

УДК 621.31

ББК 31.281

Д.Ю. РУДИ, С.В. ГОРЕЛОВ, А.И. АНТОНОВ,
М.Г. ВИШНЯГОВ, А.А. РУППЕЛЬ

АНАЛИЗ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Ключевые слова: качество электрической энергии, суммарный коэффициент гармонической составляющей, гармоника, электромагнитная помеха, несимметрия напряжений, медленные изменения напряжения, ГОСТ 32144-2013.

Важность проблемы повышения качества электрической энергии нарастала вместе с развитием и широким внедрением на производстве различных высокоэффективных технологических установок, таких как дуговые сталеплавильные печи, сварочные установки, индукционные печи и др. Авторами проведено исследование в системе электроснабжения механического цеха ЗАО «Сибгазстройдеталь» в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 30804.4.7–2013 и в соответствии с программой измерений. Описан способ обработки результатов исследований, полученных в ходе проведения эксперимента. Все показатели качества электроэнергии обработаны при помощи программ для ЭВМ, созданных в среде графического программирования Labview. Выполнен анализ показателей качества электрической энергии на соответствие их требованиям ГОСТ 32144-2013¹, по результатам которого в электрической сети 0,4 кВ обнаружены кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи по значениям коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения. Полученные значения показателей качества электрической энергии, характеризующих значения коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения, подтверждают необходимость применения технических средств по снижению влияния высших гармоник на электрические сети.

В настоящее время на промышленных предприятиях широко используются электроустановки индукционного нагрева (ЭИН) для поверхностной закалки, гибки и термообработки деталей машин, закалки деталей сложной формы и т.д.

Для создания индуцированных токов используются высокочастотные генераторы на базе тиристорных преобразователей. Тиристорные преобразователи являются источниками высших гармоник тока и напряжения в электрическую сеть, входящую в состав системы электроснабжения промышленного предприятия.

Главным источником высших гармоник в системах электроснабжения промышленных предприятий являются приемники с нелинейными характеристиками. К таким в первую очередь относятся преобразовательные устройства для питания дуговых установок постоянного тока (вакуумные, плазменные и т.д.), тиристорные источники повышенной и пониженной частоты для технологических процессов, тиристорные преобразователи для регулирования электропри-

¹ ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

вода. Эти нагрузки достигают очень больших значений (до 2000 МВт) и могут составлять подавляющую часть нагрузки предприятий некоторых отраслей промышленности (например, электролизеры алюминиевых заводов) [5].

Высшие гармоники в питающем напряжении вредно воздействуют на ряд приемников. Появляются дополнительные потери в электрических машинах, сетях и трансформаторах, пропускная способность которых снижается. Значительно сокращается срок службы изоляции электрических двигателей, кабельных линий и конденсаторов. Появляется вероятность возникновения резонансных явлений в батареях конденсаторов, что часто служит причиной их выхода из строя. Ухудшается работа устройств автоматики, значительно возрастают погрешности приборов [8].

Проблема качества электроэнергии наряду с надежностью и экономичностью является одной из главных в электроэнергетике. Исследование этой проблемы привело к созданию научного направления. В настоящее время имеется большое количество публикаций, посвященных отдельным аспектам качества электроэнергии [1–3, 7, 10–12].

Цель исследования – анализ несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения с электроустановками индукционного нагрева.

Методы исследования. В электрических сетях коэффициент $K_{U(n)}$ является непрерывно распределенной случайной величиной, зависящей от многих случайных событий. Коэффициент $K_{U(n)}$ связан с полем событий, характеризуется таблицей вероятностей [7]

$$\left\{ \begin{matrix} K_{U(n)1}, K_{U(n)2}, \dots, K_{U(n)i}, \dots, K_{U(n)k} \\ P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k \end{matrix} \right\}, \quad (1)$$

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 суток, %; $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k$ – вероятности появления этих значений коэффициента; $k = 1, 2, 3, \dots$ – номер значения коэффициента $K_{U(n)}$.

При превышении нормально допустимого значения коэффициентов $K_{U(n)}$ часть поля событий обуславливает кондуктивную низкочастотную электромагнитную помеху (ЭМП), вызванную особенностями технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии [7] (рис. 1).

Достоверное значение этой кондуктивной низкочастотной ЭМП может быть определено только статистическими методами.

На основании того, что плотность распределения $P(K_{U(n)})$ обуславливается законом распределения случайной величины $K_{U(n)}$, процесс возникновения кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения представляется математической моделью [7]:

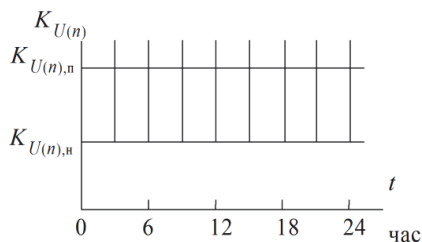


Рис. 1. Область появления кондуктивной низкочастотной ЭМП по $K_{U(n)}$ ($\delta K_{U(n)}$): область нормально допустимых и предельно допустимых значений

$$K_{U(n)} [P(K_{U(n),н} < K_{U(n)} < K_{U(n),п})] > 0,05; \quad (2)$$

$$P(K_{U(n),п} < K_{U(n)} < \infty) \neq \delta K_{U(n)},$$

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

Эта помеха появляется в электрической сети тогда, когда вероятность нахождения её в течение определённого интервала времени в пределах от $K_{U(n),н}$ до $K_{U(n),п}$ превышает 0,05, а в пределах от $K_{U(n),п}$ до ∞ – отлична от нуля. Выполнение только одного условия также обуславливает появление данной помехи.

Иными словами, на основании математической модели можно сделать вывод, что если значения $K_{U(n)}$ находятся в пределах от $K_{U(n),н}$ до $K_{U(n),п}$ в течение 5 % времени и более или хотя бы одно из значений $K_{U(n)}$ вышло за пределы $K_{U(n),п}$, то в этом случае возникает помеха $\delta K_{U(n)}$.

Интегральная функция вероятности распределения непрерывно распределённой случайной величины $K_{U(n)}$ в интервалах $[K_{U(n),н}; K_{U(n),п}]$ и $[K_{U(n),п}; \infty]$ определяется [7]

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

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

где $\psi[K_{U(n)}]$ – плотность вероятности распределения величины $K_{U(n)}$, 1/%.

На основе теоремы равенства начальных моментов и, как следствие, равенства центральных моментов распределения непрерывной случайной величины и ее производящей функции

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

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

где $M(K_{U(n)})$, $M(\delta K_{U(n)})$ – математическое ожидание, соответственно, величин $K_{U(n)}$ и $\delta K_{U(n)}$, %; $\sigma[K_{U(n)}]$, $\sigma[\delta K_{U(n)}]$ – среднеквадратичные отклонения этих величин, %.

Математическое ожидание $M(\delta K_{U(n)})$ характеризует средний уровень значений коэффициента n -й гармонической составляющей напряжений за необходимый контролируемый период времени.

Математическое ожидание определяется по формуле [7]

$$M[\delta K_{U(n)}] = \sum_{i=1}^k \overline{\delta K_{U(n)i}} P_i, \quad (6)$$

где k – число разрядов (квантилей) гистограммы; $\delta K_{U(n)i}$ – значение середины i интервала; P_i – вероятность попадания значений коэффициента n -й гармонической составляющей напряжений в i интервал.

Рассеяние значений $\delta K_{U(n)}$ относительно математического ожидания характеризуется дисперсией.

Она равна математическому ожиданию квадрата отклонений случайной величины от её среднего значения [10]:

$$D(\delta K_{U(n)}) = \sigma^2(\delta K_{U(n)}) = \sum_{i=1}^k \left[(\overline{\delta K_{U(n)i}})^2 P_i \right] - \left[M(\delta K_{U(n)}) \right]^2, \quad (7)$$

где $\sigma[\delta K_{U(n)}]$ – среднеквадратичное отклонение.

Среднеквадратичное отклонение характеризует меру рассеяния значений от математического ожидания. Для вычисления этой величины необходимо воспользоваться следующей формулой [7]

$$\sigma[\delta K_{U(n)i}] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta K_{U(n)i} - M(\delta K_{U(n)i}))^2}{n}}, \quad (8)$$

где n – количество значений $\delta K_{U(n)}$ за расчётный период.

$$\Psi\{K_{U(n)}; M[K_{U(n)}]; \sigma[K_{U(n)i}]\} = \Psi\{\delta K_{U(n)}; M[\delta K_{U(n)}]; \sigma[\delta K_{U(n)i}]\}, \quad (9)$$

где $\Psi\{K_{U(n)}; M[K_{U(n)}]; \sigma[K_{U(n)i}]\}$ – плотность вероятности распределения случайной величины $K_{U(n)}$, 1/°; $\Psi\{\delta K_{U(n)}; M[\delta K_{U(n)}]; \sigma[\delta K_{U(n)i}]\}$ – плотность вероятности распределения случайной величины $\delta K_{U(n)}$, 1/°;

Вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП $\delta K_{U(n)}$ составляет [7]

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

Полученные параметры кондуктивной низкочастотной ЭМП $M[\delta K_{U(n)}]$ и $\sigma[\delta K_{U(n)}]$, а также вероятность её появления позволяют представить последовательность решений по определению критерия качества функционирования систем электроснабжения общего назначения по $K_{U(n)}$ [9].

Исследование проводилось на предприятии ЗАО «Сибгазстройдеталь» в механическом цехе. Для измерений использовался прибор-анализатор качества электроэнергии «Ресурс-ПКЭ-1.7-оэ-А» заводской номер 32696-12.

Результаты, полученные при исследовании, обработаны при помощи программы для ЭВМ [9], созданной в среде графического программирования Labview [4, 6].

Сводные данные результатов испытаний представлены в табл. 1–2. Особое внимание следует уделить коэффициентам $K_{U(n), \min}$ и $K_{U(n), \max}$, которые являются минимальным и максимальным значениями коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения, соответственно.

На рис. 3-4 представлены некоторые осциллограммы изменения и гистограммы распределения значений коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения, выходящие за пределы нормально допустимых и предельно допустимых значений.

Из осциллограмм видно, что на некоторых промежутках времени значения коэффициентов n -й гармонической составляющей напряжения выходят за пределы нормально допустимого.

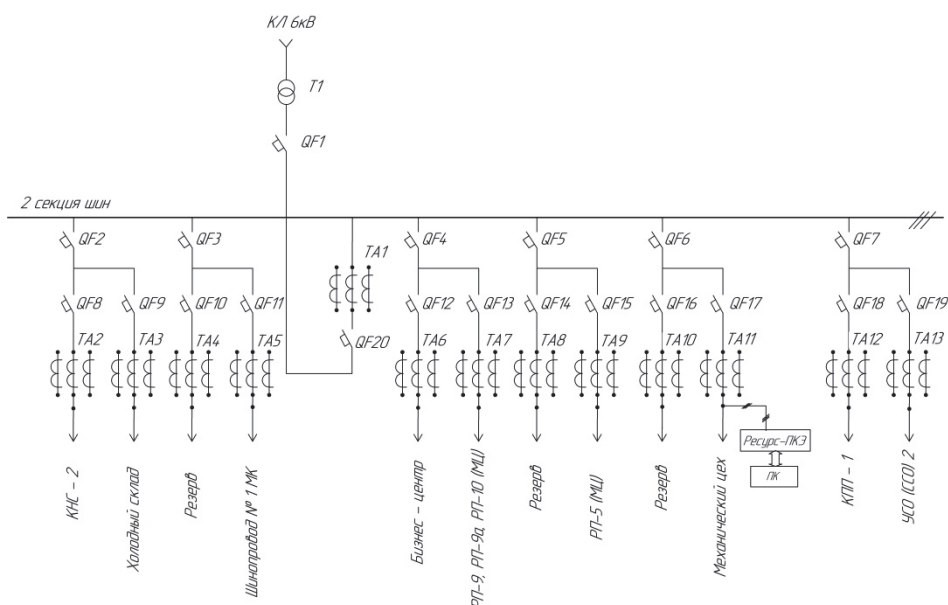


Рис. 2. Схема подключение прибора-анализатора качества электроэнергии в электрическую сеть объекта исследования

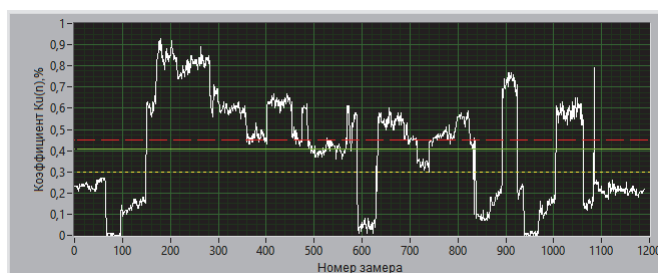
Таблица 1

Сводные данные значений коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения

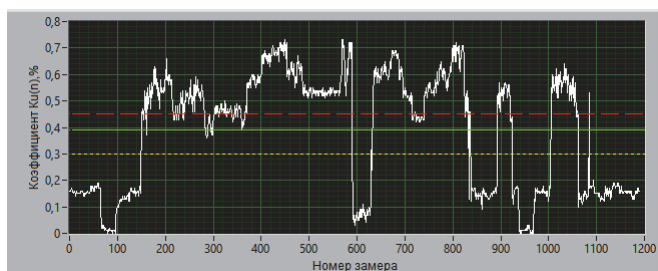
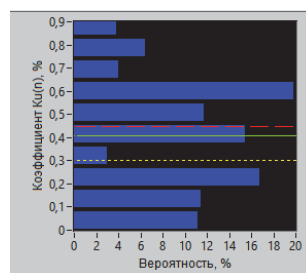
| Номер гармоники | Механический цех | | | | | | $K_{U(n), \text{н}}, \%$ | $K_{U(n), \text{н}}, \%$ |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Фаза А | | Фаза В | | Фаза С | | | |
| | $K_{U(n), \text{min}}, \%$ | $K_{U(n), \text{max}}, \%$ | $K_{U(n), \text{min}}, \%$ | $K_{U(n), \text{max}}, \%$ | $K_{U(n), \text{min}}, \%$ | $K_{U(n), \text{max}}, \%$ | | |
| 2 | 0,00 | 0,17 | 0,00 | 0,16 | 0,00 | 0,14 | 2,00 | 3,00 |
| 3 | 0,00 | 0,33 | 0,03 | 0,47 | 0,01 | 0,43 | 5,00 | 7,50 |
| 4 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,09 | 1,00 | 1,50 |
| 5 | 0,32 | 2,35 | 0,23 | 2,26 | 0,19 | 2,39 | 6,00 | 9,00 |
| 6 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,07 | 0,50 | 0,75 |
| 7 | 0,00 | 2,23 | 0,01 | 2,09 | 0,01 | 1,89 | 5,00 | 7,50 |
| 8 | 0,00 | 0,27 | 0,00 | 0,39 | 0,00 | 0,22 | 0,50 | 0,75 |
| 9 | 0,01 | 0,76 | 0,00 | 0,58 | 0,00 | 0,39 | 1,50 | 2,25 |
| 10 | 0,00 | 0,34 | 0,00 | 0,41 | 0,00 | 0,18 | 0,50 | 0,75 |
| 11 | 0,14 | 1,86 | 0,10 | 1,78 | 0,13 | 2,21 | 3,50 | 5,25 |
| 12 | 0,00 | 0,23 | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 0,12 | 0,20 | 0,30 |
| 13 | 0,01 | 1,80 | 0,00 | 1,74 | 0,04 | 1,49 | 3,00 | 4,50 |
| 14 | 0,00 | 0,24 | 0,00 | 0,40 | 0,00 | 0,21 | 0,20 | 0,30 |
| 15 | 0,00 | 0,93 | 0,00 | 0,73 | 0,00 | 0,49 | 0,30 | 0,45 |
| 16 | 0,00 | 0,31 | 0,00 | 0,43 | 0,00 | 0,19 | 0,20 | 0,30 |
| 17 | 0,05 | 1,17 | 0,04 | 1,31 | 0,04 | 1,61 | 2,00 | 3,00 |
| 18 | 0,00 | 0,32 | 0,00 | 0,42 | 0,00 | 0,16 | 0,20 | 0,30 |
| 19 | 0,00 | 1,64 | 0,00 | 1,45 | 0,01 | 1,16 | 1,50 | 2,25 |
| 20 | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 0,48 | 0,00 | 0,27 | 0,20 | 0,30 |
| 21 | 0,00 | 1,05 | 0,00 | 0,82 | 0,00 | 0,50 | 0,20 | 0,30 |
| 22 | 0,00 | 0,32 | 0,00 | 0,47 | 0,00 | 0,20 | 0,20 | 0,30 |
| 23 | 0,00 | 0,88 | 0,00 | 1,12 | 0,00 | 1,52 | 1,50 | 2,25 |
| 24 | 0,00 | 0,31 | 0,00 | 0,45 | 0,00 | 0,20 | 0,20 | 0,30 |

Окончание табл. 2

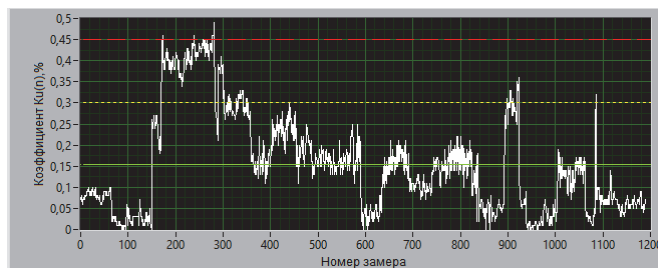
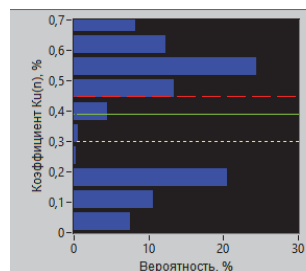
| № | Фаза А | | | Фаза В | | | Фаза С | | |
|----|---------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|----------------------|
| | $K_{U(n), n}$ | $K_{U(n), n}$ | $P(\delta K_{U(n)})$ | $K_{U(n), n}$ | $K_{U(n), n}$ | $P(\delta K_{U(n)})$ | $K_{U(n), n}$ | $K_{U(n), n}$ | $P(\delta K_{U(n)})$ |
| 30 | 47,43 | 0 | 42,43 | 31,65 | 65,23 | 91,88 | 0,733 | 0 | 0 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 32 | 8,624 | 0 | 3,624 | 36,97 | 57,98 | 89,95 | 9,908 | 0,64 | 5,55 |
| 33 | 4,77 | 89,42 | 89,42 | 9,18 | 84,84 | 89,02 | 31,13 | 29,79 | 55,91 |
| 34 | 15,5 | 0 | 10,5 | 58,26 | 37,25 | 90,5 | 4,22 | 0 | 0 |
| 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 9,17 | 0 | 4,17 | 64,95 | 30,00 | 89,95 | 0,64 | 0 | 0 |
| 37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 38 | 1,01 | 0 | 0 | 71,56 | 23,03 | 89,59 | 9,54 | 0 | 4,54 |
| 39 | 31,03 | 61,71 | 87,74 | 32,53 | 51,50 | 79,03 | 21,96 | 39,42 | 56,38 |
| 40 | 1,01 | 0 | 0 | 80,64 | 13,39 | 89,04 | 0 | 0 | 0 |



Фаза А



Фаза В



Фаза С

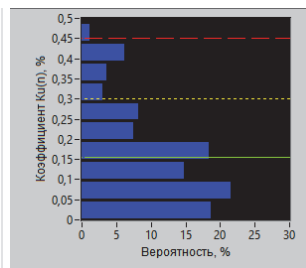


Рис. 3. Осциллограммы изменения и гистограммы распределения значений коэффициента 15-й гармонической составляющей напряжения

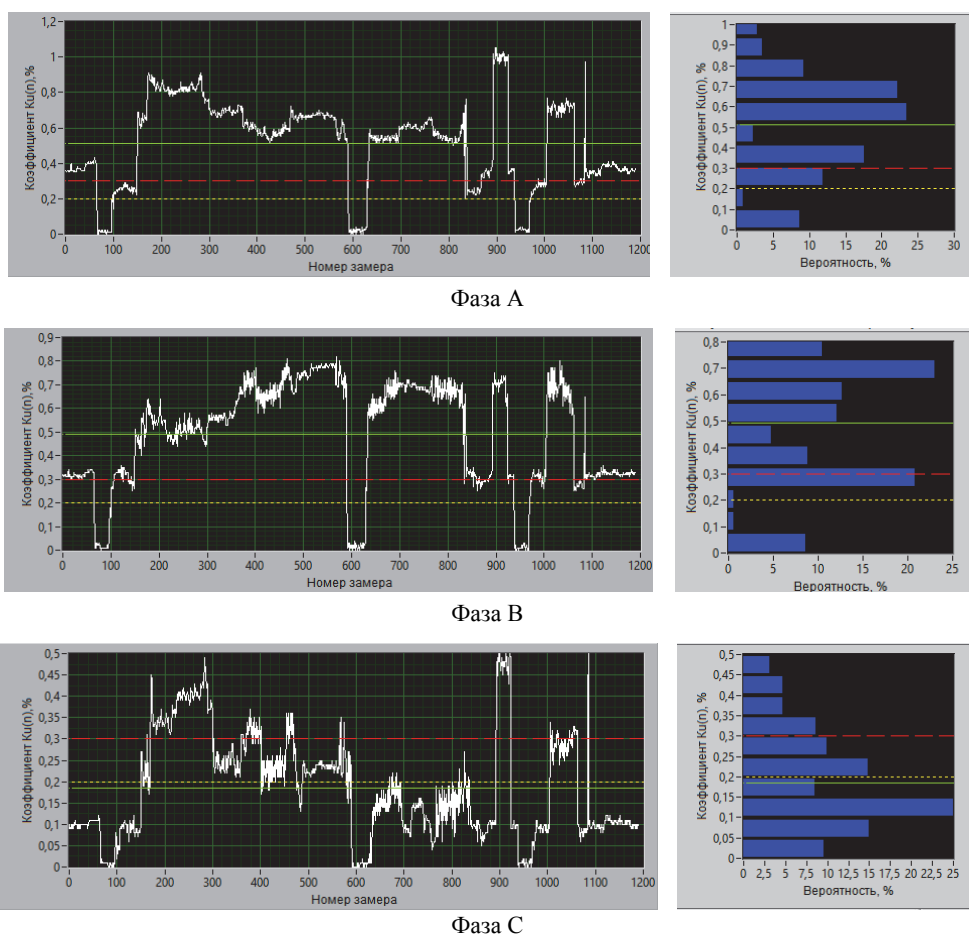


Рис. 4. Осциллограммы изменения и гистограммы распределения значений коэффициента 21-й гармонической составляющей напряжения

Для наглядности расчёта кондуктивной низкочастотной ЭМП по значениям коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения на рис. 5-6 представлены графики нормального закона распределения, совмещённые с нормируемыми значениями уровней ЭМС технических средств.

По результатам сводных данных таблиц, суточных осциллограмм напряжений и гистограмм плотности распределения, а также графиков нормального закона распределения кондуктивной электромагнитной помехи сделаны следующие наблюдения и выводы.

Результаты измерений показателей качества электроэнергии в зависимости от значения коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения не соответствует требованиям стандарта. За нормально и допустимые пределы выходят гармоники: 12; 14; 15; 16; 18; 19; 20; 21; 22; 24; 26; 27; 28; 30; 32; 33; 34; 36; 38; 39; 40 – на фазе А; 12; 14; 15; 16; 18; 19; 20; 21; 22; 24; 26; 27; 28; 30; 32; 33; 34; 36; 38; 39; 40 – на фазе В, 14; 15; 20; 21; 23; 26; 27; 28; 30; 32; 33; 34; 36; 38; 39 – на фазе С.

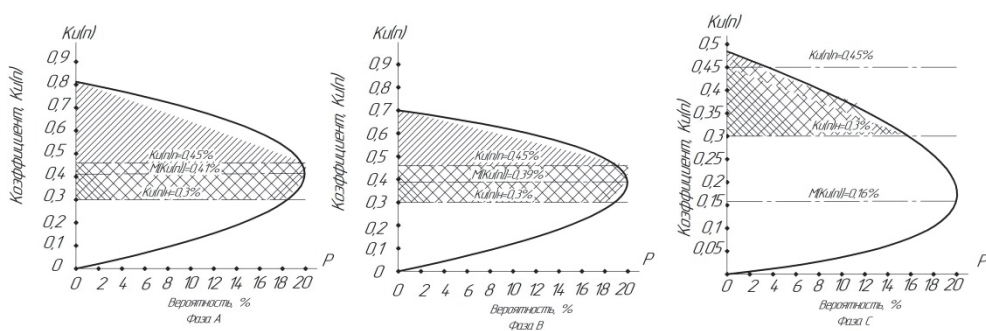


Рис. 5. Графики нормального закона распределения коэффициента 15-й гармонической составляющей напряжения, совмещённые с нормируемыми значениями уровней ЭМС

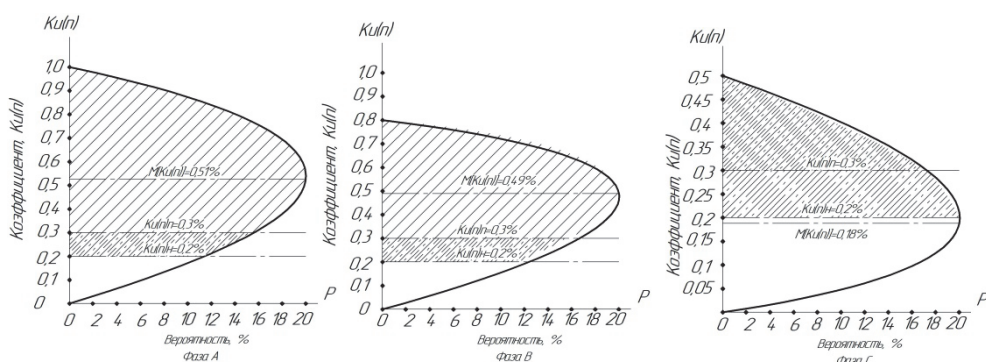


Рис. 6. Графики нормального закона распределения коэффициента 21-й гармонической составляющей напряжения, совмещённые с нормируемыми значениями уровней ЭМС

Вероятность выхода показателей по медленному изменению напряжения выше номинального значения на всех фазах равна 0. Вероятность выхода коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности равна 0. Вероятность выхода суммарного коэффициента гармонической составляющей напряжений равна 0.

Выводы. Проблема несинусоидальности напряжения в электрических сетях всегда была актуальной в России. Важность этой проблемы связана с развитием и широким внедрением на производстве различных высокоэффективных технологических установок. Исследование этой проблемы привело к созданию отдельного научного направления – электромагнитная совместимость. С помощью теории вероятности и математической статистики описана вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП по значениям коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения. На основе данного математического аппарата разработаны алгоритм и компьютерная программа, с помощью которых обработаны результаты измерений. Результаты измерений показали несоответствие значений коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения требованиям стандарта

ГОСТ 32144-2013¹. Необходимо внедрить в системы электроснабжения батареи статических конденсаторов либо силовые фильтры и произвести мероприятия по снижению значений коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения.

Литература

1. Асосков С.М., Вишнягов М.Г., Иванова Е.В., Клеутин В.И., Руппель А.А., Сидоренко А.А. К проблеме электроснабжения при некачественной электроэнергии // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 1. С. 333–336.
2. Вишнягов М.Г., Иванова Ю.М., Сальников В.Г. Параметры электромагнитной обстановки в сети с искажающей нагрузкой // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. № 2. С. 242–247.
3. Горелов С.В., Морев К.Н., Никулин В.И., Игнатенко Е.С. Повышение качества электрической энергии в сетях с нелинейными потребителями // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2016. № 3-4. С. 151–153.
4. Денчик Ю.М., Зубанов Д.А., Руппель Е.Ю. Разработка программного обеспечения для обработки результатов экспериментальных исследований установившегося отклонения напряжения средствами LabView // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 1. С. 362–365.
5. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
6. Зубанов Д.А., Клеутин В.И., Сидоренко А.А. Обработка результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии средствами программы LabView // Сборник научных трудов / Новосибирская государственная академия водного транспорта. Иртышский филиал (Омск). Омск, 2012. С. 118–121.
7. Иванова Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / под ред. В.П. Горелова, Н.Н. Лизалека. Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. транспорта, 2006. 432 с.
8. Лютаревич А.Г., Вырва А.А., Долингер С.Ю., Осипов Д.С., Четверик И.Н. Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения // Омский научный вестник. 2009. № 1 (77). С. 109–113.
9. Руди Д.Ю., Горелов С.В., Вишнягов М.Г., Зубанов Д.А., Зубанова Н.В., Иванов Д.М., Руппель А.А. 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.
10. Руди Д.Ю., Аитонов А.И., Вишнягов М.Г., Горелов С.В., Зубанов Д.А., Руппель А.А., Руппель Е.Ю. Исследование высших гармоник в электрических сетях низкого напряжения // Омский научный вестник. 2018. № 6(162). С. 119–125.
11. Руди Д.Ю. Обеспечение качества электрической энергии как неотъемлемый фактор задачи энергосбережения // Интеграционные процессы в науке в современных условиях: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. / отв. ред. А.А. Сукиасян. Уфа: Изд-во ООО «Аэтерна», 2019. С. 12–15.
12. Хацевский К.В., Денчик Ю.М., Клеутин В.И., Зубанов Д.А., Бубнов А.В., Харламов В.В. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения // Омский научный вестник. 2012. № 2(110). С. 212–214.

РУДИ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ – аспирант кафедры электроэнергетические системы и электротехника, Сибирский государственный университет водного транспорта, Россия, Новосибирск (dima_rudi@mail.ru).

¹ ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

ГОРЕЛОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетические системы и электротехника, Сибирский государственный университет водного транспорта, Россия, Новосибирск (nsawt_esc@mail.ru).

АНТОНОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ – старший преподаватель кафедры электротехники и электрооборудования, Омский институт водного транспорта, Россия, Омск (aleksandr_antonov_85@mail.ru).

ВИШНЯГОВ МИХАИЛ ГЕННАДИЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования, Омский институт водного транспорта, Россия, Омск (vishnyagov@mail.ru).

РУППЕЛЬ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат технических наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования, Омский институт водного транспорта, Россия, Омск (ruppelsan@mail.ru).

Dmitriy Yu. RUDI, Sergey V. GORELOV, Aleksandr I. ANTONOV,
Mikhail G. VISHNYAGOV, Aleksandr A. RUPPEL

ANALYSIS OF VOLTAGE NON-SINUSIDALITY IN POWER SUPPLY SYSTEMS WITH INDUCTION HEATING UNITS

Key words: quality of electrical energy, total harmonic component, harmonics, electro-magnetic interference, voltage unbalance, slow voltage changes, GOST 32144-2013.

The importance of the problem of improving the quality of electrical energy grew along with the development and widespread introduction of various high-performance technological installations in production, such as arc steel-making furnaces, welding installations, induction furnaces, etc. in accordance with the requirements of the standard GOST 30804.4.7-2013 and in accordance with the measurement program. A method for processing the research results obtained during the experiment is described. All power quality indicators are processed using computer programs created in the Labview graphical programming environment. The analysis of indicators of the quality of electrical energy to the requirements of GOST 32144-2013 was carried out, according to the results of which conductive low-frequency electromagnetic interference was detected in the 0.4 kV electrical network according to the coefficient of the n -th harmonic voltage components. The obtained values of the indicators of the quality of electrical energy, characterizing the coefficient of the n -th harmonic components of the voltage, confirm the need to use technical means to reduce the influence of higher harmonics on electrical networks.

References

1. Asoskov S.M., Vishnyagov M.G., Ivanova E.V., Kleutin V.I., Ruppel A.A., Sidorenko A.A. *K probleme elektrosnabzheniya pri nekachestvennoy elektroenergii* [To the problem of power supply with low-quality electricity]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2010, no. 1, pp. 333–336.
2. Vishnyagov M.G., Ivanova Yu.M., Salnikov V.G. *Parametry elektromagnitnoy obstanovki v seti s iskazhayushchey nagruzkoj* [Parameters of the electromagnetic environment in a network with a distorting load]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2008, no. 2, pp. 242–247.
3. Gorelov S.V., Morev K.N., Nikulin V.I., Ignatenko E.S. *Povysheniye kachestva elektricheskoy energii v setyakh s nelineynymi potrebitelyami* [Improving the quality of electrical energy in networks with non-linear consumers]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2016, no. 3-4, pp. 151–153.
4. Denchik Yu.M., Zubanov D.A., Ruppel E.Yu. *Razrabotka programmnogo obespecheniya dlya obrabotki rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy ustanovivshegosya otkloneniya napryazheniya sredstvami LabView* [Development of software for processing the results of experimental studies of steady-state voltage deviation by means of LabView]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2013, no. 1, pp. 362–365.
5. Zhezhelenko I.V. *Vysshiyе гармоникі в системах електропостачання промислових підприємств. 2-е изд.* [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises. 2nd ed.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 160 p.

6. Zubanov D.A., Kleutin V.I., Sidorenko A.A. *Obrabotka rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy pokazateley kachestva elektricheskoy energii sredstvami programmy LabView* [Processing the results of experimental studies of electrical energy quality indicators by means of the LabView program]. In: *Sbornik nauchnykh trudov* [Collection of scientific papers]. Omsk, Novosibirsk State Academy of Water Transport. Irtysh branch (Omsk), 2012, pp. 118–121.

7. Gorelov V.P., Lizalek N.N., eds., Ivanova E.V. *Konduktivnyye elektromagnitnyye pomekhi v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Conducted electromagnetic interference in power systems]. Novosibirsk, 2006, 432 p.

8. Lyutarevich A.G., Vyrva A.A., Dolinger S.Yu., Osipov D.S., Chetverik I.N. *Otsenka dopolnitel'nykh poter' moshchnosti ot vysshikh garmonik v elementakh sistem elektro-snabzheniya* [Assessment of additional power losses from higher harmonics in the elements of power supply systems]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2009, no. 1 (77), pp. 109–113.

9. Rudi D.Yu., Gorelov S.V., Vishnyagov M.G., Zubanov D.A., Zubanova N.V., Ivanov D.M., Ruppel A.A. *Algoritm opredeleniya konduktivnoy nizkочастотной электромагнитной помехи po koeffitsiyentu n-y гармонической составляющей napryazheniya* [Algorithm for determining conducted 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*, 2020, no. 33, pp. 177–194.

10. Rudi D.Yu., Aitonov A.I., Vishnyagov M.G., Gorelov S.V., Zubanov D.A., Ruppel A.A., Ruppel E.Yu. *Issledovaniye vysshikh garmonik v elektricheskikh setyakh nizkogo napryazheniya* [Research of higher harmonics in low voltage electrical networks]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2018, no. 6 (162), pp. 119–125.

11. Rudi D.Yu. *Obespecheniye kachestva elektricheskoy energii kak neot'yemlyyy faktor zadachi energosberezheniya* [Ensuring the quality of electrical energy as an integral factor in the task of energy conservation]. In: *Integratsionnyye protsessy v nauke v sovremennykh usloviyakh: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf* [Proc. of Int. Sci. Conf. «Integration processes in science in modern conditions»]. Ufa, Aeterna Publ., 2019, pp. 12–15.

12. Khatsevskiy K.V., Denchik Yu.M., Kleutin V.I., Zubanov D.A., Bubnov A.V., Kharlamov V.V. *Problemy kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya* [Power quality problems in power supply systems]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2012, no. 2 (110), pp. 212–214.

DMITRIY Yu. RUDI – Post-Graduate Student, Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering, Siberian State University of Water Transport, Russia, Novosibirsk (dima_rudi@mail.ru).

SERGEY V. GORELOV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering, Siberian State University of Water Transport, Russia, Novosibirsk (nsawt_ese@mail.ru).

ALEKSANDR I. ANTONOV – Senior Lecturer, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment, Omsk Institute of Water Transport, Russia, Omsk (aleksandr_antonov_85@mail.ru).

MIKHAIL G. VISHNYAGOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment, Omsk Institute of Water Transport, Russia, Omsk (vishnyagov@mail.ru).

ALEKSANDR A. RUPPEL – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment, Omsk Institute of Water Transport, Russia, Omsk (ruppelsan@mail.ru).

Формат цитирования: Руди Д.Ю., Горелов С.В., Антонов А.И., Вишнягов М.Г., Руппель А.А. 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.