Вестник аграрной науки Дона. 2023. Т. 16. № 2 (62). С. 66–76.
Don agrarian science bulletin. 2023. 16-2(62): 66–76.

Научная статья
УДК 621.316.11
doi: 10.55618/20756704_2023_16_2_66–76
EDN: ICQOCY

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕМ» НА ТОК В НУЛЕВОМ ПРОВОДЕ СЕТИ 0,38 кВ

Ольга Борисовна Забродина[1], Михаил Анатольевич Юндин[1], Александра Михайловна Исупова[1], Данил Андреевич Севостьянов[1]
[1]Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде, Ростовская область, г. Зерноград, Россия, achgaa@achgaa.ru

Аннотация. Описаны результаты экспериментального исследования, в котором на физической модели сети 380/220 В, с однородной несимметричной нелинейной нагрузкой, продемонстрирована возможность использования трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулем» в качестве шунто-симметрирующего устройства (ШСУ) для токовой разгрузки нулевого провода линейной сети. Приведены схема экспериментальной установки, программа и методика проведения эксперимента. Оценивались действующие значения несинусоидальных токов и напряжений на различных участках модели сети, мощности, значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжений и токов. Результаты измерений, выполненных с помощью сертифицированного прибора HIOKI 3196, получали как в статике, так и в динамике, с возможностью их фиксации и последующего анализа. Получены уравнения, описывающие эти токи и напряжения. Осциллограммы токов и напряжений, записанные на участках модели сети до и после подключения ШСУ, доказывают, что трансформатор со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулем» при его включении перед нелинейным несимметричным однородным приемником в четырехпроводной трехфазной цепи действительно значительно уменьшает ток в нулевом проводе. При этом с увеличением несимметрии и мощности нагрузки использование трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулем» для снижения тока в нулевом проводе более эффективно. Кроме этого уменьшаются токи нулевой последовательности основной и третьей гармоник. Полученные результаты могут быть использованы на практике в нагруженных кабельных линиях с сечением нулевого провода меньше фазного, питающих несимметричную нелинейную нагрузку.

Ключевые слова: несимметрия, несинусоидальность, трансформатор, схема «двойной зигзаг с нулем», шунто-симметрирующее устройство, нагрузка, модель сети, качество электрической энергии

Для цитирования: Забродина О.Б., Юндин М.А., Исупова А.М., Севостьянов Д.А. Экспериментальная оценка влияния трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулем» на ток в нулевом проводе сети 0,38 кВ // Вестник аграрной науки Дона. 2023. Т. 16. № 2 (62). С. 66–76.

Original article

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE INFLUENCE OF A TRANSFORMER WITH A "DOUBLE ZIGZAG WITH ZERO" WINDING CONNECTION SCHEME ON THE CURRENT IN THE 0,38 KV NETWORK NEUTRAL WIRE

Olga Borisovna Zabrodina[1], Mikhail Anatolyevich Yundin[1], Alexandra Mikhailovna Isupova[1], Danil Andreevich Sevostyanov[1]
[1]Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of Don State Agrarian University in Zernograd, Rostov region, Zernograd, Russia, achgaa@achgaa.ru

Abstract. The results of an experimental study are described where a physical model of a 380/220 V network with an asymmetric homogeneous nonlinear load demonstrates the possibility of using a transformer with a "double zigzag with zero" winding connection scheme as a shunt-balancing device for current discharge of the zero wire of a linear network. There has been given a scheme of an experimental setup, a program and the methodology of the experiment. There have been estimated the effective values of non-sinusoidal currents and voltages in various parts of the network model, power, the values of the total coefficients of the harmonic components of voltages and currents. The measurement results obtained using a certified HIOKI 3196 instrument were obtained both statically and dynamically together with the possibility of fixation and subsequent analysis. There have been obtained the equations describing currents and voltages. The oscillograms of currents and voltages recorded in the sections of the network model before and after connecting the shunt-balancing device prove that a transformer with a

© Забродина О.Б., Юндин М.А., Исупова А.М., Севостьянов Д.А., 2023

"double zigzag with zero" winding connection scheme, when it being switched on in front of a nonlinear asymmetric homogeneous receiver in a four-wire three-phase circuit, really significantly reduces the current in the zero wire. At the same time, when increasing in asymmetry and load power, the use of a transformer with a "double zigzag with zero" winding connection scheme to reduce the current in the neutral wire is more efficient. In addition, the currents of the zero sequence of the main and third harmonics are reduced. The results obtained can be used in practice in loaded cable lines with a zero-wire cross-section smaller than the phase one, feeding an asymmetric nonlinear load.

Keywords: asymmetry, non-sinusoidality, transformer, «double zigzag circuit with zero», shunt-balancing device, load, network model, quality of electrical energy

For citation: Zabrodina O.B., Yundin M.A., Isupova A.M., Sevostyanov D.A. Experimental evaluation of the influence of a transformer with a "double zigzag with zero" winding connection scheme on the current in the 0,38 kV network neutral wire. Vestnik agrarnoy nauki Dona = Don agrarian science bulletin. 2023; 16-2(62): 66–76. (In Russ.)

Введение. Неизбежность присутствия токов несимметрии и несинусоидальности в трехфазных четырехпроводных электрических сетях подтверждается анализом научных публикаций как в России [1–9], так и за рубежом [10–15]. Основными причинами этого явления в действующих электрических сетях являются: наличие большого количества электротехнической стали в силовом электрооборудовании сетей, рост в узлах нагрузки электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками [3], однофазное подключение потребителей, особенно в коммунально-бытовых трехфазных четырехпроводных сетях [7, 8].

Наибольшее значение на токовую нагрузку нулевого рабочего провода трехфазной четырехпроводной сети оказывают ток нулевой последовательности основной частоты и нечетные гармоники, кратные трем. Протекание указанных токов по элементам электрической сети вызывает дополнительные потери энергии в виде теплоты и ухудшение качества электроэнергии. Особенно сильно влияет нагрев на срок службы изоляции кабельных линий с нулевой жилой, меньшей по площади сечения, чем фазные жилы. Поскольку в нулевых проводниках трехфазных четырехпроводных сетей токовые аппараты защиты отсутствуют, то они могут перегреваться вплоть до полного разрыва электрической цепи. Большие величины токов в нулевом рабочем проводнике приводят к росту потерь напряжения между нейтралью силового трансформатора и нулевыми проводниками у электроприемников, что увеличивает вероятность некорректной работы электрооборудования.

Известны работы, направленные на симметрирование нагрузки сетей 0,38 кВ с помощью трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулем» [9, 13, 14] и «зигзаг с нулем» [15]. Однако в опубликованных работах недостаточно внимания уделено оценке эффективности данного технического средства для ограничения тока в нулевом проводе трехфазной четырехпроводной сети.

Поэтому целью настоящего исследования является экспериментальная проверка в лабораторных условиях эффективности уменьшения токов нулевой последовательности основной частоты и токов третьей гармоники в нулевом рабочем проводе сети 0,38 кВ при помощи трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулем».

Материалы и методы исследования. Экспериментальная установка включала модель электрической сети напряжением 380/220 В с однородной несимметричной нелинейной нагрузкой (далее «приемник»), в качестве которой были использованы дуговые ртутные газоразрядные лампы типа ДРЛ (рисунок 1). Модель электрической сети (далее «модель сети») получала питание от силового трансформатора типа ТС-1,5.

В экспериментальной установке предусмотрена возможность подключения с помощью автоматического выключателя QF шунто-симметрирующего устройства перед нелинейным несимметричным приемником.

В качестве шунто-симметрирующего устройства (далее ШСУ) использовали трехстержневой трансформатор Т2 с обмотками, соединенными по схеме «двойной зигзаг с нулем» [10].

С помощью сертифицированного прибора HIOKI 3196 измеряли действующие значения напряжений, токов, разности фаз между ними, мощности на различных участках модели сети, фиксировали их изменения во времени. Прибор также позволял получить значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения и тока, а также суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения THD-U и тока THD-I.

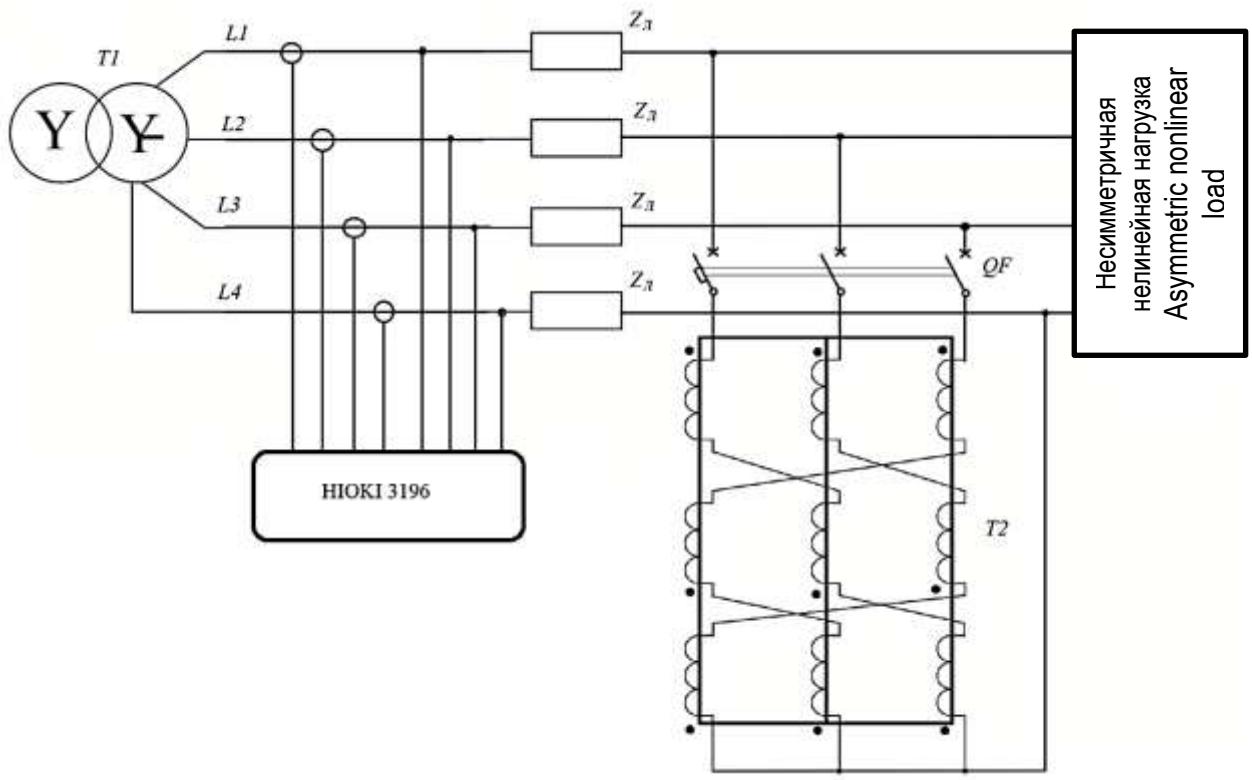


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная экспериментальной установки
Figure 1 – Electrical schematic diagram of the experimental installation

Нагрузку фаз в модели сети задавали изменением количества и мощности ламп типа ДРЛ. Согласно программе исследований были проведены измерения указанных выше величин при следующих режимах работы модели сети:

– до подключения ШСУ при нагрузке модели сети 1,76 кВА (в фазы приемника включены: L1 – ДРЛ 400, L2 – ДРЛ 250, L3 – ДРЛ 250);

– после подключения ШСУ при нагрузке модели сети 1,76 кВА (в фазы приемника включены: L1 – ДРЛ 400, L2 – ДРЛ 250, L3 – ДРЛ 250);

– до подключения ШСУ при нагрузке модели сети 2,02 кВА (в фазы приемника включены: L1 – ДРЛ 400 параллельно с ДРЛ 250, L2 – ДРЛ 250, L3 – ДРЛ 250);

– после подключения ШСУ при нагрузке модели сети 2,02 кВА (в фазы приемника включены: L1 – ДРЛ 400 параллельно с ДРЛ 250, L2 – ДРЛ 250, L3 – ДРЛ 250).

При обработке результатов измерений оценивали и сравнивали для различных режимов работы модели сети показатели, регламентированные ГОСТ 32144–2013 и ГОСТ 30804.4.30–2013 (при этом учитывали из высших гармоник только третью, в наибольшей степени влияющую на значение тока в нулевом проводе).

Результаты исследования и их обсуждение. Осциллограммы токов фаз и тока в нулевом проводе при нагрузке модели сети 1,76 кВА до и после подключения ШСУ приведены на рисунке 2.

Из осциллограмм видно, что после небольшого переходного процесса, длительностью примерно в два периода основной гармоники тока, устанавливается существенно меньшее (в 5,53 раза) действующее значение тока в нулевом проводе сети.

Модели, описывающие токи на различных участках сети при несимметричной однородной нагрузке 1,76 кВА, приведены в таблице 1, а значения токов приемника и ШСУ – в системах уравнений (1) и (2). Заметим, что в формулах индексы 1, 2, 3 относятся соответственно к фазам (L1, L2, L3), а индекс 4 – к току в нулевом проводе.

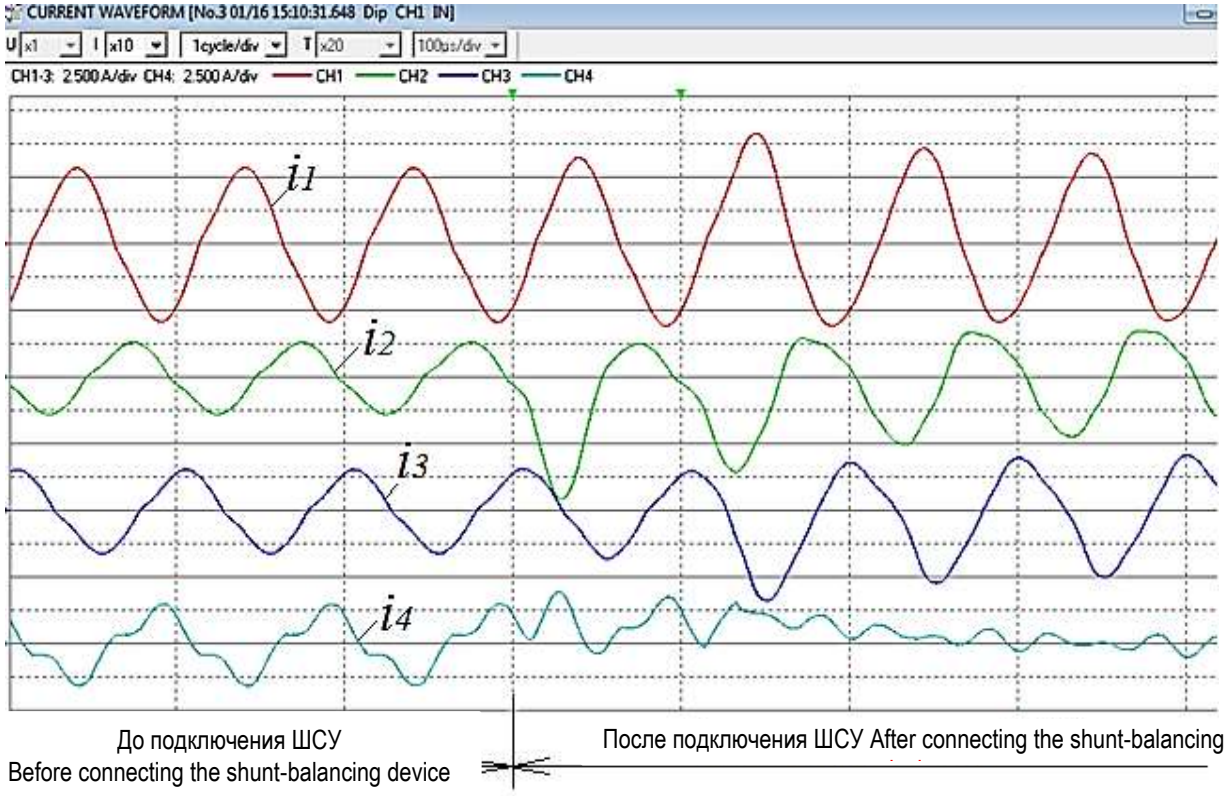


Рисунок 2 – Осциллограммы токов при нагрузке 1,76 кВА до и после подключения трансформатора с обмотками, соединенными в «двойной зигзаг с нулем», к модели сети
Figure 2 – Oscillograms of currents at a load of 1,76 kVA before and after connecting a transformer to the windings connected in a "double zigzag with zero" to the network model

Таблица 1 – Значения токов и напряжений на головном участке модели сети при однородной нагрузке приемника 1,76 кВА
Table 1 – Values of currents and voltages on the main section of the network model at a single receiver load of 1,76 kVA

До подключения трансформатора Т2 Before connecting Transformer T2	После включения трансформатора Т2 After connecting Transformer T2
$i_1 = 5{,}6\sin(\omega t - 53^0) + 0{,}35\sin(3\omega t - 26^0)$ A; $i_2 = 2{,}6\sin(\omega t - 173^0) + 0{,}21\sin(3\omega t - 30^0)$ A; $i_3 = 3{,}3\sin(\omega t + 70^0) + 0{,}19\sin(3\omega t - 5^0)$ A; $i_4 = 2{,}6\sin(\omega t + 138^0) + 0{,}72\sin(3\omega t + 159^0)$ A	$i_1 = 5{,}80\sin(\omega t - 59^0) + 0{,}15\sin(3\omega t - 31^0)$ A; $i_2 = 3{,}92\sin(\omega t + 166^0) + 0{,}21\sin(3\omega t + 100^0)$ A; $i_3 = 4{,}11\sin(\omega t + 81^0) + 0{,}35\sin(3\omega t + 105^0)$ A; $i_4 = 0{,}14\sin(\omega t - 7^0) + 0{,}46\sin(3\omega t - 91^0)$ A
$u_1 = 307{,}4\sin\omega t + 0{,}72\sin(3\omega t - 121^0)$ B; $u_2 = 295{,}5\sin(\omega t - 119^0) + 1{,}49\sin(3\omega t - 25^0)$ B; $u_3 = 305{,}6\sin(\omega t + 122^0) + 0{,}86\sin(3\omega t - 143^0)$ B.	$u_1 = 304{,}6\sin\omega t + 1{,}53\sin(3\omega t - 169^0)$ B; $u_2 = 295{,}7\sin(\omega t - 119^0) + 1{,}40\sin(3\omega t - 19^0)$ B; $u_3 = 305{,}8\sin(\omega t + 122^0) + 0{,}48\sin(3\omega t + 116^0)$ B.

В цепи ШСУ при той же нагрузке зафиксированы следующие токи:

$$
\begin{aligned}
i_1 &= 0{,}72\sin(\omega t + 178^0) + 0{,}41\sin(3\omega t + 142^0)\ \text{A};\\
i_2 &= 2{,}20\sin(\omega t + 134^0) + 0{,}41\sin(3\omega t + 100^0)\ \text{A};\\
i_3 &= 1{,}48\sin(\omega t + 101^0) + 0{,}58\sin(3\omega t + 126^0)\ \text{A};\\
i_4 &= 3{,}93\sin(\omega t - 47^0) + 1{,}39\sin(3\omega t - 47^0)\ \text{A}.
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

При включенном ШСУ, между местом его подключения и той же нагрузкой, токи в фазах приемника оказались следующие:

$$\begin{aligned} i_1 &= 6{,}31\sin(\omega t - 53^0) + 0{,}56\sin(3\omega t - 34^0)\ \text{A};\\ i_2 &= 2{,}21\sin(\omega t - 169^0) + 0{,}28\sin(3\omega t - 21^0)\ \text{A};\\ i_3 &= 2{,}77\sin(\omega t + 69^0) + 0{,}29\sin(3\omega t - 26^0)\ \text{A};\\ i_4 &= 0{,}13\sin(\omega t - 19^0) + 0{,}47\sin(3\omega t - 91^0)\ \text{A}. \end{aligned} \quad (2)$$

На головном участке модели сети линейные токи при подключении ШСУ несколько увеличились, как и тепловые потери. В частности, при нагрузке 1,76 кВА и одинаковом спектральном составе гармоник тока ламп ДРЛ, тепловые потери в фазах линейной сети от основной и третьей гармоник увеличились в 1,31 раза, но в нулевом проводнике тепловые потери снизились в 30,57 раза.

Из осциллограммы рисунка 3 видно, что в нулевом проводнике ШСУ ток значительно больше, чем токи в его фазах.

Результаты аналогичных исследований модели сети при нагрузке фаз приемника 2,02 кВА приведены на рисунках 4 и 5 и в таблице 2.

Анализ осциллограмм рисунка 4 показывает, что при увеличении нагрузки фазы L1 и общей нагрузки в 1,19 раза ток в нулевом проводе на головном участке сети также становится значительно меньше (в 6,45 раза), а тепловые потери в нулевом проводнике сети уменьшаются примерно в 28 раз. Тепловые потери при подключении ШСУ всей сети, естественно, увеличиваются.

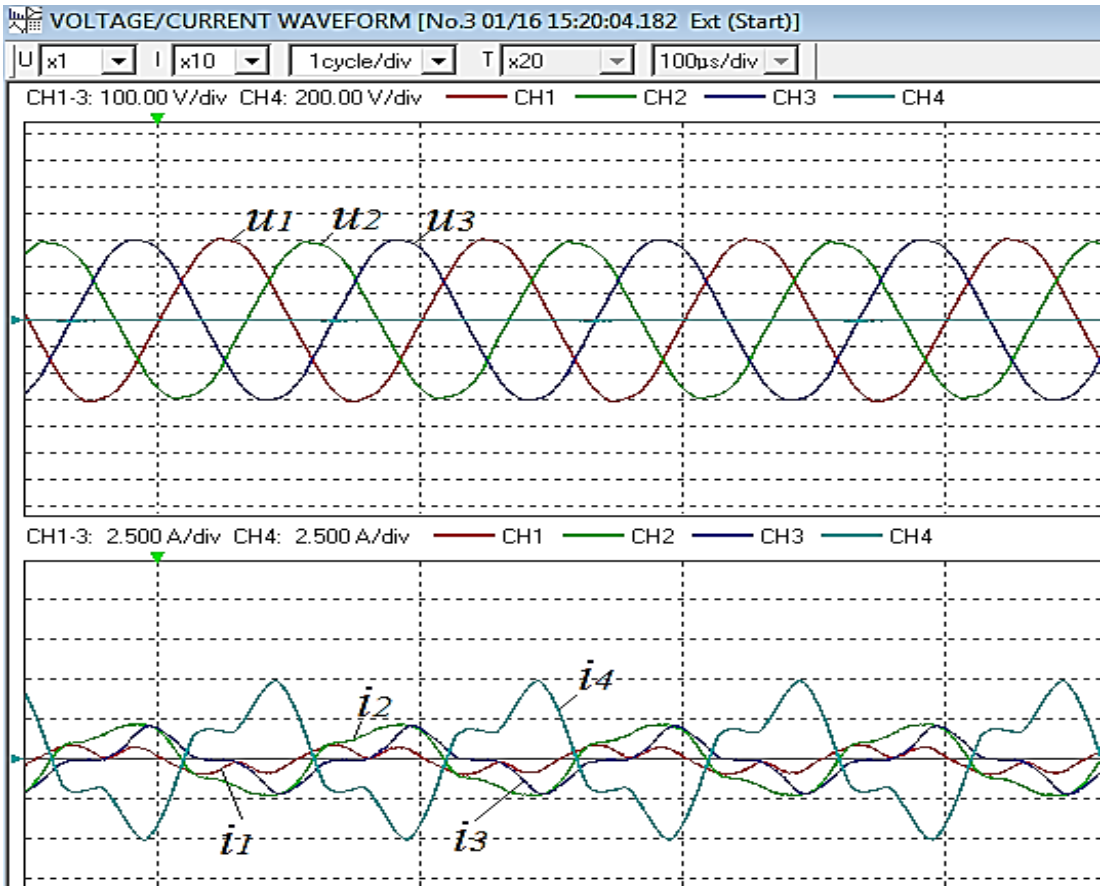


Рисунок 3 – Осциллограммы токов и напряжений в фазах и нулевом проводе трансформатора с обмотками, соединенными в «двойной зигзаг с нулем», при однородной нагрузке приемника 1,76 кВА
Figure 3 – Oscillograms of currents and voltages in phases and the zero wire of a transformer with windings connected in a "double zigzag with zero" at a uniform receiver load of 1,76 kVA

Таблица 2 – Значения токов и напряжений на головном участке модели сети при однородной нагрузке приемника 2,02 кВА
Table 2 – Values of currents and voltages on the main section of the network model at a single receiver load of 2,02 kVA

До подключения трансформатора Т2 Before connecting Transformer T2	После включения трансформатора Т2 After connecting Transformer T2
$i_1 = 7{,}57\sin(\omega t - 58^0) + 0{,}35\sin(3\omega t - 19^0)$ A; $i_2 = 2{,}75\sin(\omega t - 176^0) + 0{,}20\sin(3\omega t - 48^0)$ A; $i_3 = 3{,}08\sin(\omega t + 75^0) + 0{,}23\sin(3\omega t + 4^0)$ A; $i_4 = 4{,}13\sin(\omega t - 60^0) + 0{,}74\sin(3\omega t - 18^0)$ A	$i_1 = 7{,}73\sin(\omega t - 60^0) + 0{,}26\sin(3\omega t - 29^0)$ A; $i_2 = 4{,}63\sin(\omega t + 159^0) + 0{,}22\sin(3\omega t + 107^0)$ A; $i_3 = 4{,}67\sin(\omega t + 89^0) + 0{,}38\sin(3\omega t + 113^0)$ A; $i_4 = 0{,}48\sin(\omega t - 129^0) + 0{,}44\sin(3\omega t + 88^0)$ A.
$u_1 = 327{,}1\sin\omega t + 1{,}90\sin(3\omega t - 114^0)$ B; $u_2 = 296{,}1\sin(\omega t - 119^0) + 1{,}39\sin(3\omega t + 13^0)$ B; $u_3 = 304{,}5\sin(\omega t + 121^0) + 0{,}59\sin(3\omega t - 56^0)$ B	$u_1 = 296{,}8\sin\omega t + 2{,}50\sin(3\omega t - 178^0)$ B; $u_2 = 295{,}8\sin(\omega t - 120^0) + 1{,}12\sin(3\omega t - 12^0)$ B; $u_3 = 301{,}4\sin(\omega t + 120^0) + 1{,}64\sin(3\omega t + 7^0)$ B

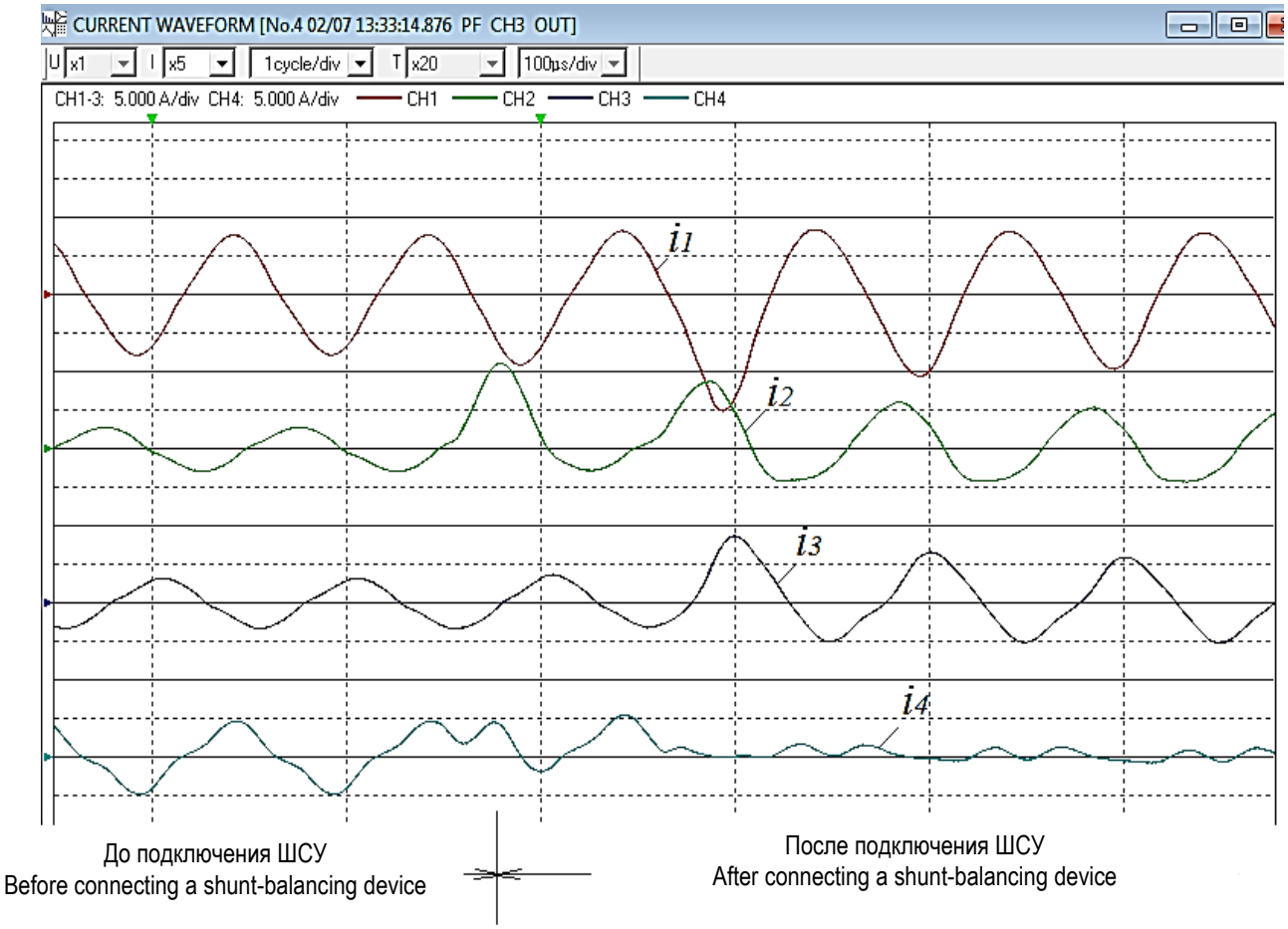


Рисунок 4 – Осциллограммы токов при однородной нагрузке приемника 2,02 кВА до и после подключения трансформатора с обмотками, соединенными в «двойной зигзаг с нулем», к модели сети
Figure 4 – Oscillograms of currents at a uniform receiver load of 2,02 kVA before and after connecting a transformer with windings connected in a "double zigzag with zero" to the network model

В цепи ШСУ при суммарной нагрузке модели сети 2,02 кВА зафиксированы следующие токи:

$$
\begin{aligned}
i_1 &= 1{,}44\sin(\omega t + 153^0) + 0{,}50\sin(3\omega t + 142^0)\ \text{A};\\
i_2 &= 2{,}95\sin(\omega t + 140^0) + 0{,}47\sin(3\omega t + 139^0)\ \text{A};\\
i_3 &= 2{,}15\sin(\omega t + 114^0) + 0{,}64\sin(3\omega t + 130^0)\ \text{A};\\
i_4 &= 6{,}31\sin(\omega t - 46^0) + 1{,}59\sin(3\omega t - 44^0)\ \text{A}.
\end{aligned}
\qquad (3)
$$

При включенном ШСУ в фазах приемника и его нулевом проводе токи описываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} i_1 &= 5{,}80\sin(\omega t - 172^0) + 0{,}54\sin(3\omega t - 30^0)\ \text{A};\\ i_2 &= 2{,}14\sin(\omega t + 70^0) + 0{,}27\sin(3\omega t - 22^0)\ \text{A};\\ i_3 &= 2{,}73\sin(\omega t - 51^0) + 0{,}28\sin(3\omega t - 28^0)\ \text{A};\\ i_4 &= 6{,}01\sin(\omega t - 165^0) + 1{,}59\sin(3\omega t - 43^0)\ \text{A}. \end{aligned} \quad (4)$$

Анализ осциллограмм токов самого ШСУ при нагрузке приемника сети 2,02 кВА показывает также, что в его нулевом проводе ток существенно выше, очевидно, за счет суммирования токов гармоник кратных трем, поскольку токи фаз фактически одинаковы.

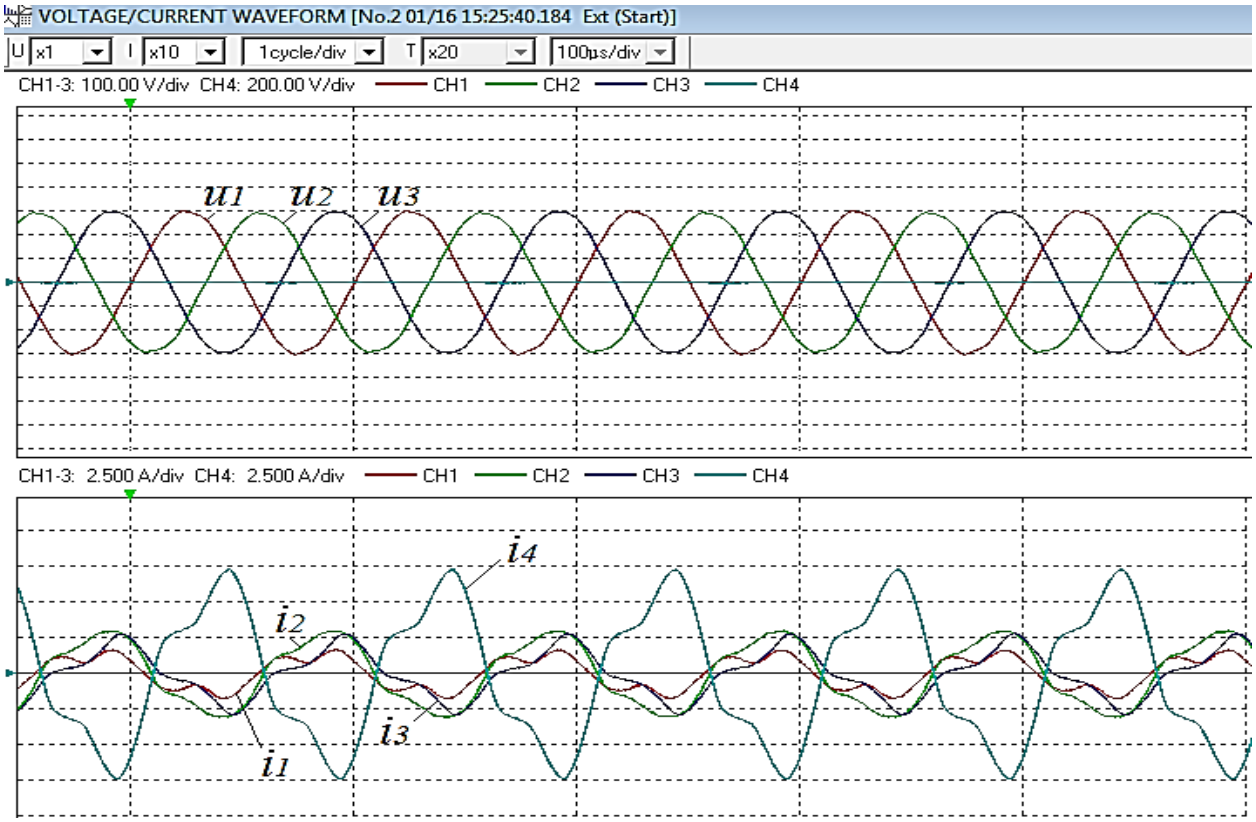


Рисунок 5 – Осциллограммы токов и напряжений на вводе в трансформатор с обмотками, соединенными в «двойной зигзаг с нулем», при однородной нагрузке приемника 2,02 кВА
Figure 5 – Oscillograms of currents and voltages at the input to a transformer with windings connected in a "double zigzag with zero" at a uniform receiver load of 2,02 kVA

Концентрированно результаты экспериментального исследования представлены в таблице 3.

Анализ таблицы 3 показывает, что подключение к сети трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулем» интенсивнее снижает в нулевом проводе составляющую тока нулевой последовательности основной гармоники по сравнению с током нулевой последовательности третьей гармоники. Так, при нагрузке в 2,1 кВА ток нулевой последовательности основной гармоники снизился с 0,612 А до 0,038 А, т.е. почти в 16 раз, в то время как ток нулевой последовательности третьей гармоники уменьшился только в 0,17/0,109 = 1,6 раза. При общей нагрузке 2,54 кВА подключение к сети трансформатора Т2 привело к снижению в нулевом проводе сети тока нулевой последовательности основной гармоники в 8,6 раза, а тока нулевой последовательности третьей гармоники – только в 1,7 раза.

Таблица 3 – Результаты сравнения применения шунто-симметрирующего устройства в модели 4-проводной трехфазной сети при несимметричной однородной нагрузке
Table 3 – Comparison results of the use of a shunt-balancing device in a model of a 4-wire three-phase network with an asymmetric homogeneous load

Измеряемая величина Measured value	К модели сети ничего не подключено No connection to the network model	К модели сети подключен трансформатор Т2 Transformer T2 is connected to the network model
1	2	3
Нагрузка по фазам приемника: L1 – ДРЛ 400, L2 – ДРЛ 250, L3 – ДРЛ 250 Receiver phase load: L1 – DRL 400, L2 – DRL 250, L3 – DRL 250		
Суммарная полная мощность нагрузки, кВА Total load power, kVA	1,76	2,10
Действующее фазное напряжение, В Operating phase voltage, B	213,99	213,46
Ток в нулевом проводе I_4, А Current in the neutral wire I_4, A	1,88	0,34
Ток нулевой последовательности основной гармоники $I_{0(1)}$, А Zero sequence current of the fundamental harmonic $I_{0(1)}$, A	0,612	0,038
Ток нулевой последовательности третьей гармоники $I_{0(3)}$, А Zero sequence current of the third harmonic $I_{0(3)}$, A	0,170	0,109
Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока: Total harmonic current: THD-I1, % THD-I2, % THD-I3, % THD-I4, %	 6,66 8,53 6,19 28,19	 4,23 7,11 8,99 342,37
Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения: Total voltage harmonics: THD-U1, % THD-U2, % THD-U3, %	 1,15 1,76 1,40	 1,58 2,08 1,49
Нагрузка по фазам приемника: L1 – ДРЛ 400 параллельно с ДРЛ 250, L2 – ДРЛ 250, L3 – ДРЛ 250 Receiver phase load: L1 – DRL 400 in parallel with DRL 250, L2 – DRL 250, L3 – DRL 250		
Суммарная полная мощность нагрузки, кВА Total load power, kVA	2,02	2,54
Среднее фазное напряжение, В Average phase voltage, B	212,57	210,70
Ток в нулевом проводе *I*4, А Current in the neutral wire *I*4, A	2,97	0,46
Ток нулевой последовательности основной гармоники $I_{0(1)}$, А Zero sequence current of the fundamental harmonic $I_{0(1)}$, A	0,982	0,114
Ток нулевой последовательности третьей гармоники $I_{0(3)}$, А Zero sequence current of the third harmonic $I_{0(3)}$, A	0,174	0,103
Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока: Total harmonic current: THD-I1, % THD-I2, % THD-I3, % THD-I4, %	 4,84 7,76 8,04 17,93	 4,32 6,29 8,51 92,64

Окончание таблицы 3

1	2	3
Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения: Total voltage harmonics:		
THD-U1, %	1,43	1,69
THD-U2, %	1,87	2,25
THD-U3, %	1,66	1,97

Выводы. Экспериментальные исследования показали, что трансформатор со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулем» при его поперечном включении в четырехпроводную трехфазную сеть перед нелинейным несимметричным однородным приемником существенно снижает ток в нулевом проводе (в 5–6 раз, при заданной в эксперименте несимметрии). При этом уменьшаются токи нулевой последовательности основной и третьей гармоник.

Анализ результатов исследований также показал, что с увеличением несимметрии использование трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулем» для снижения тока в нулевом проводе более эффективно.

Несмотря на то, что в фазах сети гармонический состав не улучшился и несколько выросли тепловые потери, перспективным направлением является практическое использование такого трансформатора в действующих электрических сетях, питающих здания и предприятия с несимметричной нелинейной нагрузкой посредством кабелей с сечением нулевой жилы менее сечения фазного провода. Особенно это актуально, если рабочие токи фаз приемника близки по значению длительно допустимым токам фазных жил кабеля.

Следует также отметить, что чем ближе к нелинейному несимметричному электроприёмнику будет подключен трансформатор со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулем», тем на большей части протяженности сети будет снижена токовая нагрузка на нулевой провод.

Список источников

1. Вагин Г.Я., Севостьянов А.А., Солнцев Е.Б., Юртаев С.Н., Терентьев П.В., Смирнов В.В. Анализ влияния нелинейной однофазной нагрузки на значение тока в нулевом проводе // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 17–19. EDN: RTXSUH

2. Тульский В.Н., Карташев И.И., Насы-ров Р.Р., Симуткин М.Г. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 39–44. EDN: QIVRCP

3. Янченко С.А. Анализ гармонической эмиссии распространенных видов современных бытовых нелинейных электроприемников // Промышленная энергетика. 2014. № 8. С. 46–55. EDN: STESYB

4. Авербух М.А., Жилин Е.В., Сизганова Е.Ю. Статистическая оценка коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию питающего напряжения в системах электроснабжения ИЖС // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 8. С.1079–1087. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-8-1079-1087. EDN: YPJYKM

5. Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Горбунов А.О. Снижение потерь мощности от несинусоидальных токов в сельских электрических сетях 0,38 кВ // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (55). С. 125–135. DOI: 10.24411/2078-1318-2019-12125. EDN: AGWMCE

6. 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. EDN: ICKKYH

7. Наумов И.В., Багаев А.А. Исследование несимметричных режимов работы низковольтных электрических сетей Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 9 (215). С. 106–114. DOI: 10.53083/1996-4277-2022-215-9-106-114. EDN: IZQWTV

8. Подъячих С.В. Анализ режимов работы действующих электрических сетей низкого напряжения // Актуальные вопросы аграрной науки. 2022. № 44. С. 12–21. EDN: LPUXUQ

9. Юндин М.А., Юндин К.М., Исупова А.М., Лукин В.В., Бабина Л.В. Об эффективности применения трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда / двойной зигзаг с нулевым проводом» при нелинейной несинусоидальной нагрузке // Электротехника. 2023. № 2. С. 46–50. DOI: 10.53891/00135860_2023_2_46. EDN: BDXDZD

10. Tofoli F.L., Sanhueza S.M.R., A. de Oliveira. On the study of losses in cables and transformers in nonsinusoidal conditions // IEEE Transactions on Power Delivery. 2006. Vol. 21. Issue 2. P. 971–978. DOI: 0.1109.TPWRD.2006.870986.

11. Cazacu E., Petrescu L., Ionita V. Losses and temperature rise within power transformers subjected to distorted currents // Proc. 15-th Intern. conf. on electrical machines, drives and power systems (ELMA). Sofia, Bulgaria, 2017. Art. № 7955464. P. 362–365. DOI: 10.1109.ELMA.2017.7955464.

12. Турдуев И.Э. Влияние несимметрии токов на потери мощности и электрической энергии в сетях 0,38 кВ // Известия Ошского технологического университета. 2018. № 2. С. 58–61. EDN: AXTYBJ

13. Зеленькевич А.И., Прищепов М.А., Збродыга В.М. О возможности применения трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» для повышения качества электроэнергии // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы IV Международной научно-практической конференции. Саратов, 2018. С. 18–21. EDN: YNPPXV

14. Прищепов М.А., Зеленькевич А.И., Збродыга В.М. Перспективный силовой трансформатор с улучшенными характеристиками для сельских электрических сетей // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. 2021. Т. 50. № 3. С. 366–377. DOI: 10.29235/1817-7204-2021-59-3-366-377. EDN: ABCBEN

15. Topolski L., Woźny K., Hanzelka Z. Kompensacja asymetrii prądów i napięć powodowanej odbiornikami i odnawialnymi źródłami energii za pomocą transformatora symetryzującego w sieciach niskich napięć.
DOI: 10.15199/48.2019.09.39

References

1. Vagin G.Ya., Sevost`yanov A.A., Solncev E.B., Yurtaev S.N., Terent`ev P.V., Smirnov V.V. Analiz vliyaniya nelineynoy odnofaznoy nagruzki na znachenie toka v nulevom provode (Analysis of the influence of a non-linear single-phase load on the current value in the neutral wire). *Promyshlennaya energetika*. 2013; 12: 17–19.
EDN: RTXSUH (In Russ.)

2. Tul'skiy V.N., Kartashev I.I., Nasyrov R.R., Simutkin M.G. Vliyanie vysshikh garmonik toka na rezhimy raboty kabeley raspredelitel'noy seti 380 V (Influence of higher harmonics of the current on the modes of operation of the cables of the 380 V distribution network). *Promyshlennaya energetika*. 2013; 5: 39-44. EDN: QIVRCP (In Russ.)

3. Yanchenko S.A. Analiz garmonicheskoy emissii rasprostranennykh vidov sovremennykh bytovykh nelineynykh elektropriemnikov (Analysis of harmonic emission of common types of modern non-linear power receivers). *Promyshlennaya energetika*. 2014; 8: 46–55. EDN: STESYB (In Russ.)

4. Averbukh M.A., Zhilin E.V., Sizganova E.Yu. Statisticheskaya otsenka koeffitsientov, kharakterizuyuschikh nesinusoidal'nost' i nesimmetriyu pitayuschego napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya IZHS (The statistical evaluation of coefficients, characterizing unsinusoidality and unsymmetry of feed voltage in private housing projects' power supply systems). *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2017; 10–8: 1079–1087.
DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-8-1079-1087.
EDN: YPJYKM (In Russ.)

5. Kosoukhov F.D., Vasil'ev N.V., Gorbunov A.O. Snizhenie poter' moschnosti ot nesinusoidal'nykh tokov v sel'skikh elektricheskikh setyakh 0,38 kV (The reduction of power loss from non-sinusoidal currents in rural electric networks 0,38 kV). *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019; 2 (55): 125–135. DOI: 10.24411/2078-1318-2019-12125. EDN: AGWMCE
(In Russ.)

6. Tul'skiy V.N., Inoyatov B.D., Dzhuraev Sh.D. Monitoring kachestva elektroenergii kak instrument diagnostiki sostoyaniya neytrali nizkovol'tnykh kabeley (Power quality monitoring as a tool for diagnostics the state of low-voltage cables neutral). *Energetik*. 2019; 6: 30–33. EDN: ICKKYH
(In Russ.)

7. Naumov I.V., Bagaev A.A. Issledovanie nesimmetrichnykh rezhimov raboty nizkovol'tnykh elektricheskikh setey Altayskogo kraya (Study of asymmetric operating modes of low-voltage electrical networks in the Altai region). *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022; 9(215): 106–114. DOI: 10.53083/1996-4277-2022-215-9-106-114. EDN: IZQWTV (In Russ.)

8. Pod"yachikh S.V. Analiz rezhimov raboty deystvuyuschikh elektricheskikh setey nizkogo napryazheniya (Analysis of operating modes of existing low voltage electrical networks). *Aktual'nye voprosy agrarnoy nauki*. 2022; 44: 12–21. EDN: LPUXUQ (In Russ.)

9. Yundin M.A., Yundin K.M., Isupova A.M., Lukin V.V., Babina L.V. Ob effektivnosti primeneniya transformatorov so skhemoy soedineniya obmotok «zvezda / dvoynoy zigzag s nulevym provodom» pri nelineynoy nesinusoidal'noy nagruzke (On the efficiency of using transformers with a «star / double zigzag with neutral wire» winding connection scheme for a non-linear non-sinusoidal load). *Elektrotekhnika.* 2023; 2: 46–50.
DOI: 10.53891/00135860_2023_2_46.
EDN: BDXDZD (In Russ.)

10. Tofoli F.L., Sanhueza S.M.R., A. de Oliveira. On the study of losses in cables and transformers in nonsinusoidal conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006; 21–2: 971–978. DOI: 10.1109.TPWRD.2006.870986.

11. Cazacu E., Petrescu L., Ionita V. Losses and temperature rise within power transformers subjected to distorted currents, Proc. 15-th Intern. conf. on electrical machines, drives and power systems (ELMA). Sofia, Bulgaria, 2017, s. 362–365. DOI: 10.1109.ELMA.2017.7955464.

12. Turduev I.E. Vliyanie nesimmetrii tokov na poteri moschnosti i elektricheskoy energii v setyakh 0,38 kV (Influence of current asymmetry on power losses and electric power in 0,38 kV networks). *Izvestiya Oshskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2018; 2: 58–61. EDN: AXTYBJ

13. Zelen'kevich A.I., Prischepov M.A., Zbrodyga V.M. O vozmozhnosti primeneniya transformatora so skhemoy soedineniya obmotok «zvezda – dvoynoy zigzag s nulevym provodom» dlya povysheniya kachestva elektroenergii (On the possibility of using a transformer with a «star-double zigzag with a neutral wire» winding connection scheme to improve the quality of electricity). Innovatsii v prirodoobustroystve i zaschite v chrezvychaynykh situatsiyakh: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Saratov, 2018, s. 18–21. EDN: YNPPXV (In Russ.)

14. Prischepov M.A., Zelen'kevich A.I., Zbrodyga V.M. Perspektivnyy silovoy transformator s uluchshennymi kharakteristikami dlya sel'skikh elektricheskikh setey (Advanced power transformer with improved parameters for rural electrical networks). *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seriya agrarnykh navuk*. 2021; 50-3: 366–377. DOI: 10.29235/1817-7204-2021-59-3-366-377. EDN: ABCBEN

15. Topolski L., Woźny K., Hanzelka Z. Kompensacja asymetrii prądów i napięć powodowanej odbiornikami i odnawialnymi źródłami energii za pomocą transformatora symetryzującego w sieciach niskich napięć. DOI:10.15199/48.2019.09.39.

Информация об авторах

О.Б. Забродина – кандидат технических наук, доцент, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде, Ростовская область, г. Зерноград, Россия. Тел.: +7-918-576-77-47. E-mail: zernob@yandex.ru.

М.А. Юндин – кандидат технических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде, Ростовская область, г. Зерноград, Россия. Тел.: +7-928-774-73-53. E-mail: m.a.ju@yandex.ru.

А.М. Исупова – кандидат технических наук, доцент, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде, Ростовская область, г. Зерноград, Россия. Тел.: +7-938-164-23-97. E-mail: alsite1 @rambler.ru.

Д.А. Севостьянов – магистрант, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде, Ростовская область, г. Зерноград, Россия. Тел.: +7-909-759-99-76. E-mail: govorkow.s@yandex.ru.

Михаил Анатольевич Юндин, m.a.ju@yandex.ru

Information about the authors

O.B. Zabrodina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of Don State Agrarian University in Zernograd, Rostov region, Zernograd, Russia. Phone: +7-918-576-77-47. zernob@yandex.ru.

M.A. Yundin – Candidate of Technical Sciences, Professor, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of Don State Agrarian University in Zernograd, Rostov region, Zernograd, Russia. Phone: +7-928-774-73-53. m.a.ju@yandex.ru.

A.M. Isupova – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of Don State Agrarian University in Zernograd, Rostov region, Zernograd, Russia. Phone: +7-938-164-23-97. alsite1@rambler.ru.

D.A. Sevostjanov – Master`s degree student, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of Don State Agrarian University in Zernograd, Rostov region, Zernograd, Russia. Phone: +7-909-759-99-76. govorkow.s@yandex.ru.

Mikhail Anatolievich Yundin, m.a.ju@yandex.ru

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors. All authors made an equivalent contribution to the preparation of the article.
The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 03.03.2023; одобрена после рецензирования 27.04.2023; принята к публикации 28.04.2023.
The article was submitted 03.03.2023; approved after reviewing 27.04.2023; accepted for publication 28.04.2023.

https://elibrary.ru/icqocy