

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ» ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

М.А. Прищепов,

профессор каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

А.И. Зеленкевич,

ст. преподаватель каф. электроснабжения БГАТУ

В.М. Збродыга,

заведующий каф. электроснабжения БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье представлены результаты экспериментальных исследований работы трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом», «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством», «звезда-зигзаг с нулевым проводом», «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке.

Ключевые слова: трансформатор, схема соединения обмоток, несимметрия токов и напряжений.

The article presents the results of experimental studies of transformers with «Y-connection winding-zero wire», «Y-connection winding with zero wire with a balanced converter», «forked wye with zero wire», «double forked wye with zero wire» at unbalanced load.

Keywords: transformer, winding circuit, currents and voltage unbalance.

Введение

Несимметрия электрических нагрузок вызывает несимметрию напряжений. При этом трехфазные электроприемники питаются несимметричным напряжением, а однофазные – оказываются под повышенным или пониженным напряжением. Отклонение напряжения у электроприемников перегруженной фазы может превысить допустимое ГОСТ 32144-2013 значение.

При несимметричном режиме существенно ухудшаются условия работы, как самих электроприемников, так и всех элементов сети, снижается надежность работы электрооборудования и системы электроснабжения в целом. Несимметрия токов и напряжений вызывает дополнительные потери мощности, снижает срок службы электрооборудования, уменьшает экономические показатели его работы.

Уменьшить несимметрию напряжений можно применением специальных корректирующих устройств. В системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей авторы рассматривают возможность использования для этого трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» ($Y/2Z_n$) [1-3].

Целью исследований является экспериментальное подтверждение способности трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» обеспечивать наиболее высокий уровень симметрии напряжений на его выводах, по сравнению с другими схемами, при несимметричном характере нагрузки.

Основная часть

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-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» (Y/Y_n -СУ), «звезда-зигзаг с нулевым проводом» (Y/Z_n).

Исследования работы трансформатора при несимметричном характере нагрузки проводились с использованием одного магнитопровода путем смены обмоток. Исследуемый трансформатор был изготовлен в лабораторных условиях. Обмотки выполнены без изменения сечений и соответствуют сечению проводов трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n .

При исследовании, нагрузка трансформатора и ее изменение обеспечивалось при помощи ползунковых реостатов. Были приняты следующие режимы нагрузки:

1. Ток в одной из фаз изменялся в пределах от 0 до $1,2 I_n$, а в двух других фазах был равен номинальному I_n (режим 1).

2. Ток в одной из фаз изменялся в пределах от 0 до $1,2 I_n$, в другой фазе был равен нулю, в третьей фазе был равен номинальному I_n (режим 2).

3. Ток в одной из фаз изменялся в пределах от 0 до $1,2 I_n$, а в двух других фазах был равен нулю (режим 3).

В указанных режимах работы измерялись линейные и фазные напряжения трансформаторов высшей и низшей сторон, токи низшей стороны, коэффициен-

ты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности при помощи анализатора качества напряжения Fluke 425.

Экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы [3], что у трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» искажения фазных и линейных напряжений первичной стороны и их отклонения от номинального значения незначительны даже при глубокой несимметрии нагрузки. На вторичной стороне установлено искажение симметрии напряжений, различное для разных схем соединения обмоток,

которое увеличивается с ростом несимметрии нагрузки.

Коэффициенты несимметрии первичных напряжений по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» практически равны нулю. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжений вторичной стороны от токов нагрузки для принятых режимов, для каждой из исследованных схем приведены на рисунках 1-6, из которых видно, что рост несимметрии нагрузки вызывает увеличение коэффициентов несимметрии напряжений.

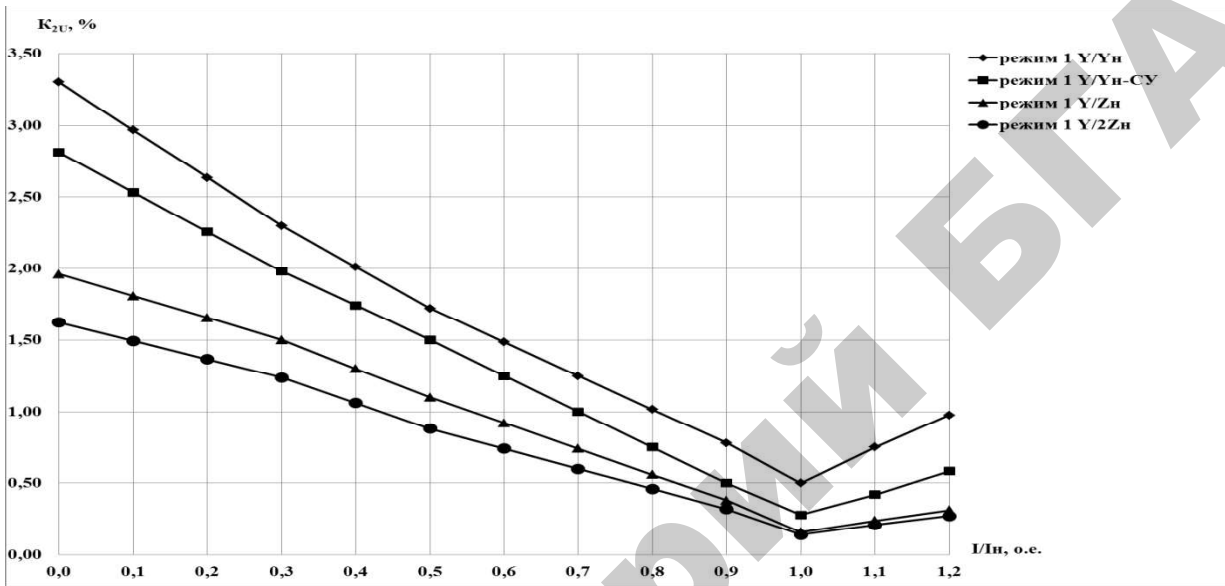


Рис. 1. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима 1 ($I_a = 0 \dots 1,2 I_n$, $I_b = I_n$, $I_c = I_n$)

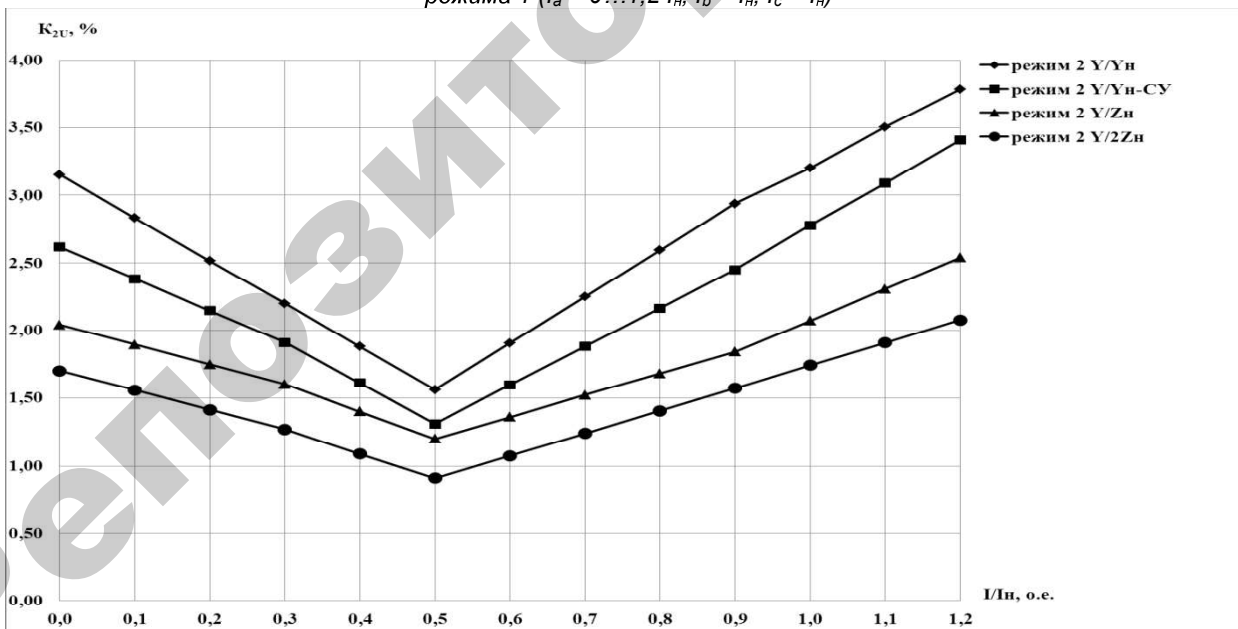


Рис. 2. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима 2 ($I_a = 0$, $I_b = 0 \dots 1,2 I_n$, $I_c = I_n$)

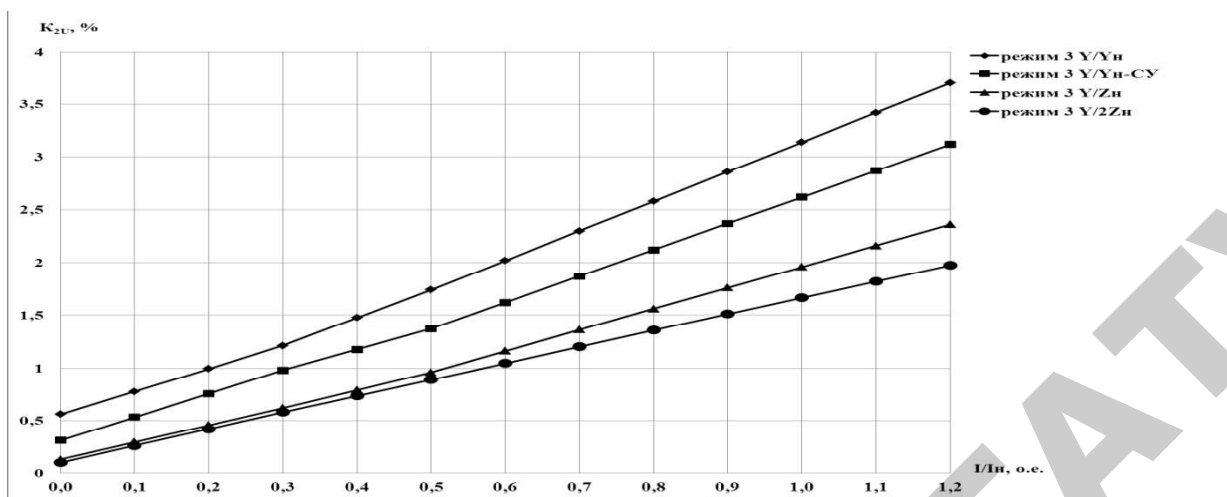


Рис. 3. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима 3 ($I_a = 0, I_b = 0, I_c = 0 \dots 1, 2 I_H$)

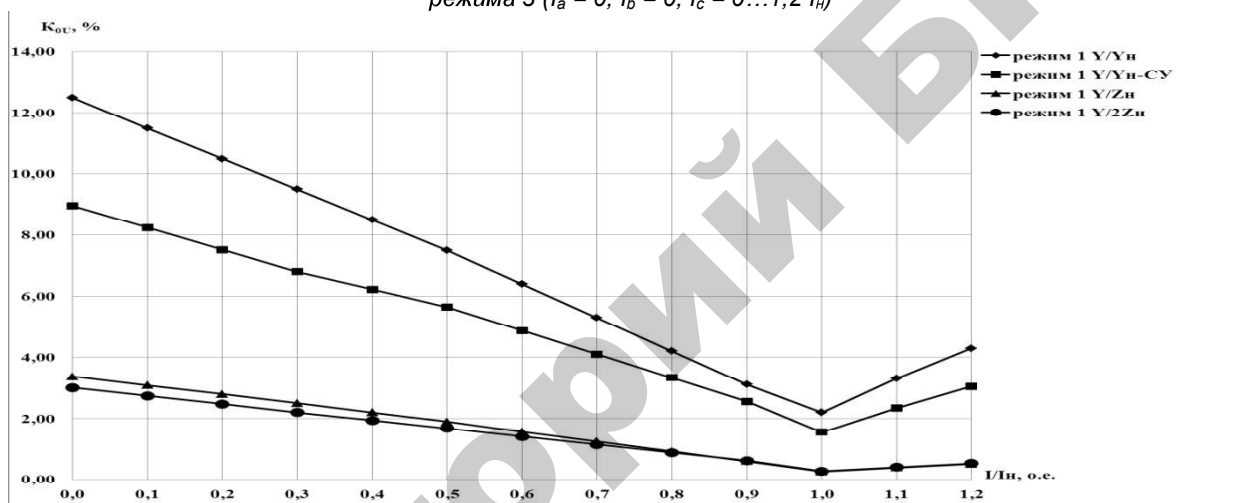


Рис. 4. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима 1 ($I_a = 0 \dots 1, 2 I_H, I_b = I_H, I_c = I_H$)

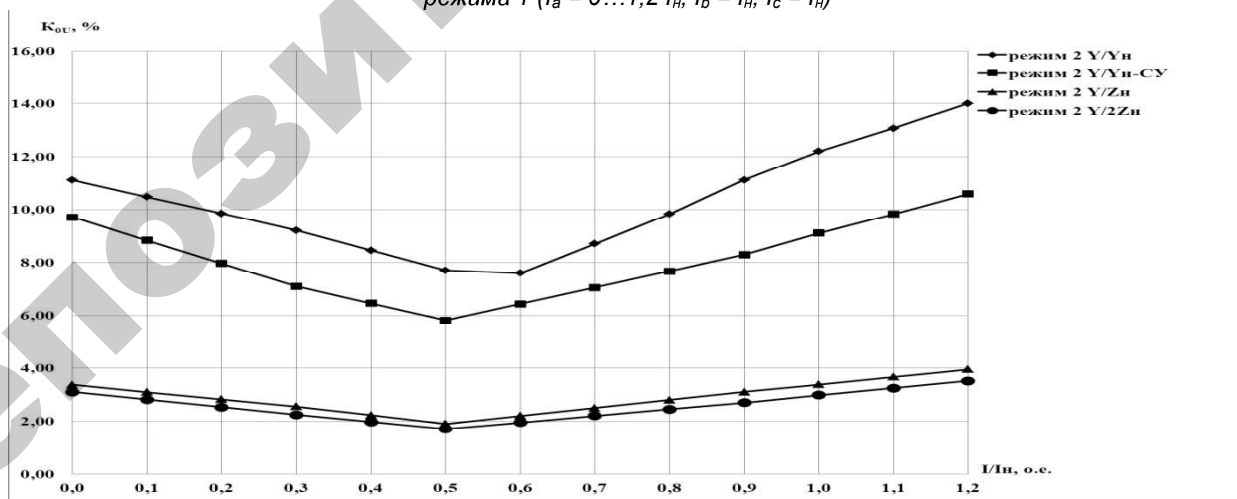


Рис. 5. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима 2 ($I_a = 0, I_b = 0 \dots 1, 2 I_H, I_c = I_H$)

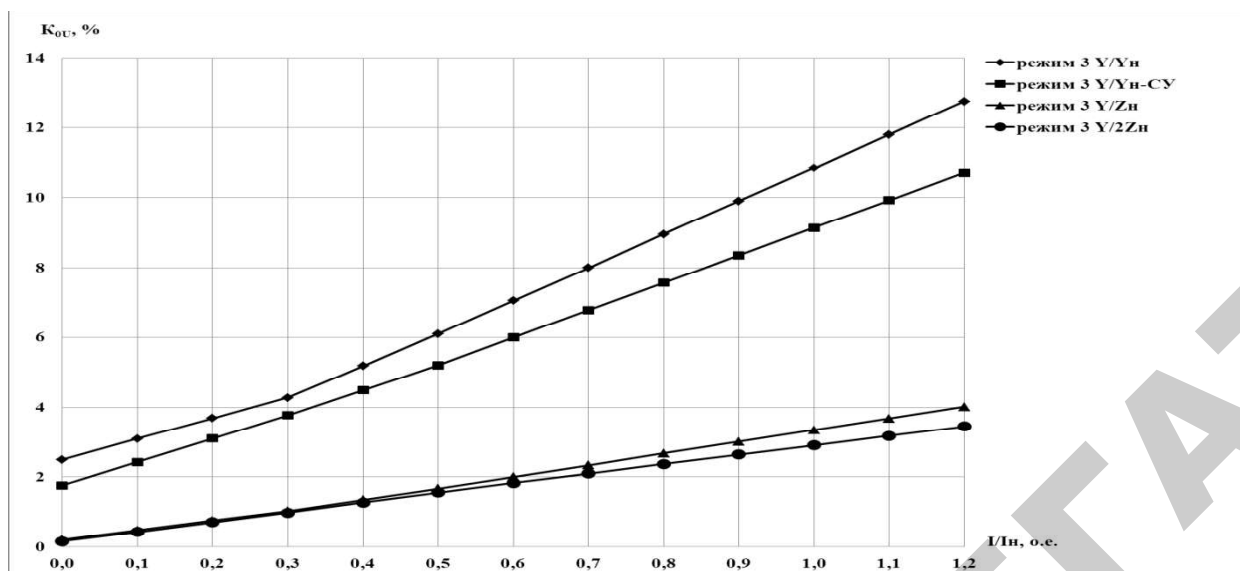


Рис. 6. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима 3 ($I_a = 0, I_b = 0, I_c = 0 \dots 1,2 I_n$)

В трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при номинальном значении нагрузки коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности при эксперименте в режиме 1 изменялся от 0,14 % до 1,62 %, в режиме 2 изменялся от 0,91 % до 1,74 %, в режиме 3 – от 0,1 % до 1,67 %. Данные значения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности не превышают 2 % допустимого стандартом значения.

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности при эксперименте в режиме 1 изменялся от 0,27 % до 2,98 %, в режиме 2 изменялся от 1,7% до 2,98%, в режиме 3 – от 0,1 % до 1,67 %. Данные значения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности выше 2 % допустимого значения.

Однако, при эксплуатации маловероятно возникновение такой глубокой несимметрии нагрузки, которая создавалась при проведении эксперимента в лабораторных условиях. Поэтому схема соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» обеспечивает симметрию напряжений в допустимых стандартом пределах значений и может успешно применяться в электроустановках сельскохозяйственных потребителей при несимметрии нагрузки.

Заключение

1. Экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы [3] о том, что трансформатор «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» обеспечивает наиболее высокий уровень симметрии вторичных напряжений при несимметрии нагрузки по сравнению с другими схемами соединения обмоток. При наиболее неблагоприятном режиме загрузки одной фазы номинальным током и отсутствия нагрузки

в двух других фазах коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности не превышает 1,74 %, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности – 2,98 %.

2. В производственных условиях маловероятно возникновение такой глубокой несимметрии нагрузки, которая создавалась при проведении эксперимента в лаборатории. Следовательно, трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» можно рекомендовать для использования в электроустановках сельскохозяйственных потребителей при несимметрии нагрузки для повышения качества напряжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: патент 16008 Респ. Беларусь / А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга; заяв. Белор. гос. аграрный технический ун-т. – № а 20100121; заявл. 2010.02.01; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 180-181.
2. 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.
3. 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.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 16.10.2019