



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

О.С. Рахимов¹, Д.Н. Мирзоев¹, Е.И. Грачева²

¹Политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими в город Худжанд, Республика Таджикистан

²Казанский государственный энергетический университет, Россия, г.Казань
E-mail: mdabir@mail.ru

Резюме. **ЦЕЛЬ.** За последние 3-4 года, в результате увеличения количества сельских хозяйств в Деваитичском районе Согдийской области Таджикистана, наблюдается непропорциональное распределение электроэнергии в сети 0,4 кВ (однофазное и трехфазное). Несимметрия токов фазных нагрузок по отношению к несимметричным фазным напряжениям на клеммах потребителей трехфазной сети вызывает дополнительные потери электроэнергии, которые составляют до 21% от нормативных потерь. В указе Президента Республики Таджикистан от 10 мая 2009 г. № 29 «Об энергосбережении и снижении потерь электроэнергии» указано, что существует необходимость исследования качества электроэнергии в сельских сетях 0,4 кВ и ее соответствия ГОСТ 32144. 2013 г., а также оценка потерь электроэнергии в распределительной структуре электрических сетей является важной задачей в области сельской электроэнергетики. **МЕТОДЫ.** Первичными материалами являлись: однолинейная схема сети 0,4 кВ с исходными параметрами, которые уточнялись в ходе обследования сети; токовые нагрузки отходящих линий. Экспериментальные исследования качества электроэнергии и оценка уровня потерь в низковольтной сети проводились с помощью комплексного измерительного прибора «Энерготестер» ПКЭ – А - С4. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Исследования позволили получить данные о суточных потреблениях электроэнергии в отдельных отходящих линиях, сведения о характеристиках потребителей, цифровая информация (база данных) о показателях качества электроэнергии в низковольтных сетях. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Установлено, что основными факторами влияющими, на уровень потерь электроэнергии в низковольтных сетях, являются: несоизмеримость мощности трансформаторов ТП и потребителей, неравномерность загрузки отдельных фаз, существенное влияния отдельных преобразовательных установок на качество ЭЭ. Прогнозируются меры по снижению потерь и повышению качества электроэнергии в низковольтных сельских сетях 0,4 кВ.

Ключевые слова: низковольтные сельские сети; потери; показатели качества электроэнергии; энергомониторинг.

Для цитирования: Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н., Грачева Е.И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 209-222. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222.

EXPERIMENTAL STUDY OF QUALITY AND ELECTRICITY LOSSES IN LOW VOLTAGE RURAL ELECTRIC NETWORKS

OS. Rakhimov¹, DN. Mirzoev¹, EI Grachieva²

¹Polytechnic Institute of Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Khujand city, Republic of Tajikistan

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

E-mail: mdabir@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Due to the increase in the number of farms in the Devashtichsky district of the Sughd region of Tajikistan, over the past 3-4 years, a disproportionate distribution of electricity in the 0.4 kV network has been observed. Unbalance currents of phase loads in relation to asymmetric phase voltages at the terminals of consumers of a three-phase network cause additional losses of electricity, which can reach 21% of the standard losses. In the decree of the President of the Republic of Tajikistan dated May 10, 2009 No. 29 "On energy saving and reduction of electricity losses" it is indicated that there is a need to study the quality of electricity in rural 0.4 kV networks and its compliance with GOST 32144. 2013, as well as an assessment of losses electricity in its distribution structure is an important task in the field of rural electricity. *METHODS.* A single-line diagram of a 0.4 kV network with initial parameters, which were refined during the survey of the network, and the current loads of outgoing lines were investigated. Experimental studies of the quality of electricity and assessment of the level of losses in the low-voltage network were carried out using a complex measuring device «Energotester» PKE - A - C4. *RESULTS.* The studies allowed obtaining data on the daily consumption of electricity in individual outgoing lines, information on the characteristics of consumers, digital information (database) on indicators of the quality of electricity in low-voltage networks. *CONCLUSIONS.* It has been established that the main factors influencing the losses of electricity in low-voltage networks are: incommensurability of the power of transformers of transformers and consumers, uneven loading of individual phases, a significant effect of individual converters on the quality of energy. Measures are forecasted to reduce losses and improve the quality of electricity in low-voltage rural networks of 0.4 kV.

Key words: low-voltage rural networks; losses; power quality indicators; energy monitoring.

For citation: Rakhimov OS, Mirzoev DN, Grachieva EI. Experimental study of quality and electricity losses in low voltage rural electric networks. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):209-222. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222.

Введение

Согласно ГОСТ 32144-2013 качество электроэнергии определяется следующими параметрами: отклонением напряжения, колебаниями напряжения, несинусоидальностью тока и напряжения, несимметрией токов и напряжений, перенапряжением, импульсным напряжением, отклонением частоты и др. [1].

Разность между рабочим и номинальным напряжениями называется отклонением напряжения (ОН) и определяется выражением [2, 3].

$$\begin{aligned}\Delta U &= U - U_{\text{НОМ}}; \\ \Delta U \% &= \frac{U - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}}. \end{aligned} \quad (1)$$

где $U_{\text{НОМ}}$ - номинальное напряжение, кВ; U - рабочее напряжение, кВ.

В трехфазных сетях в качестве рабочего напряжения принимается линейное напряжение. Согласно стандарту нормально допустимое значение ОН на выводах потребителей электроэнергии составляет $\pm 5\%$, а предельно допустимое значение $\pm 10\%$ от номинального напряжения электрической сети. Поэтому к понятию «отклонение напряжения» относятся изменения напряжения длительностью не менее 1 минуты [3, 4].

Колебания напряжения (КН) характеризуются размахом изменения напряжения δU_t и дозой фликера P_f . Источник колебаний напряжения в системах электроснабжения является мощным потребителем и зависит от изменения потребляемой активной и реактивной мощности. Величина изменения напряжения определяется разностью между значениями, следующих друг за другом, экстремумов горизонтального участка огибающей среднеквадратичных значений напряжения основной частоты, определяемых на каждом периоде.

Размах изменения напряжения δU_t в процентах вычисляется по следующему выражению [5, 6, 7]:

$$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{ном}} 100, \quad (2)$$

где U_i, U_{i+1} – значения следующих друг за другом экстремумов или экстремума на горизонтальном участке огибающей среднеквадратичных значений напряжения основной частоты.

Согласно ГОСТ 13109-97 и ГОСТ 32144-2013 продолжительность колебания напряжения электропитания менее 1 мин, в том числе быстрые изменения напряжения, является «дозой фликера». «Фликером» (термин «мерцание» ламп – перевод английского слова «flicker») называют субъективное восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения, а его дозой – мера восприимчивости человека к воздействию фликера за установленный промежуток времени. При этом под «временем восприятия фликера» понимается минимальное время для субъективного восприятия человеком фликера, вызванного колебаниями напряжения определенной формы. Величину дозы фликера измеряют с помощью фликерметра – устройства, воспроизводящего математическую модель канала влияния этого процесса на зрение. [8, 9].

Из-за колебаний напряжения возникает кратковременная доза фликера P_{st} , которая измеряется с интервалом времени 10 минут, и длительная доза фликера P_{lt} , с интервалами 2 часа в заданной точке в линия электропередачи. В течение 100% интервала времени, в неделю кратковременная доза фликера не должна превышать 1,38 и длительная доза фликера не должна превышать 1,0 [10,11].

Кратковременная доза фликера в интервале 10 мин определяется следующим выражением [2]:

$$P_{st} = \sqrt{k_1 P_{0,1} + k_2 P_1 + k_3 P_3 + k_4 P_{10} + k_5 P_{50}}, \quad (3)$$

где $K_1 = 0,0314$ – для 0,1% уровня; $K_2 = 0,0525$ – для 1,0% уровня; $K_3 = 0,0657$ – для 3% уровня; $K_4 = 0,28$ – для 10% уровня; $K_5 = 0,08$ – для 50% уровня.

Если общие КН обусловлены рядом резкопеременных нагрузок, характеризующихся случайным характером работы (сварка, электродвигатели и др.), длительную дозу фликера P_{lt} за рассматриваемый промежуток времени находят, исходя из совокупности 10-минутных значений [10]:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N P_{st}^3}, \quad (4)$$

Для сетей низкого напряжения, соответственно $P_{st} \leq 1$; $P_{lt} \leq 0,8$; $\delta U_t \leq 8\%$. Эти нормы определяют уровень электромагнитной совместимости.

Отклонение частоты (ОЧ) определяется как разность значения основной частоты напряжения источника питания от номинального значения:

$$\Delta f = f - f_{ном}, \quad (5)$$

где f – фактическое значение частоты, Гц, измеренное в интервале времени 10 с в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30; $f_{ном}$ – номинальная частота, Гц.

Номинальное значение частоты в электрической сети равно 50 Гц. Отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100% времени интервала за одну неделю [12,13].

Несинусоидальность напряжения (НН) характеризуется степенью искажения синусоидальности формы кривой напряжения. НН характеризуется величиной

коэффициента искажения кривой напряжения $k_{не}$ %, которая определяется отношением напряжению основной частоты U_1 или номинальным напряжением к действующему значению высшей гармоники напряжения U_v :

$$k_{не} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (6)$$

где U_v – действующее значение напряжения v - й гармоники, В; n – количество учитываемых гармоник.

Допустимое значение коэффициента не синусоидальности $k_{не}$ для напряжения 0,38 кВ равно 8,0 % и предельно допустимое значение $k_{не} = 12,0$ %. Согласно ГОСТ 13109-97 значения коэффициента v - й гармонической составляющей напряжения определяется по следующие формуле:

$$K_{U(v)} = \frac{U_v}{U_1} \cdot 100, \quad (7)$$

Не симметрия напряжения стабилизируется по параметрам основной частоты. Если амплитуды фазных напряжений и их сдвиг равны, то напряжение симметрично. Если в одном параметров есть нарушение, это означает что напряжение несимметрично. Для оценки несимметрия напряжения используется метод симметричных составляющих, а система синусоидального напряжения делится на три симметричных составляющих: прямую последовательность, обратной и нулевую последовательность. В соответствии с этой методикой также установлены показатели качества электроэнергии для оценки несимметрии напряжения [14, 15, 16]:

- коэффициент несимметрии напряжения обратной последовательности в сети 0,38 кВ определяется следующим выражением

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\% = \frac{U_{2(1)}}{U_{ном}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

- коэффициент несимметричного напряжения нулевой последовательности для четырехпроводной сети 0,38 кВ определяется по формуле

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\% = \frac{U_{0(1)}}{U_{ном.ф}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где $U_{2(1)}$ и $U_{0(1)}$ – напряжения нулевой и обратной последовательности; $U_{1(1)}$ – междуфазное напряжение прямой последовательности.

Напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned} U_{1(1)} &= \frac{1}{3}(U_A + aU_B + a^2U_C); \\ U_{2(1)} &= \frac{1}{3}(U_A + a^2U_B + aU_C); \\ U_{0(1)} &= \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C). \end{aligned} \quad (10)$$

где U_A, U_B, U_C – напряжение фазы сети; $a = e^{j2\pi/3}$ – трехфазные системные операторы.

Провалы напряжения характеризуют внезапное снижение напряжения более чем на 10% от номинального напряжения $U_{ном}$ в заданных точках электрических сетей. Основная причина провалы напряжения - это попадание молнии в линии или шины открытых распределительных устройств. В этом случае происходит процесс короткого замыкания, когда срабатывают защитные устройства оборудования и системы автоматики (АПВ, АВР).

Провал напряжения характеризуется глубиной (минимальное значение напряжения) δU_n и длительностью времени провала Δt_n . Глубина провала напряжения рассчитывается по следующей формуле:

$$\delta U_n = \frac{U_{ном} - U_{мин}}{U_{ном}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение трехфазной сети, В; $U_{мин}$ – остаточное или минимальное напряжение в контрольной точке электрической сети, В.

Длительность времени провала рассчитывается как разность между временем восстановления напряжения $t_{\text{в}}$ и временем начала провала напряжения $t_{\text{н}}$:

$$\Delta t_{\text{п}} = t_{\text{в}} - t_{\text{н}}, \quad (12)$$

Длительность времени провала напряжения не может превышать 1 минуты.

Временное перенапряжение – повышение напряжения в точке сети выше $1,1U_{\text{ном}}$ продолжительностью более 10 мс, возникающее в системах электроснабжения при коммутациях или коротких замыканиях.

Несоответствие напряжения качества электроэнергии требованиям ГОСТ приводит к дополнительным потерям активной мощности в электрической сети.

В случае несинусоидального напряжения дополнительные потери в трансформаторе от высших гармоник тока определяются по следующей формуле [15].

$$\Delta P_{\Sigma \text{в.г.тр.}} = 3 \sum_2^n I_{(n)}^2 r_1 k_{r(n)}, \quad (13)$$

где $I_{(n)}$ – электрический ток n-й гармоники; r_1 – активное сопротивление на основной частоте;

$k_{r(n)}$ – коэффициент изменения активного сопротивления токоведущих частей в n-й гармоники. В расчетах принимают значение $k_{r(5)} = 2,1$; $k_{r(7)} = 2,5$; $k_{r(11)} = 3,2$; $k_{r(37)} = 6,08$; $k_{r(39)} = 6,24$.

Дополнительные потери от высших гармоник тока в линии электропередачи определяются согласно [2]. При этом коэффициент изменения активного сопротивления токоведущих частей на частоте n-й гармоники $k_{r(n)} = \sqrt{n}$.

В сетях 0,4 кВ с нулевой проводом необходимо исследование дополнительных потерь от несимметрии токов нулевой последовательности. В соответствии с [16] формула для расчета потерь мощности в радиальных сетях с учетом несимметричных нагрузок фаз имеет вид:

$$\Delta P_{\text{ЛЭП}} = k_{\text{ui}} I_{\Sigma i}^2 r_{\Sigma i} k_{\text{дi}}, \quad (14)$$

где k_{ui} – коэффициент количества фаз участка сети; $r_{\Sigma i}$ – активное сопротивление участка сети; $k_{\text{дi}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительные потери от неравномерной загрузки фаз:

$$k_{\text{д}} = N_{\text{кв}}^2 \left(1 + 1,5 \frac{r_{\text{ог}}}{r_{\text{фг}}} \right) - 1,5 \frac{r_{\text{ог}}}{r_{\text{фг}}},$$

где $r_{\text{ог}}$, $r_{\text{ф}}$ – сопротивления нулевого и фазного проводов;

$$N_{\text{кв}}^2 = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2},$$

коэффициент неравномерности распределения фазных токов;

I_A, I_B, I_C – измеряемые токи отдельных фаз сети.

Согласно выражениям [13] и [14] суточные потери активной электроэнергии в сети равны:

$$\Delta W = (\Delta P_{\Sigma \text{в.г.тр.}} + \Delta P_{\text{ЛЭП}}) \cdot 24, \quad (15)$$

$$\Delta W \% = \frac{\Delta W}{W} \cdot 100\%, \quad (16)$$

где W – суточное потребление активной электроэнергии, кВт·ч; $\Delta W\%$ – суточные потери активной электроэнергии, %.

Материалы и методы

Для оценки влияния показателей качества электроэнергии на потери электроэнергии в низковольтных сетях экспериментальные исследования проводились в характерной низковольтной сети села Угук Деваштичского района Согдийской области Республики Таджикистан. Исследования проводились с использованием комплексного цифрового электронного измерительного прибора «Энерготестер ПКЭ-А-С4».

Измерительный прибор «Энерготестер ПКЭ-А-С4» производства «Марс-Энерго» позволяет, производить измерения и регистрацию основных показателей качества

электроэнергии согласно ГОСТ 32144-2013, а также других электрических параметров отдельных фаз таких, как ток, напряжение, мощность и электроэнергия в трехфазной четырехпроводной сети. Данное измерительное устройство может быть использовано для проведения энергомониторинга и энергоаудита в электрических сетях. Порядок ввода в эксплуатацию и настройки программного комплекса Энерготестер ПКЭ-А-С4 для обработки результатов исследований приведены в руководстве .

Внешний вид переносного электронного измерительного прибора «Энерготестер ПКЭ-А-С4» показан на рисунке 1.

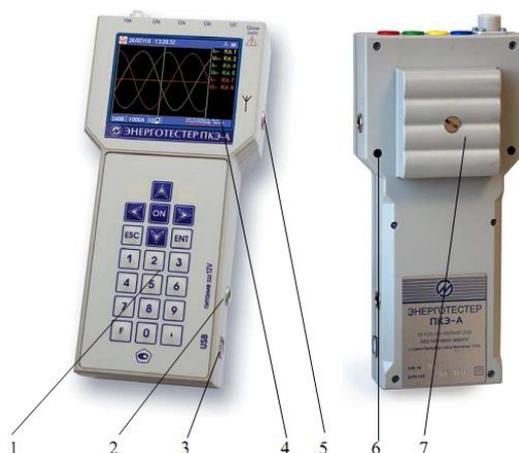


Рис. 1. Внешний вид электронного измерительного прибора «Энерготестер ПКЭ-А-С4»:
1 - клавиатура; 2 - место подключения источника; 3 - USB для подключения к компьютеру; 4 - графическое окно; 5 - место установки антенны GPS; 6 - пломбированное место; 7 - место батарейки

Fig. 1. Appearance of the electronic measuring device "Energotester PKE-A-C4":
1-keyboard; 2 - place of connection of the source; 3-USB for connection to the computer; 4-graphic window; 5 - place of installation of the GPS antenna; 6-sealed place; 7 - place of the battery.

Измерения и регистрация электрических параметров низковольтной сети 0,4 кВ выполнялись на участках, где в основном установлены однострансформаторные подстанции с трансформаторами мощностью 160 кВА. Так например, от ТП 6785 с трансформатором 160 кВА питаются 183 дворовых хозяйств. В селе Угук всего имеется 420 дворовых хозяйств и других потребителей электроэнергии.

После проведения экспериментальных исследований обобщение и компьютерная обработка результатов производились с помощью прикладной программы *EmWorkNet_setup* и базы данных *PostgreSQL*.

Результаты

Обработка суточного мониторинга фазных и линейных напряжений сети 0,4 кВ показывают, что в отдельные часы суточные отклонения напряжения превышают максимально допустимое ГОСТом 32144-2013 значение $\pm 10\%$ и составляют (15 – 17)% (см. рис. 2 а и б)

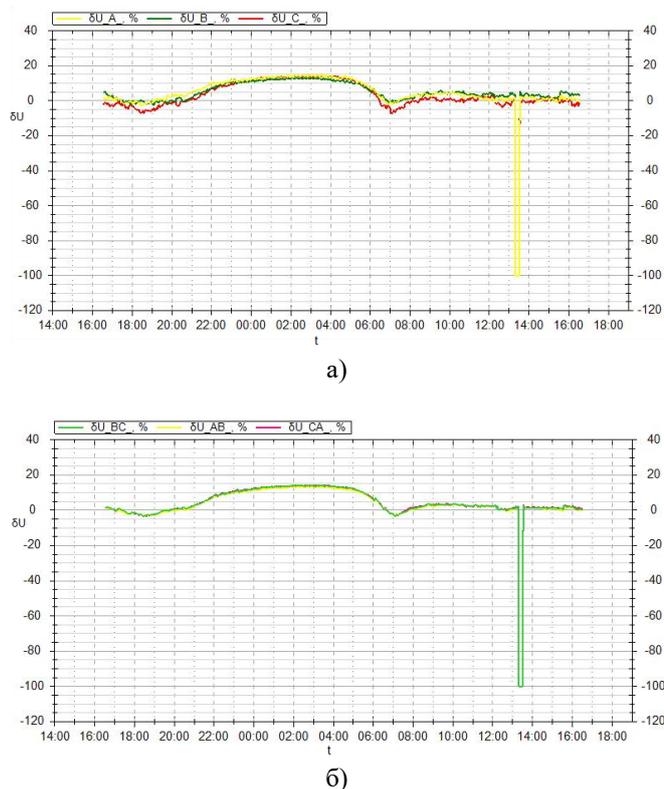


Рис. 2. Суточное отклонение фазного (а) и линейного (б) напряжения сети 0,4 кВ

Fig. 2. Daily deviation of the phase (a) and linear (b) mains voltage of 0.4 kV

Обобщенный график зависимости отклонений фазных напряжений сети (рис. 3) показывает, что в ночные часы напряжение отдельных фаз превышает номинальное значение на 5 – 7 %. В утренние и вечерние часы фазное напряжение отдельных фаз ниже номинального значения и несимметрично, что обусловлено неравномерностью загрузки отдельных фаз однофазными потребителями электроэнергии.

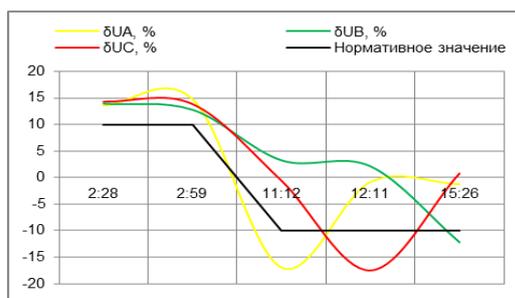


Рис.3. Отклонение фазного напряжения низковольтной сельской сети, превышающее норму

Fig. 3. Deviation of the phase voltage of the low-voltage rural network, exceeding the norm

Основными потребителями электроэнергии в селе Угук являются дворовые хозяйства (около 80 %), где в качестве электрических нагрузок установлены квартирное освещение и маломощные электробытовые приборы.

Результат суточного отклонения частоты (ОЧ) в сельской сети низкого напряжения приведен на рисунке 4.

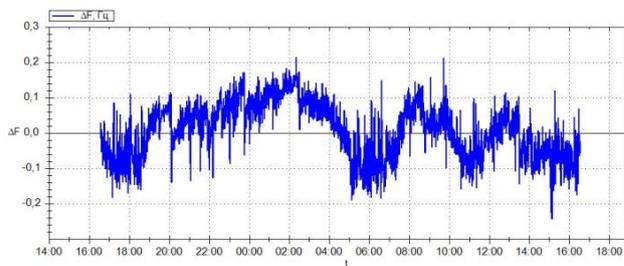


Рис. 4. Суточное отклонение частоты в сельской сети

Fig. 4. Daily frequency deviation in the rural network

Обобщенный график зависимости отклонения частоты в сельской сети приведен на рис. 5.

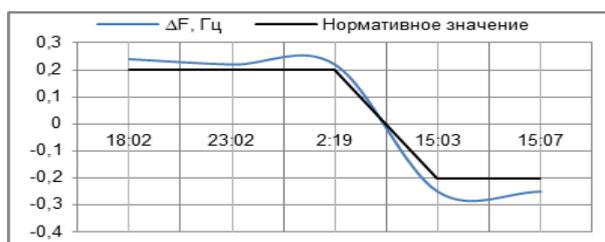


Рис. 5. Отклонение частоты сельской сети

Fig. 5. Rural network frequency deviation

Как показывает рисунок 5, наблюдается незначительное отклонение частоты от максимально допустимого ГОСТом значения $\pm 0,2$ Гц.

Анализ несинусоидальности формы кривой напряжения и тока в сети, показывает, что в сети преобладают нечетные гармоники (см. рис. 6).

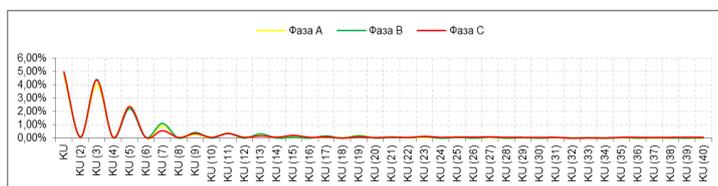


Рис. 6. Гармонический спектр частоты напряжения сельской сети

Fig. 6. Harmonic spectrum of the rural network voltage frequency

Результаты определения коэффициентов несимметрии фазных и линейных напряжений, оцениваемые симметричными составляющими нулевой и обратной последовательности, приведены на рисунке 7.

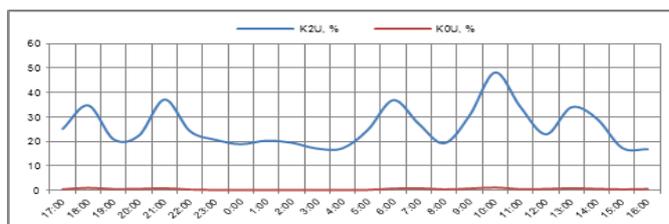


Рис. 7. Суточное изменение коэффициента несимметрии напряжения низковольтной сельской сети по симметричным составляющим нулевой и обратной последовательности

Fig. 7. Daily variation of the low-voltage rural network voltage asymmetry coefficient by the symmetric components of the zero and reverse sequence

Анализ коэффициентов несимметрии фазных напряжений и токов (см.рис. 8) показывает, что несимметрия напряжений и токов отдельных фаз имеют место в вечерние и дневные часы суток. Основной причиной возникновения несимметрии напряжений и токов фаз является неравномерность распределения нагрузок отдельных фаз. Как известно, несимметрия напряжений и токов приводит к дополнительным потерям мощности в отдельных элементах низковольтной сети [16].

Длительная доза фликера для низковольтных сетей не превышала 1, а кратковременная доза фликера - 1,38.

Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты измерений доз фликера приведены на рисунке 9. Как показывают результаты исследований, доза фликера превышает допустимые ГОСТом значения.

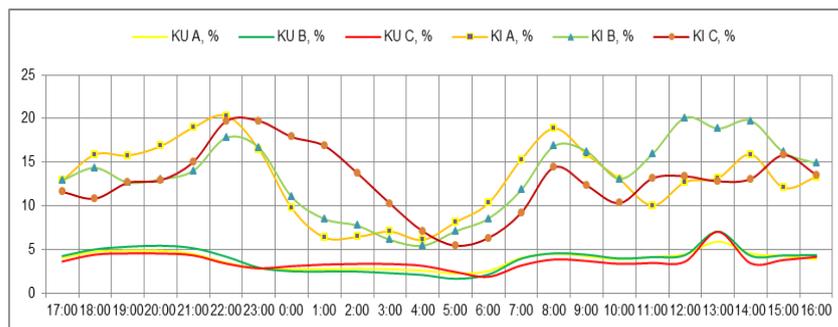


Рис. 8. Суточный график зависимости коэффициентов несимметрии токов и напряжений отдельных фаз низковольтной сети

Fig. 8. Daily graph of the dependence of the current and voltage asymmetry coefficients of individual phases of the low-voltage network

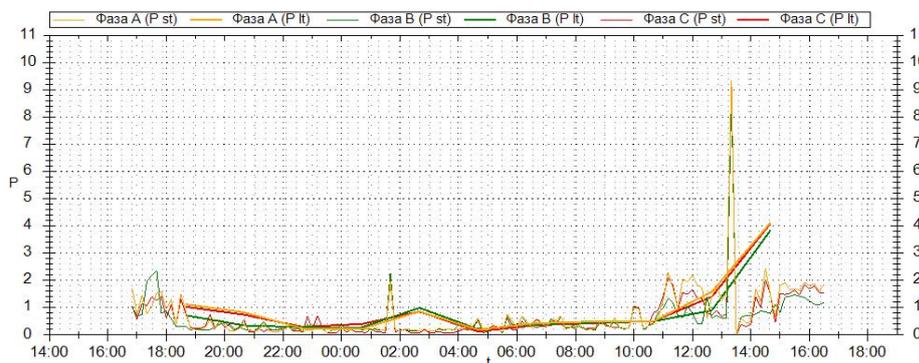


Рис. 9. Суточный график зависимости длительной P_{lt} и кратковременной P_{st} дозы фликера

Fig. 9. Daily graph of the dependence of the long-term P_{lt} and short-term P_{st} dose of the flicker

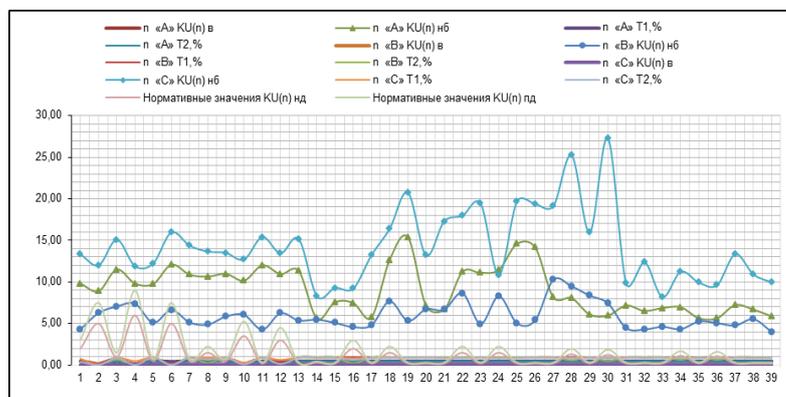


Рис. 10. Результаты измерения электрической энергии по коэффициенту n-й гармонической

Fig. 10. Results of measuring electrical energy by the coefficient of the nth harmonic component of phase

составляющей фазных напряжений

voltages

Это положение свидетельствует о соизмеримости мощности отдельных потребителей электроэнергии с мощностью трансформатора ТП, а следовательно, влияния пусковых характеристик отдельных потребителей на показатели качества электроэнергии, и как следствие, снижения уровня электромагнитной совместимости. Несоответствие доз фликера требованиям стандарта также приводит к миганию яркости осветительных приборов [7].

Высшие гармонические составляющие токов и напряжений характеризуются коэффициентами гармоник. На рисунке 10 приведены коэффициенты высших гармонических составляющих напряжений отдельных фаз до 39-й гармоники на шинах 0,4 кВ трансформаторов Т1 и Т2 ТП. Как видно из рисунка, коэффициенты 19, 28 и 30-ой гармоник в фазе С имеет максимальное значение и превышают нормативные значения.

Результаты определения коэффициентов фазового сдвига приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерения коэффициентов фазового сдвига кривой напряжения

Измеряемая характеристика	Фаза «А»			Фаза «В»			Фаза «С»			Нормативное значение
	Результат измерений	T ₁ , %	T ₂ , %	Результат измерений	T ₁ , %	T ₂ , %	Результат измерений	T ₁ , %	T ₂ , %	
K _{УВ}	0	0,49		0	0,99		0	0,91		8
K _{Унб}	34,69		0,49	23,32		0,99	40,65		0,91	12
	Междуфазное АВ			Междуфазное ВС			Междуфазное СА			
K _{УВ}	0	0		0	0		0	0		8
K _{Унб}	4,14		0	6,34		0	4,39		0	12

Результаты таблицы 1 показывают, что коэффициент сдвига синусоидальности кривой небаланса напряжения фаз (K_{Унб} > 12) больше, чем нормативное значение, что указывает на несимметрию фаз. Коэффициенты сдвига синусоидальности кривой междуфазного напряжения меньше (K_{Унб} < 12), чем значение стандарта, соответствующего ГОСТ.

Результаты оценки провалов и перенапряжений в сельских сетях низкого напряжения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерения провалов и перенапряжений

Провал			
Напряжение	U _А	U _В	U _С
Количество	1	1	1
Суммарная продолжительность, с	00:14:09.016	00:14:09.037	00:14:09.071
Максимальная глубина, %	99,98	99,98	99,98
Перенапряжения			
Напряжение	U _А	U _В	U _С
Количество	13	15	6
Суммарная продолжительность, с	07:32:05.694	06:35:14.715	06:20:22.351
Максимальное перенапряжение	1,15	1,14	1,15

Данные таблицы 1 показывают, что провал напряжения в сети наблюдаются с 13:17 до 13:31, что подтверждается данными рисунка 7. В моменты времени 06:20, 06:35 и 07:32 в фазах сельской сети напряжение превышало норму, что негативно воздействует на работу электрооборудования.

Для определения потерь мощности в трансформаторах использовались исходные данные, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Параметры линии электропередачи и трансформатора				
ТП, кВА	r_{mp} , Ом	I_A , А	I_B , А	I_C , А
ТМ-160	4,35	31	42	43
ВЛЭП - 0,38 кВ				
$S_{ЛЭП}$, мм ²	L , км	r_{ϕ} , Ом	$N_{кв}^2$	k_d
25	1	1,14	1,02	1,1

По результатам экспериментального исследования с помощью Энерготестер ПКЭ-А суточная потребляемая электроэнергия мощность в селе Угук составила $W = 7681$ кВтч.

Потери активной мощности в трансформаторе показаны на рисунке 11.



Рис.11. Дополнительные потери активной мощности за счет высших гармоник в трансформаторе

Fig. 11. Additional active power losses due to higher harmonics in the transformer

Потери мощности от высших гармоник определяются согласно выражению 13. Как показывает рисунок 11, потери мощности от 37 и 39-ой гармоник имеют относительно большую величину и суммарные потери активной мощности от них составляют $\Delta P_{6,2} = 58,28$ кВт, с учетом токов отдельных гармоник $I_{(37)} = 18$ А, $I_{(39)} = 20$ А.

Потери мощности на ЛЭП – 0,38 кВ определяем по данным таблицы 3, с учетом выражения 14.

$$\Delta P_{ЛЭП} = 3 \cdot 38,56^2 \cdot 1,14 \cdot 1,1 = 5,59 \text{ кВт}$$

где ток в 3-х фазной сети принимается равным среднему значению фазных токов равно $I_{\phi} = 38,56$ А.

По потерям мощности в трансформаторе и ЛЭП определяем суточные суммарные потери активной электроэнергии в соответствии с формулами 14 и 15.

$$\Delta W = (58,28 + 5,59) \cdot 24 = 1532,88 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W \% = \frac{1532,88}{7681} \cdot 100\% = 19,96\%$$

Потери активной электроэнергии в сельской сети 0,38 кВ составляют 19,96%, из них 5,96 % нагрузочные и 14 % дополнительные потери за счет низкого качества электроэнергии в сети.

Обсуждение

В результате экспериментальных исследований установлено, что отклонение напряжения превышает нормы, установленные ГОСТ 32144-2013. Рисунок 2 (а, б) показывает, что отклонение фазного и линейного напряжения увеличилось с +10% до +15% с 23:00 до 05:00, а с 13:17 до 13:31 наблюдался провал напряжения. В период от 06:20 до 07:32 возникали перенапряжения 13 раз (см. таблицу 2). Нестандартные показатели отклонения напряжения отрицательно влияют на работу оборудования используемого в сельском хозяйстве. Например, при снижении напряжения на зажимах двигателя потребляемая мощность и ток увеличиваются и происходит нагрев обмоток двигателя. В результате срок службы двигателя сокращается. Повышение напряжения на зажимах двигателя приводит к увеличению расхода реактивной мощности. Также расход реактивной

мощности увеличивается с уменьшением коэффициента загрузки двигателя. В среднем на каждый процент увеличения напряжения потребление реактивной мощности увеличивается на 3% (в основном за счет увеличения холостого хода тока двигателя), что приводит к увеличению потерь активной мощности в электрических сетях 0,4 кВ. Отклонение напряжения также влияет на процесс световой поток ламп накаливания и люминесцентных ламп, а также отрицательно влияет на качестве работы и срок службы бытовой техники (телевизор, холодильник, компьютер и др.).

На рисунке 5 показано, что отклонение частоты в интервале 18:00 до 02:19 составляет более +2 Гц, а с 15:00 до 15:07 от -2 Гц до -3 Гц. Изменение частоты с 49,9 до 49,5 Гц приводит к увеличению сигнала телевизионной техники почти в четыре раза выше нормы и отрицательно влияет на срок службы оборудования.

Заключение

В результате экспериментальных исследований установлено, что при несоответствии показателей качества электроэнергии нормам ГОСТ в сельских электрических сетях 0,4 кВ возникают дополнительные потери. Потери напряжения и электроэнергии возникают из-за неравномерного распределения фазных нагрузок и появления высших гармоник фазных напряжений. Также было обнаружено, что потери активной мощности от высших гармоник составили 19,96%.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что:

- основными факторами влияющими, на возрастание потерь электроэнергии в низковольтных сетях, являются: несоизмеримость мощности трансформаторов ТП и потребителей, а также неравномерность загрузки отдельных фаз;
- имеет место существенное влияние отдельных преобразовательных установок на качество ЭЭ в сети и требуется установки фильтров высших гармоник;
- для обеспечения равномерности фазных напряжений на зажимах потребителей на отходящих фидерах ТП, необходимо установить автоматический выравнитель загрузки фаз, основанный на принципе мониторинга показателей качества электроэнергии в низковольтной сельской сети 0,4 кВ.

Литература

1. Виноградов А. и др. Повышение качества электроэнергии сельских потребителей за счет корректировки стоимости электроэнергии // Возобновляемые источники энергии и проблемы электроснабжения для сельских регионов. IGI Global. 2019. С. 312-341.
2. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
3. Карчин В.В., Сидорова В.Т., Леухин А.Н. Улучшение показателей качества электроэнергии в сельских распределительных сетях 0,4 кВ с помощью компенсации реактивной мощности. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015. № (1-2). С. 61-67.
4. Лукина Г.В., Бондаренко С.И., Самаркина Е.В. Экспериментальное исследование показателей качества электрической энергии на физической модели сети 0.38 кВ с симметрирующим устройством // «Вестник ИрГСХА». 2016. №72. С. 138-146.
5. Мирзоев Д.Н. Методы снижения потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях // Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения. 2019. С. 22-28.
6. Наумов И.В., Лукина Г.В., Сукьясов С.В., и др. Методика расчета показателей несимметрии токов и напряжений в сети 0.38 кВ с симметрирующим устройством // Вестник АлтГАУ им И.И. Ползунова. 2001. № 2. С. 49-56.
7. Немцев Г.А. Управление качеством электроэнергии в системах электроснабжения. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. 372 с.
8. Рахимов О.С., Мирзоев Д. Н. Определение потерь электроэнергии моделированием низковольтных сельских электрических сетей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. №. 4.

9. Савина Н.В., Бодруг Н.С. Проблемы нормирования качества электроэнергии при переходе на интеллектуальные электроэнергетические системы. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016. № 5-6. С.19-26.

10. Тульский В.Н., Иноятов Б.Д., Джураев Ш.Д. Мониторинг качества электроэнергии как инструмент диагностики состояния нейтрали низковольтных кабелей // Энергетик. 2019. №. 6. С. 30-33.

11. Фетисов Л.В., Роженцова Н.В., Булатов О.А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. №20(11-12). С. 99-106.

12. Martinenas S., Knezović K., Marinelli M. Management of power quality issues in low voltage networks using electric vehicles: Experimental validation // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. V. 32. №. 2. p. 971-979.

13. Tulsy V. N. et al. Study and analysis of power quality of electric power system. Case study: Republic of Tajikistan // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2018. p. 827-833.

14. Khosiljonovich K. I. Electric power quality analysis 6-10/0.4 kV distribution networks // Energy and Power Engineering. 2016. V. 8. №. 6. p. 263-269.

15. Albu M. M., Sănduleac M., Stănescu C. Syncretic use of smart meters for power quality monitoring in emerging networks // IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. V. 8. №. 1. p. 485-492.

16. Ch Y., Goswami S. K., Chatterjee D. Effect of network reconfiguration on power quality of distribution system // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2016. V. 83. P. 87-95.

Авторы публикации

Рахимов Охунбобо Сайфиiddинович – канд. техн. наук, и.о. профессора кафедры электроснабжения и автоматика Худжандский политехнический институт Таджикского технического университета имени акад. М.С. Осими.

Мирзоев Дабир Назирович – докторант кафедры электроснабжения и автоматика, Политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими в город Худжанде.

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Vinogradov A. et al. Improving the power quality of rural consumers by means of electricity cost adjustment. *Renewable Energy and Power Supply Challenges for Rural Regions*. IGI Global, 2019. P. 312-341.

2. Zhezhelenko IV, Sayenko YUL. *Pokazатели kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh*. 3-ye izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 2000. 252 P.

3. Karchin VV, Sidorova VT, Leukhin AN. The improvement of quality indicators electricity in the rural distribution networks of 0,4 kv by reactive power compensation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(1-2):61-67.

4. Lukina GV, Bondarenko SI, Samarkina EV. Experimental study of the quality indicators of electrical energy on a physical model of a 0.38 kV network with a balancing device. *Vestnik IrGSKhA*. 2016;72:138.

5. Mirzoyev DN. Metody snizheniya poter' elektroenergii v nizkovol'tnykh sel'skikh elektricheskikh setyakh. *Sovremennyye problemy elektroenergetiki i puti ikh resheniya*. 2019. P. 22-28.

6. Naumov IV, Lukina GV, Sukyisov SV, et al. The methodology of calculating indicators of the asymmetry of the currents and voltages in the network of 0.38 kV with balanced-to-unbalanced device. *The Reporter of ASAU of I.I. Polzunova*. 2001;2:49-56.

7. Nemtsev G.A. Upravleniye kachestvom elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya. Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2013. 372 P.

8. Rakhimov OS, Mirzoyev DN. Opredeleniye poter' elektroenergii modelirovaniyem nizkovol'tnykh sel'skikh elektricheskikh setey. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020. №. 4.

9. Savina NV, Bodrug NS. The problem of normalizing electrical energy quality while transferring to intellectual electrical energy systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;(5-6):19-26.

10. Tul'skiy VN, Inoyatov BD, Dzhurayev SH. D. Monitoring kachestva elektroenergii kak instrument diagnostiki sostoyaniya neytrali nizkovol'tnykh kabeley. *Energetik*. 2019;6:30-33.

11. Fetisov LV, Rozhencova NV, Bulatov OA. Improving the quality of electric power in low voltage networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(11-12):99-106.

12. Martinenas S, Knezović K, Marinelli M. *Management of power quality issues in low voltage networks using electric vehicles: Experimental validation*. IEEE Transactions on Power Delivery. 2016;32(2):971-979.

13. Tulskey VN. et al. *Study and analysis of power quality of electric power system. Case study: Republic of Tajikistan*. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2018. P. 827-833.

14. Khosiljonovich KI. Electric power quality analysis 6-10/0.4 kV distribution networks. *Energy and Power Engineering*. 2016;8:6:263-269.

15. Albu MM, Sănduleac M, Stănescu C. *Syncretic use of smart meters for power quality monitoring in emerging networks*. IEEE Transactions on Smart Grid. 2016;8(1):485-492.

16. Ch Y, Goswami SK, Chatterjee D. Effect of network reconfiguration on power quality of distribution system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2016;83:87-95.

Authors of the publication

Okhunbobo S. Rakhimov – Polytechnic Institute of Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi.

Dabir N. Mirzoev – Polytechnic Institute of Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi to the city of Khujand.

Elena I. Grachieva – Kazan State Power Engineering University.

Получено 01.06.2021 г.

Отредактировано 14.06.2021 г.

Принято 22.06.2021 г.