериодах) работы электрооборудования, получены уравнения, описывающие напряжения гармоник, генерируемых при изменениях нагрузок. Показано, что чередование минимумов и максимумов амплитуд составляющих комплексного напряжения гармоник спектра не зависит от фазы включения изменений нагрузок, а меняется лишь отношение амплитуд гармоник, что упрощает решение задачи идентификации нарушителя. Показано, что анализ комплексных свойств спектра высокочастотных гармоник, генерируемых нагрузкой потребителя в сеть энергоснабжения общего назначения, позволяет уверенно идентифицировать как нарушителя режима энергопотребления, так и интервал времени генерации недопустимых помех.

Ключевые слова: качество электроэнергии, идентификация потребителя (нагрузок) электроэнергии сети электроснабжения, спектр высокочастотных гармоник, электрооборудование.

Abstract. *Subject and goals.* The object of the research is the analysis and identification of signs characterizing consumers whose electrical equipment degrades the quality of electricity in general-purpose power supply networks and, as a result, affects the technological processes of production of other consumers connected to this network. The aim of the work is to develop a methodology for identifying violators of the quality of electricity on the basis of analytical research and analysis of the distribution of modules of complex volt-

ages of harmonic components of the spectrum, which characterizes the modes of operation of electrical equipment. *Methods.* The studies presented in the work are based on the analysis and generalization of scientific works in the field of methods for increasing the measurement accuracy electrical quantities, methods of the classical theory of electrical circuits, differential and integral calculus, the theory of signal decomposition in the system of basis functions. The research was carried out using the MathCAD software package. *Results and Conclusions.* The most complex modes (load change in one and each half-period) of electrical equipment operation are investigated, equations are obtained that describe the harmonic voltages generated during load changes. It is shown that the alternation of the minima and maxima of the amplitudes of the components of the complex voltage of the harmonics of the spectrum does not depend on the phase of switching on the load changes, but only the ratio of the amplitudes of the harmonics changes, which simplifies solving the problem of identifying the intruder. It is shown that the analysis of the complex properties of the spectrum of high-frequency harmonics generated by the consumer load in a general-purpose power supply network, allows you to confidently identify both the violator of the power consumption mode and the time interval for generating unacceptable interference.

Keywords: quality of electricity, identification of the consumer (loads) of electricity from the power supply network, spectrum of high-frequency harmonics, electrical equipment.

Введение

Одной из важных задач электроэнергетики является контроль и управление качеством электрической энергии в сетях электроснабжения различных потребителей. С этой целью проводится периодическая проверка и измерение значений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на соответствие требованиям ГОСТа [1] и анализ причин превышения допустимых значений ПКЭ. При этом весьма актуальной является проблема выявления электрооборудования (потребителя), генерирующего недопустимые искажения электрической энергии в сетях общего электроснабжения для предъявления к виновнику в ухудшении качества электроэнергии юридически обоснованных претензий.

С точки зрения системного анализа это задача идентификации источника, генерирующего сетевые помехи-искажения, и, соответственно, его местоположения.

Материал и методика

Согласно отечественным и международным стандартам одним из требований к качеству электроэнергии является обеспечение допустимых значений высокочастотных помех сетевого напряжения (нелинейных искажений). Согласно ГОСТ 32144–2013 нормируются уровни помех от 2 до 40 гармоник. Для выявления нагрузок и, следовательно, потребителей, генерирующих помехи, превышающие ПКЭ, предлагается использовать результаты измерения спектров помех. Зная особенности распределений гармонических компонент в зависимости от принципа регулирования тока в нагрузке, можно достаточно точно идентифицировать и выявлять нагрузки (потребителей), оказывающие доминирующее влияние на возникновение нелинейных искажений [2, 3].

Покажем возможности данного метода на примере линейного переключения дополнительной нагрузки, полагая, что зависимость напряжения в сети U_c от тока I основной нагрузки описывается выражением [4]

$$U_c = U_n - a_1 I - a_2 I^2, \quad (1)$$

где U_n – номинальное сетевое напряжение; a_1 и a_2 – коэффициенты, характеризующие нагрузку и описывающие нелинейную зависимость напряжения от тока.

В случае регулирования среднего тока в нагрузке переключением в одном полупериоде его мгновенное значение может быть представлено выражением

$$I_a(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \in [0, T_p]; \\ I \sin \omega_c t & \text{при } t \in [T_p, T_c/2]; \\ 0 & \text{при } t \in [T_c/2, T_c], \end{cases} \quad (2)$$

где $\omega_c = 2\pi/T_c$; T_p – интервал времени внутри полупериода, в котором нагрузка отключается; T_c – период сетевого напряжения (рис. 1).

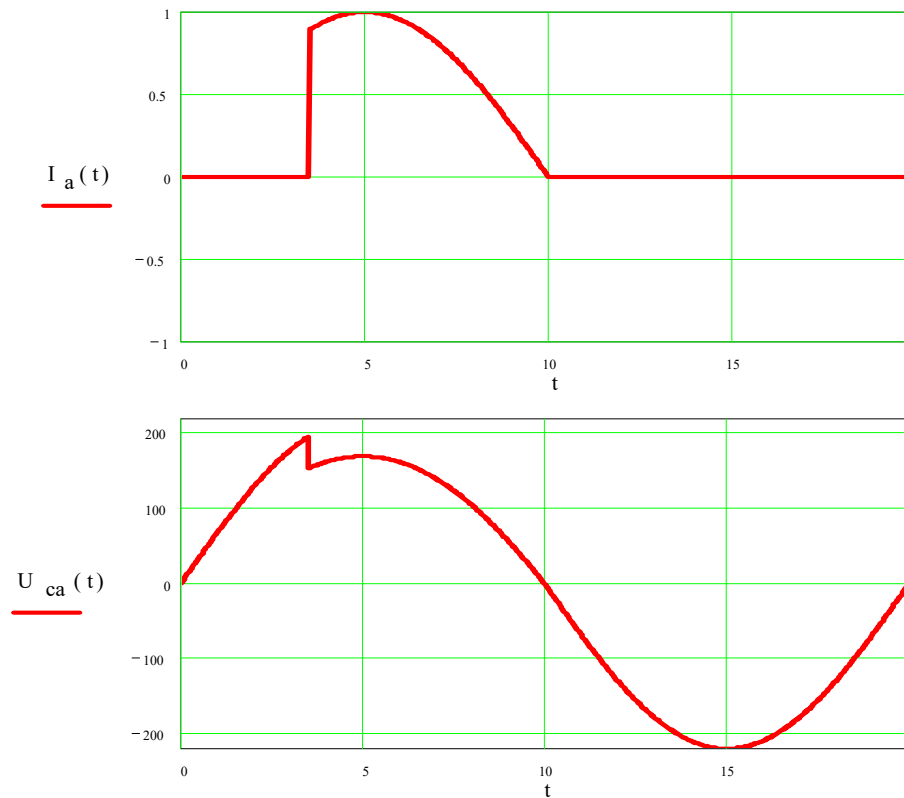


Рис. 1. Диаграммы тока и напряжения на нагрузке при регулировании переключением в одном полупериоде

Для упрощения анализа будем полагать, что

$$I_a(t) = \begin{cases} I \sin t & \text{при } t \in [\phi_p, \pi]; \\ 0 & \text{при } t \notin [\phi_p, \pi], \end{cases} \quad (3)$$

где $t \in [0, 2\pi]$, $\phi_p = 2\pi T_p/T_c$ – фаза регулирования. Причем $\phi_p \in [0, \pi]$.

С учетом принятой зависимости $I_a(t)$ соответствующее изменение сетевого напряжения согласно (1) будет описываться выражением

$$U_{ca}(t) = \begin{cases} U_n \sin t - a_1 I \sin t - a_2 I^2 \sin^2 t & \text{при } t \in [\phi_p, \pi]; \\ U_n \sin t & \text{при } t \notin [\phi_p, \pi]. \end{cases} \quad (4)$$

Используя известные соотношения [5], запишем уравнение, описывающее составляющие частотного спектра напряжения $U_{ca}(t)$:

$$A_{ak} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} U_n \sin t \cos kt \cdot dt - \frac{1}{\pi} \int_{\phi_p}^{\pi} [a_1 I \sin t + a_2 I^2 \sin^2 t] \cos kt \cdot dt; \quad (5)$$

$$B_{ak} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} U_n \sin t \sin kt \cdot dt - \frac{1}{\pi} \int_{\phi_p}^{\pi} [a_1 I \sin t + a_2 I^2 \sin^2 t] \sin kt \cdot dt, \quad (6)$$

где A_{ak} , B_{ak} – составляющие соответственно cos- и sin-спектров; k – номер гармоник.

Первое слагаемое в формуле (5), очевидно, в силу ортогональности функций $\sin$ и $\cos$ равно нулю, т.е. $A_{ak}^{<1>} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} U_n \sin t \cdot \cos kt \cdot dt = 0$, а первое

слагаемое в (6) $B_{ak}^{<1>} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} U_n \sin t \cdot \sin kt \cdot dt = U_n$ при $k = 1$ и равно нулю при любых других k .

Рассмотрим отдельно свойства линейных и нелинейных компонент вторых слагаемых в формулах (5) и (6) спектра. Для линейных компонент после взятия интегралов имеем:

$$\begin{aligned} A_{ak}^{<2>} &= -\frac{a_1 I}{\pi} \int_{\phi_p}^{\pi} \sin t \cdot \cos kt \cdot dt = \\ &= -\frac{a_1 I}{2\pi} \left[\frac{\cos(k+1)\phi_p - \cos(k+1)\pi}{k+1} - \frac{\cos(k-1)\phi_p - \cos(k-1)\pi}{k-1} \right]; \end{aligned} \quad (7)$$

$$B_{ak}^{<2>} = -\frac{a_1 I}{\pi} \int_{\phi_p}^{\pi} \sin t \cdot \sin kt \cdot dt = -\frac{a_1 I}{2\pi} \left[\frac{\sin(k+1)\phi_p}{k+1} - \frac{\sin(k-1)\phi_p}{k-1} \right]. \quad (8)$$

С учетом того, что $\cos k\pi = (-1)^k$ и выражение (7) можно несколько упростить, имеем

$$A_{ak}^{<2>} = -a_1 I \left\{ \frac{(-1)^{(k+1)}}{\pi(k^2-1)} + \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\cos(k+1)\phi_p}{k+1} - \frac{\cos(k-1)\phi_p}{k-1} \right] \right\}. \quad (9)$$

Соответствующие, обусловленные влиянием нелинейностей компоненты формул (5) и (6) спектра описываются выражениями:

$$A_{ak}^{<3>} = -\frac{a_2 I^2}{\pi} \int_{\phi_p}^{\pi} \sin^2 t \cos kt \, dt =$$

$$= -\frac{a_2 I^2}{4\pi} \left[\frac{\sin(k+2)\phi_p}{k+2} + \frac{\sin(k-2)\phi_p}{k-2} - \frac{2\sin k\phi_p}{k} \right]; \quad (10)$$

$$B_{ak}^{<3>} = -\frac{a_2 I^2}{\pi} \int_{\phi_p}^{\pi} \sin^2 t \sin kt \, dt =$$

$$= -\frac{a_2 I^2}{2\pi} \left[\frac{4 \cdot (-1)^k}{k(k^2-4)} + \frac{\cos k\phi_p}{k} - \frac{\cos(k-2)\phi_p}{2(k-2)} - \frac{\cos(k+2)\phi_p}{2(k+2)} \right]. \quad (11)$$

Рассмотрим случай регулирования среднего тока в нагрузке переключением в каждом полупериоде (рис. 2). Здесь значение мгновенного напряжения на нагрузке описывается выражением

$$U_{cc}(t) = \begin{cases} U_n \sin t & \text{при } t \in [0, \phi_p], \quad t \in [\pi, \pi + \phi_p]; \\ (U_n - a_1 I) \sin t - a_2 I^2 \sin^2 t & \text{при } t \in [\phi_p, T_1], \quad t \in [\pi + \phi_p, 2\pi]. \end{cases} \quad (12)$$

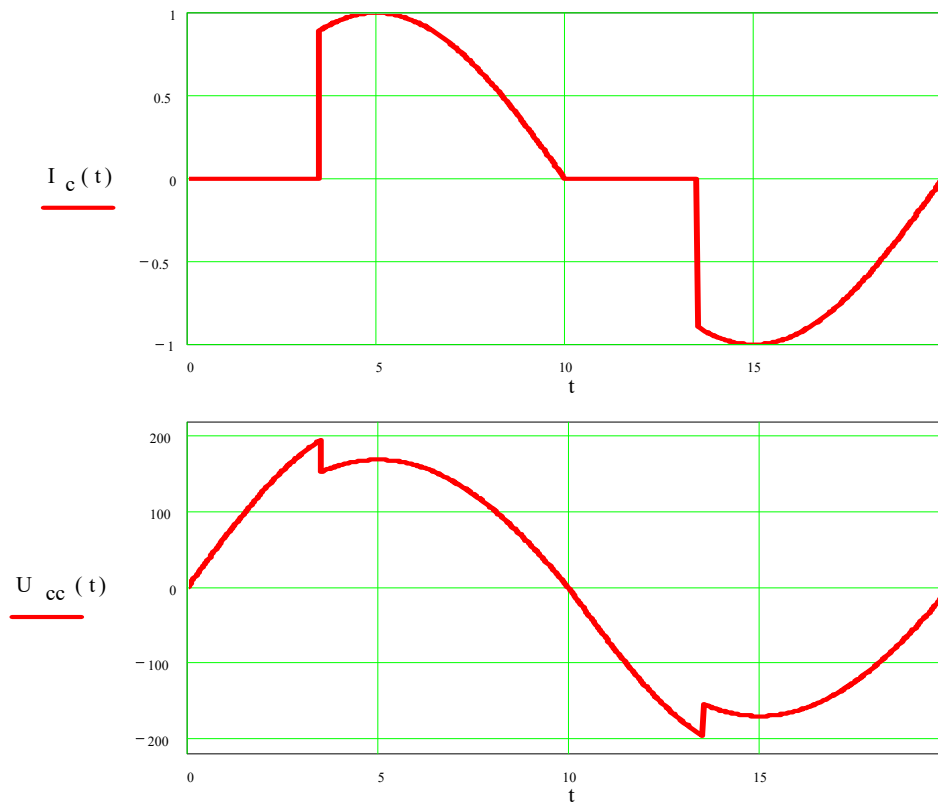


Рис. 2. Диаграммы тока и напряжения на нагрузке при регулировании переключением в двух полупериодах

Анализируемые частотные спектры будут описываться уравнениями:

$$A_{ck} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U_H \sin t \cos kt \, dt - \frac{1}{\pi} \int_{\phi_p}^{\pi} [a_1 I \sin t + a_2 I^2 \sin^2 t] \cos kt \, dt - \\ - \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\phi_p}^{2\pi} [a_1 I \sin t + a_2 I^2 \sin^2 t] \cos kt \, dt; \quad (13)$$

$$B_{ck} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U_H \sin t \sin kt \, dt - \frac{1}{\pi} \int_{\phi_p}^{\pi} [a_1 I \sin t + a_2 I^2 \sin^2 t] \sin kt \, dt - \\ - \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\phi_p}^{2\pi} [a_1 I \sin t + a_2 I^2 \sin^2 t] \sin kt \, dt. \quad (14)$$

Взяв интегралы в выражениях (13) и (14), получим искомые компоненты спектра:

$$A_{ck}^{<2>} = A_{ak}^{<2>} - a_1 \left[\frac{1}{\pi(k^2-1)} + \frac{(-1)^{k+1} \cos(k+1)\phi_p}{k+1} - \frac{(-1)^{k-1} \cos(k-1)\phi_p}{k-1} \right]; \quad (15)$$

$$B_{ck}^{<2>} = B_{ak}^{<2>} - \frac{a_2 I^2}{2\pi} \left[\frac{(-1)^{k+1} \sin(k+1)\phi_p}{k+1} - \frac{(-1)^{k-1} \sin(k-1)\phi_p}{k-1} \right]; \quad (16)$$

$$A_{ck}^{<3>} = A_{ak}^{<3>} - \frac{a_2 I^2}{2\pi} \left[\frac{(-1)^{k+2} \sin(k+2)\phi_p}{2(k+2)} + \right. \\ \left. + \frac{(-1)^{k-2} \sin(k-2)\phi_p}{2(k-2)} - \frac{(-1)^k \sin k \phi_p}{k} \right]; \quad (17)$$

$$B_{ck}^{<3>} = B_{ak}^{<3>} - \frac{a_2 \cdot I^2}{\pi} \times \\ \times \left[8 + \frac{(-1)^k \cos k \phi_p}{2k} - \frac{(-1)^{k+2} \cos(k+2)\phi_p}{4(k+2)} - \frac{(-1)^{k-2} \cos(k-2)\phi_p}{4(k-2)} \right]. \quad (18)$$

Заметим, что в формулах (13) и (14) первые слагаемые, как и в (5) и (6), соответственно равны: $A_{ck}^{<1>} = 0$ при всех k , $B_{ck}^{<1>} = U_H$ только при $k = 1$ и $B_{ck}^{<1>} = 0$ при других k .

Результаты

На рис. 3–5 представлены спектры высокочастотных гармоник напряжения сети, например, при $\phi_p = 3,5\pi/20$, вычисленные средствами системы MathCAD согласно приведенным выше выражениям. Как показал анализ, чередование минимумов и максимумов спектра не зависит от фазы ϕ_p . Меняется лишь отношение амплитуд гармоник.

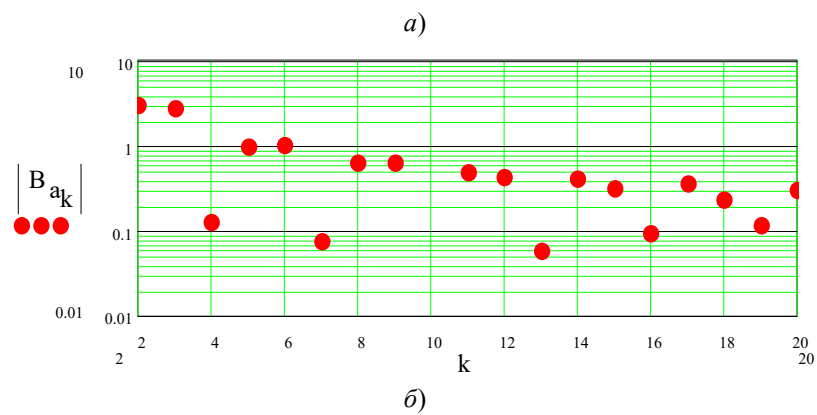
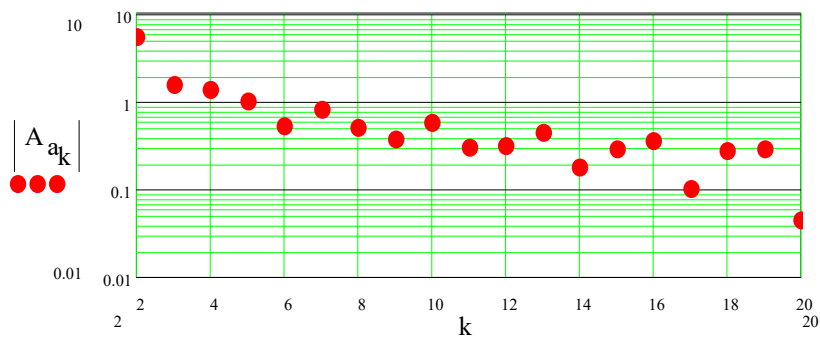


Рис. 3. Модули cos- (а) и sin-спектров (б) напряжения в нагрузке при регулировании переключением в одном полупериоде

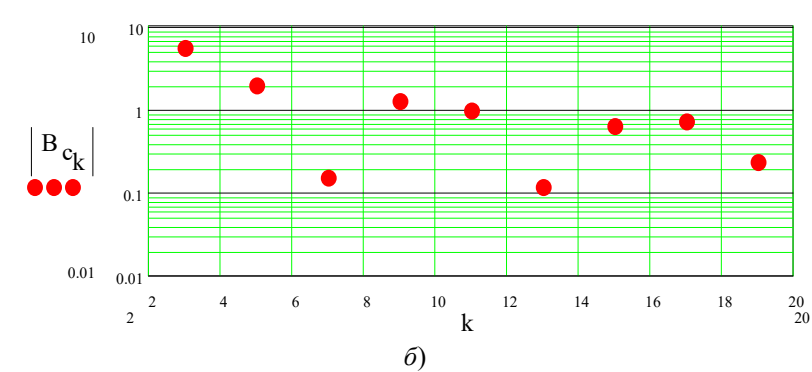
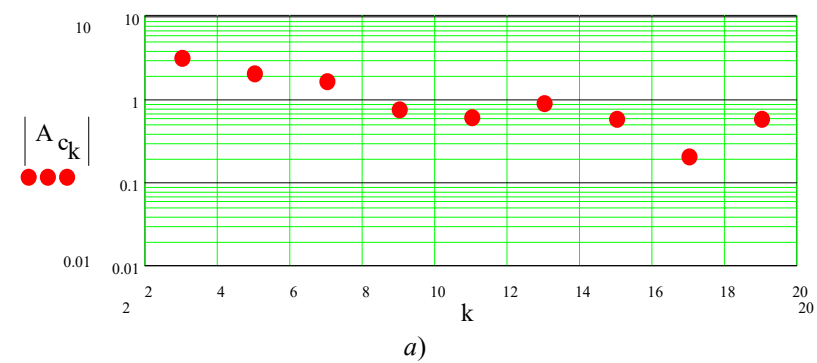


Рис. 4. Модули cos- (а) и sin-спектров (б) напряжения в нагрузке при регулировании переключением в каждом полупериоде

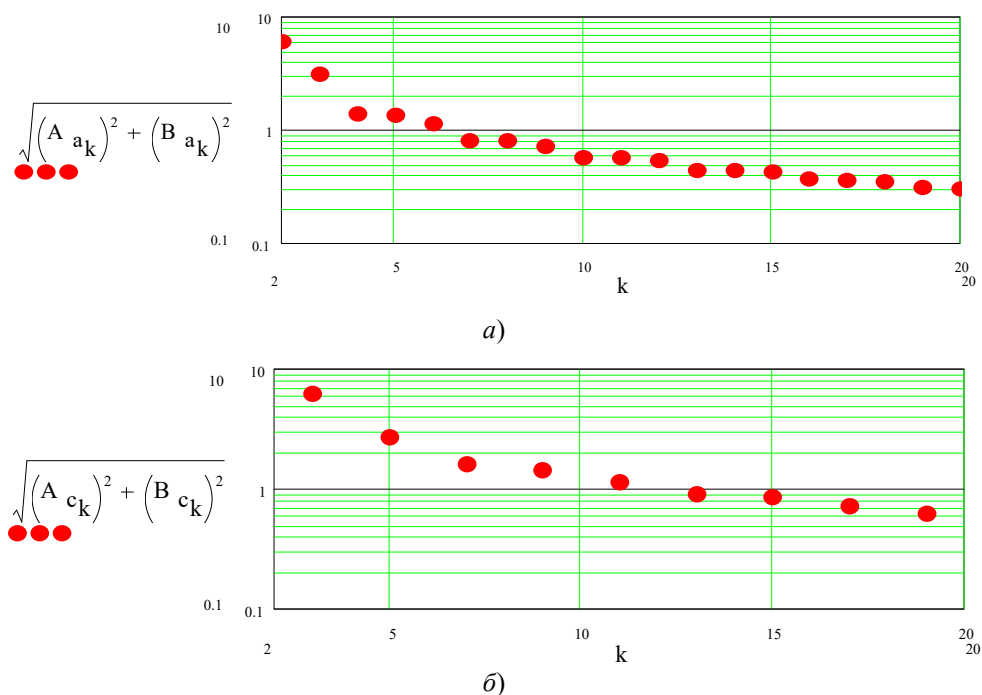


Рис. 5. Спектры напряжения в нагрузке при регулировании переключением в одном (а) и каждом (б) полупериоде

Обсуждение

Приведенные примеры достаточно наглядно показывают, что, имея информацию только о модулях гармоник, можно достаточно уверенно идентифицировать доминирующего нарушителя (или группы нарушителей), существенно влияющего на качество электроэнергии в сети электроснабжения общего назначения [6, 7]. При этом в качестве идентификационных признаков в процессе выявления нарушителя режима электроснабжения достаточно иметь банк данных комплексных характеристик (модулей) наиболее характерных параметров высокочастотного спектра гармоник, генерируемых общей нагрузкой каждого потребителя. Эти данные могут быть получены при заключении договоров на электроснабжение потребителя на основе анализа паспортных данных его электрооборудования и подтверждены при периодической (внеочередной) проверке качества электроэнергии в общей точке присоединения в процессе эксплуатации.

Примерный алгоритм выявления нарушителей качества электроэнергии приведен на рис. 6.

Следует отметить, что современные методы и средства позволяют обеспечить постоянный контроль качества электроэнергии, а также амплитуд (модулей) напряжения высокочастотных составляющих в общей точке присоединения, по результатам анализа которых выявляются не только нарушитель, но и его местоположение и интервал времени, в течение которого генерируются недопустимые помехи.

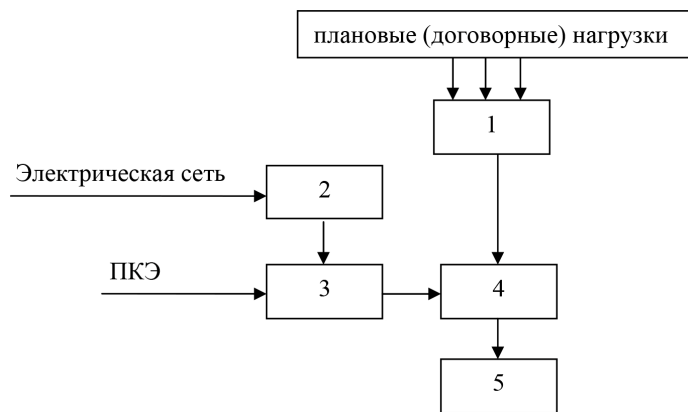


Рис. 6. Алгоритм выявления нарушителей качества электроэнергии:
 1 – библиотека хранения частотных спектров, описывающих плановые (договорные) нагрузки потребителей энергии в анализируемой сети; 2 – блок сбора и хранения данных о реальных частотных спектрах всех нагрузок (модулях гармоник);
 3 – блок контроля нарушений ПКЭ; 4 – блок анализа и выявления нарушителей ПКЭ по частотному спектру его нагрузки сравнением с данными библиотеки;
 5 – блок документирования результатов анализа нарушений ПКЭ

Выводы

Постоянный контроль амплитуд (модулей) напряжения высокочастотных составляющих в общей точке присоединения и сравнение их с данными, внесенными в библиотеку плановых (договорных) нагрузок потребителей энергии, позволяет выявить местоположение нарушителей показателей качества электроэнергии, т.е. анализ комплексных свойств спектра высокочастотных гармоник, генерируемых нагрузкой потребителя в сеть энергоснабжения общего назначения, уверенно идентифицировать как нарушителя режима энергопотребления, так и интервал времени генерации недопустимых помех.

Библиографический список

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – URL: <https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2014/05/06/GOST-32144-2013-Elektricheskaja-energija.pdf>
2. Кудрин, Б. И. Электроснабжение / Б. И. Кудрин, М. Г. Ошурков, Б. В. Жилин. – Москва : Высш. шк., 2018. – 382 с.
3. Степанов, В. П. Уточнение вероятностных моделей оценки электрических нагрузок на низших ступенях иерархии системы электроснабжения / В. П. Степанов, А. В. Гудков, Е. А. Кротков, А. Ю. Алексеев // Труды V Всерос. науч. конф. с междунар. участием (29–31 мая 2008 г.). – Самара : СамГТУ, 2008. – С. 124–127.
4. Харлов, Н. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учеб. пособие / Н. Н. Харлов. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.
5. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи / Г. И. Атабеков. – Москва : Лань, 2009. – 592 с.
6. Лучинкин, А. В. Проблемы создания систем мониторингового контроля качества электроэнергии / А. В. Лучинкин, В. И. Чернецов, В. А. Шаповал // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. – Москва, 2003. – С. 332–333.
7. Кудашов, А. В. Способы и алгоритмы измерения интегральных параметров электрической энергии : монография / А. В. Кудашов, В. Д. Михотин, М. В. Чернецов. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2009. – 140 с.

References

1. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [GOST 32144-2013. Electric energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards of quality of electric energy in General-purpose power supply systems]. Available at: <https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2014/05/06/GOST-32144-2013-Elektricheskaya-energija.pdf> [In Russian]
2. Kudrin B. I., Oshurkov M. G., Zhilin B. V. *Elektrosnabzhenie* [Electrosupply]. Moscow: Vyssh. shk., 2018, 382 p. [In Russian]
3. Stepanov V. P., Gudkov A. V., Krotkov E. A., Alekseev A. Yu. *Trudy V Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem (29–31 maya 2008 g.)* [Proceedings Of V All-Russia. scientific Conf. with internat. participation (may 29-31, 2008).]. Samara: SamGTU, 2008, pp. 124–127. [In Russian]
4. Kharlov N. N. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike: ucheb. posobie* [Electromagnetic compatibility in the electric power industry: textbook. stipend]. Tomsk: Izd-vo TPU, 2007, 207 p. [In Russian]
5. Atabekov G. I. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Lineynye elektricheskie tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering. Linear electrical circuits]. Moscow: Lan', 2009, 592 p. [In Russian]
6. Luchinkin A. V., Chernetsov V. I., Shapoval V. A. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality : proceedings of intern. simp.]. Moscow, 2003, pp. 332–333. [In Russian]
7. Kudashov A. V., Mikhotin V. D., Chernetsov M. V. *Sposoby i algoritmy izmereniya integral'nykh parametrov elektricheskoy energii: monografiya* [Methods and algorithms for measuring integrated parameters of electric energy: monograph]. Penza: IITs PGU, 2009, 140 p. [In Russian]

Медведева Светлана Николаевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электроэнергетики
и электротехники,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sn-medvedeva@yandex.ru

Medvedeva Svetlana Nikolaevna

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of electric power
and electrical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Чернецов Михаил Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра технического управления
качеством,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова / ул.
Гагарина, 1а/11)
E-mail: oksana_chernecov@mail.ru

Chernetsov Mikhail Vladimirovich

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of technical quality
management,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova avenue / Gagarin street,
Penza, Russia)

Чернецова Маргарита Михайловна

магистрант,
Московский государственный
технический университет
имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5,
корп. 1)
E-mail: radikal.xxxxx@gmail.com

Chernetsova Margarita Mikhailovna

master degree student,
Moscow State Technical University
named after N. E. Bauman
(bld. 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Медведева, С. Н. Метод идентификации потребителей электроэнергии, генерирующих в сетях общего электроснабжения помехи, превышающие нормированные значения показателей качества / С. Н. Медведева, М. В. Чернецов, М. М. Чернецова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 2 (34). – С. 121–131. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-2-9.