

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ

В статье представлены результаты измерений показателей качества электрической энергии и проведенного их анализа. Измерения проводились в характерных точках контроля распределительной сети 0,4 кВ предприятий и организаций различных отраслевых секторов экономики. Установлено, что параметры напряжения питания по ряду параметров более чем в 30 % имеют отклонения от допустимых норм, установленных в нормативных документах. Подтверждены данные, что основным показателем, имеющим наибольший процент отклонения от граничных значений, является установившееся отклонение напряжения.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии, отклонение напряжения, несинусоидальность, несимметрия, показатели качества, контроль качества электрической энергии.

В Омском государственном техническом университете (ОмГТУ), на базе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», с 2004 года создана и функционирует испытательная лаборатория по качеству электрической энергии. Вопросы и задачи обеспечения качества электрической энергии поднимаются и успешно решаются в ОмГТУ достаточно длительное время [1–6]. Для решения этих задач начиная с 2006 года, пройдя первичную процедуру аккредитации на техническую компетентность и независимость в рамках выполнения энергетических обследований, научно-исследовательских работ, а также периодических испытаний качества электрической энергии, сотрудники кафедры и лаборатории провели значительное число измерений показателей качества электрической энергии. Данные измерения, помимо периодических испытаний у территориальных сетевых организаций, осуществлялись как в энергоснабжающих системах разноотраслевых промышленных предприятий, так и в организациях бюджетной сферы, на объектах жилого фонда и коммунального хозяйства.

Измерения параметров качества электрической энергии в большинстве случаев (более 80 % от общего числа) проводились на стороне низкого напряжения 0,4 кВ.

В качестве мест подключения анализаторов качества электрической энергии выбирались либо распределительные устройства (шины 0,4 кВ) понижающих трансформаторных подстанции 6(10)/0,4 кВ, либо непосредственно вводно-распределительные устройства, расположенные у потребителей. При проведении замеров, контролировалось соот-

ветствие параметров напряжения передаваемого потребителям параметрам, определенным соответственно до 01.06.2014 года — ГОСТ 13190-97, а далее — ГОСТ 32144-2013 [7–9].

Измерения для определения параметров электрической сети реализовывались при помощи многоканальных измерительно-вычислительных комплексов «Омск-М» (на соответствие ГОСТ 13109-97) и отвечающих требованиям класса «А» (ГОСТ 32144-2013) анализаторами качества Metrel 2792A, Metrel 2892, Fluke 435 II [10–12]. Все приборы на момент проведения работ, помимо свидетельств о поверке, имели соответствующие свидетельства об утверждении типа средства измерения и были внесены в государственный реестр.

По отношению к следующим параметрам, контролирующим показатели качества электрической энергии, определены основные нормативные требования:

- отклонение напряжения  $\Delta U$  (ГОСТ 13109-97);
- положительное отклонение напряжения  $\Delta U_{(+)}$  (ГОСТ 32144-2013);
- отрицательное отклонение напряжения  $\Delta U_{(-)}$  (ГОСТ 32144-2013);
- отклонение частоты  $\Delta f$ ;
- коэффициент искажения синусоидальности напряжения  $K_n$ ;
- коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$ ;
- коэффициент несимметрии по обратной последовательности  $K_{2U}$ ;
- коэффициент несимметрии по нулевой последовательности  $K_{0U}$ .

Главной задачей проводимых исследований ставилось определение в сетях 0,4 кВ реальных уровней напряжений и нагрузок (токи, мощности, коэффициенты мощности), несинусоидальности, несимметрии по обратной и нулевой последовательностям. В последующем все сведения обрабатывались и анализировались на соответствие требований действующих нормативов.

Итоги изучения данных, полученных в ходе обработки более 170 измерений, показали, что в 32 % случаев значения показателей качества электрической энергии не соответствовали требуемым нормам и определили, что показателями качества электроэнергии, наиболее часто выходящими своими значениями за пределы, установленные ГОСТ [7, 9], являются (рис. 1):

- отклонение напряжения  $\Delta U$  (68 %);
- коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  (40 %);
- коэффициент несимметрии по нулевой последовательности  $K_{0U}$  (38 %).

Сводные результаты измерений показателей качества электрической энергии представлены в табл. 1 и 2.

Результаты измерений в точках контроля на промышленных предприятиях подтвердили тот факт, что нагрузка большинства трансформаторов лежит в интервале от 30 до 70 % от номинальной мощности. Выход такого показателя, как коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  и коэффициент несимметрии по обратной последовательности  $K_{2U}$  за предельные нормативные значение не превышают 1 % от общего числа измерений (рис. 2).

В целом же анализ измерений показал, что в среднем в 23 % случаев значения показателей качества электрической энергии в сетях промышленных предприятий не соответствовали установленным нормативам (табл. 1). В основном это относится к уровню нормального допустимого отклонения напряжения при сопоставлении его значений с требованиями ГОСТ 13109-97 [7].

Стоит отметить, что со второй половины 2014 года соответствие качеству электрической энергии стали проверять по ГОСТ 32144-2013 [8]. В данном нормативном акте был исключен такой термин, как нормально допустимое отклонение напряжения, определяемое в границах  $\pm 5$  % от УНОМ.

Таким образом, сети многих предприятий без внедрения каких-либо технических мероприятий и проведения регулировочных работ смогли уложиться в новые нормативные требования по отклонению напряжения, установленные ГОСТ 32144-2013 только в качестве предельного уровня отклонения напряжения на границе  $\pm 10$  % от  $U_{НОМ}$ .

Основной причиной выхода за нормы значений коэффициентов несимметрии напряжений по нулевой последовательности в сетях промышленных предприятий является наличие несимметрии токов в сети из-за неравенства фазовых нагрузок.

Повышенные уровни значений коэффициентов  $n$ -ых гармонических составляющих напряжения зачастую обусловлены наличием высших гармонических составляющих в спектре питающего напряжения. Применение на предприятиях оборудования с нелинейной вольт-амперной характеристикой, потребляющего ток с формой, отличной от синусоиды, приводит к искажению синусоиды питающего напряжения и наличию высших гармоник тока [2].

В электрических сетях электроснабжения жилого фонда основное внимание, безусловно, требует поддержание в пределах допустимых норм уровней питающего напряжения (рис. 3). Уровень отклонения напряжения от номинального значения, в связи с характерными суточными изменениями нагрузки, может иметь как отрицательное, так и положительное направления. Другими словами, величина напряжения, подведенного к зажиму электроприемника, может быть как меньше, так и больше номинального уровня. Временные диаграммы фазных напряжений, полученные в ходе испытаний, показывают, что в часы максимальной нагрузки (вечернее время) можно часто наблюдать наибольшее отрицательное отклонение напряжения от номинального. С обратной стороны, во время ночных часов, при снижении нагрузки жилого дома до минимального уровня, отклонение напряжения принимает наибольшее положительное значение.

Присутствие в электрических сетях жилого фонда высших гармонических составляющих можно объяснить наличием современных электробытовых приборов и оборудования, которое инжектирует искажения в кривые тока и напряжения. К такому оборудованию можно отнести блоки питания телевизоров, компьютеров, микроволновых печей, компактные энергосберегающие и светодиодные

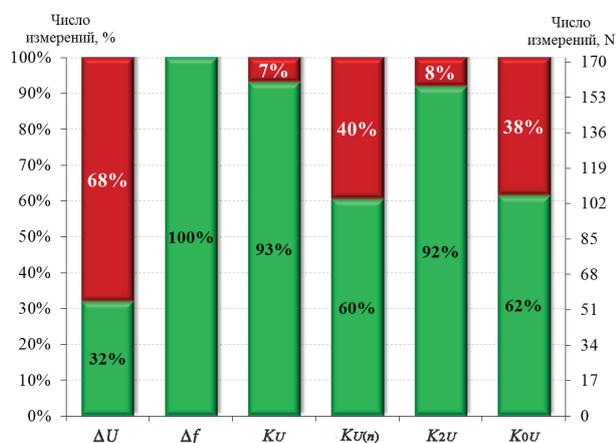


Рис. 1. Общее распределение показателей качества электрической энергии

Таблица 1

Общие результаты измерений показателей качества электрической энергии

Наименование ПКЭ	$\Delta U$	$\Delta f$	$K_U$	$K_{U(n)}$	$K_{2U}$	$K_{0U}$
Соответствует требованиям	55	172	160	104	158	106
	32 %	100 %	93 %	60 %	92 %	62 %
Не соответствует требованиям	117	0	12	68	14	66
	68 %	0 %	7 %	40 %	8 %	38 %

Результаты измерений показателей качества электрической энергии с учетом отраслевой принадлежности

Наименование ПКЭ / Отраслевая принадлежность/ Соответствие требованиям ГОСТ	Установившееся отклонение напряжения, $\Delta U$			Коэффициент искажения синусоидальности напряжения, $K_U$			Коэффициент $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, $K_{U(n)}$			Коэффициент несимметрии по обратной последовательности, $K_{2U}$			Коэффициент несимметрии по нулевой последовательности, $K_{0U}$			ИТОГО
	Промышленность	ЖКХ	Бюджетная сфера	Промышленность	ЖКХ	Бюджетная сфера	Промышленность	ЖКХ	Бюджетная сфера	Промышленность	ЖКХ	Бюджетная сфера	Промышленность	ЖКХ	Бюджетная сфера	
Число измерений	73	45	54	73	45	54	73	45	54	73	45	54	73	45	54	860
ПКЭ соответствуют требованиям ГОСТ	28	11	16	72	45	43	55	25	24	72	43	43	53	18	35	68 %
	38 %	24 %	30 %	99 %	100 %	80 %	75 %	56 %	44 %	99 %	96 %	80 %	73 %	40 %	65 %	
	32 %			93 %			60 %			92 %			62 %			
ПКЭ не соответствуют требованиям ГОСТ	45	34	38	1	0	11	18	20	30	1	2	11	20	27	19	277
	62 %	76 %	70 %	1 %	0 %	20 %	25 %	44 %	56 %	1 %	4 %	20 %	27 %	60 %	35 %	
	68 %			7 %			40 %			8 %			38 %			

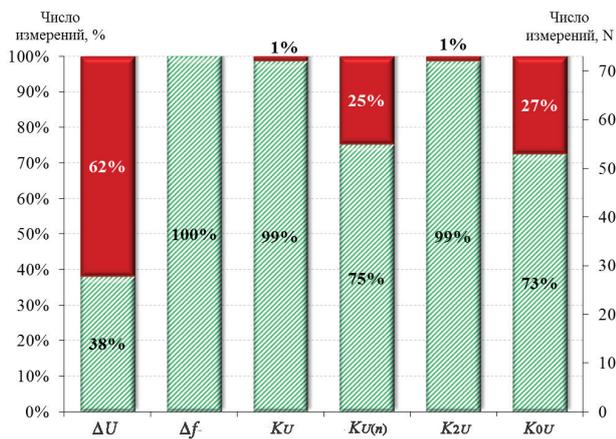


Рис. 2. Гистограмма распределения показателей качества электрической энергии центров питания промышленных предприятий

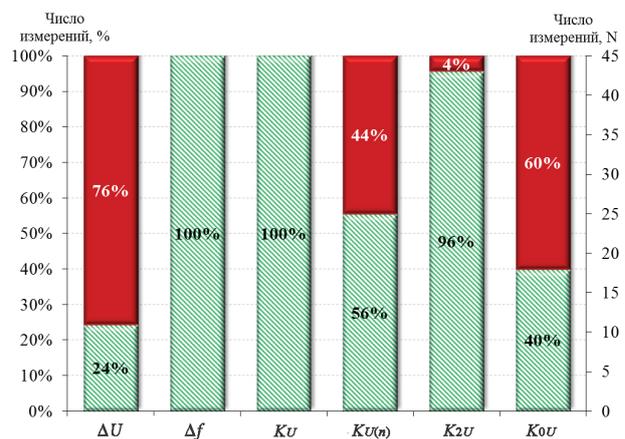


Рис. 3. Гистограмма распределения показателей качества электрической энергии объектов жилищно-коммунального хозяйства

лампы и т.п. Необходимо отметить, что в большинстве случаев большие искажения гармонического состава возникают в таких распределительных сетях в вечернее время из-за увеличения общего количества энергопотребляющего оборудования.

В целом распределение показателей, выходящих за границы установленных норм в электрических

сетях объектов жилищно-коммунальной сферы (табл. 2), выглядит следующим образом:

- отклонение напряжения  $\Delta U$  (76 %);
- коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  (44 %);
- коэффициент несимметрии по обратной последовательности  $K_{2U}$  (4 %);

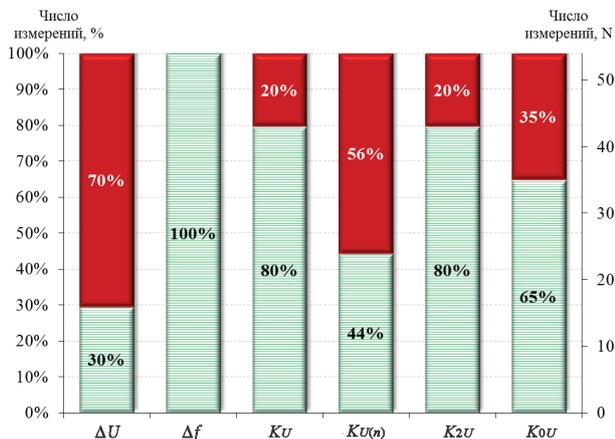


Рис. 4. Гистограмма распределения показателей качества электрической энергии объектов бюджетной сферы

— коэффициент несимметрии по нулевой последовательности  $K_{ou}$  (60 %).

Похожие проблемы присутствуют и в сетях организаций бюджетной сферы.

Выход уровней напряжения за допустимый диапазон (как в положительную, так и в отрицательную сторону) связан в подавляющем большинстве случаев с совпадением двух факторов: изначально несимметричного уровня напряжения в точке передачи электрической энергии и неравномерного подключения электроприемников однофазного исполнения и осветительного оборудования. Число подобных потребителей в таких учреждениях значительно, однако пофазное перераспределение этих нагрузок для снижения уровня несимметрии либо вообще не проводится, либо проводится редко.

Тот факт, что сети организации бюджетной сферы имеют в качестве подключенной нагрузки значительное количество оборудования с нелинейной вольт-амперной кривой приводит к появлению высших гармонических составляющих. В процессе своей работы компьютерная и офисная техника, современные энергосберегающие источники света генерируют гармонические искажения, значения которых на выходе каждого приемника могут быть незначительными, но за счет общего большого количества таких источников взаимное искажение приводит к отклонению уровня коэффициента, отражающего наличие искажающей гармонической составляющей за пределы нормативных значений [13, 14].

Основными показателями, выходящими за пределы установленных норм в электрических сетях организаций бюджетной сферы, являются (рис. 4):

- отклонение напряжения  $\Delta U$  (70 %);
- коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  (56 %);
- коэффициент несимметрии по нулевой последовательности  $K_{ou}$  (35 %).

Как указывалось выше, с вступлением в силу ГОСТ 32144-2013 и отменой величины нормально допустимого отклонения напряжения в большинстве случаев уровни данного показателя будут находиться в границах  $\pm 10\%$  от  $U_{ном}$  даже без реализации каких-либо мероприятий и внедрения технических средств регулирования.

В то же время для обеспечения потребителей вне зависимости от типа и рода деятельности электрической энергией требуемого качества необхо-

димо осуществлять периодический мониторинг и контроль основных показателей качества напряжения, а также регулярный контроль правильности подключения потребителей для оперативного принятия технических мер по приведению действующих значений питающего напряжения в нормативные рамки.

#### Библиографический список

1. Бумагин Г. И., Дед А. В., Лютаревич А. Г. Применение методов контроля и анализа качества электроэнергии при исследовании систем электроснабжения объектов Министерства здравоохранения Омской области. Омск: ОмГТУ, 2006. 9 с. Деп. в ВИНТИ 22.02.2008, № 151 – В2008.
2. Горюнов В. Н., Осипов Д. С., Лютаревич А. Г. Расчет потерь мощности от влияния высших гармоник // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 2. С. 268 – 273.
3. Хацевский К. В., Ю. М. Денчик, В. И. Клеутин [и др.]. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения // Омский научный вестник. 2012. № 2 (110). С. 212 – 214.
4. Долингер С. Ю., Лютаревич А. Г., Горюнов В. Н. [и др.]. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 178 – 183.
5. Дед А. В., Бирюков С. В., Паршукова А. В. Оценка дополнительных потерь мощности в электрических сетях 0,38 кВ на основе экспериментальных данных // Успехи современного естествознания. 2014. № 11-3. С. 64 – 67.
6. Дед А. В. К проблеме современного состояния уровней показателей несимметрии напряжений и токов в сетях 0,4 кВ // Омский научный вестник. 2017. № 2 (152). С. 63 – 65.
7. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 1999–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1998. 32 с.
8. О введении в действие межгосударственного стандарта: приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) [от 22 июля 2013 г. № 400-ст]. URL <http://docs.cntd.ru/document/499061116> (дата обращения: 30.01.2018).
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2013. 10 с.
10. Прибор измерения показателей качества электрической энергии: Fluke 435 II. URL: <http://www.electronpribor.ru/catalog/16/fluke-435-ii.htm> (дата обращения: 30.01.2018).
11. Анализатор качества электроэнергии Metrel MI 2892. URL: <http://www.electronpribor.ru/catalog/16/mi-2892.htm> (дата обращения: 30.01.2018).
12. Анализатор качества электроэнергии класса А Metrel MI 2892. URL: <http://www.metrel-russia.ru/products/Kachestvo/MI-2892-01> (дата обращения: 30.01.2018).
13. Белей В. Ф., Харитонов М. С. Некоторые рекомендации для систем освещения на основе энергосберегающих ламп // Промышленная энергетика. 2014. № 6. С. 41 – 47.
14. Велемчук Н. С. Искажение синусоидальности кривой напряжения в электрических сетях освещения. URL: <http://www.teslafirm.ru/waveform-distortion> (дата обращения: 30.01.2018).

**ДЕД Александр Викторович**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 5237-6697

AuthorID (РИНЦ): 512774.

ORCID (SCOPUS) 0000-0001-5625-8869

**СИКОРСКИЙ Сергей Петрович**, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета элитного образования и магистратуры.

**СМИРНОВ Павел Сергеевич**, магистрант, гр. ЭЭМ-172 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: ded\_av@mail.ru

Для цитирования

Дед А. В., Сикорский С. П., Смирнов П. С. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 60–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64.

Статья поступила в редакцию 05.02.2017 г.

© А. В. Дед, С. П. Сикорский, П. С. Смирнов

УДК 621.311:621.314

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-64-69

**Д. В. КОВАЛЕНКО**  
**Л. А. ФАЙФЕР**  
**Б. Ю. КИСЕЛЁВ**  
**А. О. ШЕПЕЛЕВ**  
**П. С. СМОРНОВ**  
**В. И. СУРОВЦЕВ**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСА ТОКОВ НА ВЫСШИХ ГАРМОНИКАХ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье дано описание имитационного моделирования резонанса токов, возникающего в системе электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности в нестационарных режимах работы и наличии электроприемников, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику. Кроме моделирования режима параллельного резонанса, возникающего на частотах, близких к частотам высших гармоник, предлагаемый алгоритм определяет все возможные резонансные частоты, на которых может выполняться условие параллельного резонанса при различных допущениях, а также относительную погрешность расчета для различных случаев: при учете всех составляющих комплексных сопротивлений; без учета активных составляющих сопротивлений; с учетом активной составляющей сопротивления трансформатора, но без учета сопротивлений нагрузок; без учета активной составляющей сопротивления трансформатора и без учета сопротивлений нагрузок. Цель предлагаемой работы: показать, как влияет учет (неучет) составляющих комплексных сопротивлений на результаты определения резонансных частот.

**Ключевые слова:** резонанс токов, резонансная частота несинусоидальные нестационарные режимы, батареи статических конденсаторов.

**Влияние высших гармоник на элементы систем электроснабжения.** Высшие гармоники напряжения и тока оказывают влияние на элементы системы электроснабжения.

Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются:

— увеличение токов гармоник вследствие параллельного резонанса (резонанса токов);

— снижение эффективности процессов генерации, передачи, использования электроэнергии;

— старение изоляции электрооборудования и сокращение его срока службы;

— ложное срабатывание устройств релейной защиты и автоматики.

Негативному влиянию высших гармоник как на отдельные элементы, так и на всю систему электроснабжения посвящено достаточно большое количество работ [1–4]. Значения коэффициентов высших гармонических составляющих регламентируются ГОСТ 32144-2013 [5].