Об эффективности применения трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда/двойной зигзаг с нулевым проводом» при нелинейной несинусоидальной нагрузке

ЮНДИН М.А., ЮНДИН К.М., ИСУПОВА А.М., ЛУКИН В.В., БАБИНА Л.В.

On the effectiveness of the use of transformers with a «star/double zigzag with zero wire» winding connection scheme under nonlinear non-sinusoidal load

YUNDIN M.A., YUNDIN K.M., ISUPOVA A.M., LUKIN V.V., BABINA L.V.

Представлены результаты экспериментальных исследований при одинаковых нагрузках силовых трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда/двойной зигзаг с нулевым проводом» и «звезда/звезда с нулевым проводом» в лабораторных условиях. Оба трансформатора нагружались симметричной и несимметричной нелинейной нагрузкой при разных коэффициентах загрузки. Контролировались значения коэффициентов искажения синусоидальности токов в фазах, К-фактор, потери активной мощности в силовых трансформаторах, полная суммарная мощность, суммарные коэффициенты мощности, токи в нулевом проводе, коэффициенты несимметрии токов нагрузки по нулевой последовательности. Выполнено сравнение полученных результатов, сделаны выводы об эффективности использования трансформаторов с различными схемами соединения обмоток.

Ключевые слова: *силовые трансформаторы, схемы соединения обмоток «звезда/звезда с нулевым проводом» и «звезда/двойной зигзаг с нулевым проводом», несимметрия, несинусоидальность, эксперимент.*

DOI: 10.53891/00135860_2023_2_46

The results of experimental studies with identical loads of power transformers with circuits for connecting windings «star/double zigzag with zero wire» and «star/star with zero wire» in laboratory conditions are presented. Both transformers were loaded with symmetrical and non-symmetrical nonlinear load at different load coefficients. The values of the distortion coefficients of the sinusoidal currents in phases, K-factor, active power losses in power transformers, total power, total power coefficients, currents in the zero wire, load current asymmetry coefficients in the zero sequence were monitored. The results obtained were compared, conclusions were drawn about the efficiency of using transformers with different winding connection schemes.

Key words: *power transformers, winding connection schemes «star/star with zero wire» and «star/double zigzag with zero wire», asymmetry, non-sinusoidality, experiment.*

Особенностью нагрузки большинства силовых трансформаторов 6 – 10/0,4 кВ является нелинейность и несинусоидальность, вызванные спецификой электроприемников в узлах нагрузки. Большая часть электроприемников представляет собой нелинейную нагрузку, которая создает искажения в питающей сети. Сельскохозяйственные и бытовые электропотребители в значительной степени не имеют электромагнитной совместимости с другими электроприемниками, включенными в общую электросеть и, как правило, снижают эффективность передачи и показатели качества электрической энергии.

Доступная цена и ремонтопригодность силовых трансформаторов 6 – 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток «звезда/звезда с нулевым проводом» предопределили их подавляющее использование в сельских и городских электрических сетей. Однако у таких трансформаторов нескомпенсированные магнитные потоки нулевой последовательности частотой 50 Гц и магнитные потоки от токов гармоник, кратных трем, вызывают рост сопротивления нулевой последовательности, что ведет к росту потерь электроэнергии, как в самих трансформаторах, так и в присоединенной к ним нагрузочной сети. Кроме этого, в электрической сети с такими трансформаторами вероятны проблемы с корректной работой токовых защит.

В электрических сетях 0,38 кВ выборочные

средние значения коэффициента искажения синусоидальности токов изменяются в диапазоне 9,81 – 17,48 %, коэффициента искажения синусоидальности напряжений – в диапазоне 1,30 – 4,01 %, коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности – в диапазоне 1,03 – 9,02 % [1 – 4].

В [5] предложен силовой трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» ($Y/2Z_н$). Изначально он создавался для исключения уравнительных токов при параллельной работе с наиболее распространенным трансформатором «звезда/звезда с нулевым проводом» ($Y/Y_н$); затем его в лабораторных условиях начали испытывать при нелинейной [6] и несимметричной нагрузках [7]. Однако в этих работах не указаны значения параметров самого исследуемого трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда–двойной зигзаг с нулевым проводом» (количество витков в обмотках трансформатора, формат исполнения и т.д.), а также параметры используемой нелинейной нагрузки, что является необходимым для проведения объективной оценки.

Цель статьи – исследовать работу силового трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/2Z_н$ при нелинейной несинусоидальной нагрузке и сравнить эффективность работы трансформаторов со схемами соединения $Y/2Z_н$ и $Y/Y_н$ при одинаковом характере нагрузочной цепи.

Исследования проводились в лабораторных условиях; использовались два сухих трансформатора одинаковой мощности (1,5 кВА) со схемами соединения обмоток $Y/2Z_н$ и $Y/Y_н$. Трансформатор $Y/2Z_н$ имел соотношение чисел витков в обмотках и полуобмотках нагрузочной цепи на каждом из стержней магнитопровода, равное 6,16 : 1 : 1.

Схема испытаний с трансформатором $Y/2Z_н$ представлена на рис. 1, с трансформатором $Y/Y_н$ – на рис. 2.

В качестве нагрузок $Z_{Н1}$ – $Z_{Н3}$ (рис. 1 и 2) использовались газоразрядные лампы ДРЛ мощностью 250 и 400 Вт. Электрические величины измерялись прибором HIOKI 3196 и электросчетчиками Меркурий 230, установленными на первичной и вторичной сторонах трансформаторов. Сопротивлениями $Z_Л$ моделировались параметры нагрузочной сети напряжением 0,38 кВ. Автотрансформаторами АТ1 напряжения на входе нагрузочной цепи поддерживались одинаковыми.

Изменением количества ламп ДРЛ в нагрузочной цепи $Z_{Н1}$ – $Z_{Н3}$ варьировался характер и уровень нагрузки на оба трансформатора. Испытания проводились при коэффициентах загрузки трансформаторов 0,8; 1,0 и 1,3.

Полученные результаты представлены в виде лепестковых диаграмм, на которых отображены следующие основные электрические величины: PF_{SUM} – суммарный коэффициент мощности нагрузок с учетом гармоник; $THD\text{-}I_1$ – $THD\text{-}I_3$ – коэффициенты искажения синусоидальной формы кривой тока в линейных проводах и $THD\text{-}I_4$ – в нулевом рабочем проводе; ΔP_T – потери активной мощности в силовом трансформаторе; I_4 – ток в нулевом рабочем проводе; $KF1$ – $KF3$ – коэффициенты, показывающие увеличение тепловых потерь в обмотках фаз трансформатора из-за нелинейности нагрузки; K_{i0} – коэффициент несимметрии тока по нулевой последовательности. При построении лепестковых диаграмм худший результат электрической величины у сравниваемых трансформаторов откладывался по лучу ближе к центру.

Как следует из рис. 3 при одинаковой, равномерной по фазам суммарной нагрузке обоих

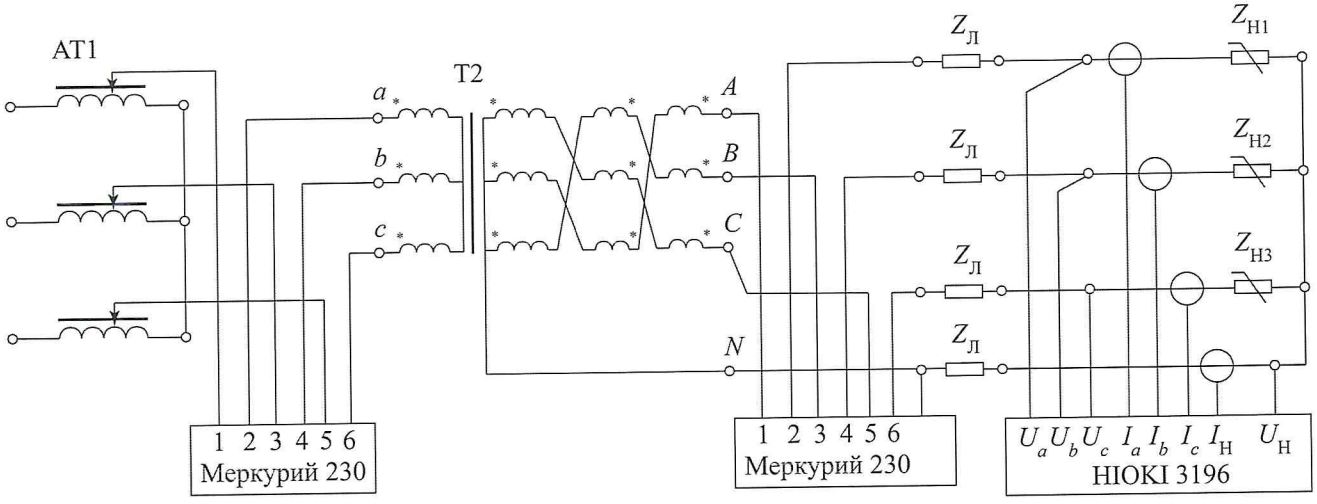


Рис. 1. Схема лабораторной установки при испытании силового трансформатора при схеме соединения обмоток $Y/2Z_н$

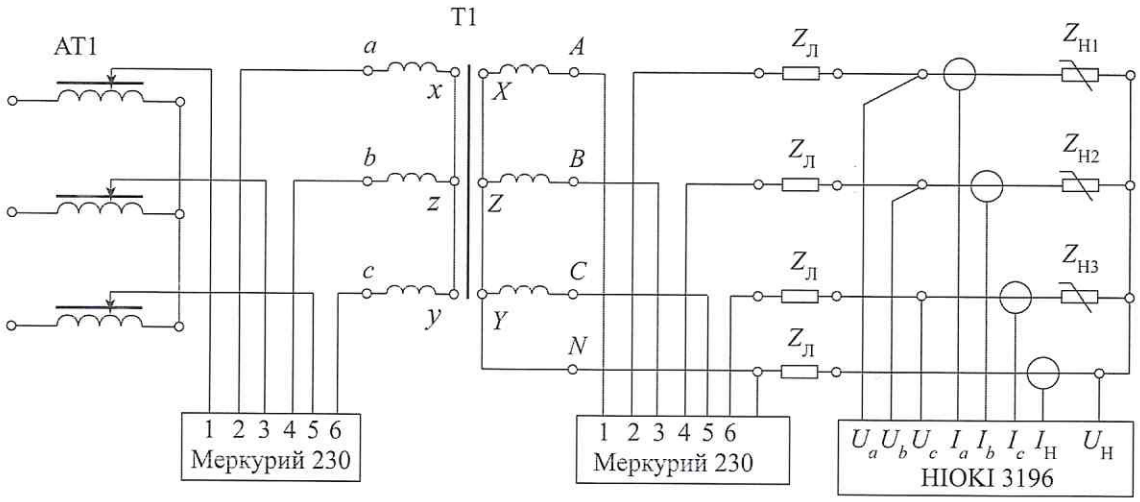


Рис. 2. Схема лабораторной установки при испытании силового трансформатора при схеме соединения обмоток $Y/Y_Н$

трансформаторов потери активной мощности ΔP_T у трансформатора со схемой $Y/2Z_Н$ больше, чем у трансформатора со схемой $Y/Y_Н$. Коэффициенты искажения синусоидальной формы кривой тока в линейных проводах оказались хуже у трансформатора со схемой $Y/Y_Н$ при загрузке, равной 0,8. Худшие результаты при данной загрузке у трансформатора со схемой $Y/Y_Н$ оказались по току в нулевом рабочем проводе (I_4) и по коэффициентам $KF3$, K_{i0}, PF_{SUM}. Исследования показали, что коэффициент искажения синусоидальности тока в нулевом проводе при питании от трансформатора $Y/2Z_Н$ почти в три раза превышал аналогичный коэффициент при питании нагрузки от трансформатора $Y/Y_Н$. Следует заметить, что и при других значениях нагрузки по коэффициенту искажения синусоидальности тока в нулевом проводе трансформатор со схемой соединения обмоток $Y/2Z_Н$ уступал трансформатору $Y/Y_Н$.

При изменении загрузки трансформаторов до номинального значения вид лепестковой диаграммы по тем же показателям приведен на рис. 4.

При номинальной нагрузке трансформаторов (были подключены две лампы ДРЛ 250 Вт в каждую фазу и одна лампа ДРЛ 400 Вт в третью фазу), заметно ухудшилась несимметрия токов нагрузки и улучшилась форма кривых токов в нагрузочных цепях, питающихся от силовых трансформаторов со схемой $Y/2Z_Н$ и $Y/Y_Н$. Так, у схемы трансформатора $Y/Y_Н$ коэффициент несимметрии тока по нулевой последовательности увеличился с 13,17 до 21,59 %, а у $Y/2Z_Н$ – с 11,13

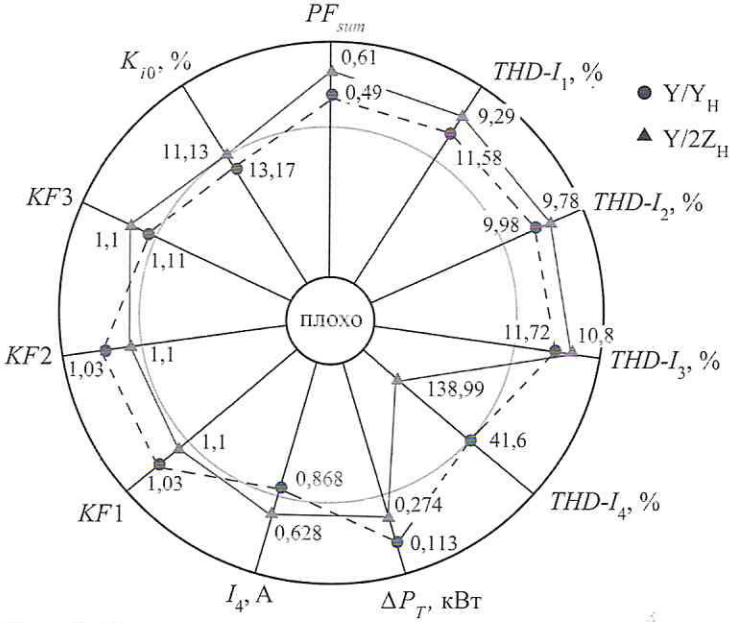


Рис. 3. Лепестковая диаграмма изменения электрических величин сравниваемых трансформаторов при коэффициенте их загрузки, равном 0,8

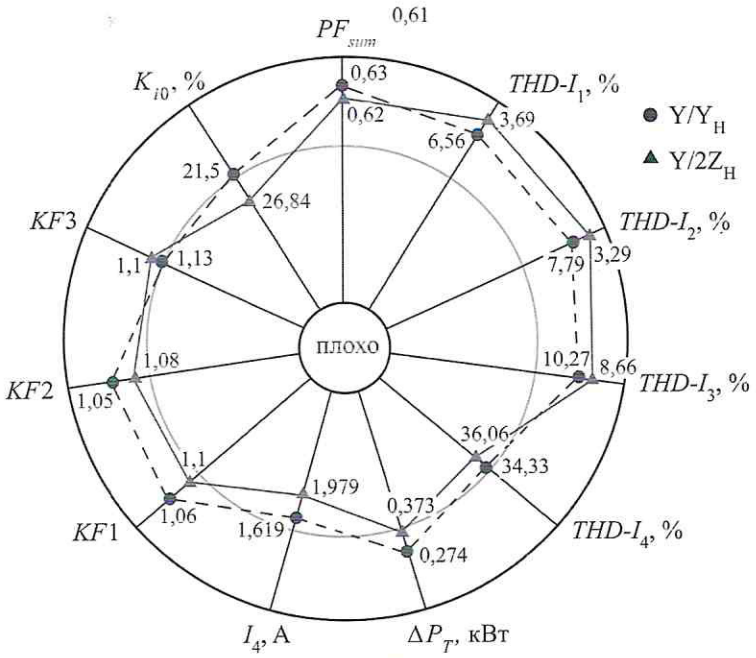


Рис. 4. Лепестковая диаграмма изменения электрических величин сравниваемых трансформаторов при номинальной загрузке

до 26,84 %. Кроме этого показателя, у трансформатора со схемой Y/Y$_н$ лучшими оказались следующие показатели: суммарный коэффициент мощности нагрузок с учетом гармоник – PF_{SUM} (0,63 против 0,62); коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока в нулевом проводе – $THD\text{-}I_4$ (34,33 против 36,06 %); потери активной мощности в трансформаторе – ΔP_T (0,274 против 0,373 кВт); ток в нулевом рабочем проводе – I_4 (1,619 против 1,979 А); а также коэффициенты $KF1$ и $KF2$.

Лепестковая диаграмма при загрузке трансформаторов до 1,3 номинальной мощности показана на рис. 5.

При дальнейшем увеличении несимметричной нелинейной нагрузки (три лампы ДРЛ 250 Вт и одна лампа ДРЛ 400 Вт) в сравниваемых трансформаторах заметно ухудшение коэффициента несимметрии тока по нулевой последовательности у трансформатора со схемой Y/2Z$_н$ с 26,84 до 40,38 %. Также незначительно уменьшаются значения коэффициентов $KF1$, $KF2$, $KF3$.

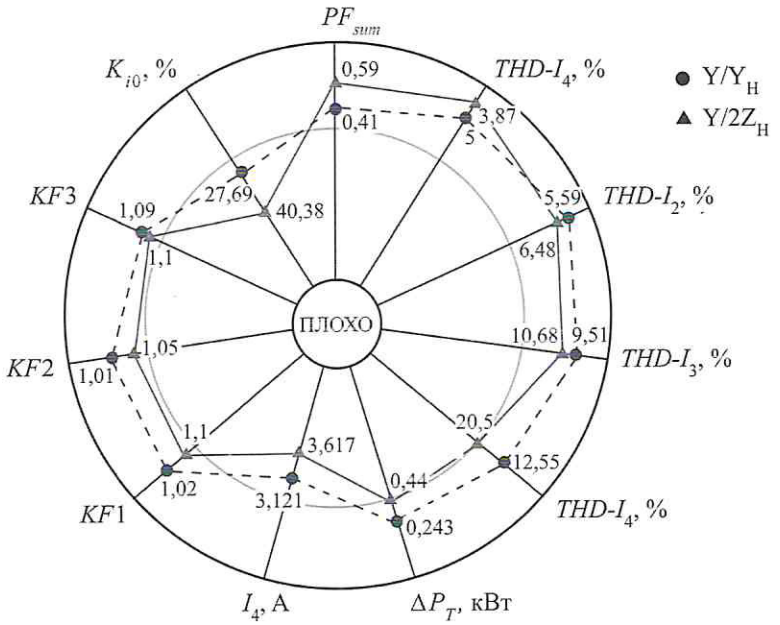


Рис. 5. Лепестковая диаграмма изменения электрических величин сравниваемых трансформаторов при коэффициенте их загрузки, равном 1,3

Коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока в нулевом проводе $THD\text{-}I_4$ у трансформатора $Y/2Z_H$ оказался больше на 7,95 %, чем у трансформатора Y/Y_H. Ток в нулевом рабочем проводе I_4 сети при питании от трансформатора $Y/2Z_H$ составил 3,617 А, что больше аналогичного показателя при питании сети от трансформатора Y/Y_H на 0,486 А. Потери активной мощности в самих трансформаторах при такой нагрузке оказались больше у трансформатора $Y/2Z_H$ на 0,197 кВт. Единственные показатели, по которым трансформатор $Y/2Z_H$ имел преимущества перед трансформатором Y/Y_H, оказались коэффициент мощности нагрузок с учетом гармоник PF_{SUM} (0,59 против 0,41) и коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока в одном из линейных проводов – $THD\text{-}I_1$ (3,87 против 5 %).

Выводы

1. При одновременном воздействии несинусоидальных и несимметричных токов наибольшее количество электрических величин, по которым силовой трансформатор со схемой соединения обмоток Y/2ZH показал лучшие результаты (7 из 11) относительно трансформатора Y/Y_H, оказалось при номинальной загрузке.

2. При загрузке силовых трансформаторов несимметричным и несинусоидальным током сверх номинального значения лучшим оказался силовой трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_H (9 из 11 показателей).

3. При равномерной неноминальной загрузке трансформаторов лучшим оказался также силовой трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_H (7 из 11 показателей).

4. Силовой трансформатор со схемой соединения обмоток $Y/2Z_H$ не имеет неоспоримых преимуществ перед трансформатором со схемой соединения обмоток Y/Y_H при разных загрузках в условиях многофакторности воздействия: уровню несимметрии и несинусоидальности, собственным потерям мощности трансформатора, степени токовой нагрузки нулевого рабочего провода сети 0,38 кВ, нагреву и коэффициенту мощности трансформатора.

Список литературы

1. **Руди Д.Ю., Антонов А.И., Вишнягов М.Г. и др.** Исследование высших гармоник в электрических сетях низкого напряжения // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162).

2. **Авербух М.А., Жилин Е.В., Сизганова Е.Ю.** Статистическая оценка коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию питающего напряжения в системах электроснабжения ИЖС // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 8.

3. **Юндин М.А., Герасько А.Л., Гондарь В.В.** Современные статистические показатели несимметрии и несинусоидальности напряжений в сети 0,38 кВ / Современные научные исследования: проблемы и перспективы: Материалы IV Междунар. научно-практич. конф. М.: Перо, 2019.

4. **Лукина Г.В., Бондаренко С.И., Самаркина Е.В.** Определение показателей качества электрической энергии в распределительных сетях фермерских и пригородных хозяйств // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2017. № 39 (126).

5. **Патент РФ №16008.** Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток / Зеленькевич А.И., Збродыга В.М. // Афіцыйны бюл. Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2012. № 3.

6. **Прищепов М.А., Збродыга В.М., Зеленькевич А.И.** Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при нелинейном характере нагрузки // Агропанорама. 2018. № 1.

7. **Прищепов М.А., Зеленькевич А.И., Збродыга В.М.** Экспериментальные исследования работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке // Агропанорама. 2019. № 5.