

П. Ю. Красовский, канд. техн. наук

(Украина, г. Днепр, ГВУЗ «Национальный горный университет»)

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УТОЧНЕНИЮ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Анотація. В статті розроблені та представлені рекомендації з уточнення розрахунку втрат потужності холостого ходу в силових трансформаторах розподільних мереж, які враховують динаміку зміни магнітних властивостей осердь трансформаторів у залежності від терміну та умов експлуатації, а також ремонти трансформаторів з розбиранням магнітопроводів, що дозволить підвищити точність розрахунку нормативних втрат в силових трансформаторах і визначити найбільш достовірну структуру втрат в електричних мережах, що лежить в основі заходів з енергозбереження.

Ключові слова: втрати холостого ходу, силовий трансформатор, динаміка зміни втрат, методика розрахунку нормативних втрат, тривалий термін експлуатації.

Аннотация. В статье разработаны и представлены рекомендации по уточнению расчета потерь мощности холостого хода в силовых трансформаторах распределительных сетей, которые учитывают динамику изменения магнитных свойств сердечников трансформаторов в зависимости от срока и условий эксплуатации, а также ремонты трансформаторов с разборкой магнитопроводов, что позволит повысить точность расчета нормативных потерь в силовых трансформаторах и определить наиболее достоверную структуру потерь в электрических сетях, лежащую в основе мероприятий по энергосбережению.

Ключевые слова: потери холостого хода, силовой трансформатор, динамика изменения потерь, методика расчета нормативных потерь, длительный срок эксплуатации.

Abstract. Developed and released recommendations to clarify the calculation of no-load power losses in power transformers of distribution networks, which take into account the changing dynamics of magnetic properties in transformer cores, depending on the operation term and conditions, and repairs of power transformers with disassembly of cores that will improve the accuracy of normative losses calculation in power transformers and determine the most accurate structure of losses in electric networks, that underlying energy saving measures.

Keywords: no-load loss, power transformer, changing dynamics of loss, method of normative losses calculation, long operation term.

Постановка задачи

Технические потери электроэнергии при ее транспортировке в распределительных сетях являются основой норматива, определяющего экономически обоснованный технологический расход электроэнергии. В городских (распределительных) электрических сетях значительной составляющей потерь электроэнергии (до 30 %) являются потери холостого хода трансформаторов ΔP_x [1]. Снижение коэффициентов загрузки трансформаторов вследствие перераспределения электроэнергии увеличивает долю потерь холостого хода в суммарных потерях в трансформаторах. При расчетах баланса энергии потери ΔP_x в трансформаторах принимаются равными паспортному значению $\Delta P_{x,пасп}$. На практике паспортное значение $\Delta P_{x,пасп}$ не всегда соответствует реальным потерям в трансформаторе [2] и для разных трансформаторов различие может быть значительным. Неточное задание ΔP_x приводит к существенной ошибке в расчетах отпуска электроэнергии. Можно утверждать, что потери электрической энергии в силовых трансформаторах изменяются во времени и динамика этих изменений зависит как минимум от срока и условий эксплуатации, а также от видов и количества повреждений трансформаторов и качества их ремонта [1-3].

Цель статьи

На основании результатов [1, 2] представить разработанные рекомендации по уточнению потерь холостого хода в силовых трансформаторах распределительных сетей.

Изложение основного материала

Для получения и оценки общей картины изменения в процессе эксплуатации потерь холостого хода в силовых трансформаторах различных классов напряжений рассмотрены и оценены математические модели изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов с первичным напряжением 10(6), 35, 110 и 150 кВ. Из-за различия в конструктивных особенностях силовых трансформаторов различных ступеней напряжения и условиях их эксплуатации зависимости величин потерь в магнитопроводе от срока эксплуатации будут различными.

Согласно исследованиям [4-6] статистический анализ распределительных сетей 10(6) кВ показал существенное возрастание потерь холостого хода трансформаторов с течением срока службы. При этом для трансформаторов со сроком службы до 20 лет допустимо принимать, с погрешностью до 8 %, потери холостого хода равными паспортным. Для трансформаторов со сроком службы более 20 лет потери холостого хода возрастают в среднем с интенсивностью 1,75 % в год. На основании упомянутых выше исследований получим уточненные потери мощности в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся трансформаторов напряжением 10(6) кВ

$$\Delta P_{x.10(6)} = \Delta P_{x.пасп.} \cdot \left(1 + \frac{T_{эi}^{1,0935} - 25,32}{100} \right). \quad (1)$$

Другой причиной увеличения потерь мощности в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся трансформаторов напряжением 10(6) кВ, согласно исследованиям [7, 8] является капитальный ремонт трансформатора с расшивкой магнитопровода, необходимость проведения которого вызывается повреждением обмоток, магнитной системы или износом их изоляции [9]. На основании полученной математической модели, характеризующей изменение потерь мощности в магнитопроводах трансформаторов 10(6)/0,4 кВ мощностью до 630 кВА после проведения капитального ремонта, уточним потери мощности холостого хода

$$\Delta P_{x.рем.10(6)} = \Delta P_{x.пасп.} \cdot \left(1 + \frac{82,2 \cdot S_{ТН}^{-0,19}}{100} \right), \quad (2)$$

где $S_{ТН}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Из формул (1) и (2) получим уточненные потери мощности в магнитопроводе для силовых трансформаторов 10(6)/0,4 кВ мощностью до 630 кВА после проведения капитального ремонта и с учетом срока эксплуатации

$$\Delta P_{x.э.рем.} = \Delta P_{x.пасп.} \cdot \left(1 + \frac{T_{эi}^{1,0935} - 25,32 + 82,2 \cdot S_{ТН}^{-0,19}}{100} \right) \quad (3)$$

или в относительных единицах

$$\Delta P_{*x.э.рем.} = \frac{\Delta P_{x.э.рем.}}{\Delta P_{x.пасп.}} = 1 + \frac{T_{эi}^{1,0935} - 25,32 + 82,2 \cdot S_{ТН}^{-0,19}}{100}. \quad (4)$$

На рис. 1 показаны зависимости для корректировки паспортных потерь мощности в магнитопроводе для силовых трансформаторов 10(6)/0,4 кВ мощностью до 630 кВА без проведения капитального ремонта (кривые 1, 2) и после проведения капитального ремонта (кривые 4, 5) с учетом срока эксплуатации в относительных единицах.

Кривые 1 и 2 являются одной зависимостью отличающиеся только интервалом срока эксплуатации согласно вышеприведенным рекомендациям, согласно которым при $T_3 \geq 20$ лет следует пользоваться формулой (2) (кривая 1), иначе в расчетах используются паспортные данные (кривая 3). Кривые 4 и 5 характеризуют зависимости для корректировки паспортных потерь с учетом проведения капитального ремонта для крайних значений номинальной мощности исследуемых трансформаторов – 630 и 20 кВА соответственно. Другими словами, после капитального ремонта точка, находящаяся на кривой 1 или 3 (в

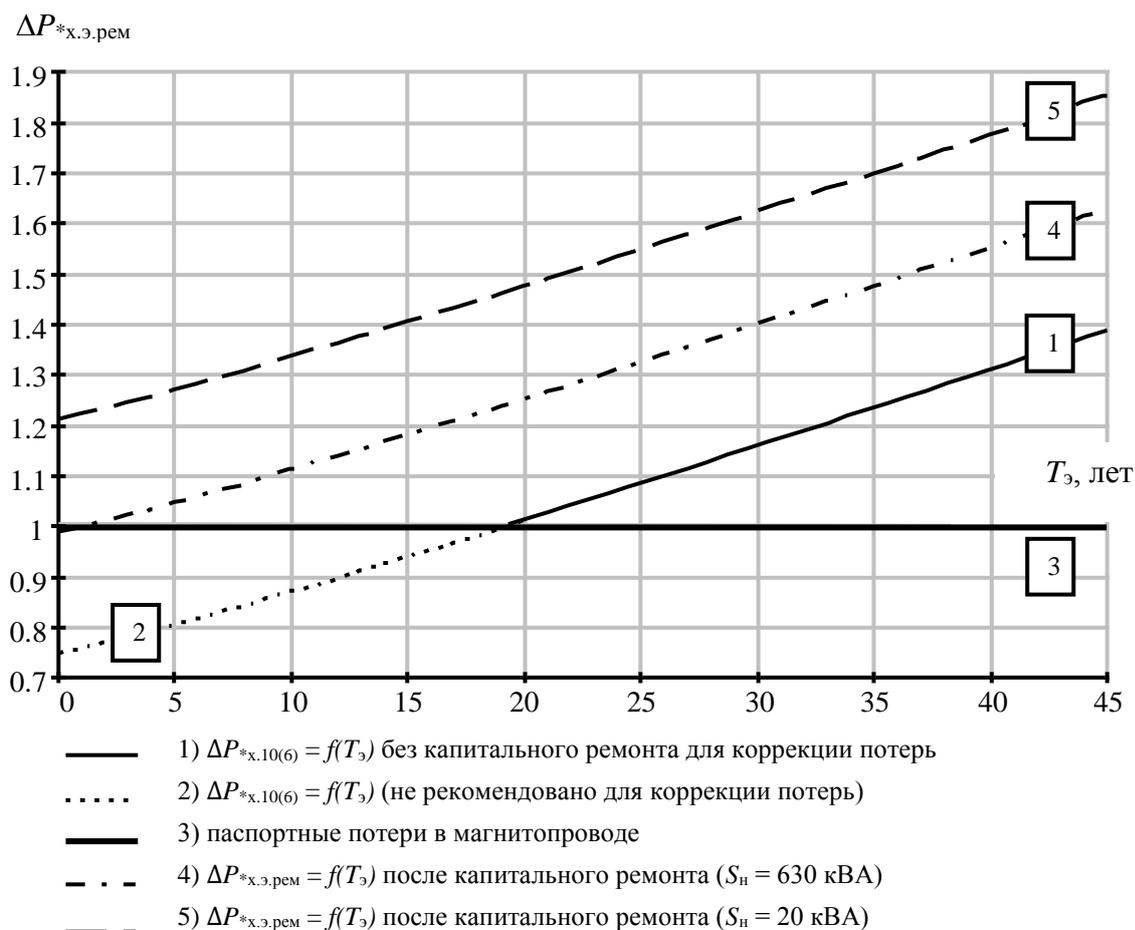


Рис. 1. Характер изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов 10(6) кВ в процессе эксплуатации

зависимости от значения $T_э$) смещается вертикально и, в зависимости от значения $S_{тн}$, попадает в зону, которая ограничена кривыми 4 и 5, и в дальнейшем перемещается вдоль кривой, рассчитанной по формуле (4).

Для силовых трансформаторов напряжением 35 и 110 кВ уточненные потери мощности холостого хода получим на базе разработанных однофакторных регрессионных математических моделей изменения потерь мощности в магнитопроводах в процессе эксплуатации [10]

$$\Delta P_{x.35} = \Delta P_{x.пасп.} \cdot \left(1 + \frac{0,66 \cdot T_{эi}^{1,12}}{100} \right), \quad (5)$$

$$\Delta P_{x.110} = \Delta P_{x.пасп.} \cdot \left(1 + \frac{1,07 \cdot T_{эi}^{1,02}}{100} \right). \quad (6)$$

Скорректированные паспортные потери мощности в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся трансформаторов напряжением 35 и 110 кВ в относительных единицах:

$$\Delta P_{*x.35} = \frac{\Delta P_{x.35}}{\Delta P_{x.пасп.}} = 1 + \frac{0,66 \cdot T_{эi}^{1,12}}{100}, \quad (7)$$

$$\Delta P_{*x.110} = \frac{\Delta P_{x.110}}{\Delta P_{x.пасп.}} = \left(1 + \frac{1,07 \cdot T_{эi}^{1,02}}{100} \right). \quad (8)$$

На рис. 2 изображен характер изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов 35 и 110 кВ в процессе эксплуатации в относительных единицах.

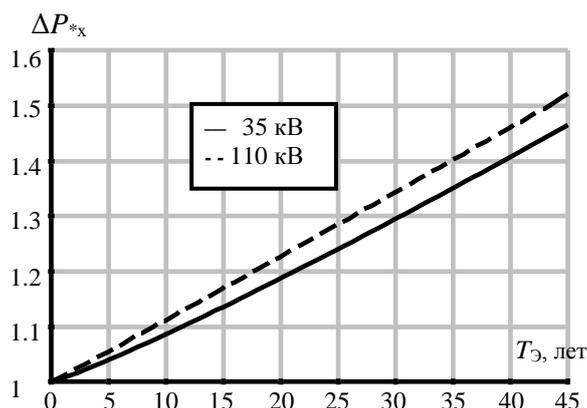


Рис. 2. Характер изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов 35 и 110 кВ в процессе эксплуатации.

Для силовых трансформаторов напряжением 150 кВ уточненные потери мощности холостого хода получим на базе разработанных однофакторных регрессионных математических моделей изменения потерь мощности в магнитопроводах в процессе эксплуатации [1, 2]. В этом случае они принимают вид:

$$\Delta P_{x,150} = \Delta P_{x,пасп.} \cdot (1 + 5,55 \cdot T_{эi}^{0,49}). \quad (9)$$

Уточненные потери мощности в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся трансформаторов напряжением 150 кВ в относительных единицах:

$$\Delta P_{*x,150} = \frac{\Delta P_{x,150}}{\Delta P_{x,пасп.}} = 1 + 5,55 \cdot T_{эi}^{0,49}. \quad (10)$$

На рис. 3 изображен характер изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов 150 кВ в процессе эксплуатации в относительных единицах.

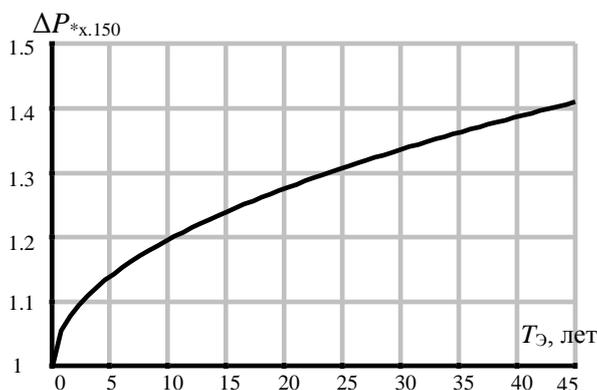


Рис. 3. Характер изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов 150 кВ в процессе эксплуатации.

Учитывая влияние длительности эксплуатации силовых трансформаторов и капитального ремонта с разборкой магнитопровода на потери мощности холостого хода, а также количество силовых трансформаторов, эксплуатирующихся с превышением нормативных сроков службы и наличием капитальных ремонтов, возникает необходимость корректировки действующей методики расчета нормативных потерь, не учитывающей данных факторов.

Корректировка методики расчета потерь электроэнергии в магнитопроводе силового трансформатора заключается в том, чтобы выполнять расчет не на основе паспортных потерь мощности в магнитопроводе, а с использованием их фактических значений. Таким образом, задача повышения точности расчета потерь сводится к определению фактических потерь мощности в магнитопроводе.

Фактические потери мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов можно определить из опыта холостого хода. При наличии замеров потерь мощности холостого хода не возникнет сложности в определении потерь электроэнергии в магнитопроводе силового трансформатора. Однако, такие данные имеются не по всем силовым трансформаторам, так как основным назначением замеров потерь в магнитопроводе в процессе эксплуатации является диагностика состояния силовых трансформаторов. В связи с чем, порядка половины силовых трансформаторов имеют данные о замерах потерь мощности в магнитопроводе, а по остальным такие данные отсутствуют. Вместе с тем, не все указанные замеры могут быть использованы при расчетах потерь электроэнергии, поскольку имеют различные сроки давности их проведения. Учитывая данное положение, необходимо разработать методику, которая позволит определять фактические потери мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов с различными сроками эксплуатации.

Для определения фактических потерь мощности в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся силовых трансформаторов их предлагается делить на следующие группы:

- 1) новые трансформаторы;
- 2) трансформаторы с актуальными результатами замеров потерь мощности в магнитопроводе;
- 3) трансформаторы с неактуальными замерами потерь;
- 4) трансформаторы без замеров потерь.

К первой группе следует отнести силовые трансформаторы со сроком эксплуатации до трех лет. Это связано с тем, что разработанные математические модели эксплуатационного изменения потерь мощности в магнитопроводе ограничиваются сроками эксплуатации от трех лет. Ко второй группе относятся силовые трансформаторы, у которых измерения потерь в магнитопроводах проводились в течение текущего года. К третьей группе следует отнести силовые трансформаторы с замерами потерь, проведенными более года назад. В четвертую группу входят трансформаторы, не охваченные замерами потерь.

С учетом приведенной классификации, фактические потери мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов, относящихся к первой группе, соответствуют паспортным потерям мощности холостого хода, в силовых трансформаторах второй группы – измеренным потерям холостого хода. Для остальных силовых трансформаторов, входящих в третью и четвертую группы, фактические потери мощности в магнитопроводах можно определить с использованием разработанных математических моделей эксплуатационного изменения потерь мощности холостого хода для силовых трансформаторов напряжением:

- 150 кВ – по формуле (9) или из графической зависимости, представленной на рис. 3;
- 110 кВ – по формуле (6) или из графической зависимости – рис. 1;
- 35 кВ – по формуле (5) или из графической зависимости – рис. 1;
- 10(6) кВ – по формуле (1) для силовых трансформаторов без капитального ремонта с разборкой магнитопровода, и по формуле (3) – после капитального ремонта, или из графической зависимости – рис. 2.

В случае, когда потери мощности в магнитопроводах трансформаторов, входящих в третью группу, по результатам расчета окажутся ниже измеренных значений, то в качестве фактических потерь мощности рекомендуется принимать результаты замеров.

При определении фактических потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов, прошедших капитальный ремонт, их предлагается делить на две группы:

- 1) трансформаторы, имеющие данные о замерах потерь мощности в магнитопроводе после проведения ремонта;
- 2) трансформаторы, у которых результаты таких замеров отсутствуют.

Таким образом, фактические потери мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов первой группы соответствуют измеренным потерям. В силовых трансформаторах, относящихся ко второй группе, фактические потери мощности в магнитопроводе рекомендуется определять на основе разработанной математической модели послеремонтного изменения потерь с учетом срока эксплуатации (3) или из графической зависимости – рис. 2.

Выводы

1. Динамика изменения потерь мощности холостого хода силовых трансформаторов в течение срока их эксплуатации характеризуется приращением, нарастающим в степенной функции от срока службы, коэффициенты которой зависят от конструктивных и режимных особенностей трансформатора, и может быть унифицирована для соответствующих классов значений первичного напряжения.

2. Разработаны принципы и методика расчета нормативных потерь энергии в силовых трансформаторах, которая, в отличие от действующей, учитывает динамику изменения магнитных свойств сердечников трансформаторов в зависимости от срока и условий эксплуатации, а также ремонты трансформаторов с разборкой магнитопроводов.

3. При выполнении расчетов потерь электроэнергии в магнитопроводах силовых трансформаторов энергосистемы, имеющих длительный срок эксплуатации, рекомендуется учитывать изменения потерь мощности в магнитопроводе, что позволит повысить точность расчета нормативных потерь в силовых трансформаторах и определить наиболее достоверную структуру потерь в электрических сетях, лежащую в основе мероприятий по энергосбережению.

Список использованных источников

1. Красовский, П. Ю. Эксплуатационная динамика параметров и технических потерь в силовых трансформаторах / Красовский П. Ю. // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. – Техн. зб. – 2012. – Вип. 89. – с. 20-23.
2. Красовский, П. Ю. Расчет технологических потерь электроэнергии в силовых трансформаторах с учетом срока эксплуатации / П. Ю. Красовский // Електрифікація транспорту: наук. журнал – 2015. – № 10. – с. 74-80.
3. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – Введ. 1986-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 48 с.
4. Казаков, Ю. Б. Учет изменения потерь холостого хода трансформаторов в период срока службы при расчете потерь в распределительных сетях / Ю. Б. Казаков, А. Б. Козлов, В. В. Коротков // Электротехника. – 2006. – № 5. – С.11-16.
5. Коротков, А. В. Методы оценки характеристик оборудования электротехнических комплексов городских распределительных сетей / А. В. Коротков, В. Я. Фролов // Электрика. – 2014. – № 1. – С.6-10.
6. Коротков, А. В. Результаты измерений мощности потерь холостого хода трансформаторов с различным сроком службы / А. В. Коротков, В. Я. Фролов // Электрика. – 2011. – № 8. – С.8-11.
7. Заугольников, В. Ф. Некоторые аспекты экономической работы силовых трансформаторов / В. Ф. Заугольников, А. А. Балабин, А. А. Савинков // Промышленная энергетика. – 2006. – № 4. – С.10-14.
8. Балабин, А. А. Повышение достоверности расчета потерь электроэнергии в трансформаторах 10(6)/0,4 кВ / А. А. Балабин, Ю. Д. Волчков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – №4. – С.22–23.
9. Худяков, З. И. Ремонт трансформаторов / З. И. Худяков. – М.: Высш. шк., 1986. – 232 с.
10. Волчков, Ю. Д. Повышение достоверности расчета потерь электроэнергии в трансформаторах 35 и 110 кВ / Ю. Д. Волчков, А. А. Балабин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 12. – С.41-43.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

УДК: 658.284:622.2

А.В. Толстов, В.Н. Прокуда, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕНОСНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СБОРА ДАННЫХ И АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В УГОЛЬНОЙ ШАХТЕ

Анотація Метою роботи є розробка та реалізація системи збору та оперативного аналізу інформації про енергоспоживання у вугільній шахті. Задачами роботи є аналіз існуючих систем збору та обліку даних про енергоспоживання, а також обґрунтування необхідних компонентів для розроблюваної системи. Наукова новизна полягає у можливості узагальнення регресійних та аналітичних моделей енергопостачання вугільних шахт в рамках одного портативного пристрою. Практичне значення полягає у використанні прямих та опосередкованих показників, отримуваних за допомогою переносного пристрою, для контролю енергоефективності, що дозволяє позбутися потреби у дорогих системах АСКОЕ.

Ключові слова: SCADA системи, АСКОЕ, регресійна модель, портативні пристрої

Аннотация. Целью работы является разработка и реализация системы сбора и оперативного анализа информации об электропотреблении в угольной шахте. Задачами работы являются анализ существующих систем сбора и учёта данных об электропотреблении, а также обоснование необходимых компонентов для разрабатываемой системы. Научная новизна заключается в возможности обобщения регрессионных и аналитических моделей электропотребления угольных шахт в рамках одного портативного устройства. Практическое значение заключается в использовании прямых и косвенных показателей, получаемых с помощью переносного устройства, для контроля энергоэффективности, что позволит избавиться от необходимости приобретения дорогостоящих систем АСКУЭ.

Ключевые слова: SCADA системы, АСКУЭ, регрессионная модель, портативные устройства

Abstract. The target of this scientific article is to develop and implement a system for collecting and analyzing operational data on energy consumption in the coalmine. The objectives of this work are the analysis of existing systems for collecting and recording data on energy consumption and justification of necessary compo-