

¹ Омский институт
водного транспорта (филиал)
Сибирского государственного
университета водного транспорта,
г. Омск

² Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет,
г. Омск

³ Омское командное
речное училище
имени В. И. Евдокимова
Омского института
водного транспорта — филиала
Сибирского государственного
университета водного транспорта,
г. Омск

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНДУКТИВНОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ *n*-Й ГАРМОНИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

С помощью методологической базы исследования (основ теории вероятности и математической статистики) произведена обработка проведенного эксперимента на объекте исследования. Данным объектом является механический цех ЗАО «СибгазСтройдеталь», который занимается обеспечением нужд газовой, нефтяной и энергетической отраслей промышленности. В данной работе углублённо изучен вопрос об определении кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту *n*-й гармонической составляющей напряжения ($K_{U_{(n)}}$). Гармонические искажения являются постоянным явлением в электрических сетях. Высшие гармоники оказывают негативное влияние на электрическую сеть, в том числе и на электропотребителей (снижение срока службы, производительности и т.д.). Проблема несинусоидальности напряжений изучается довольно давно и результаты, полученные в ходе этих исследований, подтверждают наличие большого количества повреждений у потребителей электроэнергии, которые находятся в эксплуатации. Определена вероятность возникновения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по $K_{U_{(n)}}$ на полигоне исследования. В работе проводится анализ результатов, полученных с помощью проведённого исследования. По результатам анализа приведены соответствующие выводы.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, высшие гармоники, кондуктивная помеха, математическая статистика и теория вероятностей, коэффициент *n*-й гармонической составляющей напряжения.

Введение. В настоящее время, методологические базы исследования (основы теории вероятности и математической статистики) распространяются в различные сферы научно-технической деятельности, чтобы произвести обработку результатов экспериментальных или лабораторных исследований. Благодаря математическому аппарату базы исследования можно определить вероятность появления различных отрицательных факторов, которые влияют на электрическое оборудование [1]. Проведенные ранее экспериментальные исследования по определению $K_{U(n)}$ были направлены в разные отрасли научно-технической деятельности: проведение математического анализа или с помощью приборов-анализаторов качества электроэнергии (КЭЭ) [2–5]. Результаты проверялись на соответствие с нормативными документами, регулирующими качество электроэнергии [6]. В данной статье предлагается совместный (двуихсторонний) подход к изучению определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи (ЭМП).

Актуальность данной работы обусловлена тем, что в электрических сетях объекта исследования наблюдается неудовлетворительное состояние КЭЭ [7–9]. Электромагнитная обстановка (ЭМО) в электрических сетях 0,4 кВ характеризуется отклонением такого показателя качества электрической энергии (ПКЭ), как несинусоидальность напряжения.

Гармонические искажения — довольно частое явление в электрических сетях различного класса напряжений и один из показателей, по которому оценивается КЭЭ [1]. Данный показатель характеризуется $K_{U(n)}$. Эти значения имеют случайный характер, наиболее полную характеристику случайных величин дают законы их распределения. Поэтому для анализа и дальнейшего прогноза изменения $K_{U(n)}$ необходимо применить методологические базы исследования.

Надежность электроснабжения и КЭЭ и их проблемы изучаются уже давно. Данные темы имеют тесную связь между собой, т.к. при снижении КЭЭ также снижается надежность электрооборудования и систем электроснабжения в целом. Вследствие этого, применяя методологические базы исследования, можно определять возникновение $K_{U(n)}$ в электрических сетях и спрогнозировать различные организационные или технические мероприятия для снижения $K_{U(n)}$, но и одновременно повышая надежность электрооборудования.

Цель работы. С помощью методологической базы исследования определить вероятность появления $K_{U(n)}$, опираясь на проведенные испытания на объекте исследования [7–9]. Результаты проверялись на соответствие с нормативными документами, регулирующими КЭЭ.

Задачи:

- 1) на основании методологической базы исследования определить основные статистические параметры $K_{U(n)}$;
- 2) определить вероятность появления $K_{U(n)}$ на объекте исследования.

Основная часть. Нормальное функционирование многих предприятий, их безопасность и экономическая эффективность зависят от качества поставляемой электрической энергии. Ведущую роль в установлении требований к электрической энергии, поставляемой сетевыми организациями, играют стандарты электромагнитной совместимости и качества электрической энергии. Основным нормативно-техническим и методическим докумен-

том, устанавливающим показатели и нормы качества электрической энергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трёхфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются сети, находящиеся в собственности различных потребителей электрической энергии (точки подключения), является ГОСТ 32144-2013 [6]. В дальнейших наших исследованиях нормы показателей КЭ или согласованные значения принимаются уровнями ЭМС технических средств для кондуктивных низкочастотных ЭМП в системах электроснабжения СЭС общего назначения. Далее для сокращения записи термин «согласованные значения» опускается.

Показатели КЭ как технологические параметры режимов ЭЭС в значительной степени оказывают влияние на ЭМС технических средств. Соответствие уровней ЭМС для кондуктивных низкочастотных ЭМП, нормированным или согласованным согласно ГОСТ 32144-2013 требованиям, необходимо: для обеспечения мероприятий по защите жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного имущества, по охране окружающей среды; для повышения технико-экономических показателей производства и качества выпускаемой ими продукции [10–13].

Значения показателей КЭ, вышедшие за нормируемые пределы (далее нестандартные показатели КЭ), усложняют ЭМО в электрических сетях общего назначения. Из-за этого уровни ЭМС технических средств нарушаются, что влечёт за собой снижение качества функционирования электрических сетей [1].

Электроэнергия рассматривается как товар на оптовом и розничном рынках и обладает целым рядом специфических свойств, таких как непосредственное использование при создании многих видов продукции и оказание существенного влияния на экономические показатели производства и качество выпускаемой продукции. Качество электроэнергии влияет на качество функционирования электроприёмников [13, 14].

При изучении режимов ЭЭС и ЭМС технических средств применяются некоторые понятия, термины и определения, которые, в общем, дополняют друг друга при описании ЭМО. Приведенные определения можно при необходимости изменять, вводя в них производные признаки, раскрывая значения используемых в них терминов, указывая объекты определяемого понятия. Изменения не должны нарушать объем и содержание понятий. Эти требования ГОСТ Р 50397-92 учитываются при дальнейших исследованиях электромагнитных переходных процессов в ЭЭС.

Сложность обеспечения ЭМС технических средств в значительной мере объясняется нестабильностью электрических режимов в ЭЭС, низким качеством электроэнергии. В действительности в системе постоянно происходит множество изменений: включаются и отключаются потребители, меняется их режим работы, производятся нормальные технологические и аварийные коммутации оборудования, работают регуляторы частоты и напряжения, системная автоматика. К тому же достаточно часто происходят аварии, связанные, например, с короткими замыканиями, обрывами проводов и повреждениями кабелей, грозовыми поражениями оборудования и т.п. Строго говоря, установившегося режима ЭЭС не существует. Есть бесконечная, никогда не прекращающаяся смена режимов —

не прекращающийся переходный процесс, протекающий во времени [1].

Переходный процесс в ЭЭС происходит при любом изменении её параметров, схемы или режима. Его интенсивность определяется степенью нарушения баланса мощностей, сопровождающего это изменение. Для упрощения расчета и анализа переходных процессов их принято подразделять на электромагнитные и электромеханические [11]. Чёткой границы между стадиями переходного процесса не существует. Все определяют цели и условия решаемых задач.

Средства измерений должны усреднять измеряемые показатели качества напряжения в интервале времени 10 мин, а показатель качества частоты в интервале времени 20 с в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30 [15].

В интервале усреднения формируется одно значение измеряемого показателя КЭ, являющегося результатом усреднения N -х измерений, каждое из которых получается как среднее значение на временном интервале длительностью от 8 до 16 периодов основной частоты (0,16 – 0,32) с. Эти периоды представляются измерительными окнами. Каждое усредненное значение показателя КЭ представляет текущее значение, измеренное в реальном времени.

Средства измерений должны обеспечивать выявление кратковременных перенапряжений, провалов и отключений измеряемых напряжений длительностью более 0,01 с. В случае, если на интервале измерений, равном ширине измерительного окна, происходит любое из этих явлений, результаты измерений в этом окне должны игнорироваться.

Средства измерений должны обеспечивать нормальную работу при снижении напряжения питания до 80 % от номинального напряжения. При большем снижении или исчезновении напряжения питания средства измерений должны обеспечивать сохранение установочных параметров, оперативных уставок, накопленной в памяти информации, а также отсчет текущего времени. При восстановлении напряжения питания до 80 % от номинального значения средства измерений должны обеспечивать автоматическое восстановление нормальной работы.

Средства измерений должны обеспечивать накопление измерительной информации за время не менее 7 суток и хранение этой информации при отключенном питании не менее 15 суток. Современные измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) по измерению и анализу показателей КЭ отвечают изложенным требованиям и осуществляют математическую обработку результатов измерения в соответствии с допустимыми алгоритмами. Все измерительные приборы должны соответствовать требованиям Госстандарта России [1].

Накоплен положительный опыт использования в наших экспериментальных исследованиях уровней ЭМС следующих приборов: ИВК «ОМСК-М», прибор показателей качества электроэнергии ППКЭ-1-50М, анализаторы качества электроэнергии ЭРИС-КЭ.02, АКЭ-823 и измеритель показателей качества электроэнергии «Ресурс-ПКЭ-1,5» [16].

Однако при значительных нарушениях показателей КЭ щитовые электроизмерительные приборы, кроме приборов, наделенных свойствами осциллографирования электрических величин, достоверно не отображают ЭМО из-за несоответствия интервалов усреднения скоростям электромагнитных

переходных процессов. По этим показателям КЭ можно только судить о нарушениях уровней ЭМС технических средств и косвенно судить о функционирующих в ЭЭС случайных процессах. К тому же показатели КЭ современными автоматизированными средствами представляются непрерывно распределенными случайными величинами в виде таблиц. Такому представлению случайного процесса присуща некоторая неопределенность, потому что табличное описание ЭМО предполагает выбор определенной системы интервалов, зависящей в известной степени от опыта исследователя и от точности измерений [1].

Изложенное свидетельствует также о необходимости поиска новых подходов к математической обработке результатов измерений. При оценке ЭМО должна учитываться вся имеющаяся информация о показателях КЭ.

Одним из важных условий для определения $K_{U(n)}$ является расхождение с требованиями нормативных документов, регулирующих КЭ на объекте исследования. Задачи, поставленные в работе, решались с применением методологической базы исследования. Полученные исследовательские данные обрабатывались с помощью программы для ЭВМ.

Функция $X(t)$ является стационарной. Все характеристики функции не зависят от временного промежутка. Она рассматривается как процесс, который продолжается непрерывно. Логично, что любой отрезок времени можно будет использовать как начало отсчета исследования стационарного процесса. При длительном проведении экспериментального исследования возможно получение одних и тех же результатов. Процессы, которые протекают в электроэнергетических системах предприятий различной отрасли, являются стационарными. Проведение опытных испытаний является единственной реализацией определенной функции для получения характеристик случайной величины.

Но в этом случае реализации функции случайной величины должны обладать особым свойством — эргодичностью. Благодаря этому свойству, одна реализация определенной продолжительности позволяет заменить множество реализаций [17].

В методологической базе исследования в качестве практических расчётов принимается, что распределение энергетических характеристик подчиняется нормальному закону [18]. Зависимость между возможными значениями случайной величины и соответствующими вероятностями характеризуется плотностью вероятности вида

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{\text{нор}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x) - \bar{\ln}(x))^2}{2\sigma_{\text{нор}}^2}}, \quad (1)$$

где x — случайная величина;

$\ln(x)$ — натуральный логарифм случайной величины;

$\sigma_{\text{нор}}$ — среднеквадратичное отклонение.

Вероятность попадания $K_{U(n)}$ в различные интервалы (0 до a , от a до b и от b до бесконечности) определяется по следующим формулам, подставляя соответствующие значения a и b каждой соответствующей гармонической составляющей.

$$P(0 < K_{U(n)} < a) = \frac{1}{\sigma_{\text{нор}} \sqrt{2\pi}} \int_0^a e^{-\frac{(\ln(x) - \bar{\ln}(x))^2}{2\sigma_{\text{нор}}^2}},$$

$$P(a < K_{U(n)} < b) = \frac{1}{\sigma_{\text{aor}} \sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{(\ln(x) - \bar{\ln}(x))^2}{2\sigma_{\text{aor}}^2}},$$

$$P(b < K_{U(n)} < \infty) = \frac{1}{\sigma_{\text{aor}} \sqrt{2\pi}} \int_b^{\infty} e^{-\frac{(\ln(x) - \bar{\ln}(x))^2}{2\sigma_{\text{aor}}^2}}.$$

Если в качестве случайной величины принимается напряжение, то x имеет размерность [кВ], если в качестве случайной величины принимается коэффициент n -й гармонической составляющей, то величина x имеет размерность — [%].

Данный закон распределения называется Гауссовским законом распределения случайной величины. Кривая распределения случайной величины, изменяющейся по нормальному закону, имеет вид, представленный на рис. 1 [19].

Гауссовским (нормальным) законом распределения случайной величины x характеризуется следующими параметрами: математическим ожиданием — M_x и дисперсией (разбросом) случайной величины — D_x [17–19]. Математическое ожидание при нормальном законе распределения случайной величины определяется следующим выражением:

$$M_x = \int_{-\infty}^{\infty} x_i \cdot f(x) dx. \quad (2)$$

Дисперсия случайной величины является характеристикой рассеивания и определяется через размерность квадрата случайной величины по формуле:

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - M_x)^2 \cdot f(x) dx. \quad (3)$$

Характеристика рассеивания имеет такую же размерность, что и случайная величина. Данная величина называется среднеквадратичным отклонением (СКО) случайной величины — σ . С возрастанием σ кривая плотности вероятности становится более пологой. Значение СКО рассчитывается по формуле:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (4)$$

Для Гауссовского распределения случайной величины рассеивание укладывается на участке $\pm 3\sigma$ с вероятностью 0,9985 благодаря правилу «трёх сигм» [17–19]. Благодаря этому, зная параметры распределения (формулы (3–5)), можно указать интервалы возможных значений.

Для обоснованной оценки ПКЭ, как функции случайного процесса, необходимо знать параметры Гауссовского (нормального) закона распределения (M_x , D_x , σ_x).

С помощью современных приборов-анализаторов качества электроэнергии можно за расчетный период времени получить статистические данные о характере изменения рассматриваемого ПКЭ, причем снятые за период повторяемости нагрузки (сутки).

Основываясь на полученных данных и приняв, что распределение ПКЭ подчиняется нормальному закону (распределение Гаусса) можно построить график распределения стационарной случайной функции.

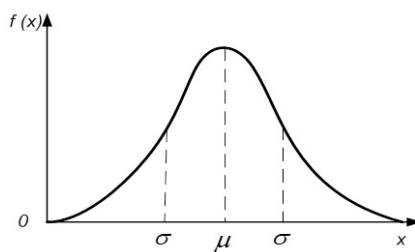


Рис. 1. Плотность вероятности нормального закона распределения

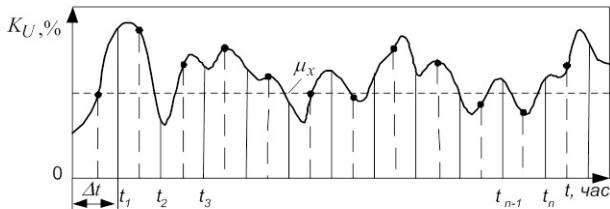


Рис. 2. Интервал записи случайной функции, разбитый на n равных частей

Для определения корреляционной функции диапазон случайной функции разбивается на равные части (n) (рис. 2) с одинаковым промежутком по времени (Δt). Для определения с требуемой точностью параметров Гауссовского (нормального) закона распределения (M_x , D_x , σ_x) необходимо большое количество равных частей (n) (порядка 100). Характер изменения случайной функции зависит от выбора длины промежутка [1].

Основные результаты. Исследования ПКЭ проводились на полигоне исследования — ЗАО «СибгазСтрайдеталь» в цехе крутоизогнутых отводов. Данное предприятие занимается обеспечением нужд газовой, нефтяной и энергетической отраслей промышленности. Измерения производились с помощью прибора-анализатора качества электроэнергии «Ресурс-ПКЭ-1.7-оэ-А». Сводные данные результатов испытаний представлены в научных работах [7–9].

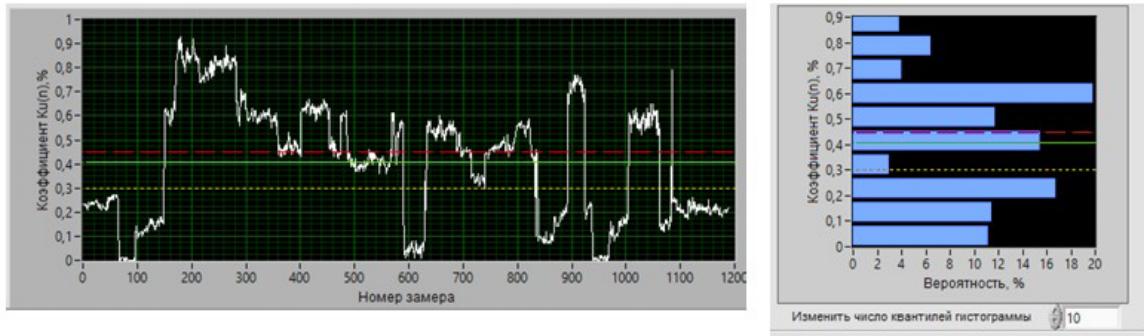
На основе данных [7–9] можно сделать вывод, что $K_{U(n)}$ не соответствуют значениям, приведённым в нормативных документах. Это приводит к ухудшению условий эксплуатации электрооборудования. На рис. 3 приведён интерфейс программы ЭВМ [20–22].

Обработка результатов осуществлялась с помощью программы ЭВМ, в которой заложен весь необходимый математический аппарат, изложенный выше. Программа для ЭВМ, используя математический аппарат, производит автоматизированный расчёт вероятности появления $K_{U(n)}$.

Далее осуществлялась обработка экспериментальных данных $K_{U(n)}$. Применяя методологическую базу исследования, определяли закон распределения случайной величины.

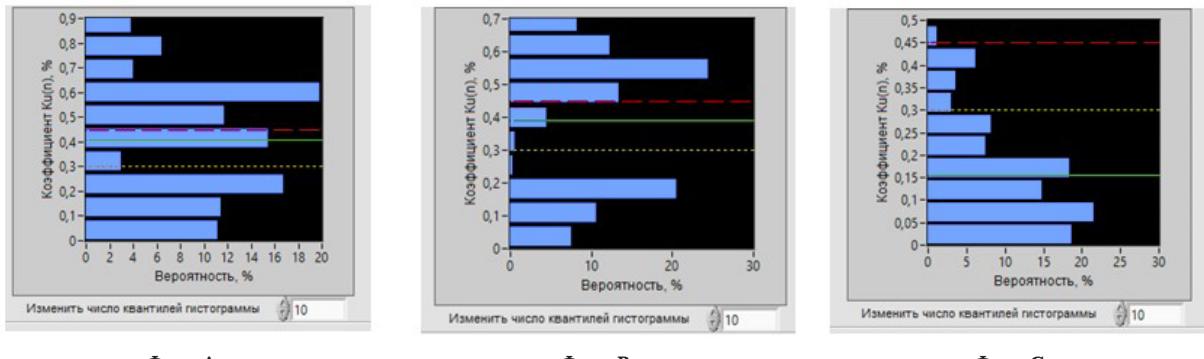
Первоначально количество измерений $K_{U(n)}$ составило 10080. Далее провели усреднение значений, в соответствии с ГОСТ 32144–2013, в 10-минутном интервале.

Объем выборки составил $N = 1008$. Далее проводится усреднение значений величины в соответствии с нормативными документами, регламентирующими КЭЭ (интервалы 10 минут в течение недели).



Фаза А

Рис. 3. Осциллограммы изменения коэффициента 15-й гармонической составляющей напряжения



Фаза А

Фаза В

Фаза С

Рис. 4. Осциллограммы изменения коэффициента и гистограммы распределения значений 15-й гармонической составляющей напряжения

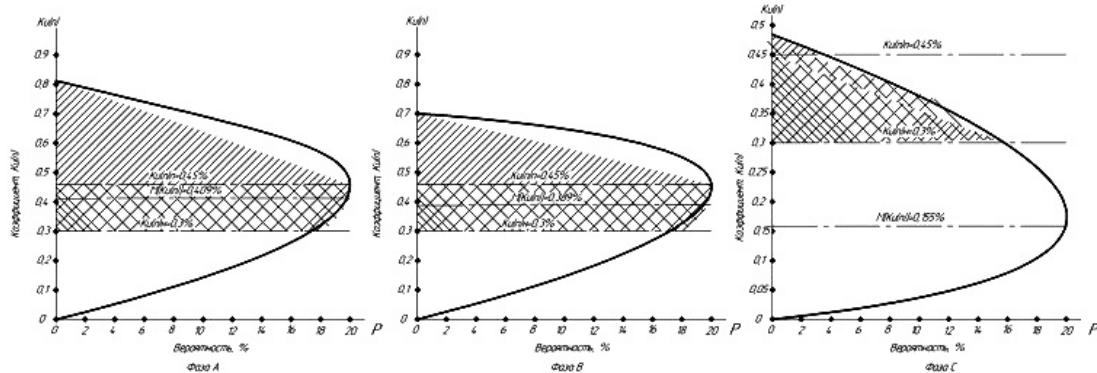


Рис. 5. Графики нормальной плотности вероятности распределения коэффициента 15-й гармонической составляющей напряжения, совмещённые с нормируемыми значениями уровней ЭМС

Пользуясь полученными значениями из работ [7 – 9], строятся гистограммы распределения значений n -й гармонической составляющей напряжения (рис. 4) и графики нормальной плотности вероятности распределения коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения (рис. 5), которые в наглядной форме предоставляют информацию об изменениях случайной величины.

Вывод. Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи по $K_{U(n)}$ формируются под действием различных негативных факторов, основная же ее особенность состоит в том, что ее невозмож но предвидеть. Однако, применяя методологические базы исследования, можно определить вероятность появления $K_{U(n)}$.

Наличие необходимой информации об электромагнитной обстановке на объекте исследования позволяет представить научно-практический интерес для реализации различных мероприятий по устранению $K_{U(n)}$. Кроме того, применяя методологическую базу исследования, можно получить обширную информацию, на которую можно опираться для проведения профилактических мер для устранения негативного влияния высших гармоник. С помощью современных приборов-анализаторов качества электроэнергии можно, не прибегая к дополнительным расчётом, определить значения $K_{U(n)}$ благодаря их конструктивным и программным особенностям.

Заключение. Подводя итог вышеизложенному, следует отметить, что с внедрением в измерительно-

расчёту практику современных приборов-анализаторов качества электроэнергии и применения методы расчетов, основанные на вероятностном подходе к анализируемой величине, можно добиться существенных результатов в обеспечении должного качества электрической энергии и, как результат, значительно повысить надёжность и экономическую эффективность работы системы электроснабжения общего назначения.

Библиографический список

- Данилов Г. А., Денчик Ю. М., Иванов М. Н. [и др.]. Повышение качества функционирования линий электропередачи: моногр. 2-е изд. Москва-Берлин: Директ Медиа, 2015. 558 с. ISBN 978-5-4475-5859-8.
- Руппель А. А., Иванова Е. В. Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях 6–10 кВ. Омск: Омский филиал НГАВТ, 2004. 284 с.
- 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. EDN: KVTODH.
- Иванова Ю. М. Гармоническое воздействие на электромеханические преобразователи в электроэнергетической системе // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт: тр. 3-й Междунар. науч.-техн. конф., Омск, 5–7 июня 2007 г. В 2-х ч. Омск: Омский филиал НГАВТ, 2007. Ч. 2. С. 109–113. ISBN 978-5-8119-0296-5.
- Вишняков М. Г., Иванова Ю. М., Клеутин В. И. [и др.]. Анализ гармонического воздействия помех на электрические сети береговых объектов водного транспорта Западной Сибири // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1. С. 331–334. EDN: KXMDKV.
- ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.
- Руди Д. Ю., Антонов А. И., Вишняков 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.
- Руди Д. Ю. Электромагнитная совместимость в системе электроснабжения механического цеха ЭАО «Сибгазстройдеталь» с электроустановками индукционного нагрева // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2021. № 10. С. 35–43. EDN: UFCKMB.
- 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.
- Володина Н. А., Каракин Р. Н., Куликов Л. В. [и др.]. Основы электромагнитной совместимости. Барнаул: ОАО Алтайский полиграфический комбинат, 2007. 480 с. ISBN 978-5-903387-07-6.
- Гужов Н. П., Ольховский В. Я., Павлюченко Д. А. Системы электроснабжения. Ростов-на-Дону: Феникс, 2011. 382 с. ISBN 978-5-222-17730-3.
- Сальников В. Г., Иванова Е. В., Иванов М. Н. Справочник электроэнергетика предприятий цветной металлургии. Москва: Металлургия, 1991. 384 с. ISBN 5-229-00253-0.
- Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 112 с.
- Сальников В. Г. Руководство по выбору структуры и параметров системы электроснабжения предприятия с мощными сериями электролизёров цветных металлов. Москва: Металлургия, 1985. 78 с.
- ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электроэнергии. Введ. 2014–01–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 57 с.
- Руди Д. Ю., Шитик Т. В. Оценка показателей качества электроэнергии с помощью прибора-анализатора «Ресурс-ПКЭ-1.7» // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России: сб. тр. IV Междунар. науч.-прак. конф., Сургут, 20–21 апреля 2023 г. Москва: Знание-М, 2023. С. 339–348.
- Пугачёв В. С. Теория вероятностей и математической статистики. Москва: Наука, 1979. 496 с.
- Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. 3-е изд. Москва: Наука, 1969. 511 с.
- Бронштейн И. Н., Семеняев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. Москва: Наука, 1981. 721 с.
- Rudi D. Y., Gorelov S. V., Khatsevskiy K. V. Algorithm for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference in electrical networks // Journal of Physics: Conference Series. 5. Series. «V Int. Scientific and Technical Conference «Mechanical Science and Technology Update», MSTU 2021. Omsk, 2021. Vol. 1901. P. 012077. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012077. EDN: SRUWQI.
- Руди Д. Ю., Горелов С. В., Зубанов Д. А., Антонов А. И. Разработка программы для ЭВМ для обработки результатов экспериментальных исследований по коэффициенту п-й гармонической составляющей напряжения средствами среды графического программирования labview // Молодежь и XXI век-2021: материалы XI Междунар. молодежной науч. конф., Курск, 18–19 февраля 2021 г., В 6-ти томах. Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2021. Т. 6. С. 213–220. EDN: XMOVCN.
- Руди Д. Ю., Вишняков М. Г., Руппель А. А. Компьютерная программа для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту п-й гармонической составляющей напряжения // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 65–78. DOI: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78. EDN: ITCMVE.

РУДИ Дмитрий Юрьевич, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта (ОИВТ) (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта (СГУВТ), г. Омск. SPIN-код: 5222-7906

AuthorID (РИНЦ): 830094

Адрес для переписки: dima_rudi@mail.ru

АНТОНОВ Александр Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 5682-8929

AuthorID (РИНЦ): 842787

Адрес для переписки: aleksandr_antonov_85@mail.ru

РУППЕЛЬ Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск. SPIN-код: 3386-9834

AuthorID (РИНЦ): 423886

Адрес для переписки: ruppelsan@mail.ru

РУППЕЛЬ Елена Юрьевна, доцент кафедры «Физика и математика» Сибирского государственного

автомобильно-дорожного университета СибАДИ,
г. Омск.

SPIN-код: 3193-1914

AuthorID (РИНЦ): 651948

Адрес для переписки: elektrotex@mail.ru

ШИТИК Татьяна Вацлавовна, преподаватель специальных дисциплин отделения «Эксплуатация судовых энергетических установок» Омского команного речного училища имени В. И. Евдокимова ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 3127-0387

AuthorID (РИНЦ): 1202984

Адрес для переписки: sobolevska-1965@mail.ru

Для цитирования

Руди Д. Ю., Антонов А. И., Руппель А. А., Руппель Е. Ю., Шитик Т. В. Применение методологической базы исследования для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту п-й гармонической составляющей напряжения // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 77 – 86. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-77-86.

Статья поступила в редакцию 27.10.2023 г.

© Д. Ю. Руди, А. И. Антонов,

А. А. Руппель,

Е. Ю. Руппель, Т. В. Шитик

¹ Omsk Institute of Water Transport (branch) Siberian State University Water Transport, Omsk, Russia

² Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

³ Omsk River Command School named after Captain V. I. Evdokimov Omsk Institute of Water Transport (branch) Siberian State University Water Transport, Omsk, Russia

THE USE OF THE METHODOLOGICAL BASE OF THE STUDY TO DETERMINE THE CONDUCTION OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE ACCORDING TO THE COEFFICIENT OF THE N-TH HARMONIC COMPONENT OF THE VOLTAGE

With the help of the methodological base of the study (the foundations of probability theory and mathematical statistics), the processing of the experiment conducted at the research object is carried out. This object is the mechanical workshop of CJSC Sibgazstroydetal, which is engaged in providing for the needs of the gas, oil and energy industries. In this paper, the issue of determining the conductive low-frequency electromagnetic interference (EMI) by the coefficient of the n-th harmonic component of the voltage ($K_{U,n}$) is studied in detail. Harmonic distortion is a constant phenomenon in electrical networks. Higher harmonics have a negative impact on the electrical network, including on electric consumers (reduced service life, productivity, etc.). The problem of non-sinusoidal voltages has been studied for quite a long time and the results obtained during these studies confirm the presence of a large number of damages to electricity consumers who are in operation. The probability of occurrence of conductive low-frequency EMF by $K_{U,n}$ at the research site is determined. The paper analyzes the results obtained with the help of the conducted research. According to the results of the analysis, the relevant conclusions are presented.

Keywords: quality of electric energy, higher harmonics, conductive interference, mathematical statistics and probability theory, the coefficient of the n-th harmonic component of stress.

References

1. Danilov G. A., Denchik Yu. M., Ivanov M. N. [et al.]. Povysheniye kachestva funktsionirovaniya liniy elektroperedachi [Improving the quality of operation of power lines]. 2nd ed. Moscow-Berlin, 2015. 558 p. (In Russ.).
2. Ruppel' A. A., Ivanova E. V. Konduktivnyye elektromagnitnyye pomekhi v setyakh 6–10 kV [Conducted

electromagnetic interference in 6–10 kV networks]. Omsk, 2004. 284 p. (In Russ.).

3. Ivanova E. V., Kulikov S. G. Opredeleniye konduktivnoy elektromagnitnoy pomekhi po koefitsiyentu iskazheniya sinusoidal'nosti krivoj napryazheniya v seti obshchego naznacheniya [Determination of conducted electromagnetic interference by the distortion factor of the sinusoidal voltage curve in a general-purpose network] // Transportnoye delo

- Rossii. *Transport Business of Russia*. 2006. No. 11 – 1. P. 42 – 44. (In Russ.).
4. Ivanova Yu. M. Garmonicheskoye vozdeystviye na elektromekhanicheskiye preobrazovateli v elektroenergeticheskoy sisteme [Harmonic influence on electromechanical converters in the electric power system] // Energetika, ekologiya, energosberezheniye, transport. *Energy, Ecology, Energy Saving*. In 2 parts. Omsk, 2007. Part 2. P. 109 – 113. (In Russ.).
5. Vishnyagov M. G., Ivanova Yu. M., Kleutin V. I. [et al.]. Analiz garmonicheskogo vozdeystviya pomekh na elektricheskiye seti beregovykh ob'yektorov vodnogo transporta Zapadnoy Sibiri [Analyses by harmonic influences into electricity supply of coast objects water transport West Siberian] // Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. *Scientific Problems of Transport of Siberia and the Far East*. 2009. No. 1. P. 331 – 334. (In Russ.).
6. GOST 32144 – 2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2014. 19 p. (In Russ.).
7. 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.).
8. Rudi D. Yu. Elektromagnitnaya sovmestimost' v sisteme elektrosnabzheniya mekhanicheskogo tsekh EA «Sibgazstroydetal» s elektrostanovkami 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. (In Russ.).
9. Rudi D. Yu., Gorelov S. V., Antonov A. I. [et al.]. Analiz nesinusoidal'nosti napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya s elektrostanovkami induktsionnogo nagreva [Analysis of non-sinusoidal voltage in power supply systems with induction heating electrical installations] // 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.).
10. Volodina N. A., Karyakin R. N., Kulikov L. V. [et al.]. Osnovy elektromagnitnoy sovmestimosti [Fundamentals of electromagnetic compatibility: textbook for universities]. Barnaul, 2007. 480 p. ISBN 978-5-903387-07-6. (In Russ.).
11. Guzhov N. P., Ol'khovskiy V. Ya., Pavlyuchenko D. A. Sistemy elektrosnabzheniya [Power supply systems]. Rostov-on-Don, 2011. 382 p. ISBN 978-5-222-17730-3. (In Russ.).
12. Sal'nikov V. G., Ivanova E. V., Ivanov M. N. Spravochnik elektroenergetika predpriyatiy tsvetnoy metallurgii [Directory of electric power industry of non-ferrous metallurgy enterprises]. Moscow, 1991. 384 p. ISBN 5-229-00253-0. (In Russ.).
13. Drekhslar R. Izmereniye i otsenka kachestva elektroenergii pri nesimmetrichnoy i nelineynoy nagruzke [Measurement and assessment of power quality under asymmetrical and nonlinear loads]. Moscow, 1985. 112 p. (In Russ.).
14. Sal'nikov V. G. Rukovodstvo po vyboru struktury i parametrov sistemy elektrocnabzheniya predpriyatiya s moshchnymi seriyami elektrolizerov tsvetnykh metallov [Guide to choosing the structure and parameters of the power supply system for an enterprise with a powerful series of non-ferrous metal electrolyzers]. Moscow, 1985. 78 p. (In Russ.).
15. GOST 30804.4.30-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmereniy pokazateley kachestva elektroenergii [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality measurement methods]. Moscow, 2014. 57 p. (In Russ.).
16. Rudi D. Yu., Shitik T. V. Otsenka pokazateley kachestva elektroenergii s pomoshch'yu pribora-analizatora «Resurs-PKE-1.7» [Assessment of power quality indicators using the analyzer device «Resurs-PKE-1.7»] // Problemy elektroenergetiki i telekommunikatsiy Severa Rossii. *Problems of Electric Power Industry and Telecommunications of the Russian North*. Moscow, 2023. P. 339 – 348. (In Russ.).
17. Pugachev V. S. Teoriya veroyatnostey i matematicheskoy statistiki [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow, 1979. 478 p. (In Russ.).
18. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskiy I. V. Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy [Course on probability theory and mathematical statistics for technical applications]. 3rd ed. Moscow, 1965. 511 p. (In Russ.).
19. Bronshteyn I. N., Semendyayev K. A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov [Handbook of mathematics for engineers and university students]. Moscow, 1981. 721 p. (In Russ.).
20. Rudi D. Y., Gorelov S. V., Khatsevskiy K. V. Algorithm for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference in electrical networks // Journal of Physics: Conference Series. 5. Series. «V Int. Scientific and Technical Conference «Mechanical Science and Technology Update», MSTU 2021. Omsk, 2021. Vol. 1901. P. 012077. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012077. EDN: SRUWQI. (In Engl.).
21. Rudi D. Yu., Gorelov S. V., Zubanov D. A., Antonov A. I. Razrabotka programmy dlya EVM dlya obrabotki rezul'tatov eksperimental'nykh issledovanii po koefitsiyentu n-y garmonicheskoy sostavlyayushchey napryazheniya sredstvami sredy graficheskogo programmirovaniya labview [Development of a computer program for processing the results of experimental studies on the coefficient of the nth harmonic component of voltage using the graphic programming environment labview] // Molodezh' i XXI vek-2021. Youth and the 21st Century – 2021. In 6 vols. Kursk, 2021. Vol. 6. P. 213 – 220. EDN: XMOVCN. (In Russ.).
22. Rudi D. Yu., Vishnyagov M. G., Ruppel' A. A. Komp'yuternaya programma dlya opredeleniya konduktivnoy nizkochastotnoy elektromagnitnoy pomekhi po koefitsiyentu 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 Technical and Economic Journal*. 2021. No. 1. P. 65 – 78. DOI: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78. EDN: ITCMBE. (In Russ.).

RUDI Dmitry Yurievich, Senior Lecturer of Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Omsk Institute of Water Transport (branch) Siberian State University Water Transport, (OIWT (branch) SSUWT), Omsk.

SPIN-code: 5222-7906

AuthorID (RSCI): 830094

Correspondence address: dima_rudi@mail.ru

ANTONOV Alexander Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, OIWT (branch) SSUWT, Omsk.

SPIN-code: 5682-8929

AuthorID (RSCI): 842787

Correspondence address: aleksandr_antonov_85@mail.ru

RUPPEL Alexander Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, OIWT (branch) SSUWT, Omsk.

SPIN-code: 3386- 9834

AuthorID (RSCI): 423886

Correspondence address: ruppelsan@mail.ru

RUPPEL Elena Yuryevna, Associate Professor of Physics and Mathematics Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk.

SPIN-code: 3193-1914

AuthorID (RSCI): 651948

Correspondence address: elektrotex@mail.ru

SHITIK Tatyana Vatslavovna, Lecturer of Special Disciplines of Operation of Ship Power Plants Department, Omsk River Command School named after Captain V. I. Evdokimov, OIWT (branch) SSUWT, Omsk.

SPIN-code: 3127-0387

AuthorID (RSCI): 1202984

Correspondence address: sobolevska-1965@mail.ru

For citations

Rudi D. Yu., Antonov A. I., Ruppel A. A., Ruppel E. Yu., Shitik T. V. The use of the methodological base of the study to determine the conduction of low-frequency electromagnetic interference according to the coefficient of the n-th harmonic component of the voltage // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 77 – 86. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-77-86.

Received October 27, 2023.

© D. Yu. Rudi, A. I. Antonov, A. A. Ruppel,
E. Yu. Ruppel, T. V. Shitik