

ENERGETICS

Прищепов Михаил Александрович

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры электрооборудования сельскохозяйственных предприятий,
Республика Беларусь

Зеленькевич Александр Иосифович

старший преподаватель кафедры электроснабжения,
Республика Беларусь

Збродыга Владимир Михайлович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроснабжения
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
Республика Беларусь

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УРОВНЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ ПРИ РАБОТЕ НА НЕЛИНЕЙНУЮ НАГРУЗКУ ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ»

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при работе на нелинейную нагрузку.

Ключевые слова: трансформатор, схема соединения обмоток, нелинейная нагрузка, высшие гармоники напряжений и токов.

Высшие гармоники токов и напряжений снижают эффективность процессов генерации, передачи и использования электроэнергии [1-4]. Уменьшение уровней высших гармоник можно обеспечить рациональным построением схемы электрической сети и применением специальных корректирующих устройств: линейных дросселей, пассивных и активных фильтров высших гармоник [5-8], питающих трансформаторов со

специальными схемами соединения обмоток [9-13]. В частности, в сельских электрических сетях для этой цели авторы рассматривают возможность использования трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» ($Y/2Z_n$) [14].

Целью исследований является экспериментальное подтверждение способности трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» обеспечивать наиболее высокий уровень синусоидальности напряжений на его выводах, по сравнению с другими схемами, при работе на нелинейную нагрузку.

Для сравнительной оценки взяты рекомендованные к применению в сельских электросетях и наиболее распространенные схемы с нулевым проводом «звезда-звезда с нулевым проводом» (Y/Y_n), «звезда-зигзаг с нулевым проводом» (Y/Z_n).

Исследования работы трансформатора при работе на нелинейную нагрузку проводились с использованием одного магнитопровода путем смены обмоток. Исследуемый трансформатор был изготовлен в лабораторных условиях. При исследовании нагрузка трансформатора и ее изменение в пределах от $0,1 I_n$ до $1,3 I_n$ обеспечивалось при помощи ползунковых реостатов, подключенных к вторичной обмотке через трехфазный двухполупериодный полупроводниковый выпрямитель. Измерялись значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и коэффициенты высших гармонических составляющих напряжений (до 40-й гармоники включительно) с помощью анализатора качества напряжения Fluke 435 при различных значениях нелинейной нагрузки.

Экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы [15-19], что у трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» искажения фазных и линейных напряжений первичной стороны несущественны даже при глубокой несинусоидальности нагрузки. На вторичной стороне установлено искажение синусоидальности напряжений, различное для разных схем соединения обмоток, которое увеличивается с ростом несинусоидальности нагрузки.

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих вторичных напряжений приведены в таблице.

Таблица 1

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих вторичных напряжений при работе трансформатора на нелинейную нагрузку

Схема соединения обмоток трансформатора	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений, K_U												
	при I/I_n , %												
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
Y/Y _n	2,32	2,37	2,43	2,63	2,89	3,05	3,24	3,41	3,64	3,89	4,06	4,18	4,42
Y/Z _n	2,37	2,57	2,73	2,84	3,09	3,34	3,64	3,85	4,25	4,66	4,91	5,07	5,40
Y/2Z _n	1,73	1,79	1,86	2,02	2,21	2,35	2,50	2,65	2,85	3,06	3,21	3,31	3,52

По этим данным построены зависимости (рисунок 1) из которых видно, что в режиме малой загрузки трансформаторов значения суммарного коэффициента гармонических составляющих незначительны. Это объясняется небольшой величиной токов высших гармоник и соответствующих им падений напряжений, которые искажают синусоиду основной частоты.

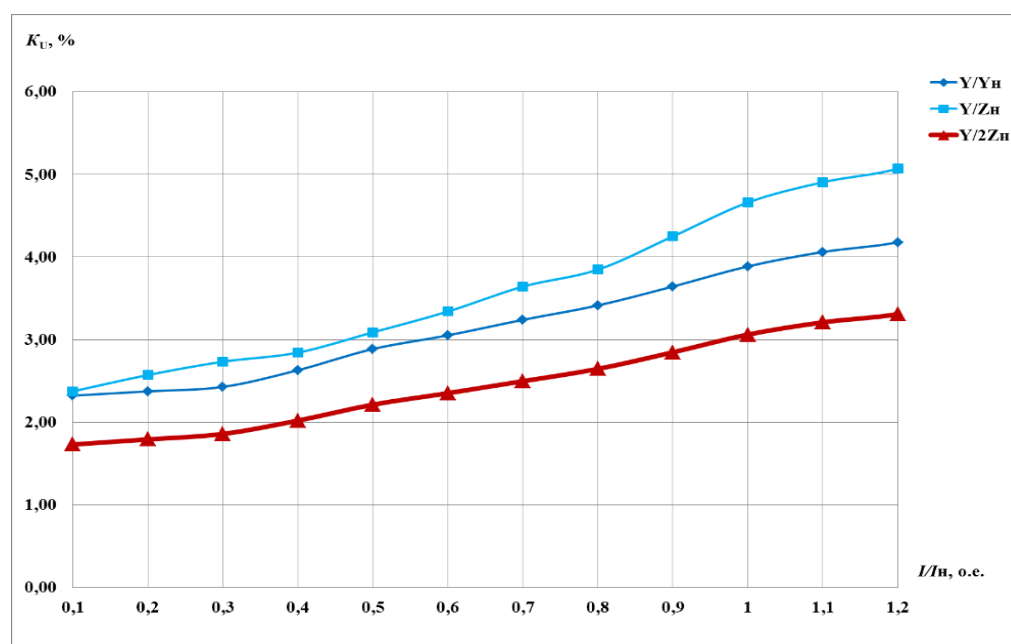


Рис. 1. Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих вторичных напряжений при работе трансформатора на нелинейную нагрузку

С увеличением загрузки трансформаторов увеличиваются значения суммарного коэффициента гармонических составляющих и при номинальном значении тока нагрузки для схемы соединения обмоток $Y/2Z$ его значение составляет 3,06 %, для схемы Y/Y_n – 3,89 %, для схемы Y/Z_n – 4,66 %.

Для определения факторов, за счет которых схема соединения обмоток «звезда-двойной зигзагом с нулевым проводом» обеспечивает наиболее высокий уровень синусоидальности напряжений, проведены исследования спектрального состава напряжений. Спектры высших гармоник вторичных фазных напряжений при работе трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзагом с нулевым проводом» при работе на нелинейную нагрузку представлены на рисунке 2.

Установлено, что при росте загрузки трансформаторов увеличиваются и уровни высших гармоник напряжений, что обусловлено ростом токов высших гармоник. Причем темпы роста уровней гармоник напряжений различны для разных схем соединения обмоток, что объясняется разной способностью схем их компенсировать.

Для схемы соединения обмоток «звезда-двойной зигзагом с нулевым проводом» характерно практически полное отсутствие высших гармоник, кратных трем, за счет компенсации их потоков в стержнях магнитопровода. Присутствует незначительно только третья гармоника, вызванная падением напряжения на активном сопротивлении тока этой гармоники и наличием соответствующего потока рассеяния. Ее коэффициент при номинальной нагрузке равен 0,44 %. Наиболее выражены пятая и седьмая гармоники, коэффициенты которых при номинальной нагрузке равны соответственно 1,62 % и 0,88 %, что намного ниже допустимых значений. Также следует отметить наличие одиннадцатой (1,39 %), тринадцатой (0,96 %), семнадцатой (0,88 %), девятнадцатой (0,75 %), двадцать третьей (0,71 %), двадцать пятой (0,58 %), двадцать девятой (0,39 %), тридцать первой (0,37 %), тридцать пятой (0,41 %) и тридцать седьмой (0,26 %) гармоник, величины которых при номинальной нагрузке не превышают допустимых значений.

У схемы соединения обмоток Y/Y_n в спектре вторичных напряжений

присутствуют все гармоники. Наиболее значительна третья гармоника (1,49 %), пятая (1,74 %), седьмая (1,74 %), одиннадцатая (1,35 %), тринадцатая (1,03 %), семнадцатая (1,08 %).

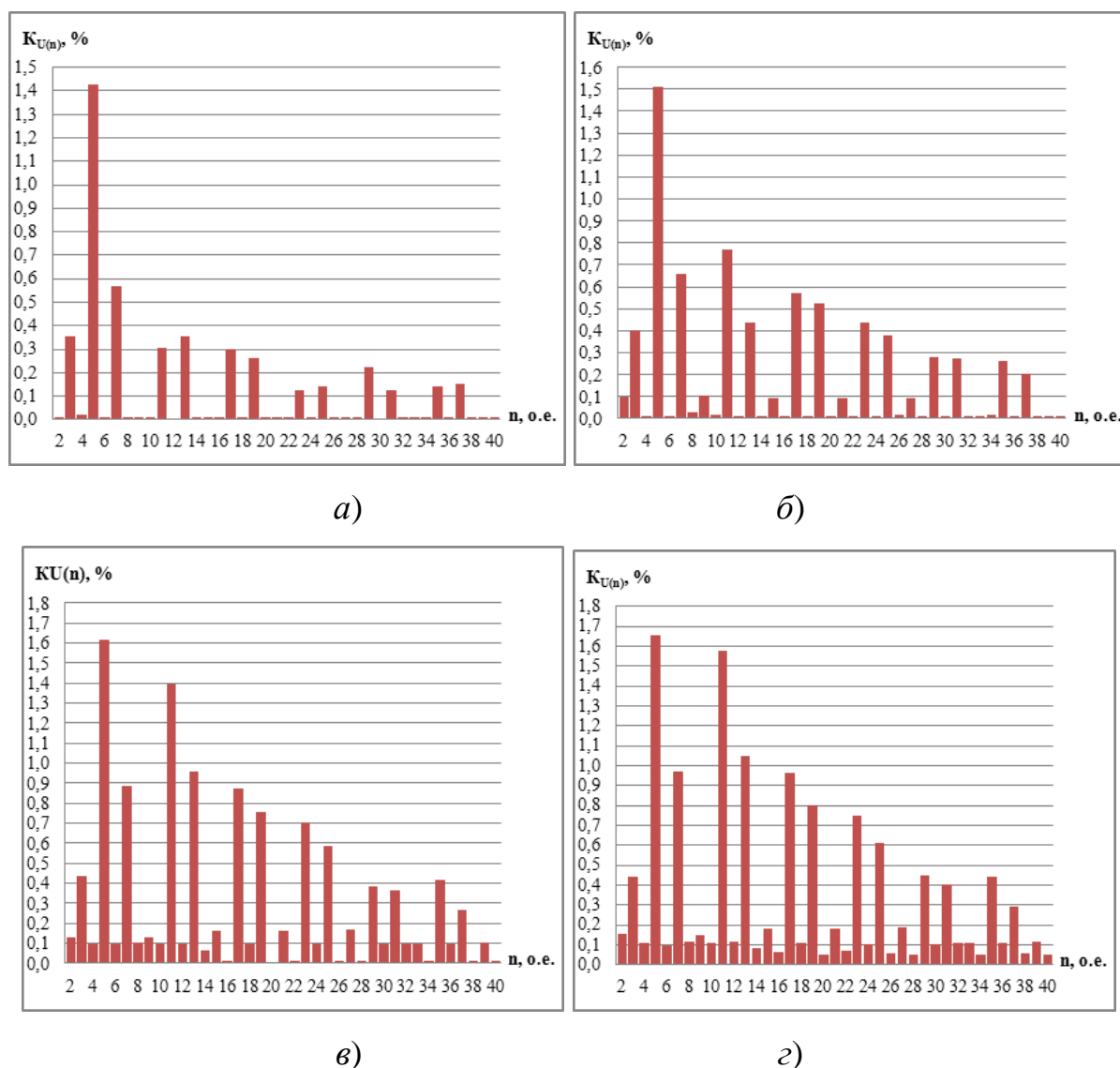


Рис. 2. Спектры высших гармоник вторичных фазных напряжений при работе трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзагом с нулевым проводом» при работе на нелинейную нагрузку: а – нагрузка $I=0,1I_N$; б - нагрузка $I=0,5I_N$; в – нагрузка $I=I_N$; г – нагрузка $I=1,2I_N$;

У схемы соединения обмоток Y/Z_N наиболее выражена пятая гармоника – 3,73 %. Присутствуют все нечетные и часть четных гармоник. Наибольшие значения принимают седьмая – 0,94 %, одиннадцатая – 1,48 %, тринадцатая –

1,07%, семнадцатая – 0,93 %, девятнадцатая – 0,8 %. Присутствуют все гармоники, кратные трем. Наиболее значительная из них третья. При номинальной нагрузке величина ее составляет 0,47 %.

Результаты экспериментальных исследований показали, что схема соединения обмоток «звезда-двойной зигзагом с нулевым проводом» обеспечивает в 1,2...1,5 раза меньшее значение коэффициента искажения синусоидальности напряжений, чем другие исследованные схемы, и может успешно применяться при работе трансформатора на нелинейную нагрузку.

Для определения спектрального состава токов произведены экспериментальные исследования высших гармоник фазных токов вторичной обмотки при работе трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзагом с нулевым проводом» на нелинейную нагрузку. Трансформатор включали на нагрузку через полупроводниковый выпрямитель. Высшие гармоники измеряли прибором Fluke 435. Нагрузка трансформатора изменялась в диапазоне от нуля до 1,2 от номинального значения. Измерения производились по трем фазам. Результаты представлены на рисунке 3 в виде распечатки экранных показаний измерительного прибора.

Для схемы соединения обмоток «звезда-двойной зигзагом с нулевым проводом» характерно практически полное отсутствие высших гармоник, кратных трем, в кривых фазных токов вторичной стороны. Присутствует незначительно только третья гармоника. При изменении нагрузки трансформатора от холостого хода до $1,2I_n$ ее среднее значение по трем фазам изменяется от 8,3% до 1,6%.

Наиболее выражена пятая гармоника тока – от 24,3% до 7,6% при изменении нагрузки трансформатора от холостого хода до $1,2I_n$. Также следует отметить наличие нечетных гармоник: седьмой, одиннадцатой, тринадцатой, семнадцатой. Уровни четных гармоник на порядок ниже соседних нечетных.

Экспериментальные исследования подтвердили результаты теоретического анализа. При работе трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзагом с нулевым проводом» на нелинейную

нагрузку в спектре фазных токов вторичной обмотки практически отсутствуют высшие гармоники кратные трем, что снижает несинусоидальность кривых токов и напряжений.

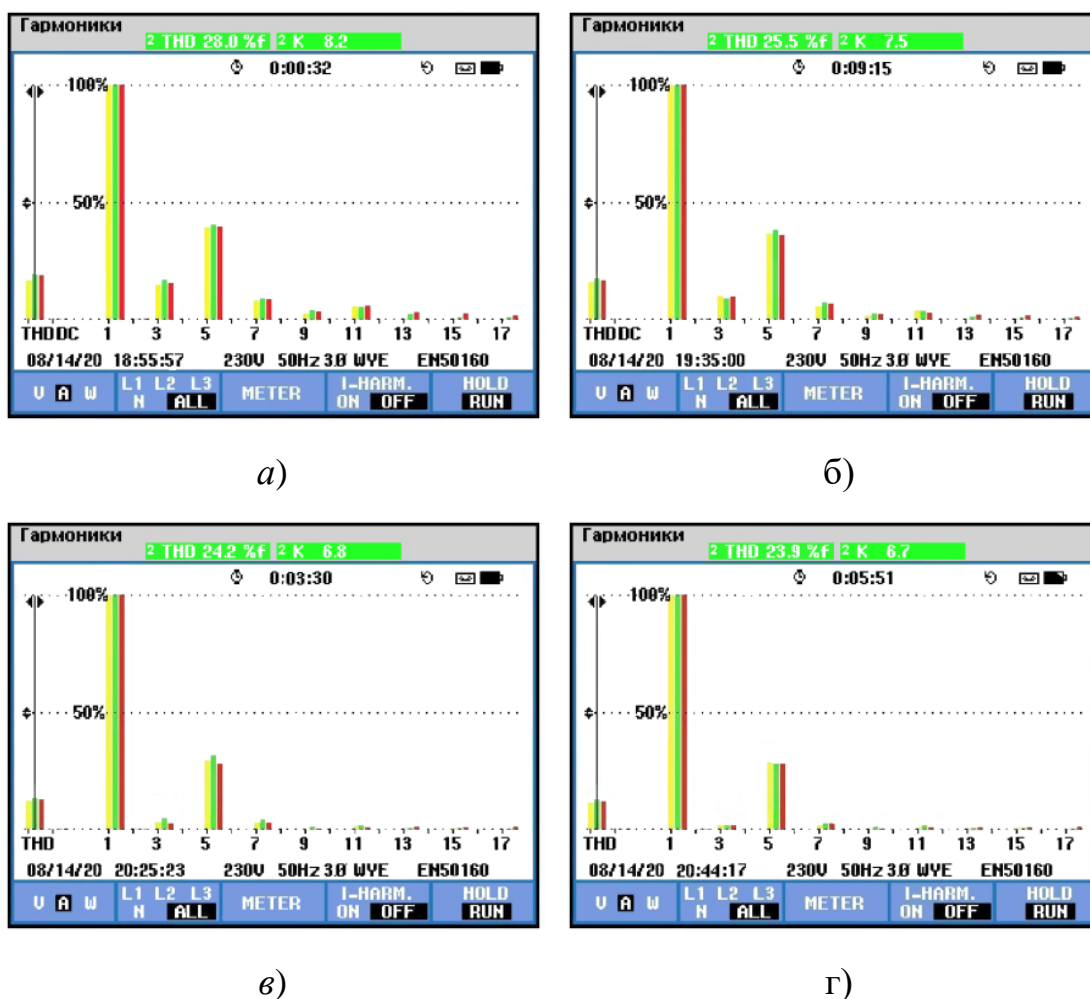


Рис. 3. Спектры высших гармоник вторичных фазных токов при работе трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзагом с нулевым проводом» при работе на нелинейную нагрузку:
 а – нагрузка $I=0,1I_n$; б – нагрузка $I=0,5I_n$; в – нагрузка $I=I_n$; г – нагрузка $I=1,2I_n$

Заключение

1. Улучшение формы кривой напряжения происходит вследствие компенсации кратных трем высших гармоник, а их остаточные значения обусловлены падениями напряжений от соответствующих токов на активных сопротивлениях фаз вторичной обмотки. Трансформатор не будет

генерировать высшие гармоники напряжений нулевой последовательности, обусловленные нелинейной нагрузкой, в питающую сеть.

2. Результаты экспериментальных исследований показали, что схема соединения обмоток «звезда-двойной зигзагом с нулевым проводом» обеспечивает в 1,2...1,5 раза меньшее значение коэффициента искажения синусоидальности напряжений, чем другие исследованные схемы, и может успешно применяться при работе трансформатора на нелинейную нагрузку.

3. Для схемы соединения обмоток «звезда-двойной зигзагом с нулевым проводом» характерно практически полное отсутствие высших гармоник, кратных трем, в кривых фазных токов вторичной стороны. Присутствует незначительно только третья гармоника. При изменении нагрузки трансформатора от холостого хода до $1,2I_n$ ее среднее значение по трем фазам изменяется от 8,3% до 1,6%. Наиболее выражена пятая гармоника тока – от 24,3% до 7,6% при изменении нагрузки трансформатора от холостого хода до $1,2I_n$.

Список источников:

1. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко. – 5-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2004. - 358 с.
2. Куско, А. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон: пер. с англ. Рободзея А.Н. М.: Додэка-XXI, 2008. - 336 с.
3. Жежеленко, И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. - 4-е изд. - Москва: Энергоатомиздат, 2005. - 261 с.
4. Карташев, И.И. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. - 320 с.
5. Akagi, H. Active harmonic filters / H. Akagi // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, iss. 12 – P. 2128-2141.
6. Barrero, F. Active power filters for line conditioning: a critical evaluation / F. Barrero, S. Martinez, F. Yeves, P.M. Martinez // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 1 – P. 319-325.
7. Литовкин Г.И., Орлов А.И., Третьяков А.Н. Средства улучшения качества электрической энергии на сельскохозяйственных предприятиях // Электротехника. 2005. - № 12. - С. 29-32.
8. Rivas D., Moran L., Espinosa J. Improving passive filter compensation performance with

active techniques / IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 50, no. 1, February 2003, pp. 161-170.

9. Янукович, Г.И. Исследование трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y -разомкнутый треугольник с целью использования его в сельских электрических сетях 380/220 В для повышения качества напряжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02/ Г.И. Янукович; ЧИМЭСХ. - Челябинск, 1975. - 20 с.
10. Шевчик, Н.Е. Повышение качества напряжения в сельских сетях путём использования в них трансформаторов с дополнительными обмотками: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03/ Н.Е. Шевчик; ЧИМЭСХ. - Челябинск, 1985. - 16 с.
11. Счастный, В.П. Обеспечение качества напряжения в сельскохозяйственных электроустановках с трёхфазными однотактными выпрямителями: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02/ В.П. Счастный. - Минск, 1987. - 185 л.
12. Протосовицкий, И.В. Использование трансформаторов Y/Y_n с общестержневой симметрирующей обмоткой в сельских электрических сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02/ И.В. Протосовицкий. - Минск, 1995. - 156л.
13. Збродыга, В.М. Улучшение показателей несинусоидальности и несимметрии напряжений в электроустановках сельскохозяйственного назначения применением трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02/ В.М. Збродыга. - Минск, 2010. - 20 с.
14. Патент № 16008 Трёхфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: / А.И. Зеленькевич, В.М. Збродыга; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» - № а 20100121; заявл. 2010.02.01; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 180-181.
15. 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. Зеленькевич // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 16-25.
16. 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. Зеленькевич // Агропанорама. – 2018. – № 1. – С. 9-19.
17. 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. Зеленькевич // Агропанорама. – 2018. – № 6. – С. 25-31.
18. 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.

19. 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. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59, № 3. – С. 355–366. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-3-355-366>.