

МЕХАНИЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА
MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 621.316
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-3-366-377>

Поступила в редакцию 24.05.2021
Received 24.05.2021

М. А. Прищепов, А. И. Зеленкевич, В. М. Збродыга

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

**ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР С УЛУЧШЕННЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

Аннотация: Проблема обеспечения качества электрической энергии актуальна в сельских электрических сетях, что обусловлено их большой протяженностью и разветвленностью, присоединением большого количества однофазных и нелинейных нагрузок. Несимметрия электрических нагрузок вызывает несимметрию напряжений, которая отрицательно влияет на работу всех элементов электрической системы, вызывая дополнительные потери мощности, снижая срок службы электрооборудования и экономические показатели его работы, а также надежность работы отдельного электрооборудования и системы электроснабжения в целом. Уменьшение несимметрии напряжений можно обеспечить рациональным построением схемы электрической сети и применением специальных корректирующих устройств. В электроустановках агропромышленного комплекса авторы считают целесообразным применение относительно простых и надежных по конструктивному исполнению и недорогих силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» ($Y/2Z_n$) с нулевой группой соединения обмоток. В статье рассмотрено устройство и процессы преобразования электрической энергии в трансформаторе. Доказано, что фазные ЭДС обмотки низкого напряжения совпадают по фазе с соответствующими ЭДС первичной обмотки, т. е. предлагаемая схема имеет нулевую группу соединения обмоток. Представлены результаты теоретических исследований работы трансформатора при несимметричной и нелинейной нагрузке. Уменьшение несимметрии напряжений обусловлено компенсацией составляющих нулевой последовательности. Уменьшение уровня высших гармонических составляющих напряжения происходит из-за компенсации высших гармоник кратных трем. Теоретически обосновано, что трансформатор не будет эмитировать высшие гармонические составляющие напряжений нулевой последовательности в питающую сеть. Приведены результаты экспериментов, подтверждающие, что силовой трансформатор со схемой соединения обмоток $Y/2Z_n$ поддерживает более высокий уровень симметрии напряжений при несимметричном характере нагрузки. В режиме однофазной нагрузки значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности не превышают 1,7 %, по нулевой последовательности – 2,9 %. Трансформатор позволяет получить в 1,2–1,5 раза меньшее значение суммарного коэффициента гармонических составляющих при нелинейном характере нагрузки, что является наилучшим результатом среди исследованных схем. Данный силовой трансформатор является устойчивым к воздействиям со стороны нагрузки искажающим качество напряжения и способен обеспечить высокий уровень симметрии и синусоидальности напряжения, а также параллельную работу с серийно выпускаемыми трансформаторами. Это обуславливает возможность его применения в сельских электрических сетях для снижения потерь мощности, повышения срока службы и экономичности работы электрооборудования, повышения надежности системы электроснабжения.

Ключевые слова: трансформатор, схема соединений обмоток, магнитодвижущие силы, магнитный поток, основные уравнения трансформатора, метод симметричных составляющих, взаимная компенсация, качество электрической энергии, несимметрия токов и напряжений, нелинейная нагрузка, высшие гармоники, параллельная работа трансформаторов

Для цитирования: Прищепов, М. А. Перспективный силовой трансформатор с улучшенными характеристиками для сельских электрических сетей / М. А. Прищепов, А. И. Зеленкевич, В. М. Збродыга // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59, № 3. – С. 366–377. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-3-366-377>

Mikhail A. Prishchepov, Alexander I. Zelenkevich, Vladimir M. Zbrodyga

Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus

ADVANCED POWER TRANSFORMER WITH IMPROVED PARAMETERS
FOR RURAL ELECTRICAL NETWORKS

Abstract: The problem of power quality supply is relevant for rural electrical networks, due to long distance and branching, as well as connection of a large number of single-phase and non-linear loads. Asymmetry of electrical loads causes voltage asymmetry, which adversely affects the operation of all elements of the electrical system, causing additional power losses, reducing the service life of electrical equipment and its economic performance, as well as reliability of operation of individual electrical equipment and power supply system as a whole. Reduction of voltage asymmetry can be ensured by rational construction of electrical network circuit and use of special correcting devices. The authors consider it reasonable to use relatively simple and reliable by design and inexpensive power transformers with a “star - double zigzag with a zero wire” ($Y/2Z_n$) winding connection circuit with a neutral winding connection group. The paper deals with design and processes of converting electrical energy in a transformer. It has been proved that phase EMF of the secondary winding coincides in phase with the same EMF of the primary winding, i.e. the proposed circuit has a neutral windings’ connection group. Results of theoretical studies of transformer operation with an asymmetric and non-linear load are presented. Decrease in voltage asymmetry is due to the neutral sequence components compensation. Decrease of the higher harmonic voltage components level occurs due to the compensation of the higher harmonics multiplied three times. It is theoretically substantiated that transformer will not emit higher harmonic components of zero sequence voltages into the supply network. Experimental studies have confirmed the theoretical conclusions that a transformer with $Y/2Z_n$ winding connection circuit allows obtaining the highest level of voltage symmetry with an asymmetric load. In single-phase load mode, the values of voltage unbalance factor in reverse sequence do not exceed 1.7 %, in neutral sequence - 2.9 %. The transformer allows obtaining 1.2-1.5 times lower value of total harmonic components factor at non-linear load, which is the best result among circuits studied. This power transformer is resistant to load effects that distort voltage quality and is capable to provide a high level of symmetry and sinusoidal voltage as well as parallel operation with commercially available transformers. This makes it possible to use it in rural electrical networks to reduce power losses, increase service life and efficiency of electrical equipment, and increase reliability of the power supply system.

Keywords: transformer, winding connection circuit, magnetomotive forces, magnetic flux, basic equations of transformer, method of symmetrical components, mutual compensation, quality of electrical energy, asymmetry of current and voltage, nonlinear load, higher harmonics, parallel operation of transformers

For citation: Prishchepov M. A., Zelenkevich A. I., Zbrodyga V. M. Advanced power transformer with improved characteristics for rural mains. *Vesti Natsyional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya agrarnyykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2021, vol. 59, no 3, pp. 366-377 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-3-366-377>

Введение. Проблема обеспечения потребителей электрической энергией надлежащего качества становится все более актуальной [1–6] с увеличением электрических нагрузок¹. Особенно остро данная проблема стоит в сельских электрических сетях, что обусловлено их большой длиной и разветвленностью, присоединением большого количества однофазных и нелинейных нагрузок [6–12].

Выбор средств и способов обеспечения качества электроэнергии является сложной технической и экономической задачей [13–17]. В электроустановках агропромышленного комплекса целесообразно использование относительно не сложных по конструкции устройств, надежных, относительно не дорогих, простых в эксплуатации. Одним из таких устройств являются силовые трансформаторы со специальными схемами соединения обмоток. Например, для повышения симметрии и синусоидальности напряжений на потребительских трансформаторных подстанциях напряжением 10/0,4 кВ применяют силовые трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда – зигзаг с нулевым проводом», с 11-й группой соединения обмоток, которые не могут параллельно работать с трансформаторами марок ТМГ и ТМГСУ со схемами соединения обмоток «звезда – звезда с нулевым проводом» и «звезда – звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством», имеющими нулевую группу соединений². Использование разработанного авторами³

¹ Об утверждении комплексного плана развития электроэнергетической сферы до 2025 года с учетом ввода Белорусской атомной электростанции и межотраслевого комплекса мер по увеличению потребления электроэнергии до 2025 года [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 1 марта 2016 г., № 169: в ред. постановления Совета Министров Республики Беларусь от 07. 04. 2021, № 205 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2021; О некоторых мерах по повышению надежности белорусской энергосистемы [Электронный ресурс]: Декрет Президента Респ. Беларусь, 22.12.2018 г., № 493 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2018.

² Силовые масляные трансформаторы [Электронный ресурс]: каталог / Мин. электротехн. завод им. В.И. Козлова. Минск, 2021. Режим доступа: <https://metz.by/files/2021/03/Silovye-maslyanye-transformatory.pdf>. Дата доступа: 20.05.2021.

³ Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: пат. BY 16008 / А.И. Зеленькевич, В.М. Збродыга. Опубл. 30.06.2012.

силового трансформатора со схемой соединения «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» ($Y/2Z_n$) с нулевой группой соединения обмоток позволяет решить эту проблему. Данный силовой трансформатор является устойчивым к воздействиям со стороны нагрузки искажающим качество напряжения и способен обеспечить высокий уровень симметрии и синусоидальности напряжения, а также параллельную работу с серийно выпускаемыми трансформаторами марок ТМГ и ТМГСУ.

Цель настоящей работы – теоретическое и экспериментальное обоснование способности предлагаемого трансформатора обеспечить высокий уровень симметрии и синусоидальности напряжения в сельских электрических сетях, а также возможность его параллельной работы с серийно выпускаемыми трансформаторами.

Основная часть. Разработку, проектирование, изготовление и исследования трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» проводили в Белорусском государственном аграрном техническом университете в период с 2012 г. в рамках госбюджетной тематики кафедры электроснабжения.

Трансформатор состоит из магнитной системы, обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжения с их изоляцией, бака и арматуры. По взаимному расположению стержней и ярм принят плоский несимметричный трехстержневой тип магнитной системы с обмотками в виде круговых цилиндров. Обмотки ВН 1 расположены на стержнях трехстержневого магнитопровода 2 и соединены по схеме «звезда» (рис. 1). Обмотки НН состоят из трех частей 3, 4 и 5, которые размещены на стержнях разных фаз и соединенных последовательно. При этом одна половина фазной вторичной обмотки 5 располагается на том же стержне трехстержневого магнитопровода трансформатора, что и первичная обмотка этой же фазы, а другая половина, которая состоит из одинаковых частей 3 и 4, – на двух других стержнях трехстержневого магнитопровода. Соотношение числа витков в частях фазных обмоток $a_1/a_2/a_3$, $b_1/b_2/b_3$, $c_1/c_2/c_3$ – 0,5/0,25/0,25. Вторичное напряжение трансформатора будет равно векторной сумме напряжений трех частей вторичной обмотки, которые находятся на разных стержнях магнитопровода трансформатора.

В режиме холостого хода питающие напряжения вызывают протекание токов только по фазным обмоткам первичной стороны трансформатора. Так как трансформатор работает с насыщенной магнитной системой, то он является нелинейным элементом электрической цепи, поэтому токи холостого хода будут несинусоидальны, т. е. содержат высшие четные и нечетные гармоники, кроме гармоник, кратных трем, для которых в первичной обмотке, соединенной по схеме «звезда» без нулевого провода, отсутствуют пути для их протекания [18–21].

Реактивные составляющие токов холостого хода первичной обмотки создают переменное магнитное поле и фазные магнитодвижущие силы (МДС). Фазные МДС создают соответствующие магнитные потоки, кривые изменения которых из-за нелинейности магнитной характеристики стали трансформатора отличаются от синусоиды и содержат высшие гармоники, кратные трем, отсутствующие в намагничивающем токе. Основные магнитные потоки первой гармоники замыкаются по пути наименьшего магнитного сопротивления в магнитопроводе. Магнитные потоки, вызываемые высшими гармониками кратными трем, вынуждены замыкаться от ярма

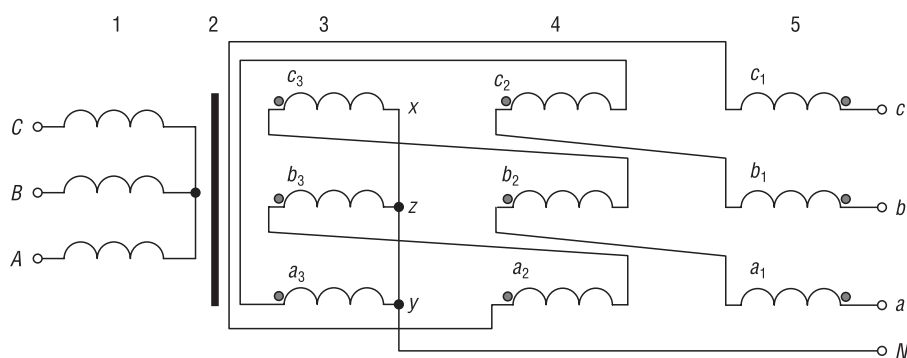


Рис. 1. Схема соединения обмоток силового трансформатора «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом»

Fig. 1. Fig. 1. “Star - double zigzag with a zero wire” winding connection diagram of power transformer

к яму по воздуху и конструктивным элементам со значительным магнитным сопротивлением. Поэтому они невелики, ими можно пренебречь и считать магнитные потоки, создаваемые намагничивающими токами, синусоидальными.

Основные магнитные потоки фаз индуцируют в обмотке ВН ЭДС, отстающие – по фазе на угол 90° . Эти фазные ЭДС обмотки ВН уравнивают соответствующие первичные напряжения силового трансформатора. Основные магнитные потоки фаз также индуцируют ЭДС в трех частях обмоток НН, которые расположены на тех же стержнях магнитопровода. Магнитный поток фазы *A* индуцирует ЭДС в частях вторичных обмоток a_1, a_2, a_3 , принадлежащих разным фазам (рис. 1). Так как части обмоток a_2, a_3 имеют противоположную маркировку выводов по отношению к a_1 , то их ЭДС дополнительно смещены по фазе на угол 180° . Магнитный поток фаз *B* и *C* аналогично индуцирует ЭДС в частях вторичных обмоток b_1, b_2, b_3 и c_1, c_2, c_3 [22]. Фазные ЭДС вторичной стороны трансформатора, создаваемые основным магнитным потоком, будут равны сумме ЭДС трех частей обмотки НН, расположенных на разных стержнях магнитопровода.

Анализ полученных выражений показывает, что фазные ЭДС обмотки НН совпадают по фазе с одноименными ЭДС обмотки ВН, т. е. предлагаемая схема имеет нулевую группу соединения обмоток. Вторичные фазные ЭДС данной схемы на 25 % меньше, чем у схемы соединения «звезда» при том же количестве витков. Для получения требуемого вторичного напряжения предложенная схема требует увеличения количества витков на 25 % во вторичной обмотке [22, 23].

Схема, показывающая направления МДС и магнитных потоков трансформатора в момент времени, согласно заданному направлению токов в обмотках, представлена на рис. 2. Первичные обмотки фаз намагничивают стержни магнитопровода, половины вторичных фазных обмоток

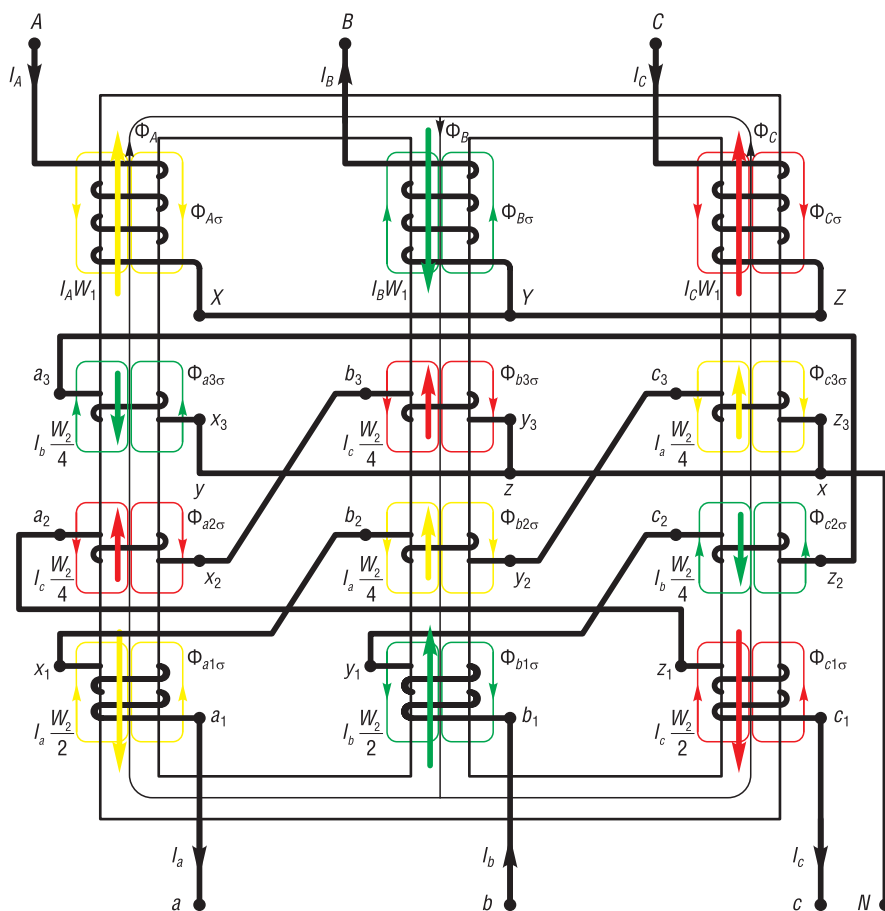


Рис. 2. Схема МДС и магнитных потоков трехфазного силового трансформатора со схемой «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» при симметричном характере нагрузки

Fig. 2. Diagram of MMF and magnetic fluxes of three-phase power transformer with a “star - double zigzag with a zero wire” circuit at symmetrical load

этих же фаз оказывают размагничивающее действие, а четверти фазных обмоток двух других фаз часть периода изменения тока размагничивают стержни, а часть периода – подмагничивают.

Результирующая МДС трехфазной первичной обмотки оказывает намагничивающее действие на трансформатор, если рассматривать трехстержневой магнитопровод в целом, а МДС вторичной обмотки – размагничивающее.

Величина результирующего магнитного поля в трансформаторе не зависит от величины нагрузки, так как токи обмотки ВН изменяются пропорционально изменению вторичных токов, а размагничивающее действие вторичной обмотки компенсируется пропорциональным намагничивающим действием первичной обмотки. Из этого следует, что основной магнитный поток в трансформаторе и индуцируемые им ЭДС в катушках обмоток также не зависят от величины нагрузки.

Величины токов первичной обмотки и их фазовый сдвиг относительно напряжений в нагрузочном режиме будет иным по сравнению с режимом холостого хода. Первичные токи можно определить из уравнений МДС трансформатора. Так как магнитное поле трансформатора распределено в пространстве, то часть его силовых линий замыкается помимо магнитопровода и создает потоки рассеяния в первичной обмотке $\Phi_{A\sigma}$, $\Phi_{B\sigma}$, $\Phi_{C\sigma}$ и вторичной обмотке $\Phi_{a1\sigma}$, $\Phi_{a2\sigma}$, $\Phi_{a3\sigma}$, $\Phi_{b1\sigma}$, $\Phi_{b2\sigma}$, $\Phi_{b3\sigma}$, $\Phi_{c1\sigma}$, $\Phi_{c2\sigma}$, $\Phi_{c3\sigma}$ (рис. 2). Магнитные потоки, обусловленные рассеянием, сцеплены в основном с создающими их фазными обмотками и индуцируют в них ЭДС рассеяния.

Так как напряжения, ЭДС, токи, МДС и магнитные потоки трансформатора с определенными допущениями гармонически изменяются во времени по синусоидальному закону, то основные уравнения трансформатора (1)–(3) могут быть представлены в комплексной форме:

1) уравнения соответствующих напряжений первичной обмотки:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= -\underline{E}_A - \underline{E}_{A\sigma} + \underline{I}_A R_A = -\underline{E}_A + \underline{I}_A (R_A + jx_A), \\ \underline{U}_B &= -\underline{E}_B - \underline{E}_{B\sigma} + \underline{I}_B R_B = -\underline{E}_B + \underline{I}_B (R_B + jx_B), \\ \underline{U}_C &= -\underline{E}_C - \underline{E}_{C\sigma} + \underline{I}_C R_C = -\underline{E}_C + \underline{I}_C (R_C + jx_C),\end{aligned}\quad (1)$$

где \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C – действующие значения напряжений соответствующих первичных фазных обмоток, В; \underline{E}_A , \underline{E}_B , \underline{E}_C – действующие значения ЭДС соответствующих первичных фазных обмоток, В; $\underline{E}_{A\sigma}$, $\underline{E}_{B\sigma}$, $\underline{E}_{C\sigma}$ – действующие значения ЭДС рассеяния соответствующих первичных фазных обмоток, В; \underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C – действующие значения фазных токов соответствующих первичных фазных обмоток, А; R_A , R_B , R_C , x_A , x_B , x_C – активные и реактивные сопротивления соответствующих первичных фазных обмоток, Ом;

2) уравнения соответствующих напряжений вторичной обмотки:

$$\begin{aligned}\underline{U}_a &= \underline{E}_{c3} + \underline{E}_{b2} + \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a\sigma} - \underline{I}_a (R_{a1} + R_{b2} + R_{c3}) = \underline{E}_{c3} + \underline{E}_{b2} + \underline{E}_{a1} - \underline{I}_a [(R_{a1} + R_{b2} + R_{c3}) + j(x_{a1} + x_{b2} + x_{c3})], \\ \underline{U}_b &= \underline{E}_{a3} + \underline{E}_{c2} + \underline{E}_{b1} + \underline{E}_{b\sigma} - \underline{I}_b (R_{b1} + R_{c2} + R_{a3}) = \underline{E}_{a3} + \underline{E}_{c2} + \underline{E}_{b1} - \underline{I}_b [(R_{b1} + R_{c2} + R_{a3}) + j(x_{b1} + x_{c2} + x_{a3})], \\ \underline{U}_c &= \underline{E}_{b3} + \underline{E}_{a2} + \underline{E}_{c1} + \underline{E}_{c\sigma} - \underline{I}_c (R_{c1} + R_{a2} + R_{b3}) = \underline{E}_{b3} + \underline{E}_{a2} + \underline{E}_{c1} - \underline{I}_c [(R_{c1} + R_{a2} + R_{b3}) + j(x_{c1} + x_{a2} + x_{b3})],\end{aligned}\quad (2)$$

где \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c – действующие значения напряжений соответствующих вторичных фазных обмоток, В; \underline{E}_{a1} , \underline{E}_{a2} , \underline{E}_{a3} , \underline{E}_{b1} , \underline{E}_{b2} , \underline{E}_{b3} , \underline{E}_{c1} , \underline{E}_{c2} , \underline{E}_{c3} – действующие значения ЭДС соответствующих частей вторичных обмоток, В; $\underline{E}_{a\sigma}$, $\underline{E}_{b\sigma}$, $\underline{E}_{c\sigma}$ – действующие значения ЭДС рассеяния соответствующих вторичных фазных обмоток, В; \underline{I}_a , \underline{I}_b , \underline{I}_c – действующие значения фазных токов соответствующих вторичных фазных обмоток, А; R_{a1} , R_{a2} , R_{a3} , R_{b1} , R_{b2} , R_{b3} , R_{c1} , R_{c2} , R_{c3} , x_{a1} , x_{a2} , x_{a3} , x_{b1} , x_{b2} , x_{b3} , x_{c1} , x_{c2} , x_{c3} – активные и реактивные сопротивления соответствующих частей вторичных фазных обмоток, Ом;

3) уравнения МДС в стержнях магнитопровода:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A W_1 + \underline{I}_a \frac{W_2}{2} - \underline{I}_b \frac{W_2}{4} - \underline{I}_c \frac{W_2}{4} &= \underline{I}_{A\mu} W_1, \\ \underline{I}_B W_1 + \underline{I}_b \frac{W_2}{2} - \underline{I}_a \frac{W_2}{4} - \underline{I}_c \frac{W_2}{4} &= \underline{I}_{B\mu} W_1, \\ \underline{I}_C W_1 + \underline{I}_c \frac{W_2}{2} - \underline{I}_a \frac{W_2}{4} - \underline{I}_b \frac{W_2}{4} &= \underline{I}_{C\mu} W_1,\end{aligned}\quad (3)$$

где $I_{A\phi}$, $I_{B\phi}$, $I_{C\phi}$ – действующие значения фазных токов рассеяния соответствующих первичных фазных обмоток, А; W_1 , W_2 – количество витков в обмотке одной фазы первичной и вторичной стороны трансформатора, шт.

При рассмотрении работы трансформатора на несимметричную нагрузку использовали метод симметричных составляющих – несимметричную систему токов, напряжений и потоков одинаковой частоты представим в виде трех симметричных систем: прямой, обратной и нулевой последовательности. Величины сопротивлений одних и тех же элементов электрических систем для разных последовательностей различны [24, 25]. При работе трансформатора с несимметричной нагрузкой его фазные напряжения обмотки ВН, которая соединена по схеме «звезда», могут содержать составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. Так как в обмотке ВН нет путей для протекания токов нулевой последовательности, то они равны нулю. Фазные токи обмотки ВН равны векторной сумме составляющих прямой и обратной последовательности. Система фазных токов обмотки ВН является уравновешенной, а их векторная сумма равна нулю. Фазные напряжения и токи обмотки НН силового трансформатора, соединенной по схеме «двойной зигзаг с нулевым проводом», могут содержать составляющие всех последовательностей. Составляющие прямой и обратной последовательности токов протекают по фазным обмоткам НН и замыкаются через нагрузку трансформатора. Векторная сумма их в нейтральной точке стороны НН равна нулю. Величина и направление вторичных токов нулевой последовательности одинаковы во всех трех фазах. Они создают утроенный ток в нулевом проводе, замыкаясь через нулевой проводник и нагрузку. Создаваемые ими МДС также равны нулю. Протекая по частям фазных обмоткам НН, токи нулевой последовательности создают в половинах обмоток a_1 , b_1 , c_1 равные между собой по величине и по фазе МДС, а также в четвертях обмоток a_2 , b_2 , c_2 , a_3 , b_3 , c_3 равные между собой МДС [24]. По половинам фаз обмоток НН a_1 , b_1 , c_1 и четвертям a_2 , b_2 , c_2 , a_3 , b_3 , c_3 , расположенным на каждом из стержней магнитопровода, токи нулевой последовательности протекают в противоположных направлениях с учетом направления намотки и маркировки выводов обмоток. В стержнях отдельных фаз величины МДС нулевой последовательности будут равны нулю, т. е. они компенсируются, вызываемые ими магнитные потоки в стержнях магнитопровода будут также равны нулю.

Обмотка НН уравнивает собственные намагничивающие силы нулевой последовательности самостоятельно, устраняя при этом дополнительное подмагничивание ими стали магнитопровода. ЭДС в обмотках, которые создаются магнитными потоками нулевой последовательности, также будут равны нулю. Трансформатор не будет создавать в питающей сети напряжения нулевой последовательности. В обмотке ВН несимметрия фазных напряжений обусловлена исключительно наличием составляющих обратной последовательности [24]. Во вторичной обмотке напряжения нулевой последовательности будут вызваны исключительно падениями напряжений на сопротивлениях фаз от соответствующих токов. Индуктивные сопротивления частей обмоток токам нулевой последовательности в значительной степени взаимно компенсируются, так как на каждом из стержней магнитопровода половины a_1 , b_1 , c_1 вторичных фазных обмоток намотаны встречно четвертям a_2 , b_2 , c_2 , a_3 , b_3 , c_3 , и преобладает активная составляющая сопротивлений [24, 26].

Каждая из составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности вторичных фазных напряжений равна сумме трех соответствующих значений частей вторичных фазных обмоток. Системы токов прямой и обратной последовательности преобразуются со вторичной стороны на первичную, и наоборот, являясь при этом уравновешенными.

При работе трансформатора на трехфазную нелинейную нагрузку его напряжения и токи могут содержать нечетные и четные высшие гармонические составляющие. При этом 1-я, 4-я, 7-я и т.д. гармоники образуют прямую последовательность, 2-я, 5-я, 8-я и т.д. являются гармониками обратной последовательности. Третья и кратные трем являются гармониками нулевой последовательности. Как доказано ранее, трансформатор не будет генерировать напряжения нулевой последовательности, обусловленные в том числе нелинейной нагрузкой, в питающую сеть [27].

С целью подтверждения теоретических были проведены экспериментальные исследования [28]. При сравнении рассматривались рекомендованные для применения в сельских электри-

ческих сетях наиболее часто встречающиеся схемы с нулевым проводом: «звезда – звезда с нулевым проводом» (Y/Y_n), «звезда – звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» (Y/Y_n-CY), «звезд – зигзаг с нулевым проводом» (Y/Z_n). Моделировали режим нагрузки, когда ток в фазе «с» изменялся от 0,0 до $1,20 I_n$, а в фазах «а» и «b» был равен нулю. Анализатором качества напряжения *Fluke 425* проводили измерения линейных и фазных напряжений и токов сторон ВН и НН трансформатора [28].

Исследования работы трансформатора при нагрузке несимметричного характера проводили, сменяя обмотки на одном магнитопроводе трансформатора, изготовленного в лабораторных условиях. Обмотки были выполнены проводом одного сечения, соответствующего сечению проводов трансформатора со схемой соединения Y/Y_n .

Зависимости значений коэффициентов несимметрии напряжений вторичной стороны от токов нагрузки для каждой из исследованных схем приведены на рис. 3, 4, на которых видно, что увеличение несимметрии нагрузки вызывает рост значений коэффициентов несимметрии напряжений.

Как видно из зависимостей, в силовом трансформаторе со схемой соединения обмоток $Y/2Z_n$ при значении нагрузки равном I_n значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности наименьшие и не превышают 1,7 и 2,9 % соответственно [28]. При проведении эксперимента создавалась такая глубокая несимметрия нагрузки, которая маловероятна при обычной эксплуатации.

При экспериментальных исследованиях работы трансформатора с нагрузкой нелинейного характера ее изменение осуществлялось при помощи реостатов, которые через полупроводниковый однополупериодный выпрямитель были подключены к обмотке НН. Проводили измерения значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U и коэффициентов высших гармонических составляющих напряжений (40 гармоник).

Построенные зависимости (рис. 5) показывают, что с увеличением величины загрузки трансформаторов увеличиваются значения суммарного коэффициента гармонических составляющих. При малой загрузке трансформаторов значения суммарного коэффициента гармонических со-

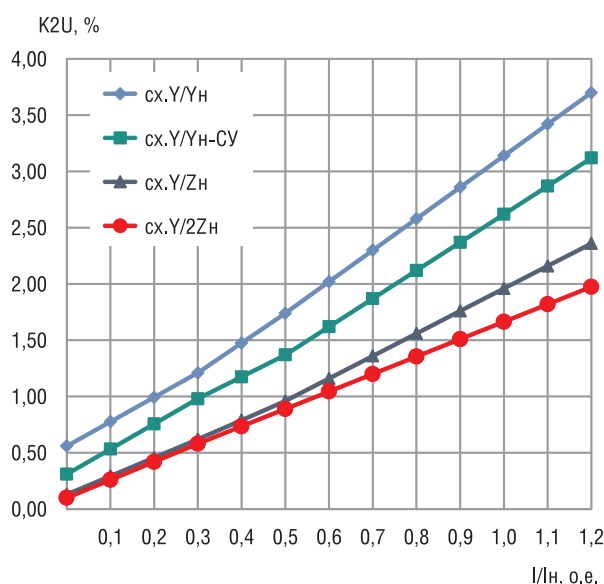


Рис. 3. Зависимость значений коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от тока нагрузки для силовых трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима $I_a = 0$, $I_b = 0$, $I_c = 0-1,2 I_n$

Fig. 3. Dependence of the negative sequence voltage unbalance coefficient values on load current for power transformers with different winding connection diagrams for the mode $I_a = 0$, $I_b = 0$, $I_c = 0-1,2 I_n$

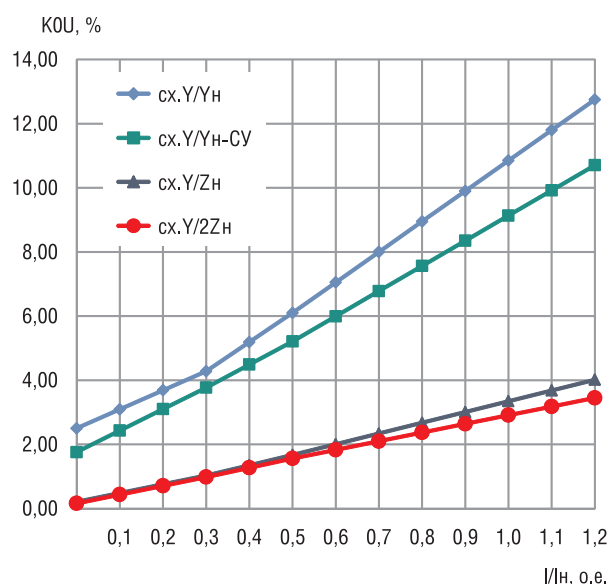


Рис. 4. Зависимость значений коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от тока нагрузки для силовых трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима $I_a = 0$, $I_b = 0$, $I_c = 0-1,2 I_n$

Fig. 4. Dependence of the neutral sequence voltage unbalance coefficient values on load current for power transformers with different winding connection diagrams for the mode $I_a = 0$, $I_b = 0$, $I_c = 0-1,2 I_n$

ставляющих также незначительны, что объясняется небольшой величиной токов высших гармонических составляющих и соответствующих им падений напряжений, которые искажают синусоиду основной частоты. При значении тока нагрузки, равном номинальному, величина суммарного коэффициента гармонических составляющих для схемы соединения обмоток Y/Y_n составляет 3,89 %, для схемы Y/Z_n – 4,66 %, для схемы $Y/2Z_n$ – 3,06 %.

Для определения факторов, обеспечивающих схеме соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» наиболее низкий уровень искажения синусоидальности напряжений, были проведены исследования спектрального состава напряжений. Установлено, что с увеличением степени загрузки трансформаторов значения величин высших гармонических составляющих также увеличиваются, что обусловлено увеличением токов высших гармоник. Скорость роста уровней гармоник напряжений различна для разных схем соединения обмоток, это объясняется неодинаковой способностью схем их компенсировать.

Схема соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» характеризуется практически полным отсутствием высших гармонических составляющих, кратных трем, что обусловлено компенсацией их потоков в стержнях магнитопровода. Незначительно присутствует только 3-я гармоника, вызванная соответствующим падением напряжения на активном сопротивлении и наличием потока рассеяния. Ее коэффициент при номинальной величине нагрузке равен 0,44 %. Более выражены 5-я и 7-я гармоники, коэффициенты которых при номинальной величине нагрузке равны 1,62 и 0,88 % соответственно, что намного ниже допустимых значений. Следует отметить также наличие 11-й (1,39 %), 13-й (0,96), 17-й (0,88), 19-й (0,7 %), 23-й (0,71), 25-й (0,58), 29-й (0,39), 31-й (0,37), 35-й (0,41) и 37-й (0,26 %) гармоник, величины которых при номинальной нагрузке не превышают допустимых значений.

В схеме соединения обмоток Y/Y_n в спектре вторичных напряжений присутствуют все гармонические составляющие. Наибольшие значения имеют 3-я (1,49 %), 5-я (1,74 %), 7-я (1,74 %), 11-я (1,35 %), 13-я (1,03 %), 17-я (1,08 %) гармоники.

У схемы соединения обмоток Y/Z_n более выражена 5-я гармоника – 3,73 %. Присутствуют все нечетные и часть четных гармонических составляющих. Наибольшие значения имеют 7-я – 0,94 %, 11-я – 1,48, 13-я – 1,07, 17-я – 0,93, 19-я – 0,8 % гармоники. Присутствуют все кратные трем гармоники. Наиболее значительная из них 3-я, величина которой при номинальном значении нагрузки составляет 0,47 %.

Заключение. Силовой трехфазный трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» обладает нулевой группой соединения, что позволяет включать его параллельно с широко распространенными трансформаторами «звезда – звезда с нулевым проводом» с целью повышения нагрузочной способности электрических сетей и качества электроэнергии. Величина результирующего магнитного поля трансформатора и создаваемых им в обмотках ЭДС не зависит от величины нагрузки. Увеличение размагничивающего действия обмотки НН компенсируется пропорциональным увеличением намагничивающего действия обмотки ВН.

Несимметрия напряжений трансформатора вызвана наличием составляющих прямой и обратной последовательности, которые преобразуются с вторичной на первичную сторону, и наоборот. Уменьшение несимметрии напряжений обусловлено компенсацией составляющих ну-

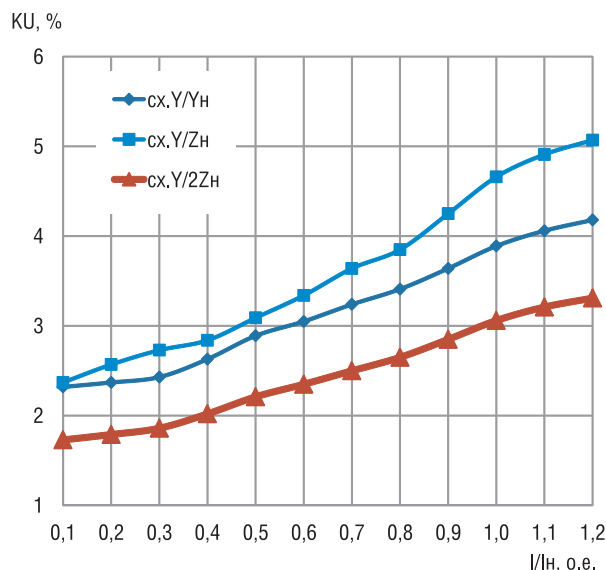


Рис. 5. Зависимости значений суммарного коэффициента гармонических составляющих вторичных напряжений при работе трансформатора на нелинейную нагрузку

Fig. 5. Dependences of the total harmonic component coefficient of the secondary voltages values at non-linear load operation of transformer

левой последовательности. Незначительные падения напряжений вызваны токами нулевой последовательности на активных сопротивлениях фаз обмотки НН. Несинусоидальность напряжений трансформатора вызвана высшими гармониками прямой и обратной последовательности, которые преобразуются с вторичной на первичную сторону, и наоборот, а также падениями напряжений на сопротивлениях обмоток от токов высших гармонических составляющих прямой и обратной последовательности. Уменьшение уровня высших гармонических составляющих напряжения происходит из-за компенсации высших гармоник кратных трем. Остаточные значения вызваны падениями напряжений на активных сопротивлениях фаз обмотки НН от соответствующих токов. Трансформатор не будет эмитировать высшие гармонические составляющие напряжений нулевой последовательности, которые обусловлены нелинейным характером нагрузки, в питающую сеть.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» позволяет получить наиболее высокий уровень симметрии вторичных напряжений при несимметричном характере нагрузки. При наиболее неблагоприятном режиме однофазной нагрузки значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности не превышают 1,7 %, по нулевой последовательности – 2,9 %. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что трансформатор со схемой соединения «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» позволяет получить в 1,2–1,5 раза меньшее значение суммарного коэффициента гармонических составляющих, чем другие исследованные схемы, что подтверждает возможность успешного его применения при работе на нелинейную нагрузку.

Использование данного силового трансформатора с улучшенными характеристиками позволит обеспечить высокий уровень симметрии и синусоидальности напряжения в сельских электрических сетях, а также параллельную работу с серийно выпускаемыми трансформаторами, что снизит потери, повысит срок службы и экономичность работы электрооборудования, а также надежность электроснабжения.

Список использованных источников

1. Power quality harmonics analysis and real measurements data / ed.: G. R. Rey, L. M. Muneta. – InTech, 2011. 289 p. <https://doi.org/10.5772/699>
2. Power quality issues / ed. A. Zobaa. – InTech, 2013. – 292 p. <https://doi.org/10.5772/3373>
3. Шидловский, А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А. К. Шидловский, А. Ф. Жаркин. – Киев : Наук. думка, 2005. – 210 с.
4. Куско, А. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии / А. Куско, М. Томпсон ; пер. с англ. А. Н. Рабодзея. – М. : Додэка-XXI, 2010. – 336 с.
5. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии : руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М. : ЭНАС, 2009. – 454 с.
6. Косоухов, Ф. Д. Показатели качества электрической энергии в распределительных сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками / Ф. Д. Косоухов, А. Г. Гуцинский, М. В. Коломыцев // Проблемы энергообеспечения предприятий АПК и сельских территорий : сб. науч. тр. / С.-Петерб. гос. аграр. ун-т. – СПб., 2008. – С. 24–28.
7. Шерьязов, С. К. Потери мощности в трансформаторах, вызванные нелинейной нагрузкой сельских потребителей / С. К. Шерьязов, А. В. Пятков // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31, № 11. – С. 72–74.
8. Исследование загрузки силовых трансформаторов в системах сельского электроснабжения / И. В. Наумов [и др.] // Надежность и безопасность энергетики. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 282–289. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-282-289>
9. Юдин, М. А. Методики расчета дополнительных потерь электроэнергии в силовом трансформаторе 6-10/0,4 кВ из-за несимметрии и несинусоидальности токов в электрической сети / М. А. Юдин, А. В. Абезин // Мировые научно-технологические тенденции социально-экономического развития АПК и сельских территорий : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию окончания Сталинград. битвы, 31 янв. – 2 февр. 2018 г. / Волгогр. гос. аграр. ун-т. – Волгоград, 2018. – Т. 2. – С. 435–441.
10. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
11. Time factor for determination of power supply system efficiency of rural consumers / V. Bolshev [et al.] // Handbook of research on renewable energy and electric resources for sustainable rural development / ed.: V. Kharchenko, P. Vasant. – Hershey, 2018. – P. 394–420. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3867-7.ch017>

12. A system for monitoring the number and duration of power outages and power quality in 0.38 kV electrical networks / A. Vinogradov [et al.] // *Intelligent computing & optimization* / ed.: P. Vasant, I. Zelinka, G.-W. Weber. – Cham, 2019. – P. 1–10. – (Advances in intelligent systems and computing ; vol. 866). https://doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3_1
13. Fusco, G. Adaptive voltage control in power systems: modeling, design and applications / G. Fusco, M. Russo. – London : Springer, 2007. – 162 p. – (Advances in industrial control). <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-565-3>
14. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения / [Н.П. Боярская и др.] ; под ред. В.П. Довгуна. – Красноярск : СФУ, 2014. – 192 с.
15. Система контроля надежности электроснабжения и качества электроэнергии в электрических сетях 0,38 кВ / А.В. Виноградов [и др.] // *Пром. энергетика*. – 2018. – №3. – С. 14–18.
16. Голиков, И.О. Адаптивное автоматическое регулирование напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ / И.О. Голиков, А.В. Виноградов. – Орел : Орл. ГАУ, 2017. – 159 с.
17. Venkata Ramana, B. Analysis of active and passive power filters for power quality improvement under different load conditions / B. Venkata Ramana, S. Dayasagar Chowdary, G. Venkata Ratnam // *Intern. J. of Advanced Research in Electrical, Electronics & Instrumentation Engineering*. – 2014. – Vol. 3, №8. – P. 11102–11115. <https://doi.org/10.15662/ijareeie.2014.0308035>
18. Петров, Г.Н. Электрические машины : [учебник] : в 3 ч. / Г.Н. Петров. – Изд. 3-е, перераб. – М. : Энергия, 1974. – Ч. 1. – 240 с.
19. Васютинский, С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С.Б. Васютинский. – Л. : Энергия, 1970. – 432 с.
20. Юндин, М.А. О токах нечетных гармоник на вводе 0,4 кВ силового трансформатора 10/0,4 кВ / М.А. Юндин, А.М. Исупова, Т.З. Пономаренко // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. – 2020. – №9. – С. 4–10.
21. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташов [и др.] : под ред. Ю.В. Шарова. – М. : Изд. дом МЭИ, 2006. – 320 с.
22. Прищепов, М.А. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // *Агропанорама*. – 2017. – №5. – С. 16–25.
23. Зеленкевич, А.И. О возможности применения трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для повышения качества электроэнергии / А.И. Зеленкевич, М.А. Прищепов, В.М. Збродыга // *Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. / Саратов. гос. аграр. ун-т. – Саратов, 2018. – С. 18–21.*
24. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // *Агропанорама*. – 2018. – №6. – С. 25–31.
25. Коваленко, П.В. Потери и качество электроэнергии в системах электроснабжения при несимметрии токов и напряжений / П.В. Коваленко. – Новочеркасск : Оникс+, 2007. – 226 с.
26. Зеленкевич, А.И. Работа трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» и «звезда-зигзаг» при однофазной несимметричной нагрузке / А.И. Зеленкевич // *Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. / Саратов. гос. аграр. ун-т. – Саратов, 2020. – С. 23–26.*
27. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при нелинейном характере нагрузки / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // *Агропанорама*. – 2018. – №1. – С. 9–19.
28. Прищепов, М.А. Экспериментальные исследования работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М.А. Прищепов, А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга // *Агропанорама*. – 2019. – №5. – С. 38–41.

References

1. Rey G.R., Muneta L.M. (eds.). *Power quality harmonics analysis and real measurements data*. InTech, 2011. 289 p. <https://doi.org/10.5772/699>
2. Zobaa A. (ed.). *Power quality issues*. InTech, 2013. 292 p. <https://doi.org/10.5772/3373>
3. Shidlovskii A.K., Zharkin A.F. *Higher harmonics in low-voltage electrical networks*. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 2005. 210 p. (in Russian).
4. Kusko A., Thompson M.T. *Power quality in electrical systems*. New York, McGraw-Hill, 2007. 225 p.
5. Zhelezko Yu.S. *Power losses. Reactive power. Electricity quality: a guide for practical calculations*. Moscow, ENAS Publ., 2009. 454 p. (in Russian).
6. Kosoukhov F.D., Gushchinskii A.G., Kolomytsev M.V. Indicators of the quality of electrical energy in distribution networks of 0.38 kV with utility loads. *Problemy energoobespecheniya predpriyatii APK i sel'skikh territorii: sbornik nauchnykh trudov* [Problems of energy supply for agricultural enterprises and rural areas: a collection of scientific papers]. St. Petersburg, 2008, pp. 24–28 (in Russian).
7. Sheryazov S.K., Pyatkov A.V. Power losses in transformers caused by non-linear loads of rural consumers. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AIC*, 2017, vol. 31, no. 11, pp. 72–74 (in Russian).

8. Naumov I.V., Karamov D.N., Tretyakov A.N., Yakupova M.A., Fedorinova E.S. Study of power transformer loading in rural power supply systems. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 282-289. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-282-289>
9. Yudin M.A., Abezin A.V. Methods for calculating additional losses of electricity in a power transformer 6-10 / 0.4 kV due to asymmetry and non-sinusoidal currents in the electrical network. *Mirovye nauchno-tehnologicheskie tendentsii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya APK i sel'skikh territorii: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 75-letiyu okonchaniya Stalingradskoi bitvy, 31 yanvarya - 2 fevralya 2018 g.* [World scientific and technological trends in the socio-economic development of the agro-industrial complex and rural areas: proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the end of the Battle of Stalingrad, January 31 - February 2, 2018]. Volgograd, 2018, vol. 2, pp. 435-441 (in Russian).
10. Zhezhelenko I.V. *Higher harmonics in industrial power supply systems*. 4th ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 331 p. (in Russian).
11. Bolshev V., Vasiliev A., Vinogradov A., Semenov A., Borodin M. Time factor for determination of power supply system efficiency of rural consumers. *Handbook of research on renewable energy and electric resources for sustainable rural development*. Hershey, 2018, pp. 394-420. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3867-7.ch017>
12. Vinogradov A., Bolshev V., Vinogradova A., Kudina T., Borodin M., Selesneva A., Sorokin N. A system for monitoring the number and duration of power outages and power quality in 0.38 kV electrical networks. *Intelligent computing & optimization. Advances in intelligent systems and computing*. Vol. 866. Cham, 2019, pp. 1-10. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3_1
13. Fusco G., Russo M. *Adaptive voltage control in power systems: modeling, design and applications*. London, Springer, 2007. 162 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-565-3>
14. Dovgun V.P. (ed.). *Synthesis of filter compensating devices for power supply systems*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2014. 192 p. (in Russian).
15. Vinogradov A.V., Borodin M.V., Vinogradova A.V., Selezneva A.O., Bol'shev V.E. System for monitoring the reliability of power supply and quality of electricity in 0.38 kV networks. *Promyshlennaya energetika = Industrial Power Engineering*, 2018, no. 3, pp. 14-18 (in Russian).
16. Golikov I.O., Vinogradov A.V. *Adaptive automatic voltage regulation in rural 0.38 kV electrical networks*. Orel, Orel State Agrarian University, 2017. 159 p. (in Russian).
17. Venkata Ramana B., Dayasagar Chowdary S., Venkata Ratnam G. Analysis of active and passive power filters for power quality improvement under different load conditions. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2014, vol. 3, no. 8, pp. 11102-11115. <https://doi.org/10.15662/ijareeie.2014.0308035>
18. Petrov G.N. *Electric cars. Part 1*. 3rd ed. Moscow, Energiya Publ., 1974. 240 p. (in Russian).
19. Vasyutinskii S.B. *Questions of theory and calculation of transformers*. Leningrad, Energiya Publ., 1970. 432 p. (in Russian).
20. Yundin M.A., Isupova A.M., Ponomarenko T.Z. About of odd harmonic currents at 0.4 kV input of 10/0.4 kV power transformer. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: Operation and Repair], 2020, no. 9, pp. 4-10 (in Russian).
21. Kartashev V.N., Tul'skii R.G., Shamonov Yu.V., Sharov A.Yu. *Power quality management*. Moscow, Publishing House of the Moscow Power Engineering Institute, 2006. 320 p. (in Russian).
22. Prishchepov M.A., Zbrodyga V.M., Zelen'kevich A.I. *Features of transformation of electric energy in a transformer with a "star - double zigzag with a neutral wire" winding connection scheme*. Agropanorama, 2017, no. 5, pp. 16-25 (in Russian).
23. Zelen'kevich A.I., Prishchepov M.A., Zbrodyga V.M. 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 prirodoobustroistve i zashchite v chrezvychainykh situatsiyakh: materialy IV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Innovations in environmental management and protection in emergency situations: proceedings of the IV international scientific-practical conference]. Saratov, 2018, pp. 18-21 (in Russian).
24. Prishchepov M.A., Zbrodyga V.M., Zelen'kevich A.I. Operation of a transformer with a "star-double zigzag with a neutral wire" winding connection at an unbalanced load. *Agropanorama*, 2018, no. 6, pp. 25-31 (in Russian).
25. Kovalenko P.V. *Losses and quality of electricity in power supply systems with unbalanced currents and voltages*. Novocherkassk, Oniks+ Publ., 2007. 226 p. (in Russian).
26. Zelen'kevich A.I. Operation of transformers with winding connection schemes "star-double zigzag with neutral wire" and "star-zigzag" at single-phase unbalanced load. *Innovatsii v prirodoobustroistve i zashchite v chrezvychainykh situatsiyakh: materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Innovations in environmental management and protection in emergency situations : proceedings of the VII international scientific-practical conference]. Saratov, 2020, pp. 23-26 (in Russian).
27. Prishchepov M.A., Zbrodyga V.M., Zelen'kevich A.I. Operation of a transformer with a "star-double zigzag with a neutral wire" winding connection scheme with a non-linear nature of the load. *Agropanorama*, 2018, no. 1, pp. 9-19 (in Russian).
28. Prishchepov M.A., Zelen'kevich A.I., Zbrodyga V.M. Experimental studies of the operation of a transformer with a "star-double zigzag with a neutral wire" winding connection scheme with an unbalanced load. *Agropanorama*, 2019, no. 5, pp. 38-41 (in Russian).

Информация об авторах

Прищепов Михаил Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электрооборудования сельскохозяйственных предприятий, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: pma.eshp@bsatu.by. <http://orcid.org/0000-0002-5359-3861>

Зеленькевич Александр Иосифович – аспирант, старший преподаватель кафедры электроснабжения, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: alex_zelenkewich@tut.by. <http://orcid.org/0000-0002-9198-6113>

Збродыга Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой электроснабжения, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: vlad1.72@mail.ru. <http://orcid.org/000-0002-6545-8114>

Information about the authors

Mikhail A. Prischepov - D. Sc. (Engineering), Assistant Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., Minsk 220023, Republic of Belarus). E-mail: pma.eshp@bsatu.by. <http://orcid.org/0000-0002-5359-3861>

Alexander I. Zelenkevich - Postgraduate student, Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., Minsk 220023, Republic of Belarus). E-mail: alex_zelenkewich@tut.by. <http://orcid.org/0000-0002-9198-6113>

Vladimir M. Zbrodyga - Ph. D. (Engineering), Assistant Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., Minsk 220023, Republic of Belarus). E-mail: vlad1.72@mail.ru. <http://orcid.org/000-0002-6545-8114>