УДК 662.997.715.1 https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.23

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДВУХОБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТИПА ТМГ

С.А. Афанасьев*

Белорусский Национальный Технический Университет, Республика Беларусь, 220013, г. Минстк, пр-т. Независимости, 65)
**e-mail:* stasafanasev871@gmail.com

Аннотация. *В статье предложено сравнительное исследование параметров схем замещения двухобмоточных масляных силовых трансформаторов мощностью 1000 кВА при напряжениях 6 и 10 кВ. Параметры определялись расчётным путём с использованием паспортных данных и результатов опытов холостого хода и короткого замыкания. Представлены результаты значений активных и реактивных сопротивлений, в ходе экспериментов изучены величины потерь в режимах холостого хода и короткого замыкания. На основе сравнения трансформаторов разных классов энергоэффективности выявлено влияние конструктивных решений и типа охлаждения на параметры эквивалентной схемы и энергетические характеристики, что позволяет оптимизировать выбор оборудования при проектировании сетей.*

Ключевые слова: *силовой трансформатор, схема замещения, холостой ход, короткое замыкание, энергетические потери, энергоэффективность, параметры трансформатора.*

UDC662.997.715.1

COMPARISON OF THE PARAMETERS OF THE EQUIVALENT CIRCUIT OF TWO-WINDING TRANSFORMERS OF TYPE TMG

S.A. Afanasiev*

Belarusian National Technical University, house 65, Nezavisimosti str., 220013, Minsk, Republic of Belarus
*e-mail: stasafanasev871@gmail.com

Abstract. *The article proposes a comparative study of the parameters of the equivalent circuits of two-winding oil power transformers with a capacity of 1000 kVA at voltages of 6 and 10 kV. The parameters were determined by calculation using the passport data and the results of the experiments of the no-load and short-circuit modes. The results of the values of active and reactive resistances are presented, during the experiments the values of losses in the no-load and short-circuit modes were studied. Based on a comparison of transformers of different energy efficiency classes, the influence of design solutions and cooling type on the equivalent circuit parameters and energy characteristics has been identified, which allows for the optimization of equipment selection during network design.*

Key words: *power transformer, equivalent circuit, no-load operation, short circuit, energy losses, energy efficiency, transformer parameters.*

Введение

В настоящее время особое внимание уделяется повышению энергоэффективности силовых трансформаторов, что связано с необходимостью снижения потерь электроэнергии в электрических сетях. Различные типы трансформаторов (масляные), а также их классы энергоэффективности обладают различными значениями параметров схемы замещения и

уровнем потерь. Целью данной работы является сравнительный анализ параметров схем замещения двухобмоточных трансформаторов различных типов, классов энергоэффективности и производителей на основе расчетов, выполненных по паспортным данным.

Методы и материалы

Для построения схемы замещения, вместо реального трансформатора рассматривают эквивалентный ему приведенный трансформатор, у которого первичные и вторичные обмотки имеют одинаковое число витков.

Коэффициент трансформации ($К_{тр}$) трансформатора рассчитывается по формуле:

$$K_{mp} = \frac{w_1}{w_2} \quad (1)$$

Где ω_1, ω_2- число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Рассматриваемая схема замещения двухобмоточного трансформатора представлена на Рисунке 1.

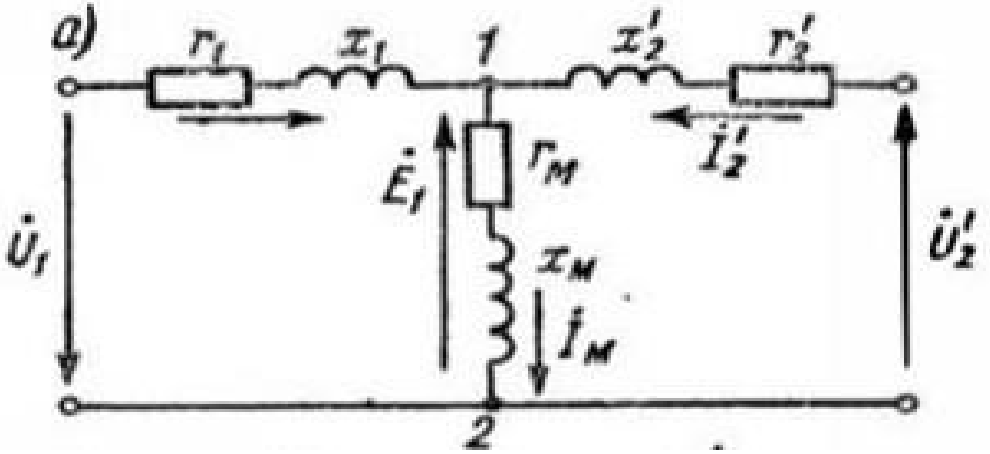

Рис.1. Схема замещения двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь.
Fig. 1. Equivalent circuit of a two-winding transformer with magnetic losses taken into account.

Параметры схемы замещения могут быть определены расчетным или опытным путем. Производится определение параметров по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. Эти положения изложены в классических учебниках по электрическим машинам, [1, 2], а также подтверждены ГОСТ 3484.1–88[3].

Опыт холостого хода: в данном опыте, первичная обмотка подключается на синусоидальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Потери холостого хода ($P_{хх}$) связаны с магнитопроводом и включают в себя: потери на гистерезис, вихревые токи, магнитопроводом, т. к. мощность холостого хода с большей точностью равна магнитным потерям, по-другому их называют постоянные потери.

Опыт короткого замыкания: в опыте вторичные обмотки замыкаются накоротко, а к первичным обмоткам, чтобы не было перегрева и повреждения трансформатора, подводят пониженное напряжение, чтобы ток находился в пределах номинального. Полное, активное и реактивное сопротивления рассчитываются аналогично, как и в опыте холостого хода. Потери короткого замыкания связаны с обмотками, т.к. мощность короткого замыкания представляет собой мощность потерь в обмотках, включая омические потери и добавочные потери от потоков рассеяния, по-другому эти потери называют переменными.

Согласно ГОСТ 11677-85, первичные и вторичные обмотки трансформатора при его подключении могут быть соединены по различным схемам: звезда, треугольник и зигзагом. Тип подключения трансформатора указан на заводской табличке. Группа соединений обмоток характеризует взаимную ориентацию соответствующих векторов линейного напряжений первичной и вторичной обмоток.

Для сравнительного анализа параметров схемы замещения рассматриваются трансформаторы со схемой и группой соединения обмоток $Y/\Delta_н - 11$. Исходные данные взяты из паспортных характеристик производителей. В работе исследованы следующие типы трансформаторов: масляные: ТМГ32, ТМГ33, ТМГ СВЭЛ (Классы Эко-1 и А), мощностью 1000кВА., напряжением (6,10)кВ.

Расчёты выполнены для всех выбранных моделей трансформаторов. Результаты расчетов приведены в Таблицах 1 -2.

Таблица 1.

Расчет параметров трансформаторов с первичным напряжением 10 кВ.

Table 1.

Calculation of transformer parameters with a primary voltage of 10 kV.

$S_{ном} = 1000$ кВА.	ТМГ СВЭЛ (Класс А)	ТМГ33	ТМГ32	ТМГ СВЭЛ (Класс Эко-1)
$P_{хх}$; Вт.	950	940	1100	940
$P_{кз}$; Вт.	9540	9540	10500	9000
$U_{кз}$	5,5%	5,5%	5,5 %	5,5%
$I_{ном.1}$; А.	57,735			
r_0; Ом.	239,445	236,925	277,253	236,925
X_0; Ом.	5011,674	5011,794	5009,725	5011,794
$r_1 + r_2'$; Ом.	0,954	0,954	1,05	0,9
$X_1 + X_2'$; Ом.	5,413	5,413	5,395	5,422
Z_0; Ом.	5017,391	5017,391	5017,391	5017,391
$Z_{кз}$;Ом.	5,413	5,497	5,497	5,497

Таблица 2.

Расчет параметров трансформаторов с первичным напряжением 6 кВ.

Table 2.

Calculation of transformer parameters with a primary voltage of 6 kV.

$S_{ном} = 1000$ кВА.	ТМГ СВЭЛ (Класс А)	ТМГ33	ТМГ32	ТМГ СВЭЛ (Класс Эко-1)
$P_{хх}$; Вт.	950	940	1100	940
$P_{кз}$; Вт.	9540	9540	10500	9000
$U_{кз}$	5,5%	5,5%	5,5 %	5,5%
$I_{ном.1}$; А.	96,225			
r_0; Ом.	85,901	86,353	99,465	84,997
X_0; Ом.	1800,034	1800,013	1799,336	1800,077
$r_1 + r_2'$; Ом.	0,343	0,343	0,378	0,324
$X_1 + X_2'$; Ом.	1,948	1,948	1,941	1,951
Z_0; Ом.	1802,083	1802,083	1802,083	1802,083
$Z_{кз}$;Ом.	1,948	1,978	1,978	1,978

На основании проведенных расчетов, построены Графики сравнения параметров схем замещения различных типов трансформаторов Рисунок 2.

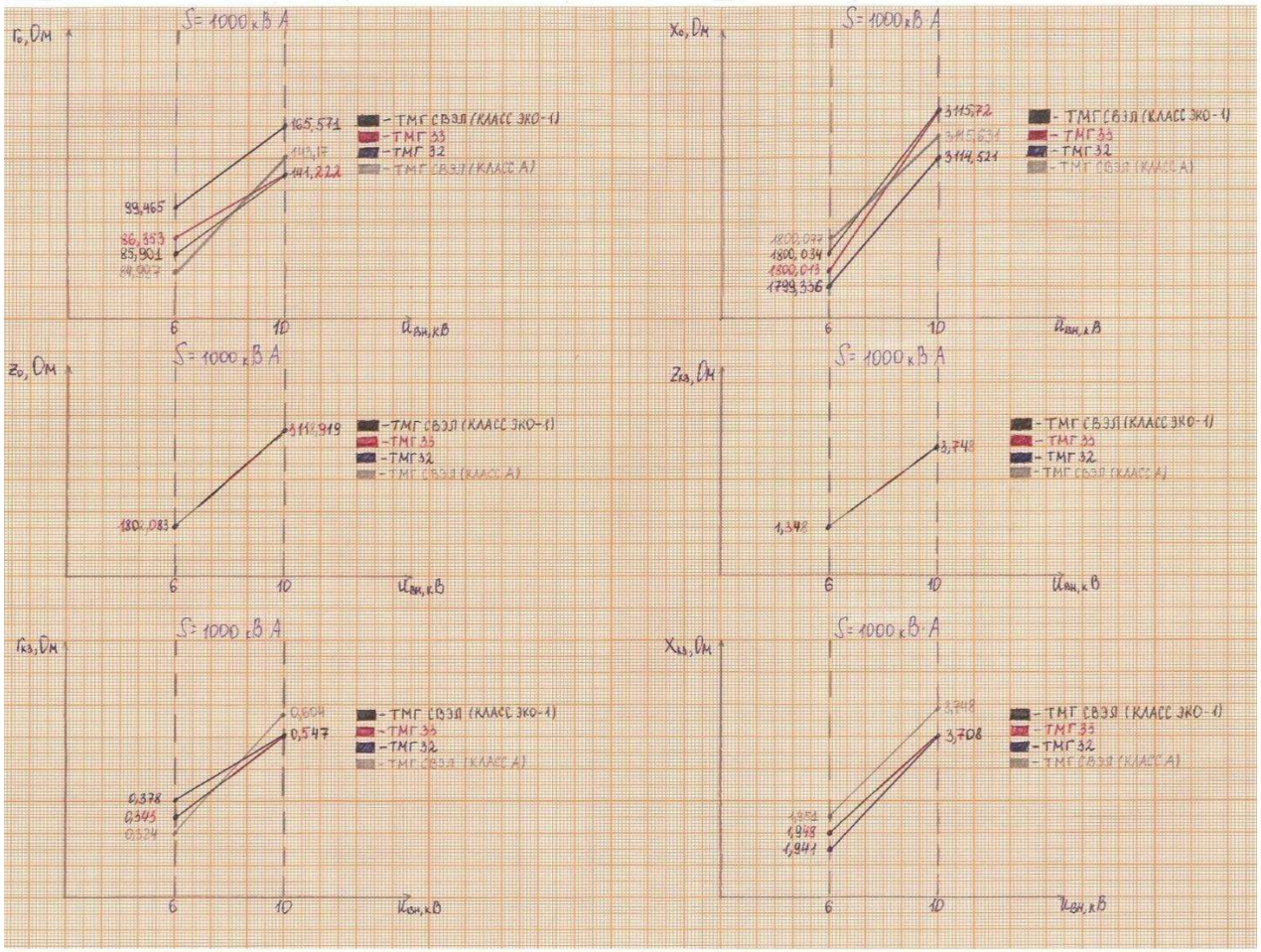

Рис.2. Графики сравнение параметров схем замещения масляных трансформаторов (ТМГ33, ТМГ32, ТМГ СВЭЛ (Класс А), ТМГ СВЭЛ (Класс Эко-1)) напряжением 10/6кВ.

Fig. 2. Graphs comparing the parameters of the replacement schemes of oil transformers (TMG33, TMG32, TMG SVEL (Class A), TMG SVEL (Class Eco-1)) with a voltage of 10/6 kV.

Результаты

По результатам из графиков можно рассчитать отклонения от среднего значения активного сопротивления короткого замыкания в %, трансформаторов ТМГ32, ТМГ33, ТМГ СВЭЛ (Классы Эко-1 и А), мощностью 1000кВА., напряжением (6,10)кВ.

В качестве примера рассмотрим трансформаторы (ТМГ33, ТМГ32, ТМГ СВЭЛ (Класс А), ТМГ СВЭЛ (Класс Эко-1)) мощностью 1000кВА, напряжением 10кВ.

Среднее значение активного сопротивления короткого замыкания равно:

$$r_{ср.} = \frac{\sum_{i=1}^{4} r_{кз}}{4};\ Ом. \tag{2}$$

Отклонения активного сопротивления короткого замыкания трансформатора ТМГ32 от среднего значения сопротивления короткого замыкания:

$$r_{кз.откл.} = \frac{\left| r_{кз.} - r_{ср.} \right|}{r_{ср.}} \times 100\%; \tag{3}$$

Результаты расчетов сведены в Таблицу 3.

Таблица 3.

Значения отклонений активного сопротивления короткого замыкания масляных трансформаторов мощностью 1000кВА.

Table 3.

Values of deviations of active resistance of short-circuit oil transformers with capacity of 1000kVA.

$U_{вн} = 10$ кВ.	ТМГ СВЭЛ (Класс А)	ТМГ33	ТМГ32	ТМГ СВЭЛ (Класс Эко-1)
$r_{кз}$; Ом.	0,954	0,954	1,05	0,9
$r_{ср.}$; Ом.	0,9645			
$r_{кз.отлк.}$; %	1,08	1,08	8,86	6,68
$U_{вн} = 6$ кВ.	ТМГ СВЭЛ (Класс А)	ТМГ33	ТМГ32	ТМГ СВЭЛ (Класс эко-1)
$r_{кз}$; Ом.	0,343	0,343	0,378	0,324
$r_{ср.}$; Ом.	0,347			
$r_{кз.отлк.}$; %	1,15	1,15	8,93	6,62

Обсуждение

На основании анализа результатов расчета можно выявить, трансформаторы (Класса Эко-1) показывают наименьшие значения потерь холостого хода и короткого замыкания при одинаковой мощности и напряжении КЗ. Активное сопротивление короткого замыкания у трансформаторов (Класса Эко-1) ниже на 5–12% по сравнению с (Классами А и С). Это свидетельствует о использовании более качественных материалов обмоток (медь с пониженным удельным сопротивлением), оптимизированной конструкции обмоток, снижающей добавочные потери. На основании расчетов отклонение активного сопротивление короткого замыкания трансформаторов одинаковой мощности различных заводов изготовителей находится в пределах от 0-10%.

Заключение

При проектировании и эксплуатации трансформаторов такие расхождения необходимо учитывать для обеспечения корректной работы защитных устройств и параллельной работы трансформаторов. Кроме того, даже небольшие расхождения в активном сопротивлении могут влиять на распределение нагрузки при параллельной работе трансформаторов, что особенно критично в сетях с высокими требованиями к надежности [4]. Для минимизации негативных последствий рекомендуется проводить сопоставительные испытания и при необходимости корректировать настройки релейной защиты с учётом реальных параметров каждого конкретного устройства.

Литература

1. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. — 3-е изд., переработанное и дополненное — Москва: Высшая школа, 2001. — 607 с.
2. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. — 3-е изд., переработанное и дополненное — Ленинград: Энергия, 1974. — 840 с.
3. ГОСТ 3484.1–88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний. — Введение 1989–07–01. — Москва: Издательство стандартов, 1988.
4. Работа трансформаторов с перегрузкой /С. А. Афанасьев; науч. рук. С. В. Константинова // Актуальные проблемы энергетики: материалы 81-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Минск : БНТУ, 2025. – С. 35–40.