



DOI: 10.18721/JEST.25102
УДК 621.311.1.018.3

В.Н. Костин, В.А. Сериков

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

В программном комплексе Multisim выполнено исследование режимов работы системы электроснабжения 6–10/0,4 кВ, включающей линейную и нелинейную (выпрямитель) нагрузки и конденсаторную батарею на стороне низшего напряжения. Выявлены зависимости величин высших гармоник тока, генерируемых нелинейной нагрузкой, от степени компенсации реактивной мощности и соотношения мощностей линейной и нелинейной нагрузок. Оценена величина суммарного тока, протекающего через конденсаторную батарею, в режимах близких к резонансным. Установлено, что в таких режимах в интервале коммутации тока вентилями появляются апериодическая и колебательная составляющие, а гармоники тока, генерируемые выпрямителем, существенно уменьшаются по сравнению с режимами отсутствия резонанса. Показано, что в резонансных и близких к ним режимах качество напряжения не соответствует нормам. Проведено сравнение результатов моделирования для трехфазной и упрощенной однофазной моделей.

Ключевые слова: высшие гармоники, конденсаторные батареи, компьютерное моделирование, компенсация реактивной мощности, резонансные режимы.

Ссылка при цитировании:

В.Н. Костин, В.А. Сериков. Компьютерное моделирование режимов работы систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 19–29. DOI: 10.18721/JEST.25102.

V.N. Kostin, V.A. Serikov

Saint-Petersburg mining university, St. Petersburg, Russia

COMPUTER SIMULATION OF OPERATING POWER SUPPLY MODES WITH NON LINEAR LOAD

Study on the operating modes of a power supply system: 6–10/0.4 kV, with linear and non-linear (rectifier) loads and a capacitor battery on the low-voltage side, was performed in the Multisim software package. We have found the dependences of the current's higher harmonics, generated by a nonlinear load, on the level of compensation of reactive power and the power ratio of linear and nonlinear loads. The magnitude of the total current flowing through a capacitor battery in near resonance modes is evaluated. It has been established that non-periodic and oscillatory components appear in such modes in the current switching interval by the diodes, and the magnitudes of the current harmonics generated by the rectifier are significantly reduced compared to the absence of resonance modes. It is shown that the quality of the voltage does not correspond to the norms in resonance and near-resonance modes. A comparison of simulation results has been made between three-phase and simplified single-phase models.

Keywords: гармоники, конденсаторные батареи, компьютерное моделирование, компенсация реактивной мощности, резонансные режимы.

Citation:

V.N. Kostin, V.A. Serikov, Computer simulation of operating power supply modes with non linear load, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 19–29, DOI: 10.18721/JEST.25102.

Введение

Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии в системах электроснабжения – важная проблема современной электроэнергетики. От ее решения зависит повышение эффективности использования электрической энергии и надежности электроснабжения потребителей.

Практика работы промышленных предприятий [3, 13, 15, 16], а в настоящее время и крупных административных зданий, офисов и бизнес-центров [11, 12, 20] показывает, что сети электроснабжения напряжением 0,4 кВ насыщены высшими гармониками вследствие широкого использования в промышленности и городских электрических сетях низкого напряжения полупроводниковых преобразователей, искажающих ток и напряжение в сети и негативно влияющих на работу всего электрооборудования системы электроснабжения, особенно на конденсаторы.

Батареи конденсаторов, используемые для компенсации реактивной мощности и работающие при несинусоидальном напряжении, в ряде случаев выходят из строя из-за токовой перегрузки высшими гармониками. Наибольшая перегрузка конденсаторов возникает, когда индуктивность сети и емкость батареи образуют резонансный контур для одной из высших гармоник тока.

Исследование высших гармоник в системах электроснабжения посвящено много работ, в большинстве которых анализируются процессы растекания гармонических токов в упрощенной однофазной схеме, причем каждая высшая гармоника представляется источником тока бесконечной мощности, т. е. неизменной величиной [2, 6–8, 10]. В работах [4, 5, 9, 13] рассматриваются трехфазные схемы, однако и в них каждая гармоника моделируется тремя сдвинутыми по фазе источниками тока соответствующей частоты.

Авторам не известны работы, в которых бы рассматривались процессы формирования, изменения по величине и растекания токов выс-

ших гармоник в трехфазной системе электроснабжения с вентильным преобразователем – непосредственным источником этих гармоник.

Цель представляемой работы – получение основных количественных соотношений для гармонических токов с оценкой их негативного воздействия на оборудование системы электроснабжения с линейной и нелинейной (выпрямитель) нагрузками и конденсаторной батареей.

В качестве инструмента исследования принято компьютерное моделирование процессов в системе электроснабжения, представляемой как трехфазной, так и однофазной моделями.

Расчетные схемы

Рассмотрена схема электроснабжения, включающая трансформатор 6–10/0,4 кВ, работающий на линейную и нелинейную нагрузки и конденсаторную батарею для компенсации реактивной мощности линейной нагрузки. Исследование режима работы рассматриваемой системы электроснабжения выполнялось в программном комплексе промышленного стандарта Multisim, который обладает интерактивной схемотехнической средой для мгновенной визуализации и анализа режима электрических и электронных схем и интуитивно понятным интерфейсом.

Расчетные схемы в трехфазном и однофазном исполнении приведены на рис. 1. В схеме рис. 1, а трансформатор моделировался тремя фазными напряжениями V и активно-индуктивными сопротивлениями $L_t R_t$, линейная нагрузка – активно-индуктивными сопротивлениями $L_h R_h$, нелинейная нагрузка – мостовым диодным выпрямителем $D1–D6$ с сопротивлением нагрузки R_d и сглаживающим дросселем L_d , конденсаторная батарея – емкостями C_k .

В однофазной схеме [2, 6–8, 10] задавались величина тока n -й гармоники I_n , сопротивления фазы трансформатора $L_t R_t$ и линейной нагрузки $L_h R_h$, емкость фазы конденсаторной батареи C_k .

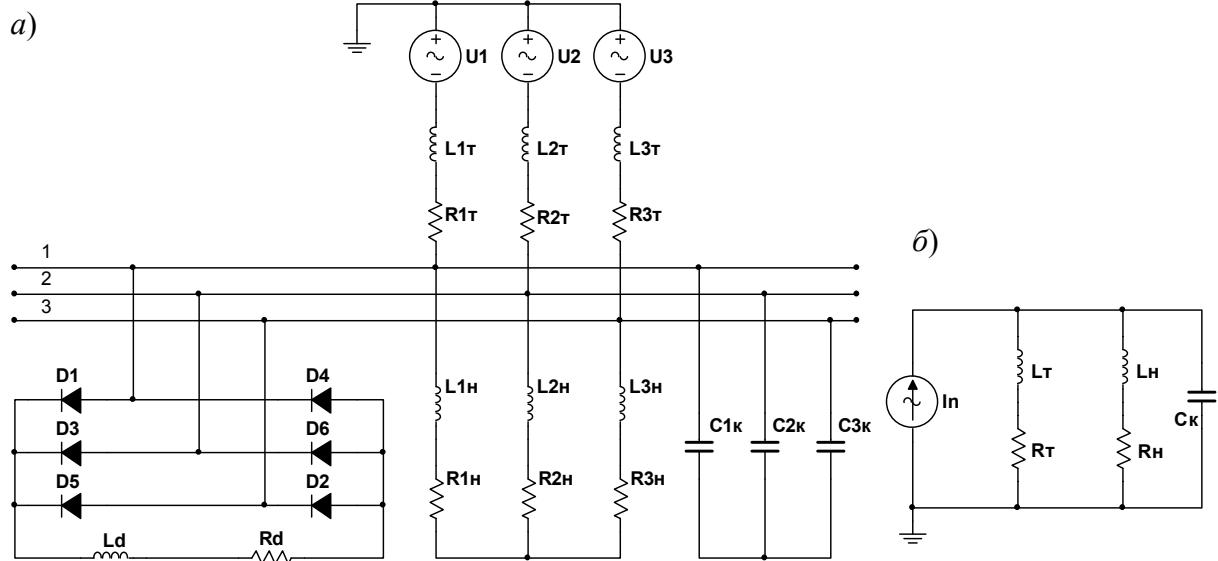


Рис. 1. Трехфазная (а) и однофазная (б) модели схемы электроснабжения в Multisim
Fig. 1. Three-phase (a) and single-phase (b) power supply circuit models in Multisim

Исследования проводились для типового ряда мощностей трансформаторов 6–10/0,4 кВ·А: 250, 400, ... 2500 кВ·А. Для разных трансформаторов результаты моделирования качественно не отличались. Некоторое количественное различие результатов было обусловлено изменением напряжения короткого замыкания U_k от 4,5 до 6 % при увеличении номинальной мощности трансформатора.

Ниже приводятся результаты моделирования для трансформатора номинальной мощности $S_{\text{т,ном}} = 1000 \text{ кВ·А}$ ($U = 230 \text{ В}$, $L_t = 28 \text{ мГн}$, $R_t = 2 \text{ мОм}$). Для обобщенности результатов моделирования все регулируемые мощности представлены в относительных единицах по отношению к номинальной мощности трансформатора: мощность нелинейной нагрузки $P_d^* = P_d / S_{\text{т,ном}}$; мощность линейной нагрузки $S_h^* = S_h / S_{\text{т,ном}}$; мощность конденсаторной батареи $Q_k^* = Q_k / S_{\text{т,ном}}$.

Гармоники тока, генерируемые выпрямителем

Основу вентильных преобразователей (выпрямители, инверторы, преобразователи частоты и др.) составляют полупроводниковые приборы (вентили), являющиеся нелинейны-

ми элементами. Переключения (коммутации) вентилей при нормальной работе преобразователя вызывают потребление из питающей сети несинусоидального тока, вследствие чего происходит искажение синусоидальности напряжения сети [17, 19].

При идеально слаженном выпрямленном токе I_d на выходе выпрямителя форма фазного тока i на его входе близка к прямоугольной с интервалом проводимости 120° в течение одного полупериода промышленной частоты. Разложение такой зависимости в ряд Фурье дает выражение

$$i = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi} \left[\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \right. \\ \left. - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \dots \right], \quad (1)$$

из которого видно, что, кроме основной (первой) гармоники с частотой питающей сети ω , фазный ток содержит высшие гармоники порядка $n = 6k \pm 1$, где $k = 1, 2, \dots$. Такие гармоники называются каноническими.

Для инженерных расчетов, например по схеме рис. 1, б, амплитуда n -й гармоники в соответствии с выражением (1) может, как это

принято в [2, 3, 10] задаваться величиной $I_n = I_1/n$, где I_1 – амплитуда первой гармоники. Однако при увеличении нагрузки выпрямителя форма фазного тока становится ближе к трапециoidalной вследствие увеличения интервала коммутации тока. Следовательно, амплитуды высших гармоник тока меняются по величине.

Исследование влияния длительности γ интервала коммутации на величины амплитуд гармоник выполнено в [3], где на основании достаточно сложных формул построены зависимости $I_n = f(\gamma)$.

На практике, как правило, задается или известна нагрузка выпрямителя. Поэтому по схеме рис. 1, *a* выполнено исследование зависимости величин высших гармоник тока от нагрузки выпрямителя.

При изменении нагрузок P_d^* и S_h^* снимались осцилограммы фазного тока на выходе выпрямителя с дальнейшим автоматическим разложением в программной среде Multisim кривой этого тока в ряд Фурье.

В результате компьютерного моделирования установлено, что при изменении нелинейной нагрузки трансформатора P_d^* от 0 до 1 относительные амплитуды гармоник $I_n^* = I_n/I_1$ практически линейно уменьшаются:

- 5-я гармоника на 10% (от 0,2 до 0,18);
- 7-я гармоника на 15% (от 0,14 до 0,12);
- 11-я гармоника на 40% (от 0,09 до 0,06);
- 13-я гармоника на 50% (от 0,077 до 0,034).

В указанном диапазоне изменения нелинейной нагрузки подключение линейной нагрузки S_h^* практически не изменяло величины высших гармоник. Незначительное отличие было обусловлено некоторым снижением напряжения на выходе трансформатора при подключении линейной нагрузки.

Таким образом, для получения более точных результатов моделирования процессов в схеме рис. 1, *b* следует учитывать зависимость амплитуды высших гармоник тока от нагрузки выпрямителя.

Влияние выпрямителя на качество напряжения питающей сети

Оценка влияния нелинейной нагрузки на качество напряжения питающей сети выполнялась по трехфазной схеме (рис. 1, *a*) при отключенной конденсаторной батарее C_k . Изменились мощности нелинейной нагрузки (сопротивление R_d) и линейной нагрузки (параметры $L_h R_h$). Оценивался суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U , автоматически определяемый в программной среде Multisim после разложения в ряд Фурье периодической кривой фазного напряжения на выходе трансформатора.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 значения K_U , усредненные на интервалах времени 10 мин., не должны превышать 8 % в течение 95 % времени за одну неделю и 12 % в течение 100 % времени также за одну неделю.

Результаты моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние нелинейной нагрузки P_d^* на коэффициент K_U гармонических искажений напряжения на выходе трансформатора

Table 1

Influence of non-linear loads P_d^* at the value higher harmonic K_U of the low-voltage side of transformation

P_d^*	При отсутствии линейной нагрузки ($S_h = 0$)	При полной загрузке трансформатора нелинейной и линейной нагрузками	
		S_h^* , о.е. (при $\cos \varphi_h = 0,85$)	K_U , %
1	10,25	0	10,25
0,75	9,1	0,25	9,2
0,66	7,15	0,33	7,65
0,5	6,3	0,5	6,75
0,25	3,6	0,75	3,95

Как видно из табл. 1, при загрузке трансформатора только нелинейной нагрузкой требования к качеству напряжения выполняются при загрузке примерно до 70 %.

Таблица 2

Мощности Q_k конденсаторных батарей, вызывающие резонанс на гармониках n

Table 2

Capacitor Q_k batteries power causing resonance for harmonics n

$S_{t\text{ном}}$, кВ·А	U_k , %	Q^*_k , о.е.					
		$n = 5$	$n = 7$	$n = 11$	$n = 13$	$n = 17$	$n = 19$
250 и 400	4,5	0,89	0,45	0,18	0,13	0,08	0,06
630 и 1000	5,5	0,73	0,37	0,15	0,11	0,06	0,05
1600 и 2500	6,0	0,67	0,34	0,14	0,10	0,06	0,05

Соотношение нелинейной и линейной нагрузок при полной загрузке трансформатора изменялось. Видно небольшое увеличение коэффициента K_U при введении линейной нагрузки, что, по-видимому, объясняется некоторым уменьшением первой гармоники напряжения при увеличении нагрузки трансформатора. Однако и в этом случае требования к качеству напряжения выполняются при величине нелинейной нагрузки, не превышающей 70 %.

Перегрузки конденсаторов от высших гармоник

Известно, что компенсация реактивной мощности позволяет снизить потери напряжения и мощности в системах электроснабжения. Чаще всего компенсация выполняется подключением параллельно линейной нагрузке конденсаторных батарей. Однако в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой такая компенсация создает ряд проблем [1, 18, 20]: искажение формы питающего напряжения; резонансные явления на частотах высших гармоник, приводящие к токовой перегрузке конденсаторов; дополнительные потери напряжения и мощности в трансформаторах, кабелях распределительной сети и электрических машинах; вибрацию электрических машин и др.

Далее основное внимание уделено оценке величин высших гармоник тока, анализу резонансных явлений на частотах высших гармоник и токовой перегрузке конденсаторных батарей.

По выражению

$$Q^* = \frac{100}{U_k [\%] \cdot n^2} \quad (2)$$

расчитаны в относительных единицах мощности конденсаторных батарей, при которых возникает резонансный режим для канонических гармоник $n = 6k \pm 1$. Индуктивности системы, питающей трансформатор, и кабельных связей напряжением 0,4 кВ не учитывались. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Различие значений Q_k^* для приведенной шкалы номинальных мощностей трансформаторов обусловлено возрастающими с мощностью значениями напряжения короткого замыкания U_k .

Очевидно, что конденсаторные батареи, близкие по мощности к Q_k , указанным в табл. 2, нецелесообразно устанавливать для компенсации реактивной мощности. При необходимости же установки конденсаторной батареи, близкой по мощности к указанным в табл. 2 Q_k , следует использовать конденсаторные установки с защитными антрезонансными дросселями [14].

Следует отметить, что в рассматриваемой схеме электроснабжения в соответствии с табл. 2 резонансные явления на 5-й гармонике практически невозможны, поскольку мощность конденсаторных батарей, как правило, не принимается равной 67 % и более от номинальной мощности трансформатора. Резонанс на 7-й гармонике маловероятен, т. к. здесь «опасная» мощность батареи составляет от 34

до 45 % мощности трансформатора. А вот появление резонанса на 11-й и более высоких гармониках имеет большую вероятность, поскольку «опасная» мощность батареи здесь не превышает 20 % мощности трансформатора.

В результате компьютерного моделирования по схеме рис. 1, *a* установлено, что в режимах работы на нелинейную нагрузку, близких к резонансному, суммарный ток, протекающий через конденсаторы, может в два и более раза превышать их номинальный ток (коэффициент перегрузки $K_{\text{пер}} > 2$), а амплитуды токов высших гармоник могут превышать амплитуду тока основной гармоники.

В качестве примера на рис. 2 приведены осциллограмма тока через конденсаторы при резонансе на 11-й гармонике ($P_d^* = 0,25$; $S_h^* = 0,25$; $\cos\varphi = 0,85$; $Q_k^* = 0,15$) и диаграмма разложения в ряд Фурье тока в конденсаторной батарее. Видно, что амплитуда тока 11-й гармоники более чем в 1,5 раза превышает амплитуду тока основной гармоники.

В табл. 3 приведены результаты моделирования гармоник тока, генерируемых выпрямителем и протекающих через конденсаторную батарею при резонансе на 13-й гармонике ($P_d^* = 0,4$; $S_h^* = 0,3$; $\cos\varphi = 0,85$; $Q_k^* = 0,11$). Видно, что токовая перегрузка конденсаторов недопустима.

Результаты моделирования показали, что при значениях $Q_k^* < 0,1$ практически не удается уйти от резонансных явлений на частотах 13-й гармоники и выше. Такая ситуация может сло-

житься при выборе для компенсации реактивной мощности широко применяемых в системах электроснабжения ступенчато регулируемых конденсаторных батарей. При уменьшении линейной нагрузки, например в ночное время, часть ступеней батареи отключается и ее мощность уменьшается до величины, приводящей к резонансу на 13-й и более высоких гармониках. Как показали результаты моделирования, при уменьшении мощности конденсаторной батареи до $Q_k^* = 0,025–0,05$ суммарный ток через конденсаторы может в три и более раз превышать их номинальный ток ($K_{\text{пер}} > 3$). Очевидно, что в таких случаях необходимо применять конденсаторные батареи с антирезонансными дросселями [14].

Влияние резонанса на процесс коммутации тока, величины гармоник выпрямителя и качество напряжения

Результаты моделирования по трехфазной модели показали, что в резонансных и близких к ним режимах относительные амплитуды высших гармоник тока, генерируемых выпрямителем (см. табл. 3), заметно меньше величин $I_n^* = I_n / I_1$, получаемых по выражению (1), которые обычно принимают в технической литературе при расчетах гармоник тока в конденсаторах по однофазной схеме [2, 3, 10]. Такое уменьшение нельзя объяснить снижением амплитуды гармоник с увеличением нагрузки выпрямителя при отсутствии конденсаторных батарей.

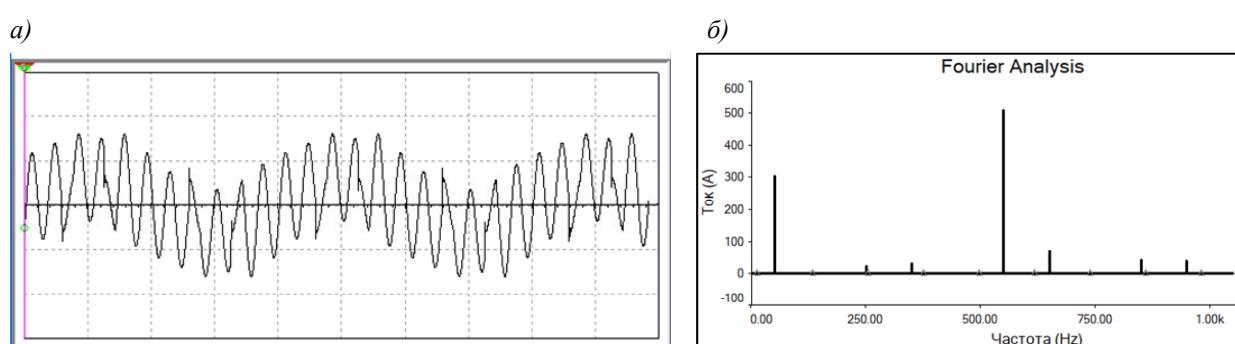


Рис. 2. Ток через конденсаторы при резонансе на 11-й гармонике (*а*) и его гармонический состав (*б*)

Fig. 2. Current through capacitors at resonance at the 11th harmonic (*а*) and its harmonic composition (*б*)



Таблица 3

Гармоники тока выпрямителя и тока конденсаторной батареи, мощность которой вызывает резонанс на 13-й гармонике*

Table 3

The currents harmonics of the rectifier and capacitor battery, whose power cause resonance at the 13th harmonic

n	Амплитуды гармоник тока выпрямителя		Амплитуды гармоник тока конденсаторной батареи		$I_{\kappa\Sigma}$, A	$K_{\text{пер.}}$, о.е.
	A	о. е.**	A	о. е.**		
1	840	1	210	1		
5	135	0,16	23	0,11		
7	76	0,09	30	0,14	341	2,18
11	29	0,034	60	0,27		
13	25	0,03	400	1,9		

* $I_{\kappa \text{ном}} = 156$ А

** За 1 о.е. принята величина 1-й гармоники

Для оценки влияния резонанса на величины гармоник тока, генерируемых выпрямителем, по результатам компьютерного моделирования (схема рис. 1, a) были построены

ны зависимости $I_n/I_1 = f(Q_k^*)$. На рис. 3 такая зависимость приведена для $P_d^* = 0,3$ в отсутствие линейной нагрузки ($S_h = 0$). Видно, что при резонансе на каждой гармонике тока наблюдается «провал» всех гармоник. Как показали результаты моделирования, линейная нагрузка ($S_h \neq 0$) незначительно уменьшает величину этих «провалов» и несколько сдвигает их вправо вследствие уменьшения эквивалентной индуктивности трансформатора и линейной нагрузки.

Уменьшение величин высших гармоник тока, генерируемых выпрямителем при резонансных режимах, связано, вероятно, с изменением формы тока в интервале его коммутации при переключении вентилей выпрямителя. На рис. 4 приведены осциллограммы переходных процессов в интервале проводимости одного вентиля моста в течение одного полупериода основной частоты. Включение очередного вентиля начинается при изменении на положительный знак линейного приложенного к нему напряжения (черные лучи осциллограммы *a* и верхних осциллограмм *b* и *c*).

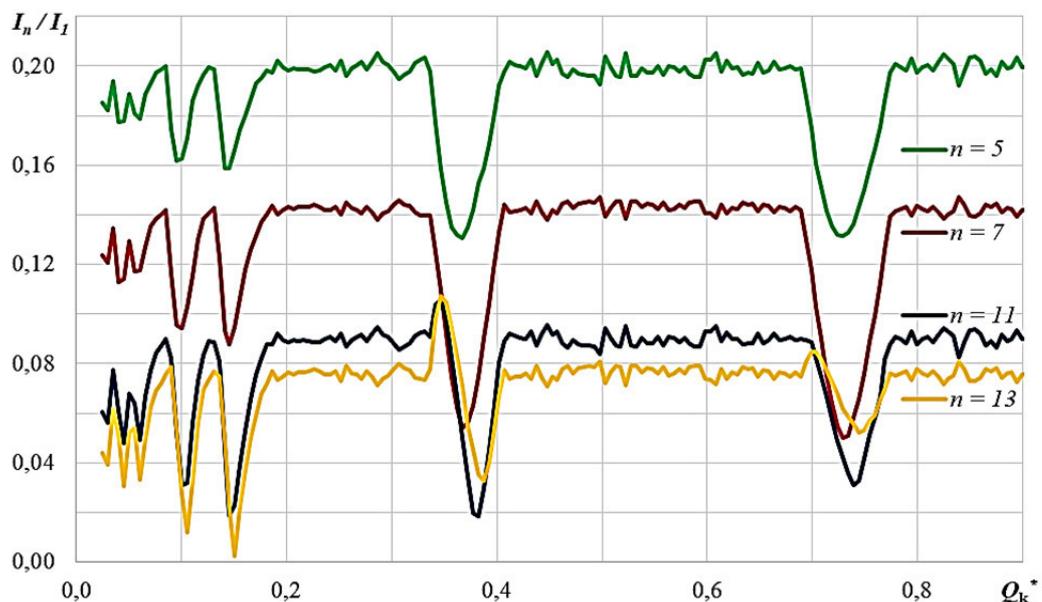
Рис. 3. Зависимости амплитуд гармоник тока от мощности батареи конденсаторов Q_k^*

Fig. 3. Dependencies of current harmonic amplitudes on batteries power

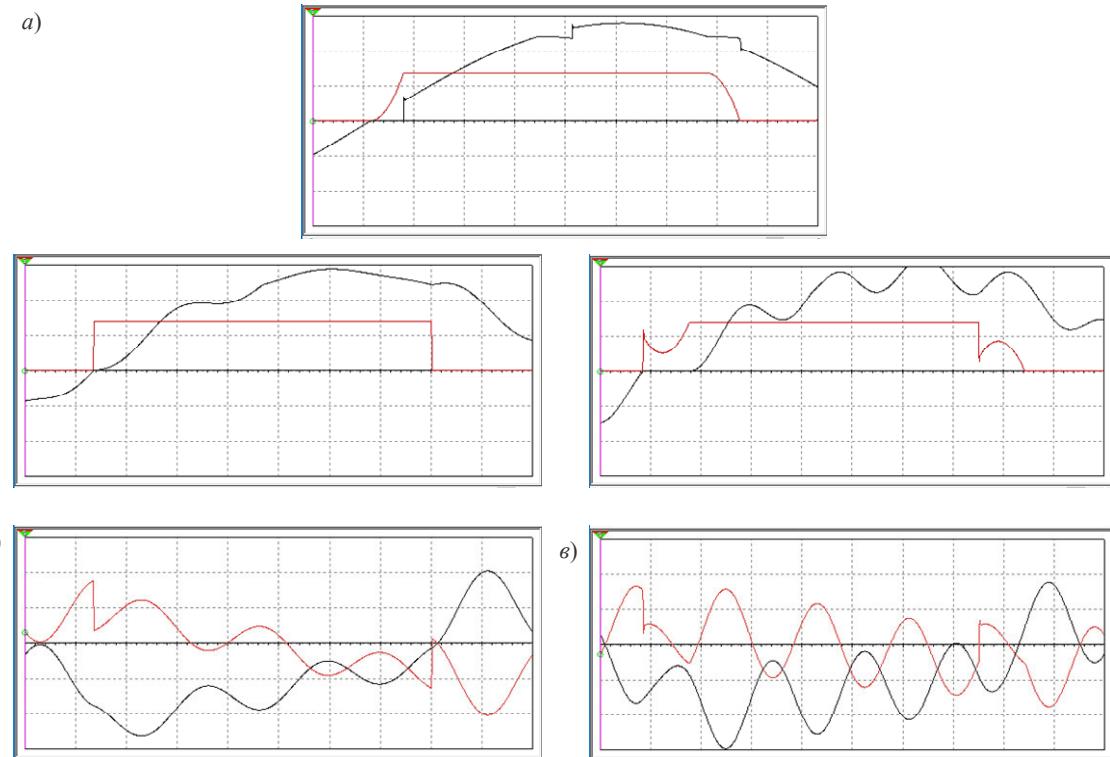


Рис. 4. Влияние мощности конденсаторной батареи на процесс коммутации тока:
 $a - Q_k^* = 0; \gamma \approx 0,5 \text{ мс}; b - Q_k^* = 0,25; \gamma \approx 0 \text{ мкс}; c - Q_k^* = 0,15; \gamma \approx 1 \text{ мс}$ (резонанс на 11-й гармонике)

Fig. 4. The effect of capacitor bank power on the current switching process:

$a - Q_k^* = 0; \gamma \approx 0,5 \text{ мс}; b - Q_k^* = 0,25; \gamma \approx 0 \text{ мкс}; c - Q_k^* = 0,15; \gamma \approx 1 \text{ мс}$ (resonance on the 11th harmonic)

При отсутствии конденсаторной батареи форма тока близка к трапеции (осциллограмма *a*). Интервал коммутации тока I_d вентилями выпрямителя $\gamma \approx 0,5 \text{ мс}$. Длительность этого интервала при заданном токе I_d обусловлена величиной индуктивности L_t трансформатора [3]:

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2\omega L_m I_d}{\sqrt{6}U}, \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f = 314$; U – фазное напряжение трансформатора.

При подключении батареи, но отсутствии резонанса интервал коммутации γ уменьшается практически до нулевого значения (см. верхнюю осциллограмму *b*). На нижней осциллограмме *b* красный луч соответствует фазному току конденсаторной батареи, а черный луч – напряжению на этой фазе. Видно,

что интервал коммутации γ здесь определяется лишь постоянной времени цепи конденсаторной батареи.

При резонансе и близких к нему режимах процесс коммутации затягивается до $\gamma \approx 1 \text{ мс}$ из-за колебания резонирующей гармоники (см. осциллограммы *c*), ток занимает большую, чем в предыдущих двух случаях, часть полупериода и его форма становится ближе к синусоидальной. Разложение такой формы тока в ряд Фурье показывает уменьшение величин высших гармоник, генерируемых выпрямителем, по сравнению с предыдущими случаями.

По результатам моделирования установлено, что линейная нагрузка не влияет на форму фазного тока на входе выпрямителя.

Следует отметить, что в режимах близких к резонансному заметно ухудшается качество



напряжения питающей сети. Так, при $P_d^* = 0,4$; $S_n^* = 0,3$; $\cos\varphi = 0,85$ и резонансах на 13-й, 11-й, 7-й и 5-й гармониках тока коэффициент несинусоидальности напряжения K_U на выходе трансформатора достигает соответственно 15, 18, 20 и 25 %. Следовательно, в резонансных и близких к ним режимах требования ГОСТ к качеству напряжения не выполняются.

Сравнение трехфазной и однофазной схем

При сопоставлении результатов компьютерного моделирования процессов в трехфазной и однофазной схемах (рис. 1) основное внимание было уделено величинам токов, протекающих через конденсаторы, при отсутствии резонанса, режимах близких к резонансу и в резонансных режимах.

Очевидным преимуществом моделирования в среде Multisim трехфазной схемы является возможность оценки суммарного тока $I_{k\Sigma}$, протекающего через конденсаторную батарею, и его гармонических составляющих благодаря автоматическому разложению формы этого тока в ряд Фурье.

В однофазной схеме моделирование выполняется для отдельной высшей гармоники тока ($n = 5, 7, 11, 13 \dots$) или их суммы при параллельном включении источников тока I_n в схеме рис. 1, б. Однако суммарный ток через конденсаторы $I_{k\Sigma}$ здесь не определить ввиду невозможности моделирования в этой схеме первой гармоники тока, протекающей через конденсаторы.

В режимах между резонансами – при $Q_k^* \approx 0,55$ и $Q_k^* \approx 0,25$ (см. рис. 3) – однофазная схема с заданием n -й гармоники источником тока $I_n = I_1 / n$ и трехфазная схема по этой же гармонике дают хорошее совпадение результатов моделирования.

В режимах резонанса и близких к ним однофазная схема с заданием высшей гармоники источником тока $I_n = I_1 / n$ дает результат, в разы превышающий таковой для этой гармо-

ники в трехфазной схеме. Это объясняется неучетом «провала» гармоник в режимах резонанса и близких к ним. В частности, для случая рис. 4, в моделирование процессов в однофазной схеме с заданием 11-й гармоники источником тока $I_{11} = I_1 / 11$ и в трехфазной схеме дало трехкратное различие величин тока через конденсаторную батарею.

Таким образом, совпадение результатов моделирования высших гармоник тока через конденсаторную батарею в однофазной и трехфазной схемах зависит от того, насколько точно задана величина n -й гармоники в однофазной схеме по отношению к этой гармонике, генерируемой выпрямителем в трехфазной схеме.

Заключение

На основе компьютерного моделирования в программном комплексе Multisim получены основные количественные соотношения для гармонических токов в трехфазной модели системы электроснабжения с линейной и нелинейной (трехфазный мостовой выпрямитель) нагрузками и конденсаторной батареей.

В резонансных и близких к ним режимах:

оценены возможные перегрузки конденсаторных батарей;

показано, что качество напряжения питающей сети не соответствует требованиям ГОСТ;

установлено, что в интервале коммутации тока вентилями появляются апериодическая и колебательная составляющие, а величины гармоник тока, генерируемых нелинейной нагрузкой, существенно уменьшаются по сравнению с режимами отсутствия резонанса.

Показано, что в резонансных и близких к ним режимах однофазная компьютерная модель дает существенно большее значение резонирующей гармоники тока через конденсаторную батарею, чем трехфазная модель, которая, по-видимому, более достоверно отражает реальную схему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ариллага Д., Бредли Д., Боджер П.М. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
2. Добуш В.С. Особенности возникновения высших гармоник в электрических сетях // Современная техника и технология. 2015. № 5. [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.s nauka.ru/2015/05/6851> (дата обращения: 24.08.2018).
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
4. Коваленко Д.В., Плотников Д.И., Шакенов Е.Е., Кулинич И.О. Негативное воздействие токов высших гармоник на элементы системы электроснабжения // Молодой ученый. 2016. № 28. С. 102–105.
5. Коваленко Д.В. Применение пассивных фильтров для компенсации высших гармоник тока в системах электроснабжения промышленных предприятий // Молодой ученый. 2016. № 19. С. 72–76.
6. Коваленко Д.В. Определение резонансной частоты системы электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности и наличии высших гармоник // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 8 (часть 1). С. 16–21.
7. Коваленко Д.В., Киселев Б.Ю., Плотников Д.И., Шакенов Е.Е., Кулинич И.О. Методика расчета пассивных фильтров, предназначенных для компенсации высших гармоник в системах электроснабжения промышленных предприятий // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1 (55), часть 4. С. 82–86.
8. Коваленко Д.В. Файер Л.А., Киселев Б.Ю., Шепелев О.А., Смирнов П.С., Суровцев В.И. Моделирование резонанса токов на высших гармониках при нестационарном режиме работы системы электроснабжения // Омский научный вестник. 2018. № 2. С. 64–69.
9. Сбитнев Е.А., Осокин В.Л. Моделирование параметров электрической сети сельскохозяйственного предприятия в среде MATLAB // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 8 (154). С. 171–177.
10. Скамьин А.Н., Шклярский А.Я. Компенсация реактивной мощности с учетом генерирования высших гармоник сторонними потребителями // Труды МНТК Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики. СПб.: Изд-во Горного университета, 2017. С. 211–215.
11. Темербаев С.А., Боярская Н.П., Довгун В.П., Колмакова В.О. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2013. № 6, С. 107–120.
12. Тульский В.Н., Карташев И.И., Симуткин М.Г., Насыров Р.Р. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 42–47.
13. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. Киев: Наукова думка, 2005. 210 с.
14. Шишкян С. Защитные антрезонансные дроссели низковольтных конденсаторных батарей // Силовая электроника. 2007. № 4. [Электронный ресурс]. URL: http://www.power-e.ru/2007_4_18.php (дата обращения: 24.05.2018).
15. Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н. Проблемы высших гармоник в сетях промышленных предприятий // Електротехніка і електромеханіка. 2013. № 1. С. 69–71.
16. Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н. Вопросы компенсации реактивной мощности при наличии высших гармоник на коксохимическом производстве // Кокс и химия. 2016, № 4. С. 44–49.
17. Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beatty H.W. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 1996. 265 p.
18. Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment // Cahier Technique Schneider Electric, № 152. 25 p.
19. Russel B.D., Harvey S.M., Nilsson S.I. Substation electromagnetic interference. Part. 1 // IEEE Trans. on power apparatus and systems. 1994. № 7. P. 1863–1870.
20. Yacamin R. Power System Harmonics. Part 3. Problems caused by distorted supplies // Power Engineering Journal. Oct., 1995. P. 233–238.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОСТИН Владимир Николаевич – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: kostin_vn@mail.ru

СЕРИКОВ Владимир Александрович – студент Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: serikov.va@bk.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 17.10.2018



REFERENCES

- [1] **Arrillaga D., Bredli D., Bodzher P.M.** Garmoniki v elektricheskikh sistemakh. M.: Energoatomizdat, 1990. 320 s.
- [2] **Dobush V.S.** Osobennosti vozniknoveniya vysshikh garmonik v elektricheskikh setyakh. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*. 2015. № 5. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://technology.sciencedirect.com/science/article/pii/S106836231500033X> (data obrashcheniya: 24.08.2018). (rus.)
- [3] **Zhezhelenko I.V.** Vysshiye garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriatiy. M.: Energoatomizdat, 2000. 331 s. (rus.)
- [4] **Kovalenko D.V., Plotnikov D.I., Shakenov Ye.Ye., Kulinich I.O.** Negativnoye vozdeystviye tokov vysshikh garmonik na elementy sistemy elektrosnabzheniya. *Moshchnost uchenyy*. 2016. № 28. S. 102–105. (rus.)
- [5] **Kovalenko D.V.** Primeneniye passivnykh filtrov dlya kompensatsii vysshikh garmonik toka v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriatiy. *Moshchnost uchenyy*. 2016. № 19. S. 72–76. (rus.)
- [6] **Kovalenko D.V.** Opredeleniye rezonansnoy chastoty sistemy elektrosnabzheniya pri izmenenii stepeni kompensatsii reaktivnoy moshchnosti i nalichii vysshikh garmonik. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovanii*. 2017. № 8 (chast 1). S. 16–21. (rus.)
- [7] **Kovalenko D.V., Kiselev B.Yu., Plotnikov D.I., Shakenov Ye.Ye., Kulinich I.O.** Metodika rascheta passivnykh filtrov, prednaznachennykh dlya kompensatsii vysshikh garmonik v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriatiy. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2017. № 1 (55), chast 4. S. 82–86. (rus.)
- [8] **Kovalenko D.V., Fayer L.A., Kiselev B.Yu., Shepelev O.A., Smirnov P.S., Surovtsev V.I.** Modelirovaniye rezonansa tokov na vysshikh garmonikakh pri nestatsionarnom rezhime raboty sistemy elektrosnabzheniya. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2018. № 2. S. 64–69. (rus.)
- [9] **Sbitnev Ye.A., Osokin V.L.** Modelirovaniye parametrov elektricheskoy seti selskokhozyaystvennogo predpriatiya v srede MATLAB. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017. № 8 (154). S. 171–177. (rus.)
- [10] **Skamin A.N., Shklyarskiy A.Ya.** Kompenzatsiya reaktivnoy moshchnosti s uchetom generirovaniya vysshikh garmonik storonnimi potrebitelyami. *Trudy MNTK Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroyeniya i elektromekhaniki*. SPb.: Izd-vo Gornogo universiteta. 2017. S. 211–215. (rus.)
- [11] **Temerbayev S.A., Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Kolmakova V.O.** Analiz kachestva elektroenergii v gorodskikh raspredelitelnykh setyakh 0,4 kV. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2013. № 6. C. 107–120. (rus.)
- [12] **Tulskiy V.N., Kartashev I.I., Simutkin M.G., Nasirov R.R.** Vliyaniye vysshikh garmonik toka na rezhimy raboty kabeley raspredelitelnoy seti 380 V. *Promyshlennaya energetika*. 2013. № 5. S. 42–47. (rus.)
- [13] **Shidlovskiy A.K., Zharkin A.F.** Vysshiye garmoniki v nizkovoltnykh elektricheskikh setyakh. Kiyev: Naukova dumka, 2005. 210 s.
- [14] **Shishkin S.** Zashchitnyye antirezonansnyye drosseli nizkovoltnykh kondensatornykh batarey. Silovaya elektronika. 2007. № 4. [Elektronnyy resurs]. URL: http://www.power-e.ru/2007_4_18.php (data obrashcheniya: 24.05.2018). (rus.)
- [15] **Shklyarskiy Ya.E., Skamin A.N.** Problemy vysshikh garmonik v setyakh promyshlennykh predpriatiy. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 2013. № 1. S. 69–71. (rus.)
- [16] **Shklyarskiy Ya.E., Skamin A.N.** Voprosy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti pri nalichii vysshikh garmonik na koksokhimicheskem proizvodstve. *Koks i khimiya*. 2016. № 4. S. 44–49. (rus.)
- [17] **Dugan R.C., McGranahan M.F., Beaty H.W.** Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 1996. 265 p.
- [18] Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment. *Cahier Technique Schneider Electric*, № 152. 25 p.
- [19] **Russel B.D., Harvey S.M., Nilsson S.I.** Substation electromagnetic interference. Part. 1. *IEEE Trans. on power apparatus and systems*. 1994. № 7. P. 1863–1870.
- [20] **Yacamini R.** Power System Harmonics. Part 3. Problems caused by distorted supplies. *Power Engineering Journal*. Oct., 1995. P. 233–238.

THE AUTHORS

KOSTIN Vladimir N. – Saint-Petersburg mining university

E-mail: kostin_vn@mail.ru

SERIKOV Vladimir A. – Saint-Petersburg mining university

E-mail: serikov.va@bk.ru

Received: 17.10.2018

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019