

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ

Г.П. Муссонов, А.С. Селезнев, В.В. Федчишин

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия
seleznevas.ru@mail.ru

Резюме: В работе обоснована актуальность повышения точности определения значений гармонических составляющих в электрических сигналах. Показана необходимость учёта нелинейного характера изменения индуктивности цепи для увеличения точности определения амплитудных и/или действующих значений гармонических составляющих в первичной цепи. Описаны быстродействующие алгоритмы точного определения значений гармонических составляющих. Представлены результаты натурных испытаний с использованием предлагаемых методов. Выполнено сравнение приведённых алгоритмов обработки вторичных сигналов.

Ключевые слова: гармоническая составляющая; гармонический состав сигнала; частотный спектр; нелинейная индуктивность; индуктивное сопротивление.

INCREASE THE ACCURACY OF DETERMINING THE VALUES OF HARMONIC COMPONENTS IN ELECTRICAL SIGNALS

G.P. Mussonov¹, A.S. Seleznev², V.V. Fedchishin³

^{1,2,3}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
seleznevas.ru@mail.ru

Abstract: In the work, the urgency of increasing the accuracy of determining the values of the harmonic components in electrical signals is substantiated. It is shown that it is necessary to take into account the nonlinear character of the change in the circuit inductance to increase the accuracy of determining the amplitude and / or effective values of the higher harmonic components in the primary circuit. Fast-acting algorithms for the accurate determination of the values of harmonic components are described. Results of full-scale tests using the proposed methods are presented. Comparison of the above algorithms for processing secondary signals is performed.

Keywords: harmonic components; harmonic composition of the signal; frequency spectrum; nonlinear inductance; inductive resistance.

Рост числа и мощности нелинейных нагрузок в электроэнергетических системах (ЭЭС) обостряет проблему ликвидации гармонических составляющих в токе и напряжении, то есть в электрических сигналах. Гармонические составляющие ухудшают характеристики надёжности основных элементов силового оборудования ЭЭС, негативно влияют на устройства релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи, что приводит к сбоям электроснабжения с последующими экономическими издержками [1–4].

С учётом физической природы и специфики к причинам появления гармонических

составляющих относят две основные группы [5, с. 7 и далее]. Первая группа обусловлена режимами работы ЭЭС, то есть перегрузками, аварийными режимами (короткими замыканиями, перенапряжениями и др.), постоянными коммутациями и пр. Вторая группа вызвана технологическими процессами потребителей и промышленных предприятий с нелинейной нагрузкой, например электродуговыми плавильными заводами, электросварочными установками, полупроводниковыми преобразователями электрических сигналов, электрифицированной железной дорогой и др.

В связи с этим **задача** повышения точности определения значений гармонических составляющих в электрических сигналах является актуальной, так как на достоверном выявлении значений гармонических составляющих в электроэнергетике базируются методы диагностики, например электросетевого оборудования, а также способы улучшения качества электрической энергии в системах электроснабжения.

Цель работы заключается в повышении точности определения значений гармонических составляющих в электрических сигналах на основе выработки управляющих воздействий для их ликвидации и более точного расчёта необходимой мощности силовых резонансных фильтров.

Снижение уровней гармонических составляющих в электрических сетях является частью общей задачи как уменьшения влияния коротких замыканий, нелинейных нагрузок и переходных режимов на промышленное оборудование, так и улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения потребителей [1, 6, 7]. Для решения этой задачи применяются силовые резонансные фильтры гармонических составляющих разных схем и исполнений для заграждения прохождения токов и/или напряжений этих гармонических составляющих, либо обеспечения поглощения (генерации в противофазе) этих токов и/или напряжений [5–7].

В общем виде, согласно [5, с. 246 и далее], работу активных фильтров гармонических составляющих в ЭЭС представляют двумя этапами. На первом этапе в режиме реального времени определяют частотный состав вредных гармонических составляющих в электрических сетях, например с помощью преобразований Фурье. А на втором этапе изменяют параметры активных фильтров таким образом, чтобы снизить влияние вредных гармонических составляющих (то есть заградить их прохождение, поглотить или сгенерировать в противофазе), амплитудное или действующее значение которых наибольшее [8–10]. Эти же два этапа характерны и для пассивных резонансных фильтров гармонических составляющих. Различие только в том, что этапы разделены во времени. Систематические измерения позволяют накопить достаточную статистику для более точного определения требуемой мощности силовых резонансных фильтров. На основе статистики определяют конкретный состав вредных гармонических составляющих в данной сети – это первый этап, а затем в ней устанавливают фильтры для снижения уровня конкретных выявленных гармоник – это второй этап [1, 11].

На первом этапе используются трансформаторы тока и/или напряжений для того, чтобы снизить промышленные значения тока и/или напряжения до величин, удобных для работы измерительной и регулирующей аппаратуры. На втором этапе индуктивная связь также имеет место быть [12].

Определение значений гармонических составляющих

Из теоретических основ электротехники известно, например [13, с. 123], что индуктивное сопротивление X_L обмотки (катушки, соленоида) индуктивностью L определяется из выражения

$$X_L = \omega L, \quad (1)$$

где X_L – индуктивное сопротивление обмотки, Ом; ω – циклическая (круговая) частота, рад/с; $\omega = 2\pi f$; f – промышленная частота, равная 50 или 60 Гц в зависимости от страны;

π – известная константа, равная отношению длины окружности к её диаметру; L – индуктивность обмотки, Гн.

Согласно выражению (1) в странах с промышленной частотой $f = 60$ Гц индуктивное сопротивление той же обмотки больше. Аналогично, индуктивное сопротивление этой обмотки для гармонических составляющих, например для третьей $f_3 = 150$ Гц, будет в три раза больше, чем для основной частоты f , для пятой – в пять раз больше, и так далее. Таким образом, как на первом, так и на втором этапах работы активных фильтров индуктивное сопротивление обмоток трансформаторов существенно искажает величину амплитуды гармонической составляющей. И компенсация некоторой гармонической составляющей будет выполняться не полностью или не будет выполняться вообще, если искажённая индуктивностью амплитуда этой гармонической составляющей на первом этапе, то есть при её измерении или контроле, не превысит допустимых для компенсации значений. Кроме того, недостоверное определение амплитудного или действующего значения гармонической составляющей может привести к выбору силового резонансного фильтра недостаточной мощности.

Индуктивность обмотки длиной l и площадью поперечного сечения S с общим числом витков N , в соответствии со стр. 247-253 [14], равна

$$L = k\mu_0\mu N^2 S / l = k\mu_0\mu M^2 V, \quad (2)$$

где k – коэффициент, зависящий от отношения длины l обмотки к диаметру d её витков; μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость вещества. Она показывает, во сколько раз магнитная проницаемость материала сердечника больше магнитной проницаемости вакуума; N – число витков обмотки; S – площадь поперечного сечения обмотки, м²; l – длина обмотки, м; $M = N/l$ – число витков на единицу длины, м⁻¹; $V = Sl$ – объем обмотки, м³.

Из выражения (2) видно, что индуктивность обмотки зависит только от относительной магнитной проницаемости μ материала её сердечника, которая изменяется от протекающего по обмотке тока, в то время как все остальные параметры конкретной обмотки определяют её геометрию и в процессе эксплуатации остаются практически неизменными.

Выходной сигнал трансформатора – это напряжение $U_{\text{вых}}$, которое на линейном участке кривой намагничивания прямо пропорционально первичному сигналу, то есть изменению напряжения или тока в первичной обмотке, соответственно, для трансформатора напряжения или тока. В общем случае мгновенное значение выходного сигнала представляет собой сумму мгновенных значений всех присутствующих в сигнале гармонических составляющих. При коэффициенте трансформации K (обозначение согласно ГОСТ [15]), например, для понижающего трансформатора тока выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ на вторичной обмотке будет в K раз меньше входного сигнала $I_{\text{вх}}$, то есть $U_{\text{вых}} \sim I_{\text{вх}} / K$, здесь знак $\sim$ означает пропорциональность. При подключении измерительной и/или регулирующей аппаратуры, то есть нагрузки с сопротивлением R , во вторичной цепи для каждой i -й гармонической составляющей потечёт ток, пропорциональный току в первичной обмотке и равный

$$I_{\text{вых}i} = U_{\text{вых}} / (R + X_{Li}) \sim I_{\text{вх}} / K (R + X_{Li}), \quad (3)$$

где $I_{\text{вых}i}$ – ток во вторичной цепи трансформатора для i -й гармонической составляющей, А; $U_{\text{вых}}$ – напряжение на клеммах вторичной обмотки трансформатора, В; R – сопротивление нагрузки во вторичной цепи трансформатора, Ом; $X_{Li} = \omega_i L$ – индуктивное сопротивление вторичной цепи для i -й гармонической составляющей, $i = 1, 2, \dots$, Ом; $\omega = 2\pi f_i$; f_i – частота

i -й гармонической составляющей, $f_i = if$, f – промышленная частота, Гц; L – индуктивность обмотки, Гн; K – коэффициент трансформации данного трансформатора.

Что касается сопротивления нагрузки R во вторичной цепи трансформатора, то оно известно, так как входное сопротивление измерительной и регулирующей аппаратуры указывается в паспортных данных. А для трансформаторов, согласно ГОСТ 7746-2001 [16, п. 8.2. Правила приёмки. Объем испытаний и проверок, ...], при квалификационных и периодических испытаниях и проверках предписывается проводить «Измерение сопротивления вторичных обмоток постоянному току» [16, п. 23]. Индуктивным сопротивлением измерительной и регулирующей аппаратуры во вторичной цепи можно пренебречь, потому что, во-первых, оно незначительно на фоне обмоток трансформаторов с ферромагнитными сердечниками, во-вторых, измерительная аппаратура – это аналого-цифровые преобразователи для гармонического анализа первичного сигнала, а регулирующая аппаратура – это низковольтные диодные схемы управления, у которых отсутствуют индуктивности на входе.

Зависимость магнитной индукции B от напряжённости магнитного поля H описывается кривой намагничивания, которая для каждого трансформатора известна либо по паспортным данным, либо по марке стали магнитопровода, указываемой в паспорте трансформатора. При цифровой обработке измеренной информации полученную зависимость в виде таблицы записываем в память прибора. Затем с её помощью при каждом измерении величины протекающего по обмотке тока I можно, согласно [13, с. 655], вычислить текущее значение напряжённости поля $H = IN/l_m$, где N и l_m для конкретного трансформатора постоянны и всегда известны (здесь N – число витков обмотки; l_m – длина магнитопровода трансформатора), далее в таблице по вычисленному значению напряжённости H найти значение магнитной индукции B и, наконец, определить величину относительной магнитной проницаемости μ из известного выражения $\mu = B/\mu_0 H$, например [14, с. 205]. Поведение относительной магнитной проницаемости μ при изменении напряжённости поля H для ферромагнетиков описывается кривой Столетова, которая имеет явно нелинейный характер. Следовательно и индуктивность, и индуктивное сопротивление обмотки не будут постоянными, а будут зависеть от величины протекающего по ней тока, кроме того индуктивное сопротивление будет зависеть от номера гармонической составляющей. Однако в любой момент времени у нас есть возможность точно определить значение индуктивного сопротивления обмотки для каждой гармонической составляющей по математическому выражению, аналогичному (1), в котором циклическая (круговая) частота является функцией этой гармонической составляющей.

Ещё одной возможностью определения относительной магнитной проницаемости μ материала сердечника обмотки и её индуктивности является построение вольт-амперной характеристики трансформатора. По физической сущности вольт-амперная характеристика трансформатора и кривая его намагничивания – это одна и та же зависимость поведения ферромагнетиков в магнитном поле. Различие только в названии осей координат и масштабных множителях, вызванных разными единицами измерения [17].

Действительно, согласно [13, с. 651], напряжение U , приложенное к обмотке, связано со значением магнитной индукции B , которую она создаёт, соотношением $B = U / (2^{0,5} \pi f N S_m)$, где B – магнитная индукция обмотки, Т; U – напряжение, приложенное к обмотке, В; f – промышленная частота, Гц; N – число витков обмотки; S_m – сечение магнитопровода, м².

Зависимость напряжённости магнитного поля H от протекающего по обмотке тока I определяется из выражения [13]: $H = IN/l_m$, где H – напряжённость магнитного поля,

А/м; I – текущее значение тока, А; N – число витков обмотки; l_m – длина магнитопровода трансформатора, м.

Использование вольт-амперной характеристики трансформатора более предпочтительно, так как она, во-первых, отражает все конструктивные особенности данного трансформатора, во-вторых, она сразу позволяет учесть индуктивность обоих обмоток трансформатора и их взаимоиндукцию, а также относительную магнитную проницаемость конкретного материала сердечника со всеми его изменениями при изготовлении и сборке.

Кроме того, построить вольт-амперную характеристику трансформатора можно более точно, так как согласно требованиям ГОСТ 8.217–2003 [18, п. 9.5 Определение погрешности] в эксплуатации должно быть оборудование для поверки трансформаторов тока во всём диапазоне первичных токов. Для увеличения точности построения вольт-амперной характеристики первичный ток изменяется с любым шагом, в том числе делается с более мелким в точках перегиба вольт-амперной характеристики. Полученная таким образом вольт-амперная характеристика трансформатора в виде таблицы записывается в память прибора для последующего использования в работе. Методы восстановления аналитического выражения функции по таблице её значений или вычисления значений функции для промежуточных значений, не приведённых в таблице, известны, например [19, Глава VI. Приближение функций].

Проиллюстрируем работу предлагаемого метода на примере трансформатора тока ТПЛ-10кВ-0,5/10Р-50/5. Зависимость вторичного напряжения от изменения первичного тока для трансформатора тока ТПЛ-10кВ-0,5/10Р-50/5 приведена в двух первых колонках табл. 1.

Таблица 1

Зависимость тока вторичной цепи от номера гармонической составляющей

Первичный ток, А	Вторичное напряжение, В	Индуктивное сопротивление, Ом	Индуктивность, L , $\Gamma \cdot 10^{-2}$	Значение тока вторичной цепи согласно (3) для гармонической составляющей с номером, А						
				1	3	5	7	9	11	13
0,243	2,85	12,391	3,944	0,127	0,060	0,040	0,029	0,023	0,019	0,017
0,250	3,10	12,800	4,074	0,140	0,066	0,043	0,032	0,026	0,021	0,018
0,300	4,15	13,833	4,403	0,174	0,081	0,052	0,039	0,031	0,026	0,022
0,350	5,15	14,714	4,684	0,208	0,095	0,062	0,046	0,036	0,030	0,026
0,400	6,20	15,500	4,934	0,243	0,110	0,071	0,052	0,041	0,034	0,029
0,450	7,30	16,222	5,164	0,278	0,124	0,080	0,059	0,047	0,039	0,033
0,522	8,95	17,146	5,458	0,330	0,146	0,093	0,069	0,054	0,045	0,038
0,718	12,85	17,897	5,697	0,461	0,202	0,129	0,095	0,075	0,062	0,053
0,828	14,65	17,693	5,632	0,529	0,232	0,149	0,109	0,087	0,072	0,061
1,043	17,75	17,018	5,417	0,657	0,291	0,187	0,137	0,109	0,090	0,077
1,250	20,20	16,160	5,144	0,772	0,345	0,222	0,164	0,130	0,108	0,092
1,500	22,35	14,900	4,743	0,898	0,409	0,264	0,196	0,155	0,129	0,110
1,720	23,95	13,924	4,432	1,001	0,463	0,301	0,223	0,177	0,147	0,125
1,960	25,50	13,010	4,141	1,108	0,520	0,340	0,252	0,201	0,167	0,142
2,094	26,20	12,536	3,990	1,163	0,550	0,360	0,268	0,213	0,177	0,151
2,360	27,25	11,746	3,739	1,253	0,602	0,396	0,295	0,236	0,196	0,167
2,900	28,95	10,491	3,339	1,408	0,696	0,462	0,346	0,276	0,230	0,197

Продолжение таблицы 1

3,055	29,45	9,640	3,068	1,499	0,757	0,506	0,380	0,304	0,254	0,218
3,998	30,95	7,741	2,464	1,745	0,932	0,635	0,482	0,388	0,325	0,280
5,090	32,05	6,277	1,998	1,963	1,108	0,772	0,592	0,481	0,404	0,349
5,940	32,65	5,497	1,750	2,107	1,233	0,871	0,674	0,549	0,463	0,401
7,202	33,45	4,645	1,478	2,284	1,398	1,007	0,787	0,646	0,548	0,475
8,040	33,85	4,210	1,340	2,382	1,496	1,090	0,858	0,707	0,601	0,523
9,140	34,35	3,758	1,196	2,497	1,615	1,193	0,946	0,784	0,669	0,584
10,320	34,85	3,377	1,075	2,605	1,731	1,296	1,036	0,863	0,739	0,647
11,360	35,25	3,103	0,988	2,690	1,826	1,382	1,111	0,929	0,799	0,700
12,160	35,55	2,924	0,931	2,751	1,894	1,444	1,167	0,979	0,843	0,741
13,340	35,95	2,695	0,858	2,832	1,988	1,531	1,245	1,050	0,907	0,798
14,210	36,25	2,551	0,812	2,888	2,053	1,593	1,301	1,100	0,952	0,840
15,010	36,45	2,428	0,773	2,933	2,109	1,646	1,350	1,144	0,993	0,877
16,250	36,85	2,268	0,722	3,004	2,193	1,727	1,424	1,212	1,055	0,933
16,900	37,05	2,192	0,698	3,039	2,235	1,768	1,462	1,246	1,086	0,962
17,840	37,25	2,088	0,665	3,082	2,290	1,822	1,513	1,294	1,130	1,003
18,730	37,55	2,005	0,638	3,128	2,345	1,875	1,562	1,339	1,172	1,041
20,300	37,95	1,869	0,595	3,197	2,431	1,962	1,644	1,415	1,242	1,106
21,060	38,25	1,816	0,578	3,237	2,476	2,005	1,684	1,452	1,276	1,138
21,990	38,35	1,744	0,555	3,266	2,518	2,049	1,727	1,492	1,314	1,174
23,360	38,65	1,655	0,527	3,316	2,583	2,115	1,791	1,553	1,371	1,227
24,230	38,90	1,605	0,511	3,352	2,625	2,158	1,832	1,591	1,406	1,260
25,330	39,25	1,550	0,493	3,398	2,679	2,212	1,883	1,639	1,451	1,302
26,180	39,35	1,503	0,478	3,421	2,712	2,247	1,918	1,673	1,483	1,332
27,000	39,55	1,465	0,466	3,450	2,748	2,283	1,953	1,706	1,515	1,362
28,200	39,75	1,410	0,449	3,484	2,794	2,332	2,001	1,752	1,558	1,403
29,100	40,05	1,376	0,438	3,520	2,835	2,372	2,040	1,789	1,593	1,436
30,330	40,25	1,327	0,422	3,553	2,879	2,420	2,087	1,834	1,636	1,477
31,470	40,50	1,287	0,410	3,588	2,922	2,464	2,131	1,877	1,677	1,515
32,000	40,65	1,270	0,404	3,607	2,943	2,486	2,152	1,897	1,696	1,533
33,200	40,85	1,230	0,392	3,637	2,984	2,529	2,195	1,938	1,736	1,571
34,560	41,15	1,191	0,379	3,677	3,032	2,579	2,244	1,986	1,782	1,615
35,040	41,25	1,177	0,375	3,691	3,048	2,597	2,261	2,003	1,797	1,630
36,050	41,45	1,150	0,366	3,718	3,082	2,632	2,297	2,037	1,830	1,662
37,270	41,75	1,120	0,357	3,754	3,125	2,676	2,340	2,079	1,870	1,700
38,410	41,95	1,092	0,348	3,782	3,160	2,713	2,377	2,116	1,906	1,734
38,960	42,05	1,079	0,344	3,795	3,176	2,731	2,395	2,133	1,923	1,750
40,010	42,35	1,058	0,337	3,830	3,214	2,769	2,433	2,169	1,957	1,782
41,000	42,50	1,037	0,330	3,851	3,242	2,799	2,463	2,199	1,986	1,810
43,200	43,10	0,998	0,318	3,919	3,317	2,876	2,538	2,271	2,055	1,876

Продолжение таблицы 1

44,800	43,30	0,967	0,308	3,948	3,357	2,919	2,583	2,316	2,099	1,919
45,780	43,75	0,956	0,304	3,993	3,400	2,960	2,621	2,352	2,133	1,951
48,320	44,15	0,914	0,291	4,045	3,465	3,031	2,693	2,423	2,202	2,018

В третьей колонке табл. 1 приведено значение индуктивного сопротивления цепи, вычисленного по закону Ома, то есть отношение содержимого второй колонки – вторичного напряжения или вторичного сигнала, к содержимому первой колонки – первичному току или первичному сигналу. В четвертой колонке табл. 1 приведено значение индуктивности, вычисленное для первой или основной гармонической составляющей, то есть при $f_i = 50$ Гц, по выражению, полученному из выражения (1). В табл. 1 для экономии места значение индуктивности приведено увеличенным на два порядка, чтобы избавиться от нулей после запятой. Характер изменения индуктивности повторяет ход изменения относительной магнитной проницаемости μ при изменении напряжённости поля H для материала сердечника данного трансформатора. В табл. 1 приведены значения величины токов во вторичной цепи для нечётных гармонических составляющих только для экономии места. Все рассуждения и приведённые формулы справедливы и для гармонических составляющих с чётными номерами.

Из выражения (3) видно, что ток в цепи для i -й гармонической составляющей уменьшается с ростом номера i -й гармонической составляющей, так как для неё, согласно (1), растёт индуктивное сопротивление X_{Li} . Эта зависимость для гармонических составляющих имеет гиперболический характер, и значение тока (3) стремительно убывает, приближаясь к нулю. Для подтверждения этого утверждения проанализируем изменение величины токов в каждой строке последних семи столбцов табл. 1, где приведены значения токов нечётных гармоник во вторичной цепи. Изменение токов обусловлено только изменением частоты гармонической составляющей по закону $f_i = 50i$, $i = 1, 2, \dots$, здесь i – номер гармонической составляющей при одном и том же напряжении питания этой цепи и при постоянном активном сопротивлении вторичной цепи $R = 10$ Ом. Из анализа данных таблицы видно, что ток в цепи для i -й гармонической составляющей уменьшается с ростом её номера. Величина изменения тока i -й гармонической составляющей зависит от текущего значения первичного сигнала и является нелинейной, так как нелинейно изменяется относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

Для иллюстрации этого сравним отношение тока основной гармонической составляющей к току 13-й гармонической составляющей для двух активных сопротивлений вторичной цепи при изменении значения первичного сигнала во всём его диапазоне, взятых из табл. 1. Для экономии места возьмём данные первичного сигнала, равномерно расположенные с шагом примерно через десять ампер. Зависимость отношения тока основной гармонической составляющей к току 13-й гармонической составляющей при разных значениях первичного сигнала приведена в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость отношения тока для основной гармонической составляющей к току 13-й гармонической составляющей при разных значениях первичного сигнала

Первичный сигнал, А		0,25	1,043	10,32	20,3	30,33	40,01	48,32
Отношение тока основной гармонической составляющей к току 13-й гармонической составляющей для активного сопротивления вторичной цепи, Ом	R=8	8,385	9,163	4,562	3,273	2,707	2,402	2,230
	R=10	7,737	8,559	4,029	2,890	2,406	2,149	2,005

Из анализа данных табл. 2 видно, что, во-первых, отношение токов повторяет ход изменения индуктивности цепи, то есть кривую Столетова; во-вторых, при больших первичных токах отношение токов уменьшается из-за насыщения магнитопровода трансформатора, и кривая намагничивания имеет почти линейный характер. Нужно иметь в виду, что в этом случае при больших первичных токах, достигающих аварийных значений, происходит срабатывание релейной защиты, после которого вопросы фильтрации гармонических составляющих теряют актуальность.

Отношение F_i , $i=1, 2, \dots$, тока основной гармонической составляющей к току i -й гармонической составляющей во вторичной цепи характеризует величину искажения значения i -й гармонической составляющей индуктивным характером самой цепи, то есть во сколько раз индуктивность цепи уменьшила амплитудное g_{mi} или действующее g_{di} значение i -й гармонической составляющей по сравнению с основной гармонической составляющей при разных значениях первичного сигнала. Математическое выражение для вычисления отношения F_i тока основной гармонической составляющей к току i -й гармонической составляющей во вторичной цепи следует из выражения (3) и имеет вид:

$$F_i = (R + X_{Li}) / (R + X_{L1}), \quad (4)$$

где F_i – величина искажения каждой i -й гармонической составляющей относительно основной составляющей; R – активное сопротивление цепи, включающей индуктивные элементы, Ом; $X_{Li} = \omega_i L$ – индуктивное сопротивление той же цепи для i -й гармонической составляющей, $i=1, 2, \dots$, Ом; $X_{L1} = \omega_1 L$ – индуктивное сопротивление той же цепи для основной гармонической составляющей, $i=1$, Ом; ω_i – циклическая (круговая) частота для i -й гармонической составляющей, рад/с, $\omega_i = 2\pi f_i$; f_i – частота i -й гармонической составляющей, $f_i = if_1$; f_1 – основная гармоническая составляющая, то есть промышленная частота, Гц; L – текущее значение индуктивности цепи, включающей индуктивные элементы, определённое по предварительно построенной в памяти прибора её зависимости от текущего значения напряжения вторичного сигнала, Гн.

Поэтому для каждой i -й гармонической составляющей перед использованием её измеренного амплитудного g_{mi} значения или измеренного действующего g_{di} значения их необходимо скорректировать в соответствии с величиной её искажения индуктивным характером цепи по математическим выражениям $G_{mi} = F_i g_{mi}$, $G_{di} = F_i g_{di}$, где G_{mi} – скорректированное амплитудное значение i -й гармонической составляющей, единицы сигнала A или B ; F_i – величина искажения значения каждой i -й гармонической составляющей относительно основной составляющей, вычисленная согласно выражения (4); g_{mi} – измеренное амплитудное значение i -й гармонической составляющей, единицы сигнала A или B ; G_{di} – скорректированное действующее значение i -й гармонической составляющей, единицы сигнала A или B ; g_{di} – измеренное действующее значение i -й гармонической составляющей, единицы сигнала A или B .

Повышение быстродействия определения значений гармонических составляющих

Исследования [20] показали, что во вторичной цепи трансформаторов тока величина искажения F_i при любых значениях вторичного сигнала $U_{\text{вых}}$, соответствующих малым изменениям первичного сигнала, а именно от нуля до значений, не превышающих 10% от максимального паспортного значения, аппроксимируется следующей функциональной зависимостью:

$$F_i = U_{\text{вых}} (i-1)(0,0201805 - 0,0007046U_{\text{вых}}) + 0,502443i + 0,497557, \quad (5)$$

где F_i – величина искажения каждой i -й гармонической составляющей относительно основной составляющей; $U_{\text{вых}}$ – значение текущего напряжения вторичного сигнала, В;

i – номер i -й гармонической составляющей.

Для всех остальных значений текущего напряжения $U_{\text{вых}}$ вторичного сигнала цепей, включающих индуктивные элементы, величина искажения F_i каждой i -й гармонической составляющей относительно основной аппроксимируется следующей функциональной зависимостью:

$$F_i = U_{\text{вых}}(i-1)(0,0007046 U_{\text{вых}} - 0,0201805) + 4,176085i - 3,17609, \quad (6)$$

где F_i – величина искажения каждой i -й гармонической составляющей относительно основной составляющей; $U_{\text{вых}}$ – значение текущего напряжения вторичного сигнала, В; i – номер i -й гармонической составляющей.

Несмотря на кажущую сложность функциональных зависимостей (5) и (6), по сравнению с математическим выражением (4), работать с ними проще, так как не нужно хранить в памяти таблицу зависимости индуктивности цепей от текущего измеренного напряжения вторичного сигнала, а затем, в процессе работы, при каждом измерении вторичного сигнала по этой таблице искать и аппроксимировать промежуточные данные, соответствующие значению индуктивности цепи. Также не нужно хранить значение активного сопротивления цепи R .

Одну величину всё-таки хранить надо – это значение вторичного сигнала, при котором первичный сигнал не превышает 10% от максимального паспортного значения. Для трансформатора тока ТПЛ-10кВ-0,5/10Р-50/5 десять процентов от максимального паспортного значения, то есть от 50 А, составляют 5 А. По данным табл. 1 ближайшее меньшее значение равно 3,998 А, ему соответствует значение вторичного сигнала 32,05 В. Для упрощения возьмём ровно 30,95 В. Если в процессе работы текущее значение вторичного сигнала не превышает 30,95 В, то есть меньше или равно 30,95 В, то величину искажения значения i -й гармонической составляющей вычисляют по зависимости (5). В противном случае – по зависимости (6).

Коэффициенты функциональных зависимостей (5) и (6) получены методом наименьших квадратов. Вычисление коэффициентов зависимостей (5) и (6) состоит из двух шагов. На первом шаге определяют зависимость величины искажения F_i , $i = 1, 2, \dots$ от номера i -й гармонической составляющей, то есть от i , в виде двухпараметрической функции, например, $y = ax + b$ при фиксированном значении вторичного сигнала цепи $U_{\text{вых}}$. Получают семейство функций во всём диапазоне изменения вторичного сигнала цепи $U_{\text{вых}}$. На втором шаге определяют зависимость коэффициентов a и b от вторичного сигнала цепи $U_{\text{вых}}$.

В общем случае для других цепей, имеющих индуктивный характер, эта зависимость может иметь более сложный вид, чем в примере с трансформатором тока, поэтому для аппроксимации зависимости F_i (4) с заданным значением погрешности можно использовать кусочно-функциональный подход.

Для сравнения качества аппроксимации величины искажения для каждой i -й гармонической составляющей, $i = 1, 2, \dots$, для трансформаторов тока в табл. 3 приведены соответствующие данные только для третьей, седьмой и одиннадцатой гармонических составляющих. Выбор этих гармоник сделан исключительно для экономии места. Для интересующихся точностью измерения значений гармонических составляющих авторы могут представить данные по любой гармонической составляющей.

Таблица 3

Качество аппроксимации по выражениям (5) и (6) величины искажения по сравнению с точным значением (4)

Вторичное напряжение, В	Значение величины искажения					
	F_3 , вычисленной согласно выражению		F_7 , вычисленной согласно выражению		F_{11} , вычисленной согласно выражению	
	(4)	(5) и (6)	(4)	(5) и (6)	(4)	(5) и (6)
2,85	2,107	2,119	4,320	4,357	6,534	6,594
3,10	2,123	2,129	4,368	4,388	6,614	6,647
4,15	2,161	2,156	4,483	4,469	6,804	6,782
5,15	2,191	2,182	4,572	4,546	6,954	6,911
6,20	2,216	2,206	4,647	4,619	7,078	7,031
7,30	2,237	2,228	4,712	4,685	7,186	7,141
8,95	2,263	2,255	4,790	4,766	7,316	7,276
12,85	2,283	2,290	4,849	4,870	7,415	7,449
14,65	2,278	2,292	4,833	4,876	7,389	7,460
17,75	2,260	2,275	4,779	4,826	7,299	7,376
20,20	2,235	2,244	4,706	4,731	7,177	7,218
22,35	2,197	2,202	4,590	4,607	6,984	7,012
23,95	2,164	2,164	4,492	4,491	6,820	6,819
25,50	2,131	2,120	4,392	4,359	6,654	6,598
26,20	2,113	2,098	4,338	4,293	6,563	6,488
27,25	2,080	2,062	4,241	4,186	6,401	6,311
28,95	2,024	2,002	4,072	4,007	6,120	6,011
29,45	1,982	1,978	3,945	3,934	5,908	5,890
30,95	1,873	1,868	3,618	3,603	5,363	5,339
32,05	1,771	1,763	3,314	3,290	4,856	4,817
32,65	1,709	1,696	3,128	3,087	4,547	4,478
33,45	1,634	1,623	2,903	2,869	4,172	4,115
33,85	1,593	1,589	2,778	2,767	3,963	3,944
34,35	1,546	1,548	2,639	2,644	3,732	3,741
34,85	1,505	1,510	2,515	2,529	3,524	3,548
35,25	1,474	1,480	2,421	2,440	3,368	3,401
35,55	1,452	1,459	2,357	2,377	3,262	3,295
35,95	1,425	1,432	2,274	2,296	3,123	3,161
36,25	1,407	1,413	2,220	2,238	3,033	3,064
36,45	1,391	1,400	2,172	2,201	2,954	3,002
36,85	1,370	1,377	2,109	2,130	2,849	2,883
37,05	1,360	1,365	2,079	2,095	2,798	2,826
37,25	1,345	1,354	2,036	2,062	2,727	2,770
37,55	1,334	1,338	2,002	2,014	2,670	2,691
37,95	1,315	1,318	1,945	1,954	2,575	2,591

Продолжение таблицы 3

38,25	1,307	1,304	1,922	1,912	2,537	2,520
38,35	1,297	1,299	1,891	1,898	2,485	2,497
38,65	1,284	1,286	1,852	1,859	2,420	2,432
38,90	1,277	1,276	1,830	1,828	2,383	2,380
39,25	1,268	1,262	1,805	1,787	2,342	2,312
39,35	1,261	1,259	1,784	1,776	2,307	2,294
39,55	1,256	1,252	1,767	1,755	2,278	2,258
39,75	1,247	1,245	1,741	1,735	2,235	2,225
40,05	1,242	1,235	1,726	1,706	2,210	2,177
40,25	1,234	1,230	1,703	1,689	2,172	2,148
40,50	1,228	1,223	1,684	1,668	2,140	2,113
40,65	1,225	1,219	1,676	1,656	2,127	2,094
40,85	1,219	1,214	1,657	1,642	2,096	2,070
41,15	1,213	1,207	1,638	1,622	2,064	2,036
41,25	1,211	1,205	1,632	1,616	2,053	2,026
41,45	1,206	1,201	1,619	1,604	2,031	2,007
41,75	1,201	1,196	1,604	1,589	2,007	1,981
41,95	1,197	1,193	1,591	1,580	1,985	1,967
42,05	1,195	1,192	1,585	1,576	1,974	1,960
42,35	1,191	1,188	1,574	1,565	1,957	1,942
42,50	1,188	1,187	1,564	1,561	1,939	1,935
43,10	1,181	1,183	1,544	1,549	1,907	1,915
43,30	1,176	1,182	1,529	1,547	1,881	1,911
43,75	1,174	1,182	1,523	1,546	1,872	1,911
44,15	1,167	1,183	1,502	1,550	1,837	1,917

Данные для сравнения качества аппроксимации величины искажения третьей, седьмой и одиннадцатой гармонических составляющих занимают две колонки. В левой колонке представлено точное значение величины искажения, вычисленное по формуле (4), а в правой колонке – аппроксимация точного значения выражениями (5) и (6). Из анализа данных табл. 3 видно, что качество аппроксимации по выражениям (5) и (6) величины искажения F_i , $i=1, 2, \dots$, по сравнению с точным значением (4) является приемлемым для практического применения. Относительная погрешность аппроксимации в рабочем диапазоне изменения вторичного сигнала для всех гармонических составляющих не превышает 2%. Выражения (5) и (6) позволяют быстро и точно определить величину искажения F_i , $i=1, 2, \dots$, значений гармонических составляющих в электрических сигналах. При этом использование предлагаемых алгоритмов практически не окажет влияния на быстродействие при решении основной задачи – повышение качества электрических сигналов в системах электроснабжения промышленных предприятий со значительной нелинейной нагрузкой.

Результатом исследования является создание алгоритмов обработки вторичных сигналов, позволяющих увеличить точность измерения значений гармонических составляющих, используемых как в решении задач диагностики электрооборудования, так и повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных

предприятий. В последнем случае применение алгоритмов позволяет повысить надёжность и эффективность исключения высокочастотных помех из основных сигналов при обеспечении качества электрической энергии и повысить точность в определении мощности силовых резонансных фильтров.

Блок-схема алгоритма состоит из четырёх последовательно соединённых блоков, которые пронумерованы и приведены ниже. Работа осуществляется следующим образом (порядок действия рассмотрен на примере трансформатора тока).

1. На основной промышленной частоте $f = 50$ Гц строят вольт-амперную характеристику конкретного измерительного трансформатора тока во всём диапазоне первичных токов, то есть зависимость $U_{\text{вых}}$ — напряжения вторичного сигнала трансформатора от величины первичного сигнала $I_{\text{вх}}$.

2. По данным вольт-амперной характеристики по закону Ома определяют индуктивное сопротивление $X_{L1} = U_{\text{вых}} / I_{\text{вх}} - R$ и индуктивность $L_1 = X_{L1} / (2\pi f)$ трансформатора тока на промышленной частоте f во всём диапазоне первичных токов с учётом активного сопротивления нагрузки R во вторичной цепи трансформатора.

3. Для каждой i -й гармонической составляющей определяют индуктивное сопротивление $X_{Li} = 2\pi f_i L_1$ и величину её искажения $F_i = (R + X_{Li}) / (R + X_{L1})$ индуктивным характером цепи с учётом активного сопротивления нагрузки R во вторичной цепи трансформатора.

4. Перед использованием измеренного амплитудного g_{mi} значения или измеренного действующего g_{di} значения для каждой i -й гармонической составляющей необходимо скорректировать их в соответствии с величиной искажения этой гармонической составляющей индуктивным характером цепи по математическим выражениям $G_{mi} = F_i g_{mi}$, $G_{di} = F_i g_{di}$.

Первые два пункта приведённого алгоритма выполняются снятием характеристик трансформатора, которые затем записываются в память компьютера. Последние два — при подключённом аналого-цифровом преобразователе к вторичной цепи трансформатора и в компьютере, осуществляющем гармонический анализ.

Полученные результаты используются при определении параметров пассивных фильтров. Техническая реализация приведённых алгоритмов осуществляется следующим способом. Вначале в течение длительного времени, с целью исключения случайной ошибки и удовлетворения требований ГОСТ 32144-2013 [2], на реальных линиях измеряется состав гармонических составляющих. Затем, с использованием приведённых в статье алгоритмов корректируются их значения, и полученные более точные значения проверяются на соответствие нормам [2]. Если некоторые гармонические составляющие стабильно превышают значения установленные ГОСТом [2], то в сети устанавливается пассивный фильтр. Сами устанавливаемые фильтры являются фильтрами первого порядка, расчёт которых для конкретной частоты описан в литературе [5; 9; 10].

Для активных фильтров [9], которые в процессе функционирования постоянно анализируют гармонический состав силовых электрических сигналов и подавляют гармонические составляющие, превышающие значения, установленные стандартом [2], коррекция вычисленных с помощью преобразования Фурье значений гармонических составляющих должна осуществляться по алгоритмам, приведённым в пунктах блок-схемы. В активных фильтрах гармонические составляющие генерируются в силовую цепь в противофазе [9]. Поэтому рассмотренные алгоритмы увеличения точности определения величины гармонических составляющих применить ещё один раз, так как выработанные в противофазе значения гармонических составляющих при их передаче в силовую цепь будут искажены (уменьшены) индуктивностью вторичного трансформатора, и компенсация гармонических составляющих до требований [2] не обеспечится. Также

фактор уменьшения компенсирующего воздействия необходимо учитывать при выборе мощности вторичного трансформатора в активном фильтре.

Исходя из результатов исследования, сформулированы следующие **выводы**:

1. Предлагаемый подход учёта нелинейной индуктивности цепи позволяет увеличить точность определения амплитудных и/или действующих значений гармонических составляющих в первичной, то есть силовой цепи.

2. Увеличение точности определения амплитудных и/или действующих значений гармонических составляющих в первичной цепи позволяет улучшить качество диагностики электросетевого оборудования, более точно выработать величину компенсирующего воздействия и обеспечить необходимую мощность силовых резонансных фильтров.

3. Приведённые в статье материалы подтверждают простоту реализации и высокую точность определения амплитудных и/или действующих значений гармонических составляющих в электрических сигналах как для силовых, так и для компенсирующих цепей.

Литература

1. Селезнев А.С. Снижение уровня высших гармоник в электрических сетях высокого напряжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 4 (87). С. 143–148.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 36 с.
3. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2015–01–01. М.: Стандартинформ, 2014. 81 с.
4. Ершов М.С., Егоров А.В., Комков А.Н Новый стандарт качества электрической энергии и вопросы регулирования взаимоотношений ее поставщиков и потребителей // Территория Нефтегаз. 2012. № 6. С. 140–146.
5. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
6. Селезнев А.С. Выявление источников искажения формы кривой напряжения в электроэнергетических системах [Электронный ресурс] / Г.С. Кудряшев, А.С. Селезнев, Д.С. Федосов // Машиностроение : сетевой электронный научный журнал. "Russian Internet Journal of Industrial Engineering" (г. Магнитогорск). 2014. № 3. Т. 2. С. 59–65. Режим доступа: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3-10.pdf>. Дата обращения: 04.04.2017.
7. Кондрат С.А., Селезнев А.С., Третьяков А.Н. Нормализация несинусоидальных режимов в электрических сетях // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 8 (91). С. 155–161.
8. Akagi H. Modern active filters and traditional passive filters // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. 2006. Vol. 54, No. 3. P. 255–269.
9. Arrillaga J., Watson N.R. Power systems harmonics. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. 412 p.
10. Das J.C. Power System Harmonics and Passive Filter Designs. Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. 873 p.
11. Карташев И.И. [и др.] Управление качеством электроэнергии / под ред. Ю.В. Шарова; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 320 с.
12. Balasubramaniam P.M., Gurusamy G. Evaluation and Implementation of Three Phase Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement // International Journal of Electrical Engineering. 2012. Vol. 5, No. 7. P. 829–841.
13. Зевеке Г.В. [и др.] Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975. 753 с.
14. Калашников С.Г. Электричество. 6-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2003. 624 с.
15. ГОСТ 1494-77. Электротехника. Буквенные обозначения основных величин. Переиздание март 1983 г. с Изменением № 1, утврждённым в мае 1983 г.; Пост. № 2174 от 06.05.83 (ИУС № 8 – 1983 г.).

16. ГОСТ 7746-2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия. Принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 20 от 1 ноября 2001 г.). Введен в действие с 01.01.2003. Пост. № 92-ст от 13.03.2002.
17. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
18. ГОСТ 8.217-2003. Трансформаторы тока. Методика поверки. Принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 23 от 22 мая 2003 г.). Введен в действие с 01.04.2004. Пост. № 268-ст от 26.09.2003.
19. Молчанов И.Н. Машинные методы решения прикладных задач. Алгебра, приближение функций. Киев: Наук. думка, 1987. 288 с.
20. Пат. 2629007 Российская Федерация, МПК7 Н 02 J 3/01. Способ определения значений высших гармонических составляющих в электрических сигналах (варианты) / Г. П. Муссонов, А.С. Селезнев, В.В. Федчишин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО ИРНИТУ). № 2016122704; заявл. 08.06.2016; опубл. 24.08.2017. Бюл. № 21. 22 с.

Авторы публикации

Муссонов Геннадий Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы» института энергетики Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрНИТУ). E-mail: genmuss@gmail.com.

Селезнев Алексей Спартакович – аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы» института энергетики Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрНИТУ). E-mail: seleznevas.ru@mail.ru.

Федчишин Вадим Валентинович – канд. техн. наук, доцент, директор института энергетики, заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы» Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрНИТУ). E-mail: fedchishin@istu.edu.

References

1. Seleznev A.S. Snizhenie urovnya vysshikh garmonik v elektricheskikh setyakh vysokogo napryazheniya // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014. No. 4 (87). P. 143–148.
2. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Vved. 2014–07–01. M.: Standartinform, 2014. 36 p.
3. GOST 33073-2014. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Kontrol' i monitoring kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Vved. 2015–01–01. M.: Standartinform, 2014. 81 p.
4. Ershov M.S., Egorov A.V., Komkov A.N. Novyi standart kachestva elektricheskoi energii i voprosy regulirovaniya vzaimootnoshenii ee postavshchikov i potrebiteli // Territoriya Neftegaz. 2012. No. 6. P. 140–146.
5. Zhezhelchenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 2000. 331 p.
6. Seleznev A.S. Vyyavlenie istochnikov iskazheniya formy krivoi napryazheniya v elektroenergeticheskikh sistemakh [Elektronnyi resurs] / G.S. Kudryashev, A.S. Seleznev, D.S. Fedosov // Mashinostroenie : setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal. "Russian Internet Journal of Industrial Engineering" (g. Magnitogorsk). 2014. No. 3. T. 2. P. 59–65. – Rezhim dostupa: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3-10.pdf>. Data obrashcheniya: 04.04.2017.
7. Kondrat S.A., Seleznev A.S., Tret'yakov A.N. Normalizatsiya nesinusoidal'nykh rezhimov v

- elektricheskikh setyakh // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014. No. 8 (91). P. 155–161.
8. Akagi H. Modern active filters and traditional passive filters // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. 2006. Vol. 54, No. 3. P. 255–269.
9. Arrillaga J., Watson N.R. Power systems harmonics. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. 412 p.
10. Das J.C. Power System Harmonics and Passive Filter Designs. Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. 873 p.
11. 11.Kartashev I.I. [i dr.] Upravlenie kachestvom elektroenergii / pod red. Yu.V. Sharova; 2-e izd., pererab. i dop. M.: Izdatel'skii dom MEI, 2008. 320 p.
12. Balasubramaniam P.M., Gurusamy G. Evaluation and Implementation of Three Phase Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement // International Journal of Electrical Engineering. 2012. Vol. 5, No. 7. P. 829–841.
13. Zeveke G.V. [i dr.] Osnovy teorii tsepei. M.: Energiya, 1975. 753 p.
14. Kalashnikov S.G. Elektrichestvo. 6-e izd., stereot. M.: Fizmatlit, 2003. 624 p.
15. GOST 1494-77. Elektrotehnika. Bukvennye oboznacheniya osnovnykh velichin. Pereizdanie mart 1983 g. s Izmeneniem No. 1, utverzhdenym v mae 1983 g.; Post. No. 2174 ot 06.05.83 (IUS No. 8 – 1983 g.).
16. GOST 7746-2001. Transformatory toka. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Prinyat Mezhsudarstvennym Sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii (protokol No. 20 ot 1 noyabrya 2001 g.). Vveden v deistvie s 01.01.2003. Post. No. 92-st ot 13.03.2002.
17. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. Raschet induktivnostei: spravochnaya kniga. 3-e izd., pererab. i dop. L.: Energoatomizdat, 1986. 488 p.
18. GOST 8.217-2003. Transformatory toka. Metodika poverki. Prinyat Mezhsudarstvennym Sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii (protokol No. 23 ot 22 maya 2003 g.). Vveden v deistvie s 01.04.2004. Post. No. 268-st ot 26.09.2003.
19. Molchanov I.N. Mashinnye metody resheniya prikladnykh zadach. Algebra, priblizhenie funktsii. Kiev: Nauk. dumka, 1987. 288 p.
20. Pat. 2629007 Rossiiskaya Federatsiya, MPK7 H 02 J 3/01. Sposob opredeleniya znachenii vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh v elektricheskikh signalakh (varianty) / G.P. Mussonov, A.S. Seleznev, V.V. Fedchishin; zayavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Irkutskii natsional'nyi issledovatel'skii tekhnicheskii universitet» (FGBOU VO IRNITU). – No. 2016122704; zayavl. 08.06.2016; opubl. 24.08.2017. Byul. No. 21. 22 p.

Authors of the publication

Gennadiy P. Mussonov – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of department «Electric Power Stations, Networks and Systems», Institute of Power Engineering.

Aleksey S. Seleznev – postgraduate student of department «Electric Power Stations, Networks and Systems», Institute of Power Engineering/

Vadim V. Fedchishin – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of department «Electric Power Stations, Networks and Systems», Director of the Institute of Power Engineering, Head of the Department of Electric Power Stations, Networks and Systems.

Поступила в редакцию

20 сентября 2017 г.