

УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ СХЕМАМИ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК С СИЛОВЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ» ПРИ НЕССИМЕТРИЧНОМ И НЕЛИНЕЙНОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЗКИ

А.И. Зеленкевич,

ст. преподаватель каф. электроснабжения БГАТУ

В статье представлены результаты исследования изменения степени несимметрии и несинусоидальности напряжений при параллельном включении рекомендованных к применению в сельских электрических сетях трансформаторов с рекомендованными к применению в сельских электросетях схемами соединений с нулевым проводом и силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом».

Ключевые слова: трансформатор, схема соединения обмоток, параллельная работа, коэффициент несимметрии напряжений, суммарный коэффициент гармонических составляющих.

The article presents research results of changes in the degree of asymmetry and non-sinusoidality of voltages with parallel connection of transformers recommended for use in rural electrical networks with connection schemes recommended for with a neutral wire and a power transformer with a winding connection scheme "star-double zigzag with a neutral wire".

Key words: transformer, winding connection scheme, parallel operation, voltage unbalance factor, total of multiples.

Введение

Параллельное включение трансформаторов позволяет обеспечивать резервирование питания, работу широко используемых в сельских электросетях трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» до полного использования их ресурса при росте нагрузки в электрических сетях, увеличить коэффициент загрузки трансформаторов, осуществляя постепенный ввод/вывод трансформаторных мощностей при фактическом росте/падении нагрузок, снизить требуемую резервируемую мощность трансформаторов, повысить качество напряжения из-за стабилизированного уровня токов короткого замыкания в сети и повысить надежность срабатывания релейной защиты при однофазных коротких замыканиях [1-4].

При выполнении следующих условий возможно включение силовых трансформаторов на параллельную работу:

– группы соединения обмоток трансформаторов должны быть одинаковы;

– отличие коэффициентов трансформации должно быть не более чем на 0,5 %;

– величины напряжений короткого замыкания трансформаторов должны отличаться не более чем на 10 %;

– номинальные мощности трансформаторов могут отличаться между собой не более чем в 3 раза;

– напряжения трансформаторов должны быть сфазированы.

Как показывают проведенные исследования [5-7], конструкция разработанного силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» обеспечивает выполнение всех этих условий.

Для снижения уровней несимметрии и несинусоидальности напряжений в сельских электрических сетях, которые обладают сравнительно низкой плотностью и ярко выраженными пиками и провалами электрических нагрузок, наиболее целесообразным является применение сравнительно недорогих силовых трансформаторов с разработанной схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом», которая обеспечивает возможность параллельной работы с трансформаторами нулевой группы соединений обмоток, компенсирует магнитные потоки нулевой

последовательности и магнитные потоки высших гармонических составляющих, кратных трем, в стали стержней магнитопровода [5-7].

Целью работы является определение изменения степени несимметрии и несинусоидальности напряжений при параллельном включении рекомендованных к применению в сельских электрических сетях трансформаторов с рекомендованными к применению схемами соединений с нулевым проводом и разработанного трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом».

Основная часть

Для определения изменения степени несимметрии и несинусоидальности напряжений при параллельной работе в сельских электрических сетях трансформаторов одинаковой мощности рассматривались схемы соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» (Y/Y_n), «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» (Y/Y_nCU) трансформатора с разработанной схемой соединения «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом». Исследования параллельной работы трансформаторов при несимметричном характере нагрузки проводились с учетом требований к включению трансформаторов на параллельную работу.

При экспериментальных исследованиях несимметрии и несинусоидальности напряжений при параллельной работе трансформаторов, изменение нагрузки обеспечивалось при помощи однофазных ползунковых реостатов. Искусственно создавались три глубоко несимметричных режима нагрузки, когда в одной из фаз всех трех режимов ток нагрузки менялся в пределах $0...1,2 I_n$, а в двух других фазах первого режима был равен номинальному, второго режима – в одной из двух фаз равен нулю, а в другой – номинальному, для третьего режима – в двух других фазах был равен нулю.

В указанных режимах работы при помощи трехфазного анализатора качества напряжения марки Fluke 425 измерялись значения междуфазных и фазных напряжений трансформаторов высшей и низшей сторон, значения токов нагрузки низшей стороны, коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности.

Зависимости значений коэффициентов несимметрии вторичных напряжений для принятых режимов изменения токов нагрузки каждой из исследованных схем приведены на рисунке 1. Характер изменения зависимостей показывает, что снижение симметрии нагрузочных токов приводит к увеличению коэффициентов несимметрии вторичных напряжений.

При параллельной работе силовых трансформаторов одинаковой мощности со схемами соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» и «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности при эксперименте в режиме 1 изменялся от 0,39 % до 2,57 %; в режиме 2 – от 1,14 %

до 2,95 %; в режиме 3 – от 0,27 % до 2,89 %. При параллельном включении силовых трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» и «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности при эксперименте в режиме 1 изменялся от 0,23 % до 2,33 %; в режиме 2 – от 1,15 % до 2,96 %; в режиме 3 – от 0,26 % до 2,71 %.

При раздельной работе силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при изменении нагрузки в пределах $0...1,2 I_n$ значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности при эксперименте в режиме 1 изменялись от 0,14 % до 1,62 %; в режиме 2 – от 0,91 % до 1,74 %; в режиме 3 – от 0,10 % до 1,67 %.

При параллельном включении трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» и «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» значения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности при эксперименте в режиме 1 изменялись от 1,5 % до 8,49 %; в режиме 2 – от 5,24 % до 9,52 %; в режиме 3 – от 1,7 % до 8,67 %. При параллельной работе трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» и «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности при эксперименте в режиме 1 изменялись от 1,2 % до 6,9 %; в режиме 2 – от 4,59 % до 8,36 %; в режиме 3 изменялись от 1,2 % до 7,81 %.

При раздельной работе силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при изменении нагрузки в пределах $0...1,2 I_n$ значения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности при эксперименте в режиме 1 изменялись от 0,27 % до 2,98 %; в режиме 2 – от 1,79 % до 2,98 %; в режиме 3 изменялись от 0,10 % до 1,67 %.

Для оценки качества напряжения при параллельном включении трансформаторов на нелинейную нагрузку величина нагрузки трансформатора изменялась в пределах от 0,1 до 1,3 от номинальной при помощи однофазных ползунковых реостатов. К вторичной обмотке реостаты подключались посредством трехфазного двухполупериодного полупроводникового выпрямителя. Измерения проводились при различных величинах нелинейной токовой нагрузки значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, и до 40-й гармоники включительно, коэффициентов высших гармонических составляющих напряжений.

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих вторичных напряжений при параллельной работе силовых трансформаторов приведены в таблице 1.

По экспериментальным данным построены зависимости (рис. 2-3), анализ которых показывает, что в трансформаторах при малых нагрузках величины суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения малы. Искажение синусоиды

напряжения основной частоты практически не происходит, так как величины токов высших гармонических составляющих и соответствующие им падения напряжений сравнительно малы.

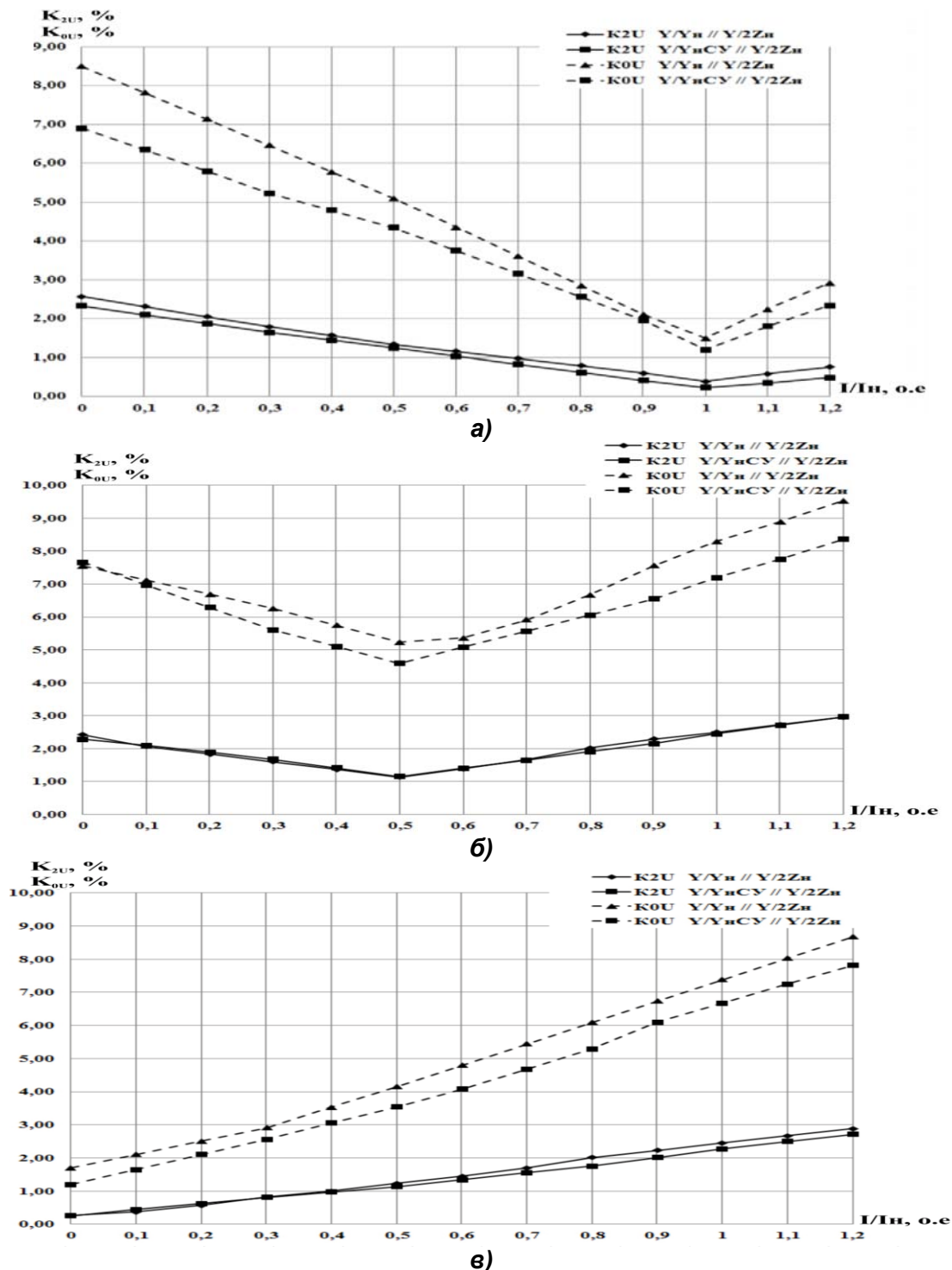


Рисунок 1. Зависимости значений коэффициентов несимметрии вторичных напряжений по обратной K2U и по нулевой последовательности K0U от величины тока нагрузки при параллельной работе трансформаторов с различными схемами соединения: а, б, в – для режимов 1, 2, 3, соответственно

Таблица 1. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих вторичных напряжений при параллельной работе силовых трансформаторов 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 // Y/2Z _n	2,18	2,24	2,31	2,45	2,67	2,81	2,99	3,12	3,33	3,58	3,74	3,85	4,07
Y/Y _n СУ // Y/2Z _n	2,00	2,07	2,14	2,35	2,57	2,71	2,89	3,04	3,25	3,51	3,67	3,78	4,00

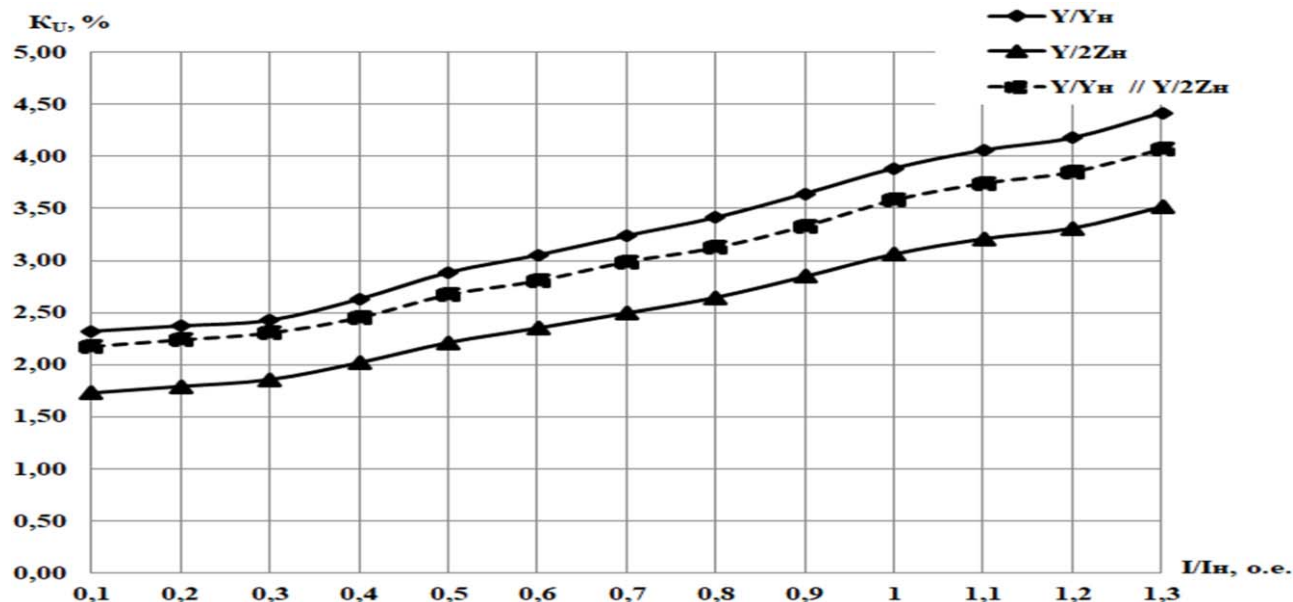


Рисунок 2. Зависимости значений суммарного коэффициента гармонических составляющих вторичных напряжений, соответственно, для трансформаторов со схемами соединений Y/Y_n и $Y/2Z_n$ при отдельной и параллельной работе на нелинейную нагрузку

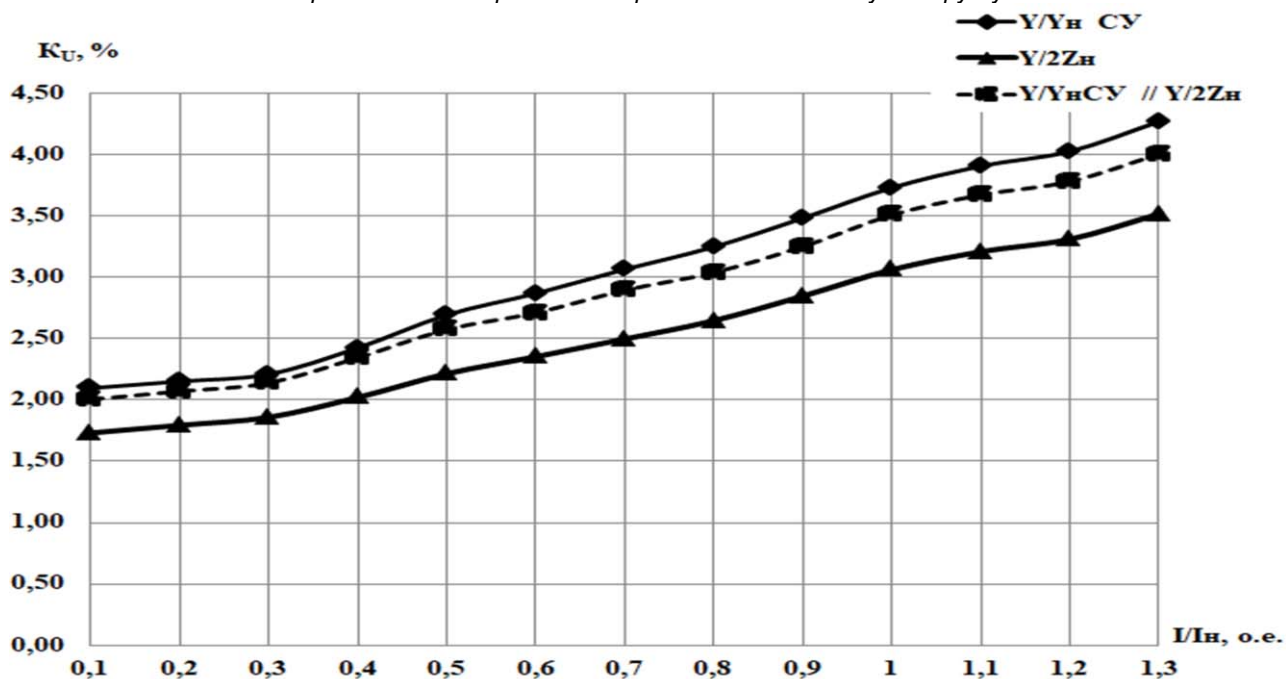


Рисунок 3. Зависимости значений суммарного коэффициента гармонических составляющих вторичных напряжений, соответственно, для трансформаторов со схемами соединений Y/Y_n СУ и $Y/2Z_n$ при отдельной и параллельной работе на нелинейную нагрузку

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих при увеличении степени загрузки трансформаторов увеличиваются. При значении тока нагрузки, равном номинальному, для схем соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» и «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» значения суммарного коэффициента гармонических составляющих равно 3,74 %, для схем «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» и «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» – 3,67 %.

Проведенные экспериментальные исследования состава спектра напряжений показали, что для всех схем соединения обмоток увеличение загрузки трансформаторов приводит к увеличению значений токов высших гармоник, что обуславливает увеличение значений высших гармонических составляющих напряжений. Различная скорость увеличения уровней гармонических составляющих напряжений объясняется разной компенсирующей способностью схем соединения обмоток.

При параллельной работе трансформаторов с одной из схем соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом», «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» со схемой соединения «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» величины высших гармоник ниже, чем при раздельной работе этих схем.

При раздельной работе силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» в кривых фазных токов вторичной стороны практически полностью отсутствуют высшие гармоники, кратные трем. Следует отметить небольшое присутствие третьей гармоники тока. В диапазоне изменения загрузки силового трансформатора от холостого хода до $1,2I_n$ среднее по трем фазам значение коэффициента третьей гармоники тока изменяется от 8,3 % до 1,6 %. Присутствуют нечетные гармоники: 7-я, 11-я, 13-я, 17-я. Величины четных гармоник на порядок ниже соседних нечетных. Необходимо указать на наличие пятой гармоники тока. В диапазоне изменения загрузки трансформатора от холостого хода до $1,2I_n$ коэффициент пятой гармоники изменяется от 24,3% до 7,6%.

При параллельной работе силовых трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» и «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» наиболее выражены: 5-я (1,7 %), 7-я (1,44%), 11-я (1,42 %) и 3-я (1,13 %) гармоники, величины которых ниже допустимых значений. Необходимо указать, что при номинальной нагрузке трансформатора величины 13-й (1,01 %), 17-й (1,01 %), 19-й (0,79 %), 23-й (0,71 %), 25-й (0,58%), 31-й (0,74%), 35-й (0,42%), 29-й (0,39%) и 37-й (0,29%) гармоник, также не превышают допустимых значений.

При параллельной работе силовых трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» и «звезда-двойной зигзаг с нулевым про-

водом» наибольшие значения имеют 5-я (1,7 %), 7-я (1,43 %), 11-я (1,41 %) гармоники, величины которых ниже допустимых значений. Присутствуют также 13-я (1,01%), 17-я (1,01%), 3-я (0,84%), 19-я (0,78%), 23-я (0,74%), 25-я (0,63%), 29-я (0,53%), 35-я (0,42%), 31-я (0,41%) и 37-я (0,29%) гармоники, величины которых при номинальной нагрузке также не превышают допустимых значений.

Заключение

При включении на параллельную работу одного из силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» и «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» с разработанным трансформатором со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» величины значений коэффициента несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности при параллельной работе трансформаторов меньше, чем при раздельной работе соответствующих трансформаторов с вышеуказанными известными схемами соединения обмоток.

Наименьшие значения коэффициентов несимметрии напряжения при искусственно создаваемых несимметричных режимах нагрузки по обратной (0,23 %) и нулевой (1,2 %) последовательности наблюдаются при включении на параллельную работу трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» и «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом».

Результаты экспериментальных исследований показали, что при параллельной работе силовых трансформаторов с одной из схем соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» и «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» с силовым трансформатором со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при номинальной нагрузке обеспечивается на 17,8...23,1 % меньшее значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжений, чем при отдельной работе трансформаторов с указанными схемами соединений обмоток (Y/Y_n и Y/Y_nСУ), и может быть рекомендовано к применению при работе трансформатора на нелинейную нагрузку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – Т. 1. – 652 с.
2. Прокопчик, В.В. Повышение качества электроснабжения и эффективности электрооборудования предприятий с непрерывными технологическими процессами / В.В. Прокопчик. – Гомель: ГГТУ, 2002. – 283 с.

3. Жежеленко, И.В. Электромагнитная совместимость в электрических сетях / И.В. Жежеленко, М.А. Короткевич. – Мн.: Вышэйшая школа, 2012. – 197 с.

4. Арриллага, Дж. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. / Дж. Арриллага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.: ил.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 20.01.2022

Технологическая линия для производства рассады овощных культур

Линия *предназначена* для удаления древесных остатков из торфа, приготовления субстрата, включая измельчение и просеивание торфа, увлажнение, смешивание торфа с минеральными удобрениями, известковым материалом и перлитом, заполнение кассет субстратом, уплотнение его в ячейках, формирование лунок в субстрате, однозерновыи высев, заделку семян и их увлажнение.



Линия осуществляет однозерновыи высев семян капусты, редиса, томата, перца и др. культур и выполнена в трехмодульном варианте, каждый из них может работать в отдельности.

Основные технические данные

Производительность (по заполнению кассет), шт./час.....	360
Производительность (по высеву семян):	
- в кассеты на 64 ячейки, тыс. шт./час	23
- в кассеты на 144 ячейки, тыс.шт./час	52
Потребляемая мощность, кВт	6
Тип высевающего аппарата	вакуумный