

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES

### 2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.315

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.3.1>

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Надежда Николаевна Долгих<sup>1</sup>, Дмитрий Сергеевич Осипов<sup>2</sup>,  
Александр Олегович Шепелев<sup>3\*</sup>, Елена Юрьевна Шепелева<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Югорский государственный университет (д. 16, ул. Чехова, Ханты-Мансийск, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, 628012, Российская Федерация)

<sup>1</sup> nabal2006@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7404-0596>

<sup>2</sup> ossipovdmitriy@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0830-408X>

<sup>3</sup> alexshepelev93@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5757-9653>

<sup>4</sup> elena.arta2013@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4908-560X>

\* Автор, ответственный за переписку

**Аннотация. Введение.** В условиях роста числа электроприёмников с нелинейной вольтамперной характеристикой возникают проблемы с искажением формы кривой питающего напряжения и тока. Эти искажения могут привести к нежелательным эффектам, таким как перегрузка сети, гармонические искажения, недопустимые пульсации напряжения и тока и т. д. **Цель.** Исследовать несинусоидальные режимы работы электрооборудования в системе электроснабжения для прогнозирования показателей качества электрической энергии и разработки мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости электрооборудования в системах электроснабжения. **Материалы и методы.** Разработанная в программном комплексе MATLAB / Simulink имитационная модель позволяет анализировать работу системы электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями в различных условиях и предсказывать ее поведение при различных нагрузках и внешних воздействиях. **Результаты и обсуждение.** В ходе работы обнаружено, что при отсутствии устройств компенсации реактивной мощности уровни суммарного коэффициента высших гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$ , в системе электроснабжения с 12-пульсным преобразователем выходят за допустимые значения в течение 95 % времени интервала измерения (ГОСТ 32144-2013) (в точках присоединения 6 кВ). Значения коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения на 11, 13, 23, 25, 35 37 гармониках в ряде случаев превышают допустимые значения в течение 100 % времени интервала измерения. При использовании средств компенсации (батарей статических конденсаторов, резонансного фильтра) значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения не превышают допустимых значений. **Заключение.** По итогам проведённого исследования видно, что повсеместное использование выпрямительных устройств приводит к значительному искажению кривой напряжения. Однако стоит отметить, что существующий ГОСТ регламентирует только величину гармонических составляющих напряжения и не учитывает гармонических составляющих тока, которые, в свою очередь, также оказывают пагубное воздействие на элементы электрической сети.

**Ключевые слова:** моделирование, система электроснабжения, несинусоидальные режимы, высшие гармоники тока и напряжения, полупроводниковые преобразователи

**Для цитирования:** Исследование несинусоидальных режимов работы электрооборудования в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями / Н. Н. Долгих, Д. С. Осипов, А. О. Шепелев, Е. Ю. Шепелева // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 3(102). С. 7–17. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.3.1>

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема «Разработка моделей вейвлет-анализа нестационарных режимов электрических сетей для повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей», код темы: FENG-2023-0005).

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.03.2024;

одобрена после рецензирования 21.05.2024;

принята к публикации 27.05.2024.

Research article

## ANALYSIS OF NON-SYNUSOIDAL MODES OF OPERATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT IN POWER SUPPLY SYSTEMS WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS

Nadezhda N. Dolgikh<sup>1</sup>, Dmitry S. Osipov<sup>2</sup>, Alexander O. Shepelev<sup>3\*</sup>,  
Elena Yu. Shepeleva<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Yugra State University (16, Chekhov str., Khanty-Mansiysk, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra, 628012, Russian Federation)  
<sup>1</sup> nabal2006@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7404-0596>  
<sup>2</sup> ossipovdmiriy@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0830-408X>  
<sup>3</sup> alexshepelev93@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5757-9653>  
<sup>4</sup> elena.arta2013@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4908-560X>  
 \* Corresponding author

**Abstract. Introduction.** With the increasing number of electrical loads with non-linear volt-ampere characteristic, there are problems with distortion of the shape of the supply voltage and current curve. These distortions can lead to undesirable effects such as network overload, harmonic distortion, unacceptable voltage and current ripple, etc. **Goal.** To investigate non-sinusoidal modes of operation of electrical equipment in the power supply system to predict the quality of electrical energy and develop measures to ensure electromagnetic compatibility of electrical equipment in power supply systems. **Materials and methods.** The simulation model developed in MATLAB/Simulink software complex allows to analyze the operation of the power supply system with semiconductor converters under different conditions and predict its behaviour under different loads and external influences. **Results and discussion.** In the course of work it was found that in the absence of reactive power compensation devices, the levels of the total coefficient of higher harmonic components of voltage  $KU(n)$ , in the power supply system with 12-pulse converter exceed the permissible values during 95% of the measurement interval time in accordance with GOST 32144-2013 (in the connection points of 6 kV). The values of the coefficient of the  $n$ -th harmonic component of voltage at 11, 13, 23, 25, 35 37 harmonics (in some cases exceed the permissible values during 100% of the measurement interval time. When using compensation means (batteries of static capacitors, resonant filter), the values of the total coefficients of voltage harmonic components do not exceed the permissible values. **Conclusion.** According to the results of the study, it is clear that the widespread use of rectifier devices leads to a significant distortion of the voltage curve. However, it should be noted that the existing GOST regulates only the value of harmonic components of voltage and does not take into account the harmonic components of current, which in turn also have a detrimental effect on the elements of the electrical network.

**Keywords:** simulation, power supply systems, non-sinusoidal modes, current and voltage harmonics, semiconductor converters

**For citation:** Dolgikh NN, Osipov DS, Shepelev AO, Shepeleva EYu. Analysis of non-sinusoidal modes of operation of electrical equipment in power supply systems with semiconductor converters. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;3(102):7-17. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.3.1>

**Funding:** the research has been conducted within the national assignment by the Ministry of Science and Higher Education in the Russian Federation (theme “Model building for wavelet analysis of non-steady behavior in electric power systems for reliability growth effectiveness for electric power supply to a customer”, theme code: FENG-2023-0005).

**Conflict of interest:** the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 22.03.2024;  
 approved after reviewing 21.05.2024;  
 accepted for publication 27.05.2024.

**Введение / Introduction.** С ростом числа электроприёмников с нелинейной вольтамперной характеристикой (например, силовых электронных устройств, компьютеров, светильников с электронными блоками питания и т. д.) возникают проблемы с искажением формы кривой питающего напряжения и тока. Эти искажения могут привести к нежелательным эффектам, таким как перегрузка сети, гармонические искажения, недопустимые пульсации напряжения и тока [1, 2, 3]. Известно, что несинусоидальность приводит к росту потерь мощности и энергии в связи с дополнительным нагревом токоведущих частей [4, 5].

Несинусоидальность питающего напряжения и тока приводит к ускоренному старению изоляции электрооборудования [6], отрицательно сказывается на режимах работы асинхронных двигателей [7], а также может приводить к ложному срабатыванию устройств релейной защиты и автоматики [8]. Действующий в настоящее время ГОСТ 32144-2013 [9] определяет гармонический спектр составляющих напряжения вплоть до 40 гармоник. Однако в некоторых работах отмечается тот факт, что необходимо учитывать и более высокие порядки высших гармоник (ВГ) [10].

Для рассмотрения несинусоидальности кривой напряжения и тока нелинейные элементы электрических сетей представляют двумя видами схем замещения:

- источник тока  $n$ -й гармоники  $J_n$  и проводимостью  $Y_n$  (рис. 1а);
- источник ЭДС  $n$ -й гармоники  $E_n$  и сопротивлением  $Z_n$  (рис. 1б).

Однако наибольшее распространение получила форма представления в виде источника тока и проводимости.

Форма кривой тока зависит непосредственно от угла управления  $\alpha$ , задаваемого системой управления и угла коммутации, который определяется по следующему выражению:

$$\gamma = \arccos(\cos \alpha - I_{d*} \cdot x_{k*}) \quad (1)$$

Для преобразователя, выполненного на диодах (неуправляемый преобразователь), кривая первичного тока для 6-пульсного преобразователя будет выглядеть, как представлено на рис. 2.

В случае неуправляемых преобразователей, в сеть генерируются так называемые канонические гармоники, определяемые по выражению

$$n = p \cdot k \pm 1, \quad (2)$$

где  $p$  – пульсность преобразователя;  $k$  – ряд натуральных чисел (1, 2, 3...).

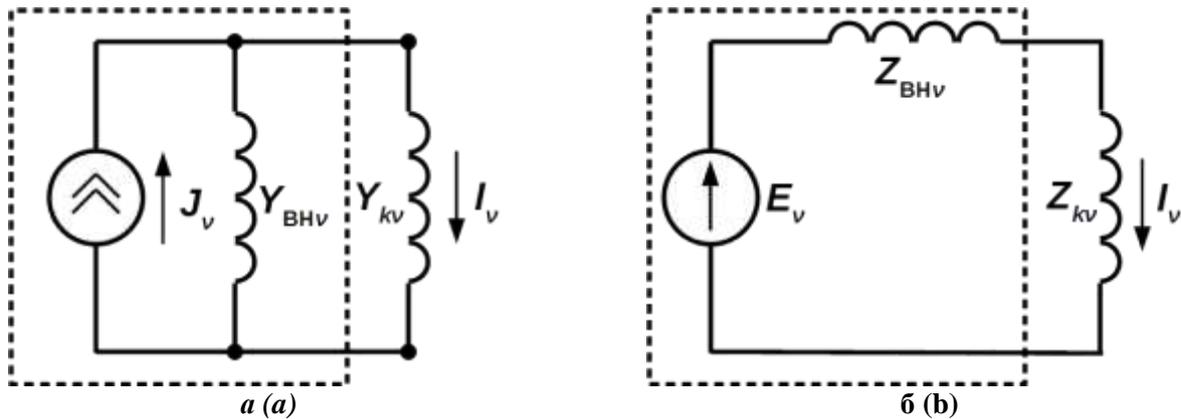


Рис. 1. Схема замещения элемента на частоте высшей гармоники /  
Fig. 1. Substitution diagram of the element at the higher harmonic frequency

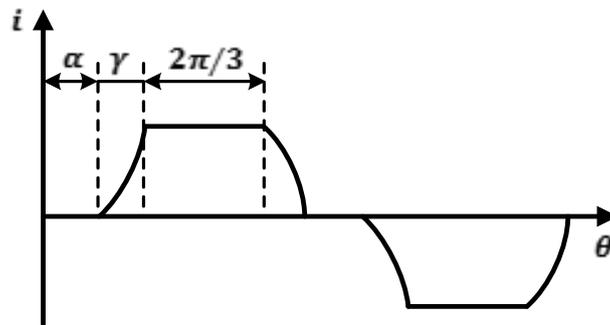


Рис. 2. Кривая первичного тока для 6-пульсного преобразователя /  
Fig. 2. Primary current curve for 6-pulse inverter

В то же время, если у потребителя установлены управляемые преобразователи (например, частотный электропривод, устройства бесперебойного питания, дуговые печи и т. д.), то в электрическую сеть помимо гармоник канонического ряда генерируются интергармоники. Появление интергармонических составляющих связано с нарушением синфазности при переключениях устройств силовой электроники [11]. При этом отметим, что текущая нормативная документация [9] не регламентирует интергармонических составляющих, хотя в настоящее время и существует большое число как отечественных [2, 12, 13], так и зарубежных [14, 15, 16] исследований по данному вопросу.

Как уже отмечалось, основной негативный эффект с появлением высших гармонических составляющих связан с увеличением потерь активной мощности и энергии. Так потери энергии в токоведущих частях на основной частоте и ВГ определяются по известному выражению

$$\Delta W_{\Sigma} = I_{50}^2 R_{50} t_i + \sum_{n=2}^{40} I_n^2 R_n t_i, \quad (3)$$

где  $I_{50}$  – значение тока на основной частоте;  $R_{50}$  – активное сопротивление жил на основной частоте;  $I_n$  – значение тока на частоте  $n$ -й гармонической составляющей;  $R_n$  – активное сопротивление жил на частоте  $n$ -й гармонической составляющей.

Изменение активного сопротивления вследствие влияния поверхностного эффекта можно определить в соответствии с простейшей формулой [17]

$$R_n = R_{50} \cdot \sqrt{n}, \quad (4)$$

где  $n$  – номер гармонической составляющей.

Как отмечается в работе [18], выражение (4) представляет собой грубое приближение реального изменения активного сопротивления на частоте ВГ. Поэтому в работе [19] предлагается учитывать увеличение активного сопротивления по следующему выражению:

$$R_n = R_{50} (0,187 + 0,532\sqrt{n}). \quad (5)$$

Таким образом, из описанного выше возникает задача точной оценки негативного влияния ВГ на электрическую сеть.

**Материалы и методы исследований / Materials and methods of research.** В данной работе используются возможности программного продукта MATLAB / Simulink (версия R2023b) для решения задачи моделирования несинусоидальных режимов работы электрооборудования в системе электроснабжения. Это позволяет получить полные сведения об эффективности передачи и преобразования электроэнергии, а также прогнозировать показатели качества и потери электрической энергии в элементах системы.

Имитационное моделирование в MATLAB / Simulink позволяет разработать мероприятия по улучшению качества электроэнергии и обеспечению электромагнитной совместимости электрооборудования [20, 21].

Модель системы электроснабжения представляет собой понижающую подстанцию с возможностью подключения 12-пульсного выпрямителя, а также батареи статических конденсаторов и резонансного фильтра высших гармоник. Разработанная в программе MATLAB / Simulink [22] модель представлена на рис. 3.

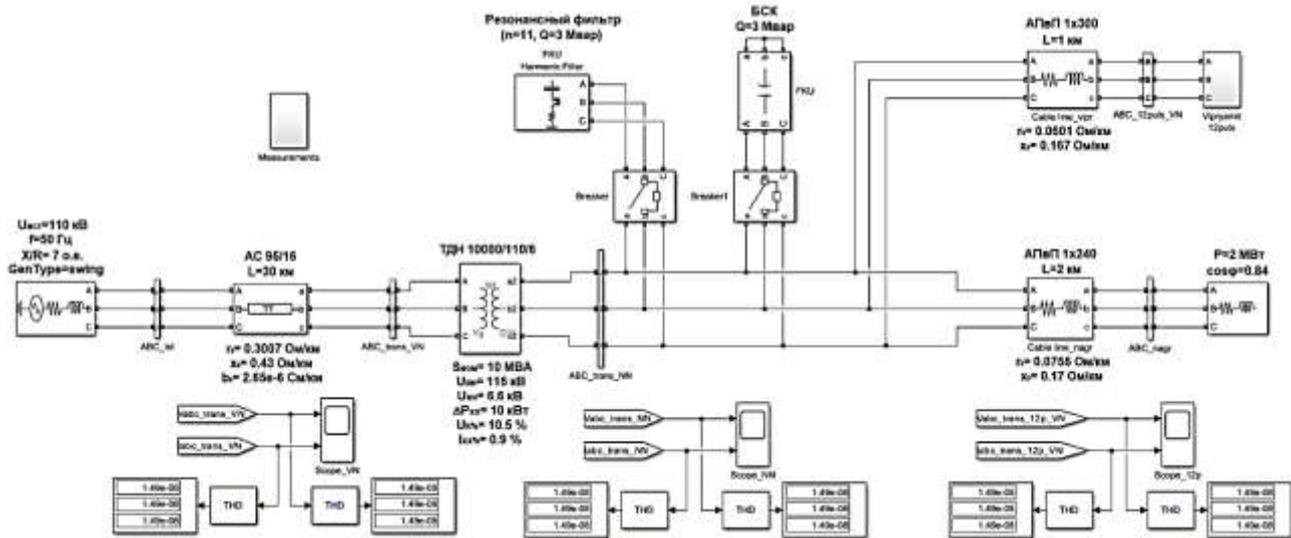


Рис. 3. Модель системы электроснабжения / Fig. 3. Power supply model

В представленной на рис. 3 системе электроснабжения рассмотрено три характерных режима:

- исходная система электроснабжения без компенсирующих устройств;
- система электроснабжения с подключенной батареей статических конденсаторов;
- система электроснабжения с подключенным резонансным фильтром, настроенным на частоту 11-й гармоники.

Выбор мощности БСК и РФ связан с фактическим уровнем реактивной мощности. Известно<sup>1</sup>, что на шинах 6 кВ величина коэффициента реактивной мощности должна составлять не более  $tg\varphi = 0,4$ . При отсутствии в системе электроснабжения устройств компенсации реактивной мощности  $tg\varphi = 0,448$ . В случае установки БСК и РФ мощностью 3 000 квар величина  $tg\varphi = 0,13$ .

Модель 12-пульсного преобразователя (рис. 4) состоит из измерителя линейных значений токов и напряжений, двух понижающих трансформаторов, двух 6-пульсных выпрямителей, построенных по схеме Ларионова, и нагрузки.

<sup>1</sup> О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии: Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. № 380.

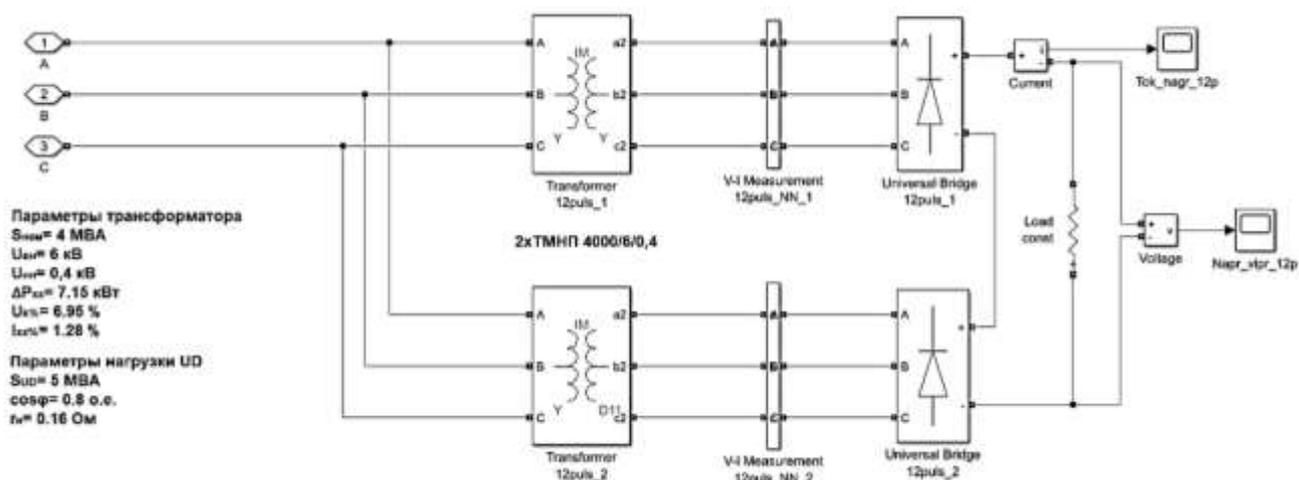


Рис. 4. Модель 12-пульсного выпрямителя / Fig. 4. Model of 12-pulse rectifier

**Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion.** Исследование несинусоидальных режимов в схеме СЭС без компенсирующих устройств. На рис. 5 и 6 представлены осциллограммы напряжения и тока (соответственно) на стороне высокого напряжения трансформатора, установленного непосредственно перед преобразователем.

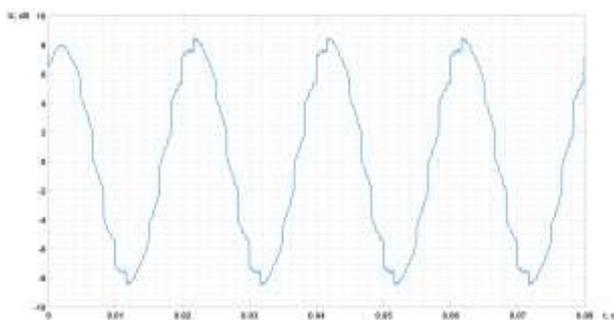


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на стороне ВН трансформатора преобразователя / Fig. 5. Voltage oscillogram on the transformer converter HV side

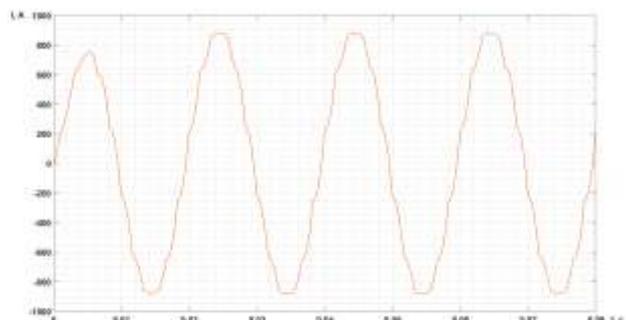


Рис. 6. Осциллограмма тока на стороне ВН трансформатора преобразователя / Fig. 6. Current oscillogram on the transformer converter HV side

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в рассматриваемой системе электроснабжения без компенсирующих устройств представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения и тока в системе электроснабжения без компенсирующих устройств / Values of total harmonic distortion of voltage and current components in the power supply system without compensating devices**

Место измерения	Коэффициенты искажений напряжения, %	Значения суммарного коэффициента $K_U$ , % [9]	Коэффициенты искажений тока, %
ВН трансформатора ПС (ABC_trans_VN)	1.89	2.0 / 3.0	2.92
НН трансформатора ПС (ABC_trans_NN)	5.54	5.0 / 8.0	2.94
ВН трансформатора преобразователя (ABC_12puls_VN)	7.35	5.0 / 8.0	4.05
Кабель, питающий нагрузку (ABC_nagr)	5.51	5.0 / 8.0	0.68

Из таблицы 1 видно, что требования ГОСТ 32144-2013 выполняются только в точке измерения на ВН трансформатора подстанции (причём значения суммарного коэффициента  $K_U$  выполняются для 95 % и 100 % интервала времени измерения). В остальных же точках измерения значения суммарных коэффициентов  $K_U$  не превышают только нормируемые для 100 % интервалы времени. В течение 95 % ин-

тервала времени значения превышают требования стандарта, что отрицательно сказывается на оборудовании и доказывает факт того, что в рассматриваемой системе электроснабжения требуется подавление высших гармонических составляющих. Коэффициенты искажений тока приведены для информации, т. к. в отечественных нормативных документах их величина не нормируется.

*Исследование несинусоидальных режимов в схеме СЭС при подключении БСК.* На рис. 7 и 8 представлены осциллограммы напряжения и тока (соответственно) на стороне ВН трансформатора преобразователя при подключении на шины низкого напряжения подстанции батареи статических конденсаторов мощностью 3 000 квар.

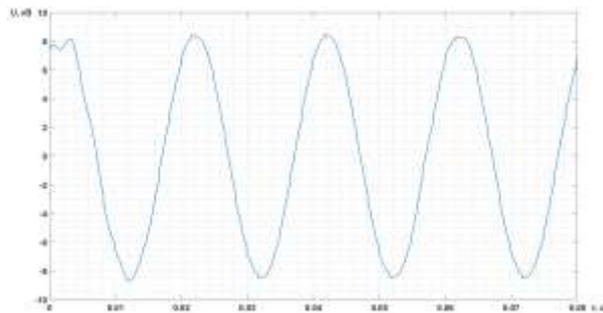


Рис. 7. Осциллограмма напряжения на стороне ВН трансформатора преобразователя / Fig. 7. Voltage oscillogram on the transformer converter HV side



Рис. 8. Осциллограмма тока на стороне ВН трансформатора преобразователя / Fig. 8. Current oscillogram on the transformer converter HV side

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в рассматриваемой системе электроснабжения с подключенной БСК представлены в таблице 2, откуда видно, что требования ГОСТ 32144-2013 выполняются во всех точках измерения и значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения снизились по сравнению с вариантом, когда БСК установлено не было.

Таблица 2 / Table 2

**Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения и тока в системе электроснабжения при подключении БСК / Values of total harmonic distortion of voltage and current components in the power supply system at SCB**

Место измерения	Коэффициенты искажений напряжения, %	Значения суммарного коэффициента $K_U$ , % [9]	Коэффициенты искажений тока, %
ВН трансформатора ПС (ABC_trans_VN)	0.21	2.0 / 3.0	1.33
НН трансформатора ПС (ABC_trans_NN)	1.78	5.0 / 8.0	1.34
ВН трансформатора преобразователя (ABC_12puls_VN)	1.45	5.0 / 8.0	6.69
Кабель, питающий нагрузку (ABC_nagr)	1.77	5.0 / 8.0	0.29

*Исследование несинусоидальных режимов в схеме СЭС при подключении резонансного фильтра.*

На рис. 9 и 10 представлены осциллограммы напряжения и тока (соответственно) на стороне ВН трансформатора преобразователя при подключении на шины низкого напряжения подстанции резонансного фильтра, настроенного на 11-ю гармонику.

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в рассматриваемой системе электроснабжения с подключенным резонансным фильтром представлены в таблице 3.

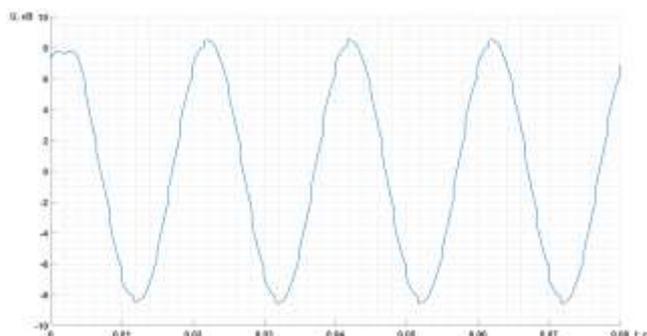


Рис. 9. Осциллограмма напряжения на стороне ВН трансформатора преобразователя / Fig. 9. Voltage oscillogram on the transformer converter HV side

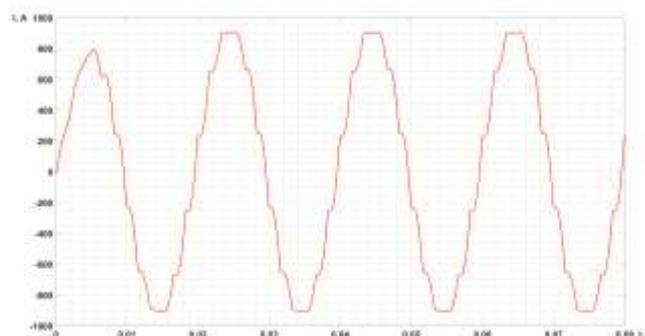


Рис. 10. Осциллограмма тока на стороне ВН трансформатора преобразователя / Fig. 10. Current oscillogram on the transformer converter HV side

Таблица 3 / Table 3

**Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения и тока в системе электроснабжения при подключении резонансного фильтра / Values of total harmonic distortion of voltage and current components in the power supply system when a resonant filter is connected**

Место измерения	Коэффициенты искажений напряжения $K_U, \%$	Значения суммарного коэффициента $K_U, \%$ [9]	Коэффициенты искажений тока, %
ВН трансформатора ПС (ABC_trans_VN)	0.21	2.0 / 3.0	0.21
НН трансформатора ПС (ABC_trans_NN)	0.68	5.0 / 8.0	0.22
ВН трансформатора преобразователя (ABC_12puls_VN)	3.02	5.0 / 8.0	5.98
Кабель, питающий нагрузку (ABC_nagr)	0.68	5.0 / 8.0	0.05

Из таблицы 3 видно, что требования ГОСТ 32144-2013 выполняются во всех точках измерения и значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения снизились по сравнению с вариантом системы электроснабжения без установленных средств компенсации. Однако стоит отметить, что значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в случае установки резонансного фильтра снизились только на шинах НН трансформатора подстанции и на кабеле, питающем нагрузку. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в случае ВН трансформатора преобразователя несколько вырос по сравнению с установкой БСК.

Таблица 4 / Table 4

**Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$  / Values of voltage harmonic distortion  $K_{U(n)}$**

Номер гармоники	На стороне ВН трансформатора подстанции ( $U_{ном} = 110$ кВ)			На стороне НН трансформатора подстанции ( $U_{ном} = 6$ кВ)			На стороне ВН трансформатора преобразователя ( $U_{ном} = 6$ кВ)			Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}, \%$ [9]	
	Исходная СЭС	СЭС с БСК	СЭС с РФ	Исходная СЭС	СЭС с БСК	СЭС с РФ	Исходная СЭС	СЭС с БСК	СЭС с РФ	110 кВ	6 кВ
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-
11	0.37	0.18	0.01	3.33	1.57	0.08	4.55	0.31	1.7	1/1.5	2/3
13	0.28	0.1	0.03	2.47	0.82	0.23	3.36	0.67	1.55	0.7/1.05	2/3
23	0.24	0.01	0.04	1.55	0.09	0.27	2.09	0.5	0.9	0.4/0.6	1/1.5
25	0.24	0.01	0.05	1.39	0.08	0.27	1.86	0.51	0.88	0.4/0.6	1/1.5
35	0.57	0.01	0.09	1.22	0.03	0.19	1.49	0.36	0.56	0.4/0.6	1/1.5
37	1.7	0.02	0.17	2.07	0.02	0.2	2.25	0.34	0.57	0.4/0.6	1/1.5

Таблица 5 / Table 5

**Действующие значения токов на частоте основной и высших гармоник /  
RMS values of currents at fundamental and higher harmonics**

Номер гармоники	На стороне ВН трансформатора подстанции			На стороне НН трансформатора подстанции			На стороне ВН преобразователя			Кабель, питающий нагрузку		
	Исходная СЭС	СЭС с БСК	СЭС с РФ	Исходная СЭС	СЭС с БСК	СЭС с РФ	Исходная СЭС	СЭС с БСК	СЭС с РФ	Исходная СЭС	СЭС с БСК	СЭС с РФ
1	47.39	46.26	46.33	822.3	804.6	806	629.5	652.1	651.6	201.3	208.3	208.3
11	1.139	0.5521	0.0274	19.86	9.639	0.478	20.96	35.5	31.83	1.106	0.537	0.0267
13	0.7106	0.2451	0.069	12.39	4.271	1.206	13.08	23.89	20.87	0.6952	0.2397	0.0676
23	0.2406	0.0146	0.043	4.195	0.2577	0.751	4.446	5.361	5.614	0.2483	0.0153	0.0444
25	0.1938	0.0111	0.039	3.38	0.1913	0.677	3.584	4.858	4.959	0.2041	0.0116	0.0409
35	0.0746	0.0014	0.012	1.302	0.0259	0.21	1.43	2.3	2.153	0.128	0.0026	0.0207
37	0.0386	0.0004	0.0038	0.685	0.0068	0.067	0.8647	2.013	1.994	0.2057	0.0021	0.0209

Дополнительно, произведём расчёт потерь активной мощности в кабелях, питающих преобразователь и нагрузку. Результаты расчёта представлены в таблице 6.

Потери мощности на частотах высших гармоник произведём с учётом изменения сопротивления по выражению (5). В действительности данное выражение не является точным. Наиболее точные результаты даёт выражение, основанное на теореме Умова – Пойнтинга. Однако описание данного выражения выходит за рамки представленной статьи. Оценка потерь мощности на высших гармониках в силовых трансформаторах в работе не проводилась. Величина потерь электрической энергии в питающих кабелях будет зависеть от длительности присутствия высокочастотных составляющих в графике работы преобразователя.

Таблица 6 / Table 6

**Результаты расчёта потерь мощности на частоте основной и высших гармоник /  
Calculation results of power losses at fundamental and higher harmonics**

Номер гармоники	Потери активной мощности $\Delta P$ , кВт								
	Провод воздушной линии электропередачи (АС 95/16)			Кабель, питающий преобразователь (АПвП 1x300)			Кабель, питающий нагрузку (АПвП 1x240)		
	Исходная СЭС	СЭС с БСК	СЭС с РФ	Исходная СЭС	СЭС с БСК	СЭС с РФ	Исходная СЭС	СЭС с БСК	СЭС с РФ
1	60.778	57.914	58.090	71.448	76.670	76.552	18.356	19.655	19.655
11	0.069	0.016	~0	0.155	0.443	0.356	0.001	~0	~0
13	0.027	0.003	~0	0.060	0.201	0.153	~0	~0	~0
23	0.003	~0	~0	0.007	0.010	0.011	~0	~0	~0
25	0.002	~0	~0	0.005	0.008	0.009	~0	~0	~0
35	~0	~0	~0	0.001	0.002	0.002	~0	~0	~0
37	~0	~0	~0	~0	0.001	0.001	~0	~0	~0

**Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion.** Таким образом, из итоговой таблицы результатов моделирования системы электроснабжения 12-пульсного преобразователя (таблица 4), сравнивая полученные результаты с нормами качества электрической энергии, приведенными в ГОСТ 32144-2013, можно сделать следующие выводы:

1) в процессе моделирования несинусоидальных режимов в исходной СЭС:

– на стороне ВН трансформатора подстанции значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40 порядка  $K_{(U(n))}$ , % превышают допустимые значения на 35-й и 37-й гармониках, а на остальном рассматриваемом спектре находятся в пределах допустимого. Значение суммарного коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения находится в пределах нормально допустимого для данного класса напряжения;

– на стороне НН трансформатора подстанции и ВН трансформатора преобразователя значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{(U(n))}$ , % превышают допустимые значения

на 11-й, 13-й, 23-й, 25-й, 35-й, 37-й гармониках, а на остальном рассматриваемом спектре находятся в пределах допустимого. Причём в ряде случаев высшие гармонические составляющие присутствуют в 100 %-ном интервале наблюдения, что в соответствии с ГОСТом выходит за допустимые границы (таблица 4). Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения превышают значения, установленные в соответствии с [9; табл. 4]. В то же время не превышают предельно допустимых значений для данного класса напряжения  $K_{иск(U_{ном}=6 \text{ кВ})} = 8\%$  [9; табл. 5];

2) при подключении батареи статических конденсаторов мощностью 3000 квар на стороне ВН, НН трансформатора подстанции, а также ВН трансформатора преобразователя значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка  $K_{U(n)},\%$  находятся в пределах допустимых значений. Значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения находятся в пределах нормально допустимого значения для данных классов напряжения;

3) при подключении резонансного фильтра высших гармоник на стороне ВН, НН трансформатора подстанции, а также ВН трансформатора преобразователя значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка  $K_{U(n)},\%$  находятся в пределах допустимых значений. Значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения находятся в пределах нормально допустимого значения для данных классов напряжения.

По результатам таблицы 6 видно, что потери мощности при наличии высших гармоник составляют незначительные значения (до 1 кВт). По сравнению с потерями мощности на основной частоте данные потери невелики. Существование высших гармоник в электрической сети наиболее опасно появлением резонансного режима (как показано в [8]). Значительный интерес исследование высших гармоник представляет в низковольтных сетях.

**Заключение / Conclusion.** В рамках настоящей статьи выполнено имитационное моделирование и исследование несинусоидальных режимов работы электрооборудования в системе электроснабжения для прогнозирования показателей качества электрической энергии и разработки мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости электрооборудования в системах электроснабжения мощных полупроводниковых преобразователей электроэнергии, а также проведён расчет потерь активной мощности, вызванных наличием высших гармонических составляющих.

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что для обеспечения надлежащего качества электрической энергии, нормированного ГОСТом 32144-2013, оптимальным для системы электроснабжения с 12-фазным преобразователем является подключение в СЭС резонансного фильтра высших гармоник, настроенного на частоту 11-й гармоники. Также допустимые показатели качества электрической энергии имеют место в системе электроснабжения 12-фазного преобразователя при подключении батареи статических конденсаторов мощностью 3 000 квар. Дальнейшей проработкой темы будет исследование режимов работы системы электроснабжения при подключении активных фильтров высших гармоник.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алгоритм расчета потерь мощности, обусловленных высшими гармониками и интергармониками на основе вейвлет-преобразования / Д. С. Осипов, А. Г. Лютаевич, В. А. Ткаченко, Я. Ю. Логунова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23. № 1. С. 38–47. <https://doi.org/10.14529/power230104>
2. Определение интергармоник тока асинхронного двигателя с переменной периодической нагрузкой / Б. А. Авдеев, С. Г. Черный, И. С. Моисеев, А. А. Жиленков // Электротехника. 2022. № 6. С. 39–44. [https://doi.org/10.53891/00135860\\_2022\\_6\\_39](https://doi.org/10.53891/00135860_2022_6_39)
3. К проблеме моделирования несинусоидальных режимов распределительных сетей / Н. Н. Харлов, В. Я. Ушаков, Е. В. Тарасов, Л. Л. Булыга // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 3. С. 95–102.
4. Бирюлин В. И., Куделина Д. В., Горлов А. Н. Анализ нагрева кабельных линий токами высших гармоник и интергармоник // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. № 2 (46). С. 61–67.
5. Разработка метода расчета потерь мощности в токоведущих частях при наличии интергармоник / Д. С. Осипов, Д. В. Коваленко, Л. А. Файфер и др. // Омский научный вестник. 2017. № 4(154). С. 60–65.
6. Воденников Д. А., Овсянников А. Г. Влияние высших гармоник напряжения на концевые муфты кабелей распределительной сети // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. № 3(72). С. 90–96.
7. Планков А. А. Учет высших гармоник при исследовании динамической устойчивости узлов электроэнергетических систем с асинхронной нагрузкой // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 23

8. Шепелев А. О., Шепелева Е. Ю. Исследование несинусоидальных режимов работы электрооборудования в системе электроснабжения с 6-пульсным преобразователем // Вестник Югорского государственного университета. 2022. № 2(65). С. 68–78. <https://doi.org/10.18822/byusu20220268-78>.
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
10. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, Т. Р. Храпшин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2016. Т. 14. № 4. С. 96–105. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105>.
11. Hanzelka Z., Bien A. Power Quality Application Guide: Harmonics & Interharmonics: A guide material by Leonardo Power Quality Initiative. Copper Development Association, 2004.
12. Сивоконь В. П., Лапшов Д. В., Белов О. А. Диагностические признаки нестандартного проявления нелинейности в электрических сетях // Вестник КамчатГТУ. 2019. № 48. С. 18–27. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2019-48-18-276>.
13. Макашева С. И., Пинчуков П. С. Качество тока: аспекты оценки и нормирования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2020. Т. 20. № 4. С. 23–35. <https://doi.org/10.14529/power200403>
14. Eidson B., Halpin M. An evaluation of the extent of correlation between interharmonic and voltage fluctuation measurements // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 31. Iss. 2. P. 753–760. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2015.2480715>.
15. Interharmonics: theory and modeling / A. Testa [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. Vol. 22. Iss. 4. P. 2335–2348. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905505>
16. Wavelet-Based Harmonic Magnitude Measurement in the Presence of Interharmonics / F. B. Costa [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 38. No. 3. Pp. 2072–2087. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2022.3233583>.
17. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
18. Манусов В. З., Хрипков В. В., Фролова В. В. Сравнительный анализ математических моделей для определения коэффициента увеличения активного сопротивления проводников от высших гармоник // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 1. С. 184–188.
19. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В / В. Н. Тульский, И. И. Карташев, Р. Р. Насыров, М. Г. Симуткин // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 39–44.
20. Вопросы моделирования устройств обеспечения качества электрической энергии / А. Г. Лютаевич, В. Н. Горюнов, С. Ю. Долингер, К. В. Хацевский // Омский научный вестник. 2013. № 1(117). С. 168–173.
21. Ершов С. В., Карницкий В. Ю. Моделирование параметров фильтров высших гармоник в среде MATLAB // Известия Тульского гос. университета. Технические науки. 2014. № 8. С. 25–31.
22. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab SimPowerSystem и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с. ISBN 5-94074-395-1.

## REFERENCES

1. Osipov DS, Lyutarevich AG, Tkachenko VA, Logunova YaYu. An algorithm for calculating power losses due to higher harmonics and interharmonics based on the wavelet transform. Bulletin of the South-Ural State University. Ser. Power Engineering. 2023;23(1):38-47. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/power230104>
2. Avdeev BA, Chernyi SG, Moiseev IS, Zhilenkov AA. Finding of current interharmonics of asynchronous motor working under variable periodic load. Elektrotehnika. 2022;6:39-44. (In Russ.) [https://doi.org/10.53891/00135860\\_2022\\_6\\_39](https://doi.org/10.53891/00135860_2022_6_39)
3. Kharlov NN, Ushakov VYa, Tarasov YV, Bulyga LL. The problem of simulation of non-sinusoidal modes in distributed networks. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2016;327(3):95-102.
4. Biryulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Analysis of heating of cable lines by currents of higher harmonics and interharmonics // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2020;2(46):61-67. (In Russ.)
5. Osipov DS, Kovalenko DV, Faifer LA, Kiselyov BYu, Dolgikh NN. Development of conductive parts power losses calculation method in case of interharmonics. Omsk scientific bulletin. 2017;4(154): 60-65. (In Russ.)
6. Vodennikov DA, Ovsyannikov AG. Influence of High Frequency of Operated Voltage Harmonics on Aging of Cable Terminations in Distribution Network. ELECTRIC POWER. Transmission and distribution. 2022;3(72):90-96. (In Russ.)
7. Plankov AA. Consideration of higher harmonics in the study of dynamic stability of nodes of electric power systems with asynchronous load. Modern problems of science and education. 2013;5:23.
8. Shepelev AO, Shepeleva EYu. Analysis of non-sinusoidal operating modes of electrical equipment in electrical supply system with 6-pulse transducer. Bulletin of the Yugra State University. 2022;2(65):67-78. (In Russ.) <https://doi.org/10.18822/byusu20220268-78>.

9. State Standard 32144-2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of quality of electric energy in general purpose power supply system's. Moscow: Standartinform; 2014. 16 p. (In Russ.)
10. Nikolaev AA, Kornilov GP, Khrumshin TR, Nikiforov G, Mutallapova FF. Experimental study of electromagnetic compatibility of modern electric drives used in the power supply system of a metallurgical enterprise. Bulletin of Nosov Magnitogorsk state technical university. 2016;14(4):96-105. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105>
11. Hanzelka Z, Bien A. Power Quality Application Guide: Harmonics & Interharmonics. A guide material by Leonardo Power Quality Initiative, Copper Development Association; 2004.
12. Sivokon VP, Lapshov DV, Belov OA. Diagnostic signs of non-standard nonlinearity display in electric networks. Bulletin of Kamchatka state technical university. 2019;48:18-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2019-48-18-27>
13. Makasheva SI, Pinchukov PS. Current Quality: Assessment and Standardization Aspects. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2020;20(4):23-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/power200403>
14. Eidson B, Halpin M. An evaluation of the extent of correlation between interharmonic and voltage fluctuation measurements. IEEE Transactions on Power Delivery. 2016;31(2):753-760. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2015.2480715>
15. Testa A. et al. Interharmonics: theory and modeling. IEEE Transactions on Power Delivery. 2007;22(4):2335-2348. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905505>
16. Costa FB, Häselbarth S, Yanchenko S, Oliveira AM, Strunz K. Wavelet-Based Harmonic Magnitude Measurement in the Presence of Interharmonics. IEEE Transactions on Power Delivery. 2022;38(3):2072-2087. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2022.3233583>
17. Zhezhelanko IV, Sayenko YuL. Electricity quality indicators and their control at industrial enterprises. Moscow: Energoatomizdat; 2000. 252 p. (In Russ.)
18. Manusov VZ, Khripkov VV, Frolova VV. Comparative analysis of mathematical models for determining the coefficient of increasing the active resistance of conductors from higher harmonics. Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2018;1:184-188. (In Russ.)
19. Tul'skii VN, Kartashev II, Nasyrov RR, Simutkin MG. The influence of current higher harmonics on the operation modes of cables in the 380 V distribution network. Industrial power engineering. 2013;5:39-44. (In Russ.)
20. Lyutarevich AG, Goryunov VN, Dolinger SYu, Khatsevskiy KV. Modeling issues of electric power quality assurance devices. Omsk scientific bulletin. 2013;1(117):168-173. (In Russ.)
21. Ershov SV, Karnitskiy VYu. Modeling of parameters of filters of higher harmonics in MATLAB environment. Bulletin Tula State University. Technical Sciences. 2014;8:25-31. (In Russ.)
22. Chernykh IV. Modeling of electrical devices in Matlab SimPowerSystem and Simulink. Moscow: DMK Press; 2007. 288 p. ISBN 5-94074-395-1.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

- Надежда Николаевна Долгих** – старший преподаватель, Политехническая школа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия, Researcher ID: O-8241-2016.
- Дмитрий Сергеевич Осипов** – доктор технических наук, профессор, Политехническая школа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия, Researcher ID: B-1019-2016.
- Александр Олегович Шепелев** – кандидат технических наук, доцент, Политехническая школа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия, Researcher ID: A-6600-2017.
- Елена Юрьевна Шепелева** – старший преподаватель, Политехническая школа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия, Researcher ID: H-4171-2017.

#### ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы внесли равнозначный вклад в написание статьи.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Nadezda N. Dolgikh** – Senior Lecturer, Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia, Researcher ID: O-8241-2016.
- Dmitry S. Osipov** – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia, Researcher ID: B-1019-2016.
- Alexander O. Shepelev** – Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof., Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia, Researcher ID: A-6600-2017.
- Elena Yu. Shepeleva** – Senior lecturer, Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia, Researcher ID: H-4171-2017.

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

All authors contributed equally to the paper.