

SPIN-код: 5237-6697

AuthorID (РИНЦ): 512774.

ORCID (SCOPUS) 0000-0001-5625-8869

СИКОРСКИЙ Сергей Петрович, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета элитного образования и магистратуры.

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

Адрес для переписки: ded_av@mail.ru

Для цитирования

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. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64.

Статья поступила в редакцию 05.02.2017 г.

© А. В. Дед, С. П. Сикорский, П. С. Смирнов

УДК 621.311:621.314

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-64-69

Д. В. КОВАЛЕНКО
Л. А. ФАЙФЕР
Б. Ю. КИСЕЛЁВ
А. О. ШЕПЕЛЕВ
П. С. СМОРНОВ
В. И. СУРОВЦЕВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСА ТОКОВ НА ВЫСШИХ ГАРМОНИКАХ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье дано описание имитационного моделирования резонанса токов, возникающего в системе электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности в нестационарных режимах работы и наличии электроприемников, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику. Кроме моделирования режима параллельного резонанса, возникающего на частотах, близких к частотам высших гармоник, предлагаемый алгоритм определяет все возможные резонансные частоты, на которых может выполняться условие параллельного резонанса при различных допущениях, а также относительную погрешность расчета для различных случаев: при учете всех составляющих комплексных сопротивлений; без учета активных составляющих сопротивлений; с учетом активной составляющей сопротивления трансформатора, но без учета сопротивлений нагрузок; без учета активной составляющей сопротивления трансформатора и без учета сопротивлений нагрузок. Цель предлагаемой работы: показать, как влияет учет (неучет) составляющих комплексных сопротивлений на результаты определения резонансных частот.

Ключевые слова: резонанс токов, резонансная частота несинусоидальные нестационарные режимы, батареи статических конденсаторов.

Влияние высших гармоник на элементы систем электроснабжения. Высшие гармоники напряжения и тока оказывают влияние на элементы системы электроснабжения.

Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются:

— увеличение токов гармоник вследствие параллельного резонанса (резонанса токов);

— снижение эффективности процессов генерации, передачи, использования электроэнергии;

— старение изоляции электрооборудования и сокращение его срока службы;

— ложное срабатывание устройств релейной защиты и автоматики.

Негативному влиянию высших гармоник как на отдельные элементы, так и на всю систему электроснабжения посвящено достаточно большое количество работ [1–4]. Значения коэффициентов высших гармонических составляющих регламентируются ГОСТ 32144-2013 [5].

В настоящей работе будет производиться математическое моделирование режима резонанса токов на частотах, близких к частотам высших гармоник.

Резонанс токов — это режим работы сети, содержащей индуктивные и емкостные составляющие, соединенные параллельно, при данном режиме суммарная реактивная проводимость неразветвленного участка равна нулю, т.е. имеет место следующее соотношение:

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2} = \frac{1/\omega C}{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}, \quad (1)$$

где L — индуктивность системы электроснабжения на частоте n -й гармоники сети; R_1 — активное сопротивление кабельной линии и нагрузки; R_2 — активное сопротивление конденсаторной батареи; C — емкость конденсаторной батареи; $\omega = 2\pi f$ — частота, на которой способен возникнуть резонанс токов.

При параллельном резонансе напряжение и ток совпадают по фазе, т.е. ток в системе будет иметь активный характер и в неразветвленном участке сети окажется значительно меньше, чем токи разветвленных участков [6]. Если в такой сети использовать конденсаторные батареи, тогда они будут работать со значительной токовой перегрузкой, которая за достаточно короткий промежуток времени приведет к дополнительному нагреву, разрушению изоляции, взбуханию секций (банок) конденсаторных батарей, что приведет, в конечном счете, к воспламенению и взрыву конденсаторных батарей. Следовательно, конденсаторные батареи при работе в таких режимах неспособны отработать свой нормативный срок.

Перегрузка конденсаторных батарей в РФ и странах СНГ регламентируется стандартами [7, 8], которые запрещают эксплуатацию конденсаторных батарей в том случае, когда токи, проходящие через конденсаторные батареи, превышают номинальные токи батареи в 1,3 раза.

За рубежом мы наблюдаем аналогичную ситуацию: согласно стандарту [9], действующее значение суммарного тока, проходящего через конденсаторную установку, не должно превышать 135 % от её номинального тока. В противном случае эксплуатация конденсаторной батареи запрещается стандартом.

Существуют различные подходы к определению резонансной частоты системы.

Авторы [10] предлагают учитывать полную проводимость всех элементов резонансного контура при расчете режима резонанса токов, т.е. под выражением $Z_{sys} = R_{sys} + jX_{sys}$ они понимают активные и индуктивные сопротивления элементов, входящих в систему электроснабжения: трансформатора, нагрузки, воздушных и кабельных линий и т.д. Кроме того, под емкостным элементом они понимают наличие в системе электроснабжения конденсаторных батарей.

Упомянутый выше подход получил свое развитие в [11, 12]. В этих работах дополнительно учитывались емкостные проводимости кабельных линий, которые (так же как и проводимость конденсаторной батареи) могут влиять на определение резонансной частоты контура. С одной стороны, мы имеем чисто активно-индуктивные элементы системы электроснабжения: трансформаторы, нагрузки; с другой — емкостные — конденсаторные батареи,

емкости кабельных линий относительно земли. Таким образом, мы получаем контур, в котором может возникнуть режим резонанса токов на частотах, близких к частотам высших гармоник.

Однако существует и альтернативный подход к решению этой задачи. Согласно ему, авторы работы [12, 13] предлагают при расчете режима резонанса токов на высших гармониках учитывать полное сопротивление трансформатора и емкостное сопротивление конденсаторных батарей. Иными словами, авторы не учитывают влияние сопротивления нагрузки на резонансные частоты контура, образованными вышеперечисленными элементами системы электроснабжения.

Нетрудно заметить, что работа [12] является, с одной стороны, развитием подхода учета емкостных проводимостей кабельных линий, а с другой — не учитывает комплексное сопротивление нагрузки при расчете резонансной частоты системы электроснабжения.

Несмотря на достаточно большое количество работ, посвященных определению частоты, на которой возможно выполнение условия резонанса токов, ни в одной из работ [10–13] авторами не ставилась задача определения частот, на которых может возникнуть резонанс токов при переключении ступеней конденсаторных батарей. В отличие от [10–13] в настоящей работе было учтено изменение режима работы системы электроснабжения и произведен расчет резонансной частоты для каждого режима.

В работе [14] авторами была предпринята попытка создать алгоритм, с помощью которого можно было бы рассчитать резонансные частоты системы электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности. Также авторами было произведено пакетное вейвлет-преобразование сигнала тока, которое позволило выявить области частот, на которых выполнялось условие резонанса токов (1). В работах [15, 16] показано применение вейвлет-преобразования для решения задач электроэнергетики.

Целью настоящей работы является модернизация алгоритма, предложенного в работе [14]. Модернизация алгоритма произведена в следующих направлениях: адаптация алгоритма для расчета режима резонанса в более сложных (по конфигурации) системах электроснабжения; разработка нескольких, так называемых «частичных алгоритмов», объединенных общими исходными данными; сопоставление результатов, полученных в результате работы этих частичных алгоритмов, и расчет погрешностей при определении резонансных частот системы электроснабжения частичными алгоритмами.

Результаты имитационного моделирования.

Рассмотрим возможность возникновения параллельного резонанса в системе электроснабжения, изображенной на рис. 1.

В систему электроснабжения входят следующие элементы: цеховой трансформатор (Т) ТМГ-630 номинальной мощностью 630 кВ·А, питающий три нелинейные нагрузки (S_1, S_2, S_3). Нелинейные нагрузки получают питание от общей системы сборных шин. Роль нелинейных нагрузок выполняет частотно-регулируемый электропривод, генерирующий широкий спектр высших гармоник в питающую сеть. Кроме нагрузок, к системе сборных шин подключена конденсаторная батарея, предназначенная для получения оптимального коэффициента активной

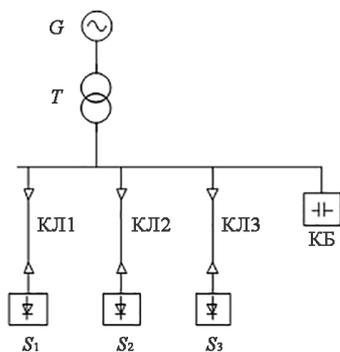


Рис. 1. Система электроснабжения

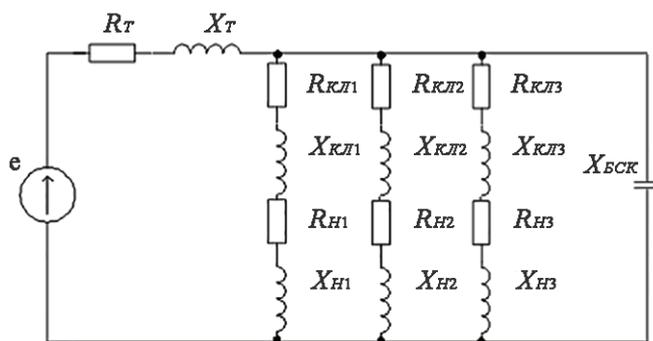


Рис. 2. Схема замещения системы электроснабжения на промышленной частоте сети

Таблица 1

Параметры элементов системы электроснабжения

Нагрузка		Параметры кабельных линий				Параметры трансформатора ТМГ-630/10У1		
		Марка кабеля	R_0 , Ом/км	X_0 , Ом/км	$I_{\text{доп}}$, А			L, км
P_1 , кВт	159,5	ПвВГнг 4x95	0,193	0,012	316	0,18	R_T , мОм	0,0031
Q_1 , квар	133						X_T , мОм	0,0136
S_1 , кВ·А	207,6						S_T , кВ·А	630
P_2 , кВт	111,9	ПвВГнг 4x50	0,387	0,0625	217	0,27	U_1 , кВ	10
Q_2 , квар	81,9						U_2 , кВ	0,38
S_2 , кВ·А	138,7						U_K , %	5,5
P_3 , кВт	207,5	ПвВГнг 4x150	0,124	0,0596	410	0,12	I_X , %	2
Q_3 , квар	183,6						P_X , кВт	1,31
S_3 , кВ·А	277						P_K , кВт	7,6

мощности в сети (иными словами, конденсаторная батарея уменьшает переток реактивной мощности, проходящий от системы к нагрузкам S_1 , S_2 и S_3).

Схема замещения рассматриваемой системы электроснабжения на промышленной частоте питающей сети (при 50 Гц) приведена на рис. 2. В табл. 1 приведены параметры элементов схемы замещения, входящих в моделируемую систему электроснабжения [17].

На рис. 3а–г приведены схемы замещения моделируемой нами системы электроснабжения при наличии высших гармоник в питающей сети для четырех случаев:

— рис. 3а — при учете всех составляющих сопротивления (во внимание берется не только активно-индуктивное сопротивление питающего трансформатора, но и активно-индуктивные сопротивления всех нагрузок с активно-индуктивным сопротивлением кабельных линий);

— рис. 3б — без учета активных составляющих комплексных сопротивлений нагрузок и без учета активной составляющей комплексного сопротивления трансформатора;

— рис. 3в — без учета составляющих комплексных сопротивлений нагрузок, но с учетом активной

составляющей комплексного сопротивления трансформатора;

— рис. 3г — без учета составляющих комплексных сопротивлений нагрузок и без учета активной составляющей комплексного сопротивления трансформатора.

Полученные схемы замещения на высших гармониках необходимы для моделирования режима резонанса токов на частотах, близких к частотам высших гармоник питающей сети, и определения всех возможных частот, на которых может выполняться условие возникновения параллельного резонанса. Таким образом, можно сказать, что схемы замещения системы электроснабжения на высших гармониках сети, приведенные на рис. 3а–г, представляют из себя не что иное, как схемы резонансных контуров, в которых существует вероятность возникновения резонансных режимов.

На рис. 4 представлен график электрических нагрузок моделируемой системы электроснабжения (зависимости активной, реактивной и полной мощности с течением времени). Из графика, представленного на рис. 4, видно, что режим работы системы электроснабжения является нестационарным (доказательством нестационарности режима

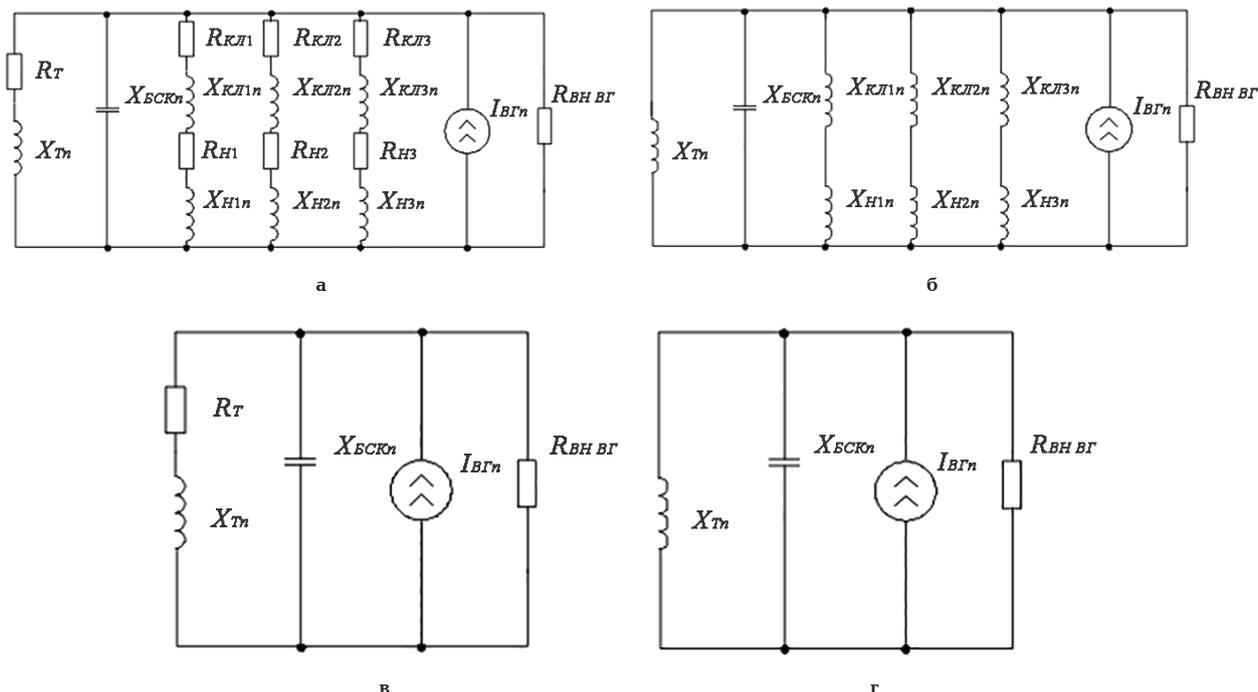


Рис. 3. Схемы замещения системы электроснабжения на высших гармониках

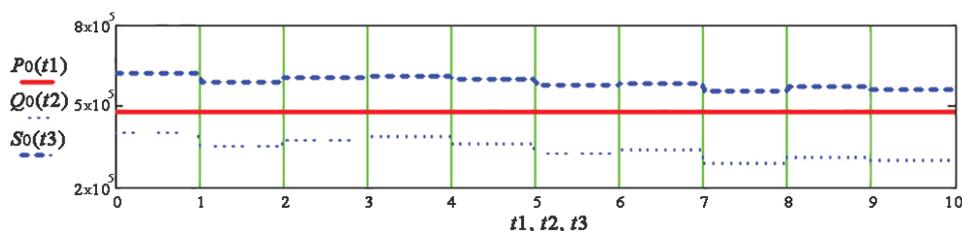


Рис. 4. График электрических нагрузок рассматриваемой системы электроснабжения

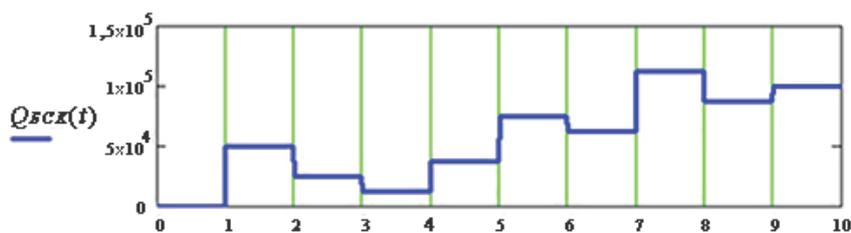


Рис. 5. График переключения ступеней конденсаторной батареи

является присутствие постоянных изменений в потреблении мощностей, наличие «ступенек» на графиках реактивной и полной мощности).

Нестационарность режима работы системы электроснабжения была достигнута переключением ступеней конденсаторной батареи, подключенной к узлу нагрузки (к системе сборных шин). График переключения ступеней конденсаторной батареи представлен на рис. 5. Для каждого режима работы (для каждой ступени конденсаторной батареи) предлагаемый алгоритм определяет частоту, на которой будет выполняться условие резонанса токов (равенство индуктивной и емкостной проводимостей системы). Резонансная частота системы вычислялась по предлагаемому в статье алгоритму для четырех случаев при следующих допущениях:

- при учете всех составляющих комплексных сопротивлений (f_{PE31});
- без учета активных составляющих комплексных сопротивлений нагрузок и без учета активной составляющей комплексного сопротивления трансформатора (f_{PE32});
- без учета составляющих комплексных сопротивлений нагрузок, но с учетом активной составляющей комплексного сопротивления трансформатора (f_{PE33});
- без учета составляющих комплексных сопротивлений нагрузок и без учета активной составляющей комплексного сопротивления трансформатора (f_{PE34}).

Путем проведения алгебраических преобразований уравнения (1) получаем, что резонансная

Результаты расчета резонансных частот системы электроснабжения

$Q_{\text{БСКн}}$, кВА	$f_{\text{РЕЗ1}}$, Гц	$f_{\text{РЕЗ2}}$, Гц	ε_2 , %	$f_{\text{РЕЗ3}}$, Гц	ε_3 , %	$f_{\text{РЕЗ4}}$, Гц	ε_4 , %
12,5	1484,28	1484,28	0	1457,22	1,823	1457,22	1,823
25	1049,47	1049,62	0,014	1030,37	1,82	1030,37	1,82
37,5	856,87	856,98	0,013	841,26	1,822	841,33	1,814
50	742,04	742,16	0,016	728,53	1,821	728,62	1,809
62,5	662,08	662,21	0,02	651,6	1,583	651,7	1,568
75	605,82	605,97	0,025	594,8	1,819	594,91	1,801
87,5	560,85	561,02	0,03	550,67	1,815	550,78	1,795
100	524,61	524,79	0,034	515,08	1,817	515,21	1,792
112,5	494,59	494,78	0,038	485,61	1,816	485,74	1,789

частота системы может быть выражена следующей формулой:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{L_{\Sigma n} - C_{\text{БСКн}} \cdot R_{\Sigma n}^2}{C_{\text{БСКн}} \cdot L_{\Sigma n}}}, \quad (2)$$

где R_{Σ} — активное сопротивление системы; $L_{\Sigma n}$ — индуктивность системы; $C_{\text{БСКн}}$ — емкость конденсаторной батареи (зависит от степени компенсации реактивной мощности).

Связь между емкостью конденсаторной батареи ($C_{\text{БСКн}}$) и вырабатываемой ею реактивной мощностью выражается простой связью:

$$C_{\text{БСКн}} = \frac{Q_{\text{БСКн}}}{2\pi f U_n^2}, \quad (3)$$

где U_n — номинальное напряжение сети; f — частота сети.

Результаты расчета резонансной частоты при различных допущениях представлены в табл. 2. Также в табл. 2 приводится относительная погрешность определения резонансной частоты, определяемая по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{|f_{\text{РЕЗ1}} - f_{\text{РЕЗn}}|}{f_{\text{РЕЗ1}}} \cdot 100, \quad (4)$$

где $n = 2, 3, 4$.

Выводы и заключение. В настоящей работе было выполнено имитационное моделирование системы электроснабжения при наличии электроприемников, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику.

Моделируемая система электроснабжения работала в нестационарном несинусоидальном режиме при изменении степени компенсации реактивной мощности, производимой с помощью конденсаторной батареи.

Для каждой ступени конденсаторной батареи по предлагаемому в статье алгоритму производилось вычисление частоты, на которой становилось воз-

можным выполнение условия параллельного резонанса при различных допущениях.

Из результатов расчетов, представленных в табл. 2, видно, что:

1) при неучете активной составляющей комплексных сопротивлений питающего трансформатора и нагрузки резонансная частота изменяется незначительно, следовательно, при выполнении оценочных («прикидочных») расчетов её можно не учитывать. В этом случае расчет резонансной частоты существенно упрощается, а погрешность расчета не превышает 0,5 %;

2) при неучете комплексных сопротивлений нагрузок в расчетах резонансная частота изменяется более существенно, чем в первом случае. Область возникновения резонанса токов может «сдвинуться» к гармоникам другого порядка и внести существенные погрешности в расчет, следовательно, параметры нагрузки следует учитывать при определении резонансной частоты;

3) при большей степени компенсации реактивной мощности (большей по мощности ступени конденсаторной батареи), частота возникновения резонанса токов смещается в область гармоник более низкого порядка, токи которых имеют большую амплитуду по сравнению с амплитудами токов гармоник более высокого порядка;

4) при любой степени компенсации реактивной мощности возможно выполнение условия резонанса токов на частотах, близких к частотам высших гармоник сети, что позволит при дальнейшей модернизации предлагаемого в статье алгоритма произвести с его помощью расчет параметров секций фильтра высших гармоник и принять решение о необходимости установки этого фильтра в систему.

Библиографический список

1. Лютаревич А. Г., Горюнов В. Н., Долингер С. Ю., Хацевский К. В. Вопросы моделирования устройств обеспечения качества электрической энергии // Омский научный вестник. 2013. № 1 (117). С. 168–173.

2. Горюнов В. Н., Осипов Д. С., Лютаевич А. Г. Расчет потерь мощности от влияния высших гармоник // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 2. С. 268–273.
3. Долингер С. Ю., Лютаевич А. Г., Горюнов В. Н. и [др.] Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 178–183.
4. Горюнов В. Н., Осипов Д. С., Лютаевич А. Г. Определенное управляющее воздействие активного фильтра гармоник // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 6. С. 20–24.
5. 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.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 10-е изд. М.: Гардарики, 2002. 638 с.
7. ГОСТ ИЕС 60931-1-2013. Конденсаторы шунтирующие силовые несамовосстанавливающегося типа для систем переменного тока на номинальное напряжение до 1000 В включительно. Ч. 1. Общие положения. Рабочие характеристики, испытания и номинальные параметры. Требования техники безопасности. Руководство по установке и эксплуатации. Введ. 2015–01–01. М.: Стандартинформ, 2015. 27 с.
8. ГОСТ ИЕС 61921-2013. Конденсаторы силовые. Конденсаторные батареи для коррекции коэффициента мощности при низком напряжении. Введ. 2015–01–01. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
9. IEEE Standard for Shunt Power Capacitors. IEEE Std. 18-2012, 2013. 69 p.
10. Huang Z., Xu W., Dinavahi V. R. A practical harmonic resonance guideline for shunt capacitor applications // IEEE Transactions on Power Delivery. 2003. Vol. 18, Issue 4. P. 1382–1387. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.817726.
11. Rahimi S., Wiechowski W., Rundrup M. [at al.] Identification of problems when using long high voltage AC cable in transmission system II: Resonance & Harmonic resonance // Transmission and Distribution Conference and Exposition. T&D. IEEE/PES. 2008. P. 1–8. DOI: 10.1109/TDC.2008.4517187.
12. Николаев А. А., Корнилов Г. П., Храмынин Т. Р. [и др.]. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2016. Т. 14, № 4. С. 96–105.
13. Петухов В. Резонансные явления в электроустановках зданий как фактор снижения качества электроэнергии // Новости электротехники. 2003. № 6 (24). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/20.php> (дата обращения: 07.02.2018).
14. Osipov D. S., Kovalenko D. V., Dolgikh N. N. Calculation of currents resonance at higher harmonics in power supply systems based on wavelet packet transform // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239492.
15. Файфер Л. А., Осипов Д. С., Еремин Е. Н., Долгих Н. Н. Применение пакетного вейвлет-преобразования для определения составляющих мощности при несинусоидальных режимах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 8 (115). С. 136–145.
16. Osipov D. S., Lyutarevich A. G., Gapirov R. A., Gorunov V. N., Bubenchikov A. A. Applications of wavelet transform for analysis of electrical transients in power systems: the review // In Przegląd elektrotechniczny. 2016. Vol. 92, no. 4. P. 162–165. DOI: 10.15199/48.2016.04.35.
17. Оборудование и электротехнические устройства систем электроснабжения: справ. / Под ред. В. К. Грунина. Омск, 2006. 268 с.

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

SPIN-код: 7587-8782

AuthorID (РИНЦ): 901108

Адрес для переписки: Dmitrii_Kovalenko92@mail.ru

ФАЙФЕР Лилия Андреевна, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 3072-4847

AuthorID (РИНЦ): 852340

КИСЕЛЁВ Богдан Юрьевич, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 4798-6140

AuthorID (РИНЦ): 828757

ШЕПЕЛЕВ Александр Олегович, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 8418-9944

AuthorID (РИНЦ): 827023

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

СУРОВЦЕВ Владислав Иванович, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: Dmitrii_Kovalenko92@mail.ru

Для цитирования

Коваленко Д. В., Файфер Л. А., Киселёв Б. Ю., Шепелев А. О., Смирнов П. С., Суровцев В. И. Моделирование резонанса токов на высших гармониках при нестационарном режиме работы системы электроснабжения // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 64–69. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-64-69.

Статья поступила в редакцию 09.02.2018 г.

© Д. В. Коваленко, Л. А. Файфер, Б. Ю. Киселёв, А. О. Шепелев, П. С. Смирнов, В. И. Суровцев