

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.313

**Е. Г. АНДРЕЕВА  
А. А. ТАТЕВОСЯН  
И. А. СЁМИНА**

Омский государственный  
технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ МОДЕЛИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОТКРЫТОГО ТИПА

В данной статье приведено исследование магнитной системы открытого типа, имеющей осевую симметрию. Рассмотрены физическая и математическая осесимметричная модели данной системы, результаты эксперимента и численного расчета в комплексе программ Elcut 5.6 (профессиональная версия).

**Ключевые слова:** магнитная система открытого типа, метод конечных элементов, комплекс программ.

В настоящее время магнитные системы с незамкнутым магнитопроводом, в частности магнитные системы открытого типа, находят применение в различных областях, особенно в медицине. Магнитные системы открытого типа имеют достаточно сложную конфигурацию магнитопровода, которую не всегда можно моделировать двухмерными математическими моделями. Математические модели таких систем представляют собой сложную полевую, возможно трехмерную краевую задачу, вследствие необходимости учета сложной геометрии элементов

магнитной системы (различные формы насадок) и большого числа кусочно-однородных областей, на которые разбивается расчетная область. Кроме того, питание обмоток таких систем производится не только постоянным, но и импульсным током. Расчеты магнитных полей систем открытого типа выполняются численными методами, обычно методом конечных элементов (МКЭ).

В данной статье приведено исследование магнитной системы открытого типа, имеющей осевую симметрию, отличающуюся от разомкнутых магнит-

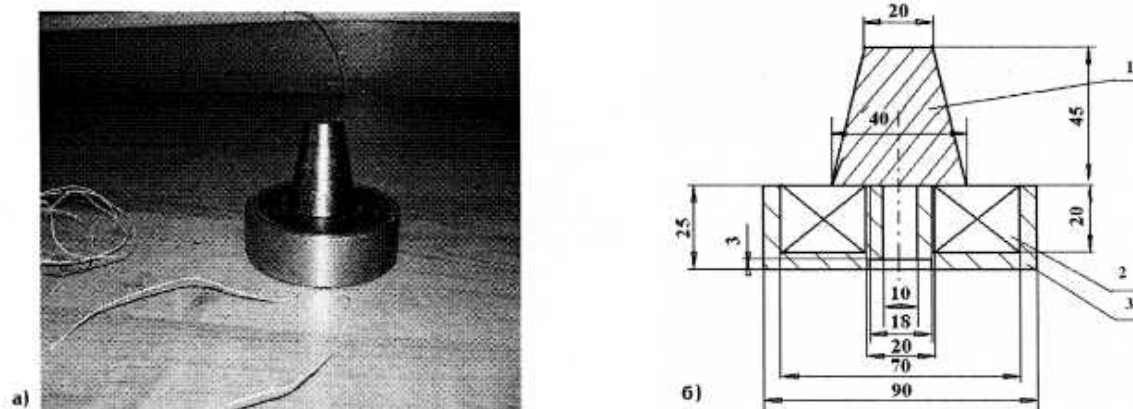


Рис. 1. Внешний вид (а) и эскиз (б) магнитной системы открытого типа: 1 – насадка, 2 – обмотка, 3 – магнитопровод

Таблица 1

№ п/п	Наименование параметра задачи	Значение параметра
1	Задача	Магнитная система открытого типа
2	Тип задачи	Задача магнитостатики (осесимметричная)
3	Геометрия модели	рис. 1б
4	Относительная магнитная проницаемость — воздуха — стали — обмотки	$\mu_a = 1$ $\mu_{st} = 2000$ $\mu_{ob} = 1$
5	Намагничивающая сила обмотки	$Iw = 2225 \text{ A}$

ных систем отсутствием фиксированной величины рабочего воздушного зазора.

Физическая модель магнитной системы открытого типа имеет внешний вид, который показан на рис. 1. Магнитная система имеет обмотку возбуждения магнитного поля, окруженную цилиндрическим стальным магнитопроводом со сменными насадками стальных сердечников переменного поперечного сечения. В качестве насадки может использоваться насадка в виде усеченного конуса.

Осесимметричное или плоскопараллельное магнитное поле систем открытого типа рассчитывается с помощью комплекса программ Elcut 5.6 (профессиональная версия), трехмерное — с помощью программного пакета ANSYS 10.0.

При моделировании магнитной системы открытого типа приняты основные допущения:

- относительная магнитная проницаемость стали является величиной постоянной;
- с учетом осевой симметрии магнитной системы поле считается осесимметричным;
- плотность тока в сечении обмотки распределяется равномерно.

Геометрия исследуемой модели, свойства среды, источники поля и граничные условия приведены в табл. 1.

Исходные уравнения магнитостатического поля:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}, \quad (1)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0, \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad (3)$$

где  $\vec{H}$  — вектор напряженности магнитного поля,  $\vec{B}$  — вектор магнитной индукции,  $\vec{J}$  — вектор плот-

ности тока,  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала,  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Для линейных и изотропных сред ( $\mu = \text{const}$ ) уравнения (1) — (3) с учетом выражений  $\text{rot} \vec{A} = \vec{B}$  и  $\text{div} \vec{A} = 0$  преобразуются к уравнению эллиптического типа или уравнению Лапласа-Пуассона относительно магнитного векторного потенциала  $\vec{A}$

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{J}. \quad (4)$$

В цилиндрической системе координат ( $r, z, \varphi$ ) магнитное поле с осевой симметрией имеет только одну составляющую векторного магнитного потенциала  $A = A_\varphi [1, 2]$ , и уравнение (4) будет иметь вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu} r \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} r \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \frac{A}{\mu r^2} = -\mu_0 J. \quad (5)$$

Введем функцию магнитного потока:

$$\psi(r, z) = \frac{\Phi}{2\pi} = rA(r, z). \quad (6)$$

Составляющие вектора магнитной индукции поля:

$$B_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}; \quad B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}; \quad B_\varphi = 0.$$

После принятых выше допущений с учетом (6) уравнение Лапласа-Пуассона (5) в кусочно-однородной области моделирования  $S$  примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu} r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} r \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = -\mu_0 J. \quad (7)$$

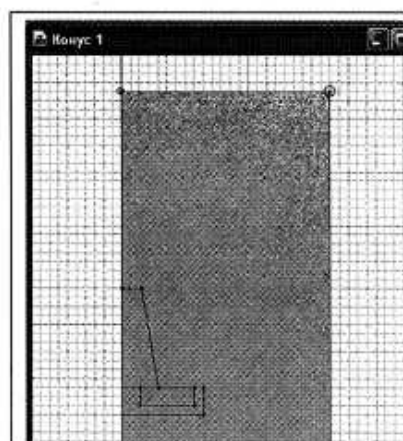


Рис. 2. Расчетная область магнитной системы открытого типа

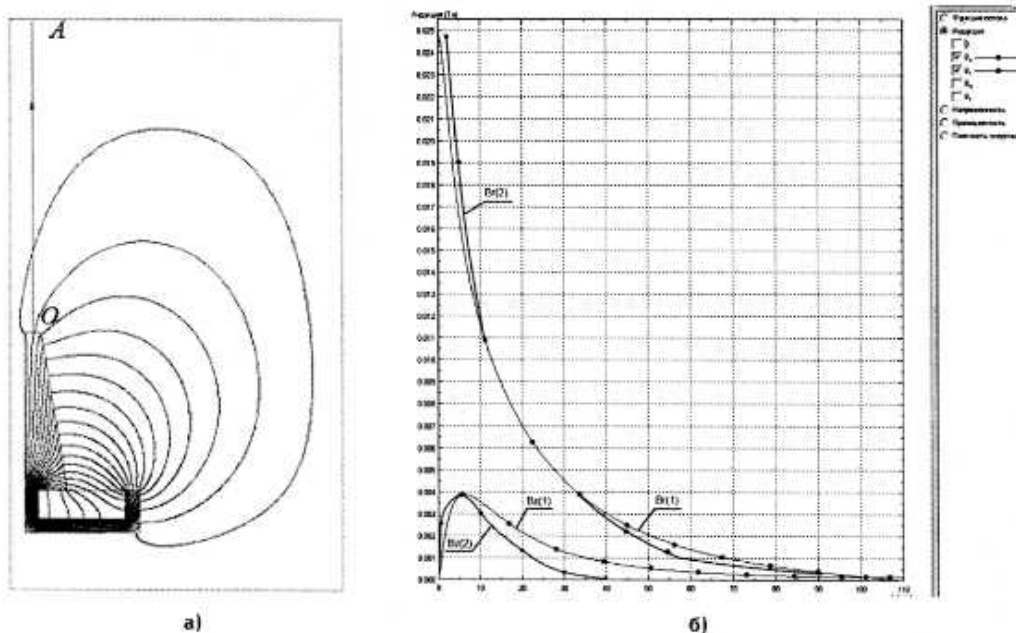


Рис. 3. Картина магнитного поля магнитной системы открытого типа с сердечником в виде усеченного конуса (а) и графики составляющих индукции магнитного поля (б); 1 – численный расчет; 2 – эксперимент

При моделировании магнитной системы открытого типа в зоне обмотки с током уравнение (7) представляется следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = -\mu_0 J,$$

где  $J = \frac{Iw}{k_3 S_{\text{обм}}}$  – плотность тока в обмотке;  $w$  – число витков обмотки;  $k_3$  – коэффициент заполнения обмотки;  $S_{\text{обм}}$  – площадь сечения обмотки.

В зоне стального магнитопровода:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = 0.$$

В зоне воздуха:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = 0.$$

Модель дополняется нулевыми граничными условиями на ее границе.

Преобразования Галеркина-МКЭ для двумерной задачи приводят к замене дифференциального уравнения (7) системой интегральных уравнений относительно  $p$  элементов расчетной сети:

$$\sum_{e=1}^p \left( \int_{S_e} \frac{1}{S_e \mu_e} [N_m]_e^T \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] dS + \int_{S_e} [N_m]_e^T \mu_0 J dS \right) = 0, \quad (8)$$

где  $S_e$  – площадь треугольного конечного элемента  $e$ ,  $[N_m]_e$  – матрица базисных функций  $N_m = \frac{a_m + b_m r + c_m z}{2S_e}$ , а коэффициенты  $a_m$ ,  $b_m$ ,  $c_m$  –

находятся через координаты узлов элемента  $m = i, j, k$ .

С учетом нулевых граничных условий после преобразования (8) получим:

$$\sum_{e=1}^p \left( \int_{S_e} \frac{1}{\mu_e} \left[ \frac{\partial [N_m]_e^T}{\partial r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial [N_m]_e^T}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] dS - \right.$$

$$-\int_S [N_m]^T \mu_0 J_{rd} S = 0, \quad (9)$$

где магнитный поток  $\psi = [N_m]_e \{\psi_m\}_e$ .

Проинтегрируем выражение (9) по площади элемента  $S_e$  и для  $p$  элементов модели приведем систему линейных алгебраических уравнений для магнитного потока в узлах элементов сети:

$$\sum_{e=1}^p \frac{1}{\mu_e} [B_m]^T [B_m]_e \{\psi_m\}_e / 4S_e - \mu_0 J \sum_{e=1}^p \frac{S_e}{12} \begin{bmatrix} 2r_i + r_j + r_k \\ r_i + 2r_j + r_k \\ r_i + r_j + 2r_k \end{bmatrix}_e = 0, \quad (10)$$

$$\text{где } 2S_e = \begin{bmatrix} 1 & r_i & z_i \\ 1 & r_j & z_j \\ 1 & r_k & z_k \end{bmatrix}_e; [B_m]_e^T = \begin{bmatrix} b_i & c_i \\ b_j & c_j \\ b_k & c_k \end{bmatrix}_e; [B_m]_e = \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix}_e.$$

Решение системы уравнений (10) получено с помощью комплекса программ Elcut 5.6 (профессиональная версия). Расчетная область магнитной системы открытого типа в Elcut 5.6 имеет вид, приведенный на рис. 2.

Площадь области моделирования с учетом кусочно-однородных сред с разной магнитной проницаемостью составляет  $400 \times 500 \text{ мм}^2$ . На внешней границе расчетной области значение векторного магнитного потенциала принимается равным нулю, то есть Число узлов триангуляционной сети составляет 998 550. Время расчета 47 секунд. Результаты расчета магнитного поля приведены на рис. 3.

В ходе решения построены: картина магнитного поля электромагнита, графики составляющих магнитной индукции осесимметричной модели электромагнита в зависимости от расстояния до насадки.

Для подтверждения правильности постановки краевой задачи для магнитной системы открытого типа и решения ее в комплексе программ Elcut 5.6 (профессиональная версия) был проведен эксперимент с помощью тесламетра типа ЭМ 4305 (класс

точности 2,5).

Анализ результатов расчета и эксперимента магнитной системы открытого типа позволяет сделать следующие выводы:

— насадка в виде сердечника переменного сечения позволяет существенно усилить магнитное поле на значительном удалении от обмотки возбуждения, то есть является концентратором магнитного потока в заданной области;

— изменение формы насадки служит в заданной области эффективным инструментом управления магнитным потоком;

— эксперимент подтвердил правильность постановки задачи и решения в комплексе программ Elcut 5.6 (профессиональная версия);

— при наличии в магнитной системе открытого типа электродов переменного сечения, имеющих осевую симметрию, эффективным методом расчета магнитного поля является комплекс программ Elcut 5.6 (профессиональная версия).

#### Библиографический список

1. Шимони, К. Теоретическая электротехника / К. Шимони. — М.: Мир, 1964. — 774 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. — М.: Высш. школа, 1978. — 231 с.

**АНДРЕЕВА Елена Григорьевна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрическая техника», профессор кафедры «Прикладная математика и информационные системы».

**ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника».

**СЕМИНА Ирина Александровна**, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника».

Адрес для переписки: e-mail: lenandr02@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23.11.2009 г.

© Е. Г. Андреева, А. А. Татевосян, И. А. Семина

## Книжная полка

Улахович, Д. А. Основы теории линейных электрических цепей [Текст]: учеб. пособие для вузов по направлению подгот. дипломир. специалистов 210400 «Телекоммуникации» / Д. А. Улахович. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 796 с.: рис., табл. — (Учебная литература для вузов). — Библиогр.: с. 783–784. — Предм. указ.: с. 785–796. — ISBN 978-9775-0083-8.

Книга основана как на классическом, так и на современном анализе и оптимальном синтезе линейных электрических цепей. Уделено внимание изучению основ теории и практики активных цепей, цепей с обратной связью, а также условиям физической реализуемости и проблемам устойчивости цепей. Рассмотрена теория и практика применения диплексоров. Изложены основные положения современного синтеза волновых аналоговых фильтров на фазовых контурах.

Рекус, Г. Г. Общая электротехника и основы промышленной электроники [Текст]: учеб. пособие для вузов / Г. Г. Рекус. — М.: Высш. шк., 2008. — 653, [1] с.: рис., табл. — (Для высших учебных заведений). — Библиогр.: с. 647. — ISBN 978-5-06-005441-5.

Пособие содержит основы теории электрических цепей постоянного, переменного (синусоидального и не-синусоидального) токов, трехфазных электрических цепей, магнитных цепей и методы их расчета; описание устройства и рабочих характеристик электрических машин постоянного тока, асинхронных и синхронных машин, трансформаторов, основ промышленной электроники, измерительной техники, электропривода, электроснабжения и электробезопасности производств.



А. В. ДЕД  
В. Н. ГОРЮНОВ  
С. С. ГИРШИН  
А. А. БУБЕНЧИКОВ  
А. С. ПЕТРОВ  
Е. В. ПЕТРОВА  
В. В. ТЕВС

Омский государственный  
технический университет

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ВЛ НА ОСНОВЕ УЧЕТА РЕЖИМНЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

В статье рассмотрены методы повышения точности расчета потерь электрической энергии. Представлен анализ формул для расчета теплопередачи лучеиспусканием, способы аппроксимации зависимости температуры провода от тока, оценено влияние изменения этих формул на расчет активных сопротивлений и потерь электрической энергии. Представлен анализ температурных режимов работы проводников различного диаметра. Выполнено сравнение потерь электрической энергии при  $t_{np} = 20^\circ\text{C}$  (допущение, ранее принятое в расчетах электрических сетей) и при фактической температуре провода (с учетом тока, ветра, температуры воздуха).

**Ключевые слова:** повышение точности, расчет потерь электроэнергии, температура провода, климатические условия.

В современных условиях достаточно часто встречаются случаи, когда сетевое строительство отстает от высоких темпов увеличения нагрузки воздушных линий. В этих условиях актуально иметь возможность оперативно и достоверно определять допустимую токовую нагрузку и уровень технологических потерь [1] электрической энергии. Повышение точности расчета потерь диктует необходимость учитывать совокупность режимных и климатических факторов. Повышение точности расчетов особенно важно для Межрегиональных распределительных сетевых компаний (МРСК), в которых происходит большая часть потерь электрической энергии. Ввиду сложности поставленной задачи многочисленные, проводимые в течение длительного времени исследования [1–7] по некоторым вопросам до настоящего времени не выявили четких рекомендаций для решения практических задач расчета потерь.

Цель настоящей статьи — проанализировать формулу для расчета теплопередачи лучеиспусканием при записи уравнения теплового баланса провода, способы аппроксимации зависимости температуры провода от протекающего тока, а также оценить влияние изменения этих формул на расчет активных сопротивлений и потерь электрической энергии.

На основе уравнений [2, 3, 4] можно получить:

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon C_0 (273 + t_{np})^4 S + \varphi_k [(t_{np} - t_{\text{раг}}) - t_a] S}{0,95 R_{20} (1 + \alpha(t_a - 20))}} \quad (1)$$

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon C_0 [(273 + t_{np})^4 - (273 + t_a)^4] S + \varphi_k [(t_{np} - t_{\text{раг}}) - t_a] S}{0,95 R_{20} (1 + \alpha(t_a - 20))}} \quad (2)$$

где  $R_{20}$  — погонное активное сопротивление при температуре провода  $20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha = 0,004$  — температурный коэффициент электрического сопротивления стале-алюминиевых проводов,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $t_{np}$  — температура провода,  $^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon$  — степень черноты поверхности провода, для окисленного алюминия, равная 0,13 отн. ед. [5];  $C_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup> [5];  $S$  — площадь излучающей поверхности проволок провода, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{раг}}$  — температура нагрева солнечной радиацией,  $^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_k$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>· $^\circ\text{C}$ ).

В работах [4, 5] значение коэффициента определяется по формуле

$$\varphi_k = 0,13057 \left( \frac{k_v v d}{a} \right)^{0,71179} \frac{\lambda_a}{d} \quad (3)$$

где  $k_v$  — коэффициент, учитывающий влияние угла направления ветра к оси воздушной линии, равный 0,5;  $v$  — скорость ветра, м/с;  $a$  — коэффициент температуропроводности воздуха, равный  $18,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_a$  — теплопроводность воздуха, равная  $0,0244$  Вт/(м· $^\circ\text{C}$ ).

Из уравнений (1) и (2) следует, что  $t_{np}$  является функцией от тока. Для аппроксимации данной зависимости в [4] используется формула

$$t_{np1} = a_1 I^2 + b_1 I + c_1, \quad (4)$$

где  $a_1, b_1, c_1$  — коэффициенты аппроксимации.

Авторами работы предложен другой вид функции аппроксимации

$$t_{np2} = a_2 I^4 + b_2 I^2 + c_2, \quad (5)$$

где  $a_2, b_2, c_2$  — коэффициенты аппроксимации.

Вспользуемся выражением (1) и (2) для нахождения годовых потерь электроэнергии, передаваемой в линиях электропередачи, выполненных из проводов марок АС-120/27 и АС-300/39 по формуле [4].

$$\Delta W = 3k_{\Phi}^2 \sum_{i=1}^{12} I_{срi}^2 R_i T_i, \quad (6)$$

где  $K_{\Phi}$  — коэффициент формы графика загрузки;  $I_{срi}$  — среднее значение тока в  $i$ -м месяце;  $R_i$  — удельное сопротивление провода;  $T_i$  — число часов линии под нагрузкой в  $i$ -м месяце.

Одновременно с достижением основной цели настоящей статьи — оценки влияния изменения основных формул математической модели на величину потерь электрической энергии — сравним значения потерь в двух линиях для случая одинаковости сезонных коэффициентов изменения нагрузки, равных коэффициентов формы графиков нагрузки, но разных значений среднемесячной температуры (рис. 1). За основу сравнения для первой линии используем данные из [4] — среднегодовая температура, характерная для Московской области, порядка  $+9,2^\circ\text{C}$ . Для второй линии рассмотрим среднемесячное изменение температур применительно к городу Омску (рис. 1) — среднегодовая температура  $+1,6^\circ\text{C}$ .

Условия расчета:

1. Температура солнечной радиации  $t_{\text{рад}} = 0$ , скорость ветра  $v = 0,5$ ;  $5 \text{ м/с}$ ; температура воздуха варьируется от минус  $40^\circ\text{C}$  до плюс  $40^\circ\text{C}$ .

2. Среднемесячные температуры воздуха в градусах Цельсия и колебания по месяцам сезонных коэффициентов изменения тока нагрузки  $K_{сез}$ , характеризующих отклонение тока от максимального значения для г. Москвы и г. Омска, представлены в табл. 1 и на рис. 1.

3. Коэффициент формы графика нагрузки  $K_{\Phi} = 1,1$ .

4. Длительно допустимые токи  $I_{\text{дон}}$  для проводов АС-120/27 и АС-300/39 соответственно равны 375 А и 710 А.

Погрешности расчета потерь электрической энергии определяются по формулам:

$$\delta_a = \frac{\Delta W_{a^2} - \Delta W_{a^4}}{\Delta W_{a^2}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

$$\delta_r = \frac{\Delta W_{r^4} - \Delta W_{\Delta r^4}}{\Delta W_{r^4}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

$$\delta_1 = \frac{\Delta W_{20} - \Delta W_{t_a}}{\Delta W_{20}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta W_{20} - \Delta W_{t_{\text{Омск}}}}{\Delta W_{20}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $\Delta W_{a^2}, \Delta W_{a^4}$  — потери на основе формул (1) и (2) соответственно и использования в обоих случаях аппроксимаций по уравнению (5);

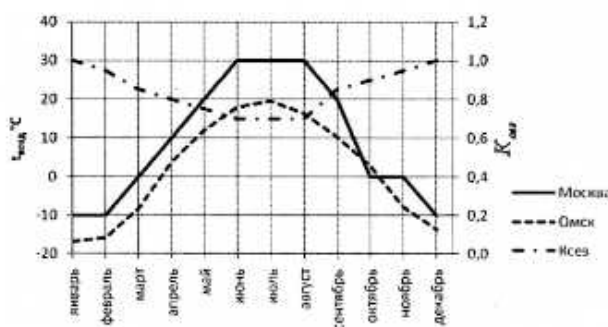


Рис. 1. Графики изменения среднемесячной температуры воздуха  $t_{\text{возд}}$  для Омска и Москвы, сезонный коэффициент изменения тока нагрузки  $K_{сез}$

Таблица 1  
Среднемесячные температуры воздуха и сезонные коэффициенты изменения тока нагрузки для г. Москвы и г. Омска

месяц	$t_a$ (Москва)	$t_a$ (Омск)	$K_{сез}$
январь	-10,00	-16,90	1,00
февраль	-10,00	-15,80	0,95
март	0,00	-8,30	0,85
апрель	10,00	3,70	0,80
май	20,00	11,90	0,75
июнь	30,00	17,90	0,70
июль	30,00	19,60	0,70
август	30,00	16,40	0,70
сентябрь	20,00	10,30	0,85
октябрь	0,00	2,80	0,90
ноябрь	0,00	-7,90	0,95
декабрь	-10,00	-13,70	1,00

$\Delta W_{a^2}, \Delta W_{a^4}$  — потери на основе аппроксимаций по формулам (4) и (5) соответственно и использования в обоих случаях расчета тока по уравнению (2);  $\Delta W_{20}, \Delta W_{t_a}, \Delta W_{t_{\text{Омск}}}$  — потери на основе аппроксимации по формуле (5), расчета тока по уравнению (2) и разных значениях активного сопротивления  $R$ :  $\Delta W_{20} - R$  при  $t_a = 20^\circ\text{C}$ ;  $\Delta W_{t_a} - R$  определяется в зависимости от значения температуры воздуха  $t_a$ ;  $\Delta W_{t_{\text{Омск}}} - R$  определяется в зависимости от значений температуры воздуха  $t_a$ , тока в проводнике  $I$  и скорости ветра  $v$ .

С целью оценки влияния значения тока нагрузки на характер изменения потерь электрической энергии рассмотрим, как это было сделано в [4], изменение тока в течение года относительно тока в декабре (табл. 1), но, в отличие от [4], диапазон изменения тока принят более широким от  $0,2I_{\text{дон}}$  до  $1,3I_{\text{дон}}$ . Расчет годовых потерь электрической энергии проводился при нагрузках в указанном диапазоне изменения токов, причем максимальное значение тока при каждом расчете годовых потерь соответствовало току декабря, а остальные токи по месяцам находились с использованием заданных коэффициентов сезонного изменения токов.

В соответствии с поставленной в работе целью определим погрешности  $\delta_a$  и  $\delta_r$  по уравнениям (7) и (8), на примере расчета потерь для провода АС-120/27 при  $v = 0,5 \text{ м/с}$  и среднемесячном изменении температур,

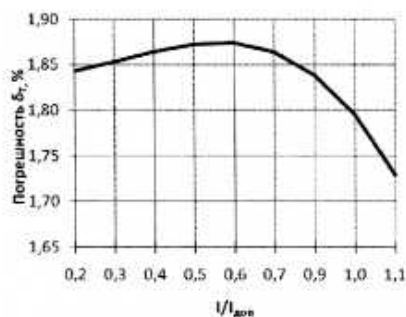


Рис. 2. Погрешность расчета потерь энергии при использовании уравнений (1) и (2) для провода АС-120/27 при  $v=0,5$  м/с с учетом изменения тока нагрузки и температуры воздуха (для г. Москвы)

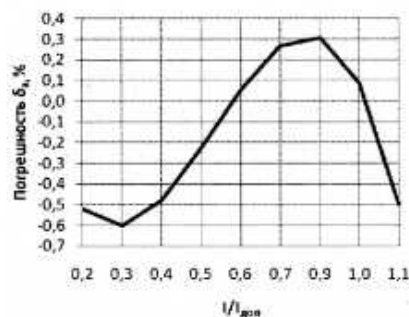


Рис. 3. Погрешность расчета потерь энергии при аппроксимациях по уравнениям (4) и (5) для провода АС-120/27 при  $v=0,5$  м/с с учетом изменения тока нагрузки и температуры воздуха (для г. Москвы)

характерном для г. Москвы (рис. 1, табл. 1). Анализ результатов расчета, представленный на рис. 2, показывает, что  $\delta_r$  не превышает 2% и можно использовать любое из уравнений (1) и (2). Однако при расчете по формуле 1 при некоторых значениях токов температура провода получается меньше, чем температура воздуха, чему достаточно сложно найти физическое толкование, поэтому в дальнейшем будет использоваться уравнение (2).

Согласно рис. 3, максимальная погрешность  $\delta_r$  по абсолютной величине не превышает 0,6%, однако при графическом построении зависимость по уравнению (5) практически совпадает с графиком, который описывает изменение температуры провода от тока по уравнению (2). Поэтому в дальнейшем будет использоваться аппроксимированная зависимость температуры от тока по уравнению (5).

В практике эксплуатации ВЛ естественный интерес представляет возможный уровень загрузки ли-

нии по условиям нагрева при различных климатических условиях, к которым в первую очередь относятся  $t_a$  и скорость ветра.

Диапазон температур определим от минус 40 °С до плюс 40 °С, так как температура ниже и выше на территории России встречается достаточно редко. В работе [6] отмечается, что в большинстве регионов России характерным является то, что время в течение года, когда скорость ветра более 6 м/с, достаточно мало, кроме того, минимальное расчетное значение скорости ветра составляет 0,6 м/с [2, 6, 7] и соответствует перемещению воздуха за счет нагрева при полном безветрии. При проведении численного эксперимента с учетом указанных выше данных, а также с целью возможности сравнения с результатами [4] скорость ветра выбрана равной 0,5 м/с и 5 м/с. На рис. 4–7 представлены построенные по уравнению (2) графики изменения температуры сталеалюминевых проводов в зависимости от режимных и климати-

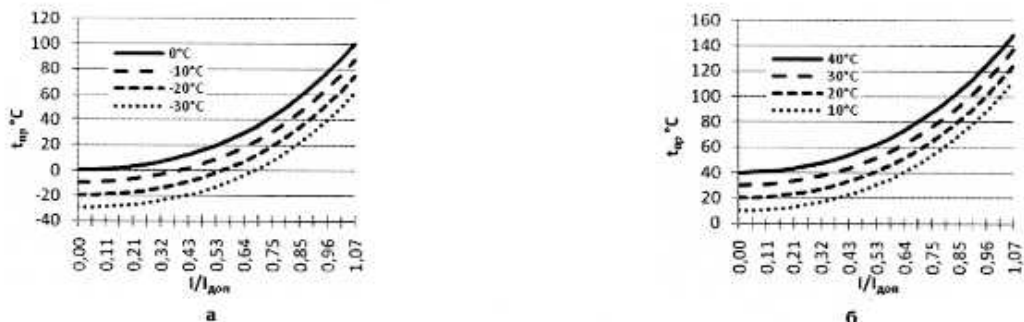


Рис. 4. Графики зависимости температуры провода АС-120/27 при  $v=0,5$  м/с от коэффициента загрузки и температуры воздуха

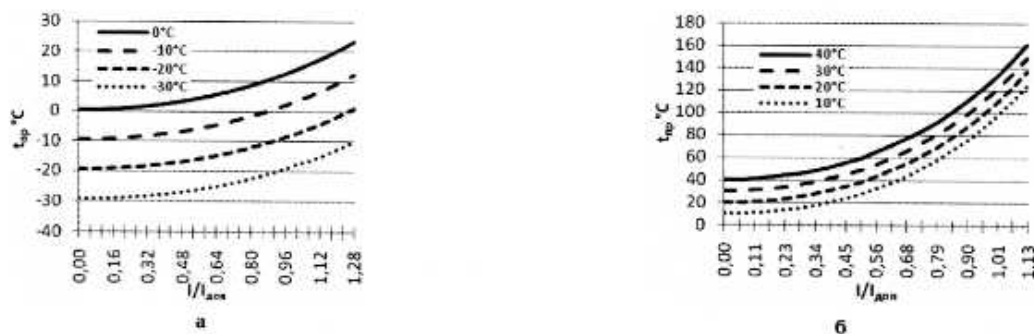


Рис. 5. Графики зависимости температуры провода АС-120/27 при  $v=5$  м/с от коэффициента загрузки и температуры воздуха

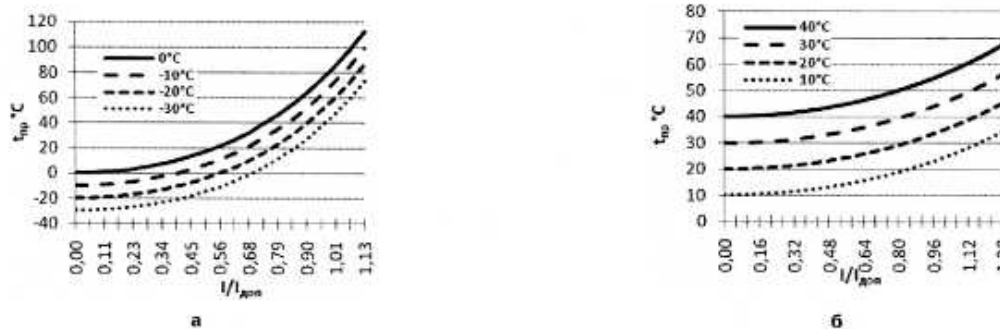


Рис. 6. Графики зависимости температуры провода АС-300/39 при  $v=0,5$  м/с от коэффициента загрузки и температуры воздуха

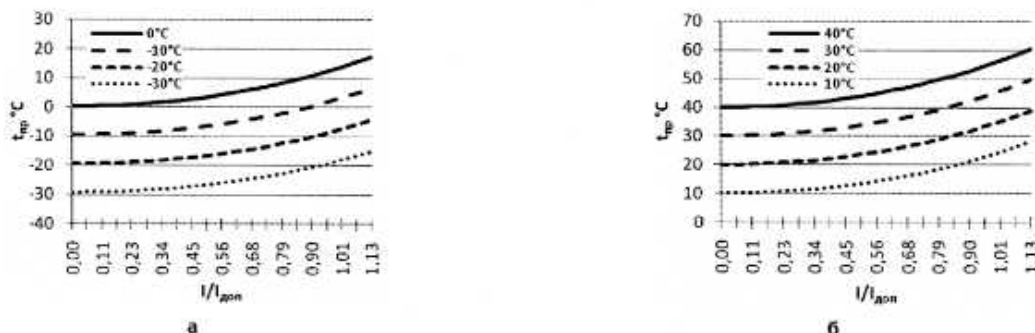


Рис. 7. Графики зависимости температуры провода АС-300/39 при  $v=5$  м/с от коэффициента загрузки и температуры воздуха

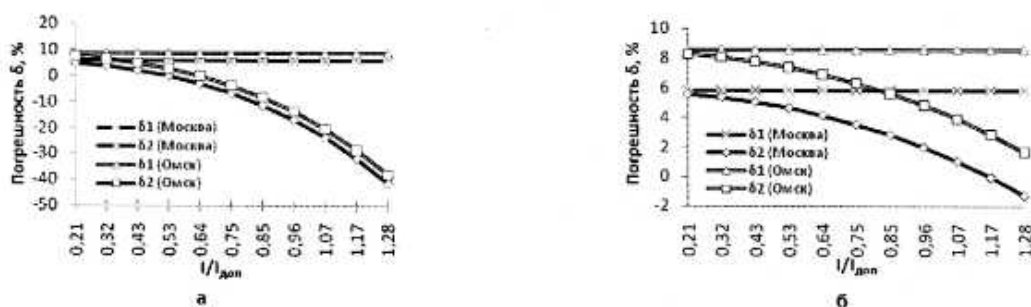


Рис. 8. Зависимости погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии от коэффициента загрузки для провода АС-120/27 для среднемесячных температур г. Омска и Московской области при скорости ветра: а)  $v=0,5$  м/с и б)  $v=5$  м/с

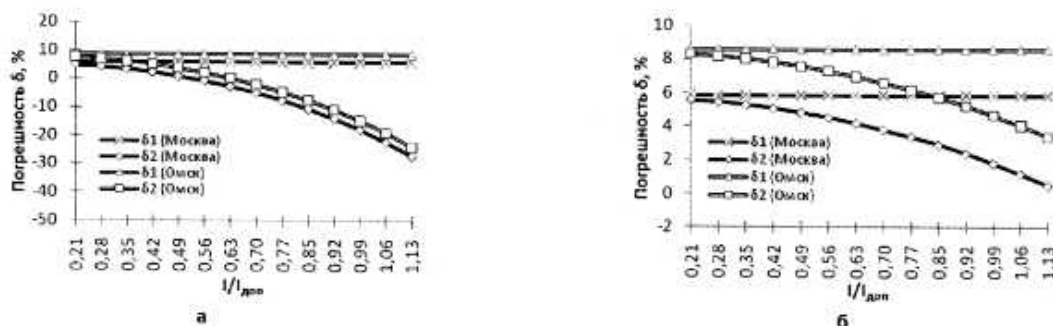


Рис. 9. Зависимости погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии от коэффициента загрузки для провода АС-300/39 для среднемесячных температур г. Омска и Московской области при скорости ветра: а)  $v=0,5$  м/с и б)  $v=5$  м/с

ческих условий. Интерес представляет длительно допустимая токовая нагрузка  $I_{доп}$ . В справочниках для каждого проводника приводится значение  $I_{доп}$ , под которым понимают ток, повышающий температуру провода до 70 °С при температуре окружающего воздуха +25 °С, при полном безветрии ( $v=0,6$  м/с).

Как следует из представленных на рис. 4–7 зависимостей, при лучших условиях охлаждения за счет обдувания проводов ветром  $v=5$  м/с и меньших чем +25 °С температурах воздуха, в проводниках могут быть допущены более высокие нагрузки, если исходить из указанной предельной температуры в



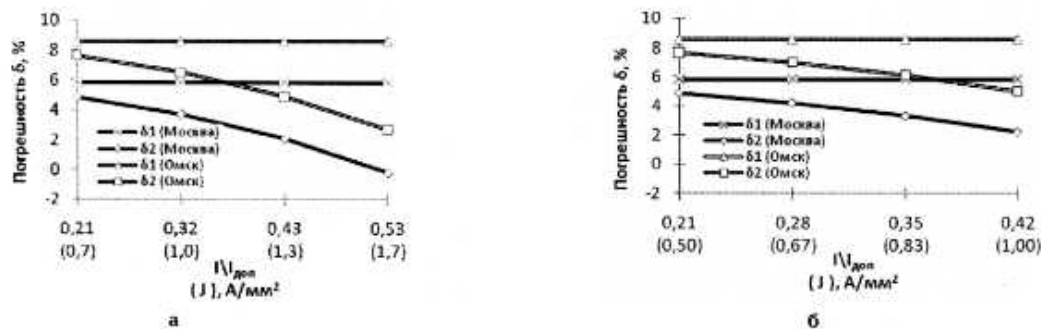


Рис. 10. Зависимости погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии от коэффициента загрузки  $I/I_{доп}$  и от плотности тока  $J$  (цифры в скобках) для среднемесячных температур г. Омска и Московской области при скорости ветра  $v=0,5$  м/с для проводов: а) АС-120/27 и б) АС-300/39

+ 70 °С. Анализ представленных зависимостей указывает также на то, что при одинаковых климатических условиях и плотностях тока провода больших сечений нагреваются сильнее.

Эти результаты вычислительного эксперимента имеют естественное физическое обоснование, состоящее в том, что тепловыделение в проводе пропорционально сечению провода, то есть радиусу в квадрате, а охлаждение площади боковой поверхности — длине окружности, то есть радиусу, поэтому при одинаковых условиях (температура воздуха, скорость ветра, плотность тока) температура проводов различных диаметров не одинакова, что в конечном итоге приводит к разной зависимости переменных потерь электрической энергии от нагрузки.

Достаточно хорошо, качественно подтверждая физическую сторону рассматриваемых процессов, представленные на рис. 4–7 графики дают при заданных токах и температурах воздуха завышенную по сравнению с ПУЭ [8] температуру провода. Аналогичные графики, построенные по уравнению (6), также иллюстрируют повышение температуры, однако в меньшей степени, чем на рис. 4–7. С целью повышения достоверности моделирования необходимо определить причину указанного несоответствия, что потребует проведения дополнительных исследований, направленных, в первую очередь, на уточнение значений постоянной лучеиспускания и мощности теплового потока, обусловленного теплоотдачей конвекцией. Особого интереса заслуживает анализ влияния на конвективный теплообмен не только величины ветра, но и его направления.

Утвержденная 30 декабря 2008 года «Инструкция по организации в Минэнерго РФ работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электрической энергии при её передаче по электрическим сетям» [1] рекомендует при расчетах учитывать реальную температуру провода. В инструкции также указывается, что в случае, когда средняя нагрузка меньше экономической плотности тока, температуру провода можно принять равной температуре окружающего воздуха. Действующий с 2006 по 2009 гг. порядок расчета и обоснования нормативов потерь предусматривал нахождение нормативов потерь электрической энергии через активное сопротивление, соответствующее + 20 °С. Учитывая также то, что температура воздуха  $t_a$  является одним из основных параметров, определяющих  $t_{np}$ , представляет интерес расчет по формулам (9) и (10) для регионов с различной среднегодовой температурой. На рис. 8 и 9 представлены погрешности расчета по-

тер электрической энергии для проводов АС-120/27 и АС-300/39 применительно к среднегодовым температурам города Омска и города Москвы. На рис. 10 для большей наглядности представлены погрешности расчета потерь электрической энергии для проводов АС-120/27 и АС-300/39 в диапазоне токов  $0 - 0,5 I_{доп}$ . Сравнение потерь электрической энергии  $\Delta W_{20}$  и  $\Delta W_{t_a}$  показывает, что  $\Delta W_{20}$  для обоих регионов превышает  $\Delta W_{t_a}$ . Погрешность составляет 5,83 % для Московского региона и 8,57 % для Омского региона. Потери электрической энергии  $\Delta W_{t_{a,t_0}}$  при увеличении  $t_a$  и увеличении тока растут. С увеличением скорости ветра, естественно, улучшаются условия охлаждения провода. Поэтому нагрев проводов и, следовательно,  $\Delta W_{t_{a,t_0}}$  при больших скоростях ветра будут иметь менее зависимый от тока характер. Представленные на рис. 8, 9 зависимости показывают, что при малых плотностях тока определяющее влияние на потери электрической энергии оказывает  $t_a$ , с увеличением загрузки линии ведущее влияние на потери энергии оказывает величина тока нагрузки. Поэтому при увеличении загрузки линии фактические потери  $\Delta W_{t_{a,t_0}}$  преобладают над  $\Delta W_{20}$  за счет интенсивного тепловыделения. Особенно заметно эта тенденция прослеживается для проводов больших диаметров.

## Выводы

1. Анализ температурных режимов работы проводов различного диаметра АС-120/27 (рис. 4 и 5) и АС-300/39 (рис. 6 и 7) указывает на то, что с увеличением диаметра провода при прочих равных условиях температура провода растет за счет преобладания процесса тепловыделения над процессом охлаждения.

2. Сравнение потерь электрической энергии при  $t_{np} = 20$  °С (допущение, ранее принимаемое в расчетах электрических сетей) и при фактической температуре провода (с учетом тока, ветра, температуры воздуха) показывает, что с увеличением  $t_a$  и увеличением тока температура провода растет, а с увеличением ветра — уменьшается (улучшаются условия отвода тепла). В регионах России с высокой среднегодовой температурой фактические потери  $\Delta W_{t_{a,t_0}}$  как правило, больше потерь, подсчитанных традиционным способом  $\Delta W_{20}$  ( $t_{np} = 20$  °С), а в северных регионах, как правило, с отрицательной среднегодовой температурой, фактические потери обычно меньше. Однако данный вывод скорее оценочный, чем количественный, так как загрузка линий и величина скорости ветра могут внести существенные поправки к

рекомендациям, сделанным только с позиции среднегодовой температуры.

3. С целью упрощения расчетов электрической энергии в некоторых работах рекомендуется проводить расчеты с использованием только среднегодовой или среднемесячной температуры воздуха. Однако такие рекомендации, как правило, имеют частный характер, относящийся к определенному типу провода, определенной нагрузке и скорости ветра. При любом отклонении от указанных условий эксплуатации провода достоверность расчета требует проведения дополнительных исследований, поэтому в современных условиях при определении годовых потерь электрической энергии целесообразно учитывать реальную температуру провода, найденную с учетом режимных и климатических факторов.

4. Исходя из предельной температуры проводов для проводов марки АС, равной  $+70^{\circ}\text{C}$ , при наличии ветра и температуре воздуха меньше  $+25^{\circ}\text{C}$  могут допускаться нагрузки, значительно превышающие  $I_{\text{ном}}$ .

#### Библиографический список

1. Инструкция по организации в Министерстве энергетики РФ работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при её передаче по электрическим сетям. Утв. Приказом Минэнерго РФ № 326 от 30.12.2008.
2. Левченко, И.И. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях / И.И. Левченко, Е.И. Садух // Электричество. — 2008. — № 4. — С. 2–8.
3. Зарудский, Г.К. Уточнение выражений для расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Г.К. Зарудский, С.Ю. Сыромятников // Вестник МЭИ. Электроэнергетика. — 2008. — № 2. — С. 37–42.
4. Воронинский, В.Э. Оценка погрешностей расчета потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучёта метеословий / В.Э. Воронинский, О.В. Туркина // Электрические станции. — 2008. — № 10. — С. 42–49.

5. Никифоров, Е.П. Предельно допустимые токовые нагрузки на провода действующих ВЛ с учетом нагрева проводов солнечной радиацией / Е.П. Никифоров // Электрические станции. — 2006. — № 7. — С. 56–59.

6. Поспелов, Г.Е. Влияние температуры проводов на потери электроэнергии в активных сопротивлениях проводов воздушных линий электропередачи / Г.Е. Поспелов, В.В. Ершечев // Электричество. — 1973. — № 10. — С. 81–83.

7. CIGRE. The thermal behavior of overhead conductors. — Electra. — 1992. — № 144.

8. Правила устройства электроустановок. 7-й вып. — Новосибирск: Сиб. ун-в. изд-во, 2007. — 854 с.

**ДЕД Александр Викторович**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».  
**ГОРЮНОВ Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий».  
**ГИРШИН Станислав Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**БУБЕНЧИКОВ Антон Анатольевич**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**ПЕТРОВ Александр Сергеевич**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».  
**ПЕТРОВА Елена Владимировна**, инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».  
**ТЕВС Василий Викторович**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».  
Адрес для переписки: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Статья поступила в редакцию 28.12.2009 г.

© А. В. Дед, В. Н. Горюнов, С. С. Гиршин, А. А. Бубенчиков, А. С. Петров, Е. В. Петрова, В. В. Тевс

## Книжная полка

**Данилов, И. А. Общая электротехника [Текст]: учеб. пособие для неэлектротехн. специальностей вузов и техникумов / И. А. Данилов. — М.: Высш. образование, 2009. — 673 с.: рис., табл. — (Основы наук). — ISBN 978-5-9692-0249-8.**

В книге изложены основы теории электрического и магнитного полей, цепей постоянного и переменного токов, электрических машин, аппаратов и приборов. Основное внимание уделено выявлению физической сущности явлений, происходящих в электрических цепях, принципов работы электротехнических устройств. Книга состоит из двух частей. В первой части рассматриваются физическая сущность электрического тока, электромагнетизм, цепи постоянного и переменного тока, резонансные явления в электрических цепях и др. Во второй части представлены электрические машины постоянного и переменного тока, трансформаторы, трехфазные системы, электроизмерительные приборы.

В пособии содержится не только теоретический, но и методический материал, обеспечивающий самоконтроль усвоения информации и коррекцию ошибок, возникающих в процессе самостоятельной работы учащихся.

**Иванов, И. И. Электротехника [Текст]: учеб. пособие для вузов по направлению «Техника и технологии» / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев. — 6-е изд., стер. — СПб. [и др.]: Лань, 2009. — 495, [1] с.: рис. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — Библиогр.: с. 492. — ISBN 978-5-8114-0523-7.**

В книге изложены основы теории электрических цепей, рассмотрены устройство, принцип действия и характеристики электрических машин, аппаратов и электроизмерительных приборов, даны методы измерения, а также основы автоматического управления электроустановками, основы электроснабжения и др.

А. А. ВЫРВА  
В. Н. ГОРЮНОВ  
С. С. ГИРШИН  
А. А. БУБЕНЧИКОВ  
А. С. ПЕТРОВ  
Е. В. ПЕТРОВА  
В. В. ТЕВС

Омский государственный  
технический университет

## УТОЧНЕНИЕ ФОРМУЛ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОДОВ ВЛ В ЗАДАЧАХ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В статье произведен анализ аналитических выражений для расчета теплопередачи лучеиспусканием при записи уравнения теплового баланса провода. Рассмотрены способы аппроксимации зависимости температуры провода от величины протекающего по нему тока. Уточнены уравнения для расчета температуры провода с учетом климатических и режимных факторов. Произведено сравнение расчетных значений допустимых длительных токов для семейства неизолированных проводов различного сечения с величинами допустимого длительного тока для этих проводов из ПУЭ

**Ключевые слова:** температура провода, аппроксимация, климатические условия, математическая модель.

Определение технологических потерь электрической энергии по электрическим сетям согласно [1] предусматривает при расчете активных сопротивлений учитывать температуру провода. Эта температура определяется режимными и климатическими факторами, в первую очередь, температурой окружающего воздуха  $t_a$ , плотностью рабочего тока, силой и направлением ветра, интенсивностью солнечной радиации. В силу того, что результаты воздействия на температуру провода солнечной радиации, ветра и тока в практических расчетах определить затруднительно, зачастую рекомендуют температуру провода принимать равной температуре окружающего воздуха. Причем предлагаемые условия такого допущения, как правило, различны.

Так, в [1] условием перехода к температуре окружающего воздуха является режим, когда средняя нагрузка линии электропередачи ниже экономической плотности тока. В работе [2] предлагается вести расчет потерь в линиях по температуре окружающего воздуха, если при средней скорости ветра, принятой авторами работы (3 м/с) максимальная нагрузка линии не превышает 30 % от допустимой. Так как экономическая плотность тока составляет, как правило, 0,3–0,5 от допустимой плотности тока, то оба условия в определенной степени согласуются.

На основе расчетов, проведенных в [3], делается вывод о возможности для провода АС-120/27 при скорости ветра 5 м/с для любой, рассматриваемой в работе, нагрузки линии (максимальная исследованная в работе нагрузка линии — порядка 60 % от длительно

допустимого тока) при расчете потерь учитывать только температуру воздуха, а для провода АС-300/39 — лишь при нагрузке, не превышающей 50 % от допустимой.

Несмотря на некоторую противоречивость результатов указанных исследований, они обосновывают то, что  $t_a$  является одним из основных факторов, воздействующих на температуру проводов, а также то, что для определенных типов проводов при определенной нагрузке линии и определенной скорости ветра можно достаточно точно рассчитывать потери электрической энергии, принимая температуру провода равной  $t_a$ . Однако возможность такого допущения в каждом конкретном случае необходимо строго доказывать. Доказательство будет легко реализовываться при наличии общей теории расчета потерь, учитывающей нагрев проводов протекающим током и солнечной радиацией, а также влияние скорости ветра и температуры окружающей среды.

Различные аспекты такого подхода рассмотрены в работах [2–14]. При этом уравнение математической модели могут решаться итерационным методом [7, 11], либо это решение базируется на аппроксимации температуры провода в зависимости от тока [3], либо используются другие приближенные уравнения [4, 7]. Цель настоящей статьи — проанализировать формулу для расчета теплопередачи лучеиспусканием при записи уравнения теплового баланса провода, способы аппроксимации зависимости температуры провода от протекающего тока.



Токовые нагрузки провода  
при заданной температуре провода и температуре воздуха при  $v=0,5$  м/с,  $t_{\text{ра}}=0$ ,  
рассчитанные по формуле (6)

$t_{\text{в}}/t_{\text{а}}$	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
-40	75,84	—	—	—	—	—	—	—	—
-35	135,02	—	—	—	—	—	—	—	—
-30	173,54	80,40	—	—	—	—	—	—	—
-25	203,60	135,57	—	—	—	—	—	—	—
-20	228,66	172,51	85,05	—	—	—	—	—	—
-15	250,29	201,60	136,53	—	—	—	—	—	—
-10	269,39	225,98	171,94	89,79	—	—	—	—	—
-5	286,50	247,10	200,09	137,89	—	—	—	—	—
0	302,03	265,81	223,80	171,82	94,62	—	—	—	—
5	316,24	282,62	244,43	199,04	139,60	—	—	—	—
10	329,33	297,91	262,75	222,10	172,10	99,54	—	—	—
15	341,47	311,91	279,26	242,24	198,43	141,65	27,51	—	—
20	352,79	324,87	294,31	260,18	220,85	172,78	104,54	—	—
25	363,38	336,89	308,13	276,39	240,50	198,22	144,02	46,80	—
30	373,33	348,11	320,92	391,20	258,07	220,02	173,82	109,63	—
35	382,71	358,64	322,82	304,83	273,98	239,20	198,41	146,68	60,54
40	391,59	368,54	343,95	317,46	288,55	256,40	219,59	175,21	114,80
45	400,00	377,89	354,40	329,23	301,98	272,01	238,31	198,97	149,62
50	408,00	386,74	364,24	340,26	314,46	286,34	255,14	219,55	176,94
55	415,62	395,15	373,55	350,63	326,11	299,58	270,46	237,81	199,88
60	422,89	403,15	382,38	360,42	337,03	311,90	284,55	254,27	219,87
65	429,85	410,78	390,77	369,69	347,32	323,42	297,59	269,31	237,68
70	436,53	418,08	398,77	378,48	357,05	334,24	309,75	283,16	253,79
75	442,93	425,06	406,41	386,86	366,26	344,44	321,14	296,01	268,54
80	449,09	431,77	413,72	394,85	375,03	354,10	331,85	308,01	282,15

В основу исследований положим уравнение теплового баланса провода для установившегося теплового режима [3, 4, 6, 7]

$$0,95R_{20}(1+\alpha(t_{\text{а}}-20))I^2=Q_{\text{л}}+Q_{\text{к}}, \quad (1)$$

где  $I$  — рабочий ток, А;  $Q_{\text{л}}$  и  $Q_{\text{к}}$  — мощность теплопередачи от поверхности провода лучеиспусканием и конвекцией соответственно, Вт/м;  $R_{20}$  — погонное активное сопротивление при температуре провода 20 °С;  $\alpha=0,004$  — температурный коэффициент электрического сопротивления сталеалюминиевых проводов, 1/град;  $t_{\text{пр}}$  — температура провода, °С.

Мощность теплового потока излучения провода может определяться согласно уравнениям [3, 6, 7],

$$Q_{\text{лТ}}=\epsilon C_0(273+t_{\text{пр}})^4 S, \quad (2)$$

$$Q_{\text{лДТ}}=\epsilon C_0[(273+t_{\text{пр}})^4-(273+t_{\text{а}})^4] S, \quad (3)$$

где  $\epsilon$  — степень черноты поверхности провода, для окисленного алюминия, равная 0,13 отн. ед. [12];  $C_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) [12];  $S$  — площадь излучающей поверхности проволок провода, м<sup>2</sup>.

Степень черноты поверхности провода (постоянная лучеиспускания или коэффициент лучеиспус-

кания) определяется материалом и состоянием поверхности провода. Согласно [3, 6, 7, 12–14], этот коэффициент может изменяться в диапазоне 0,11–0,8 отн. ед., соответственно, малые значения относятся к чистому алюминию, а наибольшие значения — к окисленному и загрязненному алюминию. В практике создания алгоритмов расчета температуры проводов достаточно часто принимают  $\epsilon=0,6$  [6–8, 11] или  $\epsilon=0,13$  [3, 12].

Возможность применения формул (2) или (3) достаточно подробно обсуждена в [4], где приводится теоретическое обоснование того или иного подхода. В настоящей статье при проведении численного эксперимента по нахождению сопротивлений и потерь будут использоваться оба выражения. Мощность теплового потока, обусловленного теплоотдачей конвекцией, удовлетворяет уравнению [12]

$$Q_{\text{к}}=\varphi_{\text{к}}[(t_{\text{пр}}-t_{\text{ра}})-(t_{\text{а}}-t_{\text{ра}})] S, \quad (4)$$

где  $\varphi_{\text{к}}$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $t_{\text{ра}}$  — температура нагрева солнечной радиацией, °С.

Для нахождения коэффициента теплоотдачи используется различные выражения, определяющие точность нахождения (4). В работах [3, 12] значение коэффициента определяется по формуле



Токовые нагрузки провода  
при заданной температуре провода и температуре воздуха при  $v=0,5$  м/с,  $t_{\text{рад}}=0$ ,  
рассчитанные по формуле (7)

$t_{\text{в}}/t_{\text{в}}$	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
-40	0	—	—	—	—	—	—	—	—
-35	112.394	—	—	—	—	—	—	—	—
-30	157.050	0	—	—	—	—	—	—	—
-25	190.111	109.905	—	—	—	—	—	—	—
-20	217.039	153.673	0	—	—	—	—	—	—
-15	239.984	186.141	107.621	—	—	—	—	—	—
-10	260.070	212.635	150.571	0	—	—	—	—	—
-5	277.971	235.252	182.489	105.52	—	—	—	—	—
0	294.135	255.083	208.580	147.715	0	—	—	—	—
5	308.876	272.788	230.890	179.124	103.586	—	—	—	—
10	322.427	288.800	250.483	204.840	145.082	0	—	—	—
15	334.965	303.425	268.002	226.863	176.019	101.802	—	—	—
20	346.627	316.889	283.869	246.233	201.386	142.652	0	—	—
25	357.527	329.364	298.383	263.577	223.141	173.151	100.154	—	—
30	367.754	340.984	311.763	279.307	242.302	198.194	140.406	0	—
35	377.385	351.859	324.177	293.715	259.482	219.699	170.499	98.631	—
40	386.483	362.076	335.755	307.015	275.084	238.665	195.24	138.33	0
45	395.102	371.709	346.604	319.370	289.392	255.691	216.514	168.046	97.224
50	403.289	380.821	356.809	330.907	302.615	271.172	235.297	192.508	136.409
55	411.084	389.463	366.443	341.730	314.913	285.386	252.18	213.565	165.777
60	418.521	397.68	375.564	351.923	326.411	298.537	267.548	232.179	189.978
65	425.632	405.513	384.226	361.555	337.209	310.782	281.674	248.928	210.835
70	432.443	412.994	392.471	370.685	347.389	322.242	294.758	264.191	229.293
75	438.980	420.155	400.338	379.364	357.019	333.016	306.952	278.235	245.917
80	445.264	427.021	407.859	387.634	366.157	343.184	318.377	291.256	261.082

$$\varphi_k = 0,13057 \left( \frac{k_v v d}{a} \right)^{0,71179} \frac{\lambda_n}{d}, \quad (5)$$

где  $k_v$  — коэффициент, учитывающий влияние угла направления ветра к оси воздушной линии, равный 0,5;  
 $v$  — скорость ветра, м/с;  $a$  — коэффициент температуропроводности воздуха, равный  $18,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  
 $\lambda_n$  — теплопроводность воздуха, равная 0,0244 Вт/(м·°C).  
На основе уравнений (1) — (5) можно получить:

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon C_0 (273 + t_{\text{в}})^4 S + \varphi_k [(t_{\text{в}} - t_{\text{рад}}) - t_n] S}{0,95 R_{20} (1 + \alpha(t_n - 20))}}, \quad (6)$$

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon C_0 [(273 + t_{\text{в}})^4 - (273 + t_n)^4] S + \varphi_k [(t_{\text{в}} - t_{\text{рад}}) - t_n] S}{0,95 R_{20} (1 + \alpha(t_n - 20))}}. \quad (7)$$

Воспользуемся выражением (6) и (7) для нахождения температуры провода АС-120/27.

Условия расчета:

Температура солнечной радиации  $t_{\text{рад}} = 0$  °C, скорость ветра  $v = 0,5$  м/с; диапазон температур воздуха от минус 40 °C до плюс 40 °C; удельное сопротивление провода  $R_{20} = 0,243$  Ом/км; диаметр провода  $d = 15,4$  мм диапазон температур воздуха от минус 40 °C до плюс 80 °C.

Предположение  $t_{\text{рад}} = 0$  °C, принятое в [3] и используемое в настоящей статье, является допущением, которое в данном случае может быть обосновано следующими соображениями. Представляется, что на результаты исследований, связанные с целью настоящей статьи, учет или пренебрежение  $t_{\text{рад}}$  в значительной степени не влияет. Тем не менее оценка влияния солнечной радиации представляет интерес. По данным [8], радиация обеспечивает повышение температуры ненагруженных током проводов на 10–12 °C, а в случае протекания тока плотностью порядка  $j = 2$  А/мм<sup>2</sup> действие радиации уменьшается и увеличение температуры провода не превышает 3–5 °C. Вместе с тем в [11] на основе расчета активного сопротивления провода АС-50/8 для плотности тока  $j = 2$  А/мм<sup>2</sup> итерационным методом с допустимой погрешностью 2 % определено, что под действием радиации активное сопротивление провода АС-50/8 увеличивается на 5 %, что эквивалентно увеличению температуры провода на 12,5 °C. Ввиду такой противоречивости в первом приближении, можно предположить, что учет влияния солнечной радиации увеличивает температуру провода на 5–10 °C. При необходимости проверки предположений можно использовать методики достаточно строгого учета солнечной радиации, описанные в [7, 8, 10, 12].

В табл. 1 и 2 представлены результаты расчета тока по уравнению (6) и (7) соответственно для провода АС-120/27.

Таблица 3

Зависимость температуры провода АС-120/27  
от тока и температуры воздуха, при токе, рассчитанном по формуле (6), для  $v=0,5$  м/с

Температура воздуха, °С	Зависимость $t_{np} = f(I, v, t_a)$	
	аппроксимация по формуле $t_{np} = a_1 I^2 + b_1 I + c$	аппроксимация по формуле $t_{np} = a_2 I^4 + b_2 I^2 + c$
-40	$t_{np} = 9,39 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,19 I - 28,93$	$t_{np} = 1,350 \cdot 10^{-8} I^4 + 3,242 \cdot 10^{-4} I^2 - 41,1$
-30	$t_{np} = 9,15 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,17 I - 20,68$	$t_{np} = 1,307 \cdot 10^{-8} I^4 + 3,526 \cdot 10^{-4} I^2 - 31,763$
-20	$t_{np} = 8,91 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,15 I - 12,40$	$t_{np} = 1,267 \cdot 10^{-8} I^4 + 3,790 \cdot 10^{-4} I^2 - 22,415$
-10	$t_{np} = 8,69 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,13 I - 4,11$	$t_{np} = 1,229 \cdot 10^{-8} I^4 + 4,034 \cdot 10^{-4} I^2 - 13,072$
0	$t_{np} = 8,47 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,12 I + 4,19$	$t_{np} = 1,193 \cdot 10^{-8} I^4 + 4,262 \cdot 10^{-4} I^2 - 3,746$
10	$t_{np} = 8,25 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,10 I + 12,51$	$t_{np} = 1,158 \cdot 10^{-8} I^4 + 4,473 \cdot 10^{-4} I^2 + 5,553$
20	$t_{np} = 8,05 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,09 I + 20,83$	$t_{np} = 1,126 \cdot 10^{-8} I^4 + 4,671 \cdot 10^{-4} I^2 + 14,815$
30	$t_{np} = 7,84 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,0771 I + 29,14$	$t_{np} = 1,094 \cdot 10^{-8} I^4 + 4,885 \cdot 10^{-4} I^2 + 24,033$
40	$t_{np} = 7,64 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,0651 I + 37,45$	$t_{np} = 1,065 \cdot 10^{-8} I^4 + 5,026 \cdot 10^{-4} I^2 + 33,2$

Таблица 4

Зависимость температуры провода  
от тока и температуры воздуха, при токе, рассчитанном по формуле (7), для  $v=0,5$  м/с

Температура воздуха, °С	Зависимость $t_{np} = f(I, v, t_a)$	
	аппроксимация по формуле $t_{np} = a_1 I^2 + b_1 I + c_1$	аппроксимация по формуле $t_{np} = a_2 I^4 + b_2 I^2 + c_2$
-40	$t_{np} = 8,259 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,119 I - 35,505$	$t_{np} = 1,322 \cdot 10^{-8} I^4 + 3,355 \cdot 10^{-4} I^2 - 39,185$
-30	$t_{np} = 7,975 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,100 I - 26,55$	$t_{np} = 1,277 \cdot 10^{-8} I^4 + 3,645 \cdot 10^{-4} I^2 - 29,424$
-20	$t_{np} = 7,708 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,083 I - 17,419$	$t_{np} = 1,234 \cdot 10^{-8} I^4 + 3,913 \cdot 10^{-4} I^2 - 19,603$
-10	$t_{np} = 7,457 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,068 I - 8,131$	$t_{np} = 1,194 \cdot 10^{-8} I^4 + 4,162 \cdot 10^{-4} I^2 - 9,735$
0	$t_{np} = 7,221 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,054 I + 1,3$	$t_{np} = 1,155 \cdot 10^{-8} I^4 + 4,394 \cdot 10^{-4} I^2 + 0,169$
10	$t_{np} = 7,000 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,043 I + 10,858$	$t_{np} = 1,118 \cdot 10^{-8} I^4 + 4,610 \cdot 10^{-4} I^2 + 10,103$
20	$t_{np} = 6,793 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,032 I + 20,526$	$t_{np} = 1,083 \cdot 10^{-8} I^4 + 4,810 \cdot 10^{-4} I^2 + 20,058$
30	$t_{np} = 6,600 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,024 I + 30,291$	$t_{np} = 1,049 \cdot 10^{-8} I^4 + 4,997 \cdot 10^{-4} I^2 + 30,03$
40	$t_{np} = 6,422 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,016 I + 40,138$	$t_{np} = 1,017 \cdot 10^{-8} I^4 + 5,171 \cdot 10^{-4} I^2 + 40,013$

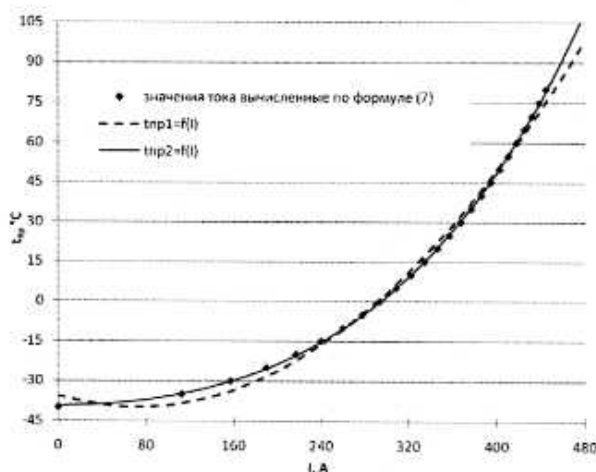


Рис. 1. Исходная и аппроксимированные зависимости температуры от тока

Анализ табл. 1 и 2 показывает, что значения токов для одних и тех же значений температур отличаются значительно. Более того, некоторые значения токов в табл. 1 соответствуют случаю, когда  $t_{np}$  меньше, чем  $t_a$ , чему достаточно сложно найти физическое толкование. По этим соображениям применение выражения (7) представляется предпочтительным.

Из уравнений (6) и (7) следует, что  $t_{np}$  является функцией от тока провода. Для аппроксимации данной зависимости в [3] используется формула

$$t_{np1} = a_1 I^2 + b_1 I + c_1, \quad (8)$$

где  $a_1, b_1, c_1$  — коэффициенты аппроксимации.

Допустимый длительный ток (вне помещений)  $I_{\text{доп.вн.}}$  [15,16]  
для неизолированных проводов по ГОСТ 839-80

Таблица 5

Марка провода	Диаметр провода $d$ , мм	Электрическое сопротивление 1 км провода постоянному току при температуре 20 °С, Ом/км	$I_{\text{доп.вн.}}$ , А
АС-25/4,2	6,9	1,1521	142
АС-50/8	9,6	0,5951	210
АС 70/11	11,4	0,4218	265
АС 120/27	15,4	0,2531	375
АС 240/32	21,6	0,1182	605
АС 300/39	24	0,0958	710
АС 500/64	30,6	0,0588	945

Расчетные значения допустимого длительного тока  $I_{\text{доп.расч}}$  и погрешности расчета для  $K_f=0,5$ 

Таблица 6

Марка провода	$I_{\text{доп.расч}}$ при $v=0,6$ м/с				Погрешности по формуле (10)			
	$\epsilon=0,13$		$\epsilon=0,6$		$\epsilon=0,13$		$\epsilon=0,6$	
	ур-е (6)	ур-е (7)	ур-е (6)	ур-е (7)	ур-е (6)	ур-е (7)	ур-е (6)	ур-е (7)
АС 25/4,2	108,05	103,51	133,27	115,47	23,91	27,10	6,15	18,68
АС 50/8	170,43	162,67	213,17	183,07	18,85	22,54	-1,51	12,82
АС 70/11	216,13	205,87	272,37	232,82	18,44	22,31	-2,78	12,14
АС 120/27	313,03	297,05	399,79	338,89	16,52	20,79	-6,61	9,63
АС 240/32	521,65	492,80	676,66	568,13	13,78	18,55	-11,85	6,10
АС 300/39	603,46	569,24	786,65	658,48	15,00	19,82	-10,80	7,26
АС 500/64	846,15	795,37	1115,78	927,47	10,46	15,83	-18,07	1,86

Расчетные значения допустимого длительного тока  $I_{\text{доп.расч}}$  и погрешности расчета для  $K_f=0,75$ 

Таблица 7

Марка провода	$I_{\text{доп.расч}}$ при $v=0,6$ м/с				Погрешности по формуле (10)			
	$\epsilon=0,13$		$\epsilon=0,6$		$\epsilon=0,13$		$\epsilon=0,6$	
	ур-е (6)	ур-е (7)	ур-е (6)	ур-е (7)	ур-е (6)	ур-е (7)	ур-е (6)	ур-е (7)
АС-25/4,2	122,66	118,69	145,37	129,25	13,62	16,42	-2,38	8,98
АС-50/8	193,17	186,37	231,76	204,42	8,01	11,25	-10,36	2,66
АС 70/11	244,77	235,76	295,61	259,62	7,63	11,03	-11,55	2,03
АС 120/27	353,95	339,90	432,58	377,02	5,61	9,36	-15,36	-0,54
АС 240/32	588,74	563,33	729,64	630,29	2,69	6,89	-20,60	-4,18
АС 300/39	680,66	650,52	847,32	729,89	4,13	8,38	-19,34	-2,80
АС 500/64	953,01	908,22	1198,84	1025,89	-0,85	3,89	-26,86	-8,56

Ток входит в уравнения теплового баланса во второй степени. Поэтому в качестве переменной при аппроксимации целесообразно использовать не сам ток, а его вторую степень.

Зависимость температуры от квадрата тока  $t_{\text{пр}}=f(I^2)$  не является линейной. Из уравнений теплового баланса видно, что при достаточно большом токе (в несколько раз превышающем допустимый) эта функция имеет разрыв, при приближении к которому температура стремится к бесконечности. Следовательно, производные высших порядков отличны от нуля и до точки разрыва являются возрастающими функциями.

Аппроксимация зависимостей, имеющих разрывы, строго говоря, не может быть осуществлена с помощью многочленов. Однако в рассматриваемом случае «рабочий участок» зависимости (до токов, незначительно превышающих допустимый), лежит достаточно далеко от точки разрыва, и значения производных быстро убывают с увеличением их порядка. Поэтому при подборе аппроксимирующей функции имеет смысл исходить из того, чтобы учитывалось лишь минимальное число производных. При этом функция должна быть нелинейной. Указанным условиям удовлетворяет парабола (9) которая учитывает первую и вторую производные температуры по квадрату тока.

$$t_{np2} = a_2 I^4 + b_2 I^2 + c_2, \quad (9)$$

где  $a_2, b_2, c_2$  — коэффициенты аппроксимации.

На основе уравнений (8) и (9), а также данных табл. 1 и 2 получим формулы для расчета  $t_{np}$ , приведенные в табл. 3 и 4.

Графики функций  $t_{np1} = a_1 I^2 + b_1 I + c_1$  и  $t_{np2} = a_2 I^4 + b_2 I^2 + c_2$  приведены на рис. 1. Из рис. 1 следует, что при заданной температуре воздуха функция по формуле (9) более адекватно описывает зависимость температуры провода от тока в проводнике, особенно явно это прослеживается в диапазоне малых токов.

Представляет интерес сравнение величин длительно допустимых токов, представленных в ПУЭ [15], с вычисленными значениями токов с использованием формул (6) и (7) для проводов различных диаметров (табл. 5).

Условия расчета:

$$K_{v1} = 0,5; K_{v2} = 0,75; v = 0,6 \text{ м/с}; t_{np} = 70^\circ\text{C}; t_a = 25^\circ\text{C}; \epsilon_1 = 0,13; \epsilon_2 = 0,6.$$

Значение  $K_v = 0,5$  рекомендуется применять при угле атаки ветра, равном нулю [12]. Согласно [8], теплоотдача конвекцией при поперечном направлении ветра по сравнению с продольным увеличивается в 2 раза, что равносильно увеличению в 2 раза  $K_v$ , то есть до  $K_v = 1$ . В вычислительном эксперименте, ввиду случайности направления ветра на практике, будет, в первом приближении, использоваться  $K_v = 0,5$ , и среднее значение этого коэффициента между 0,5 и 1, то есть  $K_v = 0,75$ .

В табл. 6 и 7 представлены результаты расчета длительно допустимых токов  $I_{доп.расч}$  по уравнениям (6) и (7) и погрешности их определения по формуле

$$\delta_v = \frac{I_{доп.ПУЭ} - I_{доп.расч}}{I_{доп.ПУЭ}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $I_{доп.ПУЭ}$  — значение длительно допустимого тока из ПУЭ.

Анализ показывает, что наиболее близки значения  $I_{доп.расч}$  к  $I_{доп.ПУЭ}$  достигается в двух вариантах:

1.  $\epsilon_1 = 0,13; K_{v2} = 0,75$ ; используется уравнение (6);
2.  $\epsilon_2 = 0,60; K_{v2} = 0,75$ ; используется уравнение (7).

Однако в виду того, что для проводов, находящихся в эксплуатации, рекомендуется значение  $\epsilon = 0,6$  [8], более оправданным в практике инженерных расчетов представляется применение второго варианта. Разброс  $I_{доп.расч}$  от  $I_{доп.ПУЭ}$  определяемое по уравнению (10), находится в пределах (табл. 7) от минус 8,56 % (для АС-500/64) до 8,98 % (для АС-25/4,2). Недостатком в этом случае является то, что для большинства проводов  $I_{доп.расч}$  превосходят  $I_{доп.ПУЭ}$ , то есть расчет дает несколько завышенное значение тока при температуре провода  $70^\circ\text{C}$ . Для максимального отрицательного превышения 8,56 % расчетное значение  $I_{доп.расч} = 1025,89 \text{ А}$  на 81 А больше тока  $I_{доп.ПУЭ}$ , которое составляет 945 А для АС-500/64. Это означает, что истинная температура (с позиции ПУЭ) будет превышать расчетную на  $7^\circ\text{C}$ , то есть вместо  $70^\circ\text{C}$  провод фактически будет иметь температуру  $77^\circ\text{C}$ . Такая температура не является критической для сталеалюминиевых проводов, при их эксплуатации значение максимально допустимой температуры может составлять  $100^\circ\text{C}$  [16] и даже  $120^\circ\text{C}$  [8]. Ограничение на температуру может накладывать температура контактов, которая из-за опасности окисления при длительной работе не должна превышать  $70^\circ\text{C}$ . Однако, в то время как температура сталеалюминиевых проводов достигает  $130^\circ\text{C}$ , соединители (соединительные

зажимы) за счет лучших условий охлаждения нагреваются до температуры, не превышающей  $60^\circ\text{C}$  [8].

Для максимального положительного превышения 8,98 % (для АС-25/4,2), что соответствует разности по токам между  $I_{доп.расч}$  и  $I_{доп.ПУЭ}$ , расчетное значение длительно допустимого тока получается несколько завышенным. Завышение понимается в том смысле, что для АС-25/4,2 ток  $I_{доп.расч} = 129,25 \text{ А}$ , который по расчету определяет температуру провода в  $70^\circ\text{C}$ , на самом деле (с позиции ПУЭ) соответствует температуре несколько меньше, чем  $70^\circ\text{C}$ . Данное несоответствие тем не менее имеет и позитивную сторону, так как дает определенный запас по нагрузочной способности.

## Выводы

1. Сравнение результатов расчета с использованием формул (6) и (7) показало, что, во-первых, некоторые значения температуры провода в табл. 1 по формуле (6) меньше, чем  $t_a$ , чему достаточно сложно найти обоснование, во-вторых, сравнение потерь электрической энергии, определенных на основе (6) и (7), показывают, что для провода АС-120/27 они отличаются в пределах 2 %.

2. Аппроксимации температуры провода (8) и (9) при анализе потерь электрической энергии дают результаты, максимально отличающиеся на 0,6 %. Таким образом, в рамках проведенного вычислительного эксперимента нет значительных преимуществ использования формулы (8) или (9), однако из соображения более высокой точности расчета в диапазоне малых токов предпочтение целесообразно отдать уравнению (9).

3. Уточнены уравнения математической модели для расчета температуры провода с учетом климатических и режимных факторов. Достоверность предложенных рекомендаций обусловлена сравнением расчетных значений допустимых длительных токов для семейства неизолированных проводов различного сечения с величинами допустимого длительного тока для этих проводов из ПУЭ.

## Библиографический список

1. Инструкция по организации в Министерстве энергетики РФ работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Утв. Приказом Минэнерго РФ № 326 от 30.12.2008.
2. Поспелов, Г. Е. Влияние температуры проводов на потери электроэнергии в активных сопротивлениях проводов воздушных линий электропередачи / Г. Е. Поспелов, В. В. Ершевич // Электричество. — 1973. — № 10. — С. 81—83.
3. Воротицкий, В. Э. Оценка погрешностей расчета потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучёта метеословий / В. Э. Воротицкий, О. В. Туркина // Электрические станции. — 2008. — № 10. — С. 42—49.
4. Никифоров, Е. П. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях / Е. П. Никифоров // Электричество. — 2009. — № 6. — С. 63—66.
5. Потери электроэнергии в электрических сетях, зависящие от погодных условий / Ю. С. Железко [и др.] // Электрические станции. — 2004. — № 11. — С. 42—48.
6. Левченко, И. И. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях / И. И. Левченко, И. И. Сацук // Электричество. — 2008. — № 4. — С. 2—8.
7. Зарудский, Г. К. Уточнение выражений для расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи сверх-



высокого напряжения / Г. К. Зарудский, С. Ю. Сыромятников // Вестник МЭИ. Электроэнергетика. — 2008. — № 2. — С. 37–42.

8. Бургсдорф, В. В. Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по нагреву их проводов / В. В. Бургсдорф // Электричество. — 1989. — № 11. — С. 1–8.

9. Хлебников, В. К. Влияние климатических условий на потери мощности и электроэнергии в кабельных линиях электропередачи / В. К. Хлебников // Известия вузов. Электромеханика. — 2009. — № 2. — С. 69–73.

10. Никифоров, Е. П. Учет мощности нагрева солнечной радиацией проводов ВЛ электропередачи / Е. П. Никифоров // Электрические станции. — 2008. — № 2. — С. 49–51.

11. Герасименко, А. А. Учет схемно-режимных и атмосферных факторов при расчете технологических потерь электроэнергии в распределительных сетях / А. А. Герасименко, И. В. Шульгин, Г. С. Тимофеев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технология. — 2008. — № 6. — С. 19–21.

12. Никифоров, Е. П. Предельно допустимые токовые нагрузки на провода действующих ВЛ с учетом нагрева проводов солнечной радиацией / Е. П. Никифоров // Электрические станции. — 2006. — № 7. — С. 56–59.

13. CIGRE. Thermal state of overhead line conductors. — Electra. — 1988. — № 121.

14. CIGRE. The thermal behavior of overhead conductors. — Electra. — 1992. — № 144.

15. Правила устройства электроустановок. 7-й вып. — Новосибирск: Сиб. ун-в. изд-во, 2007. — 854 с.

16. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередачи. — М.: Союзтехэнерго. — 1987. — 36 с.

**ВЫРВА Андрей Аркадьевич**, кандидат технических наук, управляющий директор ООО «ЮНГ-Энерго-нефть».

**ГОРЮНОВ Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

**ГИРШИН Станислав Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

**БУБЕНЧИКОВ Антон Анатольевич**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

**ПЕТРОВ Александр Сергеевич**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

**ПЕТРОВА Елена Владимировна**, инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

**ТЕВС Василий Викторович**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

Адрес для переписки: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Статья поступила в редакцию 28.12.2009 г.

© А. А. Вырва, В. Н. Горюнов, С. С. Гиршин, А. А. Бубенчиков, А. С. Петров, Е. В. Петрова, В. В. Тевс

## Книжная полка

**Эрнст, А. Д. Самозапуск синхронных электродвигателей [Текст] : учеб. пособие / А. Д. Эрнст ; ОмГТУ. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2009. — 75 с. : рис., табл. — Библиогр.: с. 73.**

В настоящем пособии собраны и структурированы данные, необходимые для расчета самозапуска синхронных электродвигателей, разработана методика, даны указания к выполнению самостоятельной работы. Изложены основные положения расчетов самозапуска синхронных электродвигателей узлов нагрузки в системах электроснабжения. Рассмотрены этапы расчетов в плане самостоятельной работы студентов при изучении дисциплин: «Устойчивость узлов нагрузки электроэнергетических систем», «Особые режимы и устойчивость электроэнергетических систем». Приведен сборник заданий, даны основные теоретические положения и примеры выполнения расчета самозапуска.

**Ополева, Г. Н. Схемы и подстанции электроснабжения [Текст] : справочник : учеб. пособие для вузов по направлению подгот. 650900 (140200) «Электроэнергетика» и специальностям 100100 (140204) «Электрические станции», 100200 (140205) «Электроэнергетические системы и сети» и 100400 (140211) «Электроснабжение» / Г. Н. Ополева. — М. : ФОРУМ-ИНФРА-М, 2009. — 479 с. : рис., табл. — (Высшее образование). — Библиогр.: с. 473–475. — ISBN 978-5-8199-0254-7. — ISBN 978-5-16-002581-0.**

Рассматриваются вопросы построения схем электроснабжения, проектирования распределительных и трансформаторных подстанций, передачи электрической энергии. Справочник содержит нормативно-технические материалы, необходимые для проектирования систем электроснабжения промышленных предприятий и городов. Приведены описания и технические данные комплектных трансформаторных подстанций напряжением 10(6)-220 кВ, низковольтных комплектных распределительных устройств напряжением 10(6)-220 кВ, низковольтных комплектных устройств распределения, самонесущих изолированных проводов, кабелей с СПЭ-изоляцией.

## **КОРРЕКЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ВЛ 35 кВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ООО «РОСНЕФТЬ-ЮГАНСКНЕФТЕГАЗ» НА ОСНОВЕ УЧЕТА КЛИМАТИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ УСЛОВИЙ**

В статье произведено сравнение потерь электроэнергии при температуре провода  $+20^{\circ}\text{C}$  с потерями электроэнергии при фактической температуре провода (с учетом тока, ветра и температуры воздуха) на примере воздушных линий электропередачи ООО «Роснефть-Юганскнефтегаз». Произведен анализ температуры провода в течение года во всем диапазоне изменения нагрузок по отношению к температуре воздуха. Показана необходимость учета температуры воздуха в районах с низкой среднегодовой температурой, который может привести к снижению величины тарифа на электроэнергию при ее передаче.

**Ключевые слова:** уточнение расчета, потери электроэнергии, климатические условия, воздушные линии.

В целях организации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии в электрических сетях организаций, осуществляющих услуги по передаче электроэнергии, в Минэнерго России разработана инструкция [1], утвержденная приказом № 326 от 30.12.2008 г., которая действует взамен Порядка расчета и обоснования нормативов потерь [2], по которому нормировались технологические потери электроэнергии для сетевых организаций до 2009 г. В соответствии с [2] температура окружающего провод воздуха не учитывалась, потери электрической энергии определялись для температуры  $20^{\circ}\text{C}$  при допущении, что сопротивление провода равно сопротивлению при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ .

Инструкция [1] определяет методику расчета технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям в базовом периоде, согласно которой наряду с прочими изменениями добавился раздел для расчета активных сопротивлений элементов электрической сети. При расчете активного сопротивления воздушной линии электропередач (ВЛЭП) необходимо учитывать температуру провода, которая при средней нагрузке линий ниже экономической плотности тока принимается приблизительно равной температуре воздуха [1].

Выражение для определения активного сопротивления ВЛЭП имеет вид:

$$R = R_{20} \cdot L \cdot (1 + \alpha(t_p - 20)), \quad (1)$$

где  $R_{20}$  — удельное активное сопротивление на 1 км провода при его температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , Ом/км;  $L$  — длина линии, км;  $t_p$  — средняя температура провода,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha = 0,004$  — температурный коэффициент электрического сопротивления сталеалюминиевых проводов,  $1/^{\circ}\text{C}$ .

Естественным следствием (1) является то, что для регионов с отрицательной среднегодовой температурой потери электроэнергии в линии одной марки провода одного и того же сечения при одинаковой нагрузке будут меньше, чем в регионах с теплым климатом.

В соответствии с [2] температура окружающей среды в расчете активного сопротивления ВЛЭП не учитывалась. Таким образом, расчетные потери с учетом фактической температуры проводов для сетевых организаций, работающих в северных регионах России и имеющих большую общую протяженность ВЛЭП на своем балансе, согласно (1), будут меньше потерь, определенных для температуры  $20^{\circ}\text{C}$ .

В результате норматив технологических потерь электроэнергии по абсолютной и в относительной величине (% от отпуска электроэнергии в сеть) умень-

шается при неизменной нагрузке, а нетехнические (разность между фактическими и нормативными) потери в балансе сетевой организации увеличиваются и в конечном итоге являются ненормативными. Следовательно, это приведет к снижению величины тарифа на электроэнергию при передаче сторонним потребителям.

Таким образом, учет температуры провода в расчетах потерь электроэнергии «выгоден» только субабонентам. Для сетевых организаций, в которых в большинстве случаев фактические потери электроэнергии существенно больше нормативных, уменьшение последних приводит к прямым финансовым потерям.

В филиале ОАО «НТЦ Электроэнергетики» — ВНИИЭ, ООО «Энергоэкспертсервис», г. Москва, создан специализированный программный комплекс РТП 3. Комплекс программ РТП 3 предназначен для расчета режимных параметров, технических потерь мощности и электроэнергии, нормативных потерь в разомкнутых электрических сетях 0,38–220 кВ, а также для расчета допустимых и фактических небалансов, количества неучтенной электроэнергии в сети. Следует отметить, что расчет сопротивлений элементов сети в РТП 3 производится по каталожным данным оборудования, а из климатических особенностей среды в последних версиях РТП 3 возможен только учет температуры воздуха  $t_{\text{в}}$ . С целью уточнения расчета потерь электроэнергии активно разрабатываются методики, которые позволяют учесть факторы окружающей среды (температуру воздуха  $t_{\text{в}}$ , скорость ветра  $v$ , нагрев проводов солнечной радиацией  $t_{\text{сол}}$ ) и нагрузку (плотность тока  $j$ ) [2–15].

В данной статье проведен сравнительный анализ результатов расчета потерь электроэнергии  $\Delta W_{20, \text{РТП3}}$  найденных с помощью программного комплекса РТП 3 и потерь электроэнергии  $\Delta W$  определенных посредством математической модели, в основу которой положена методика [3].

В результате моделирования исследованы следующие вопросы:

- сравнение потерь электроэнергии, рассчитанных по каталожным параметрам ( $t_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$ );
- анализ влияния температуры воздуха на величину потерь электроэнергии;
- анализ комплексного влияния температуры воздуха, скорости ветра, тока нагрузки.

В качестве примера для сравнения представлены расчеты потерь электроэнергии в фидере «Север-1» подстанции «Усть-Балык» 110/35/6 кВ Юганской базы энергообеспечения ООО «Роснефть-Юганскнефтегаз» на участке длиной  $l=0,47$  км от центра питания до первого разветвления. Рассматриваемый фидер имеет следующие характеристики: суммарная протяженность ВЛЭП составляет 27,13 км, пять силовых трансформаторов 35/6 кВ общей мощностью 30,6 МВ·А.

Расчет потерь электроэнергии произведен за каждый месяц расчетного периода, данные по отпуску активной и реактивной энергии для расчета приняты по показаниям счетчика электроэнергии, установленного на рассматриваемом фидере.

Система учета на фидере «Север-1» состоит из электронного счетчика электроэнергии А1R-3-AL-C8-T (класс точности 0,2S), трансформаторов тока ТФМ-35 (класс точности 0,5) и трансформатора напряжения НАМИ-35 (класс точности 0,5).

Условия расчета:

- Среднемесячная температура воздуха  $t_{\text{в}}$ , скорость ветра  $v$ , число часов работы  $T_{\text{в}}$  приведены в табл. 1 и на рис. 1 [16].

— Параметры провода АС-120/27: сечение алюминиевой/стальной части провода — 120/27 мм<sup>2</sup>, удельное активное сопротивление  $R_{20} = 0,253$  Ом/км, диаметр провода  $d = 15,4$  мм.

Результаты измерений электроэнергии электронным счетчиком приведены в табл. 2.

Расчет потерь электроэнергии с помощью РТП 3 выполнен методом средних нагрузок, рекомендуемым методикой расчета нормативных технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям [1]. За расчетный период принят 2008 г., в котором отпуск электрической энергии по фидеру «Север-1» составил 46,042 млн кВт·ч.

В качестве исходных данных в расчетной схеме фидера (рис. 2) задавались токи нагрузки по низкой стороне силовых трансформаторов 35/6 кВ за каждый месяц расчетного периода, принятые из ведомостей нагрузок подстанций. В результате чего были получены корректные перетоки мощностей по ВЛЭП фидера «Север-1» и распределение электроэнергии по подстанциям.

Результаты расчета потерь электроэнергии по программе РТП 3 для температуры  $20^\circ\text{C}$   $\Delta W_{20, \text{РТП3}}$  сведены в табл. 3.

Таблица 1  
Среднемесячная температура воздуха, скорость ветра, число часов работы

месяц	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	скорость ветра $v$ , м/с	$T_{\text{в}}$ , ч
январь	-20,9	3,9	744
февраль	-20,0	4,0	696
март	-11,4	3,9	744
апрель	-2,9	4,2	720
май	4,3	4,6	744
июнь	14,3	4,3	720
июль	17,4	3,9	744
август	14,1	3,6	744
сентябрь	7,8	3,9	720
октябрь	-2,1	4,5	744
ноябрь	-10,0	4,6	720
декабрь	-15,8	4,4	744

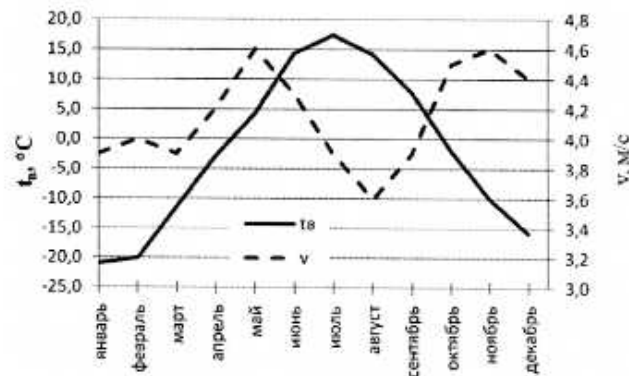


Рис. 1. Среднемесячная температура воздуха  $t_{\text{в}}$  и скорость ветра  $v$  в г. Нефтеюганске



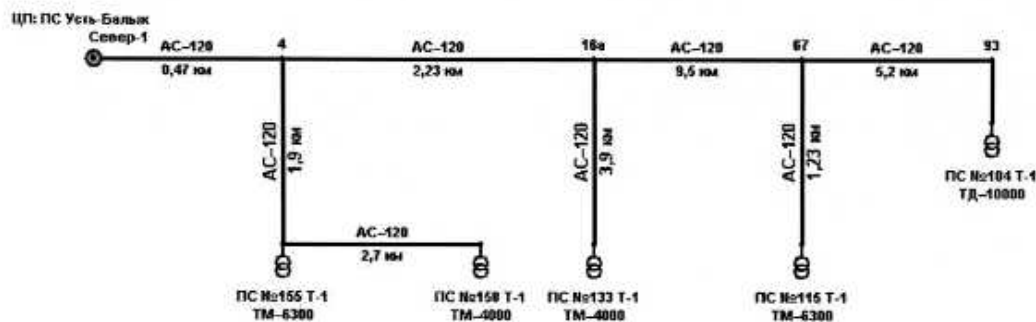


Рис. 2. Схема фидера «Север-1»

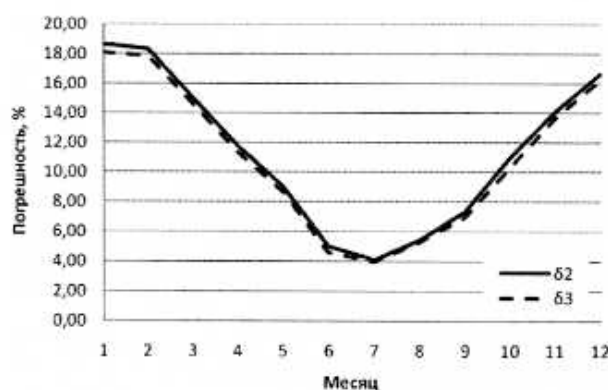


Рис. 3. Погрешности расчета потерь электроэнергии

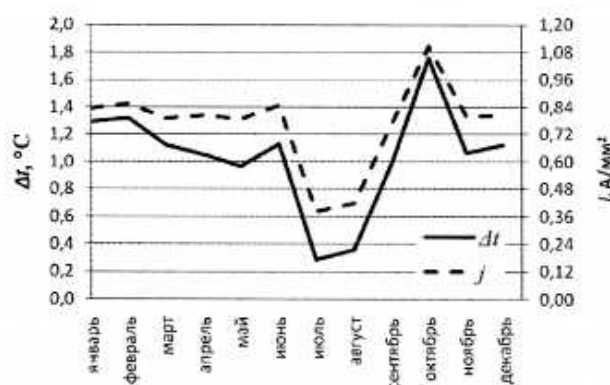
Рис. 4. Графики превышения температуры провода относительно окружающей среды  $\Delta t$  и плотности тока  $j$ Отпуск активной  $W_a$  и реактивной  $W_p$  электроэнергии

Таблица 2

месяц	$W_a$ , кВт·ч	$W_p$ , кВар·ч	месяц	$W_a$ , кВт·ч	$W_p$ , кВар·ч
январь	4 415 460	1 716 750	июль	2 015 790	794 808
февраль	4 216 380	1 661 730	август	2 019 129	1 252 293
март	4 200 210	1 591 170	сентябрь	3 664 773	2 083 578
апрель	4 097 940	1 620 360	октябрь	5 512 878	3 018 582
май	4 094 580	1 822 380	ноябрь	3 786 426	2 208 591
июнь	4 120 620	2 182 173	декабрь	3 897 852	2 360 967

Основное уравнение математической модели, построенной на основе исследований [3], имеет вид:

$$I = \sqrt{\frac{\epsilon C_0 [(273 + t_{np})^4 - (273 + t_a)^4] S + \phi_k [(t_{np} - t_{раг}) - t_a] S}{0,95 R_{20} (1 + \alpha (t_a - 20))}}, \quad (2)$$

где  $I$  — рабочий ток, А;  $C_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) [3];  $S$  — площадь излучающей поверхности проводов;  $R_{20}$  — удельное активное сопротивление при температуре провода 20 °С;  $\alpha = 0,004$  — температурный коэффициент электрического сопротивления сталеалюминиевых проводов, 1/°С;  $\epsilon$  — степень черноты поверхности провода, равная 0,6 отн.ед. [5];  $\phi_k$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $t_{np}$  — температура провода, °С;  $t_a$  — температура воздуха, °С;  $t_{раг}$  — температура нагрева солнечной радиацией, °С, в данной работе принимается равной нулю.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией, согласно [3, 6], определяется по формуле:

$$\phi_k = 0,13057 \left( \frac{k_v v d}{a} \right)^{0,71179} \frac{\lambda_a}{d}, \quad (3)$$

где  $k_v$  — коэффициент, учитывающий влияние угла направления ветра к оси воздушной линии, равный 0,5;  $v$  — скорость ветра, м/с;  $a$  — коэффициент температуропроводности воздуха, равный  $18,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_a$  — теплопроводность воздуха, равная 0,0244 Вт/(м·°С).

Для достоверного нахождения потерь электроэнергии необходимо знание реального сопротивления провода. При определении сопротивления провода возникает необходимость определения температуры провода при известных токе нагрузки, скорости ветра, температуре воздуха. Для этой цели используются уравнение (2) и предложенная аппроксимация  $t_{np}$  вида:

$$t_{np} = aI^4 + bI^2 + c, \quad (4)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — коэффициенты аппроксимации.



Таблица 3  
Потери электроэнергии на участке линии фидера «Север-1»

Месяц	$\Delta W_{\text{э.р.лп.д.}}$ кВт·ч	Месяц	$\Delta W_{\text{э.р.лп.д.}}$ кВт·ч
январь	2 973,85	июль	624,33
февраль	2 911,65	август	751,41
март	2 676,79	сентябрь	2 429,47
апрель	2 663,41	октябрь	5 215,77
май	2 666,53	ноябрь	2 622,25
июнь	2 979,04	декабрь	2 752,43

Таблица 4  
Зависимость температуры провода АС-120/27  
от тока, температуры воздуха, скорости ветра

Расчетный месяц	Зависимость $t_{\text{пр}} = f(I, t_a, v)$
	аппроксимация по формуле $t_{\text{пр}} = aI^2 + bt^2 + c$
январь	$t_{\text{пр}} = 6,377 \cdot 10^{-11} I^2 + 8,921 \cdot 10^{-5} t^2 - 20,51$
февраль	$t_{\text{пр}} = 6,181 \cdot 10^{-11} I^2 + 8,804 \cdot 10^{-5} t^2 - 19,611$
март	$t_{\text{пр}} = 6,165 \cdot 10^{-11} I^2 + 8,463 \cdot 10^{-5} t^2 - 11,139$
апрель	$t_{\text{пр}} = 5,454 \cdot 10^{-11} I^2 + 9,431 \cdot 10^{-5} t^2 - 2,724$
май	$t_{\text{пр}} = 4,802 \cdot 10^{-11} I^2 + 9,168 \cdot 10^{-5} t^2 + 4,439$
июнь	$t_{\text{пр}} = 5,048 \cdot 10^{-11} I^2 + 1,005 \cdot 10^{-4} t^2 + 14,379$
июль	$t_{\text{пр}} = 5,585 \cdot 10^{-11} I^2 + 1,089 \cdot 10^{-4} t^2 + 17,458$
август	$t_{\text{пр}} = 6,235 \cdot 10^{-11} I^2 + 1,132 \cdot 10^{-4} t^2 + 14,173$
сентябрь	$t_{\text{пр}} = 5,769 \cdot 10^{-11} I^2 + 1,045 \cdot 10^{-4} t^2 + 7,902$
октябрь	$t_{\text{пр}} = 4,88 \cdot 10^{-11} I^2 + 8,886 \cdot 10^{-5} t^2 - 1,92$
ноябрь	$t_{\text{пр}} = 5,176 \cdot 10^{-11} I^2 + 8,619 \cdot 10^{-5} t^2 - 9,729$
декабрь	$t_{\text{пр}} = 5,41 \cdot 10^{-11} I^2 + 8,462 \cdot 10^{-5} t^2 - 15,466$

Средние значения нагрузки

Таблица 5

Месяц	$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	Отпуск электроэнергии		Средняя мощность		Полная мощность $S_{\text{пр}}, \text{кВА}$	$I_{\text{пр}}, \text{А}$	Плотность тока $j, \text{А/мм}^2$	$I/I_{\text{ном}}$
		$W_{\text{э}}, \text{кВт·ч}$	$W_{\text{р}}, \text{кВар·ч}$	$P_{\text{пр}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{пр}}, \text{кВар}$				
январь	744	4 415 460	1 716 750	5 934,76	2 307,46	6 367,55	100,04	0,83	0,27
февраль	696	4 216 380	1 661 730	6 058,02	2 387,54	6 511,52	102,30	0,85	0,27
март	744	4 200 210	1 591 170	5 645,44	2 138,67	6 036,96	94,84	0,79	0,25
апрель	720	4 097 940	1 620 360	5 691,58	2 250,50	6 120,37	96,15	0,80	0,26
май	744	4 094 580	1 822 380	5 503,47	2 449,44	6 023,94	94,64	0,79	0,25
июнь	720	4 120 620	2 182 173	5 723,08	3 030,80	6 476,06	101,74	0,85	0,27
июль	744	2 015 790	794 808	2 709,40	1 068,29	2 912,40	45,75	0,38	0,12
август	744	2 019 129	1 252 293	2 713,88	1 683,19	3 193,48	50,17	0,42	0,13
сентябрь	720	3 664 773	2 083 578	5 089,96	2 893,86	5 855,09	91,98	0,77	0,25
октябрь	744	5 512 878	3 018 582	7 409,78	4 057,23	8 447,84	132,72	1,11	0,35
ноябрь	720	3 786 426	2 208 591	5 258,93	3 067,49	6 088,17	95,65	0,80	0,26
декабрь	744	3 897 852	2 360 967	5 239,05	3 173,34	6 125,17	96,23	0,80	0,26

Месяц	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	Потери электроэнергии				Погрешность		
		$\Delta W_{20}$ , кВт·ч	$\Delta W_{20, \text{ТППЗ}}$ , кВт·ч	$\Delta W_{\text{ср}}$ , кВт·ч	$\Delta W_{\text{ср}, \text{ТППЗ}}$ , кВт·ч	$\delta_1, \%$	$\delta_2, \%$	$\delta_3, \%$
январь	-17,8	2 892,60	2 973,85	2 419,37	2 434,28	2,73	18,65	18,14
февраль	-13,1	2 829,62	2 911,65	2 376,88	2 391,79	2,82	18,37	17,85
март	-6,1	2 599,70	2 676,79	2 273,18	2 284,80	2,88	15,08	14,64
апрель	-5,1	2 585,82	2 663,41	2 348,96	2 359,84	2,91	11,81	11,40
май	6,7	2 588,75	2 666,53	2 426,18	2 436,16	2,92	9,01	8,64
июнь	13,1	2 895,23	2 979,04	2 829,22	2 842,25	2,81	5,03	4,59
июль	19,1	604,95	624,33	598,66	599,36	3,10	4,11	4,00
август	14,1	727,49	751,41	710,32	711,37	3,18	5,47	5,33
сентябрь	7,5	2 366,39	2 429,47	2 250,91	2 260,28	2,60	7,35	6,96
октябрь	2,0	5 091,12	5 215,77	4 641,06	4 676,91	2,39	11,02	10,33
ноябрь	-5,7	2 559,00	2 622,25	2 251,92	2 262,81	2,41	14,12	13,71
декабрь	-13,4	2 676,46	2 752,43	2 293,19	2 305,21	2,76	16,68	16,25
ср. год	0,1							
за год	—	30 417,14	31 266,92	27 419,86	27 565,07	2,72	12,30	11,84

Полученные в результате моделирования зависимости  $I_{\text{ср}}$  для характерного для каждого месяца тока приведены в табл. 4.

Нагрузочные потери электроэнергии в ВЛ за базовый период определяются по формуле [1], кВт·ч:

$$\Delta W_{\text{н}} = k_{\text{с}} \cdot \Delta P_{\text{ср}} \cdot T_{\text{в}} \cdot k_{\text{ф}}^2, \quad (5)$$

где  $\Delta P_{\text{ср}}$  — потери мощности в ВЛ, при средних за базовый период нагрузках, кВт, определяются по формуле (4);  $k_{\text{ф}}^2$  — квадрат коэффициента формы графика за базовый период, в расчете принят равным 1,1 о.е.;  $k_{\text{с}}$  — коэффициент, учитывающий различие конфигураций графиков активной и реактивной нагрузки (принимается равным 0,99), о.е.;  $T_{\text{в}}$  — число часов в базовом периоде, ч.

Нагрузочные потери мощности при средних за базовый период нагрузках в ВЛ определяются по формуле, кВт:

$$\Delta P_{\text{ср}} = 3 \cdot I_{\text{ср}}^2 \cdot R \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

где  $I_{\text{ср}}$  — среднее значение токовой нагрузки, А, определяется по формуле (10);  $R$  — активное сопротивление провода при расчете потерь электроэнергии принимается равным:

— без учета температуры воздуха:

$$R = L \cdot R_{20}, \quad (7)$$

— с учетом температуры воздуха:

$$R = R_{20} \cdot L \cdot (1 + \alpha(t_{\text{в}} - 20)), \quad (8)$$

— с учетом температуры воздуха, скорости ветра и нагрузки:

$$R = R_{20} \cdot L \cdot (1 + \alpha(t_{\text{в}} - 20)). \quad (9)$$

Температура провода  $t_{\text{в}}$  в (9) рассчитывается по аппроксимированным зависимостям для каждого месяца (табл. 4).

Средняя нагрузка определяется по формулам:

$$P_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{а}}}{T_{\text{в}}}, \text{ кВт}; \quad Q_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{р}}}{T_{\text{в}}}, \text{ кВар};$$

$$S_{\text{ср}} = \sqrt{P_{\text{ср}}^2 + Q_{\text{ср}}^2}, \text{ кВА}; \quad (10)$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср}}},$$

где  $W_{\text{а}}$ ,  $W_{\text{р}}$  — активная и реактивная электроэнергия в узле за базовый период  $T_{\text{в}}$ , кВт·ч, кВар·ч,  $P_{\text{ср}}$ ,  $Q_{\text{ср}}$  — средние активная и реактивная мощности за базовый период, кВт, кВар,  $S_{\text{ср}}$  — средняя полная мощность за базовый период, кВА,  $U_{\text{ср}}$  — среднее напряжение элемента за базовый период, кВ.

Пример расчета средней нагрузки в январе по формулам (10) представлен ниже:

$$P_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{а}}}{T_{\text{в}}} = 4415460/744 = 5934,76 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{р}}}{T_{\text{в}}} = 1716750/744 = 2307,46 \text{ кВар}$$

$$S_{\text{ср}} = \sqrt{P_{\text{ср}}^2 + Q_{\text{ср}}^2} = \sqrt{5934,76^2 + 2307,46^2} = 6367,55 \text{ кВА}$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср}}} = \frac{6367,55}{\sqrt{3} \cdot 36,75} = 100,04 \text{ А}.$$

Средние значения нагрузки за все месяцы сведены в табл. 5.

Результаты расчета потерь электроэнергии в ВЛ представлены в табл. 6.

Погрешности рассчитывались по следующим формулам:

$$\delta_1 = \frac{\Delta W_{20, \text{ТППЗ}} - \Delta W_{20}}{\Delta W_{20, \text{ТППЗ}}} \cdot 100 \%, \quad (11)$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta W_{20, \text{ТППЗ}} - \Delta W_{\text{ср}}}{\Delta W_{20, \text{ТППЗ}}} \cdot 100 \%, \quad (12)$$

$$\delta_3 = \frac{\Delta W_{20, \text{РТПЗ}} - \Delta W_{t_{\text{в.л.}}}}{\Delta W_{20, \text{РТПЗ}}} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где  $\Delta W_{20}$ ,  $\Delta W_{t_{\text{в.л.}}}$ ,  $\Delta W_{t_{\text{в.л.}}}$  — потери электроэнергии с учетом сопротивления по формулам (7), (8), (9) соответственно;  $\Delta W_{20, \text{РТПЗ}}$  — потери электроэнергии, определенные посредством программного комплекса РТПЗ для температуры  $t_{\text{пр}} = 20^\circ\text{C}$ .

На рис. 3 и 4 приведены графики распределения погрешности расчета потерь электроэнергии по месяцам и графики превышения температуры провода относительно окружающей среды  $\Delta t$  и плотности тока  $j$ .

### Выводы

1. Сравнение потерь электрической энергии при  $t_{\text{пр}} = 20^\circ\text{C}$  с потерями при фактической температуре провода (с учетом тока ветра и температуры воздуха) показывает, что учет режимных и климатических факторов приводит к уменьшению расчетных значений потерь электроэнергии. Максимальное месячное уменьшение составляет 15,77 % (январь,  $t_{\text{пр}} = -20,9^\circ\text{C}$  — наиболее низкая из среднемесячных температур), минимальная 0,91 % (июль,  $t_{\text{в}} = 17,4^\circ\text{C}$ ). В целом уменьшение потерь за год, по сравнению с традиционным расчетом по температуре  $+20^\circ\text{C}$ , составляет 9,32 %.

2. Температура провода  $t_{\text{пр}}$  в течение года во всем диапазоне изменения нагрузок превышает  $t_{\text{в}}$ , но отличие  $t_{\text{в}}$  и  $t_{\text{пр}}$  находится в пределах  $1,8^\circ\text{C}$ . Максимальное различие, как и следует из физических представлений, соответствует наибольшей плотности тока, наблюдаемой в октябре.

3. Учет реальной температуры провода при низкой среднегодовой температуре (для Нефтеюганска —  $1,9^\circ\text{C}$ ) приводит фактически к снижению технологических потерь при передаче электроэнергии для сетевой организации и, соответственно, к снижению величины тарифа на электроэнергию при ее передаче.

### Библиографический список

1. Инструкция по организации в Министерстве энергетики РФ работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Утв. приказом Минэнерго РФ от 30.12.2008, № 326.
2. Порядок расчета и обоснования нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Утв. приказом Минпромэнерго России от 4 октября 2005 г., № 267.
3. Воротицкий, В. Э. Оценка погрешностей расчета потерь электроэнергии в ВЛ из-за учета метеословий / В. Э. Воротицкий, О. В. Туркина // Электрические станции. — 2008. — № 10. — С. 42–49.
4. Герасименко, А. А. Учет схемно-режимных и атмосферных факторов при расчете технологических потерь электроэнергии в распределительных сетях / А. А. Герасименко, И. В. Шульгин, Г. С. Тимофеев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технология. — 2008. — № 6. — С. 19–21.
5. Бургсдорф, В. В. Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по нагреву их проводов / В. В. Бургсдорф // Электричество. — 1989. — № 11. — С. 1–8.

6. Никифоров, Е. П. Предельно допустимые токовые нагрузки на провода действующих ВЛ с учетом нагрева проводов солнечной радиацией / Е. П. Никифоров // Электрические станции. — 2006. — № 7. — С. 56–59.

7. Никифоров, Е. П. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях / Е. П. Никифоров // Электричество. — 2009. — № 6. — С. 63–66.

8. Потери электроэнергии в электрических сетях, зависящие от погодных условий / Ю. С. Железко [и др.] // Электрические станции. — 2004. — № 11. — С. 42–48.

9. Поспелов, Г. Е. Влияние температуры проводов на потери электроэнергии в активных сопротивлениях проводов воздушных линий электропередачи / Г. Е. Поспелов, В. В. Ершечев // Электричество. — 1973. — № 10. — С. 81–83.

10. Левченко, И. И. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях / И. И. Левченко, Е. И. Сапук // Электричество. — 2008. — № 4. — С. 2–8.

11. Зарудский, Г. К. Уточнение выражений для расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Г. К. Зарудский, С. Ю. Сыромятников // Вестник МЭИ. Электроэнергетика. — 2008. — № 2. — С. 37–42.

12. Хлебников, В. К. Влияние климатических условий на потери мощности и электроэнергии в кабельных линиях электропередачи / В. К. Хлебников // Известия вузов. Электромеханика. — 2009. — № 2. — С. 69–73.

13. Никифоров, Е. П. Учет мощности нагрева солнечной радиацией проводов ВЛ электропередачи / Е. П. Никифоров // Электрические станции. — 2008. — № 2. — С. 49–51.

14. CIGRE. Thermal state of overhead line conductors. — Electra, 1988, № 121.

15. CIGRE. The thermal behavior of overhead conductors. — Electra, 1992, № 144.

16. Электронный ресурс <http://pogoda.ru.net>

**БУРЧЕВСКИЙ Виталий Анатольевич**, главный энергетик ОАО «Юганскнефтегаз».

**БУБЕНЧИКОВ Антон Анатольевич**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

**ГОРЮНОВ Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

**ГИРШИН Станислав Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

**ПЕТРОВ Александр Сергеевич**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

**ПЕТРОВА Елена Владимировна**, инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

**САФОНОВ Дмитрий Геннадьевич**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

Адрес для переписки: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Статья поступила в редакцию 28.12.2009 г.

© В. А. Бурчевский, А. А. Бубенчиков, В. Н. Горюнов, С. С. Гиршин, А. С. Петров, Е. В. Петрова, Д. Г. Сафонов

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ГАРМОНИК В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Данная статья посвящена оценке эффективности использования технических средств, снижающих уровень высших гармоник в узлах нагрузок систем электроснабжения. В заключение приведён критерий использования силового активного фильтра гармоник, полученный в результате расчётов времени окупаемости активного и пассивного фильтров в зависимости от коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и доли 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник из общего гармонического содержания.

**Ключевые слова:** силовые фильтры гармоник, эффективность использования фильтров гармоник.

Электрическая энергия является товаром и используется во всех сферах жизнедеятельности человека, а также непосредственно участвует при создании других видов продукции, влияя на их качество. В силу своей специфики понятие качества электрической энергии отличается от понятия качества других видов продукции. Каждый электроприемник рассчитан для работы при определённых параметрах электрической энергии, поэтому для его нормальной работы должно быть обеспечено требуемое качество. Таким образом, качество электроэнергии определяется совокупностью её характеристик, при которых электроприёмники могут нормально работать и выполнять заложенные в них функции. Особенность электрической энергии заключается в том, что её качество на месте производства не гарантирует качества на месте потребления. Качество электроэнергии до и после подключения электроприемника к сети также может быть различно. Поэтому надлежащее качество электрической энергии — это один из её главных показателей эффективности производства, передачи, распределения и потребления.

В данной статье будет уделено внимание вопросу снижения уровня высших гармонических составляющих тока и напряжения, как наиболее сложному для инженерной оценки фактору.

Необходимо отметить, что основными формами воздействия высших гармонических составляющих тока и напряжения на элементы системы электроснабжения являются:

- увеличение токов и напряжений гармоник вследствие резонанса;
- снижение эффективности процессов генерации, передачи и использования электроэнергии вследствие дополнительных потерь;
- ускоренное старение изоляции электрооборудования;
- ложная работа устройств релейной защиты и автоматики.

В настоящее время все способы снижения несинусоидальности можно разделить на две группы: схемные решения и применение специальных технических средств.

К схемным решениям можно отнести рациональное построение сети, которое включает в себя:

- увеличение установленной мощности силовых трансформаторов систем электроснабжения;
- применение разделительных трансформаторов с обмотками «треугольник-звезда» позволяет эффективно бороться с гармониками, кратными третьей, при сбалансированной нагрузке. Для ослабления влияния несимметрии нагрузки по фазам и уменьшения тока, протекающего в нейтральном проводе, применяют зигзагообразную систему обмоток, где вторичная обмотка каждой фазы разбита на две части и размещена на разных стержнях магнитопровода трансформатора.

— выделение крупной нелинейной нагрузки на отдельные секции шин;

— подключение нелинейной нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания  $S_{кз}$ .

Выше перечисленные способы должны использоваться как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации электроэнергетических систем.

К современным техническим средствам, снижающим уровень гармоник в системах электроснабжения, относятся:

- линейные дроссели;
- магнитные синтезаторы;
- пассивные фильтры;
- СТАТКОМ (статический компенсатор);
- гибридные фильтры;
- активные фильтры.

Результаты исследований в различных системах электроснабжения, проведённые испытательной лабораторией по качеству электроэнергии при кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического универси-



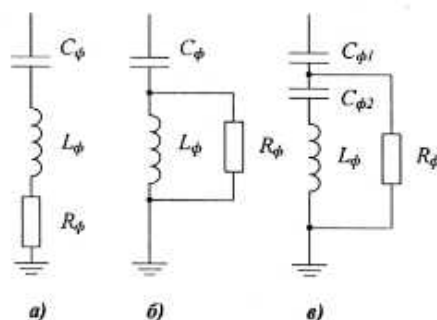


Рис. 1. Схемы пассивных фильтров параллельного типа: а – одночастотный фильтр; б – широкополосный фильтр; в – широкополосный фильтр типа С

тета, показывают необходимость использования различных технических средств, снижающих уровень высших гармоник.

В большинстве случаев возникает задача наиболее рационального использования того или иного технического средства, другими словами, необходимо оценить, в каких случаях нужно применять пассивные фильтры, а в каких – активные. Силовой активный фильтр гармоник является наиболее перспективным средством обеспечения синусоидальности кривой напряжения [1, 2], а пассивный фильтр – наиболее распространенное техническое средство, применяемое в настоящее время в распределительных сетях для ограничения уровня высших гармоник. Поэтому для сравнения эффективности использования были выбраны именно эти технические средства.

Пассивные фильтры выполнены на основе индуктивных и ёмкостных элементов. Принцип фильтрации пассивных фильтров основан на зависимости сопротивлений их элементов от частоты протекаемых в них токов и, на использовании явлений резонанса в последовательных и параллельных цепях, содержащих такие конденсаторы и реакторы. Принято различать следующие варианты схем пассивных фильтров параллельного типа (рис. 1).

Имея минимальное сопротивление на частоте настройки, такие пассивные фильтры шунтируют токи высших гармоник, генерируемые нелинейной нагрузкой. В результате токи высших гармоник не попадают в питающую сеть.

В зависимости от схемы пассивные фильтры, параллельного типа могут быть настроены на одну или несколько отдельных частот высших гармоник, а также осуществлять фильтрацию в полосе частот [3].

Наиболее распространенными из представленных являются простые одночастотные фильтры (рис. 1а), при этом часто их объединяют в группы, фильтрующие несколько гармоник, например, 5, 7, 11, 13 гармоник.

Фильтры, представленные на рис. 1б, удобны в эксплуатации, но основным их недостатком являются большие потери на основной частоте по сравнению с фильтром, представленным на рис. 1в.

Основным преимуществом фильтра С-типа (рис. 1в) является наличие наибольших потерь на основной частоте из-за того, что на этой частоте  $C_{\phi 2}$  и  $L_{\phi}$  последовательно настроены. Такие фильтры очень чувствительны к изменениям основной частоты и отклонениям параметров элементов.

Также различают расстроенные и настроенные пассивные фильтры. Расстроенные фильтры имеют резонанс на частоте ниже частоты фильтруемой гармоники. Коэффициент, характеризующий степень расстройки, определяется из соотношения

$$\nu = \frac{\omega_1}{\omega_n} 100 \%, \quad (1)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_n$  – угловые частоты основной 1-й и фильтруемой n-й гармоник тока или напряжения [4].

Причём секции фильтров необходимо настраивать на резонансные частоты, немного более низкие, чем частоты соответствующих гармоник. Это необходимо для сохранения их эффективности при старении конденсаторов в батарее, что сопровождается уменьшением ёмкости и сдвигом резонансной частоты фильтра вверх [5].

Расстроенные фильтры рассчитаны не только на фильтрацию высших гармонических составляющих тока и напряжения, но и на компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники.

Пассивные фильтры являются простыми и надёжными устройствами повышения качества электроэнергии. Их целесообразно применять на крупных промышленных объектах с достаточно постоянной потребляемой мощностью и для подавления всего нескольких гармоник.

Развитие силовой электроники: СТО-тиристоров, IGBT-транзисторов, определило элементную базу, являющуюся основой для построения активных фильтров гармоник. Это название является общим и не отражает существенных признаков фильтра. Дадим более точное определение «силового активного фильтра».

Силовой активный фильтр – это преобразователь переменного/ постоянного тока с ёмкостным или индуктивным накопителем электрической энергии на стороне постоянного тока, формирующий методами импульсной модуляции усреднённое значение тока (напряжения), равное разности нелинейного (фильтруемого) тока или напряжения и синусоидального тока (напряжения) его основной гармоники [4, 5].

Идея активной фильтрации рассматривается в работах не только зарубежных, но и российских ученых [2, 6, 7]. Анализ данных работ показывает, что активная фильтрация является новым и перспективным направлением развития полупроводниковой преобразовательной техники, улучшающей качество электроэнергии в узлах нагрузок.

В качестве исследуемой схемы будет использоваться схема электроснабжения, представленная на рис. 2.

Рассмотрим два варианта: в первом случае в качестве технического средства снижения уровня гармоник будет использоваться набор пассивных фильтров, настроенных на наиболее значимые гармоники ( $n=5, 7, 11, 13$ ), а во втором случае будет использоваться силовой активный фильтр.

В качестве критерия оценки будем брать срок окупаемости. Для этого рассчитаем величину потерь от высших гармоник, используя существующие методики [8]. В качестве исходных данных будут использоваться значения, полученные в результате моделирования различных режимов нагрузки, основанные на реальных измерениях, проведенных испытательной лабораторией по качеству электроэнергии при кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета.

В расчётах в качестве пассивного фильтра будем использовать резонансный LC-фильтр типа 4RF14–03, обеспечивающий подавление 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник, номинальный ток до 42 А. Стоимость пассивного резонансного LC-фильтра типа 4RF14–03 составляет 44 тыс. рублей. В качестве силового

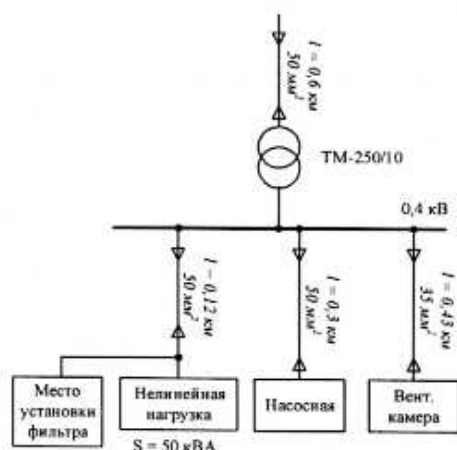


Рис. 2. Исследуемая схема электроснабжения

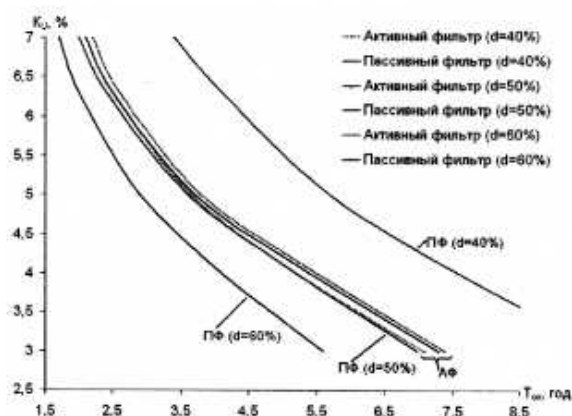


Рис. 3. Зависимость времени окупаемости от коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

Результаты расчётов времени окупаемости при использовании фильтров гармоник

Таблица 1

K <sub>u</sub> , %	Доля 5-й, 7-й, 11-й, 13-й гармоник от общего гармонического содержания, %					
	40		50		60	
	T <sub>ок АФ</sub> , г.	T <sub>ок ПФ</sub> , г.	T <sub>ок АФ</sub> , г.	T <sub>ок ПФ</sub> , г.	T <sub>ок АФ</sub> , г.	T <sub>ок ПФ</sub> , г.
3	7,10	9,80	7,30	7,00	7,40	5,60
4	5,20	7,60	5,40	5,20	5,50	4,10
5	3,65	5,70	3,70	3,60	3,80	2,90
6	2,50	4,10	2,50	2,40	2,60	2,00
7	2,10	3,40	2,10	2,00	2,20	1,70

активного фильтра будем использовать фильтр типа НС50, номинальный ток до 50 А. Стоимость данного фильтра составляет 151 тыс. рублей. Результаты расчётов времени окупаемости активного и пассивного фильтров в зависимости от коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и доли 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник из общего гармонического содержания сведём в табл. 1. По результатам расчётов, представленных в табл. 1, построим зависимость времени окупаемости от коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения (рис. 3).

В результате анализа кривых, представленных на рис. 3, можно сделать вывод о том, что активный фильтр целесообразно применять при доле 5-й, 7-й, 11-й, 13-й гармоник от общего гармонического содержания менее чем 50 %. Значение доли  $d_{5,7,11,13} = 50\%$  указывает на эффективность применения как активных, так и пассивных фильтров, в этом случае требуется технико-экономическое обоснование.

Анализ кривых, представленных на рис. 3, позволяет вывести критерий использования активного фильтра гармоник. Зная, что

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1}, \quad (2)$$

$$K_{5,7,11,13} = \frac{\sqrt{U_5^2 + U_7^2 + U_{11}^2 + U_{13}^2}}{U_1}, \quad (3)$$

тогда

$$d_{5,7,11,13} = \frac{K_{5,7,11,13}}{K_U} = \frac{\sqrt{U_5^2 + U_7^2 + U_{11}^2 + U_{13}^2}}{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}} < 50\%. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой критерий использования активного фильтра гармоник.

Кроме того, при использовании пассивных фильтров необходимо учитывать их недостатки: возможность перекомпенсации при мощности потребителя ниже установленной и недокомпенсации при увеличении потребляемой мощности выше номинального значения, т.е. эффективность пассивных фильтров ограничена за счёт постоянной установленной мощности и невозможности слежения изменений процессов сети. Также к недостаткам можно отнести большую потребляемую мощность и высокие массогабаритные показатели.

**Вывод.** В результате численных экспериментов были получены зависимости времени окупаемости при использовании фильтров гармоник от коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и доли 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник из общего гармонического содержания. Указанные зависимости позволяют сделать вывод, что чем больше величина коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, тем меньше время окупаемости фильтра. Кроме того, выведен критерий использования активного фильтра гармоник, который указы-

вает на эффективность применения активных фильтров гармоник при значениях доли 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник от общего гармонического содержания, равной  $d_{5,7,11,13} < 50\%$ .

#### Библиографический список

1. Лютаревич, А.Г., Ощепков В.А., Петрова Е.В. Анализ современных методов и средств повышения качества электроэнергии / А.Г. Лютаревич, В.А. Ощепков Е.В. Петрова // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт: 3-я Междунар. науч.-техн. конф. — Омск, 2007. — С. 114—118.
2. Parkatti P., Salo M., Tuusa H. Experimental results for a current source shunt active power filter with series capacitor / IEEE Power Electronics Specialists Conference, 15—19 June 2008, pp. 3814—3818.
3. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 320 с.
4. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчинский, А.А. Кваснюк. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007. — 632 с.
5. Куско, А. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон: пер. с англ. Рободзея А.Н. — М.: Додэка-XXI, 2008. — 336 с.
6. Jain Shailendra Kumar, Agarwal Pramod, Gupta H. O. A

control algorithm for compensation of customer-generated harmonics and reactive power // IEEE Trans. Power. Deliv. — 2004. — № 1. — С. 357—366.

7. Ortuzar M., Carmi R., Dixon J., Morfin L. Voltage source active power filter, based on multi-stage converter and ultracapacitor DC-link / IEEE Power Electronics Specialists Conference, 15—19 June 2008, pp. 2300—2305. — Режим доступа: <http://www2.ing.puc.cl/power/paperspdf/dixon/61a.pdf>.

8. Лютаревич, А.Г. Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения / А.Г. Лютаревич [и др.] // Омский научный вестник. — 2009. — №1 (77). — С. 109—113.

**ЛЮТАРЕВИЧ Александр Геннадьевич**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: e-mail: [l.alexander@inbox.ru](mailto:l.alexander@inbox.ru)

**ДОЛИНГЕР Станислав Юрьевич**, аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Статья поступила в редакцию 06.11.2009 г.

© А. Г. Лютаревич, С. Ю. Долингер

УДК 621.3.08

**С. Ю. ДОЛИНГЕР  
А. Г. ЛЮТАРЕВИЧ**

Омский государственный  
технический университет

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Данная статья посвящена проблеме контроля качества электроэнергии, которая, как и всякий товар, должна удовлетворять определенным требованиям. Применение вейвлет-анализа для определения показателей качества электроэнергии позволит создать приборы способные непрерывно отслеживать качество электроэнергии. В статье рассмотрены теоретические основы использования вейвлетов для анализа нестационарных сигналов.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, вейвлет-анализ, вейвлет, Фурье, измерение показателей качества.

В настоящее время в электроэнергетике огромное внимание уделяется обеспечению качества электроэнергии, которая, безусловно, является товаром и должна удовлетворять определенным требованиям. Значительная часть используемого в настоящее время оборудования восприимчива к плохому качеству электроэнергии, несоблюдение которого приводит к снижению производительности и качества выпускаемой продукции, а также повреждению оборудования и увеличению потерь электроэнергии в распределительных сетях.

Постоянный рост доли и мощности электроприемников с нелинейными вольтамперными характеристиками приводит к возникновению высших гармонических составляющих тока и напряжения и, как следствие, к проблеме качества электроэнергии. Для этих потребителей проблема повышения качества элек-

троэнергии становится особенно острой из-за постоянно растущей стоимости электроэнергии и требований к ее качеству со стороны энергоснабжающих организаций.

Нормативно-правовые документы, обеспечивающие регулирование взаимоотношений между энергоснабжающей организацией и потребителем, устанавливают скидки и надбавки за оплату электроэнергии. Так же как к производителю некачественного товара, который нанес потребителю ущерб, можно выставить требование о материальном и моральном возмещении. Но отсутствие непрерывного мониторинга и наблюдений за качеством электрической энергии не дает возможности пострадавшим потребителям получения материальной компенсации от энергоснабжающей организации, являющейся коммерческой, продающей и произведенную электроэнергию. В связи



с этим возникает задача непрерывного контроля качества электрической энергии в узлах нагрузки различных систем электроснабжения.

Под качеством электрической энергии понимают соответствие характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей качества электроэнергии [1]. В настоящее время в России действует единственный межгосударственный стандарт, устанавливающий основные положения в области качества электроэнергии — ГОСТ 13109-97. Но данный документ действует уже более 12 лет и нуждается в пересмотре с учетом требований международных стандартов.

Планируется с 1 января 2010 года ввести в действие два новых национальных стандарта ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЭК 61000-4-30:2008) и ГОСТ Р 51317.4.7-2008 (МЭК 61000-4-7:2002) [2]. Данные нормативные документы имеют ряд положений, отличающихся от положений, действующих в настоящее время в России, основанных на требованиях ГОСТ 13109-97. Наиболее существенные отличия в области оценки и мониторинга качества электроэнергии:

1. В ГОСТ Р 51317.4.30-2008 введены два класса характеристик процесса измерений показателей качества электрической энергии — А и S. Для каждого класса установлены методы измерений различных показателей КЭ и требования к характеристикам средств измерений. Обозначения классов следующие: А («advanced») — «повышенного типа»; S («survey») — «для наблюдений».

2. В ГОСТ Р 51317.4.30-2008 изменяются состав и характеристики показателей КЭ, измеряемых в настоящее время в соответствии с ГОСТ 13109-97.

3. В ГОСТ Р 51317.4.30 — 2008 изменяется требование к длительности основного интервала времени измерений показателей КЭ, объединению результатов измерений по времени, неопределенности измерения текущего времени. Новым и весьма важным является требование о маркировании результатов измерений показателей КЭ, если имели место провалы, прерывания напряжения и перенапряжения.

Рассматривая эти отличия, можно сделать выводы, что разработанные национальные стандарты относят наблюдение за качеством электрической энергии, в том числе непрерывный мониторинг, к необходимому аспекту деятельности электросетевых компаний и потребителей электрической энергии. Для обеспечения непрерывного мониторинга и наблюдений за качеством электрической энергии должны быть разработаны измерительные приборы класса S, которые в настоящее время в России не производятся. Обзор отечественных анализаторов качества показывает, что показатели точности измерительных приборов превышают требования к точности измерений, установленные для класса S, но недостаточны для требований к точности измерений по классу А [2]. Для этого отечественным предприятиям необходимо будет разработать новые или усовершенствовать имеющиеся анализаторы качества для работы с точностью измерения по классу А. Поэтому введение ГОСТ Р 51317.4.30-2008 и ГОСТ Р 51317.4.7-2008 повлечет за собой изменения требований к составу показателей КЭ, точности их измерений, характеристикам средств измерений.

Одним из путей усовершенствования измерительных приборов качества электроэнергии является разработка совершенно новой методики анализа кривых тока и напряжения. Так как в существующих методиках, для упрощения процесса анализа, применяемых

в определении различных искажений формы электроэнергетических сигналов, предполагается, что показатели качества электроэнергии остаются неизменными в течение длительного интервала времени [3]. Это не дает возможности получить полную картину происходящих в системе процессов. Новая методика определения искажений должна позволять непрерывно контролировать параметры изменяющихся во времени электроэнергетических сигналов. Математической базой для разработки этой методики анализа показателей качества электроэнергии послужит современная теория вейвлет-анализа.

Преобразования Фурье, широко используемые в современных анализаторах качества электроэнергии, применимы лишь для стационарных сигналов. Это связано с тем, что в качестве основных базисных функций используются синусы, косинусы и комплексные экспоненты, являющиеся бесконечными функциями. С их помощью можно получить лишь информацию о частотном спектре сигнала в каком-то временном интервале. Их нельзя использовать для анализа постоянно изменяющихся во времени напряжения и тока, так как нам необходим не только частотный спектр, но и время появления определенных частот в сигнале.

В качестве подтверждения рассмотрим Фурье-спектр  $f_{\omega}$  одномерного сигнала  $f(t)$  с конечной энергией (т.е. квадратично-интегрируемого). Он задается формулой [4]

$$f_{\omega} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt. \quad (1)$$

Для восстановления исходного сигнала применяется обратное преобразование:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\omega} e^{i\omega t} d\omega. \quad (2)$$

Используя теорему Парсеваля, в которой говорится, что интеграл квадрата функции равен интегралу квадрата преобразованной, получим:

$$\int |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int |f_{\omega}|^2 d\omega. \quad (3)$$

Это указывает на сохранение энергии при переходе от временной области к частотной. Из формулы (1), видно, что необходима информация о сигнале  $f(t)$  как из прошлого, так и из будущего. Что говорит о применимости Фурье-анализа лишь к стационарным сигналам, у которых частота не меняется со временем. Таким образом, частотно-временная полоса оказывается хорошо локализована по частоте и практически неограниченна по оси времени, т.е. формула (1) описывает частотное содержание сигнала, но не локальные свойства на оси времени. Также сигнал  $f(t)$  должен достаточно быстро спадать на бесконечности в прошлом и будущем [4].

Для решения проблемы определенных локальных координат, при которых проявляют себя те или иные частоты, с помощью того же набора базисных функций было разработано оконное преобразование Фурье. Сигнал  $f(t)$  анализируется лишь внутри некоторого окна. Но на практике это связано с трудностями поиска оптимального окна, ограничивая себя выбором из наиболее доступных и легко генерируемых.

Недостатки, присущие преобразованиям Фурье, не позволяя производить своевременный и непрерывный анализ параметров сигнала. Вейвлет-анализ



является мощной альтернативой анализу Фурье и дает более гибкую технику обработки сигналов. С каждым годом популярность вейвлет-анализа стремительно растет, так же быстро увеличивается и область применения вейвлетов. Они стали незаменимым математическим инструментом в тех случаях, когда результат анализа некоторого сигнала должен содержать не только простое перечисление его характерных частот, но и сведения об определенных локальных координатах, при которых эти частоты проявляют себя. Вейвлеты широко применяются для фильтрации и предварительной обработки данных, анализа состояния и прогнозирования ситуации на фондовых рынках, распознавания образов, при обработке и синтезе различных сигналов, например речевых, медицинских, для решения задач сжатия и обработки изображений, при обучении нейросетей и во многих других случаях.

Термин «вейвлет» происходит от английского слова *wavelet* (от французского «*ondelette*») и дословно переводится как «короткая (маленькая) волна». Так же в различных переводах зарубежных статей на русский язык встречаются еще термины: «всплеск», «всплесковая функция», «маловолновая функция», «волночка» и др. [5].

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала заключается в представлении в виде обобщенного ряда, или интеграла Фурье по системе базисных функций  $\psi_{ab}(t)$ . Эти функции сконструированы из материнского (исходного) вейвлета  $\psi(t)$ , обладающего определенными свойствами за счет операций сдвига во времени ( $b$ ) и изменения временного масштаба ( $a$ ) [5].

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (4)$$

где  $\psi_{ab}(t)$  представляет собой вейвлет, порожаемый материнским вейвлетом  $\psi(t)$ , для заданных значений параметров  $a$  и  $b$ . Множитель  $1/\sqrt{a}$  обеспечивает независимость нормы этих функций от масштабирующего числа  $a$ . Чем меньше значения  $a$ , тем меньше масштаб  $\psi_{ab}(t)$  или выше частота ( $\omega \sim 1/a$ ), и наоборот, больше параметр  $a$  — крупнее масштаб  $\psi_{ab}(t)$ . Т.е. увеличение значения  $a$  приводит к растяжению материнского вейвлета  $\psi(t)$  и сжатию его спектра.

Таким образом, в частотной области спектры вейвлетов похожи на небольшие всплески с амплитудой на частоте  $\omega_0$  и полосой  $\Delta\omega$ , т.е. имеют вид полосового фильтра; при этом  $\omega_0$  и  $\Delta\omega$  уменьшаются с ростом параметра  $a$ . Следовательно, вейвлеты локализованы как во временной, так и частотной областях. На рис. 1 в качестве примера представлены вейвлеты Хаара и Гаусса.

Дадим теперь формальное определение интегральному вейвлет-преобразованию, которое используется в основе вейвлет-анализа [6]. Интегральным вейвлет-преобразованием функции  $f(t) \in L^2(R)$  называется выражение

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (5)$$

где  $a, b \in R$ ,  $a \neq 0$ . Функция  $\psi(t)$  в выражение (5) называется вейвлетом (анализирующим, базисным или материнским вейвлетом). В формуле (5) символом  $*$  обозначена процедура комплексного сопряжения.

Параметр  $a$  называется *масштабом* (scale), он аналогичен частоте (периоду) гармонического колебания в Фурье-анализе. Следует отметить, что поня-

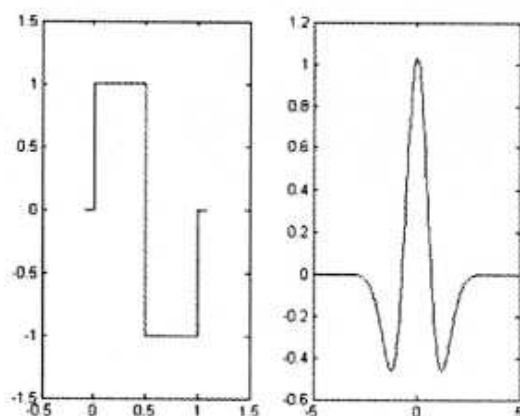


Рис. 1. Вейвлеты Хаара и Гаусса

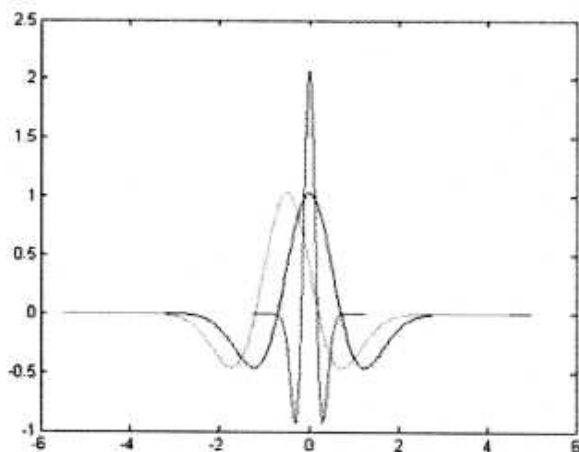


Рис. 2. Сдвиг и масштабирование вейвлета Гаусса

тие масштаба несколько отличается от понятия периода, являясь более широким, хотя и менее наглядным. Это связано с тем, что в Фурье-преобразовании базис преобразования зафиксирован, а в вейвлет-преобразовании возможно использование различных базисных вейвлетов, т.е. системы масштаба всегда будут немного отличаться друг от друга.

Параметр  $b$  определяет перемещение в пространстве вейвлета и называется *сдвигом* (shift). Этот параметр не имеет аналога в Фурье-преобразовании. В качестве примера на рис. 2 рассмотрены изменения параметров  $a$  и  $b$ , приводящие к сдвигу и масштабированию материнского вейвлета Гаусса.

Обратное вейвлет-преобразование задается выражением [6]

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{dad b}{a^2}, \quad (6)$$

где  $C_\psi$  — нормирующий коэффициент.

Помимо интегральных существует дискретное вейвлет-преобразование, которое получило широкое применение в численном моделировании, сжатии изображений и т.д. Дискретное преобразование основано на использовании целочисленных сдвигов и задании масштабов степенями двойки. Исходя из опыта применения для анализа временных рядов, непрерывные преобразования более удобны, чем дискретные.

Для более наглядного представления в различии результатов анализа сигнала при использовании преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. Рас-

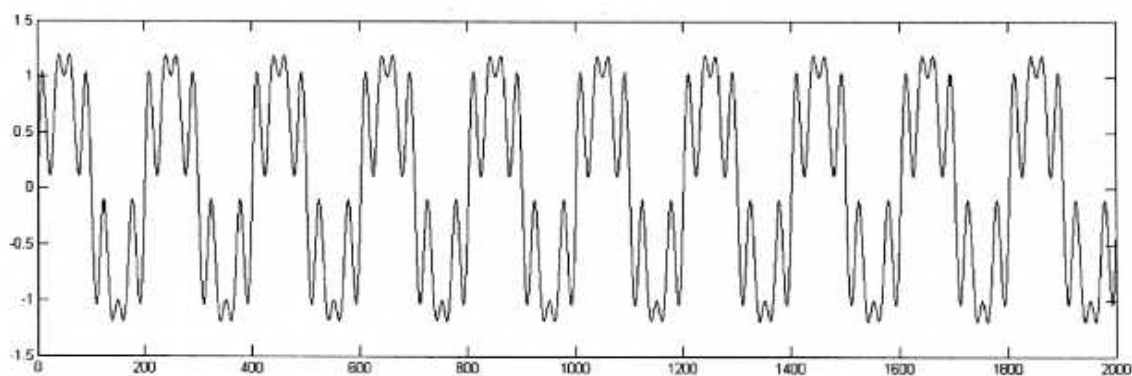


Рис. 3. Сигнал, представляющей собой сумму синусоид с частотами 50, 250 и 350 Гц

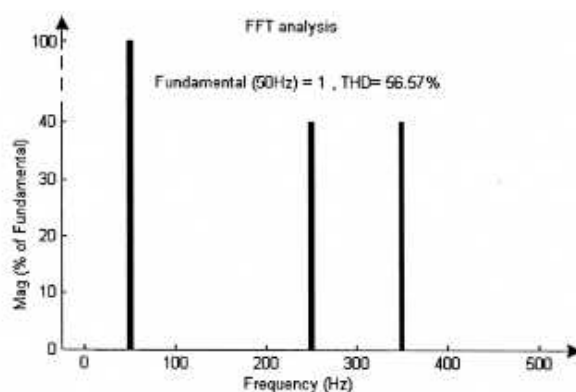


Рис. 4. Результаты Фурье-анализа

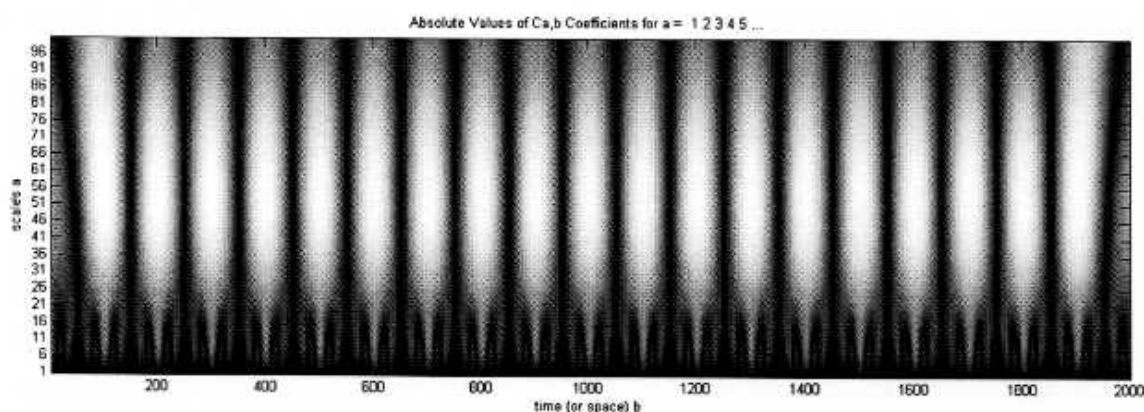


Рис. 5. Результаты вейвлет-преобразования

смотрим на примере кривой (рис. 3), представляющей собой сумму синусоид с частотами 50, 250 и 350 Гц. Для анализа данного сигнала предпочтительнее использовать Фурье-преобразование, т.к. анализирующая функция является синусоидой. На рис. 4 и 5 представлены результаты Фурье и вейвлет-преобразования, по результатам которых видно существенное отличие в предоставлении информации о сигнале. Фурье представляет лишь частотный спектр исследуемого сигнала, который не дает информацию о том, в какой момент проявляет себя та или иная частота. Вейвлет-преобразование позволяет увидеть, когда именно и с какой амплитудой проявляет себя каждая гармоника.

Одним из основных преимуществ вейвлет-анализа является возможность многомасштабного анализа [7]. Преимущество заключается в том, что мы можем путем последовательного огрубления (или уточнения) сигнала выявлять его локальные особенности и подразделять их по интенсивности. Также открывается

возможность обнаружения динамики изменения сигнала в зависимости от масштаба. Во многих случаях резкое изменение сигнала хорошо видно невооруженным глазом, но взаимодействия событий на мелких масштабах, перерастающих потом в крупномасштабные явления, увидеть очень сложно. И наоборот, анализируя сигнал только на мелком масштабе, можно не заметить явлений, происходящих на глобальном уровне.

Многомасштабное представление одномерных сигналов на базе вейвлет-преобразования дает несколько своеобразную, но довольно наглядную частотную и временную информацию о сигнале, с возможностью анализа сигнала на том масштабе представления, который нам необходим в конкретной ситуации.

**Вывод.** Используя вейвлет-преобразование для контроля качества, можно добиться более высокой точности и скорости в определении показателей качества электроэнергии. Существующие анализаторы

качества производят измерение с определенными интервалами, применения же новой технологии в обработке измерительной информации позволит проводить непрерывные измерения. А так же, используя технологии многомасштабный анализа, позволит избежать учета единственного события более чем один раз для различных показателей (например, учета единственного провала напряжения как одновременного провала напряжения и отклонения частоты) и показать, что объединенное значение может быть недостоверным. Поэтому внедрение новой методики в аппаратную часть повысит точность и скорость измерения показателей качества электроэнергии по сравнению с существующими аналогами

#### Библиографический список

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Балаков, Ю. Н. Значение новых стандартов ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЭК 61000-4-30:2008) и ГОСТ Р 51317.4.7-2008 (МЭК 61000-4-7:2002) для работ по оценке и мониторингу качества электрической энергии / Ю.Н. Балаков // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2009. — №4. — С. 10 — 14.

3. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. — М.: ЭНАС, 2009. — 456 с.

4. Дремил, И.М. Вейвлеты и их использование / И.М. Дремил, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. — 2001. — Т. 171, № 5. — С. 467 — 500.

5. Яковлев, А.Н. Введение в вейвлет-преобразования / А.Н. Яковлев: учеб. пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 104 с.

6. Витязев, В.В. Вейвлет-анализ временных рядов / В.В. Витязев: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. — 58 с.

7. Чуи, К. Введение в вейвлеты / К. Чуи; пер. с англ. Жилейкина Я.М. — М.: Мир, 2001. — 412 с.

**ДОЛИНГЕР Станислав Юрьевич**, аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

**ЛЮТАРЕВИЧ Александр Геннадьевич**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: e-mail: l.alexander@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 20.11.2009 г.

© С. Ю. Долингер, А. Г. Люtareвич

УДК 621.316.1

**Д. Г. САФОНОВ**  
**К. Х. ТУРАХАНОВ**

Омский государственный  
технический университет

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Статья посвящена проблеме анализа качества электрической энергии в системах электроснабжения. Контроль качества электрической энергии подразумевает оценку соответствия показателей установленным нормам, а дальнейший анализ качества электроэнергии — определение причин ухудшения этих показателей. Изменения параметров электрической сети, мощности и характера нагрузки во времени являются основной причиной изменения ПКЭ. Таким образом, ПКЭ — установившееся отклонение напряжения, коэффициенты, характеризующие несинусоидальность и несимметрию напряжений, отклонение частоты, размах изменения напряжения и др. — величины случайные и их измерения и обработка должны базироваться на вероятностно-статистических методах.

**Ключевые слова:** показатели качества электрической энергии, закон распределения, дисперсия, медиана, критерий Пирсона.

Процесс изменения параметров рабочего режима в ЭЭС является, как правило, случайным. Это связано, прежде всего, со случайным характером изменения нагрузок и соответствующим случайным характером изменения ПКЭ [1]. В этих условиях для оценки соответствия ПКЭ требованиям ГОСТ применяют вероятностно-статистический метод контроля КЭ [2].

Действительное переменное, которое принимает различные значения в зависимости от случая, называют случайной величиной [3]. Дискретные значения ПКЭ измеряют на конечном интервале времени (одни сутки) и, таким образом, получают конечное число таких измерений  $n$ , каждое из которых рассматривается как случайная величина  $k_j$ . Если из общего



количества  $n$  измерений было получено  $m$  раз, то вероятность такого события (или частота случайного события):

$$P(k_i) = \frac{m}{n}, \quad (1)$$

где  $m$  — число появления результата  $k_i$ ;  $n$  — общее число измерений.

При оценке ПКЭ вероятность можно рассчитать в процентах.

Тогда

$$P(k_i) = \frac{m}{n} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Под случайной величиной понимается величина, принимающая в результате опыта какое-либо числовое или качественное значение.

Случайная величина, принимающая конечное число или последовательность различных значений, называется дискретной случайной величиной. Случайная величина, принимающая все значения из некоторого интервала, называется непрерывной случайной величиной.

Наиболее удобной формой представления информации об изменениях случайной величины (например, отклонение напряжения) является гистограмма, т.е. графическое представление статистического ряда исследуемого показателя, изменение которого носит случайный характер (рис. 1).

Основными характеристиками случайной величины, заданной своими распределениями, является математическое ожидание (или среднее значение) и дисперсия.

Математическое ожидание случайной величины является центром ее распределения. Дисперсия характеризует отклонение случайной величины от ее среднего значения [4].

Если  $X$  дискретная случайная величина, значения  $x_i$  которой принимают с вероятностью  $p_i$ , так, что  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ , то математическое ожидание  $M(X)$  случайной величины  $X$  определяется равенством

$$M(X) = \sum_{i=1}^n x_i p_i = m_x, \quad (3)$$

т.е. суммой произведений всех ее возможных значений на соответствующие вероятности.

Математическим ожиданием непрерывной случайной величины является аналог его дискретного выражения

$$M(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx = x, \quad (4)$$

где  $f(x)$  — плотность распределения величины  $X$ .

Действительно, все значения в интервале  $(x; x+\Delta x)$  можно считать примерно равными  $x$ , а вероятность таких значений равна  $f(x)dx$  (см. ранее). Поэтому значения  $x_i$  дискретного распределения заменяются  $x$ , а вероятности  $p_i$  — на  $f(x)dx$ , а сумма заменяется интегралом.

Дисперсией или рассеянием случайной величины  $X$  называется математическое ожидание квадрата разности случайной величины и ее математического ожидания.

$$D(X) = M[(X - m_x)^2] = \sigma^2(x), \quad (5)$$

где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение.

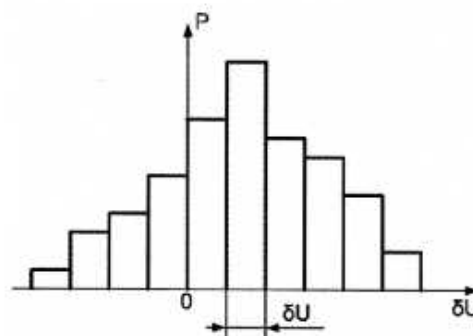


Рис. 1. Гистограмма отклонений напряжения

Если случайная величина  $X$  дискретна и принимает значения  $x_i$  с вероятностями  $p_i$ , то случайная величина  $(X - x)^2$  принимает значения  $(x_i - x)^2$  с вероятностями  $p_i$ . Поэтому для дискретной случайной величины имеем

$$D(X) = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i = \sigma^2(x). \quad (6)$$

Аналогично для непрерывной случайной величины получаем

$$D(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx. \quad (7)$$

Чем меньше величина дисперсии, тем лучше значения случайной величины характеризуются ее математическим ожиданием.

Любое утверждение о виде или свойствах распределения наблюдаемых в эксперименте случайных величин называют статистической гипотезой. Такие утверждения можно делать на основе теоретических соображений или статистических исследований других наблюдений. На результат измерений влияют многие случайные факторы, поэтому результат  $i$ -го измерения можно записать в виде  $a_i = X + \epsilon_i$ , где  $\epsilon_i$  — случайная погрешность измерения. Если  $\epsilon_i$  складывается из большого числа ошибок, каждая из которых не велика, то на основании центральной предельной теоремы можно предположить, что случайные величины  $a_i$  имеют нормальное распределение [5]. Такое предположение является статистической гипотезой о виде распределения наблюдаемой случайной величины.

Статистический критерий проверки гипотезы  $H_0$  служит для определения возможного отклонения от основной гипотезы. Характер отклонений может быть различным. Если критерий «улавливает» любые отклонения от  $H_0$ , то такой критерий называют универсальным или критерием согласия. Существуют критерии, которые выявляют отклонения от заданного вида, это узко направленные критерии.

При проверке эксперимента закон распределения вероятностей случайных величин неизвестен, и можно лишь предположительно судить о его виде (рис. 2). Выборочные оценки параметров распределения несут в себе случайные ошибки, искажающие истинный характер распределения. Поэтому после получения эмпирического распределения производится подбор теоретического закона распределения, пригодного для описания вероятностных свойств изучаемой случайной величины. Критерии подбора (проверки гипотезы соответствия) называют в статистике критериями согласия. Все они основаны на выборе допустимой меры расхождения между теоретическим распределением и выборочными данными [6].



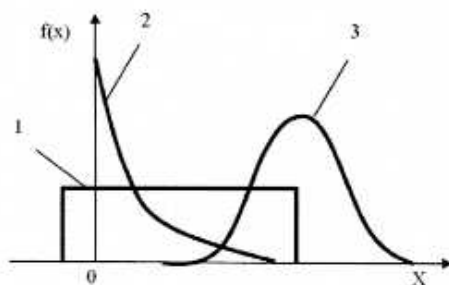


Рис. 2. Кривые распределения:  
1 – закон равномерной плотности;  
2 – показательный закон распределения; 3 – закон Гаусса

Общую процедуру проверки гипотезы закона распределения можно представить в следующей последовательности:

- по опытным данным строится эмпирическая кривая распределения вероятностей;
- определяются параметры эмпирического распределения (в соответствии с его видом);
- выдвигается одна или несколько гипотез о функции плотности исследуемой случайной величины, исходя из внешнего вида эмпирической кривой, значений ее параметров, технических факторов, влияющих на ее вид;
- эмпирическая кривая выравнивается по одной или нескольким теоретическим кривым;
- проводится сравнение по одному или нескольким критериям согласия;
- выбирается теоретическая функция, дающая наилучшее согласование.

Определив по эмпирическим данным параметры распределения, подставляют их в теоретическую кривую закона распределения и рассчитывают вероятность середины интервалов эмпирического распределения. Умножив значение полученной вероятности на общее число опытов, получают теоретическое значение частот случайной величины, которые и определяют «выровненную» кривую. Теперь можно найти вероятность того, что эмпирическая кривая соответствует выбранной теоретической, выбрав вероятность согласия (уровень значимости). Если результат расхождения не выйдет за принятый уровень значимости, то считают, что эмпирическое распределение согласуется с теоретическим. Если сравнение осуществляется с несколькими теоретическими законами, то окончательно принимать тот, который дает лучшее соответствие [7].

Чаще всего в качестве критериев согласия принимают критерий Пирсона ( $\chi^2$ ) и критерий Колмогорова – Смирнова (К – С-критерий).

Критерий  $\chi^2$  является наиболее состоятельным при большом числе наблюдений. Он почти всегда опровергает неверную гипотезу, обеспечивает минимальную ошибку в принятии неверной гипотезы по сравнению с другими критериями.

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^K \frac{(m_j - m_j^*)^2}{m_j^*}, \quad (8)$$

где  $m_j$  – наблюдаемая частота случайного события;  $m_j^*$  – ожидаемая по принятому теоретическому закону распределения;  $K$  – число интервалов случайной величины.

Затем определяется число степеней свободы  $i$ :

$$i = K - r - 1; \quad (9)$$

где  $K$  – число интервалов случайной величины;  $r$  – число параметров теоретической функции распределения.

Приведем пример расчета статистической обработки коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения. Данные после обработки сводим в табл. 1.

Вычислим математическое ожидание по формуле (3):

$$M(X) = \sum_{i=1}^n x_i p_i = m_X,$$

где  $x_i$  – представитель  $i$ -го разряда,  $p_i$  – частота  $i$ -го разряда,  $k$  – число разрядов.

$$m_X = 0,587.$$

Вычислим дисперсию по формуле (6):

$$D(X) = \sum_{i=1}^n (x_i - m_X)^2 p_i = \sigma^2(X).$$

Выберем параметры  $m$  и  $\sigma$ , так чтобы  $m = m_X$  и  $\sigma^2 = D_X$ :

$$\sigma = \sqrt{D_X}, \\ m = 0,587, \quad \sigma = 0,123.$$

Запишем нормальный закон распределения:

$$F(x) = \frac{1}{0,123 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-0,587)^2}{2 \cdot 0,123^2}}.$$

Теперь можно найти вероятность того, что эмпирическая кривая соответствует выбранной теоретической. В качестве критерия согласия применим критерий Пирсона ( $\chi^2$ ).

Для каждого интервала рассчитаем  $P_i$  – ожидаемая вероятность по принятому теоретическому закону распределения по формуле:

$$P_i = \Phi\left(\frac{x_{i+1} - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_i - m}{\sigma}\right), \quad (10)$$

где  $x_i$  – представитель  $i$ -го разряда,  $m$  – математическое ожидание.

Для 1-го интервала:  $P_1 = \Phi^*(0,0026) - \Phi^*(0,0003)$  из табл. 1 [6]  $P_1 = 0,0023$ .

Для 2-го интервала:  $P_2 = \Phi^*(0,0179) - \Phi^*(0,0026)$  из табл. 1  $P_2 = 0,0153$ .

Для 3-го интервала:  $P_3 = \Phi^*(0,0655) - \Phi^*(0,0179)$  из табл. 1  $P_3 = 0,0476$ .

Для 4-го интервала:  $P_4 = \Phi^*(0,1949) - \Phi^*(0,0655)$  из табл. 1  $P_4 = 0,1294$ .

Для 5-го интервала:  $P_5 = \Phi^*(0,4168) - \Phi^*(0,1949)$  из табл. 1  $P_5 = 0,2219$ .

Для 6-го интервала:  $P_6 = \Phi^*(0,6664) - \Phi^*(0,4168)$  из табл. 1  $P_6 = 0,2496$ .

Для 7-го интервала:  $P_7 = \Phi^*(0,8577) - \Phi^*(0,6664)$  из табл. 1  $P_7 = 0,1913$ .

Для 8-го интервала:  $P_8 = \Phi^*(0,9582) - \Phi^*(0,8577)$  из табл. 1  $P_8 = 0,1005$ .

Для 9-го интервала:  $P_9 = \Phi^*(0,9899) - \Phi^*(0,9582)$  из табл. 1  $P_9 = 0,0317$ .

Для 10-го интервала:  $P_{10} = \Phi^*(0,9990) - \Phi^*(0,9899)$  из табл. 1  $P_{10} = 0,0091$ .

Для 11-го интервала:  $P_{11} = \Phi^*(0,9999) - \Phi^*(0,9990)$  из табл. 1  $P_{11} = 0,0009$ .

Сведем полученные результаты в табл. 2.

Вычислим значение меры расхождения по формуле:

Данные для расчета

Интервал	Число наблюдений	Частота наблюдений
0,16 .. 0,24	6	0,4
0,24 .. 0,32	18	1,39
0,32 .. 0,4	57	4,7
0,4 .. 0,48	126	10,4
0,48 .. 0,56	221	18,3
0,56 .. 0,64	361	29,89
0,64 .. 0,72	243	20,1
0,72 .. 0,8	117	9,69
0,8 .. 0,88	38	3,1
0,88 .. 0,97	12	0,9
0,97 .. 1,05	1	0

Данные для проверки согласования  
теоретического и статистического распределения

Интервал	$m_i$	$nP_i$
0,16 .. 0,24	6	3,5
0,24 .. 0,32	18	18,5
0,32 .. 0,4	57	57,6
0,4 .. 0,48	126	146,3
0,48 .. 0,56	221	267,2
0,56 .. 0,64	361	315,2
0,64 .. 0,72	243	230,7
0,72 .. 0,8	117	118,5
0,8 .. 0,88	38	37,5
0,88 .. 0,97	12	11,7
0,97 .. 1,05	1	1,5

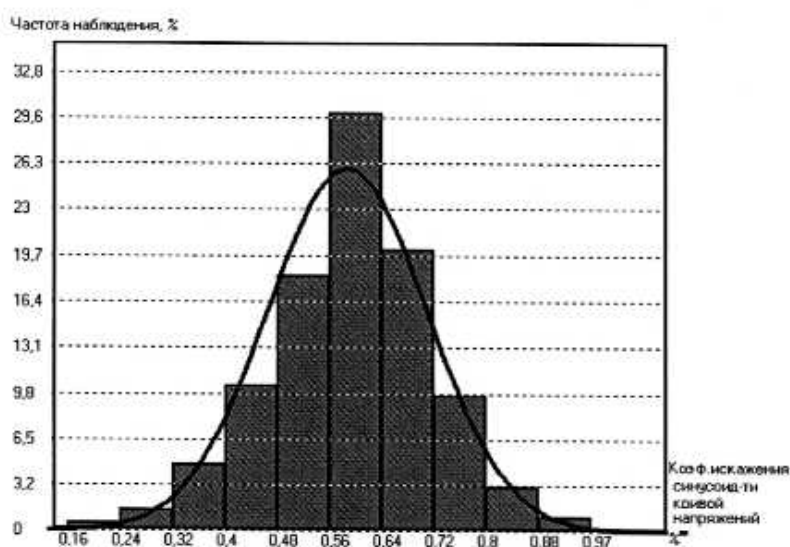


Рис. 3. Теоретическая и гипотетическая кривые распределения

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}, \quad (11)$$

где  $m_i$  – наблюдаемая частота случайного события;  
 $nP_i$  – ожидаемая частота по принятому теоретическому закону распределения;  $K$  – число интервалов случайной величины.

$$\chi^2 = 2,71.$$

Затем определяется число степеней свободы « $i$ » по формуле (11):

$$i = 11 - 2 - 1 = 8;$$

по таблице 7.2 [4] получим  $P=0,96$ .

$P=0,96$  – эта вероятность малой не является: поэтому гипотезу о том, что величина  $X$  распределена по нормальному закону, можно считать правдоподобной (рис. 3).

В ходе проведенных исследований были выявлены характерные недостатки в упрощенных методиках обработки результатов измерений согласно ГОСТ 13109-97[8] и РД 153-34.0-15 [9]. С 1 января 2010 г. взамен ГОСТ 13109-97 действует ГОСТ Р 51317.4.30-

2008 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии», разработанный на основе МЭК 61000-4-30[10], который определяет необходимость построения систем мониторинга качества электроэнергии посредством использования недорогих средств измерения.

Для более эффективного использования методов определения и в целом контроля показателей качества электроэнергии существует необходимость применения вероятностно-статистических методов для обработки большого объема результатов измерений, полученных с помощью систем мониторинга качества электроэнергии.

#### Библиографический список

1. Карташев, И. И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / И. И. Карташев // под ред. М.А. Калугиной. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 120 с.
2. Суднова, В. В. Качество электрической энергии / В. В. Суднова. – М.: ЗАО Энергосервис, 2008. – 80 с.
3. Сухов, А. Н. Математическая обработка результатов измерений: учеб. пособие / А. Н. Сухов. – М.: МИСИ, 1982. – 89 с.

4. Вентцель, Е. С. Теория вероятности / Е. С. Вентцель. — М.: Энергоатомиздат, 2004 г. — 540 с.
5. Орлов, А. И. Непараметрическое точечное и интервальное оценивание характеристик распределения / А. И. Орлов. — Заводская лаборатория. — 2004. — Т. 70, № 5. — С. 65–70.
6. Орлов, А. И. О критериях согласия с параметрическим семейством / А. И. Орлов. — Заводская лаборатория. — 1997. — Т. 63, № 5. — С. 49–50.
7. Дрехслер, Р. Измерение и оценка качества электрической энергии при несимметричной и нелинейной нагрузке / Р. Дрехслер. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 112 с.
8. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Госкомитет по стандартам, 1999. — 33 с.
9. РД 153-34.0-15.502-2002. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах элект-

роснабжения общего назначения. Ч. 2. Анализ качества электрической энергии. — М.: Госкомитет по стандартам, 2002. — 24 с.

10. МЭК 61000-4-30 «Электромагнитная совместимость (ЭМС). Ч. 4–30: Методы испытаний и измерений. Методы измерения качества электроэнергии», 2008. — 40 с.

**САФОНОВ Дмитрий Геннадьевич**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: e-mail: SafonovDG@mail.ru

**ТУРАХАНОВ Кайрат Хаирболович**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: e-mail: kairatkhan@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.11.2009 г.

© Д. Г. Сафонов, К. Х. Тураханов

УДК 621.316.1

**Д. Г. САФОНОВ  
К. Х. ТУРАХАНОВ**

Омский государственный  
технический университет

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Данная статья посвящена вопросам измерения и анализа качества электрической энергии в электрических сетях. В статье рассматриваются современные средства измерения показателей качества электроэнергии. Также уделяется внимание требованиям, предъявляемым нормативными документами по измерениям качества электроэнергии. В заключение приводятся сопоставления характеристик отечественных и зарубежных приборов по измерению показателей качества электроэнергии.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, показатели качества электроэнергии, средства измерения показателей качества электроэнергии.

Электрооборудование, работающее в электрических сетях, требует соблюдения определенных номинальных параметров, таких как номинальная частота, номинальные синусоидальные напряжения и ток. Как и любой товар, энергия, продаваемая потребителю, характеризуется качеством. В процессе эксплуатации электрических сетей возникают отклонения вышеуказанных параметров от предъявляемых требований, которые характеризуются показателями качества электроэнергии (ПКЭ).

Показатели качества электроэнергии в значительной степени определяются характеристиками сетей, в которых аппараты и электроприемники (ЭП) имеют различные точки присоединения. Кроме этого, на качество электроэнергии (КЭ) оказывает влияние потребитель, ЭП которого зачастую существенно искажают напряжение.

Обеспечить идеальное качество электроэнергии в реальных условиях эксплуатации, когда происходит постоянный ввод новых мощностей, замена устаревшего оборудования и т.д., практически невоз-

можно, так как это требует больших материальных затрат для постоянного мониторинга и проведения необходимых мероприятий. В связи с этим государственным стандартом устанавливаются некоторые допустимые уровни ухудшения ПКЭ, которые не влияют на нормальную работу ЭП потребителей, при этом обеспечивая все их технические и экономические характеристики.

Наиболее исчерпывающим документом в России является стандарт ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Документ дает основные понятия о показателях и нормах качества электроэнергии, устанавливает требования к погрешностям измерений качества электроэнергии.

Стандартом устанавливаются следующие показатели качества электроэнергии (ПКЭ) [1]:

- установившееся отклонение напряжения  $\delta U_{\gamma}$ ;
- размах изменения напряжения  $\delta U_{\delta}$ ;

Номенклатура измеряемых величин СИ ПКЭ в соответствии с ГОСТ 13109-97

Измеряемые величины	ЭРИС-КЭ.02	Энерготестер ПКЭ-06	ИБК «Омск-М»	Прорыв-КЭ	ЭМ-3.2	ION 7650	Fluke 435	MAVOW ATT 70	SATEC PM175
Действующие значения фазных напряжений	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Действующие значения фазных токов	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Коэффициент искажения синусоидальности напряжения, порядок учитываемых гармоник	+ / 2-40	+ / 2-40	+ / 2-40	+ / 2-40	+ / 2-40	+ / 2-63	+ / 2-51	+ / 2-63	+ / 2-40
Коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Интергармоники	-	-	-	-	-	+	-	+	+
Установившееся отклонение напряжения	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Отклонение частоты	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Доза фликера	+	+	-	-	+	-	-	+	+
Размах изменения напряжения	+	-	-	-	-	+	+	+	+
Амплитуда импульса напряжения	+	-	-	-	-	-	+	+	+
Длительность провала напряжения	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Коэффициент временного перенапряжения	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Активная/ реактивная/полная мощность	+ / + / +	+ / + / +	+ / + / +	+ / + / +	+ / + / +	+ / + / +	+ / + / +	+ / + / +	+ / + / +
Коэффициент мощности	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Активная/реактивная электроэнергия	+ / +	+ / +	+ / +	+ / +	+ / +	+ / +	-	+ / +	+ / +

- доза фликера  $P_f$ ;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ ;
- коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{Un}$ ;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ ;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$ ;
- отклонение частоты  $\Delta f$ ;
- длительность провала напряжения  $\Delta t_p$ ;
- импульсное напряжение  $U_{имп}$ ;
- коэффициент временного перенапряжения  $K_{перU}$ ;

При определении значений некоторых ПКЭ стандартом вводятся следующие вспомогательные параметры электрической энергии:

- интервал между изменениями напряжения  $\Delta t_{(n+1)}$ ;
- глубина провала напряжения  $\delta U_n$ ;
- частота появления провалов напряжения  $F_p$ ;
- длительность импульса по уровню 0,5 его амплитуды  $\Delta t_{имп,0.5}$ ;
- длительность временного перенапряжения  $\Delta t_{перU}$ ;

Часть ПКЭ (выделенные жирным шрифтом) характеризует установившиеся режимы работы электрооборудования энергоснабжающей организации и потребителей электроэнергии и дает количественную оценку КЭ в электрических сетях. Для характеристики вышеперечисленных показателей стандартом установлены численные нормально и предельно допустимые значения ПКЭ (нормы).

Для оценки соответствия ПКЭ указанным нормам стандартом устанавливается минимальный расчетный период, равный 24 ч, и рекомендуемый период, равный 7 суткам.

Измеренные ПКЭ не должны выходить за нормально допустимые значения с вероятностью 0,95 за установленный стандартом расчетный период времени (это означает, что можно не считать с отдельными превышениями нормируемых значений, если ожидаемая общая их продолжительность составит менее 5 % за установленный период времени). Другими словами, КЭ по измеренному показателю соответствует требованиям стандарта, если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода времени, т.е. 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения — 0 % от этого периода времени [2].



Наименование измеряемых характеристик	Единицы измерений	Диапазон измерений	Чувстви- тельность	Предел погрешности		Интервал усредн., с
				абсолютн.	относит., %	
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения	%	0 – 50	0,01	$\pm 0,05$ ( $K_{L1} < 1,0$ )	$\pm 5$ ( $K_{L1} \geq 1,0$ )	3
Коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения	%	0 – 50	0,01	$\pm 0,05$ ( $K_{L(n)} < 1,0$ )	$\pm 5$ ( $K_{L(n)} \geq 1,0$ )	3
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности	%	0 – 50	0,1	$\pm 0,2$	—	3
Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности	%	0 – 50	0,1	$\pm 0,2$	—	3
Установившееся отклонение напряжения	%	– 100... + 40	0,1	$\pm 0,2$	—	60
Отклонение частоты	Гц	45 – 55	0,01	$\pm 0,01$	—	20
Размах изменения напряжения	%	0 – 10	0,1	—	$\pm 5$	—
Доза фликера	отн.ед.	0,25 – 10	0,01	—	$\pm 5$	—
Амплитуда импульса напряжения*: — грозового — коммутационного	кВ	1 – 10 0,5 – 5	0,1 0,1	— —	$\pm 10$ $\pm 10$	—
Длительность импульса на уровне $0,5 U_{\text{ном}}$	мкс	10 – 10000	1	—	$\pm 10$	—
Длительность провала напряжения	с	0,01 – 60	0,01	$\pm 0,01$	—	—
Глубина провала напряжения	%	10 – 100	0,1	$\pm 0,5$	$\pm 10$	—
Коэффициент временного перенапряжения	отн.ед.	1 – 7,99	0,1	—	$\pm 2$	—
Длительность временного перенапряжения	с	0,02 – 200	0,01	$\pm 0,01$	—	—

Использование существующих средств измерения ПКЭ (СИ ПКЭ) позволяет решать текущие задачи при инструментальном контроле ПКЭ, основной целью которого является определение соответствия их значений требованиям ГОСТ 13109-97. Однако постоянная модернизация аппаратной и программной частей СИ ПКЭ значительно увеличивает их функциональность, что расширяет возможность их применения в электрических сетях, поскольку современная энергетика, имеющая тенденцию к развитию электронной высокоточной автоматики управления и использованию микропроцессорных защит, предъявляет новые требования к мониторингу КЭ, связанные с точностью измерений и их обработкой.

Таким образом, следует отметить, что анализ КЭ является многогранной задачей, основная цель которой состоит в определении влияния источников искажения на КЭ как со стороны системы электроснабжения (СЭС), так и со стороны потребителя. В условиях постоянно изменяющихся нагрузок решение ее может осуществляться расчетными методами с использованием измеренных параметров источников искажения (напряжение, ток и т.д.). В современных СИ ПКЭ применяются программно-вычислительные средства, позволяющие им самостоятельно производить расчеты для определения значений ПКЭ. В этом случае можно говорить об инструментальном анализе ПКЭ, а СИ ПКЭ можно назвать анализаторами КЭ.

С целью классификации СИ ПКЭ рассматриваются четыре формы контроля: диагностический, инспекционный, оперативный или технологический и коммерческий контроль КЭ [3].

Основной целью диагностического контроля на границе раздела электрических сетей потребителя и

энергоснабжающей организации является обнаружение в сети источника искажения КЭ, определение допустимого вклада в нарушение требований стандарта по каждому ПКЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97.

Инспекционный контроль осуществляется органами сертификации для получения информации о состоянии сертифицированной электроэнергетики в электрических сетях энергоснабжающей организации.

Оперативный или технологический контроль необходим в условиях эксплуатации в точках электрической сети, где имеются и в ближайшей перспективе не могут быть устранены искажения напряжения. Основной задачей является выявление связи между технологическим процессом потребителя электроэнергии и его влиянием на КЭ.

Коммерческий контроль КЭ должен осуществляться на границах балансовой принадлежности в тех случаях, когда договором энергоснабжения установлены взаимные обязательства сторон при расчетах за потребленную электроэнергию с учетом ее качества.

В настоящее время вопросам качества электроэнергии в различных отраслях промышленности уделяется большое внимание со стороны широкого круга специалистов, а следовательно, СИ ПКЭ становятся все более востребованными и ориентированными на потребителя.

В табл. 1 приведены типы некоторых СИ ПКЭ, представленных на российском рынке измерительных приборов как отечественного, так и зарубежного производства [4].

Следует отметить, что при определении номенклатуры параметров, измеряемых конкретным СИ, следует исходить из его назначения и области приме-

СИ ПКЭ	Прорыв-КЭ	ЭМ-3.2	Тест-Электро	Fluke 435	ION 7650	MAVOWATT 70	SATEC PM175
Соответствие стандартам	ГОСТ 13109-97	ГОСТ 13109-97	ГОСТ 13109-97, МЭК 61000-4-30	МЭК 61000-4-30, EN50160	МЭК 61000-4-30, EN50160	ГОСТ 13109-97, МЭК 61000-4-30, EN50160	ГОСТ 13109-97, МЭК 61000-4-30, EN50160
Класс измерений*	—	—	A (S)	A	A	A	A
Основной интервал времени измерений, с	н/д	н/д	н/д	до 0,5	0,2	0,2	0,2
Объединенный интервал времени измерений, с	3, 20, 60	3, 20, 60, 1800	н/д	3, 600, 7200	3, 600, 7200	3, 600, 7200	3, 600, 7200
Неопределенность измерения текущего времени, мс/сут.	н/д	50	н/д	20	20	20	20
Синхронизация времени	GPS (SNTP)	GPS	н/д	н/д	GPS	GPS	GPS
Маркирование результатов измерения	н/д	+	+	+	+	+	+

Таблица 4

## Сопоставление требований к точности измерений четырех ПКЭ

ПКЭ	ГОСТ Р 51317.4.30-2008				ГОСТ 13109-97	
	Класс А		Класс S		Предел допустимой погрешности измерений	Диапазон измерений
	Неопределенность измерений	Диапазон измерений	Неопределенность измерений	Диапазон измерений		
Значение и отклонение (установившееся отклонение) напряжения	$\pm 0,1\%$	10–150 % $U_{\text{дин}}$	$\pm 0,5\%$	20–120 % $U_{\text{дин}}$	$\pm 0,2\%$	$\pm 20\%$
Значение и отклонение частоты	$\pm 0,01$ Гц	42,5–57,5/ 51–69 Гц	$\pm 0,05$ Гц	42,5–57,5/ 51–69 Гц	$\pm 0,03$ Гц	45–55 Гц
Коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения	$\pm 5\% U_n$ при $U_n \geq 1\% U_{\text{ном}}$ $\pm 0,05\% U_n$ при $U_n < 1\% U_{\text{ном}}$	От 10 до 200 % значения уровня электромагнитной совместимости обстановки класса 3 по ГОСТ Р 51317.2.4	$\pm 10\% U_n$ при $U_n \geq 3\% U_{\text{ном}}$ $\pm 0,3\% U_n$ при $U_n < 3\% U_{\text{ном}}$	От 10 до 100 % значения уровня электромагнитной совместимости обстановки класса 3 по ГОСТ Р 51317.2.4	$\pm 0,03\%$ при $K_{\text{опт}} < 1$ , $\pm 3\%$ при $K_{\text{опт}} \geq 1$	0,05–30 %
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности	$\pm 0,15\%$	1–5 % $U_1$	$\pm 0,3\%$	1–5 % $U_1$	$\pm 0,2\%$	0–15 %
$U_{\text{ном}}$ — номинальное значение диапазона измерения напряжения СИ ПКЭ $U_n$ — измеряемая величина						

нения. Такой подход позволяет разрабатывать не универсальные приборы, а специализированные, направленные на решение определенных задач.

Основными нормативными документами, определяющими технические характеристики и методы проведения измерений, являются ГОСТ 13109-97 и РД 153-34.0-15.501-00. В соответствии с данными документами и практическим опытом, накопленным производителями СИ ПКЭ в последние годы, и определяются требования к используемым измерительным приборам в отечественной электроэнергетике.

Современные СИ ПКЭ позволяют обеспечить высокие метрологические характеристики, что обусловлено их реализацией с помощью современной

элементной базы и комплектующих, средствами программирования, которые определяют, прежде всего, диапазоны измерений и погрешности прибора.

В табл. 2 приведены метрологические характеристики некоторых отечественных СИ ПКЭ.

В 2008 г. Международной электротехнической комиссией (МЭК) опубликованы два основополагающих документа, действующих в области КЭ:

— МЭК 61000-4-30:2008. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии;  
 — МЭК 61000-4-7:2002. Изменение 1 (2008). Электромагнитная совместимость (ЭМС). Методы испытаний и измерений. Общее руководство по из-

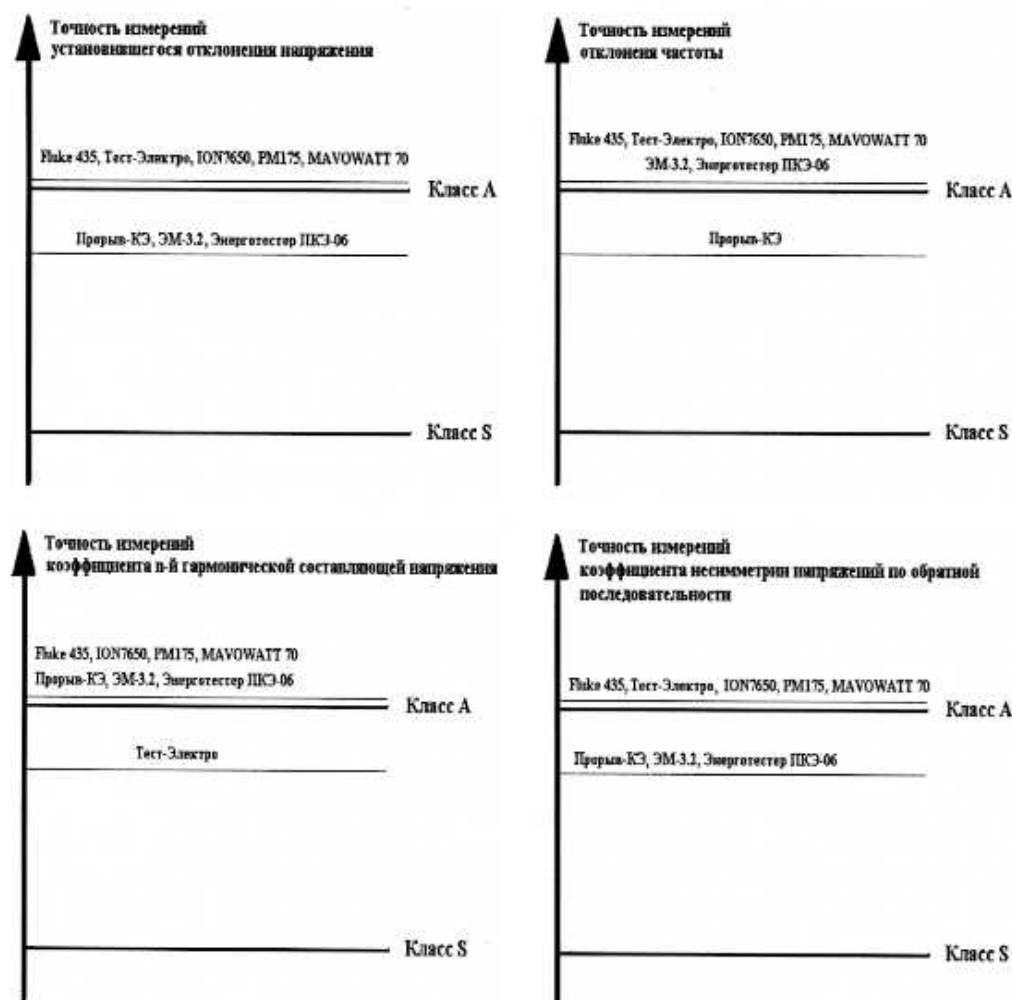


Рис. 1. Сопоставление характеристик современных СИ ПКЭ требованиям к точности измерений, установленных в ГОСТ Р 51317.4.30-2008

мерениям гармоник и интергармоник и измерительным приборам для систем энергоснабжения и подключаемого к ним оборудования.

На их основе были разработаны и в настоящее время издаются национальные стандарты ГОСТ Р 51317.4.30-2008 и ГОСТ Р 51317.4.7-2008, которые будут действовать вместо существующего ГОСТ 13109-97.

В новых стандартах процесс измерения ПКЭ характеризуется двумя классами А (повышенного типа) и S (для наблюдений), для которых установлены методы измерений ПКЭ и требования к характеристикам СИ ПКЭ [5, 6].

Класс А предназначен для проведения точных измерений характеристик КЭ, например, для проверки соответствия КЭ требованиям стандартов.

Класс S предназначен для наблюдения в оперативных целях за уровнями ПКЭ (мониторинг ПКЭ), предварительной диагностики и для других измерений, когда высокой точности не требуется.

В стандарте приводятся диапазоны измерения ПКЭ отдельно для СИ ПКЭ класса А и класса S, требования к точности измерения по классу S существенно ниже.

Введение нового стандарта потребует пересмотра состава и характеристик ПКЭ, измеряемых в соответствии с ГОСТ 13109-97. В частности, это касается отклонения напряжения от номинального значения и показателей синусоидальности напряжения в электрических сетях, измерение и определение которых в

ГОСТ Р 51317.4.30-2008 принципиально отличаются от используемого в настоящее время ГОСТ 13109-97. Кроме того, в ГОСТ Р 51317.4.30-2008 установлен ряд ПКЭ, отсутствующих в ГОСТ 13109-97, например, связанные с интергармоническими составляющими напряжения, прерываниями напряжения и др.

Введение ГОСТ Р 51317.4.30-2008 изменяет требования к длительности основного интервала времени измерений ПКЭ, объединению результатов измерений по времени, неопределенности измерения текущего времени. Новым и весьма важным является требование о маркировании результатов измерений показателей КЭ [7]. Анализ реализации данных требований в современных СИ ПКЭ представлены в табл. 3.

В качестве основного интервала времени измерительного окна в системах электроснабжения 50 Гц должен приниматься интервал длительностью 10 периодов (приблизительно 0,2 с), пропуски между интервалами измерения не допускаются. Данным требованиям ранее разработанные отечественные СИ ПКЭ не удовлетворяют.

Результаты измерений на основных интервалах времени объединяются для получения значений ПКЭ для трех объединенных интервалов: 3 с, 10 мин, 2 ч.

Именно к 10-минутным интервалам объединения установлены нормы КЭ в международных стандартах, что существенно отличается от используемого интервала объединения равного одной минуте в ГОСТ 13109-97.

В целом представляет большой интерес приведенное в табл. 4 сопоставление требований к точности измерений, установленных в ГОСТ Р 51317.4.30-2008 и ГОСТ Р 51317.4.7-2008, с характеристиками отечественных СИ ПКЭ, соответствующих требованиям ГОСТ 13109-97.

Результаты сопоставления по ряду ПКЭ, представленные на рис. 1, показывают, что метрологические характеристики отечественных СИ ПКЭ превышают требования к точности измерений для класса измерения  $S$ , но не обеспечивают требуемой точности по некоторым ПКЭ для класса измерения  $A$ , что делает невозможным их применение для сертификации качества электроэнергии. Следовательно, отечественным производителям СИ ПКЭ будет необходимо совершенствовать их конструкцию и программное обеспечение, в противном случае придется использовать зарубежные измерительные приборы.

Кроме того, появится потребность в недорогих анализаторах качества электроэнергии по классу измерения  $S$ , применение которых позволит создавать простую и дешевую систему мониторинга качества электроэнергии в электрических сетях.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Госкомитет по стандартам, 1999. — 33 с.
2. Суднова, В.В. Качество электрической энергии / В.В. Суднова. — М.: ЗАО «Энергосервис», 2000. — 80 с.

3. Карташев, И.И. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов // под ред. Ю.В. Шарова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. — 320 с.

4. Карташев, И.И. Приборы для контроля и анализа качества электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов // Мир измерений. — 2002. — № 5–6. — С. 4–10.

5. МЭК 61000-4-30:2008. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4–30. Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии, 2008 — 40 с.

6. МЭК 61000-4-7:2008. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4–7. Методы испытаний и измерений. Общее руководство по измерениям гармоник и интергармоник и измерительным приборам для систем энергоснабжения и подключаемого к ним оборудования, 2008 — 42 с.

7. Балаков, Ю. Н. Значение новых стандартов ГОСТ Р 51317.4.30–2008 (МЭК 61000-4-30:2008) и ГОСТ Р 51317.4.7–2008 (МЭК 61000-4-7:2002) для работ по оценке и мониторингу качества электрической энергии / Ю.Н. Балаков // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2009. — №4. — С. 10–14.

**САФОНОВ Дмитрий Геннадьевич**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: e-mail: SafonovDG@mail.ru

**ТУРАХАНОВ Кайрат Хаирболович**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: e-mail: kairatkhan@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.11.2009 г.

© Д. Г. Сафонов, К. Х. Тураханов

УДК 621.3.018.78

**С. Н. ЧИЖМА  
В. С. ЦИРКИН**

Омский государственный  
университет путей сообщения

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Данная статья посвящена вопросам анализа нестационарных электрических сигналов. Рассмотрены основные типы искажений, возникающие в электрических сетях. В качестве математического аппарата представлено дискретное вейвлет-преобразование. Произведен анализ сигналов с различными типами искажений.

**Ключевые слова:** качество вейвлет, дискретное вейвлет-преобразование, искажение сигнала.

В последние годы изучение качества электрической энергии является одной из наиболее важных тем в энергетике. Низкое качество электроэнергии приводит к нарушениям работоспособности и сокращению времени службы оборудования. Для того чтобы своевременно устранить неисправности, необходимо точно определить вид искажения качества электроэнергии и тип события, произошедшего в сети. Важность темы повышения качества электроэнергии является актуальной и на железнодорожном транспорте, который в целом представляет собой сложный электротехнический комплекс. Электри-

ческие процессы, происходящие в системах электроснабжения железных дорог, в большинстве случаев являются нестационарными и вызваны работой элементов железнодорожного комплекса, а также случайными явлениями, связанными с эксплуатацией электроподвижного состава. Наличие факторов, снижающих эффективность и качество функционирования всех звеньев сложного электротехнического комплекса (отклонение токов и напряжений от номинальных значений, резкие изменения тока нагрузки, импульсы перенапряжений, возникающие при коммутационных процессах в питающей сети и силовых



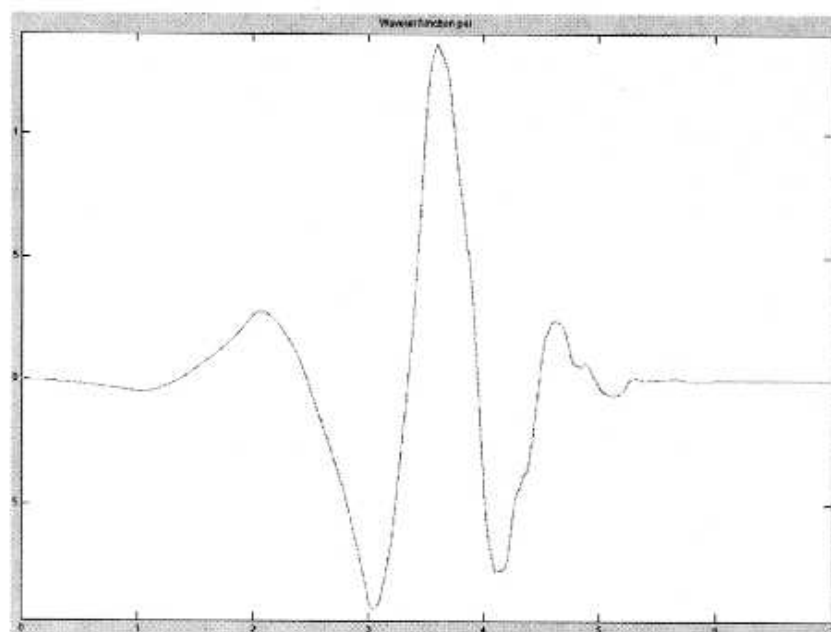


Рис. 1. Материнский вейвлет Добеши 4-го уровня (db4)

цепях электроподвижного состава и др.), требует разработки новых методов исследования и классификации искажений [1].

В настоящее время одним из наиболее распространенных математических аппаратов для выполнения задач мониторинга искажений, происходящих в электрических сетях, является быстрое преобразование Фурье (БПФ). Однако данный подход является неэффективным, когда речь идет о нестационарных сигналах, спектр которых меняется с течением времени. Для проведения спектрального анализа нестационарных сигналов может быть применено вейвлет-преобразование.

Вейвлет-преобразование переводит сигнал в частотно-временную область и производит обработку сигнала на различных частотах и при различном разрешении одновременно [2]. В отличие от преобразования Фурье, которое представляет сигнал в целом, вейвлет-преобразование дает локальное представление о сигнале (во временной и частотных областях).

Основным инструментом для анализа сигналов является дискретное вейвлет-преобразование (ДВП), которое обеспечивает достаточно информации для анализа сигнала, являясь вместе с тем экономным как по числу операций, так и по требуемым вычислительным ресурсам [3]. ДВП является аналогом непрерывного вейвлет-преобразования (НВП). НВП исследуемого сигнала  $x(t)$ :

$$CWT_{\psi} x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt, \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0, \quad (1)$$

где

$$\psi_{a,b}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right). \quad (2)$$

$\psi_{a,b}^*(t)$  — масштабирующая, двухпараметрическая функция, материнский вейвлет (\* — комплексное сопряжение).

Параметр  $a$  определяет масштаб вейвлета, малые значения параметра  $a$  соответствуют высоким частотам или очень мелкому масштабу  $\psi_{a,b}^*(t)$ ; большие значения параметра  $a$  соответствуют малым частотам

или большому масштабу  $\psi_{a,b}^*(t)$ . Параметр  $b$  задает положение центра временной локализации вейвлета и называется сдвигом. ДВП дискретного сигнала  $x$  представляется в виде:

$$DWT_{\psi} x(m, n) = \sum_k x_k \psi_{m,n}^*(k), \quad (3)$$

где

$$\psi_{m,n}^*(k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi^* \left( \frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right). \quad (4)$$

Оба параметра: масштабирующий и сдвига являются функциями параметра  $m$ , где  $m$  — это масштабирующее число, а  $n$  — число дискретизации,  $m=0, 1, 2, \dots$ .

В качестве материнского вейвлета будем использовать вейвлет Добеши четвертого уровня [4], представленный на рис. 1.

На практике для расчета значений коэффициентов вейвлет-преобразования используется алгоритм, суть которого заключается в последовательной двухполосной фильтрации входного сигнала при помощи каскадно-соединенных блоков фильтров низкой (Н) и высокой (Г) частот (рис. 2) [5]. В результате фильтрации сигнал представляется в виде совокупности последовательных приближений грубой (аппроксимирующей)  $A_m(t)$  и уточненной (детализирующей)  $D_m(t)$  составляющих:

$$S(t) = A_m(t) + \sum_{j=1}^m D_j(t). \quad (5)$$

Исходя из понятия качества электрической энергии, искажение сигнала — это временное отклонение значений сигнала от установившегося состояния, которое вызвано внезапными изменениями, ошибками небольшой длительности.

В качестве возможных типов искажений, которые необходимо определить выделены следующие: падение/нарастание напряжения, прерывание сигнала, гармонические искажения, мгновенные всплески. Также необходимо добавить к представленному выше перечню чистый синусоидальный сигнал, от-

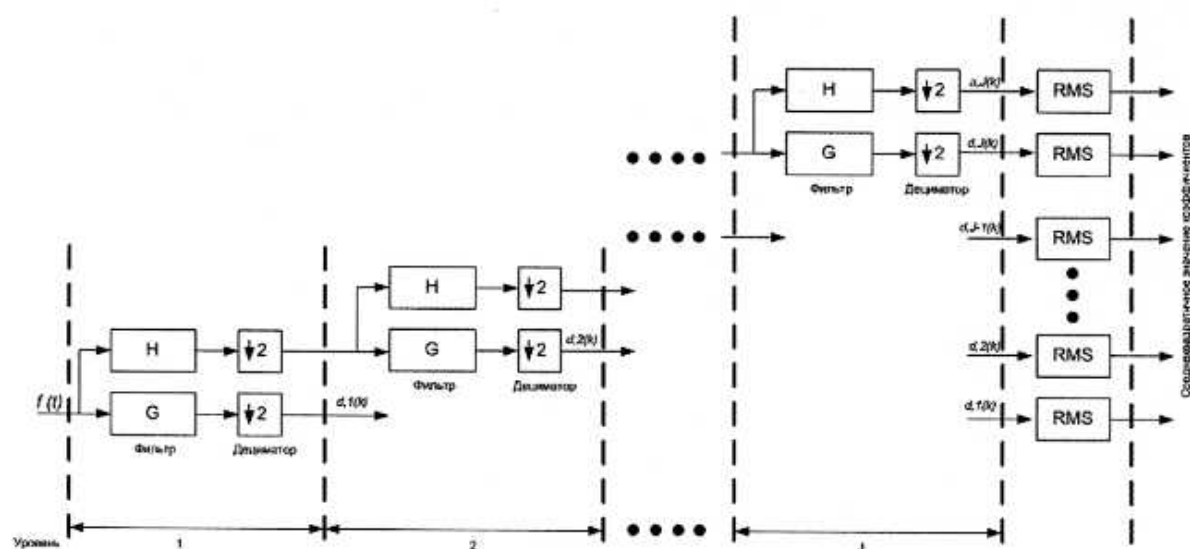


Рис. 2. Алгоритм быстрого вейвлет-преобразования (БПФ)

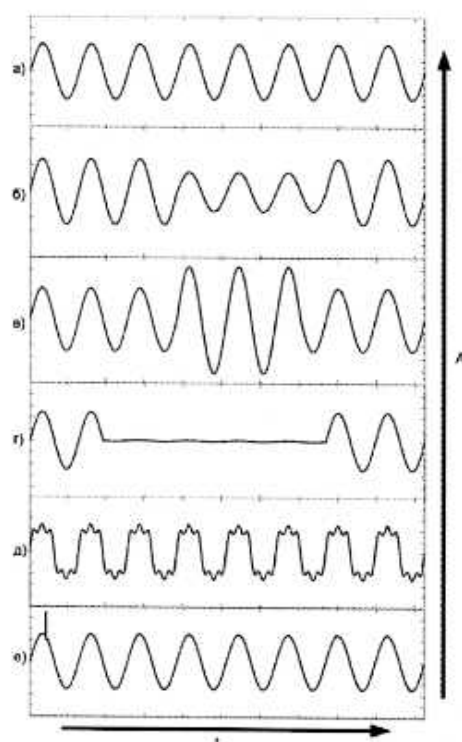


Рис. 3. а) нормальный сигнал; б) падение напряжения; в) нарастание напряжения; г) прерывание; д) гармонические искажения; е) мгновенный всплеск

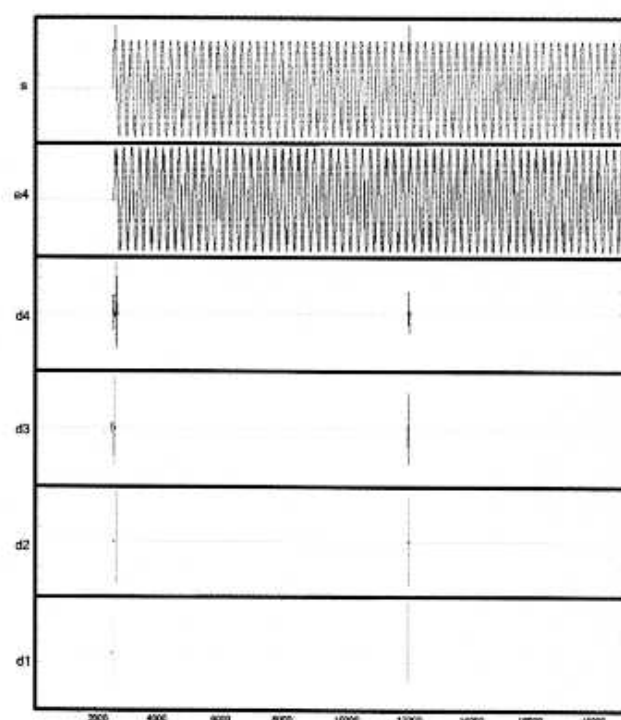


Рис. 4. Вейвлет-анализ сигнала с мгновенными всплесками (s – сигнал, a – аппроксимирующие коэффициенты, d – детализирующие коэффициенты)

клонения от которого рассматривается в качестве искажений. Используя пакет моделирования MATLAB, были сгенерированы перечисленные выше сигналы, получены их графики, которые представлены на рис. 3, аналитические выражения приведены в табл. 1.

В качестве основного математического аппарата для анализа искажений сигналов в статье используется дискретное вейвлет-преобразование, рассмотренное выше. Разложение сигнала на аппроксимацию и детализацию дает возможность извлечь важную информацию о сигнале на различных уровнях [6].

Анализ сигнала с мгновенными всплесками приведен на рис. 4. Для того чтобы зафиксировать и локализовать любое искажение в сигнале достаточно произвести декомпозицию сигнала на первом уровне d1,

где несколько коэффициентов имеют высокие значения, а остальные равны нулю. Более высокие уровни детализации d2 – d4 предназначены для того, чтобы получить дополнительные сведения об особенностях сигнала, которые помогут классифицировать искажение.

Коэффициенты вейвлет-преобразования с высокими значениями показывают наличие искажения сигнала и точное место его возникновения. Остальная часть декомпозированного на первом уровне сигнала не изменяется и означает, что амплитуда и частота исходного сигнала постоянны, шум отсутствует. Таким образом, уровень d1 показывает точное местоположение искажения. Уровень аппроксимации a4 показывает форму сигнала.

Сигнал / искажение	Модель	Параметры
Нормальный сигнал	$x(t) = \sin(\omega t)$	$\omega = 2\pi 50$
Нарастание	$x(t) = A(1 + \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2)))\sin(\omega t)$ $t_1 < t_2, u(t) = \begin{cases} 1, t \geq 0 \\ 0, t < 0 \end{cases}$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Падение	$x(t) = A(1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2)))\sin(\omega t)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Прерывание	$x(t) = A(1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2)))\sin(\omega t)$	$0.9 \leq \alpha \leq 1$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Гармонические искажения	$x(t) = A(\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t))$	Гармоники: 3, 5 $0 \leq \alpha_3, \alpha_5 \leq 0.9$

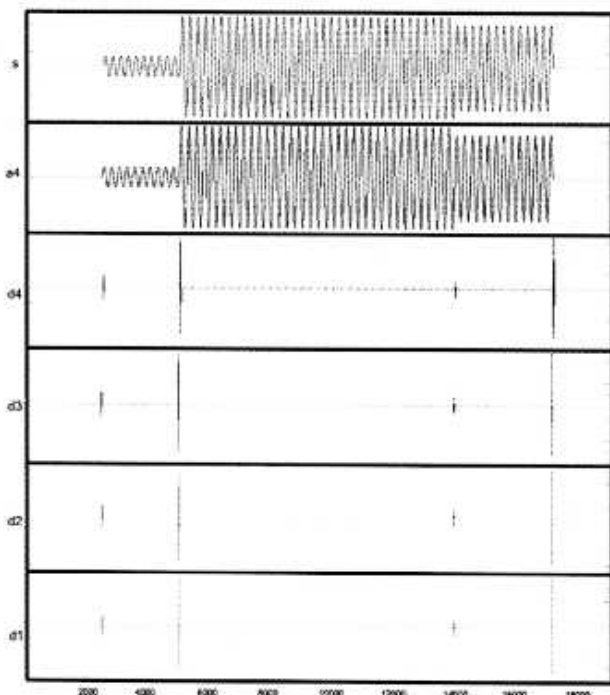


Рис. 5. Вейвлет-анализ сигнала с падением напряжения (s – сигнал, a – аппроксимирующие коэффициенты, d – детализирующие коэффициенты)

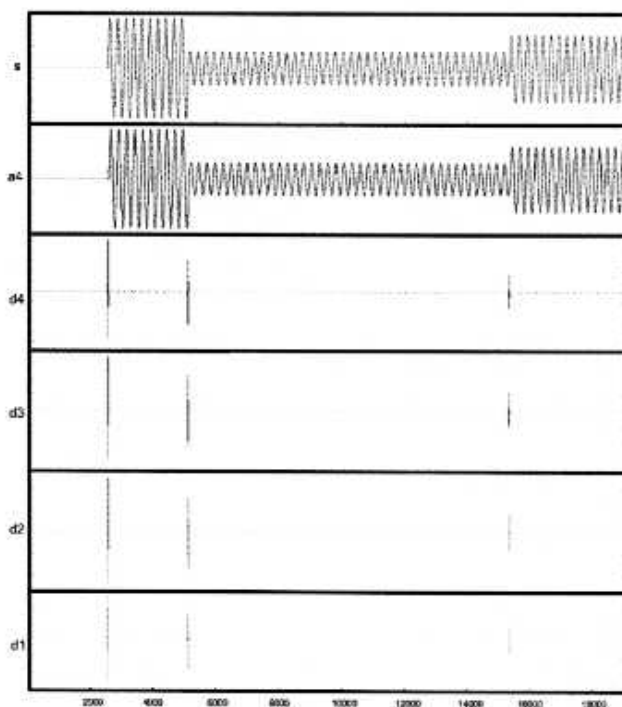


Рис. 6. Вейвлет-анализ сигнала с падением/нарастанием напряжения (s – сигнал, a – аппроксимирующие коэффициенты, d – детализирующие коэффициенты)

На рис. 5 представлена декомпозиция сигнала с падением напряжения. Коэффициенты, представленные на первом уровне детализации четко указывают на время возникновения искажения. Амплитуда коэффициентов детализации показывает характер искажений. Например, рассмотрим изменение коэффициентов детализации на отсчете времени 2500. От 0 до 2500 наблюдается провал напряжения, следовательно, коэффициенты близки к нулю. На отсчете 2500 амплитуда изменяется незначительно, поэтому коэффициент детализации тоже относительно мал. По своей природе сигнал изменился незначительно, являясь до 2500 – прерыванием напряжения, а после – падением относительно нормального уровня. На отсчете 5000 наблюдается увеличение амплитуды коэффициента, что свидетельствует о резком увеличении амплитуды сигнала. После 5000 напряжение достигает своего нормального значения. На 14000 наблюдается слабое падение напряжения относительно его нор-

мального уровня, что приводит к тому, что наблюдается появление коэффициента детализации малой амплитуды. На 17500 напряжение исходного сигнала резко падает до нуля, что обуславливает наличие значительного по величине коэффициента детализации.

На рис. 6 представлена декомпозиция сигнала с падением/нарастанием напряжения, показаны уровни детализации, из которых можно определить искажения, происходящие с сигналом.

С целью построения автоматической системы по определению конкретного типа искажения необходимо использование классификатора. Так как большинство классификаторов имеют низкую производительность, то предлагается использовать нейронную сеть, которая позволяет работать с неопределенной, избыточной, искаженной информацией, а также обладает высоким быстродействием. В качестве входных величин возможно использование статистически обработанных коэффициентов детализа-

ции и аппроксимации, а в качестве выходных — исследуемые искажения.

Таким образом, большинство протекающих сигналов являются нестационарными в силу ряда причин, поэтому выбор дискретного вейвлет-преобразования в качестве основного математического аппарата для анализа искажений происходящими с такими сигналами является обоснованным и эффективным. Применение быстрого вейвлет-преобразования позволяет определить время возникновения искажения и его тип.

#### Библиографический список

1. Филипп, В.Б. Вейвлет-анализ как метод оценки нестационарных процессов в электротранспортном комплексе / В.Б. Филипп, Н.И. Щуров // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — Новосибирск : НГАСУ, 2008. — №1. — С. 267 — 270.
2. Яковлев, А.Н. Введение в вейвлет-преобразования : учеб. пособие. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. — 104 с.

3. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. — Москва : ДМК Пресс, 2005. — 304 с.

4. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши ; под ред. А.П. Петухова ; пер. с англ. Е.В. Мищенко. — Ижевск : НИЦ РХД, 2001. — 464 с.

5. Дворников, С.В. Метод распознавания радиосигналов на основе вейвлет-пакетов / С.В. Дворников, А.М. Сауков // Научное приборостроение. — 2004, Т. 14. — №1. — С. 58 — 65.

6. Detection of Power Quality Disturbances using Wavelet Transform // World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009, №49. — P. 869 — 873.

**ЧИЖМА Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика и системы управления».

**ЦИРКИН Виталий Степанович**, аспирант кафедры «Автоматика и системы управления».

Адрес для переписки: e-mail: tsirkinvs@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.12.2009 г.

© С. Н. Чижма, В. С. Циркин

УДК 621.3.083.92

**С. Н. ЧИЖМА  
И. Ю. МАЦКО**

Омский государственный  
университет путей сообщения

## КОНТРОЛЬ ШЕСТИ- И ДВЕНАДЦАТИПУЛЬСОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНО- ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА

В работе рассматривается использование спектрально-временного анализа для диагностики работы систем электроснабжения железных дорог постоянного тока.

**Ключевые слова:** спектрально-временной анализ, контроль работы систем электроснабжения постоянного тока, трехфазный выпрямитель.

В настоящее время проявляется всё больший интерес к разработке и внедрению средств технической диагностики электрических комплексов на тяговых подстанциях постоянного тока железнодорожного транспорта. Применение диагностических устройств позволяет производить мониторинг и диагностику оборудования и переходить с обслуживания и ремонта оборудования по регламенту на ремонт и обслуживание по техническому состоянию, что повысит экономическую эффективность его использования [1].

Выпрямительные устройства систем электроснабжения постоянного тока могут иметь различные неисправности, среди которых выделяются короткие замыкания и обрывы выпрямительных плеч. Совместный анализ спектрального состава входных и выходных сигналов выпрямительных установок может позволить определить тип неисправности, а анализ временной диаграммы выходного сигнала позволит определить неисправное выпрямительное плечо [2].

В программном продукте Matlab 7.0 были построены две модели системы электроснабжения постоянного тока электрифицированных железных дорог. В моделях используется шестипульсовая и двенадцатипульсовая выпрямительные установки, выполненные по схеме Ларионова.

При помощи данных моделей были получены сигналы при нормальном режиме работы выпрямительных установок и двух режимах аномальной работы: — обрыв на одном плече моста выпрямления; — короткое замыкание на одном плече моста выпрямления.

С каждым из трех режимов работы выпрямительных установок смоделированы ситуации, когда входной сигнал имеет следующие особенности:

- нормальный входной сигнал без искажений;
- несимметрия входного сигнала в 5, 10, 15 %;
- несинусоидальность входного сигнала в 5, 10, 15 %;
- несимметрия и несинусоидальность входного сигнала в 5, 10, 15 %.



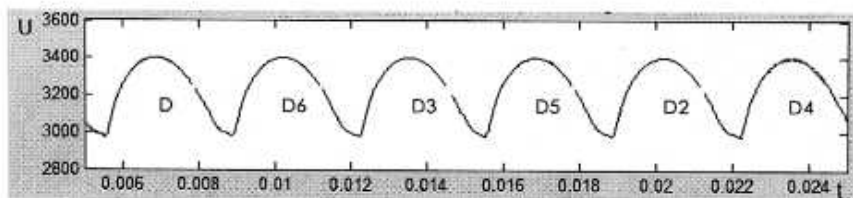


Рис. 1. Временные диаграммы выходного напряжения трехфазного шестипульсового выпрямителя

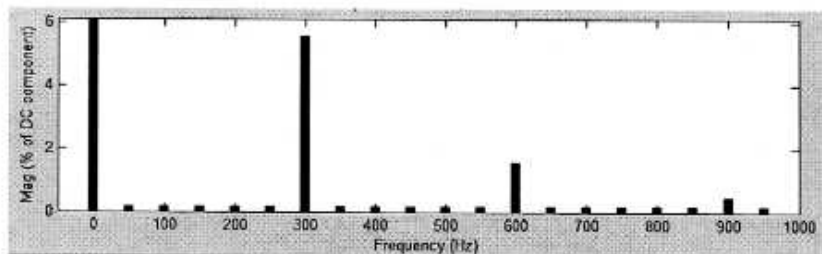


Рис. 2. Спектральная характеристика выходного напряжения при нормальном режиме работы шестипульсового выпрямителя

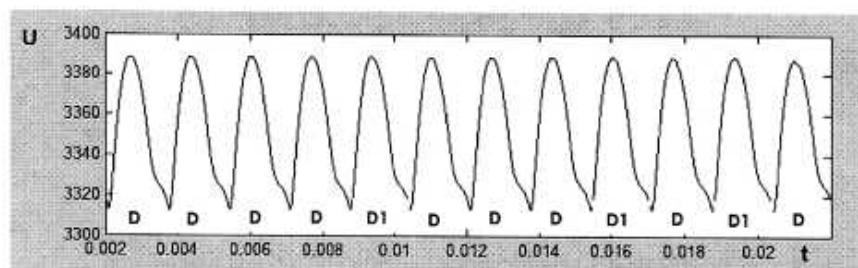


Рис. 3. Временные диаграммы выходного напряжения трехфазного двенадцатипульсового выпрямителя

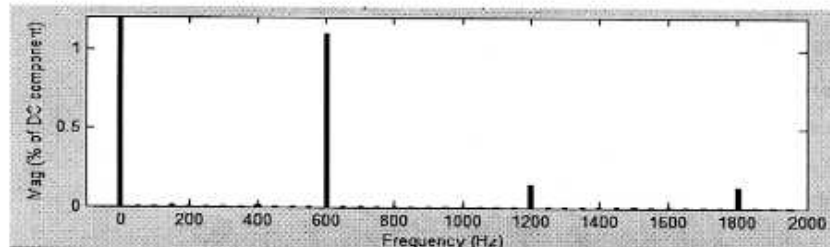


Рис. 4. Спектральная характеристика выходного напряжения при нормальном режиме работы двенадцатипульсового выпрямителя

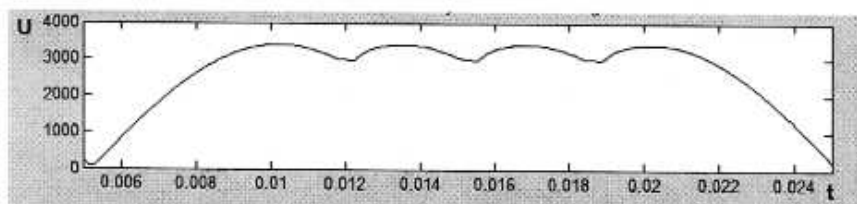


Рис. 5. Временная диаграмма выходного напряжения при обрыве одного из диодов в шестипульсовом выпрямителе

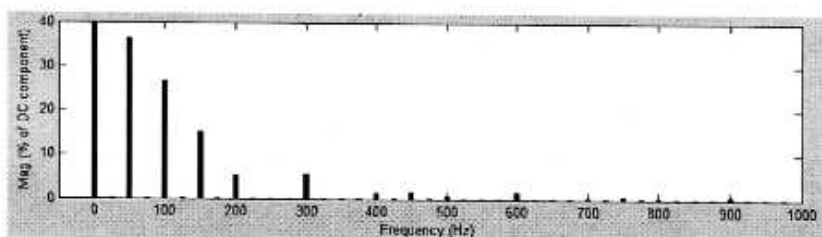


Рис. 6. Спектральная характеристика выходного напряжения при обрыве одного из диодов в шестипульсовом выпрямителе

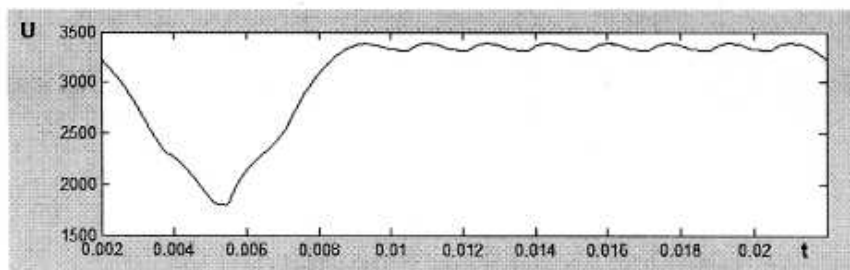


Рис. 7. Временная диаграмма выходного напряжения при обрыве одного из диодов в двенадцатипульсовом выпрямителе

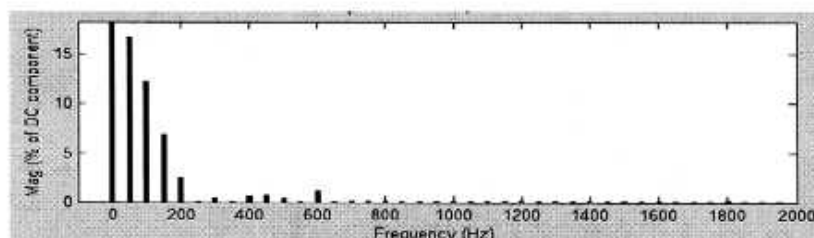


Рис. 8. Спектральная характеристика выходного напряжения при обрыве одного из диодов в двенадцатипульсовом выпрямителе

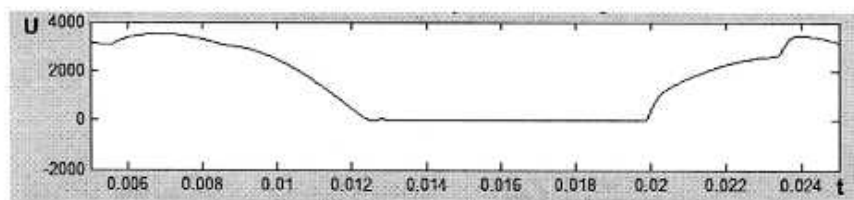


Рис. 9. Временная диаграмма выходного напряжения при коротком замыкании одного из диодов шестипульсового выпрямителя

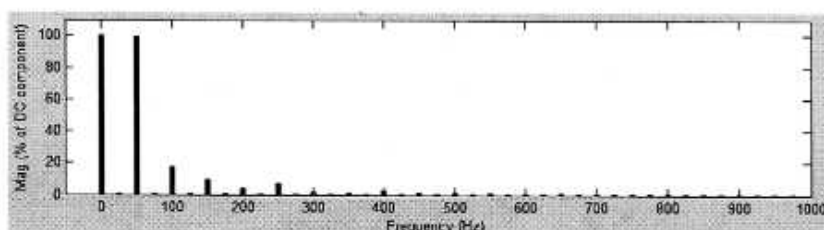


Рис. 10. Спектральная характеристика выходного напряжения при коротком замыкании одного из диодов шестипульсового выпрямителя

Таким образом, было проведено моделирование 48 режимов работы системы электроснабжения постоянного тока электрифицированных железных дорог для схемы с шестипульсовой и двенадцатипульсовой выпрямительными установками.

Далее представлены спектры и временные диаграммы сигнала при условии, что входной сигнал без искажений, а выпрямительные установки работают в трех режимах, представленных выше.

При нормальном режиме работы трехфазного выпрямителя временная диаграмма и спектральные характеристики выходного напряжения имеют вид, представленный на рис. 1 и 2 для шестипульсового выпрямителя и на рис. 3 и 4 — для двенадцатипульсового.

При возникновении обрыва одного из диодов трехфазного выпрямителя происходит искажение кривой выходного напряжения и спектральной характеристики, которые будут иметь вид, изображенный на рис. 5 и 6 для шестипульсового выпрямителя и на рис. 7 и 8 — для двенадцатипульсового выпрямителя [3].

Как видно из рис. 6 и 8, спектральный состав выходного напряжения изменяется таким образом, что появляются 1, 2, 3 и 4 гармоники. Задав уровень значимости, определяемый экспериментальным путем, можно определить наличие дефекта диода типа «обрыв». Сравнивая временные диаграммы входных и выходных напряжений и определяя положение провала выходного напряжения относительно кривых фазных входных напряжений, можно определить неисправный диод.

При возникновении короткого замыкания одного из диодов трехфазного выпрямителя происходит искажение кривой выходного напряжения и спектральной характеристики, которые будут иметь вид, представленный на рис. 9 и 10 для шестипульсового выпрямителя и на рис. 11 и 12 — для двенадцатипульсового выпрямителя.

Как видно из рис. 10, спектральный состав выходного напряжения изменяется таким образом, что появляются 1, 2, 3 и 4 гармоники, на рис. 12 также видны изменения спектрального состава, появились 1 и 3 гармоники. Задав уровень значимости, определяемый

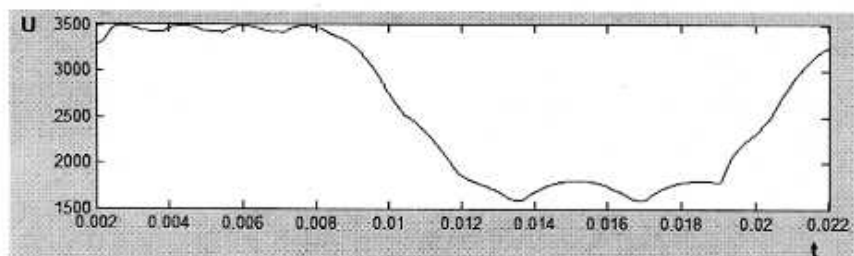


Рис. 11. Временная диаграмма выходного напряжения при коротком замыкании одного из диодов двенадцатипульсового выпрямителя

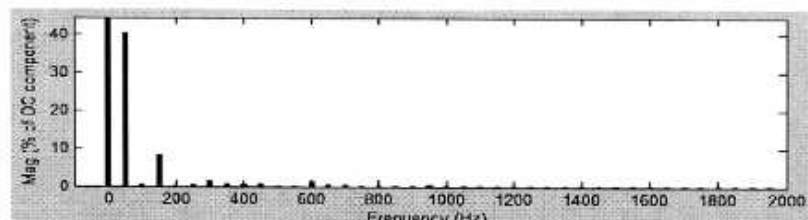


Рис. 12. Спектральная характеристика выходного напряжения при коротком замыкании одного из диодов двенадцатипульсового выпрямителя

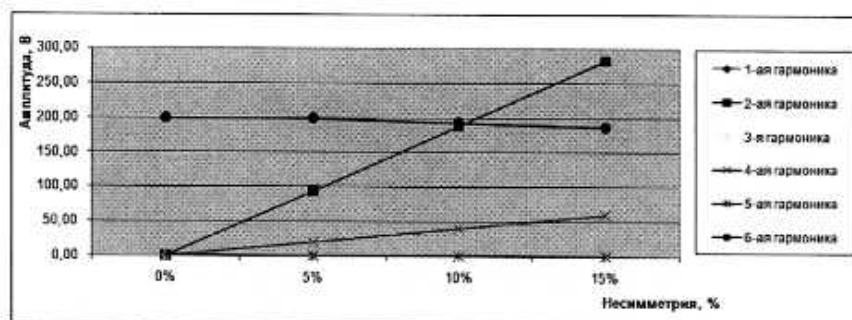


Рис. 13. Зависимость амплитуд гармоник спектрального состава выходного напряжения от процента несимметрии входного сигнала при нормальном режиме работы шестипульсовой выпрямительной установки

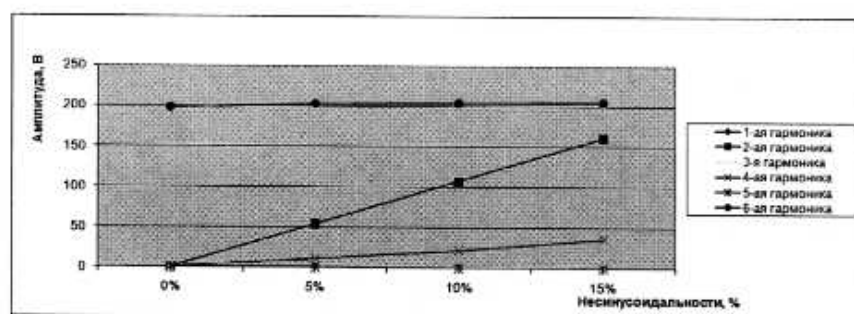


Рис. 14. Зависимость амплитуд гармоник спектрального состава выходного напряжения от процента несинусоидальности входного сигнала при нормальном режиме работы шестипульсовой выпрямительной установки

экспериментальным путем, можно определить наличие дефекта диода типа «короткое замыкание». Сравнивая временные диаграммы входных и выходного напряжений, и определяя положение провала выходного напряжения относительно кривых фазных входных напряжений, можно определить неисправный диод.

При анализе данных спектральных составов выходного напряжения видно, что при возникновении аномальных режимов работы выпрямительной установки наиболее сильно изменяются гармоники с 1 по 6.

Поэтому данные гармоники будут участвовать в дальнейшем анализе.

Такие искажения входного сигнала как несимметрия и несинусоидальность также влияют на спектральный состав выходного напряжения. Из проделанных опытов были построены зависимости влияния явлений несимметрии и несинусоидальности входного напряжения на спектральный состав выходного напряжения.

На рис. 13 представлена зависимость амплитуд гармоник спектрального состава выходного напряжения

от процента несимметрии входного сигнала при нормальном режиме работы выпрямительной установки.

Из данной диаграммы видно, что с увеличением процента несимметрии входного сигнала увеличивается амплитуда 2-й и 4-й гармоник.

На рис. 14 представлена зависимость амплитуд гармоник спектрального состава выходного напряжения от процента несинусоидальности входного сигнала при нормальном режиме работы выпрямительной установки. На данной диаграмме, так же как и на предыдущей, амплитуды 2-й и 4-й гармоник увеличиваются с увеличением процента несинусоидальности входного сигнала. Изменения амплитуд остальных гармоник минимальны.

Характер зависимостей амплитуд гармоник спектрального состава выходного напряжения от процента несинусоидальности и несимметрии входного сигнала при нормальном режиме работы двенадцатипульсовой выпрямительной установки аналогичен шестипульсовой.

Применение в выпрямителях сглаживающих фильтров уменьшает величину провалов выходного напряжения при неисправностях типа «обрыв» и «короткое замыкание» выпрямительных плеч. На моделях выпрямителей были проведены эксперименты, в которых на выход подключался сглаживающий LC-фильтр, имеющий максимальные используемые значения емкости и индуктивности. Эксперименты показали, что сглаживающий фильтр не влияет на результат диагностики выпрямительной установки [4].

Таким образом, результаты экспериментов показали:

1. Применение описанного метода обеспечивает диагностирование неисправности в шести- и двенад-

цатипульсовых выпрямителях и определение типа неисправности.

2. Совместное использование спектрального анализа выходного сигнала и временного анализа входного сигнала дает возможность определить неисправное плечо в выпрямительном агрегате.

3. Предложенный метод позволяет определить неисправности независимо от искажений входного сигнала.

#### Библиографический список

1. Чижма С.Н., Мацько И.Ю. Устройство диагностики трехфазных выпрямителей. Пат. РФ на полезную модель № 88161 от 27.10.2009.
2. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций: производственно-практическое издание / ред. М. Г. Шалимов. — М.: Транспорт, 1990. — 127 с.
3. Бадер, М.П. Электромагнитная совместимость / М.П. Бадер: учебник для вузов железнодорожного транспорта. — М.: УМК МПС, 2002.
4. Ковалева, Г.В. Сглаживающие фильтры тяговых подстанций постоянного тока / Г.В. Ковалева, М.Г. Шалимов: учеб. пособие. — Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 1999. — 53 с.

**ЧИЖМА Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика и системы управления».

Адрес для переписки: e-mail: gazizovri@mail.ru

**МАЦЬКО Илья Юрьевич**, аспирант кафедры «Автоматика и системы управления».

Адрес для переписки: e-mail: llua\_m@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.12.2009 г.

© С. Н. Чижма, И. Ю. Мацько

## Книжная полка

**Лобов, Д. Г. Источники питания [Текст]: конспект лекций / Д. Г. Лобов; ОмГТУ. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. — 67 с.: рис., табл. — Библиогр.: с. 66.**

Настоящий конспект лекций разработан в соответствии с требованиями образовательного стандарта ОмГТУ. В нем рассматриваются основные принципы работы и схемотехника линейных и импульсных источников вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры.

**Эрнст, А. Д. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения [Текст]: курс лекций / А. Д. Эрнст; ОмГТУ. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. — 143 с.: рис., табл. — Библиогр.: с. 142–143. — ISBN 978-5-8149-0781-3.**

Изложены основные положения теории и практики расчетов электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах. Рассмотрены вопросы составления и преобразования схем замещения и применения практических методов расчета симметричных и несимметричных коротких замыканий в курсе «Переходные процессы в электроэнергетических системах».

**Шкаев, А. Г. Твердотельная электроника [Текст]: конспект лекций / А. Г. Шкаев; ОмГТУ. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. — 56 с.: рис. — Библиогр.: с. 55–56.**

В краткой форме рассматриваются основные типы полупроводниковых приборов и физические процессы, обеспечивающие их работу. Приводится анализ электронных процессов в объеме полупроводников, в электронно-дырочных переходах и в области пространственного заряда на поверхности полупроводников. Приводится краткий обзор современных методов их структурной реализации в интегральных схемах.



## СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ ПРИ ВНЕДРЕНИИ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ СИТУАЦИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПЕРЕЕЗДЕ

В статье описана система автоматизированного контроля занятости переезда, основанная на видеонаблюдении контролируемого участка. Предлагаемая система позволяет управлять скоростью движения поезда в районе железнодорожного переезда, что приводит к снижению удельного расхода электрической энергии на тягу поездов. Для оценки расхода электрической энергии при различных скоростных режимах прохождения электроподвижного состава было выполнено имитационное моделирование участка одной межподстанционной зоны с использованием программного комплекса «КОРТЕС».

**Ключевые слова:** автоматическая система контроля, расход, электроэнергия.

Задача снижения удельного расхода электрической энергии в рамках перевозочного процесса на железнодорожном транспорте является одной из наиболее актуальных в настоящее время [1]. Во многом уровень удельного расхода на тягу поездов обусловлен тем, насколько оптимально реализуется график движения поездов.

Пересечение автомобильных и железных дорог представляет собой опасный участок пути, что обуславливает необходимость снижения скорости электропоезда (притормаживание) при приближении его к железнодорожному переезду. В свою очередь это приводит к росту удельного расхода электрической энергии за счет последующего разгона с целью выполнения графика движения поездов [2]. Следует отметить, что своевременное обнаружение препятствия на переезде также позволяет снизить потребление электроэнергии за счет оптимального режима торможения электроподвижного состава.

Сегодня большое внимание в области железнодорожного транспорта уделяется системам управления движением. Современная система управления строится как единая интегрированная система, составной частью которой является подсистема автоматизированного управления движением. В основу такой системы заложены принципы управления, контроля, регулирования, наблюдения и информирования. В качестве предлагаемого способа контроля занятости железнодорожного переезда рассматривается автоматическая система, основанная на видеонаблюдении исследуемого участка (рис. 1). Система представляет собой технический комплекс, включающий в себя:

- подсистему оповещения о приближении поезда к переезду;
- подсистему видеонаблюдения;
- подсистему определения параметров объекта;
- подсистему анализа ситуации и принятия решения;
- подсистему локомотивных устройств.

Для оценки расхода электрической энергии при различных скоростных режимах прохождения элек-

троподвижного состава было выполнено имитационное моделирование участка одной межподстанционной зоны (рис. 2) с использованием программного комплекса «КОРТЕС». Используемый программный комплекс содержит отдельные программные модули, позволяющие:

- задавать параметры исследуемого участка;
- формировать базу данных локомотивов и типовых составов, задавая их технические характеристики;
- выполнять тяговый расчет и редактировать тяговую нагрузку;
- формировать на основе тяговых расчетов графики движения поездов;
- редактировать схемы питания контактной сети;
- выполнять расчеты режимов нагрузки системы тягового электроснабжения.

Процесс имитационного моделирования системы тягового электроснабжения включает следующие этапы: обработка графика движения поездов; формирование мгновенных схем и определение потоков распределения для каждой схемы; формирование интегральных показателей электропотребления [3].

В ходе моделирования рассмотрены вариант двухпутного участка переменного тока при различных схемах питания (консольная, узловая и двусторонняя). В границах межподстанционной зоны располагается неуправляемый железнодорожный переезд (271 км). Результаты расчета расхода электрической энергии определялись при пропуске по участку грузового поезда массой 3700 т.

В соответствии с инструкцией по эксплуатации железнодорожных переездов максимальная допустимая скорость подвижного состава в границах железнодорожного переезда составляет от 40 до 80 км/ч (в зависимости от расстояния видимости поезда). Таким образом, при выполнении моделирования режимов работы межподстанционной зоны задавались ограничения скорости движения и определялись основные характеристики рабочего режима участка при



Рис. 1. Автоматизированная система контроля занятости железнодорожного переезда

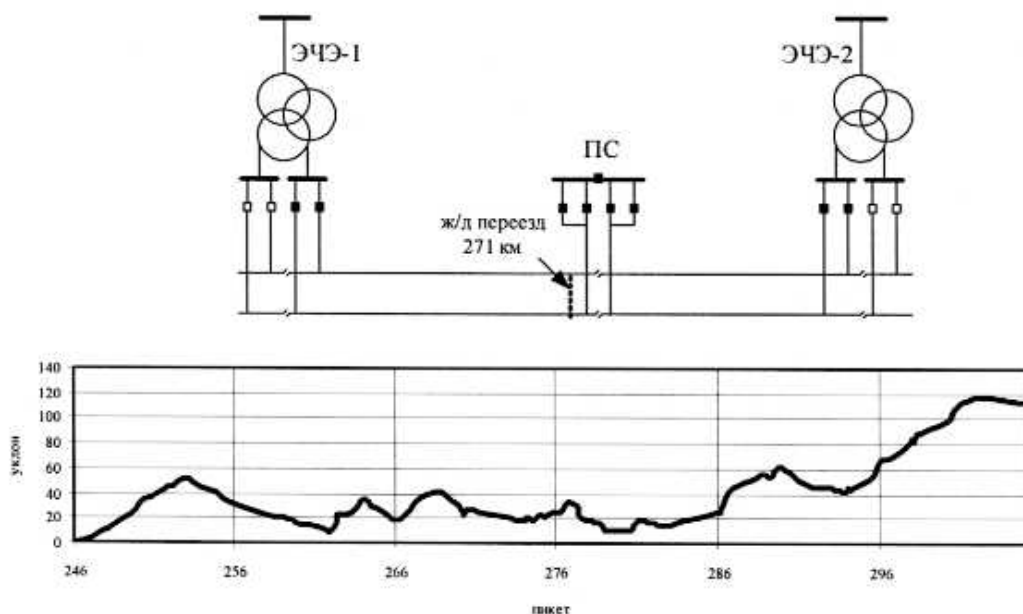


Рис. 2. Схема и профиль пути моделируемого участка



Рис. 3. Динамика изменения расхода электроэнергии в зависимости от ограничения скорости в границах железнодорожного переезда

прохождении грузового поезда. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Анализ полученных данных показывает:

1. Увеличение ограничения по скорости прохождения участка рассматриваемой межподстанционной зоны приводит к росту удельного расхода электрической энергии. Такая тенденция наблюдается вне зависимости от схемы питания контактной сети. Это

обусловлено притормаживанием поезда при приближении к железнодорожному переезду и последующей необходимостью увеличения тяговых усилий. Рост расхода электрической энергии при ограничении скорости в границах железнодорожного переезда до 40 км/ч по сравнению с оптимальным режимом движения поезда составил в среднем 400 кВт·ч или 14 % (рис. 3).

**Значения расхода и потерь электрической энергии по междостанционной зоне  
в зависимости от графика движения поезда и схемы питания контактной сети**

Таблица 1

Моделируемый режим	Схема питания контактной сети	Расход электроэнергии		Потери электроэнергии
		кВт·ч	квар·ч	%
Без ограничения скорости	консольная	2721	2105	4,2
	двухсторонняя	2827	2049	1,5
	узловая	2831	2043	1,3
Ограничение до 80 км/ч	консольная	2803	2176	4,1
	двухсторонняя	2912	2119	1,5
	узловая	2917	2112	1,3
Ограничение до 60 км/ч	консольная	2945	2138	4,4
	двухсторонняя	2956	2179	1,7
	узловая	2962	2172	1,4
Ограничение до 40 км/ч	консольная	3111	2412	4,1
	двухсторонняя	3231	2353	1,7
	узловая	3238	2343	1,4

**Значения расхода и потерь электрической энергии по междостанционной зоне  
в зависимости от режима торможения**

Таблица 2

Моделируемый режим	Схема питания контактной сети	Расход электроэнергии		Потери электроэнергии
		кВт·ч	квар·ч	%
Плавное торможение	консольная	3100	2479	6,2
	двухсторонняя	3257	2383	1,8
	узловая	3265	2373	1,4
Экстренное торможение	консольная	4156	3315	5,9
	двухсторонняя	4353	3199	2
	узловая	4366	3182	1,5

2. При моделировании консольной схемы питания при ограничении скорости до 40 – 60 км/ч наблюдалось снижение напряжения в контактной сети ниже предельно допустимого при последующем разгоне состава. Таким образом, следует отметить, что при соблюдении требований безопасности в соответствии с инструкцией по эксплуатации железнодорожных поездов переход на консольную схему питания невозможен.

На втором этапе моделирования была выполнена оценка расхода электрической энергии в зависимости от условий торможения. При выполнении расчетов принималось, что длина тормозного пути при экстренном торможении составляет в среднем 1,6 км. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Как видно из полученных данных, необходимость экстренного торможения в случае возникновения препятствия на железнодорожном переезде приведет к резкому росту расхода электрической энергии (в среднем на 1084 кВт·ч, или 33 %).

Результаты, полученные на основе моделирования, показали, что внедрение на неуправляемых переездах автоматической системы контроля занятости переезда, позволяющей своевременно определять препятствие, в дополнение к повышению безопас-

ности движения поездов приведет к снижению удельного расхода электрической энергии на тягу поездов. Это достигается за счет увеличения скорости прохождения участка в границах железнодорожного переезда, а также за счет плавного торможения в случае возникновения аварийной ситуации.

#### Библиографический список

1. Энергетическая стратегия железнодорожного транспорта на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года. Распоряжение ОАО «РЖД» № 920 от 01.10.2004 г.
2. Инструкция по эксплуатации железнодорожных поездов МПС России (ЦП/483). – М.: Транспорт, 1997. – 103 с.
3. Комплекс программ для расчетов систем тягового электрооборудования: Общее руководство пользователя. – М.: ВНИИЖТ, 2003. – 12 с.

**АНАНИЕВА Надежда Геннадьевна**, аспирантка кафедры автоматики и систем управления.

Адрес для переписки: e-mail: ananievang@omgups.ru

Статья поступила в редакцию 18.12.2009 г.

© Н. Г. Аняньева

## ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ ОСНОВНОЙ ГАРМОНИКИ СИГНАЛА НАПРЯЖЕНИЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Предложен алгоритм оценки частоты основной гармоники сигнала напряжения систем тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог, основанный на его модели. Он отвечает требованиям стандартов ГОСТ Р 13109-97 и IEC 61000-4-30:2002. Для иллюстрации работы алгоритма и его устойчивости произведено моделирование в пакете Matlab.

**Ключевые слова:** алгоритм, устойчивость, качество, сигнал, частота, оценка.

**Введение.** Частота питающего напряжения сети электроснабжения является основным, критичным параметром качества электроэнергии. Задача ее оценки является на сегодняшний день актуальной, вызывает интерес у поставщиков электроэнергии, потребителей и энергоаудиторских компаний, производителей контрольно-измерительного оборудования [1].

От действующего значения частоты питающего напряжения зависят режимы работы электрооборудования, устройств автоматики и защиты, ход технологических процессов производства и, как следствие, технико-экономические показатели работы промышленных предприятий [2, 3].

Помимо этого, действующее значение частоты питающего напряжения оказывает значительное влияние на процедуры контроля и анализа качества электроэнергии вследствие того, что на нем базируются соответствующие методы и алгоритмы оценки параметров качества. Отклонение частоты основной гармоники ведет к изменению числа целых периодов сигнала, попадающих в окно наблюдения, что, в свою очередь, ведет к возникновению эффекта Гиббса при проведении преобразования Фурье (ПФ). Таким образом, снижается качество гармонического анализа, увеличивается погрешность определения амплитуды и фазы как основной гармоники, так и высших гармонических составляющих.

Существуют различные способы оценки частоты основной гармоники электрического сигнала. Их можно разделить на периодограммные, кореллограммные и основанные на непосредственном счете [4].

Под периодограммными понимаются методы, в которых находится ПФ отсчетов сигнала, и оценка частоты основной гармоники определяется местоположением максимума амплитудного спектра. Кореллограммные методы подразумевают нахождение сначала автокорреляционной функции сигнала (АКФ), ее ПФ и оценку частоты основной гармоники также по расположению максимума амплитудного спектра АКФ. Данные методы характеризуются повышенной вычислительной сложностью и загруженностью — количество необходимых операций сложения и умно-

жения пропорционально величине  $N \cdot \log_2 N$  (и это только для быстрого ПФ), где  $N$  — количество обрабатываемых отсчетов. Точность оценки частоты этих методов прямопропорциональна числу наблюдаемых периодов основной гармоники; (при этом точность кореллограммных методов в два раза выше точности периодограммных при одинаковых окне наблюдения сигнала и частоте дескритизации [4]). Эти методы являются в большей степени универсальными в сравнении с остальными и позволяют определить несущую и оценить ее частоту в широком диапазоне. Структурные схемы периодограммного и кореллограммного методов представлены на рис. 1а и рис. 1б соответственно.

Способы оценки частоты основной гармоники, основанные на непосредственном счете, более узки в своем применении и настроены на определенную частоту или узкий (в сравнении с периодограммными и кореллограммными методами) диапазон частот. Работа этих методов разделена на два основных этапа: фильтрацию и поиск переходов с дальнейшей оценкой. В качестве фильтров входного сигнала применяются цифровые фильтры. Отфильтрованный сигнал с выделенной основной гармоникой или диапазоном частот анализируется на переходы через ползу с последующей оценкой частоты основной гармоники. Применение цифровых фильтров значительно снижает сложность и вычислительную нагруженность способа (в сравнении с периодограммными и кореллограммными методами), однако все так же оставляет его затратным. Точность метода при этом определяется качеством (порядком) фильтра и размером окна наблюдения. Структурная схема метода представлена на рис. 2.

В практических приложениях, а именно при анализе качества электроэнергии в системах электроснабжения, модель исследуемого сигнала заранее известна (частота основной гармоники, амплитудный и фазный спектры, уровень шума, диапазоны изменения параметров), и вопрос применения незатратных, с точки зрения вычислительной сложности и нагруженности, методов стоит достаточно остро.



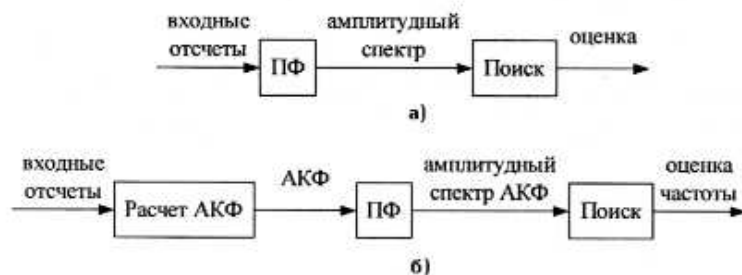


Рис. 1. Структурные схемы методов: а – периодограммных; б – кореллограммных

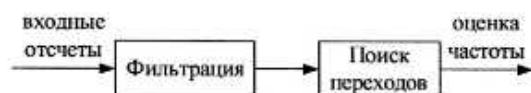


Рис. 2. Структурная схема счетных методов



Рис. 3. Структурная схема алгоритма

**Алгоритм.** В статье предлагается алгоритм оценки частоты сигнала, основанный на прямой работе с его отсчетами — их значениями и порядковыми номерами без каких-либо первичных преобразований. Это делает его конкурентоспособным в сравнении как с классическими (требующими проведение ПФ или расчет АКФ), так и с аналогичными методами оценивания частоты, основанными на счете.

Алгоритм является универсальным в своей формулировке, но узким в частных реализациях. Суть его заключается в контроле переходов отсчетов сигнала через ноль и оценке частоты основной гармоники по этим переходам. Алгоритм настраивается под определенную модель сигнала, с которым он будет работать.

Процесс оценивания частоты состоит из периодически повторяющихся трех основных этапов: ожидание, измерение, пропуск. При поступлении очередного массива отсчетов для обработки начинается этап ожидания — контроль первого перехода через ноль (смена знака двух соседних отсчетов). Как только такой переход обнаружен, окно ожидания закрывается и открывается окно измерения — включается в действие второй этап. Оценка частоты основной гармоники происходит внутри окна измерения фиксированной ширины, измеряемой в отсчетах. Каждый переход через ноль внутри этого окна включается в первое приближение оценки частоты (внутри окна измерения), пройдя через внутренний фильтр первого порядка. После анализа числа отсчетов, равного ширине окна измерения, окно измерения закрывается, и первая оценка частоты поступает на внешний фильтр конечного результата для сглаживания пульсаций первых приближений оценок в пределах отдельных окон измерения. За окном измерения следует окно пропуска — игнорирование определенного числа отсчетов путем увеличения счетчика текущего

анализируемого отсчета на ширину окна пропуска. Далее процесс анализа повторяется в указанном порядке до полного анализа всего массива отсчетов. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 3 (О — ожидание; И — измерение; Ф1 — внутренний фильтр результата окна измерения; Ф2 — внешний фильтр результата; П — пропуск).

Окно пропуска является элементом оптимизации алгоритма. Пропуск определенного количества отсчетов осуществляется на основании модели сигнала и предположении, что в пределах этого окна переходы через ноль либо отсутствуют, либо носят случайный (редкий) характер (обусловленные мощной высокочастотной помехой, переходным процессом, влиянием ВГС и т.п.). Такой подход позволяет не только сократить объем лишних вычислений, но и отбросить «неправильные» переходы с целью исключения негативного их влияния на результат оценивания.

Регулируемыми параметрами алгоритма являются окно измерения и окно пропуска. Их можно подстраивать под конкретную модель сигнала, учитывая ожидаемый уровень шума. Так, для малозашумленных сигналов ширина окна измерения может быть выбрана небольшой и, наоборот, для сильно зашумленных окно измерения следует выбирать большим. В то же время ширина окна пропуска выбирается с учетом того диапазона изменения частоты основной гармоники, который планируется покрывать с помощью алгоритма — увеличение ширины окна пропуска сужает диапазон частот, в пределах которого частота основной гармоники может изменяться и может быть оценена способом. При этом сумма размеров окон измерения и пропуска не должна превышать количество отсчетов на полупериод основной гармоники (формула 1).

$$N_{T/2} > N_H + N_P, \quad (1)$$

Номер гармоники	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
Значение, %	14,1	10,0	2,5	2,6	2,9	4,0	5,7	7,7	8,7	2,9	3,3	4,1	1,3	0,3	0,0	0,7	0,6	0,6	0,6

Результаты моделирования

Таблица 2

Размер окна измерения	Размер окна пропуска	Уровень шума, %	Диапазон частот, Гц
9	30	10	от 30 до 120
15	30	20	от 30 до 100
22	30	30	от 30 до 85

где  $N_{T/2}$  — число отсчетов на полупериод основной гармоники;

$N_H$  — число отсчетов окна измерения;

$N_P$  — число отсчетов окна пропуска.

Для оценки необходимой ширины окна измерения (для учета всех возможных переходов для определенного уровня шума для худшего случая) можно использовать формулу 2:

$$N_H = \frac{\arcsin(SNR)}{\pi} \cdot \frac{f_s}{f_0}, \quad (2)$$

где  $SNR$  — уровень шума, в долях;

$f_0$  — частота основной гармоники;

$f_s$  — частота дискретизации.

Для иллюстрации способа было осуществлено моделирование его работы в пакете Matlab, исследованы его устойчивость к изменению частоты основной гармоники в пределах определенного диапазона и уровню шума.

Алгоритм был настроен на работу с сигналом напряжения систем тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог. В табл. 1 представлены максимальные уровни ВГС этого сигнала относительно основной гармоники, которые были учтены в модели сигнала.

Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Как видно по данным таблицы, способ покрывает регламентированный стандартами [5, 6] диапазон изменения частоты основной гармоники, позволяя контролировать и фиксировать ее выход за эти рамки, а предварительно проведенная оценка уровня шума в системе энергоснабжения позволяет настроить алгоритм под эту модель сигнала.

Современные стандарты [5, 6] требуют производить оценку значения частоты основной гармоники с определенной точностью и за заданный интервал времени усреднения оценки. Требования национального стандарта определяют эти значения как точность 30 мГц и время усреднения 20 с; требования международного стандарта жестче — 10 мГц и 10 с соответственно. Алгоритм, настроенный под принятую модель сигнала, гарантирует точность порядка

1 мГц и является устойчивым к указанному в табл. 2 уровню шума.

**Заключение.** Предложенный способ отличается простотой своей реализации, устойчивостью и высокой точностью оценивания частоты основной гармоники в сравнении с другими способами при достаточно высоком уровне шума, отвечая требованиям как национального, так и международного стандартов качества электроэнергии [5, 6]. Присутствующий элемент оптимизации — окно пропуска — делает способ еще более экономичным. Его использование в комплексе программного обеспечения приборов контроля параметров качества электроэнергии позволит снизить необходимую вычислительную мощность микропроцессора и/или получить дополнительное процессорное время для расширения функциональности устройств.

#### Библиографический список

1. Кучумов, А. А. Исследователи ждут большего от современных измерительных приборов / А. А. Кучумов, А. А. Кузнецов, М. В. Сапунов // Новости электротехники. — 2004. — № 4. — С. 64–66.
2. Карташов, И. И. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. — 320 с.
3. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. — М.: УМК МПС, 2002. — 638 с.
4. Марпл, С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл. — М.: Изд-во «Мир», 1990. — 265 с.
5. ГОСТ Р 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Изд-во стандартов, 1997. — 44 с.
6. IEC 61000-4-30:2002 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods.

**ГАЗИЗОВ Равиль Ильшатович**, аспирант кафедры автоматики и систем управления.

Адрес для переписки: e-mail: GazizovRI@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.12.2009 г.

© Р. И. Газизов