

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.11

УДК 621.311:622.276

Д.Ю. Руди<sup>1</sup>, С.В. Горелов<sup>1</sup>, М.Г. Вишнягов<sup>2</sup>, Д.А. Зубанов<sup>2</sup>,  
Н.В. Зубанова<sup>1</sup>, Д.М. Иванов<sup>3</sup>, А.А. Руппель<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет водного транспорта,  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Омский институт водного транспорта, Омск, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНДУКТИВНОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ $n$ -Й ГАРМОНИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Электроэнергетические системы (ЭЭС) различных промышленных предприятий по ряду причин характеризуются низким качеством электрической энергии, в частности, наличием в сетях высших гармоник, в результате чего возникают кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи (ЭМП), что оказывает негативное влияние на электрооборудование. Вопрос определения кондуктивных низкочастотных ЭМП по коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения в рамках указанной проблемы остается нерешенным. **Цель исследования:** разработка алгоритма определения кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения, позволяющего научно обоснованно оценивать электромагнитную обстановку в электрических сетях. **Методы:** формирование последовательности действий по определению критерия качества функционирования электроэнергетических систем по коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения. **Результаты:** на базе теории вероятности и математической статистики разработан алгоритм определения кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения, основанный на требованиях стандарта ГОСТ 32144-2013. На базе алгоритма разработана компьютерная программа, позволяющая производить автоматизированный расчёт параметров электромагнитной обстановки, включая такие параметры распределения значений коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения, как математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение, вероятность выхода коэффициентов  $n$ -й гармонической составляющей напряжения за нормируемые значения и вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения за расчётный период. Программа позволяет производить визуализацию массивов данных, которые получены в ходе различных экспериментальных исследований, с помощью осциллограмм и гистограмм. **Практическая значимость:** предлагаемый алгоритм позволяет сформировать достоверные сведения об электромагнитной обстановке в ЭЭС и может быть использован при разработке концепции повышения качества электрической энергии с учетом аналитических и численных аспектов компьютерных исследований.

**Ключевые слова:** алгоритм, качество электроэнергии, кондуктивная помеха, гармоники, коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения.

**D.Yu. Rudi<sup>1</sup>, S.V. Gorelov<sup>1</sup>, M.G. Vishnyagov<sup>2</sup>, D.A. Zubanov<sup>2</sup>,  
N.V. Zubanova<sup>1</sup>, D.M. Ivanov<sup>3</sup>, A.A. Ruppel<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Omsk Institute of Water Transport, Omsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

## **THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE CONDUCTIVE LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE BY THE COEFFICIENT OF THE NTH HARMONIC COMPONENT OF THE VOLTAGE**

The electric power systems (EPS) of various industrial enterprises for a number of reasons are characterized by low quality of electric energy, in particular, the presence of higher harmonics in the grids, as a result of which conductive low-frequency electromagnetic interference (EMI) occurs, which has a negative effect on electrical equipment. This leads to the problem of the quality of electric energy in the EPS, which negatively affects the electrical equipment. The question of determining the conductive low-frequency EMI by the coefficient of the n-th harmonic component of the voltage within the framework of this problem remains unresolved. **Purpose:** development of an algorithm for determining the conductive low-frequency EMI by the coefficient of the n-th harmonic component of the voltage, which allows scientifically sound estimation of the electromagnetic environment in electric grids. **Methods:** the formation of a sequence of actions to determine the quality criterion for the functioning of electric power systems by the coefficient of the n-th harmonic component of the voltage. **Results:** based on the theory of probability and mathematical statistics, an algorithm has been developed for determining the conductive low-frequency electromagnetic field by the coefficient of the nth harmonic component of the voltage, based on the requirements of the standard GOST 32144-2013.

Based on the algorithm, a computer program that allows automated calculation of the parameters of the electromagnetic environment, including the distribution parameters of the coefficient of the n-th harmonic component of the voltage, such as the mean and standard deviation, the probability of the coefficients of the n-th harmonic component of the voltage exceeding the normalized values and the probability of the conductive low-frequency EMI by the coefficient of the n-th harmonic component of the voltage was developed. The program allows you to visualize the data arrays that were obtained during various experimental studies using waveforms and histograms. **Practical relevance:** the proposed algorithm allows you to generate reliable information about electromagnetic environment in EES and can be used to develop a concept for improving the quality of electric energy, taking into account the analytical and numerical aspects of computer research.

**Keywords:** Algorithm, power quality, conductive noise, harmonics, coefficient of the nth harmonic component of voltage.

**Введение.** Разработка и внедрение интеллектуальных электросетевых технологий в системах электроснабжения промышленных предприятий Российской Федерации (РФ) позволят создать интеллектуальные системы электроснабжения в любой отрасли.

В то же время новые интеллектуальные системы электропитания должны быть адаптированы к различным возможностям потребителей

промышленных предприятий, и в случае обнаружения нарушений электроснабжения их следует эффективно выявлять и устранять. Результаты многочисленных теоретических и экспериментальных исследований [1–3] показали, что основным источником нелинейных искажений в источнике питания является наличие электромагнитных помех, вызывающих несоответствие уровня качества энергии и нарушение электромагнитной совместимости электрического оборудования.

В РФ с её огромными запасами энергоресурсов, гигантской протяжённостью высоковольтных линий электропередач, высокой степенью износа электрического оборудования одной из главных является задача обеспечения эффективности работы электросетевого комплекса при ограниченных инвестициях и дефиците времени на основе концепции Smart Grid («интеллектуальной сети»), принятой правительством РФ. Ключевым требованием, предъявляемым к системам электроснабжения, является качество использования сетей общественного назначения, которое определяется степенью соответствия техническим стандартам ГОСТ 32144–2013 [1]. Системы электроснабжения по ряду причин обусловлены неэффективной электромагнитной обстановкой (ЭМО), вызванные кондуктивными низкочастотными ЭМП в системах электроснабжения [2].

Улучшение ЭМО является решением электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств (ТС). Проблема ЭМС имеет очень широкий диапазон различных аспектов и требований, а также вопросов по решению научно-технической задачи, которая заключается в определении кондуктивной низкочастотной ЭМП по данному показателю качества электроэнергии (ПКЭ). Возникает потребность в разработке алгоритма определения кондуктивной низкочастотной ЭМП по  $K_{U(n)}$ . Это позволяет своевременно обнаруживать наличие помех и вероятность появления их в электрических сетях различного уровня напряжения. Без этого достаточно трудно подавлять данную ЭМП, так как неизвестно, где и в какой момент времени может появиться эта помеха. А подавлять её очень важно, так как кондуктивная низкочастотная ЭМП по  $K_{U(n)}$  приводит к ряду отрицательных воздействий для электрооборудования, таких как потери в обмотках ротора, вследствие чего сокращается срок службы изоляции, что может привести к негативным последствиям, а также приводит к образованию вибрации на валу различных электрических машин, что влечет снижение срока службы [3–11].

В связи с этим появляется потребность в формировании алгоритма автоматизированного определения кондуктивных низкочастотных ЭМП по  $K_{U(n)}$ . Это даёт возможность вовремя выявить ЭМП и вычислить вероятность её появления в электрических сетях.

**Цель:** разработать алгоритм определения кондуктивной низкочастотной ЭМП по  $K_{U(n)}$ .

**Задачи:**

– определить нормально и предельно допустимые значения коэффициента  $K_{U(n)}$  в трехфазных трехпроводных сетях с различным номинальным напряжением в соответствии с ГОСТ 32144–2013;

– с помощью методов теории вероятности и математической статистики разработать порядок действий для определения кондуктивной низкочастотной ЭМП по  $K_{U(n)}$ .

Анализ методологической базы исследования ЭМС технических средств показывает достаточно высокий физико-математический уровень разработок. При этом применение известных программных средств для исследования режимов электрических сетей с нелинейной нагрузкой в рамках концепции подавления кондуктивных низкочастотных ЭМП вызывает трудности для специалистов электроэнергетики. Поэтому существует потребность в компьютерных программах, которые позволяют производить автоматизированный расчёт параметров ЭМО. Для этих целей сформирован алгоритм определения кондуктивной низкочастотной ЭМП по  $K_{U(n)}$ .

Представленный в данной статье алгоритм разработан в соответствии с теорией кондуктивных низкочастотных ЭМП, а также обеспечивает применение этой теории для определения кондуктивных низкочастотных ЭМП по  $K_{U(n)}$  [12, 13]. Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента  $K_{U(n)}$  в трехфазных трехпроводных сетях с различным номинальным напряжением  $U_n$  приведены на рис. 1–4 в соответствии с ГОСТ 32144–2013 [1].

Предельно допустимое значение данных коэффициентов вычисляют по формуле

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

Уровень ЭМС ТС по  $K_{U(n)}$  в точке общего присоединения к трехпроводной электрической сети соответствует требованиям ГОСТ 32144–2013 [1]. Значения коэффициента  $K_{U(n)}$ , полученные в ходе проведенных исследований, не должны превышать нормально допустимые значения, которые приведены на рис. 1–4.



Рис. 1. Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения в трехфазных трехпроводных сетях в процентах для электрической сети 0,38 кВ

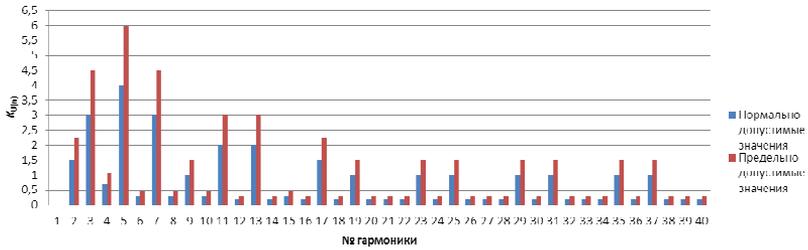


Рис. 2. Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения в трехфазных трехпроводных сетях в процентах для электрической сети 6–25 кВ

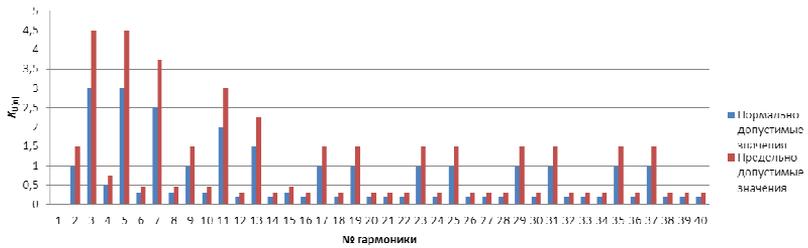


Рис. 3. Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения в трехфазных трехпроводных сетях в процентах для электрической сети 35 кВ

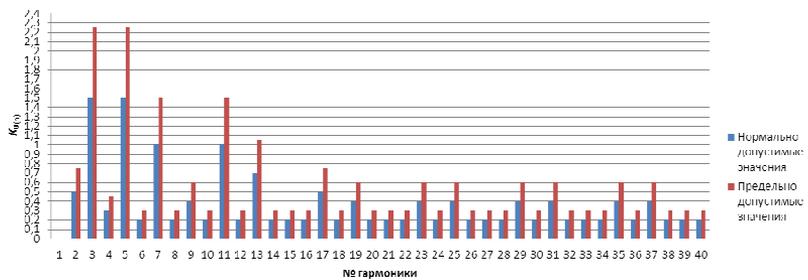


Рис. 4. Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения в трехфазных трехпроводных сетях в процентах для электрической сети 110–220 кВ

В электрических сетях коэффициент  $K_{U(n)}$  является непрерывно распределённой случайной величиной, зависящей от многих случайных событий. Коэффициент  $K_{U(n)}$  связан с полем событий, который характеризуется таблицей вероятностей [14]:

$$\left. \begin{array}{cccc} K_{U(n)1}, & K_{U(n)2}, & \dots, & K_{U(n)i}, & \dots, & K_{U(n)k} \\ P_1, & P_2, & \dots, & P_i, & \dots, & P_k \end{array} \right\},$$

где  $K_{U(n)1}, K_{U(n)2}, \dots, K_{U(n)i}, \dots, K_{U(n)k}$  – различные значения коэффициента  $K_{U(n)}$  в течение одного полного дня (24 ч), %;  $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k$  – вероятности появления этих значений;  $k = 1, 2, 3, \dots$  – порядковый номер значения  $K_{U(n)}$ .

При превышении значений коэффициента  $K_{U(n)}$ , представленных в [1], часть поля событий обуславливает появление помехи, вызванной особенностями различных технологических процессов [15–18]. Достоверное значение ЭМП может быть определено только статистическими методами. Процесс возникновения кондуктивной низкочастотной ЭМП по  $K_{U(n)}$  представляется математической моделью [19]:

$$\begin{aligned} K_{U(n)} [P(K_{U(n),н} < K_{U(n)} < K_{U(n),п})] &> 0,05; \\ P(K_{U(n),п} < K_{U(n)} < \infty) &\neq \delta K_{U(n)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\delta K_{U(n)}$  – кондуктивная низкочастотная ЭМП электромагнитной совместимости в трёхфазных трёхпроводных электрических сетях по коэффициенту  $K_{U(n)}$ , %.

На основании данной формулы можно предположить следующее: помеха  $\delta K_{U(n)}$  появляется в сети в том случае, когда вероятность нахождения величины  $K_{U(n)}$  в пределах  $(K_{U(n),н}; K_{U(n),п})$  превышает 0,05 в течение одного дня, а в пределах  $(K_{U(n),п}; \infty)$  не равна нулю. Стоит отметить важный фактор: если хотя бы одно условие не выполняется, то в электрической сети происходит появление помехи  $\delta K_{U(n)}$ .

Используя математический аппарат теории вероятности и математической статистики, определяем интегральные функции распределения случайной величины  $K_{U(n)}$ :

$$P[K_{U(n),н} < K_{U(n)} < K_{U(n),п}] = \int_{K_{U(n),н}}^{K_{U(n),п}} \psi[K_{U(n)}] d[K_{U(n)}]; \quad (3)$$

$$P[K_{U(n),n} < K_{U(n)} < \infty] = \int_{K_{U(n),n}}^{\infty} \psi[K_{U(n)}] d[K_{U(n)}]; \quad (4)$$

$$M[K_{U(n)}] = M[\delta K_{U(n)}];$$

$$\sigma[K_{U(n)}] = \sigma[\delta K_{U(n)}],$$

$$\Psi\{K_{U(n)}; M[K_{U(n)}]; \sigma[K_{U(n)}]\} = \Psi\{\delta K_{U(n)}; M[\delta K_{U(n)}]; \delta K_{U(n)}\}, \quad (5)$$

где  $\psi[K_{U(n)}]$  – плотность вероятности распределения величины  $K_{U(n)}$ , 1/%;  $M[K_{U(n)}], M[\delta K_{U(n)}]$  – математическое ожидание соответственно величины  $K_{U(n)}$  и  $\delta K_{U(n)}$ , %;  $\sigma[K_{U(n)}], \sigma[\delta K_{U(n)}]$  – средние квадратические отклонения указанных величин, %,  $\Psi\{K_{U(n)}; M[K_{U(n)}]; \sigma[K_{U(n)}]\}$  – плотность вероятности распределения случайной величины  $K_{U(n)}$ , 1/%;  $\Psi\{\delta K_{U(n)}; M[\delta K_{U(n)}]; \delta K_{U(n)}\}$  – плотность вероятности распределения случайной величины  $\delta K_{U(n)}$ , 1/%;

Вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП  $\delta K_{U(n)}$  определяется по формуле (6) [20]:

$$P[\delta K_{U(n)}] = P[K_{U(n),n} < K_{U(n)} < K_{U(n),n}] + P[K_{U(n),n} < K_{U(n)} < \infty] - 0,05. \quad (6)$$

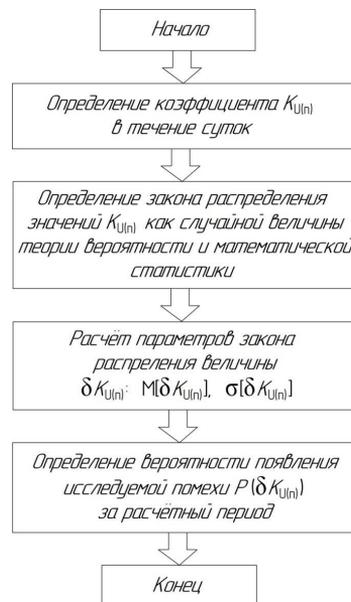


Рис. 5. Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту  $K_{U(n)}$

На основании формул (3)–(6) сформирован порядок действий по определению кондуктивной помехи по  $K_{U(n)}$  (рис. 5). На данный алгоритм получено свидетельство [21].

В рамках разработанной концепции используют различные программные продукты для исследования режимов работы электрических сетей с искажающей нагрузкой. Их можно представить двумя семействами, различие этих семейств обуславливается видом математической модели:

– модели в виде схем замещения (блок-схем, принципиальных схем и т.д.) для программ моделирования Electronics Workbench, Saber, Spice, Microcap и т.д.;

– модели в виде систем дифференциальных уравнений для прикладных программ решения задач технических вычислений MatLab, Mahtcad, Matrix, Simnon и т.д.

Тем не менее для обеспечения качественного функционирования сетей электроснабжения необходимо своевременно выявлять кондуктивные низкочастотные ЭМП по коэффициенту  $n$ -х гармонических составляющих напряжений (параметры распределения, вероятность их появления), однако перечисленные выше программные продукты не имеют соответствующих функциональных возможностей и не способны производить расчет кондуктивных низкочастотных ЭМП по  $K_{U(n)}$  в автоматизированном режиме.

На основании разработанного алгоритма и методического подхода к разработке концепции повышения качества электрической энергии возникла необходимость в компьютерной программе, позволяющей производить автоматизированный расчёт параметров электромагнитной обстановки. В связи с этим разработана программа для ЭВМ в среде программирования LabVIEW.

Данная программа даёт возможность оценивать массив данных измерений коэффициентов  $n$ -х гармонических составляющих напряжений. Не стоит забывать, что все современные анализаторы качества электроэнергии могут экспортировать полученный массив данных в формат MS EXCEL.

Программа производит автоматизированный расчёт таких параметров распределения значений  $K_{U(n)}$ , как математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение. Кроме этого программа производит автоматизированный расчёт вероятности выхода коэффициентов  $n$ -й гармонической составляющей напряжения за нормируемые значения

и вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения за расчётный период. Интерфейс программы представлен на рис. 6.

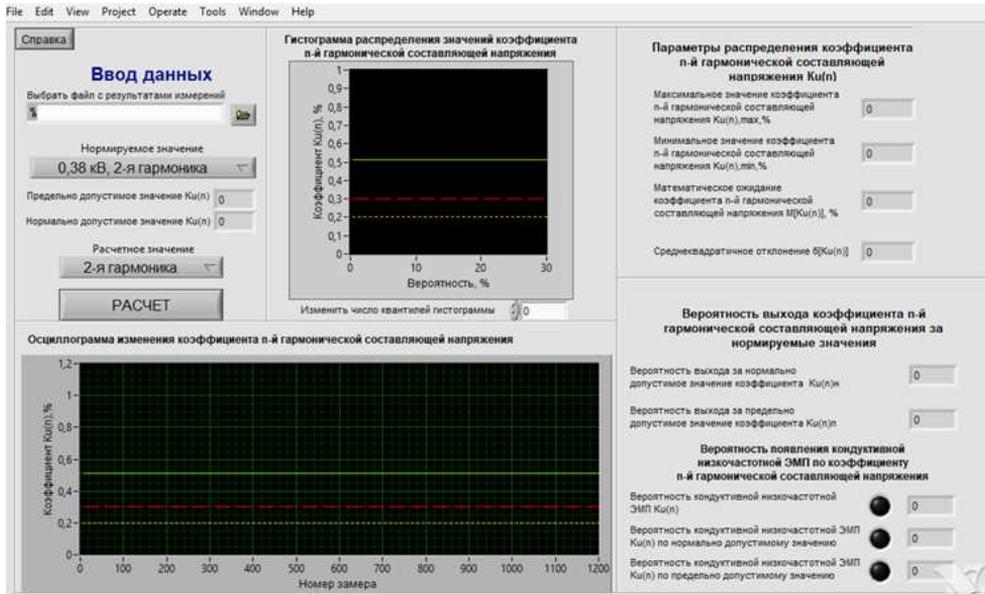


Рис. 6. Интерфейс программы для определения кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения

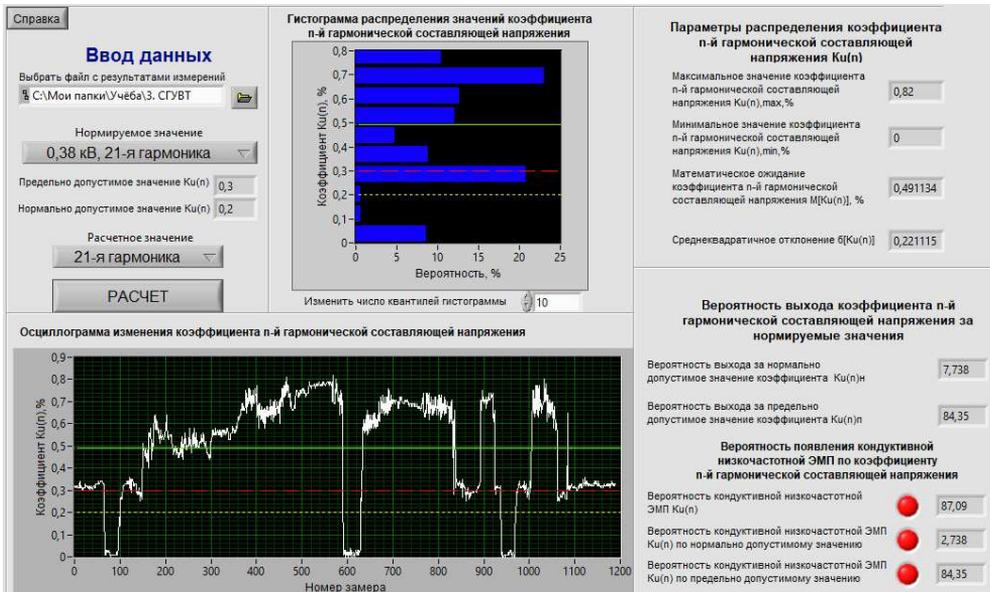


Рис. 7. Интерфейс программы для ЭВМ по обработке результатов исследований коэффициент 21-й гармонической составляющей напряжения (фаза А)

С помощью разработанного алгоритма и программы для ЭВМ произведена обработка результатов на предприятии ЗАО «Сибгазстройдеталь» [3, 22–24]. Некоторые результаты измерений представлены на рис. 7. Как видно из осциллограммы напряжений, замеры проходят для каждой фазы, количество измерений при этом чуть меньше 1200, так как интервал измерений выбран равным 60 с. Зеленой линией указывается нормированное значение напряжения, штрихпунктирной – нормально допустимое значение коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения.

**Выводы.** В статье определены нормально и предельно допустимые значения коэффициента  $K_{U(n)}$  в трехфазных трехпроводных сетях с различным номинальным напряжением в соответствии со стандартом ГОСТ 32144–2013. На основании математических моделей определены вероятности нахождения величины коэффициента  $K_{U(n)}$  в различных пределах. С помощью методов теории вероятности и математической статистики разработана интегральная функция распределения непрерывно распределённой случайной величины и определена вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП  $\delta K_{U(n)}$ . Разработанный алгоритм определения кондуктивной низкочастотной ЭМП  $\delta K_{U(n)}$  позволяет научно обоснованно оценивать ЭМО в ЭЭС. С помощью разработанного алгоритма определения кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту  $K_{U(n)}$  разработана программа для ЭВМ, которая позволяет обрабатывать данные, полученные в ходе экспериментальных исследований по качеству электрической энергии. В отличие от существующих компьютерных программ (MatLab, Mahtcad, Matrix, Spice и т.д.) данная программа имеет функциональные возможности автоматизированного определения кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех [3, 22–24].

### **Библиографический список**

1. ГОСТ 32144–2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. (Взамен ГОСТ 13109-97; введ. 2014-07-01). – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

2. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г.А. Данилов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Г.В. Ситников / под ред. В.П. Горелова, В.Г. Сальникова. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2013. – 559 с.

3. Исследование высших гармоник в электрических сетях низкого напряжения / Д.Ю. Руди, А.И. Антонов, М.Г. Вишнягов [и др.] // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162). – С. 119–125.

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

5. Иванова Е.В., Руппель А.А. Кондуктивные электромагнитные помехи в электрических сетях 6–10 кВ: моногр. / под ред. В.П. Горелова. – Омск: Изд-во НГАВТ, Омск. фил., 2004. – 284 с.

6. Григорьев О. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости электротехники. – 2003. – № 1. – С. 54–56.

7. Степанов В.М., Базыль И.М. Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятия на потери электрической энергии // Известия Тул. гос. ун-та. Технические науки. – 2013. – № 12–2. – С. 27–31.

8. Глотов А.А., Денчик Ю.М. Обеспечение электромагнитной совместимости электрических сетей по допустимым уровням кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI Всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т. – 2015. – С. 12–15.

9. Иванова Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / под ред. В.П. Горелова, Н.Н. Лизалека. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. акад. вод. транспорта, 2006. – 432 с.

10. Olhovskiy V.Ya., Myateg S.V., Myateg T.V. Analyzes of high harmonics generation and power losses of low power consumers within 1000 V networks // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings 2. – 2016. – P. 7911026.

11. Ded A.V., Maltsev V.N., Sikorski S.P. Comparative analysis of the specifications on the power quality of the european union and the Russian Federation // Journal of Physics: Conference Series Theory and Practice. Ser. Metrology, Standardization, Quality: Theory and Practice, MSQ 2017. – 2018. – P. 012007.

12. Денчик Ю.М. Методика определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи в электрической сети при гармоническом воздействии // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 2. – С. 218–221.

13. Анализ определения кондуктивной низкочастотной помехи по коэффициенту несинусоидальности кривой напряжения / А.И. Антонов, М.Г. Вишнягов, Ю.М. Денчик [и др.] // Омский научный вестник. – 2015. – № 3(143). – С. 244–247.

14. Денчик Ю.М. Определение параметров поля событий в электрических сетях при сложной электромагнитной обстановки // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 2. – С. 418–424.

15. Математическое описание процесса формирования в электрической сети кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех / А.Ю. Ковалев, Н.А. Ковалева, Е.В. Иванова [и др.] // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 143–145.

16. Вероятность и процесс возникновения кондуктивной электромагнитной помехи в электроэнергетических системах / А.И. Антонов, М.Г. Вишнягов, В.И. Клеутин, А.А. Руппель // Сборник науч. труд. Омск. ин-та водного транспорта (филиал) – СГУВТ. – Омск, 2015. – С. 4–8.

17. Иванова Ю.М. Методология исследования кондуктивных электромагнитных помех, распространяющихся по сетям // Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / под ред. В.П. Горелова, Н.Н. Лизалека. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2006. – 432 с. – С. 52–56.

18. Денчик Ю.М. Методика определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи в электрической сети при гармоническом воздействии // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 2. – С. 218–221.

19. Иванова Е.В., Куликов С.Г. Определение кондуктивной электромагнитной помехи по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения в сети общего назначения // Транспортное дело России. – 2006. – № 11–1. – С. 42–44.

20. Горелов С.В., Глотов А.А., Денчик Ю.М. Допустимые уровни электромагнитной совместимости для кондуктивных низкочастотных

электромагнитных помех в электроэнергетической системе // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3. – С. 194–197.

21. Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения / А.И. Антонов, Ю.М. Денчик, Д.А. Зубанов [и др.]. № 24171; заявл. 15.07.2019 г.; опубл. хроники объединён. фонда электронных ресурсов // Наука и образование. – Август 2019. – № 8(123). – С. 28.

22. Руди Д.Ю., Горелов С.В., Руппель А.А. Исследование высших гармоник в рабочей электрической сети низкого напряжения // Актуальные вопросы профессионального образования и пути их решения: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Якутск, 2019. – С. 27–32.

23. Руди Д.Ю. Исследование суммарного коэффициента гармонических составляющих в электрических сетях низкого напряжения // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: материалы LXXVII Студ. междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2019. – С. 231–238.

24. Руди Д.Ю. Исследование показателей качества электроэнергии в рабочей электрической сети цеха металлоизделий // Теоретические и практические проблемы развития современной науки: сб. материалов XVIII Междунар. науч.-практ. конф. – 2019. – С. 7–14.

## References

1. GOST 32144–2013. Mezhgosudarstvennyi standart. Elektricheskaiia energiiia. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiia. (Vzamen GOST 13109-9, vved. 2014-07-01) [GOST 32144–2013. Interstate standard. Electric Energy. Electromagnetic compatibility. Quality standards for electric energy in general-purpose power supply systems. Instead of GOST 13109-97, enter 2014-07-01]. Moscow: Standartinform, 2014. 20 c.

2. Danilov G.A., Denchik Iu.M., Ivanov M.N., Sitnikov G.V. Povyshenie kachestva funktsionirovaniia linii elektroperedachi [Improving the quality of the functioning of power lines]. Eds. V.P. Gorelova, V.G. Sal'nikova. Novosibirsk: Novosibirskaiia gosudarstvennaia akademiia vodnogo transporta, 2013. 559 p.

3. Rudi D.Iu., Antonov A.I., Vishniagov M.G. et al. Issledovanie vysshikh garmonik v elektricheskikh setiakh nizkogo napriazheniia [The study of higher harmonics in low voltage electrical networks]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2018, no. 6(162), pp. 119-125.

4. Khatsevskii K.V., Denchik Iu.M., Kleutin V.I. et al. Problemy kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniia [Problems of power quality in power supply systems]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2012, no. 2(110), pp. 212-214.

5. Ivanova E.V., Ruppel' A.A. Konduktivnye elektromagnitnye pomekhi v elektricheskikh setiakh 6-10 kV [Conducted electromagnetic interference in electric networks 6-10 kV]. Ed. V.P. Gorelova. Omsk: Novosibirskaia gosudarstvennaia akademiia vodnogo transporta, Omskii filial, 2004. 284 p.

6. Grigor'ev O. Vysshie garmoniki v setiakh elektrosnabzheniia 0,4 kV [Higher harmonics in 0.4 kV power supply networks]. *Novosti elektrotehniki*, 2003, no. 1, pp. 54-56.

7. Stepanov V.M., Bazyl' I.M. Vliianie vysshikh garmonik v sistemakh elektrosnabzheniia predpriiatiia na poteri elektricheskoi energii [The influence of higher harmonics in the power supply systems of the enterprise on the loss of electric energy]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 12-2, pp. 27-31.

8. Glotov A.A., Denchik Iu.M. Obespechenie elektromagnitnoi sovместimosti elektricheskikh setei po dopustimym urovniam konduktivnykh nizkochastotnykh elektromagnitnykh pomekh [Ensuring the electromagnetic compatibility of electrical networks at acceptable levels of conductive low-frequency electromagnetic interference]. *Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost'. Materialy XXI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 2015, pp. 12-15.

9. Ivanova E.V. Konduktivnye elektromagnitnye pomekhi v elektroenergeticheskikh sistemakh [Conducted electromagnetic interference in electric power systems]. Eds. V.P. Gorelov, N.N. Lizalek. Novosibirsk: Novosibirskaia gosudarstvennaia akademiia vodnogo transporta, 2006. 432 p.

10. Olhovskiy V.Ya., Myateg S.V., Myateg T.V. Analyzes of high harmonics generation and power losses of low power consumers within 1000 V networks. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 - Proceedings 2*, 2016. P. 7911026.

11. Ded A.V., Maltsev V.N., Sikorski S.P. Comparative analysis of the specifications on the power quality of the European Union and the Russian Federation. *Journal of Physics: Conference Series Theory and Practice. Ser. Metrology, Standardization, Quality: Theory and Practice, MSQ 2017*, 2018. P. 012007.

12. Denchik Iu.M. Metodika opredeleniia konduktivnoi nizkochastotnoi elektromagnitnoi pomekhi v elektricheskoi seti pri garmonicheskom vozdeistvii [Method for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference in the electric network under harmonic influence]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2013, no. 2, pp. 218-221.

13. Antonov A.I., Vishniagov M.G., Denchik Iu.M. et al. Analiz opredeleniia konduktivnoi nizkochastotnoi pomekhi po koeffitsientu nesinusoidal'nosti krivoi napriazheniia [Analysis of the definition of conductive low-frequency noise by the coefficient of non-sinusoidality of the voltage curve]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2015, no. 3(143), pp. 244-247.

14. Denchik Iu.M. Opredelenie parametrov polia sobytii v elektricheskikh setiakh pri slozhnoi elektromagnitnoi obstanovki [Determination of the parameters of the field of events in electrical networks in a complex electromagnetic environment]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2010, no. 2, pp. 418-424.

15. Kovalev A.Iu., Kovaleva N.A., Ivanova E.V. et al. Matematicheskoe opisanie protsessa formirovaniia v elektricheskoi seti konduktivnykh nizkochastotnykh elektromagnitnykh pomekh [A mathematical description of the process of formation of conductive low-frequency electromagnetic interference in the electric network]. *Kul'tura, nauka, obrazovanie: problemy i perspektivy. Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 2017, pp. 143-145.

16. Antonov A.I., Vishniagov M.G., Kleutin V.I., Ruppel' A.A. Veroiatnost' i protsess vozniknoveniia konduktivnoi elektromagnitnoi pomekhi v elektroenergeticheskikh sistemakh [The probability and process of the occurrence of conductive electromagnetic interference in electric power systems]. *Sbornik nauchnykh trudov Omskogo instituta vodnogo transporta (filial) - SGUVT*. Omsk, 2015, pp. 4-8.

17. Ivanova Iu.M. Metodologiya issledovaniia konduktivnykh elektromagnitnykh pomekh, rasprostraniiaushchikhsia po setiam [Methodology for the study of conducted electromagnetic interference propagating through networks]. *Konduktivnye elektromagnitnye pomekhi v elektroenergeticheskikh*

*sistemakh*. Eds. V.P. Gorelov, N.N. Lizalek. Novosibirsk: Novosibirskaiia gosudarstvennaia akademiia vodnogo transporta, 2006. 432 p, pp. 52-56.

18. Denchik Iu.M. Metodika opredeleniia konduktivnoi nizkochastotnoi elektromagnitnoi pomekhi v elektricheskoi seti pri garmonicheskom vozdeistvii [Method for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference in an electric network under harmonic influence]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2013, no. 2, pp. 218-221.

19. Ivanova E.V., Kulikov S.G. Opredelenie konduktivnoi elektromagnitnoi pomekhi po koeffitsientu iskazheniia sinusoidal'nosti krivoi napriazheniia v seti obshchego naznacheniiia [Determination of conducted electromagnetic interference by the distortion coefficient of the sinusoidality of the voltage curve in a general-purpose network]. *Transportnoe delo Rossii*, 2006, no. 11-1, pp. 42-44.

20. Gorelov, S.V., Glotov A.A., Denchik Iu.M. Dopustimye urovni elektromagnitnoi sovместимости dlia konduktivnykh nizkochastotnykh elektromagnitnykh pomekh v elektroenergeticheskoi sisteme [Permissible levels of electromagnetic compatibility for conductive low-frequency electromagnetic interference in an electric power system]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2015, no. 3, pp. 194-197.

21. Antonov A.I., Denchik Iu.M., Zubanov D.A. et al. Algoritm opredeleniia konduktivnoi nizkochastotnoi elektromagnitnoi pomekhi po koeffitsientu  $n$ -i garmonicheskoi sostavliaiushchei napriazheniia [The algorithm for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference by the coefficient of the  $n$ th harmonic component of the voltage]. *Nauka i obrazovanie*. Avgust 2019, no. 8(123). 28 p.

22. Rudi D.Iu., Gorelov S.V., Ruppel' A.A. Issledovanie vysshikh garmonik v rabochei elektricheskoi seti nizkogo napriazheniia [The study of higher harmonics in a working low voltage electrical network]. *Aktual'nye voprosy professional'nogo obrazovaniia i puti ikh resheniia. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Iakutsk, 2019, pp. 27-32.

23. Rudi D.Iu. Issledovanie summarnogo koeffitsienta garmonicheskikh sostavliaiushchikh v elektricheskikh setiakh nizkogo napriazheniia [Investigation of the total coefficient of harmonic components in low voltage electrical networks]. *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiiia. Tekhnicheskie nauki. Materialy LXXVII Studencheskoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Novosibirsk, 2019, pp. 231-238.

24. Rudi D.Iu. Issledovanie pokazatelei kachestva elektroenergii v rabochei elektricheskoi seti tsekha metalloizdelii [Study of indicators of the

quality of electricity in the working electric network of the metalware workshop]. *Teoreticheskie i prakticheskie problemy razvitiia sovremennoi nauki: sb. materialov XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 2019, pp. 7-14.

### **Сведения об авторах**

**Руди Дмитрий Юрьевич** (Новосибирск, Россия) – аспирант кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» Сибирского государственного университета водного транспорта (630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: dima\_rudi@mail.ru).

**Горелов Сергей Валерьевич** (Новосибирск, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» Сибирского государственного университета водного транспорта (630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: nsawt\_ese@mail.ru).

**Вишнягов Михаил Геннадиевич** (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудования» Омского института водного транспорта – филиал «Сибирский государственный университет водного транспорта» (644099, Омск, ул. Ивана Алексеева, 4, e-mail: vishnyagov@mail.ru).

**Зубанов Дмитрий Александрович** (Омск, Россия) – старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудования» Омского института водного транспорта – филиал «Сибирский государственный университет водного транспорта» (644099, Омск, ул. Ивана Алексеева, 4, e-mail: serdimitri@mail.ru).

**Зубанова Наталья Валерьевна** (Новосибирск, Россия) – аспирантка кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» Сибирского государственного университета водного транспорта (630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: nsawt\_ese@mail.ru).

**Иванов Дмитрий Михайлович** (Новосибирск, Россия) – студент Новосибирского государственного технического университета (630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: nsawt\_ese@mail.ru).

**Руппель Александр Александрович** (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта – филиал «Сибирский государственный университет водного транспорта» (644099, Омск, ул. Ивана Алексеева, 4, e-mail: ruppelsan@mail.ru).

### **About the authors**

**Rudi Dmitry Yuryevich** (Novosibirsk, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering of the Siberian State University of Water Transport (630099, Novosibirsk, 33, Schetinkina str., e-mail: dima\_rudi@mail.ru).

**Gorelov Sergey Valeryevich** (Novosibirsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering of the Siberian State University of Water Transport (630099, Novosibirsk, 33, Schetinkina str., e-mail: nsawt\_ese@mail.ru).

**Vishnyagov Mikhail Gennadievich** (Omsk, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of the Omsk Institute of Water Transport – Branch of the Siberian State University of Water Transport (644099, Omsk, 4, Ivan Alekseev str., e-mail: vishnyagov @ mail.ru).

**Zubанov Dmitry Alexandrovich** (Omsk, Russian Federation) is a Senior Lecturer, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment, Omsk Institute of Water Transport - Branch of the Siberian State University of Water Transport (644099, Omsk, 4, Ivan Alekseev str., e-mail: serdimitri@mail.ru).

**Zubanova Natalia Valeryevna** (Novosibirsk, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering of the Siberian State University of Water Transport (630099, Novosibirsk, 33 Schetinkina str., e-mail: nsawt\_ese@mail.ru).

**Ivanov Dmitry Mikhailovich** (Novosibirsk, Russian Federation) is a Student Novosibirsk State Technical University (630073, Novosibirsk, 20, K. Marx ave., e-mail: nsawt\_ese@mail.ru).

**Ruppel Aleksandr Alexandrovich** (Omsk, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of the Omsk Institute of Water Transport – Branch of the Siberian State University of Water Transport (644099, Omsk, 4, Ivan Alekseev str., e-mail: ruppelsan@mail.ru).

Получено 27.01.2020