

дрой «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 2765-2945

Author ID (SCOPUS): 7003455231

КРОПОТИН Олег Витальевич, доктор технических наук, доцент (Россия), декан факультета довузовской подготовки, помощник проректора по учебной работе по профориентации.

SPIN-код: 4218-4900

AuthorID (РИНЦ): 118225

ORCID: 0000-0002-6620-9945

AuthorID (SCOPUS): 6505835545

ResearcherID: H-4616-2013

ЛАВРИКОВ Юрий Петрович, магистрант гр. ЭЭМ-181 факультета элитного образования и магистратуры.

СМИРНОВ Павел Сергеевич, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета элитного образования и магистратуры.

Для цитирования

Дед А. В., Горюнов В. Н., Кропотин О. В., Лавриков Ю. П., Смирнов П. С. Определение допустимых диапазонов регулирования медленных изменений напряжений путем имитационного моделирования // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). С. 90–96. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-90-96.

Статья поступила в редакцию 25.09.2018 г.

© А. В. Дед, В. Н. Горюнов, О. В. Кропотин, Ю. П. Лавриков, П. С. Смирнов

УДК 621.311

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-96-101

Д. В. КОВАЛЕНКО
П. С. СМОРНОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ РАСЧЕТАХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ, ВОЗНИКАЮЩИХ В КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ К СЕТИ ГРУППЫ ПЕРСОНАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

В настоящей работе были произведены физические замеры показателей качества электрической энергии (ПКЭ) для электрической сети, питающей компьютерный класс одного из учебных заведений города Омска. На основе данных, полученных в ходе эксперимента, был определен амплитудно-частотный спектр гармоник. Установлено, что при работе персональных компьютеров нарушаются ПКЭ, которые в отдельных случаях выходят за рамки ГОСТ 32144–2013. Произведен расчет потерь мощности и активной энергии, возникающих в кабельной линии электропередачи при наличии высших гармоник в сети. Потери определялись как для каждой из гармоник в отдельности, так и суммарные. Показано, что потери, возникающие на частотах высших гармоник, необходимо учитывать в расчетах. Предложена установка фильтров высших гармоник для улучшения ПКЭ (чтобы они соответствовали требованиям ГОСТ 32144-2013).

Ключевые слова: показатели качества электрической энергии, высшие гармоники, потери мощности и энергии, несинусоидальный нестационарный режим.

Введение. Высшие гармоники в системах электроснабжения. За последние 20 лет в связи с бурным развитием компьютеризации произошло проникновение компьютерной техники и различных электронных устройств во все сферы жизни общества. На производстве это частотно-регулируемый электропривод, станки с программным управлением, дуговые сталеплавильные печи, различные пре-

образовательные установки. Кроме того, произошло повсеместное распространение персональных компьютеров (ПК) и различной оргтехники в связи с автоматизацией рабочих процессов, открытием большого количества представительств и офисов различных компаний, торговых центров. Отдельного внимания заслуживает проблема обеспечения требуемого качества электрической энергии при

внедрении ПК в различные организации бюджетной сферы, жилищно-коммунального хозяйства, а также их использование в образовательном процессе в школах, техникумах, колледжах и высших учебных заведениях.

Для питания такого оборудования используются импульсные источники питания, входное комплексное сопротивление которых с течением времени характеризуется ярко выраженной нелинейностью.

Потребляемый этими нагрузками ток имеет импульсный характер. Как только синусоида питающего напряжения достигает амплитудного (максимального за период промышленной частоты сети) значения, диоды, входящие в состав импульсного блока питания, практически мгновенно изменяют значение собственного сопротивления от бесконечно большого (равносильно состоянию запертого диода) до нуля (равносильно состоянию открытого диода). Такие открывания и запирающие диодов с течением времени создают короткие импульсы в сигнале потребляемого тока. Полученный несинусоидальный сигнал может быть представлен в виде суммы основной синусоиды с промышленной частотой (50 Гц) и бесконечного числа синусоид, кратных основной частоте сети.

При наличии в системах электроснабжения (СЭС) высших гармоник тока и напряжения возникает повышенный износ установок компенсации реактивной мощности, реактивное сопротивление которых имеет емкостный характер. При определенных условиях сочетание емкостной составляющей сопротивления батарей статических конденсаторов (БСК) с индуктивным сопротивлением питающей сети могут иметь место резонансные режимы на частотах, близких к частотам высших гармоник. Если в спектральном составе нелинейных нагрузок присутствуют такие гармоники, то будет происходить усиленный износ БСК, который приведет к вспучиванию банок и преждевременному выходу из строя конденсаторных батарей (в отдельных случаях возможны взрывы и пожары на БСК) [1–3].

В работе [1] произведен анализ исследований, выполненных при проведении энергоаудита жилых и общественных зданий Москвы, подтверждающих актуальность проблемы подавления возникающих резонансных режимов при наличии нелинейных нагрузок в питающих сетях. Также в этой работе было отмечено о необходимости проведения детального анализа потребителей и выявление потенциально возможных резонансных режимов, которые могут возникнуть в исследуемой СЭС.

Отметим, что проблема наличия высших гармоник в СЭС не ограничивается возникновением резонансных режимов. В частности, при питании большого количества ПК в частотном спектре потребляемого тока будет присутствовать значительная доля третьей гармоники. Известно, что токи третьей гармоники (как и любой другой, кратной трем) не имеют сдвига по фазе и ведут себя подобно системе нулевой последовательности. Токи третьей гармоники, протекающие по фазным проводникам в несимметричной системе, суммируются, и этот суммарный ток будет протекать по нулевому рабочему проводнику. По этой причине ток, проходящий по нулевому проводу, будет соизмерим с током, протекающим по фазному проводу. При протекании несинусоидальных токов по нулевым рабочим проводникам возможен их перегрев и разрушение из-за перегрузки токами

гармоник, кратных трем. Это обстоятельство приводит к смещению нейтрали, перераспределению напряжений между фазами с последующим выходом из строя потребителей электроэнергии [2, 4, 5].

В работе [6] была упомянута аналогичная ситуация, которая произошла на одном из предприятий Москвы. По вине предприятия возникшие перенапряжения привели к выходу из строя блоков питания компьютерной техники. Кроме того, в этой же работе выполнено моделирование, показавшее, что при неучете высших гармонических составляющих в суммарном токе приводит к превышению предельно допустимой температуры кабельной линии электропередачи. К аналогичным выводам приходят и авторы исследования [5].

В ряде работ [5, 7, 8] разработана модель импульсного источника питания ПК. На основе данных, полученных с использованием разработанной модели, были определены амплитудно-частотные спектры гармоник тока и напряжения. Все данные имитационного моделирования получили экспериментальную проверку [8, 9].

Влиянию группового подключения большого количества нелинейных электроприемников на сети питания посвящено достаточно большое количество работ, например [4, 9, 10].

В [10] приведены результаты многочисленных исследований, которые показали, что групповое подключение большого количества ПК и другой оргтехники приводит к выходу коэффициентов n -й гармонической составляющей за пределы значений, регламентированных ГОСТ 32144-2013 [11].

Авторы исследования [4] пришли к выводу, что подключение большого количества нелинейных бытовых электроприемников приводит также и к увеличению коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения.

Кроме уже упомянутых аспектов качества электрической энергии при групповом подключении нелинейных нагрузок проявляется «эффект взаимной компенсации отдельных гармонических составляющих тока» [9].

Результаты эксперимента. Расчет потерь мощности и энергии в кабельной линии электропередачи при подключении к сети групповой нелинейной нагрузки. В работе [12] произведена попытка разработать алгоритм расчета потерь мощности в различных элементах СЭС при наличии нелинейной нагрузки. Стоит отметить, что главная задача, стоявшая перед авторами этого исследования, — определение потерь мощности с учетом фактического нагрева токоведущих частей. Расчет потерь авторами этой работы предполагал итерационность процесса решения.

Целью исследования [13] было сравнение результатов расчета потерь мощности и энергии в кабельной линии, полученных различными методами. При расчете потерь классическим методом авторы выполнили расчет потерь, возникающих на каждой из гармоник тока в отдельности, а после — произвели операцию суммирования для нахождения результирующих потерь. В качестве альтернативного метода расчета потерь мощности и энергии, возникающих в СЭС, авторами был использован метод расчета, основанный на пакетном вейвлет-преобразовании.

В отличие от работ [12, 13] в настоящей работе выполнен физический эксперимент с использованием анализатора качества электрической энергии и расчет потерь мощности и активной электроэнергии

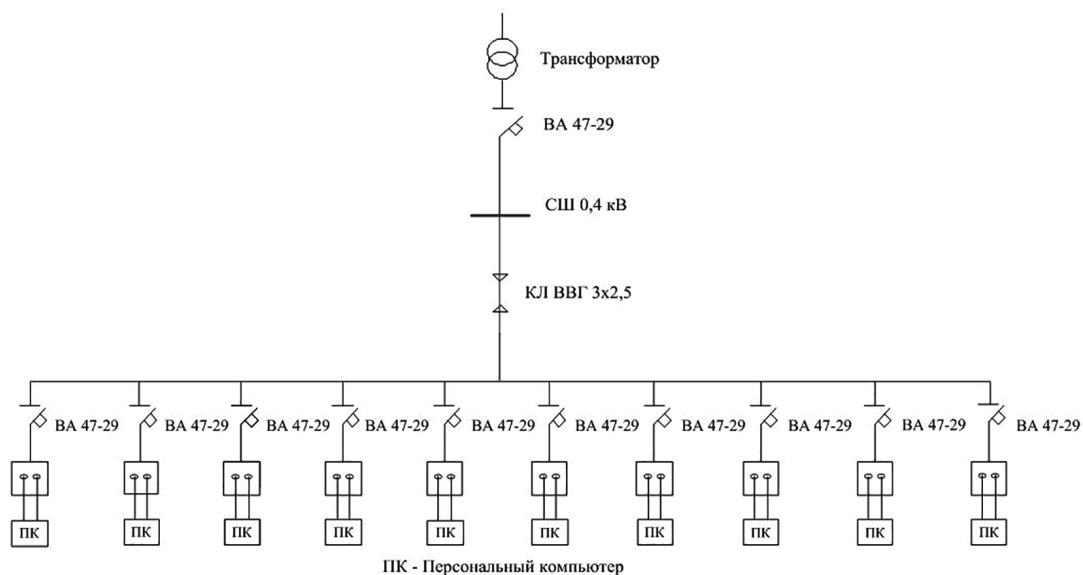


Рис. 1. Схема СЭС компьютерного класса

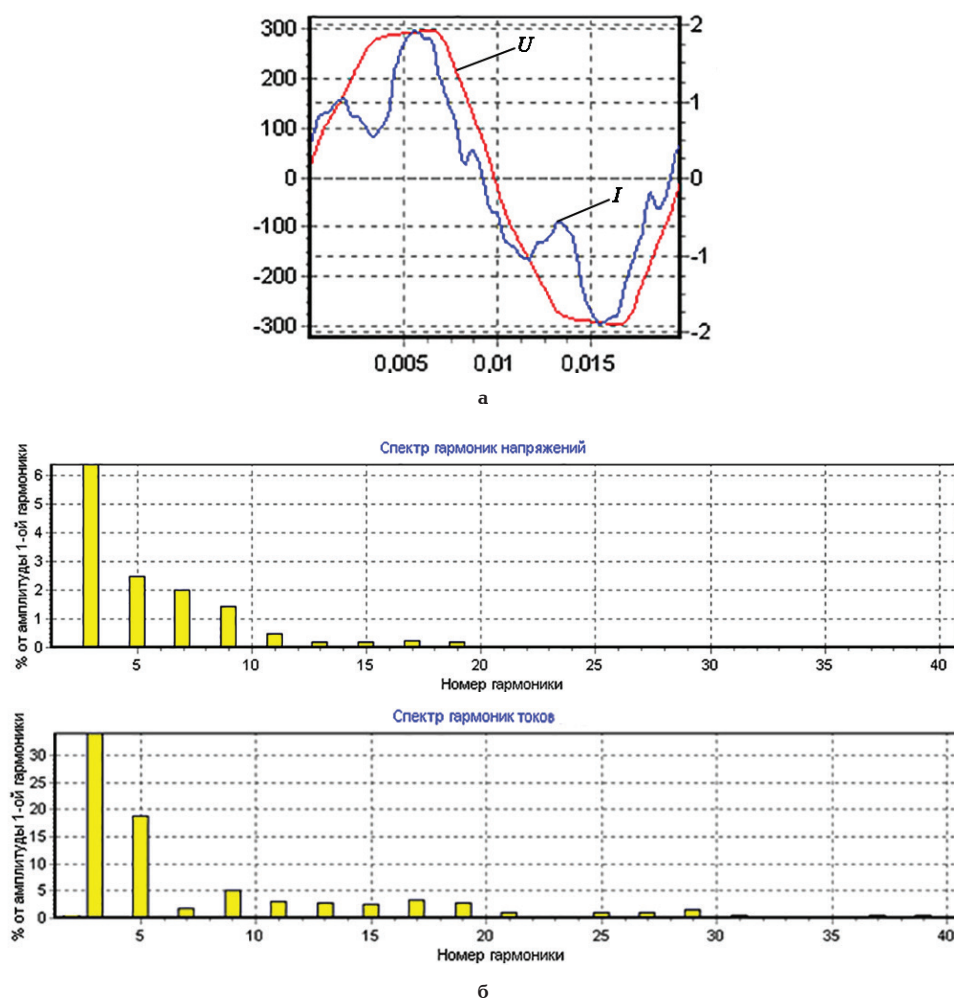


Рис. 2. Осциллограммы напряжения, тока, потребляемого компьютерным классом (а), и спектры гармоник напряжений, токов (б)

гии был произведен с использованием данных, полученных при работе ПК, расположенных в компьютерном классе учебного заведения.

Для компьютерного класса одного из высших учебных заведений города Омска были произведены замеры ПКЭ и определен амплитудно-частотный

спектр гармоник. Для подключения анализатора качества электрической энергии была использована секция шин 0,4 кВ (рис. 1).

Анализируя амплитудно-частотные спектры (рис. 2), можно сказать, что наиболее существенный вклад в искажение синусоидального сигнала

Таблица 1

Значения коэффициента K_U (класс напряжения 0,4 кВ)

Номер гармоники	Значения коэффициента K_U	
	допустимые согласно ГОСТ 32144-2013, %	полученные в результате эксперимента, %
3	5	6,37
5	6	2,48
7	5	2,02
9	1,5	1,53
11	3,5	0,47
13	3	0,19
15	0,3	0,2
17	2	0,23
19	1,5	0,19

напряжения вносят 3, 5, 7, 9 и 11 гармоники. Значения коэффициента K_U (допустимые по ГОСТ 32144-2013 и фактически полученные при проведении эксперимента) приведены в табл. 1.

Анализ коэффициентов n -й гармонической составляющей, полученных в ходе эксперимента (табл. 1, рис. 2), приводит к выводу, что значения коэффициентов соответствуют допустимым значениям, регламентированных ГОСТ 32144-2013 для 5, 7, 11, 15, 17 и 19 гармоник и не соответствуют для 3 и 9 гармоник. Кроме того, ГОСТ 32144-2013 накладывает значительные ограничения в отношении коэффициентов n -й гармонической составляющей для гармоник, кратных трем, по причине их суммирования при протекании по нулевому рабочему проводнику в несимметричном режиме работы СЭС.

Выполним расчет потерь мощности и активной энергии для СЭС, приведенной на рис. 1, на основании полученных в ходе эксперимента данных.

Пусть СЭС, питающая компьютерный класс учебной аудитории, работает в нестационарном несинусоидальном режиме. Это видно из графиков нагрузок, приведенных на рис. 3.

Нестационарность режима работы СЭС в ходе эксперимента была смоделирована путем подключения (отключения) различных ПК к сети. Таким

образом, во время проведения исследования в работе одновременно могли находиться как все ПК, так и их часть. Поэтому в настоящем исследовании расчет потерь ведется при допущении, что все ПК учебной аудитории находились в работе (или максимуму потребляемой мощности нелинейной нагрузкой). Это соответствует моменту времени 11:52.35 (рис. 3).

Общеизвестно, что активное и индуктивное сопротивление кабельной линии электропередачи на промышленной частоте сети может быть определено по удельным параметрам:

$$R_{кЛ} = r_0 L, \quad (1)$$

$$X_{кЛ} = x_0 L, \quad (2)$$

где r_0 , x_0 — соответственно удельное активное и удельное индуктивное сопротивление кабельной линии, Ом/км; L — длина кабельной линии, км.

При наличии высших гармоник в питающей сети индуктивное сопротивление элемента СЭС (каким является кабельная линия) является функцией частоты:

$$X_{кЛ(n)} = n X_{кЛ}, \quad (3)$$

где $X_{кЛ(n)}$ — индуктивное сопротивление кабельной линии на частоте n -й гармоники сети; $X_{кЛ}$ — индуктивное сопротивление кабельной линии на промышленной частоте сети (при 50 Гц); n — порядок гармоники.

Потери активной мощности на частоте n -й гармоники сети определяются по выражению (4)

$$\Delta P_n = I_n^2 R_{кЛ}. \quad (4)$$

Потери активной мощности в кабельной линии электропередачи, обусловленные прохождением тока основной частоты сети и высших гармоник, могут быть рассчитаны следующим образом:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N I_n^2 R_{кЛ}, \quad (5)$$

где n — порядок гармоники; N — гармоники, участвующие в расчете потерь активной мощности; I_n — ток n -й гармоники; $R_{кЛ}$ — активное сопротивление кабельной линии электропередачи на частоте.

Здесь и далее при расчетах потерь мощности и энергии не учитывалось влияние поверхностного эффекта и эффекта близости.

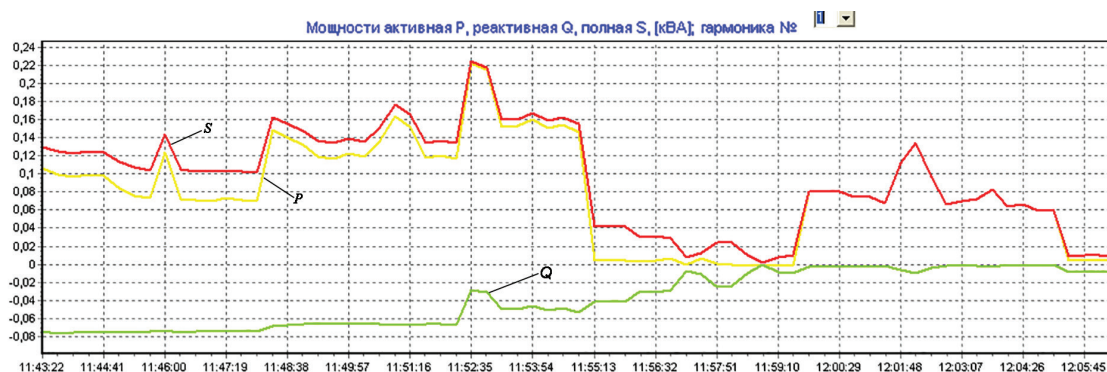


Рис. 3. График электрических нагрузок исследуемой СЭС

Результаты расчета потерь мощности и активной энергии при наличии высших гармоник в СЭС за время проведения эксперимента ($t = 23$ минуты)

n	ΔP_n , Вт	ΔQ_n , вар	ΔS_n , В·А	ΔW_n , Вт·ч	n	ΔP_n , Вт	ΔQ_n , вар	ΔS_n , В·А	ΔW_n , Вт·ч
1	21,7	0,27	21,7	8,33	21	7,59	1,96	7,84	2,91
3	11,49	0,42	11,5	4,41	23	7,5	2,12	7,79	2,88
5	9,59	0,59	9,6	3,68	25	7,58	2,33	7,93	2,91
7	7,67	0,66	7,7	2,95	27	7,58	2,51	7,99	2,91
9	8,01	0,89	8,06	3,08	29	7,64	2,72	8,11	2,93
11	7,79	1,05	7,86	2,99	31	7,52	2,86	8,05	2,89
13	7,76	1,24	7,86	2,98	35	7,5	3,23	8,17	2,88
15	7,75	1,43	7,88	2,97	37	7,51	3,41	8,25	2,88
17	7,83	1,63	7,99	3	39	7,51	3,6	8,33	2,89
19	7,78	1,82	7,99	2,99					

Потери реактивной мощности на частоте n -й гармоники сети равны:

$$\Delta Q_n = I_n^2 X_{K\Lambda(n)} \quad (6)$$

Суммарные потери реактивной мощности рассчитываются аналогично по вышеприведенному выражению с той лишь разницей, что в него следует подставить значение индуктивного сопротивления, вычисленного по уравнению (3), т.е.

$$\Delta Q_\Sigma = \sum_{n=1}^N I_n^2 X_{K\Lambda(n)} \quad (7)$$

Потери полной мощности в кабельной линии равны на частоте n -й гармоники:

$$\Delta S_n = \sqrt{\Delta P_n^2 + \Delta Q_n^2} \quad (8)$$

Потери активной электроэнергии в кабельной линии электропередачи при наличии высших гармоник в сети могут быть определены по формуле (9):

$$\Delta W_{\Sigma n} = \sum_{n=1}^N I_n^2 R_{K\Lambda} t \quad (9)$$

где t — время, за которое производится расчет потерь энергии (в первом случае — это время проведения эксперимента, которое составило 23 минуты, во втором — время работы компьютерного класса в течение года, которое было учтено приблизительно и составило 525 часов).

Результаты расчетов потерь активной, реактивной, полной мощности и активной энергии при наличии высших гармоник за время проведения эксперимента представлены в табл. 2, а годовые потери активной энергии — в табл. 3.

Суммарные потери активной энергии за год при работе компьютерного класса составили 86,79 кВт·ч.

Вычислим относительные погрешности определения потерь активной мощности и энергии при учете высших гармоник в СЭС.

Таблица 3

Результаты расчета годовых потерь активной энергии при наличии высших гармоник в СЭС

n	ΔW_n , кВт·ч	n	ΔW_n , кВт·ч
1	11,39	21	3,98
3	6,03	23	3,94
5	5,03	25	3,98
7	4,03	27	3,98
9	4,21	29	4,01
11	4,09	31	3,95
13	4,08	35	3,94
15	4,07	37	3,94
17	4,11	39	3,95
19	4,08		

Относительные погрешности расчета потерь активной мощности и энергии могут быть рассчитаны по выражениям (10) и (11).

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta P_\Sigma - \Delta P_1}{\Delta P_1} \cdot 100\% \quad (10)$$

$$\varepsilon_w = \frac{\Delta W_{\Sigma r} - \Delta W_{1r}}{\Delta W_{1r}} \cdot 100\% \quad (11)$$

где ΔP_Σ — суммарные потери активной мощности на основной частоте и высших гармониках; ΔP_1 — потери активной мощности на основной частоте сети; $\Delta W_{\Sigma r}$ — годовые потери активной энергии с учетом высших гармоник в сети; ΔW_{1r} — годовые потери активной энергии на промышленной частоте.

Сопоставляя результаты расчетов, приходим к выводу, что потери активной мощности от токов высших гармоник составляют 86,7 % от величины суммарных потерь мощности, реактивной — 99,2 %, полной — 87,3 % и их необходимо учитывать в расчетах. Аналогичная ситуация и с потерями активной энергии — они составили 86,9 % от общих (суммарных) потерь энергии при работе компьютерного класса в течение года.

Заключение. Мы выяснили, что в исследуемой СЭС наблюдается превышение K_U для 3 и 9 гармоник напряжения над значениями, регламентированными ГОСТ 32144-2013. По этой причине для рассматриваемого узла нагрузки необходимо предусмотреть установку фильтров высших гармоник для компенсации 3, 9 гармоник и «возвращения» соответствующих значений K_U в пределы ГОСТ. Тип фильтра (пассивный, активный или гибридный) и место его установки следует выбирать с учетом технико-экономического расчета всех возможных вариантов и принципа минимума приведенных затрат. Кроме того, применение фильтров высших гармоник приведет к уменьшению потерь мощности и активной электроэнергии в системе электроснабжения.

Библиографический список

1. Силкин Д. А. О резонансах высших гармоник в электрических сетях // Электротехнические комплексы и системы. 2013. № 21. С. 184–187.
2. Булатова В. М., Амирова С. С., Чекунов Н. И. Современные проблемы электроснабжения компьютерных и информационных систем // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 18. С. 245–248.
3. Степанов В. М., Базыль И. М. Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятия на потери электрической энергии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 12. Ч. 2. С. 27–31.
4. Кобелев А. В., Зыбин А. А. Современные проблемы высших гармоник в городских системах электроснабжения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2011. Т. 17, № 1. С. 187–191.
5. Вагин Г. Я., Севостьянов А. А., Солнцев Е. Б. [и др.]. Анализ влияния нелинейной однофазной нагрузки на значение тока в нулевом проводе // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 17–19.
6. Тульский В. Н., Карташев И. И., Симуткин М. Г. [и др.]. Оценка теплового режима кабеля, питающего нелинейную нагрузку // Промышленная энергетика. 2012. № 7. С. 42–45.
7. Цырук С. А., Янченко С. А. Гармонический анализ нелинейных электроприемников офисных центров // Промышленная энергетика. 2012. № 3. С. 54–61.
8. Цырук С. А., Янченко С. А., Рыжкова Е. Н. Моделирование основных источников несинусоидальности в бытовых электросетях // Вестник Московского энергетического института. 2013. № 3. С. 67–71.
9. Анчарова Т. В., Бодрухина С. С., Цырук С. А. [и др.] Оценка влияния эмиссии высших гармонических составляющих напряжения и тока от бытовых электроприемников на питающую сеть // Промышленная энергетика. 2012. № 9. С. 36–42.
10. Дед А. В., Сикорский С. П., Смирнов П. С. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 60–64.
11. 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. 19 с.
12. Гапиров Р. А., Осипов Д. С. Расчет потерь мощности в элементах системы электроснабжения с учетом высших гармоник и зависимости сопротивлений токоведущих частей от температуры // Промышленная энергетика. 2015. № 1. С. 16–21.
13. Осипов Д. С., Коваленко Д. В., Киселев Б. Ю. Расчет потерь энергии в кабельной линии электропередачи при наличии нелинейной нагрузки методом пакетного вейвлет-преобразования // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 84–89.

КОВАЛЕНКО Дмитрий Валерьевич, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 7587-8782

AuthorID (РИНЦ): 901108

ORCID: 0000-0003-4822-4145

AuthorID (SCOPUS): 57193410109

ResearcherID: R-7414-2017

СМИРНОВ Павел Сергеевич, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: Dmitrii_Kovalenko92@mail.ru

Для цитирования

Коваленко Д. В., Смирнов П. С. Учет влияния высших гармоник при расчетах потерь мощности и энергии, возникающих в кабельной линии электропередачи, при подключении к сети группы персональных компьютеров // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). С. 96–101. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-96-101.

Статья поступила в редакцию 22.08.2018 г.

© Д. В. Коваленко, П. С. Смирнов