

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ УРОВНЕЙ ОТКЛОНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ

В статье представлены результаты обработки данных об отклонениях уровней питающего напряжения в электрических сетях 0,38 кВ Омского государственного технического университета, полученных в рамках проведения обязательного энергетического обследования. При заданном значении вероятности для каждой точки измерения произведен расчет величины отклонения напряжений от номинального значения каждой из фаз. Установлено, что среднее значение отклонения уровня питающего напряжение не превышает для каждой из фаз величину 7 %, что меньше предельного максимально допустимого значения 10 % установленного ГОСТ.

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

В рамках энергетического обследования в декабре 2017 года в Омском государственном техническом университете (ОмГТУ) были проведены испытания по показателям качества электрической энергии, передаваемой в распределительных сетях 0,38 кВ.

Научный коллектив ОмГТУ на протяжении длительного периода изучает и решает вопросы, связанные с обеспечением и контролем качества электрической энергии у потребителей различных сфер и областей деятельности [1–3]. Поэтому, опираясь на опыт проведенных ранее исследований, в качестве пунктов проведения измерений были определены вводно-распределительные устройства распределительных пунктов учебно-лабораторных корпусов ОмГТУ, что соответствовало точке передачи электрической энергии — точке электрической сети, которая находится на линии раздела объектов электроэнергетики между владельцами по признаку собственности, определенная в процессе технологического присоединения [4].

Инструментальное обследование проводилось для оценки энергетической эффективности систем электроснабжения при действующих нагрузках в соответствии с ГОСТ 33073-2014 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [5].

В качестве средств измерения использовались анализаторы качества электрической энергии Metrel 2892 (сертификат об утверждении типа средств из-

мерений SI.C.34.004.A № 54921, номер регистрации в Государственном реестре средств измерений 57207-14), которые являются приборами класса А по ГОСТ 30804.4.30, что позволяет использовать их для сертификации качества электрической энергии [6].

С целью анализа характера изменения нагрузки во всех контролируемых точках проводились одновременно с определением уровней напряжений и их отклонений и величины нагрузочных токов. Все проводившиеся замеры осуществлялись в трех фазах.

Показателями качества электрической энергии, относящимися к изменениям напряжения электропитания, являются отрицательное  $\delta U(-)$  и положительное  $\delta U(+)$  отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального/согласованного значения.

Отклонение напряжения можно определить по следующим формулам:

$$\delta U_{(-)} = \frac{U_{НОМ} - U_{m(-)}}{U_{НОМ}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$\delta U_{(+)} = \frac{U_{m(+)} - U_{НОМ}}{U_{НОМ}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $U_{m(+)}$ ,  $U_{m(-)}$  — значения напряжения электропитания, меньшие  $U_{НОМ}$  и большие  $U_{НОМ}$  соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.12.

В электрических сетях низкого напряжения стандартное номинальное напряжение  $U_{ном}$  электропитания равно 220 В (между фазным и нейтральным проводниками для однофазных и четырехпроводных трехфазных систем) и 380 В (между фазными проводниками для трех- и четырехпроводных трехфазных систем).

Положительные  $\delta U_{(+)}$  и отрицательные  $\delta U_{(-)}$  отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала измерения [4].

Как известно, целью каждого измерения является направленность на определение результата измерения, с оценкой реальной величины измеряемого параметра. Для ее достижения в большинстве случаев при обработке результатов измерений, в том числе и показателей качества электрической энергии, применяются вероятностно-статистические методы, основанные на теории вероятностей и математической статистики [7, 8]. К основной цели обработки экспериментальных данных в первую очередь можно отнести определение итогового значения измеряемого параметра и оценка его возможной погрешности.

По существующему мнению, из-за невозможности правильной оценки о достоверности измеренных данных, применение однократных измерений, допустимы только в порядке исключения [9]. К таким измерениям можно отнести регулярные разовые измерения уровней токов и напряжений, проводимых службами, ответственными за энергетическое хозяйство предприятия или организации.

Под измерением в общем случае понимается набор совместных операций, которые выполняются при помощи технического средства измерения (например, анализатора качества электрической энергии), позволяющего хранить единицу величины, сопоставлять измеряемый параметр с его единицей и в итоге получать искомое значение величины. Полученное таким образом значение именуется как результат измерения. Для результата измерения указание величины погрешности, с которой он определен, является неотъемлемым требованием [9].

Погрешностью измерения характеризуют величину отклонения результата измерения от его реального (действительного) значения измеряемого параметра [10].

Замеры показателей качества электрической энергии, в частности уровней напряжения, по своему характеру являются многократными прямыми измерениями. То есть измерениями одного и того же параметра, результат которого получают из нескольких следующих друг за другом однократных измерений, при которых искомое значение параметра будет определяться непосредственно из объема (массива) опытных данных [9].

Объем данных, из которого формируется исследуемая выборка, формируется из  $n$  числа измерений. В случае если число данных в выборке  $n > 20$ , то выборка считается большой, иначе, при  $n < 20$ , выборка является малой. Исходной информацией для обработки является ряд из  $n$  результатов измерений  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ , из которых исключены известные систематические погрешности, т.е. выборка [10].

В общем случае действительное значение измеряемого параметра неизвестно, поэтому в качестве

исходной (опорной) величины применяется его теоретическое или номинальное значение.

Действительное значение величины может быть определено только экспериментальным способом, с учетом гипотезы, что полученные итоги эксперимента (измерений) будут наилучшим образом приближены к истинному (реальному) значению искомого параметра.

Статистическая обработка результатов необходимого количества измерений возможна в том случае, когда составляющая систематической погрешности по сравнению со случайной погрешностью в общей величине погрешности пренебрежительно мала [10].

Определено, что результаты начинают приобретать определенную устойчивость при числе измерений  $7 < n < 8$ . Для более высокой достоверности изучаемого параметра число измерений для выборки должно быть  $25 < n < 30$ . В ситуации, когда измеряемый параметр до этого не исследовался и не определялся, то, кроме предварительных, обычно расчетных (номинальных) значений, данных о нем нет. В таком случае необходимо увеличивать число измерений до  $50 < n < 100$ , но для определения закона распределения измеряемого параметра такого числа измерений  $n$  недостаточно, поэтому их рекомендовано увеличивать на порядок [9].

Увеличением числа измерений  $n$  стараются уменьшить случайности результата измерений  $n$ , тем самым максимально приближая результат к действительному значению исследуемого параметра. При этом необходимо, чтобы систематическая составляющая погрешности была практически исключена. В то же время простое повышение числа измерений не гарантирует нахождения реального значения параметра.

Результатом обработки измерений в большинстве случаев является расчет среднего арифметического значения, являющегося оценкой математического ожидания величины и статистического (теоретического) среднего квадратического отклонения (СКО) измеряемого параметра.

Обработка результатов прямых измерений проводится по следующему алгоритму:

- в таблицу (массив) заносится результат каждого из измерений;
- рассчитывается средняя величина параметра измерения из всего объема  $n$  измерений;
- для каждого отдельного измерения определяется погрешность;
- погрешности каждого отдельного измерения вводятся в квадрат;
- для среднего арифметического значения рассчитывается среднеквадратичная ошибка;
- выбирается необходимая надежность (как правило — 95 %);
- для заданной надежности  $P$  и числа количества измерений  $n$  из табличных данных выбирается коэффициент Стьюдента  $t$ ;
- определяются границы доверительного интервала (погрешность измерения);
- записывается результат измерения в окончательном виде;
- оценивается относительная погрешность результата измерений.

Рассмотрим каждый из вышеуказанных пунктов на примере некоторой случайной величины  $X$ . Для определения ее параметров выполнено  $n$  независимых измерений, которым соответствуют значения  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ .

Для анализа действующего значения измеряемой величины применяется его среднее арифметическое значение  $\bar{X}(\bar{X})$  или оценка математического ожидания  $m_x$ , которая для физической величины соответствует ее реальному значению:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (3)$$

где  $n$  — число значений коэффициентов несимметрии токов, полученных в результате проведенных измерений;  $X_i$  — каждое независимое значение из выбранного интервала значений  $n$ .

Для выявления тенденций, насколько результаты измерений разбросаны относительно среднего значения, помимо среднего значения  $\bar{X}$ , представляет интерес среднеквадратическое отклонение —  $\Delta X_i$ .

Среднеквадратическое отклонение показывает меру отклонения наблюдений относительно среднего и определяется для каждого из интервала значений:

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X}. \quad (4)$$

Далее необходимо рассчитать среднеквадратичную погрешность (стандартное отклонение) выборки  $S_n$  из выражения:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}. \quad (5)$$

Определяется среднеквадратичная ошибка среднего арифметического, которая позволяет вычислить вероятность попадания истинного значения измеряемой величины в любой интервал вблизи среднего арифметического:

$$\delta_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}}. \quad (6)$$

Определяем границы доверительного интервала (абсолютная ошибка для данной доверительной вероятности), с учетом коэффициента Стьюдента  $t_p$ , определенного для вероятности 95 % [11], из выражения:

$$\Delta X_i = \pm t_p \cdot \delta_n. \quad (7)$$

Оцениваем относительную погрешность результата измерений по формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta X_i}{\bar{X}_i} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Окончательный результат значения измеряемой величины записывается в виде:

$$X = \bar{X} \pm \Delta X_i. \quad (9)$$

Для полученных результатов измерений уровней напряжений в соответствии с уравнениями (1) и (2) были определены отклонения напряжения и построены временные диаграммы (рис. 1, рис. 2).

На примере уровня напряжения фазы А определим величину отклонения напряжений от но-

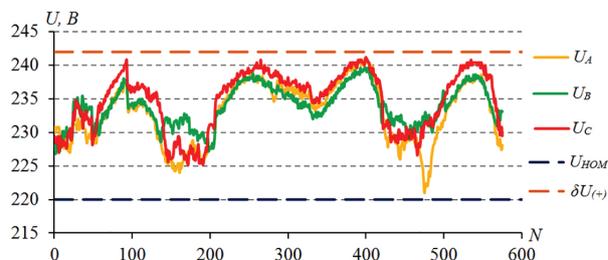


Рис. 1. Временная диаграмма уровней напряжений (РУ 0,4 кВ ВРУ-1, УЛК – 6, ввод № 1)

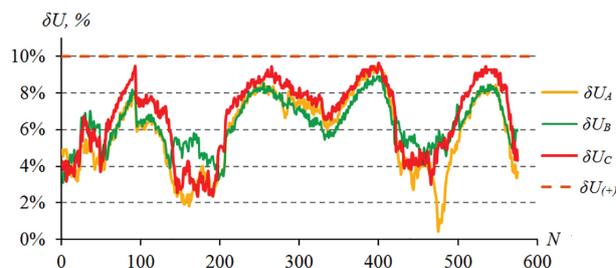


Рис. 2. Временная диаграмма уровней отклонений напряжений от номинального значения (РУ 0,4 кВ ВРУ-1, УЛК – 6, ввод № 1)

минального значения при заданной вероятности 95 %. Количество измеренных значений  $n$ , попавших в выборку, составляет 575.

Находим среднее арифметическое значение выборки:

$$\bar{X}_{dUa} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{dUa}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{575} 4,91 + 4,55 + 4,82 + \dots + 3,64 + 3,36 + 3,68}{575} = 0,059. \quad (10)$$

Определим отклонение каждого значения ряда относительно среднего отклонение относительно среднего (на примере для первого значения):

$$\Delta X_{i(dUa)} = X_i - \bar{X}_{dUa} = 0,0491 - 0,059 = -0,0099. \quad (11)$$

Рассчитываем среднеквадратичную погрешность (стандартное отклонение) выборки  $S_{dUa}$ :

$$S_{dUa} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_{dUa})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{575} (\Delta \bar{X}_{dUa})^2}{575-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{575} (-0,0099)^2 + (-0,0135)^2 + \dots + (-0,0221)^2}{575-1}} = 0,205. \quad (12)$$

Определяем среднеквадратичную ошибку среднего арифметического:

$$\delta_{dUa} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_{dUa})^2}{n(n-1)}} = \frac{S_{dUa}}{\sqrt{n}} = \frac{0,205}{\sqrt{575}} = 0,00085. \quad (13)$$

Определяем границы доверительного интервала (абсолютная ошибка для данной доверительной вероятности), принимая коэффициент Стьюдента  $t_p$  для вероятности 95 % равным 1,96 [11]:

$$\begin{aligned} \Delta X_{dUa} &= \pm t_p \cdot \delta_{dUa} = \pm 1,96 \cdot 0,00085 = \\ &= \pm 0,001672 \approx \pm 0,0017. \end{aligned} \quad (14)$$

Оцениваем относительную погрешность результата измерений:

$$\varepsilon_{dUa} = \frac{\Delta X_{dUa}}{\bar{X}_{dUa}} \cdot 100\% = \frac{0,0017}{0,059} \cdot 100\% = 2,83\%. \quad (15)$$

Записываем окончательный результат для отклонения напряжения фазы А (рис. 3):

$$\begin{aligned} dUa &= \bar{X}_{dUa} + \Delta X_{dUa} = 5,9\% \pm 0,17\% \\ &\text{при вероятности } P=0,95. \end{aligned} \quad (16)$$

Аналогичным образом проводились расчеты для остальных измерений, в результате чего получены следующие значения:

$$\begin{aligned} dUb &= \bar{X}_{dUb} + \Delta X_{dUb} = 6,34\% \pm 0,11\% \\ &\text{при вероятности } P=0,95; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} dUc &= \bar{X}_{dUc} + \Delta X_{dUc} = 6,7\% \pm 0,16\% \\ &\text{при вероятности } P=0,95. \end{aligned} \quad (18)$$

В результате обработки результатов измерений показателей качества электрической энергии, в частности значений отклонений уровней напряжений от нормативных параметров, определены с вероятностью 95 % средние значения отклонений напряжений для каждой из фаз. Результаты расчета представлены в табл. 1

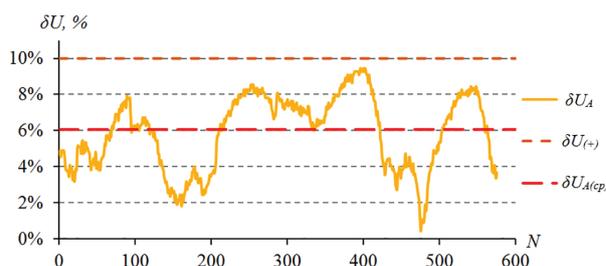


Рис. 3. Временная диаграмма уровня изменения напряжения фазы А от среднего значения (РУ 0,4 кВ ВРУ-1, УЛК – 6, ввод № 1)

Таблица 1

Общие результаты измерений показателей качества электрической энергии

№ п/п	Наименование точки измерения	Отклонение напряжения		
		Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	УЛК – 6, РУ 0,4 кВ, ВРУ-1, ввод № 1	5,9 % ± 0,17 %	6,34 % ± 0,11 %	6,7 % ± 0,16 %
2	УЛК – 6, РУ 0,4 кВ, ВРУ-1, ввод № 2	5,81 % ± 0,17 %	6,15 % ± 0,22 %	6,78 % ± 0,28 %
3	УЛК «Главный», РУ 0,4 кВ, ВРУ-1, ввод № 1	5,93 % ± 0,17 %	4,71 % ± 0,16 %	7,55 % ± 0,15 %
4	УЛК «Главный», РУ 0,4 кВ, ВРУ-1, ввод № 2	6,07 % ± 0,18 %	4,89 % ± 0,17 %	7,89 % ± 0,16 %
5	УЛК – 1, РУ 0,4 кВ, ВРУ-1, ввод № 1	5,27 % ± 0,14 %	6,13 % ± 0,12 %	6,4 % ± 0,12 %
6	УЛК – 8, РУ 0,4 кВ, ВРУ-1, ввод № 2	7,24 % ± 0,19 %	6,02 % ± 0,22 %	6,8 % ± 0,2 %
7	УЛК – 8, РУ 0,4 кВ, ВРУ-2, ввод № 1	6,55 % ± 0,18 %	4,82 % ± 0,21 %	6,13 % ± 0,18 %
8	УЛК – 8, РУ 0,4 кВ, ВРУ-2, ввод № 2	7,2 % ± 0,16 %	5,93 % ± 0,18 %	6,91 % ± 0,17 %
9	УЛК – 8, РУ 0,4 кВ, ВРУ-1, ввод № 1	6,35 % ± 0,12 %	6,78 % ± 0,11 %	5,38 % ± 0,14 %
10	УЛК – 8, РУ 0,4 кВ, ВРУ-3, ввод № 2	7,68 % ± 0,12 %	7,78 % ± 0,12 %	6,67 % ± 0,13 %
11	УЛК – 8, РУ 0,4 кВ, ВРУ-3, ввод № 1	6,21 % ± 0,12 %	6,66 % ± 0,11 %	5,49 % ± 0,15 %
		<b>6,38 % ± 0,16 %</b>	<b>6,02 % ± 0,16 %</b>	<b>6,61 % ± 0,17 %</b>

Установлено, что среднее значение отклонения уровня питающего напряжения не превышает для каждой из фаз величин 7 %, что меньше предельного максимально допустимого значения — 10 %, определенного ГОСТ 32144-2013 [4]. В то же время следует отметить, что повышенный уровень напряжения приводит к увеличенному потреблению активной и реактивной мощности и увеличенному расходу энергии без повышения производительности, а также при повышенном напряжении от номинального снижается надежность и долговечность электрооборудования, освещения и др.

#### Библиографический список

1. Дед А. В., Паршукова А. В. Результаты испытаний показателей качества напряжения электропитания в трехфазных системах электроснабжения промышленных предприятий // Технологии XXI века: проблемы и перспективы развития: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Челябинск, 2015. С. 42–45.
2. 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.
3. Долингер С. Ю., Лютаревич А. Г., Горюнов В. Н., Сафонов Д. Г., Черемисин В. Т. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 178–183.
4. 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.
5. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2015–01–01. М.: Стандартинформ, 2015. 46 с.
6. Анализатор качества электроэнергии Metrel MI 2892. URL: <http://www.electronicpribor.ru/catalog/16/mi-2892.htm> (дата обращения: 12.02.2018).
7. Романова В. В., Хромов С. В. Применение методов математической статистики для прогнозирования возникновения

несимметрии напряжений в электрических сетях // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2017. Т. 17, № 4. С. 59–71. DOI: 10.14529/power170407.

8. Антонов А. И., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А., Руппель А. А. Порядок обработки результатов экспериментальных исследований на соответствие отклонения напряжения требованиям ГОСТ 32144-2013 // Омский научный вестник. 2015. № 2 (140). С. 163–166.

9. Пшеничникова В. В. Мультимедийный учебно-методический комплекс по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация» // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». 2017. № 3 (94). С. 38.

10. Кузнецов В. А., Ялунина Г. В. Основы метрологии. М.: Изд-во стандартов. 1995. 279 с.

11. Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. Л.: Лениздат, 1987. 295 с.

**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.

**ДАНИЮКОВ Илья Борисович**, магистрант гр. ЭЭМ-162 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: ded\_av@mail.ru

#### Для цитирования

Дед А. В., Сикорский С. П., Даниюков И. Б. Обработка данных экспериментальных измерений показателей качества электрической энергии на примере уровней отклонений напряжений // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 55–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-55-59.

Статья поступила в редакцию 14.02.2017 г.

© А. В. Дед, С. П. Сикорский, И. Б. Даниюков