



УДК/UDC 621.311:622.276

DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-34-43

EDN: NVRKNK

Научная статья / Original article

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

А. И. Антонов, Д. Ю. Руди

Омский институт водного транспорта (филиал)
Сибирского государственного университета водного транспорта, г. Омск

Тенденция развития промышленных объектов непосредственно связана с внедрением в системы электроснабжения различных полупроводниковых преобразователей. Однако актуальным остается вопрос влияния данных преобразователей на качество электроэнергии. Энергоустановки индукционного нагрева, в состав которых входит тиристорный преобразователь частоты, могут стать причиной появления гармонических искажений.

В статье представлен активный эксперимент на выбранном объекте исследования с нелинейной нагрузкой. Разработана математическая модель для исследования влияния нелинейной нагрузки на качество электрической энергии при различных параметрах электрической сети. С помощью программы для ЭВМ обработаны результаты эксперимента и проведен анализ результатов.

Ключевые слова: качество электроэнергии, моделирование, приёмники электроэнергии, установки индукционного нагрева, несинусоидальность напряжений, гармонические искажения.

Для цитирования: Антонов А. И., Руди Д. Ю. Имитационное моделирование нелинейных режимов работы электрической сети и обработка результатов с помощью программы для ЭВМ // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 34–43. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-34-43. EDN: NVRKNK.



© Антонов А. И., Руди Д. Ю., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

SIMULATION MODELLING OF NONLINEAR MODES OF ELECTRIC NETWORK OPERATION AND PROCESSING OF RESULTS USING A COMPUTER PROGRAM

A. I. Antonov, D. Yu. Rudi

Omsk Institute of Water Transport (branch) Siberian State University Water Transport, Omsk, Russia

The trend of industrial facilities development is directly related to the introduction of various semiconductor converters into power supply systems. However, the issue of influence of these converters on the quality of electric power remains relevant. Power installations of induction heating, which include thyristor frequency converter, can cause the appearance of harmonic distortions. The paper presents an active experiment on a selected object of study with a nonlinear load. This developed model is designed to determine the indicators of power quality caused by the operation of nonlinear load. The model allows carrying out studies of the influence of nonlinear load on the quality of electrical energy at different parameters of the electrical network. The results of the experiment are processed using a computer program and the analysis of data processing of the results is carried out.

Keywords: power quality, modeling, power receivers, induction heating units, voltage non-sinusoidality, harmonic distortions.



Введение

В последнее время наблюдается ухудшение качества электроэнергии (КЭЭ) в электрических сетях промышленных и непромышленных потребителей [1–4].

Проблема снижения КЭЭ возникает при разнообразных нарушениях их нормального функционирования [1, 2]. Стремительное развитие электрооборудования и его широкое применение в разных отраслях (сырьевой, перерабатывающей, машиностроительной, металлургической и т.д.) приводит к развитию промышленных предприятий. Внедрение современных, высокоэффективных технологических установок, особенно тех, что используют полупроводниковые преобразователи, негативно влияет на качество электроэнергии в электроэнергетических системах. Наиболее серьезная проблема — это несинусоидальность напряжения [5].

Появление гармонических колебаний, составляющих спектр напряжения, тесно связано с применением электроприёмников с нелинейными вольт-амперными характеристиками (ВАХ). Данное электрическое оборудование потребляет ток несинусоидальной формы, который, в свою очередь, искажает синусоиду питающего напряжения. В связи с этим оборудование с нелинейными ВАХ является генератором высших гармоник тока [4–6]. Токи гармонических искажений генерируются нагрузкой как результат преобразования части энергии основной частоты. Они протекают по электрической сети через сопротивление источника и далее — по всем ветвям нагрузки, в результате чего гармонические напряжения появляются на всех элементах электрической цепи.

Цель — разработать имитационную модель объекта исследования в программном продукте Matlab

SimPowerSystem и проанализировать электромагнитную обстановку в исследуемой электрической сети.

Задачи:

- исследовать проблему влияния тиристорных преобразователей частоты на элементы электрической сети;
- построить имитационную модель объекта исследования;
- на основе разработанной модели проанализировать электромагнитную обстановку.

Основная часть

В современных промышленных предприятиях различного назначения широко используется электрическая энергия уже в преобразованном виде. Применение нелинейных электрических потребителей (вентильные преобразователи, преобразователи частоты различного типа, дуговые сталеплавильные печи, электросварочные установки, установки индукционного нагрева, освещения, бытовая и офисная техника) привело к тому, что значительно ухудшилось качество электроэнергии в электроэнергетических системах общего назначения [4, 5, 7–13].

Объектом исследования является электроустановка индукционного нагрева, в состав которой входит тиристорный преобразователь частоты (ТПЧ), электрическая схема которого представлена на рис. 1. ТПЧ построен по схеме двухзвенного преобразователя частоты со звеном постоянного тока [14].

Вентильные преобразователи в электрических сетях представляют собой генераторы спектров гармонических составляющих тока и напряжения [15], что, в свою очередь, негативно влияет на электрическую сеть переменного тока (дополнитель-

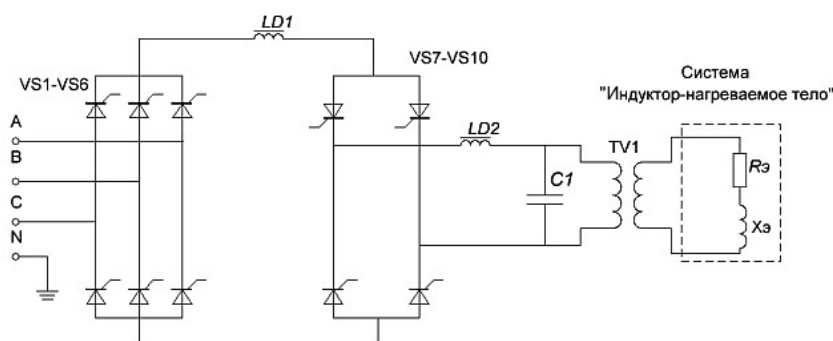


Рис. 1. Укрупненная принципиальная схема тиристорного преобразователя частоты: VS1-VS6 — выпрямитель; LD1-LD2 — сглаживающий реактор; VS7-VS10 — инвертор; C1 — батарея конденсаторов; RЭ, XЭ — эквивалентное активное и реактивное сопротивление системы «индуктор — нагреваемое тело»; TV1 — закалочный трансформатор [14]

Fig. 1. Enlarged schematic diagram of the thyristor frequency converter: VS1-VS6 — rectifier; LD1-LD2 — smoothing reactor; VS7-VS10 — inverter; C1 — capacitor bank; RЭ, XЭ — equivalent active and reactive resistance of the “inductor — heated body” system; TV1 — hardening transformer [14]

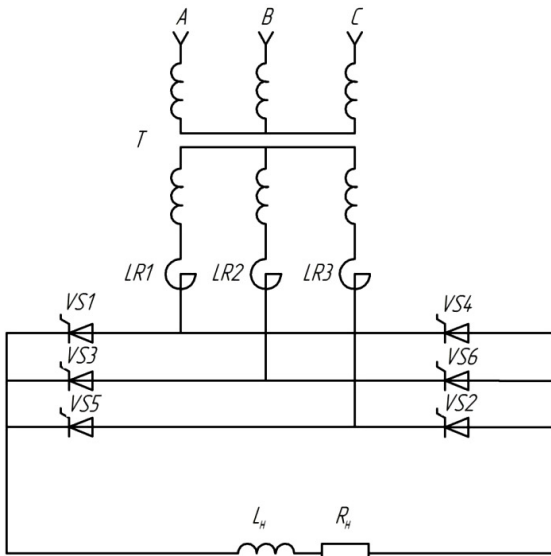


Рис. 2. Схема управления мостового управляемого выпрямителя
 Fig. 2. Control circuit of a bridge controlled rectifier

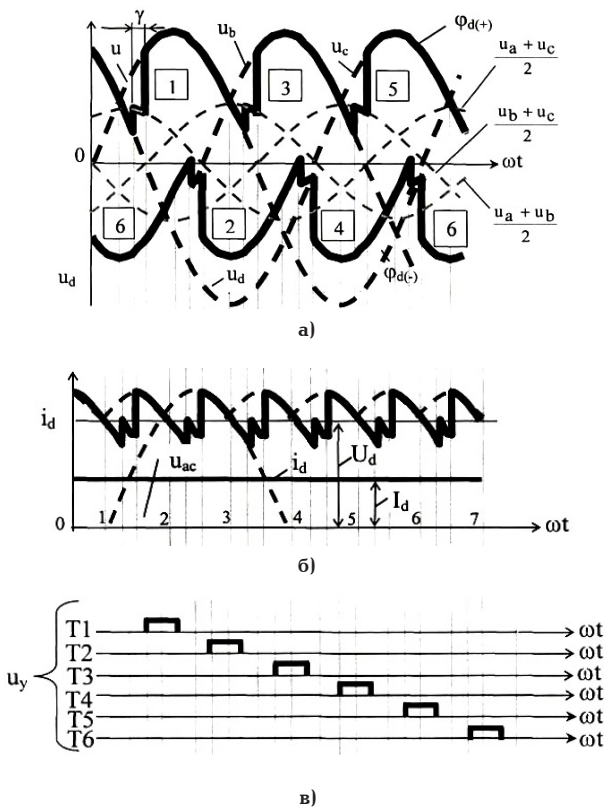


Рис. 3. Временные диаграммы токов и напряжений управляемого трехфазного мостового выпрямителя: а — диаграмма напряжений, б — диаграмма токов; в — импульсы отпирания тиристоров
 Fig. 3. Timing diagrams of currents and voltages of a controlled three-phase bridge rectifier: а — voltage diagram; б — current diagram; в — thyristor triggering pulses

ные потери мощности и нагрев) [16–18]. Данные электрические потери образуются в передающей электрической сети и в силовых трансформаторах. Падение напряжения от высших гармоник создает несинусоидальность напряжения, что неблагоприятно влияет на режимы работы промышленных и бытовых электропотребителей.

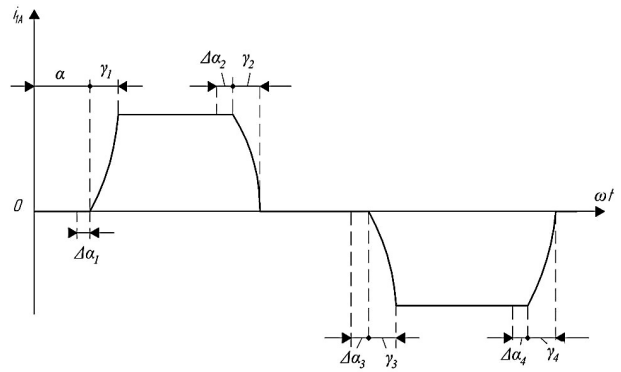


Рис. 4. Влияние асимметрии управляющих импульсов на форму выпрямленного тока
 Fig. 4. Influence of control pulse asymmetry on the shape of the rectified current

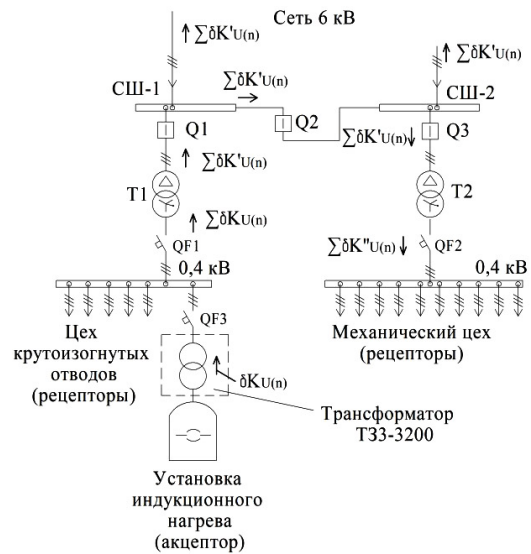


Рис. 5. Электрическая схема объекта исследования
 Fig. 5. Electrical diagram of the research object

В управляемых вентильных преобразователях чаще всего используются трехфазные мостовые схемы (рис. 2). Их работа характеризуется задержкой на угол α момента отпирания очередных тиристоров относительно точек естественного включения 1, 2, 3, 4, 5, 6 и т. д. (рис. 3а). Таким образом, отпирание импульсы u_y подаются на тиристоры T1–T6 (рис. 3в) с задержкой на угол α , определяемой системой управления выпрямителем [19].

Когда углы управления отдельных тиристоров T1–T6 имеют одинаковые значения α , то осуществляется симметричный способ управления выпрямителей. В таких условиях гармонические составляющие напряжения значительно меньше первой (основной) гармоники, поэтому при исследованиях ими пренебрегают [19, 20].

Однако возможен и несимметричный режим управления выпрямителем. В этом случае углы управления α_i отличаются от заданного значения α на величину ошибки $\Delta\alpha_i$ (рис. 4). Наличие такой ошибки приводит к увеличению угла сдвига, что негативно влияет на синусоидную форму напряжения [15].

В связи с этим предполагается, что при проведении исследования на разработанной имитационной модели в программе Matlab возможно обнаружить наличие превышения предельных значений выс-

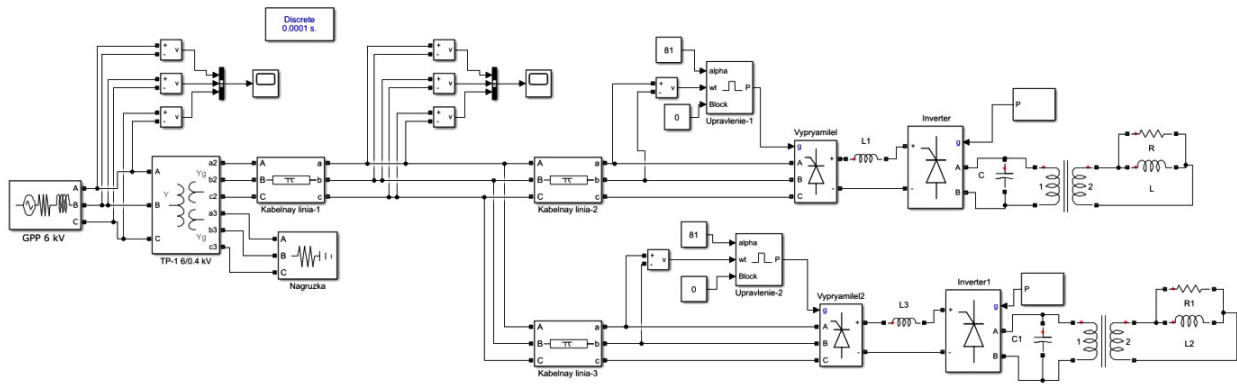


Рис. 6. Графическая интерпретация объекта исследования в Matlab
 Fig. 6. Graphical interpretation of the research object in the Matlab

ших гармоник. Более того, можно выявить кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжений $K_{U(n)}$.

Согласно ГОСТ 32144–2013, для данного коэффициента существует несколько допустимых пределов (нормально допустимые ($K_{U(n),н}$) и предельно допустимые ($K_{U(n),п}$). При определённом проценте значений коэффициентов $K_{U(n)}$ (не более 5 %) выход за пределы $K_{U(n),н}$ помеха не будет определяться, но наряду с этим ни одно значение коэффициентов $K_{U(n)}$ не должно выходить за пределы $K_{U(n),п}$. При других условиях в сети будет обнаружена помеха по $K_{U(n)}$ ($\delta K_{U(n)}$). Значения данных пределов для высших гармоник ($n = 2...40$) приведены в государственном стандарте. Например, если для 5-й гармоники ГОСТ 32144–2013 установил нормально допустимый предел значения коэффициента $K_{U(n)}$ равным 6 %, то значение предельно допустимого предела коэффициента $K_{U(n)}$ того же номера гармоники будет составлять 9 %.

Для проведения исследований необходимо сформировать проблемно-ориентированные математические модели элементов объекта исследования, которые рассматриваются по принципу декомпозиции, то есть математические модели элементов оборудования рассматриваются в отдельности, но с учетом реакции связи между ними [21, 22]. Электрическая схема объекта исследования представлена на рис. 5, а ее графическая интерпретация в программном продукте Matlab — на рис. 6.

Графическая интерпретация электрической схемы объекта исследования в программном продукте Matlab состоит из следующих блоков:

- блок «Three-Phase sources» реализует источник напряжения (трехфазный) с активно-индуктивным сопротивлением;
- блок «Three-phase transformer» реализует понижающий трансформатор;
- блок «Distributed Parameters Line» представляет модель трехфазной кабельной линии с сосредоточенными параметрами с учетом взаимной индуктивности фаз линии;
- блок «Universal Bridge» позволяет моделировать работу выпрямителя и инвертора, входящего в состав тиристорного преобразователя;
- блок «Linear Transformer» виртуально представляет высокочастотный закалочный трансформатор;
- RLC-цепь, подключенная параллельно закалочному трансформатору, моделирует работу батареи конденсаторов и активно-индуктивной нагруз-

ки преобразователя частоты, включающего в себя индуктор и участок нагреваемого тела;

— блок «Pulse Generator» является источником импульсного сигнала, который формирует управляющие импульсы на открытие вентилей инвертора;

— блок «Powergui», через подпрограмму «FFT Analysis», позволяет проводить исследование спектрального состава напряжения и тока в электрической схеме [22].

Исследуемый объект состоит из силового понижающего трансформатора Т1 типа ТМГ 1000-6/0,4; цеха крутоизогнутых отводов, в котором находится установка индукционного нагрева в составе генератора тока высокой частоты, выполненного на базе ТПЧ; батареи конденсаторов; закалочного трансформатора и активно-индуктивной нагрузки преобразователя частоты, представляющей собой индуктор и участок нагреваемого тела; механического цеха и лаборатории № 1.

Перед началом проведения активного эксперимента на разработанной имитационной модели объекта исследования примем к сведению, что угол отпирания тиристора в ТПЧ — от 0 до 90°. Для выявления отклонения электромагнитной обстановки в исследуемой имитационной модели объекта используется генератор случайных чисел (ГСЧ), который имитирует изменение значений по нормальному закону распределения случайной величины [22]. С помощью ГСЧ получены значения высших гармоник напряжения при различных углах отпирания тиристора (угол отпирания изменялся случайным образом 50 раз). Остальные блоки имитационной модели содержат параметры элементов исследуемой электрической сети, которые реально существуют на объекте исследования [22].

Основные результаты

Обработка массива данных $K_{U(n)}$, полученных в ходе проведения измерений в имитационной модели объекта исследования, производилось в программе для ЭВМ [23], разработанной коллективом авторов, на которую получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [24] на основе методов теории вероятности и математической статистики [25].

Для лучшего восприятия результаты обработки значений $K_{U(n)}$ в электрической сети 0,4 кВ при наличии нелинейной нагрузки для фазы А представлены в табл. 1.

По представленным результатам видно, что в некоторых гармониках имеет место быть вероятность появления кондуктивной низкочастотной

Таблица 1. Результаты обработки значений $K_{U(n)}$ в электрической сети 0,4 кВ при наличии нелинейной нагрузки на фазе А

Table 1. Results of processing the $K_{U(n)}$ values in a 0,4 kV electrical network by the presence of a nonlinear load on phase A

| № гармоники | $K_{U(n),\text{max.}}\%$ | $K_{U(n),\text{min.}}\%$ | $M[K_{U(n)}]\%$ | $\sigma[K_{U(n)}]\%$ | $K_{U(n),н.}\%$ | $K_{U(n),п.}\%$ | $P(\delta K_{U(n)})\%$ |
|-------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| 2 | 0,25 | 0,01 | 0,103 | 0,057 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | 0,44 | 0,02 | 0,144 | 0,093 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 4 | 0,67 | 0,03 | 0,287 | 0,166 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 1,45 | 0,09 | 0,645 | 0,268 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | 1,61 | 0,04 | 0,528 | 0,407 | 18,00 | 24,00 | 37,00 |
| 7 | 1,31 | 0,08 | 0,700 | 0,306 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 8 | 1,58 | 0,10 | 0,756 | 0,369 | 16,00 | 52,00 | 63,00 |
| 9 | 1,29 | 0,06 | 0,550 | 0,335 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 10 | 1,83 | 0,06 | 0,606 | 0,402 | 24,00 | 28,00 | 47,00 |
| 11 | 1,32 | 0,02 | 0,461 | 0,276 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 12 | 1,53 | 0,04 | 0,534 | 0,313 | 14,00 | 74,00 | 83,00 |
| 13 | 1,38 | 0,02 | 0,468 | 0,315 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 14 | 1,27 | 0,05 | 0,403 | 0,263 | 16,00 | 62,00 | 73,00 |
| 15 | 0,89 | 0,02 | 0,337 | 0,181 | 34,00 | 24,00 | 53,00 |
| 16 | 0,81 | 0,02 | 0,276 | 0,161 | 18,00 | 40,00 | 53,00 |
| 17 | 0,71 | 0,01 | 0,240 | 0,148 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 18 | 0,66 | 0,03 | 0,203 | 0,130 | 22,00 | 18,00 | 35,00 |
| 19 | 0,46 | 0,04 | 0,201 | 0,114 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 20 | 0,48 | 0,02 | 0,178 | 0,094 | 22,00 | 12,00 | 29,00 |
| 21 | 0,43 | 0,01 | 0,165 | 0,095 | 14,00 | 14,00 | 23,00 |
| 22 | 0,51 | 0,03 | 0,182 | 0,101 | 16,00 | 16,00 | 27,00 |
| 23 | 0,54 | 0,02 | 0,198 | 0,113 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 24 | 0,33 | 0,04 | 0,149 | 0,072 | 10,00 | 4,00 | 9,00 |
| 25 | 0,62 | 0,02 | 0,167 | 0,123 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 26 | 0,45 | 0,04 | 0,158 | 0,085 | 14,00 | 6,00 | 15,00 |
| 27 | 0,35 | 0,01 | 0,139 | 0,095 | 14,00 | 10,00 | 19,00 |
| 28 | 0,38 | 0,04 | 0,154 | 0,084 | 18,00 | 8,00 | 21,00 |
| 29 | 0,33 | 0,05 | 0,157 | 0,069 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 30 | 0,37 | 0,01 | 0,129 | 0,088 | 18,00 | 6,00 | 19,00 |
| 31 | 0,28 | 0,02 | 0,123 | 0,062 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 32 | 0,27 | 0,01 | 0,109 | 0,061 | 8,00 | 0,00 | 3,00 |
| 33 | 0,31 | 0,01 | 0,130 | 0,072 | 14,00 | 2,00 | 11,00 |
| 34 | 0,28 | 0,03 | 0,133 | 0,065 | 16,00 | 0,00 | 11,00 |
| 35 | 0,33 | 0,00 | 0,122 | 0,076 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 36 | 0,33 | 0,02 | 0,146 | 0,086 | 24,00 | 4,00 | 23,00 |
| 37 | 0,33 | 0,02 | 0,128 | 0,089 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 38 | 0,38 | 0,02 | 0,113 | 0,077 | 10,00 | 2,00 | 7,00 |
| 39 | 0,34 | 0,02 | 0,127 | 0,068 | 14,00 | 2,00 | 11,00 |
| 40 | 0,32 | 0,02 | 0,132 | 0,074 | 12,00 | 2,00 | 9,00 |

электромагнитной помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения как по нормально допустимому значению ($P(\delta K_{U(n),н})$), так и по предельно допустимому значению ($P(\delta K_{U(n),п})$). Общая вероятность появления помехи $\delta K_{U(n)}$, в процентах, находится по формуле

$$P(\delta K_{U(n)}) = P(\delta K_{U(n),н}) + P(\delta K_{U(n),п}) - 5. \quad (1)$$

В формуле (1) из суммы в процентах вероятности появления кондуктивной низкочастотной

электромагнитной помехи по $K_{U(n)}$ по нормально допустимому и предельно допустимому значению отнимается 5 %. Согласно ГОСТ 32144–2013, если до 5 % всех полученных значений коэффициентов $K_{U(n)}$ находятся выше нормально допустимых пределов, то это не считается помехой. Следовательно, в общую вероятность появления кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи $K_{U(n)}$ не входит. По данному принципу, согласно формуле (1), в табл. 2 найдены численные значения общей вероятности появления помехи $P(\delta K_{U(n)})$. Например, для

Таблица 2. Значения F -критерия Фишера
Table 2. Fisher's F -test values

| Номер гармоники | Значения F -критерия Фишера |
|-----------------|-------------------------------|
| 2 | 2,44 |
| 3 | 3,06 |
| 4 | 2,92 |
| 5 | 2,33 |
| 6 | 2,38 |
| 7 | 1,72 |
| 8 | 1,04 |
| 9 | 2,63 |
| 10 | 1,05 |
| 11 | 1,01 |
| 12 | 1,39 |
| 13 | 2,41 |
| 14 | 3,09 |
| 15 | 2,78 |
| 16 | 2,79 |
| 17 | 1,03 |
| 18 | 1,12 |
| 19 | 2,38 |
| 20 | 1,30 |
| 21 | 1,06 |
| 22 | 1,62 |
| 23 | 0,75 |
| 24 | 1,20 |
| 25 | 2,48 |
| 26 | 1,01 |
| 27 | 1,37 |
| 28 | 0,50 |
| 29 | 0,48 |
| 30 | 1,95 |
| 31 | 0,47 |
| 32 | 0,73 |
| 33 | 0,83 |
| 34 | 1,36 |
| 35 | 0,96 |
| 36 | 1,87 |
| 37 | 0,83 |
| 38 | 1,91 |
| 39 | 0,37 |
| 40 | 1,02 |

6-й гармоники на фазе А общая вероятность появления помехи $P(\delta K_{U(n)})$ в процентах равна

$$P(\delta K_{U(n)}) = 18,00 + 24,00 - 5 = 37,00.$$

По номерам гармоники, в которых присутствует вероятность появления помехи $P(\delta K_{U(n)})$, можно судить, какие воздействия эта помеха оказывает на рецепторы (элементы электрической сети, которые являются чувствительными к электромагнитным помехам). Например, известно, что гармоники 1, 4, 7, 10, ... образуют прямую последовательность; гармоники 2, 5, 8, 11, ... — обратную; гармоники кратные трем (3, 6, 9, ...) — нулевую.

Из табл. 1 видно, что воздействие гармонических составляющих напряжения прослеживается и для прямой последовательности (гармоники 10, 16, 22, 28, 34, 40), и для обратной последовательности (гармоники 8, 14, 20, 26, 32, 38), и для нулевой последовательности (гармоники 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39).

Из интерфейса результатов обработки значений коэффициентов $K_{U(n)}$ (рис. 7–8) понятно, что для гармоник 12 и 14 математическое ожидание значений коэффициентов $K_{U(n)}$ составляют 0,534 и 0,403, соответственно, а среднеквадратичные отклонения — 0,313 и 0,263.

После создания имитационной модели и проведения экспериментальных исследований необходимо проверить результаты на адекватность.

Адекватность модели проверялась с использованием F -критерия (критерия Фишера), согласно которому система дифференциальных уравнений адекватна, т. е. неточности моделирования существенно меньше ошибок измерений при следующем выражении:

$$F \leq F_{кр}, \quad (2)$$

где $F_{кр}$ — критическое значение F -критерия (находится из таблицы значений F -критерия Фишера).

Значение F -критерия определяется по формуле

$$F = \frac{S_{ост}^2}{S^2(\bar{y})}, \quad (3)$$

где $S_{ост}$ — дисперсия ошибки моделирования; $S^2(\bar{y})$ — дисперсия ошибок измерений выходной величины y , полученных в ходе пассивного эксперимента.

Выходной величиной в данном случае являются значения $K_{U(n)}$. Дисперсия ошибок $S(\bar{y})$ определяется по формуле

$$S^2 = \frac{1}{50 - 1} \cdot \sum_{i=1}^{50} \left(y_i - \frac{\sum_{i=1}^{50} y_i}{50} \right)^2. \quad (4)$$

Так как при моделировании получено 50 значений $K_{U(n)}$, то из результатов пассивного эксперимента сделана выборка 50-ти значений в период работы электротермических установок с учетом отбраковывания грубых ошибок, полученных в ходе эксперимента. Выборка 50-ти подряд значений $K_{U(n)}$ производилась из проведенного эксперимента в электрических сетях реального объекта [26] и значения $K_{U(n)}$ взяты из результатов проведенного эксперимента в имитационной модели объекта исследования.

Зная значение среднеквадратичного отклонения, определяем значение дисперсии. Дисперсия ошибки моделирования вычисляется по формуле

$$S_{ост}^2 = S_{\Delta}^2 / f, \quad (5)$$

где S_{Δ}^2 — выборочная дисперсия случайной ошибки; f — число степеней свободы эксперимента.

Выборочная дисперсия случайной ошибки S_{Δ}^2 вычисляется по формуле

$$S_{\Delta}^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^p)^2, \quad (6)$$

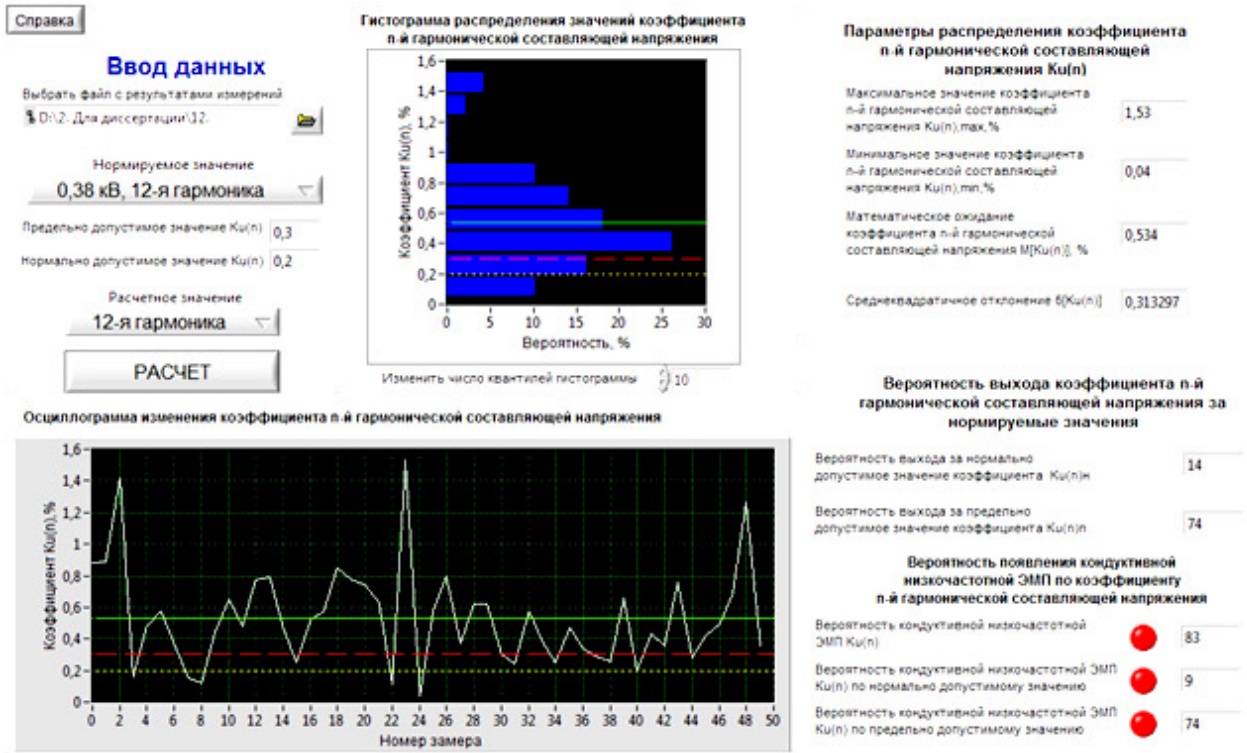


Рис. 7. Интерфейс результата обработки значений коэффициента $\delta K_{U(12)}$
 Fig. 7. Interface of the result of processing the values of the $\delta K_{U(12)}$ coefficient

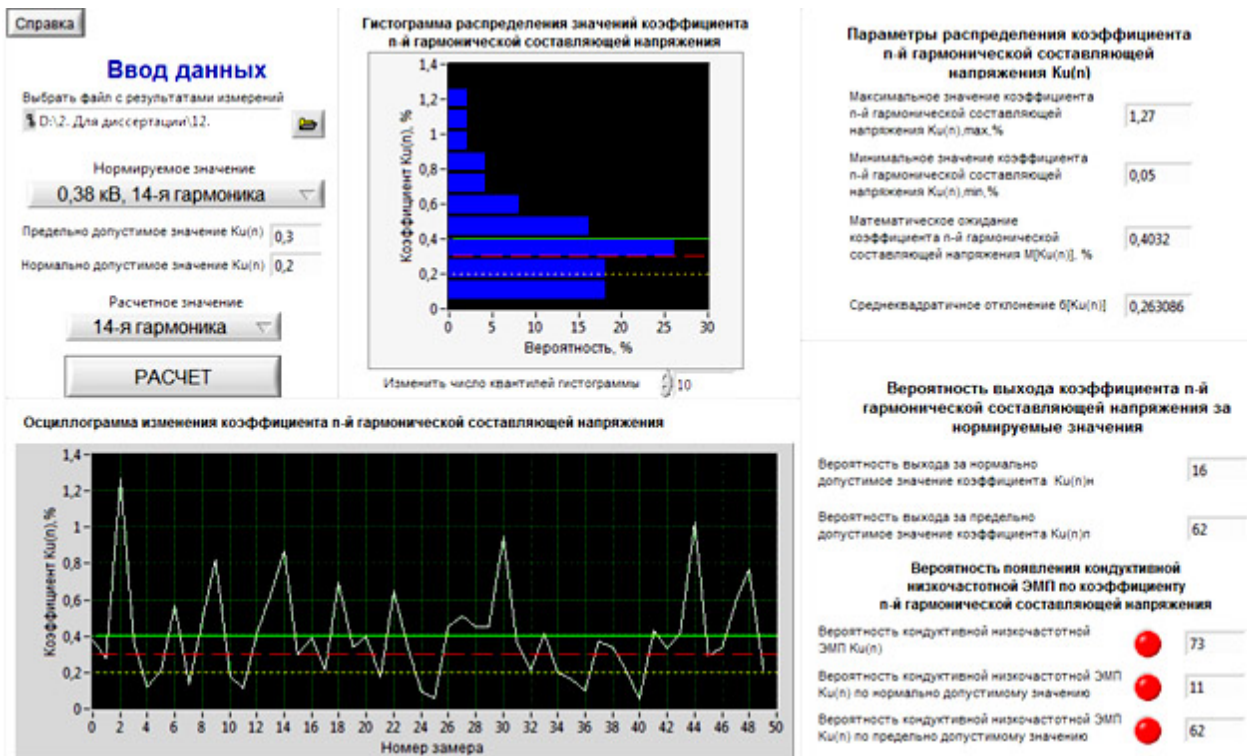


Рис. 8. Интерфейс результата обработки значений коэффициента $\delta K_{U(14)}$
 Fig. 8. Interface of the result of processing the values of the $\delta K_{U(14)}$ coefficient

где y_i — значения из пассивного эксперимента; y_i^p — значения, полученные по имитационной модели.

Число степеней свободы эксперимента рассчитывается по формуле

$$f = n - (m + 1), \quad (7)$$

где n — количество опытов; m — число рассчитываемых параметров модели.

Зная дисперсии ошибки моделирования и используя формулу (3), определяем F -критерий

(табл. 2). Необходимо найти критическое значение F -критерия из таблицы значений F -критерия Фишера [27]. Для этого определяем коэффициент k_1 , равный 2 (порядок модели) и коэффициент k_2 , равный 50 (количество опытов). Исходя из найденных коэффициентов, по таблице значений F -критерия Фишера определяем значения. Так как значения F -критерия Фишера всех гармоник ниже, чем 3,18, то условие (2) выполняется. Следовательно, модель объекта исследования адекватна.

Вывод

В ходе моделирования системы электроснабжения объекта исследования разработана имитационная модель в программном продукте Matlab. Данная модель позволяет проводить анализ качества электрической энергии и решать разнообразные задачи, которые относятся к анализу поведения объекта моделирования.

На основе анализа сделан вывод о том, что в узле нагрузки объекта исследования значение коэффициента n -й гармонических составляющих напряжения превышает нормально и предельно допустимые значения в соответствии с ГОСТом 32144–2013.

Список источников / References

1. Степанов В. С., Солонина Н. Н., Суслов К. В. Анализ влияния гармонических колебаний на работу электрических сетей и потребителей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3 (98). С. 222–227. EDN: TMYXPV.

Stepanov V. S., Solonina N. N., Suslov K. V. Analiz vliyaniya garmonicheskikh kolebaniy na rabotu elektricheskikh setey i potrebiteley [Analysis of harmonic oscillation effect on the operation of electrical networks and consumers]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2015. No. 3 (98). P. 222–227. EDN: TMYXPV. (In Russ.).

2. Хацевский К. В., Денчик Ю. М., Клеутин В. И. [и др.] Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения // Омский научный вестник. 2012. № 2 (110). С. 212–214. EDN: PBGNQN.

Khatsevskiy K. V., Denchik Yu. M., Kleutin V. I. [et al.] Problemy kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya [Quality of electric power in electrical supply system]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2012. No. 2 (110). P. 212–214. EDN: PBGNQN. (In Russ.).

3. Бершадский И. А., Якимишина В. В., Наглюк Е. Я. Влияние несинусоидальности и несимметрии в четырехпроводной сети непромышленных потребителей на снижение пропускной способности кабелей // Вестник Донецкого национального технического университета. 2020. № 2 (20). С. 18–25. EDN: QECTFU.

Bershadskiy I. A., Yakimishina V. V., Naglyuk E. Ya. Vliyaniye nesinusoidal'nosti i nesimmetrii v chetyrehprovodnoy seti nepromyshlennykh potrebiteley na snizheniye propusknoy sposobnosti kabeley [Impact of sinusoidality and asymmetry in four-wire network of non-industrial consumers on reducing the cable capacity]. Vestnik Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. *Vestnik Donetsk National Technical University*. 2020. No. 2 (20). P. 18–25. EDN: QECTFU. (In Russ.).

4. Руди Д. Ю., Антонов А. И., Вишнягов М. Г. [и др.]. Исследование высших гармоник в электрических сетях низкого напряжения // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125. EDN: VQNFZY.

Rudi D. Yu., Antonov A. I., Vishnyagov M. G. [et al.]. Issledovaniye vysshikh garmonik v elektricheskikh setyakh nizkogo napryazheniya [Study of higher harmonics in low voltage electrical networks]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*.

2018. No. 6 (162). P. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125. EDN: VQNFZY. (In Russ.).

5. Антонов А. И., Руди Д. Ю., Хацевский К. В. Исследование качества электроэнергии в электрических сетях с полупроводниковыми преобразователями // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 1 (68). С. 123–30. DOI: 10.18822/byusu202301123-130. EDN: TNSTWH.

Antonov A. I., Rudi D. Yu., Khatsevskiy K. V. Issledovaniye kachestva elektroenergii v elektricheskikh setyakh s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami [Study of the quality of electric power in electric networks with semiconductor converters]. Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. *Yugra State University Bulletin*. 2023. No. 1 (68). P. 123–30. DOI: 10.18822/byusu202301123-130. EDN: TNSTWH. (In Russ.).

6. Рылов Ю. А. Расчет режимов работы систем электроснабжения и определение долевого вклада потребителей в показатели качества электроэнергии при наличии несинусоидальных нагрузок: дис. ... канд. тех. наук. Казань, 2006. 152 с.

Rylov Yu. A. Raschet rezhimov raboty sistem elektrosnabzheniya i opredeleniye dolevogo vklada potrebiteley v pokazateli kachestva elektroenergii pri nalichii nesinusoidal'nykh nagruzok [Calculation of operating modes of power supply systems and determination of the share contribution of consumers to the quality indicators of electric power in the presence of non-sinusoidal loads]. Kazan, 2006. 152 p. (In Russ.).

7. Викторов В. А., Мешалкин В. А., Салтыков В. М. Исследование уровней и спектров высших гармоник тока в электрических сетях питания компьютерной техники и основные мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 381–401. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10415. EDN: JGIIPU.

Viktorov V. A., Meshalkin V. A., Saltykov V. M. Issledovaniye urovney i spektrov vysshikh garmonik toka v elektricheskikh setyakh pitaniya komp'yuternoy tekhniki i osnovnyye meropriyatiya po obespecheniyu elektromagnitnoy sovmestimosti [The research of the levels and spectra of higher harmonics of current in electrical power networks of computer equipment and the basic activities of the electromagnetic compatibility provision]. Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. *Systems of Control, Communication and Security*. 2019. No. 4. P. 381–401. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10415. EDN: JGIIPU. (In Russ.).

8. Абрамович Б. Н., Сычев Ю. А., Мингазов А. С., Полищук В. В. О компенсации высших гармоник тока и напряжения, создаваемых источником бесперебойного питания // Нефтяное хозяйство. 2013. № 10. С. 126–127. EDN: RPUKPH.

Abramovich B. N., Sychev Yu. A., Mingazov A. S., Polishchuk V. V. O kompensatsii vysshikh garmonik toka i napryazheniya, sozdavayemykh istochnikom bespereboynogo pitaniya [On the elimination of voltage and current harmonics created by uninterruptible power]. Neftyanoye khozyaystvo. *Oil Industry*. 2013. No. 10. P. 126–127. EDN: RPUKPH. (In Russ.).

9. Широков О. Г., Алферова Т. В., Бахмутская В. В., Юрлов И. Ю. Оценка влияния осветительной нагрузки на показатели несинусоидальности напряжения и потребляемого тока // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 2 (19). С. 28–40. EDN: OVGBVB.

Shirokov O. G., Alferova T. V., Bakhmutskaya V. V., Yurlov I. Yu. Otsenka vliyaniya osvetitel'noy nagruzki na pokazateli nesinusoidal'nosti napryazheniya i potreblayemogo toka [Assessment of the impact of lighting load on the indices of non-sinusoidal voltage and consumed current]. Agrotekhnika i energoobespecheniye. *Agricultural Machinery and Energy Supply*. 2018. No. 2 (19). P. 28–40. EDN: OVGBVB. (In Russ.).

10. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1994. 264 с.

Zhezhelenko I. V. Vysshieye garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. 3rd ed., revised and suppl. Moscow, 1994. 264 p. (In Russ.).

11. Шидловский А. К., Жаркин А. Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях: моногр. Киев: Наукова думка, 2005. 209 с. ISBN 966-00-0471-0. EDN: QMLTXN.
- Shidlovskiy A. K., Zharkin A. F. Vysshieye garmoniki v nizkovol'tnykh elektricheskikh setyakh [Higher harmonics in low-voltage electrical networks]. Kyiv, 2005. 209 p. ISBN 966-00-0471-0. EDN: QMLTXN. (In Russ.).
12. Руди Д. Ю., Горелов С. В., Антонов А. И. [и др.] Анализ несинусоидальности напряжения в системах электроснабжения с электроустановками индукционного нагрева // Вестник Чувашского университета. 2021. № 1. С. 122–133. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-122-133. EDN: DBZXOF.
- Rudi D. Yu., Gorelov S. V., Antonov A. I. [et al.] Analiz nesinusoidal'nosti napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya s elektroustanovkami induktsionnogo nagreva [Analysis of voltage non-sinusoidality in power supply systems with induction heating units]. Vestnik Chuvashskogo universiteta. *Bulletin of the Chuvash University*. 2021. No. 1. P. 122–133. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-122-133. EDN: DBZXOF. (In Russ.).
13. Руди Д. Ю. Электромагнитная совместимость в системе электроснабжения механического цеха ЗАО «Сибгазстройдеталь» с электроустановками индукционного нагрева // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2021. № 10. С. 35–43. EDN: UFCKMB.
- Rudi D. Yu. Elektromagnitnaya sovmestimost' v sisteme elektrosnabzheniya mekhanicheskogo tsekha ZAO «Sibgazstroydetal'» s elektroustanovkami induktsionnogo nagreva [Electromagnetic compatibility in the power supply system of the mechanical shop of CJSC Sibgazstroydetal with induction heating electrical installations]. Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont. *Electrical Equipment: Operation and Repair*. 2021. No. 10. P. 35–43. EDN: UFCKMB. (In Russ.).
14. Коржов Д. Н. Обеспечение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2015. 169 с.
- Korzhev D. N. Obespecheniye elektromagnitnoy sovmestimosti v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii s elektroustanovkami induktsionnogo nagreva [Ensuring electromagnetic compatibility in power supply systems of industrial enterprises with induction heating installations]. Belgorod, 2015. 169 p. (In Russ.).
15. Ордабаев М. Е. Повышение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения при гармоническом воздействии: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 168 с.
- Ordabayev M. E. Povysheniye elektromagnitnoy sovmestimosti v sistemakh elektrosnabzheniya pri garmonicheskom vozdeystvii [Increasing electromagnetic compatibility in power supply systems under harmonic influence]. Moscow, 2009. 168 p. (In Russ.).
16. Лютаревич А. Г., Вырва А. А., Долингер С. Ю. [и др.] Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения // Омский научный вестник. 2009. № 1 (77). С. 109–113. EDN: MVPQYB.
- Lyutarevich A. G., Vyryva A. A., Dolinger S. Yu. [et al.] Otsenka dopolnitel'nykh poter' moshchnosti ot vysshikh garmonik v elementakh sistem elektrosnabzheniya [Estimation of additional power losses due to higher harmonics in elements of power system]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2009. No. 1 (77). P. 109–113. EDN: MVPQYB. (In Russ.).
17. Осипов Д. С., Лютаревич А. Г., Ткаченко В. А., Логунова Я. Ю. Алгоритм расчета потерь мощности, обусловленных высшими гармониками и интергармониками на основе вейвлет-преобразования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23, № 1. С. 38–47. DOI: 10.14529/power230104. EDN: UURUKU.
- Osipov D. S., Lyutarevich A. G., Tkachenko V. A., Logunova Ya. Yu. Algoritm rascheta poter' moshchnosti, obuslovlennykh vysshimi garmonikami i intergarmonikami na osnove veyvlet-preobrazovaniya [An algorithm for calculating power losses due to higher harmonics and interharmonics based on the wavelet transform]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"*. 2023. Vol. 23, no. 1. P. 38–47. DOI: 10.14529/power230104. EDN: UURUKU. (In Russ.).
18. Осипов Д. С., Коваленко Д. В., Горюнов В. Н., Долгих Н. Н. Расчет дополнительных потерь мощности при несинусоидальных режимах систем электроснабжения с учетом температурной зависимости сопротивления токоведущих частей // Ученые Омска — Региону: сб. тр. I Регион. науч.-техн. конф. 2016. С. 44–48. EDN: YVQSV.
- Osipov D. S., Kovalenko D. V., Goryunov V. N., Dolgikh N. N. Raschet dopolnitel'nykh poter' moshchnosti pri nesinusoidal'nykh rezhimakh sistem elektrosnabzheniya s uchedom temperaturnoy zavisimosti soprotivleniya tokovedushchikh chastei [Calculation of additional power losses in non-sinusoidal modes of power supply systems considering the temperature dependence of the current-carrying parts resistance]. *Uchenyye Omska — Regionu*. 2016. P. 44–48. EDN: YVQSV. (In Russ.).
19. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Электрооборудование. В 2 т. / Под общ. ред. А. А. Федорова. Москва: Энергоатомиздат, 1987. Т. 2. 487 с.
- Spravochnik po elektrosnabzheniyu i elektrooborudovaniyu. Elektrooborudovaniye. V 2 t. [Handbook of power supply and electrical equipment. Electrical equipment] / Ed. by A. A. Fedorov. Moscow, 1987. Vol. 2. 487 p. (In Russ.).
20. Иванова Е. В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / Под ред.: В. П. Горелова, Н. Н. Лизалека. Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2006. 432 с. ISBN 5-8119-0201-0. EDN: QMJPSJ.
- Ivanova E. V. Konduktivnyye elektromagnitnyye pomekhi v elektroenergeticheskikh sistemakh [Conductive electromagnetic interference in electric power systems] / Ed. by V. P. Gorelov, N. N. Lizaleka. Novosibirsk, 2006. 432 p. ISBN 5-8119-0201-0. EDN: QMJPSJ. (In Russ.).
21. Антонов А. И., Руди Д. Ю., Хацевский К. В. Моделирование системы электроснабжения цеха кривоизогнутых отводов в программе Matlab // Новые технологии в ТЭК, энергоэффективность и энергосбережение в ТЭК: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Ханты-Мансийск, 2023. С. 12–19. EDN: OBSZTI.
- Antonov A. I., Rudi D. Yu., Khatsevskiy K. V. Modelirovaniye sistemy elektrosnabzheniya tsekha krivoizognutykh otvodov v programme Matlab [Modeling of the power supply system of the shop of curved branches in Matlab]. *Novyye tekhnologii v TEK, energoeffektivnost' i energosberezeniye v TEK. New Technologies in the FEC, Energy Efficiency and Energy Saving in FEC*. Khanty-Mansiysk, 2023. P. 12–19. EDN: OBSZTI. (In Russ.).
22. Антонов А. И. Повышение качества функционирования электрических сетей на основе компьютерного моделирования несимметричных режимов: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2020. 187 с.
- Antonov A. I. Povysheniye kachestva funktsionirovaniya elektricheskikh setey na osnove komp'yuternogo modelirovaniya nesimmetrichnykh rezhimov [Improving the quality of electrical networks based on computer modeling of asymmetric modes]. Novosibirsk, 2020. 187 p. (In Russ.).
23. Руди Д. Ю., Вишнягов М. Г., Руппель А. А. Компьютерная программа для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 65–78. DOI: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78. EDN: ITCMBE.
- Rudi D. Yu., Vishnyagov M. G., Ruppel A. A. Komp'yuternaya programma dlya opredeleniya konduktivnoy nizkochastotnoy elektromagnitnoy pomekhi po koeffitsiyentu n-y garmonicheskoy sostavlyayushchey napryazheniya [Computer program for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference by the coefficient of the nth harmonic component of the voltage]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskiy zhurnal. International Scientific Journal*. 2021. No. 1. P. 65–

78. DOI: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78. EDN: ITCMBE. (In Russ.).

24. Руди Д. Ю., Антонов А. И., Денчик Ю. М. [и др.]. Программа для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения: программа для ЭВМ RU № 2021613934. Москва: ФИПС, 2024. Бюл. № 2. EDN: LTRBRG.

Rudi D. Yu., Antonov A. I., Denchik Yu. M. [et al.]. Programma dlya opredeleniya konduktivnoy nizkochastotnoy elektromagnitnoy pomekhi po koefitsiyentu n -y garmonicheskoy sostavlyayushchey napryazheniya [Program for determining conductive low-frequency electromagnetic interference by the coefficient of the n -th harmonic component of voltage: computer program No. 2021613934]. Moscow, 2024. Bull. No. 2. EDN: LTRBRG. (In Russ.).

25. Руди Д. Ю., Горелов С. В., Вишнягов М. Г. [и др.] Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 33. С. 177–194. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.11. EDN: WZNYAM.

Rudi D. Yu., Gorelov S. V., Vishnyagov M. G. [et al.] Algoritm opredeleniya konduktivnoy nizkochastotnoy elektromagnitnoy pomekhi po koefitsiyentu n -y garmonicheskoy sostavlyayushchey napryazheniya [The algorithm for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference by the coefficient of the n th harmonic component of the voltage]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems*. 2020. No. 33. P. 177–194. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.11. EDN: WZNYAM. (In Russ.).

26. Антонов А. И., Руди Д. Ю., Хацевский К. В. Анализ результатов исследования качества электроэнергии в электрических сетях ЗАО «Сибгазстройдеталь» // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 4. С. 143–152. DOI: 10.18822/byusu202304143-152. EDN: HILOYG.

Antonov A. I., Rudi D. Yu., Khatsevskiy K. V. Analiz rezul'tatov issledovaniya kachestva elektroenergii v elektricheskikh setyakh ZAO «Sibgazstroydetal» [Analysis of the results of studying the quality of electric power in the electric networks of the CJSC Sibgazstroydetal]. Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. *Yugra State University Bulletin*. 2023. No. 4. P. 143–152. DOI: 10.18822/byusu202304143-152. EDN: HILOYG. (In Russ.).

27. Бронштейн И. Н., Семедьяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. Москва: Наука, 1981. 721 с.

Bronshteyn I. N., Semendiyayev K. A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov [Handbook of mathematics for engineers and students]. Moscow, 1981. 721 p. (In Russ.).

АНТОНОВ Александр Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта, ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 5682-8929

AuthorID (РИНЦ): 842787

Адрес для переписки: aleksandr_antonov_85@mail.ru

РУДИ Дмитрий Юрьевич, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 5222-7906

AuthorID (РИНЦ): 830094

Адрес для переписки: dima_rudi@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 03.03.2025; одобрена после рецензирования 06.05.2025; принята к публикации 18.07.2025.

ANTONOV Alexander Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Omsk Institute of Water Transport (Branch) Siberian State University Water Transport (OIWT (branch) SSUWT), Omsk.

SPIN-code: 5682-8929

AuthorID (RSCI): 842787

Correspondence address: aleksandr_antonov_85@mail.ru

RUDI Dmitry Yurievich, Senior Lecturer of the Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, OIWT (branch) SSUWT, Omsk.

SPIN-code: 5222-7906

AuthorID (RSCI): 830094

Correspondence address: dima_rudi@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 03.03.2025; approved after reviewing 06.05.2025; accepted for publication 18.07.2025.