

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТЫ

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-282-289>

УДК 621.311

Исследование загрузки силовых трансформаторов в системах сельского электроснабжения

Наумов И. В.^{1,2*}, Карамов Д. Н.^{1,3}, Третьяков А. Н.², Якупова М. А.², Федоринова Э. С.²

¹ ФГБОУ «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

ул. Лермонтова 83, 664074, г. Иркутск, Россия

² ФГБОУ «Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского»

пос. Молодежный 1/1, 664038, г. Иркутск, Россия

³ ФГБ «Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН», ул. Лермонтова 130, 664058, г. Иркутск, Россия

Поступила / Received 26.08.2020

Принята к печати / Accepted for publication 3.11.2020

Целью настоящего исследования является изучение влияния загрузки силовых трансформаторов (СТ) при их непрерывном использовании, на их энергоэффективность на реальном примере действующих сельских электрических сетей. Отмечается, что подавляющее большинство СТ в сельских районах имеет очень низкий коэффициент загрузки, что приводит к увеличению удельных потерь электрической энергии при ее передаче различным потребителям. Предполагается оптимизировать существующие синхронизированные системы электроснабжения сельских территорий путем создания новых проектов электроснабжения таким образом, чтобы интегрировать существующие источники питания и обеспечить наиболее эффективную загрузку силовых трансформаторов для последующего перевода этих систем в изолированные, получающие питание от средств распределенной генерации. В качестве примера используются данные электросетевой компании по загрузке силовых трансформаторов одного из районов Иркутской области. Рассматриваются вопросы, связанные с определением потерь электрической энергии в сельских СТ при различных численных значениях их коэффициентов загрузки. Разработан вычислительный аппарат с применением современных средств программирования в системе MATLAB, с помощью которого произведен расчет и построены графики зависимости потерь электроэнергии в трансформаторах различной мощности от фактического и рекомендуемого коэффициентов загрузки, а также зависимости удельных потерь при транзите 1 кВА мощности через силовой трансформатор при фактическом, рекомендуемом и оптимальном коэффициентах загрузки. Произведен анализ удельных потерь электрической энергии при фактическом, рекомендуемом и оптимальном коэффициентах загрузки СТ. На основании анализа предложены интервалы оптимальных коэффициентов загрузки для различной номинальной мощности СТ сельских распределительных электрических сетей. Отмечается, что для увеличения энергоэффективности СТ необходимо снижение потерь холостого хода за счет повышения их загрузки, что может быть достигнуто сокращением числа трансформаторов с одновременным изменением конфигурации распределительных сетей 0,38 кВ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сельские электрические сети, энергоэффективность силовых трансформаторов, коэффициент загрузки, удельные потери электроэнергии

Благодарности

Результаты работы, представленные в статье, получены на основании предоставленных данных измерений ОАО «Иркутская сетевая компания» (филиал ООВЭС) за 2019 г.

Адрес для переписки:

Наумов И. В.

ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», кафедра Электроснабжения и электротехники

ул. Лермонтова 83, 664074, г. Иркутск, Россия

e-mail: professornaumov@list.ru

Address for correspondence:

Naumov I. V.

Irkutsk scientific research technical University, Department of power supply and electrical engineering

83 Lermontov str., 664074, Irkutsk, Russia

e-mail: professornaumov@list.ru

Для цитирования:

Наумов И. В., Карамов Д. А., Третьяков А. Н., Якупова М. А., Федоринова Э. С. Исследование загрузки силовых трансформаторов в системах сельского электроснабжения. Надежность и безопасность энергетики. 2020. – Т. 13, №4. – С. 282 – 289.

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-282-289>

For citation:

Naumov I. V., Karamov D. A., Tretyakov A. N., Yakupova M. A., Fedurinova E. S. [Study of power transformer loading in rural power supply systems]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2020, vol. 13, no. 4, pp. 282 – 289. (in Russian)

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-282-289>

Study of power transformer loading in rural power supply systems

Naumov I. V.^{1,2*}, Karamov D. N.^{1,3}, Tretyakov A. N.², Yakupova M. A.², Fedorinova E. S.²

¹ Irkutsk national research technical University
83 Lermontov str., 664074, Irkutsk, Russia

² Irkutsk state agrarian University named after A. A. Yezhevsky
village Youth 1/1, 664038, Irkutsk, Russia

³ Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS
130 Lermontov str., 664058, Irkutsk, Russia

The purpose of this study is to study the effect of loading power transformers (PT) in their continuous use on their energy efficiency on a real-life example of existing rural electric networks. It is noted that the vast majority of PT in rural areas have a very low load factor, which leads to an increase in specific losses of electric energy when this is transmitted to various consumers. It is planned to optimize the existing synchronized power supply systems in rural areas by creating new power supply projects in such a way as to integrate existing power sources and ensure the most efficient loading of power transformers for the subsequent transfer of these systems to isolated ones that receive power from distributed generation facilities. As an example, we use data from an electric grid company on loading power transformers in one of the districts of the Irkutsk region. Issues related to the determination of electric energy losses in rural PT at different numerical values of their load factors are considered. A computing device was developed using modern programming tools in the MATLAB system, which has been used to calculate and plot the dependence of power losses in transformers of various capacities on the actual and recommended load factors, as well as the dependence of specific losses during the transit of 1 kVA of power through a power transformer at the actual, recommended and optimal load factors. The analysis of specific losses of electric energy at the actual, recommended and optimal load factors of PT is made. Based on the analysis, the intervals of optimal load factors for different rated power of PT of rural distribution electric networks are proposed. It is noted that to increase the energy efficiency of PT, it is necessary to reduce idling losses by increasing the load of these transformers, which can be achieved by reducing the number of transformers while changing the configuration of 0.38 kV distribution networks.

KEYWORDS: rural electric networks, energy efficiency of power transformers, load factor, specific power losses

Acknowledgments

The results of the work presented in the article were obtained on the basis of the provided measurement data of JSC Irkutsk Grid Company (OOVES branch) for 2019.

Введение. В настоящее время постепенно происходит переход от глобального централизованного электроснабжения отдельных районов к новым, децентрализованным системам, имеющим в качестве основного центра питания источник распределенной генерации (РГ), питающий потребителей по изолированным системам электроснабжения. Это во многом связано с трудностями при сооружении синхронизированных систем электроснабжения отдельных районов, большими капитальными вложениями и издержками при эксплуатации объединенных систем. Поэтому выбор наиболее корректной, экономически обоснованной мощности источника распределенной генерации является одной из актуальнейших задач современной электроэнергетики.

При выборе мощности источника распределенной генерации основное внимание следует уделять той инфраструктуре (производственная, коммунально-бытовая нагрузка), которая уже получает питание от существующих пунктов питания в структуре рассматриваемой системы электроснабжения. Поэтому, прежде чем сооружать комплекс распределенной генерации и проектировать его номинальную мощность для питания таких изолированных систем, необходимо оптимизировать существующие электрические сети

для повышения эффективности функционирования их отдельных элементов, минимизировав возможные дополнительные потери электрической энергии. Это позволит более точно скорректировать и мощность источника распределенной генерации.

Другими словами, если имеется определенная территория с развитой инфраструктурой и существующей системой синхронизированного электроснабжения, то, прежде чем переводить эту систему на питание от РГ, необходимо оптимизировать эту систему, в первую очередь, уделив внимание корректному определению расчетной нагрузки и выборе силовых трансформаторов с наиболее оптимальным коэффициентом загрузки.

Соответствие количества произведенной энергии средствами распределенной генерации и мощности, потребляемой нагрузкой, является одной из самых актуальных задач современных структур изолированных систем электроснабжения. Но прежде чем адаптировать существующую систему электроснабжения к источнику РГ определенной мощности необходимо тщательно проанализировать возможности использования существующих источников питания (СТ) в изолированной системе. Основной целью такого исследования является возможность перевода определенной

части потребителей, получающих питание от синхронизированной системы электроснабжения на изолированную, получающую питание от источника РГ.

На первоначальном этапе была поставлена задача исследования загрузки СТ сельских электрических сетей, т. е., насколько эффективно используется мощность этих источников и определить наиболее эффективные их коэффициенты загрузки. Последующие задачи связаны с рассмотрением возможности перехода от синхронизированной к изолированной системе электроснабжения определенной территории, на которой расположены сельские электропотребители.

Основная часть. Нагрузочные потери СТ определяются рабочими токами, и для их снижения без изменения электропотребления, необходимо совершенствовать структуру СТ, в основном, за счет изменения сечения обмоточного провода или использования проводников более дорогого материала с низким удельным сопротивлением. Но это связано с удорожанием самого трансформатора. Потери же холостого тока, вызываемые током намагничивания, постоянны и обусловлены потерями на гистерезис и вихревые токи в пластинах сердечника, а также потери на вихревые токи в других компонентах сердечника, зажимах и болтовых соединениях. Диэлектрические потери незначительны и их можно не учитывать. Поэтому, по некоторым оценкам [1], в потерях холостого хода трансформатора значительная доля приходится именно на гистерезисные, которые составляют от 50 до 80% от общих потерь холостого хода и вихревые потери — от 20 до 50% потерь холостого хода. Конечно в СТ, кроме указанных, существуют и другие дополнительные потери, обусловленные, например, низким качеством электрической энергии [2, 3], но в данной статье этот вопрос не рассматривается.

Часть реактивной мощности, обеспечивающей скорость обмена электромагнитной энергией между трансформатором и пунктом приема может быть скомпенсирована не только за счет средств компенсации реактивной мощности (КРМ), но также и за счет повышения коэффициента загрузки силового трансформатора и соответствующего увеличения его коэффициента активной мощности.

Цель исследования. Целью исследования являлось изучение влияния загрузки СТ при непрерывном использовании на их энергоэффективность на реальном примере действующих сельских электрических сетей.

Задачи исследования. Для достижения цели исследования необходимо было решить ряд задач, основными из которых являлись следующие:

1. Выбор реальных электрических сетей, обеспечивающих электроснабжение сельских потребителей.
2. Определение реальных (фактических) коэффициентов загрузки силовых трансформаторов в этих электрических сетях.
3. Разработка вычислительного инструментария для определения потерь в трансформаторах.
4. Определение влияния загрузки силового трансформатора различной мощности на удельные потери

электрической энергии при реальном, рекомендуемом и оптимальном коэффициентах загрузки.

Исходные данные. В качестве исходных данных для анализа использована информация по функционированию Осинских РЭС (районных электрических сетей) Иркутской области (Россия).¹ Эти электрические сети напряжением 10 кВ расположены на достаточно большой территории, выполненные по магистральным типовым схемам и берут свое начало от 6 Центров Питания, а именно: ЦП «Бильчир», имеющий 4 фидера; ЦП «Енисей», имеющий 4 фидера; ЦП «Ново-Ленино», имеющий 4 фидера; ЦП «Осинский», имеющий 6 фидеров; ЦП «Тихоновка», имеющий 5 фидеров и ЦП «Усть-Алтан», имеющий 3 фидера. Всего Осинские сети охватывают 450 трансформаторных подстанций. Для примера выбран ЦП «Осинский», от 6 фидеров которого получают питание 137 трансформаторных подстанций разной мощности. Марка трансформатора ТМ10/0,4. Количественная оценка мощности СТ следующая.

Из общего количества (137 шт.) трансформаторы мощностью 25 кВА составляют 2,2% (3 шт.), со средним коэффициентом загрузки ($K_{зср}$), равным 5,6%; 40 кВА — 2,9% (4 шт.), $K_{зср} = 5,6\%$; 63 кВА — 24,8% (34 шт.), с $K_{зср} = 24,8\%$; 100 кВА — 31,3% (43 шт.) с $K_{зср} = 22\%$; 160 кВА — около 19% (26 шт.) с $K_{зср} = 38,6\%$; 250 кВА — около 11% (15 шт.) с $K_{зср} = 22,4\%$; один трансформатор 320 кВА с $K_{зср} = 8,8\%$; 400 кВА — 6,5% (9 шт.) с $K_{зср} = 15,4\%$ и трансформаторы мощностью 630 кВА (около 1,5% — 2 шт.) с $K_{зср} = 26,2\%$. По всем рассматриваемым электрическим сетям этого класса напряжения коэффициент загрузки силовых трансформаторов составил в среднем 18,8%.

Как известно, номинальная мощность СТ выбирается в зависимости от его расчетной нагрузки на шинах низкого напряжения, а также рекомендуемого коэффициента загрузки, зависящего от категории электроприемников по уровню надежности электроснабжения.

Так как все исследуемые СТ питают в подавляющем большинстве электроприемники 3 категории, то для них *рекомендуемым* значением коэффициента загрузки является величина — 0,85–0,95. Как видно из исследования, значение коэффициента загрузки 18–19% никак не удовлетворяет требованиям эффективного электроснабжения.

Вычислительный инструмент. Для оценки энергоэффективности рассматриваемых СТ, в среде программирования *Matlab* был разработан пакет компьютерных программ «*Transformer1*», «*Transformer2*», которые позволяют осуществить расчет потерь активной, реактивной и полной мощности СТ. При этом расчет осуществлялся для рекомендуемого коэффициента загрузки каждого трансформатора.

Далее, был произведен расчет количества энергии, проходящей через СТ за год, как при реальном (фактическом), так и при рекомендуемом коэффициенте загрузки, кВА·ч.

Следует отметить, что для оценки энергоэффектив-

¹ Данные периодических измерений нагрузок силовых трансформаторов за 2019 г. предоставлены ОАО Иркутская сетевая компания (филиал ООВЭС).

ности работы СТ предлагается применять удельную величину, а именно: удельные потери, приходящиеся на 1 кВА·ч энергии, проходящей через СТ. Этот показатель и будет характеризовать эффективное использование номинальной установленной мощности СТ в общем объеме передаваемой электрической энергии. Поэтому был произведен расчет таких удельных потерь для каждого из исследуемых трансформаторов при фактическом и рекомендуемом значении коэффициента загрузки.

На первом этапе выполнения исследований рассматривался вопрос об изменении потерь в трансформаторах определенной номинальной мощности с различными коэффициентами загрузки.

На основании исходной информации с помощью разработанного пакета программ произведено вычисление активных, реактивных, полных потерь трансформатора и удельных потерь энергии при транзите через него 1 кВА·ч электрической энергии. На основе вычислений были получены зависимости этих потерь при фактическом и рекомендуемом коэффициенте загрузки для всех номиналов мощностей трансформаторов (рисунки 1 и 2, графики 1–3).

Анализ полученных зависимостей показал следующее. Полные потери в трансформаторах мощностью 25 кВА при рекомендуемом коэффициенте загрузки (0,95) в 2,3 раза будут превышать аналогичные потери при среднем фактическом коэффициенте загрузки (0,059). Такое превышение характерно для всех номинальных мощностей СТ. Для трансформаторов 40 кВА превышение составляет 1,96; для мощности 63 кВА — в 1,06 раза; для 100 кВА — в 1,72 раза; для 160 кВА — в 1,63 раза; для 250 кВА — в 2,01 раза; для 320 кВА — в 1,76 раза; для 400 кВА — в 2,31 раза и для 630 кВА — 2,12. Такое превышение объяснимо, так как чем больше токовая нагрузка, тем больше потери. Поэтому на **втором этапе** исследования было решено рассмотреть

вопрос об удельных потерях электрической энергии в трансформаторе при пропускании через него полной мощности в единицу времени. Для этой цели выполнен расчет таких потерь для всех номиналов мощностей исследуемых трансформаторов.

На рисунках 1 и 2 (графики 4) представлены функциональные зависимости удельных потерь полной мощности, пропускаемой через СТ при сравниваемых коэффициентах загрузки (фактическом — рисунок 1 и рекомендуемом — рисунок 2).

Анализ полученных зависимостей показал следующее. Для силовых трансформаторов мощностью 25 кВА удельные потери электроэнергии при пропускании через трансформатор 1 кВА полной мощности при рекомендуемом коэффициенте загрузки (0,95) в 9,25 раз меньше, чем аналогичные удельные потери, пропускаемые через СТ при фактическом (среднем) коэффициенте загрузки (0,059).

Аналогичная ситуация наблюдается и с другими исследуемыми СТ. Так, для трансформаторов мощностью 40 кВА превышение составило 23,4 раза; для трансформатора 63 кВА — 2,86 раза; для 100 кВА — в 2,88 раза; для 160 кВА — в 4,86 раз; для 250 кВА — в 4,71 раза; для 320 кВА — в 6,2 раза; для 400 кВА — в 9,14 раза и для 630 кВА — в 3,75 раза. Таким образом, отчетливо видно, что удельные потери энергии тем ниже, чем выше коэффициент загрузки трансформатора.

В [4–6] отмечается, что максимум энергоэффективности достигается при вполне определённой нагрузке трансформатора заданной мощности. А так как оптимальные потери холостого хода (хх) и короткого замыкания (кз) однозначно связаны между собой через максимум коэффициента энергоэффективности, то повышение энергоэффективности трансформаторов трансформаторных подстанций это не просто уменьшение потерь хх и кз трансформаторов, а обеспечение определенных сочетаний минимальных потерь хх и кз

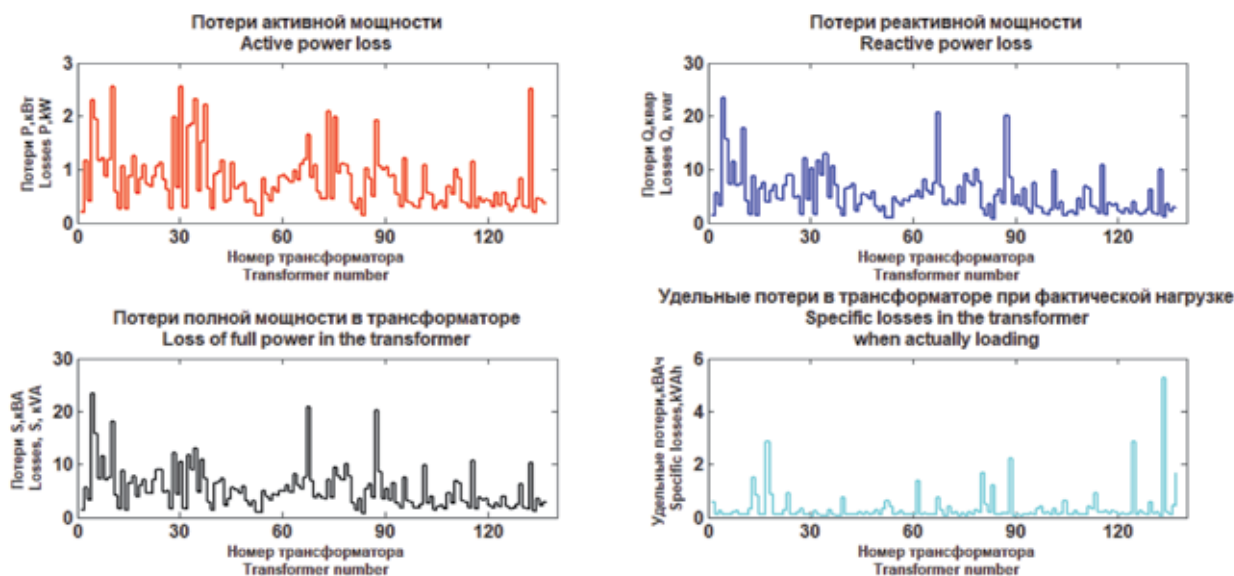


Рисунок 1. Зависимость потерь в трансформаторах различной мощности от фактического коэффициента нагрузки
Figure 1. Dependence of losses in transformers of different power at the actual load factor

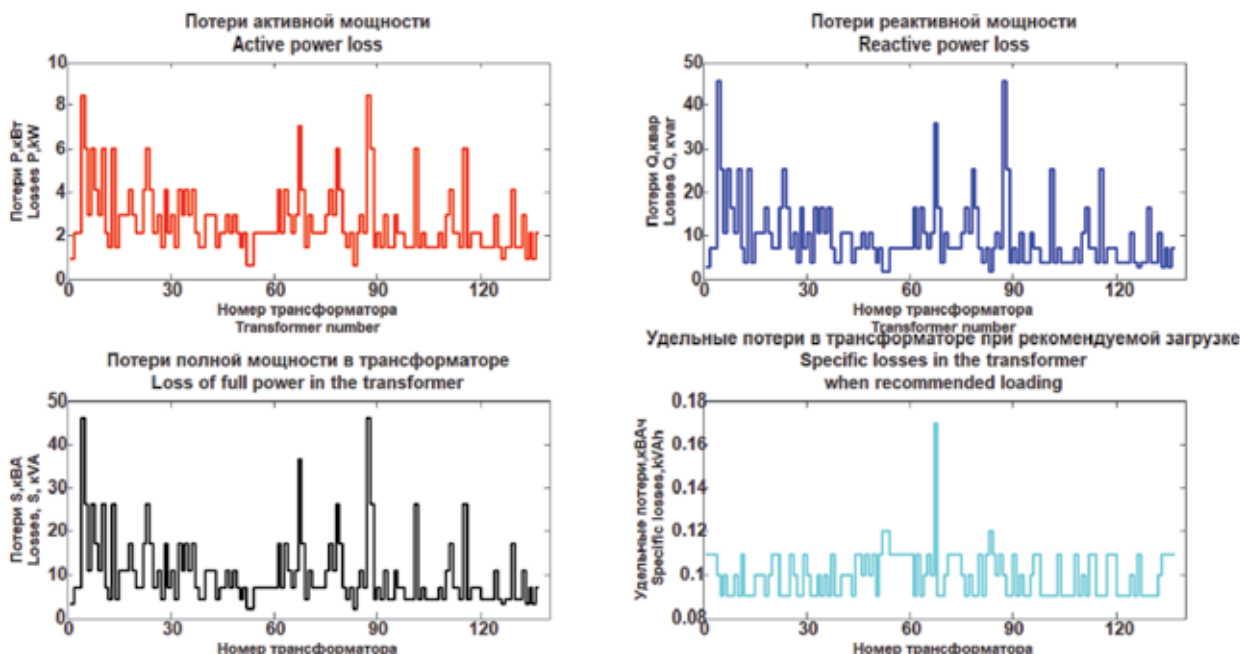


Рисунок 2. Зависимость потерь в трансформаторах различной мощности от рекомендуемого коэффициента нагрузки
Figure 2. Dependence of losses in transformers of different power at the recommended load factor

при заданной нагрузке.

Соотношения потерь холостого тока и короткого замыкания определяют номинальную мощность, заданную для СТ [7, 8].

Во многих литературных источниках отмечается, что фактический коэффициент загрузки СТ практически всегда много ниже, чем рекомендуемый для определенной категории потребителей по уровню надежности электроснабжения. Поэтому достаточное количество исследований [9–12] посвящено определению именно оптимального коэффициента загрузки. С учетом некоторых допущений, *оптимальный коэффициент загрузки* может быть определен взаимосвязью потерь холостого хода и короткого замыкания²:

$$P_{xx} = P_{кз} (\alpha_m)^2$$

При этом коэффициент загрузки α_m будет являться оптимальным и соответствовать максимальной энергоэффективности трансформатора.

В связи с этим на **3 этапе исследований** возникла необходимость рассмотреть вопрос взаимосвязи удельных потерь энергии при различных коэффициентах загрузки. Для этой цели были разработаны 2 компьютерных программы в системе *Matlab*: “*Transformer 3*” и “*Transformer 4*”. Эти программы позволяют осуществить расчет удельных потерь энергии при *нормативном* (рекомендуемом), равным 0,95; оптимальном, вычисленном предствленному выражению, а также при изменяющимся коэффициенте загрузки от 0,1 до 0,95.

В результате были рассчитаны и получены зависимости удельных потерь энергии при транзите 1 кВА

мощности для каждого из 137 СТ при фактическом, рекомендуемом и оптимальном коэффициенте загрузки (рисунки 3–5).

Следует отметить, что уменьшение точек на графиках рисунков 4 и 5 по сравнению с рисунком 3 связано с тем, что большое количество СТ одинаковой мощности имеет практически одинаковые значения рекомендуемого и оптимального коэффициентов загрузки.

Анализ рисунков 3–5 показал следующее. Для СТ мощностью 25 кВА наиболее оптимальным является коэффициент загрузки 0,73. При этом значении удельные потери энергии при транзите 1 кВА мощности в 9,25 раза меньше, чем при фактическом среднем значении этого коэффициента, равного для трансформаторов этой мощности 0,06. При этом, даже если коэффициент загрузки составит 0,95, удельные потери при транзите через СТ 1кВА мощности не меняются. Т. е., значение удельных потерь через СТ при коэффициенте загрузки 0,95 остается таким же также, как и при коэффициенте загрузки 0,73. Таким образом коэффициент загрузки 0,73 является минимально-целесообразным.

Для трансформаторов 40 кВА наиболее целесообразным является коэффициент равный 0,72. В этом случае удельные потери по сравнению с реальным коэффициентом загрузки (0,191) уменьшатся в 28,4 раза.

Аналогично этому, определены оптимальные коэффициенты загрузки и для СТ других номинальных мощностей. Так, для мощности 63 кВА оптимальным коэффициентом загрузки будет 0,78 (удельные потери снижаются по сравнению с фактическим коэффициентом загрузки в 4,6 раза); для 100 кВА — 0,78 (потери снижаются в 7,7 раза); для 160 кВА — 0,58 (снижение потерь в 17 раз); для 250 кВА — 0,66 (снижение потерь в 33 раза — с 0,33 до 0,01); для 320 кВА — 0,42 (потери снижаются в 74 раза — с 0,74 до 0,01); для 400 кВА —

² Ю. Савинцев. Надежный поставщик — ключ к безаварийности и энергоэффективности / Газета “Энергетика и промышленность России”, № 09 (365) май 2019 года. Наука и новые технологии.

0,31 (снижение в 64 раза) и для 630 кВА — минимальный коэффициент загрузки составляет 0,17. При этом удельные потери энергии с возрастанием коэффициента загрузки не меняются.

Проведенный анализ показал, что для исследуемых электрических сетей существует реальная возможность повышения энергоэффективности при условии рекомендуемой загрузки трансформаторов до 95%. В частности, для трансформаторов номинальной мощности 25 кВА коэффициент загрузки следует повысить в среднем на 67%, для 40 кВА — на 53%; для 63 кВА — на 50%; для 100 кВА — на 45%; для 160 кВА — на 18%; для 250 кВА — на 43%; для 320 кВА — на 33%; для 400 кВА — на 15%, для 630 кВА коэффициент загрузки можно существенно не изменять.

В трех СТ по 25 кВА при фактических коэффициентах загрузки 0,03, 0,06 и 0,09 (среднее значение составляет 0,06) удельные потери энергии превышают аналогичные при оптимальном (0,47), рассчитанном по выше

приведенному выражению, в **6,2 раз**, а при рекомендуемом (0,95) — в **7,5 раз**. На основе анализа рисунков 3 и 4 установлено, удельные потери при рекомендуемом коэффициенте загрузки (0,95) будут такими же, что и при коэффициенте загрузки 0,73. Следовательно значение коэффициента загрузки 0,73 и будет являться целесообразным. Практически во всех литературных источниках утверждается, что период эксплуатации СТ существенно влияет на увеличение потерь холостого хода. По всей видимости это связано с тем, что при периодическом перемагничивании ферромагнетика в нём происходят необратимые процессы, на которые расходуется энергия от намагничивающего источника. Поэтому скорость перемагничивания ферромагнитного материала определяет и степень проявления различных видов потерь.

Соответственно со временем эксплуатации СТ увеличиваются и гистерезисные потери. Достоверная информации о том, какие конкретно из 137 исследуемых

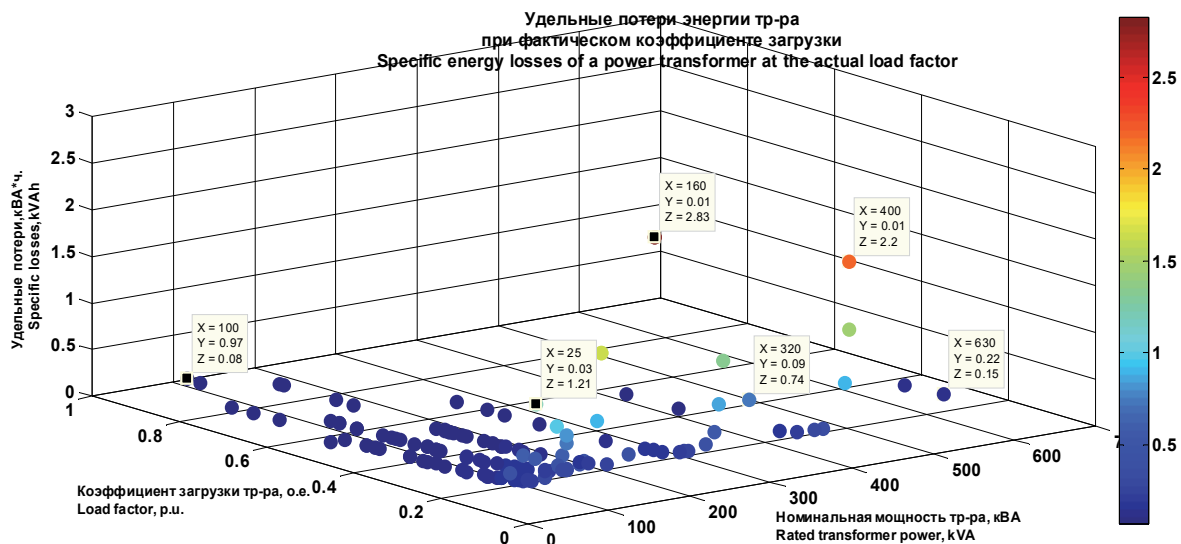


Рисунок 3. Изменение удельных потерь энергии при транзите 1 кВА мощности через СТ при фактических коэффициентах загрузки
Figure 3. Change in specific energy losses during transit of 1 kVA of power through a PT at the actual load factors

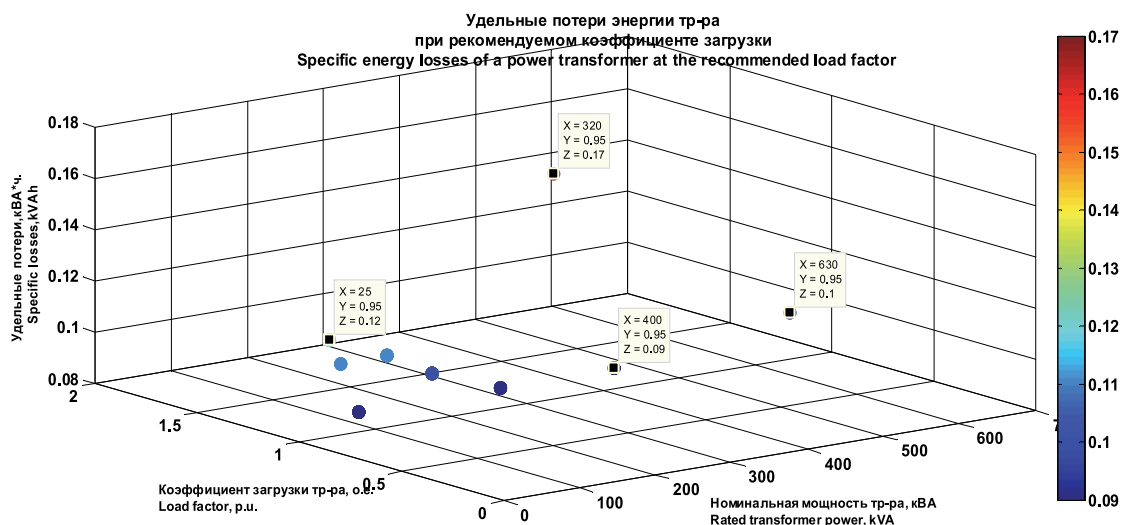


Рисунок 4. Изменение удельных потерь энергии при транзите 1 кВА мощности через СТ при рекомендуемом коэффициенте загрузки
Figure 4. Change in specific energy losses during transit of 1 kVA of power through a PT at the recommended load factor

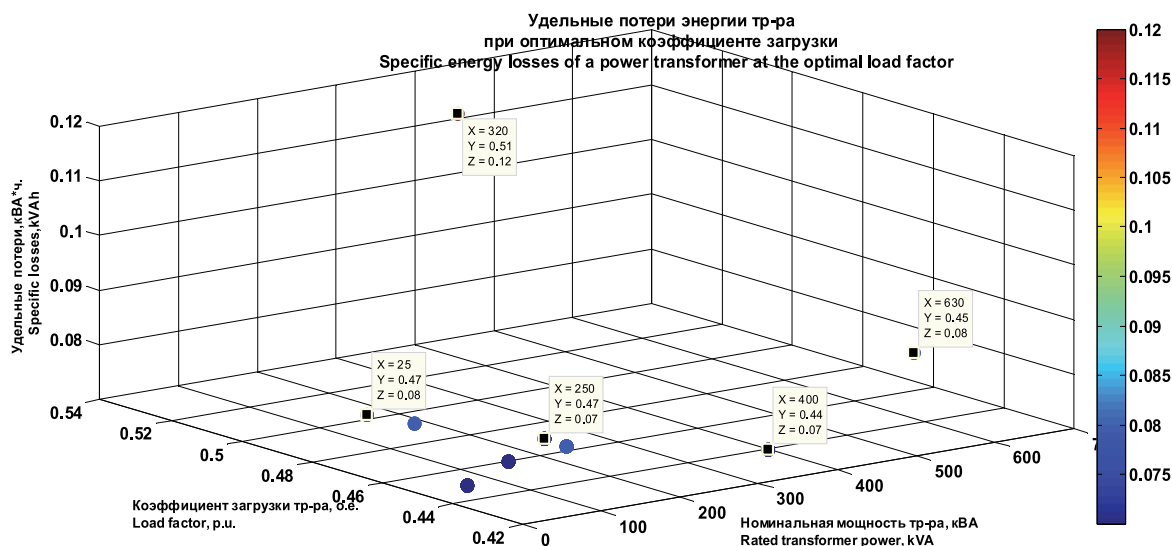


Рисунок 5. Изменение удельных потерь энергии при транзите 1 кВА мощности через СТ при оптимальных коэффициентах загрузки
Figure 5. Change in specific energy losses during the transit of 1 kVA of power through a PT at an optimal load factors

трансформаторов работают 20 и более лет, отсутствует. В связи с этим можно утверждать, что *оптимальным коэффициентом загрузки трансформаторов 25 кВА* будут значения, находящиеся в пределах **0,47–0,73**. Кроме того, в этом же примерно диапазоне будет наиболее высокий к.п.д. трансформатора согласно исследованиям [13].

Для трансформаторов 40 кВА (4 шт.) удельные потери при среднем фактическом коэффициенте загрузки K_3 , равном 0,19, в **19 раз** больше потерь при оптимальном K_3 (0,46). С учетом анализа рисунков 3, 4, оптимальный коэффициент загрузки будет находиться в пределах $\alpha_m = 0,46 - 0,72$. Для трансформаторов 63 кВА (33 шт.) удельные потери при среднем фактическом $K_3 = 0,28$ в **2,2 раза** больше тех же потерь при оптимальном (0,45). И оптимальным для α_m будет интервал **0,45 – 0,78**.

Аналогично для трансформаторов 100 кВА (43 шт.) превышение составляет **2,1 раза**, а интервал для α_m составляет **0,43 – 0,78**.

Для трансформаторов 160 кВА (26 шт.) превышение — в **3,8 раза**, интервал для α_m составляет **0,46 – 0,58**. Для трансформаторов 250 кВА (16 шт.) превышение — также в **3,8** раза, интервал α_m — **0,47–0,66**. Для трансформаторов 320 кВА (1 шт.) превышение — в **6,2** раза, α_m — **0,51**. Для трансформаторов 400 кВА (9 шт.) превышение — в **7,1** раза, $\alpha_m = 0,44$. Для трансформаторов 630 кВА (2 шт.) превышение составило **3** раза, $\alpha_m = 0,45$.

Выводы

Проведенным анализом установлено следующее.

1. СТ сельских распределительных сетей Осинского района Иркутской области работают со значительной недогрузкой. Средний коэффициент загрузки по всем трансформаторам составляет 0,22.
2. Среднее значение удельных потерь электроэнергии, проходящей через СТ, при транзите 1 кВА мощности составляет 0,6.
3. Рекомендуемыми оптимальными коэффициен-

тами загрузки для трансформаторов мощностью 25, 40, 63, 100, 160, 250, 320, 400 и 630 кВА являются соответственно, значения: 0,47–0,73; 0,46–0,72; 0,45–0,78; 0,43–0,78; 0,46–0,58; 0,47–0,66; 0,51; 0,44; 0,45.

4. Для увеличения энергоэффективности СТ необходимо снижение потерь холостого хода за счет повышения их загрузки, что может быть достигнуто сокращением числа трансформаторов с одновременным изменением конфигурации распределительных сетей 0,38 кВ.

5. В сельских сетях нормативными актами не предусмотрена КРМ, но, тем не менее, низкая загрузка трансформаторов приводит к естественному увеличению реактивной мощности. Следовательно, замена трансформаторов с низким коэффициентом загрузки (менее 20–30%) позволит снизить коэффициент реактивной и повысить коэффициент активной мощности силового трансформатора.

Список использованных источников

1. Power Transformers – Introduction to measurement of losses. Document published: August 2016 Lead author of this document: Angelo Baggini (ECD) Project coordinator: WIP. Horizon 2020 programme Project acronym: INTAS Project full name: Industrial and tertiary product Testing and Application of Standard / (https://www.intas-testing.eu/storage/app/media/INTAS_transformers_descr.pdf).
2. Наумов И. В., Гантулга Д., Шевченко М. В. Исследование режимов работы электрических сетей низкой наблюдаемости Монголии / Вестник ИргСХА 2016; 73: 140–147.
3. Vinogradov A. V., Vinogradova A. V., Bolshev V. E., Ward M. O., Makhyanova N. V., Dolomaniuk L. V. Justification for creating a mobile complex to assess electric energy loss in power transformers during the operation process / E3S Web of Conferences 124, 02009 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402009>
4. Zeynep Kaya, Nazim İmal. On power transformers energy efficiency based load transfer analysis / International Journal of Energy Applications and Technologies, December 2018 // doi: 10.31593/ijeat.442589.

5. Khomenko I. V., Berezka S. K., Poliakov I. V. Analysis of optimum operating modes of power transformers under operating conditions / Electrical Engineering and Electromechanics. 2016. no 6 pp. 70–73 // doi:10.20998-2074-272X.2016.6.12.

6. Baidak Yu., Matukhno V., Chaikovskiy V. Energie efficient transformers with various load graphics for the consumers of electric power / Refrigeration Engineering and Technology 52(2), June 2016 // doi: 10.21691/ret.v52i2.59

7. Трансформаторы силовые распределительные 6–10 кВ мощностью 63–2500 кВА. Требования к уровню потерь холостого хода и короткого замыкания / Акционерное общество «Российские сети». СТО 34.01-3.2-011-2017 (дата введения 12.04.2017 г.).

8. Alyunov A. N., Vyatkina O. S., Akhmetova I. G., Pentiu R. D., Sakipov K. E. Issues on optimization of operating modes of power transformers / E3S Web of Conferences 124, 02015 (2019).

9. By Edvard. Losses in the power transmission system and short, medium and long line model analysis/ Home / Technical Articles / Transformers / Transmission and Distribution / <https://electrical-engineering-portal.com/losses-power-transmission-system>, February, 21st 2018.

10. Грачева Е. И., Наумов О. В., Федотов Е. А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики / Казанский государственный энергетический университет, г. Казань // Проблемы энергетики 2017; 19 (7–8): 71–77.

11. Ивакин В. Н., Ковалев В. Д., Магницкий А. А. Нормирование энергоэффективности распределительных трансформаторов // Энергия единой сети 2017; 5 (34): 20–31.

12. Котов Г. Н. Потери в силовом трансформаторе и как их уменьшить [Текст] / Г. Котов // Радиоаматор 2016; 2: 14–17.

References

1. Power Transformers – Introduction to measurement of losses. Document published: August 2016 Lead author of this document: Angelo Baggini (ECD) Project coordinator: WIP. Horizon 2020 programme Project acronym: INTAS Project full name: Industrial and tertiary product Testing and Application of Standard / (https://www.intas-testing.eu/storage/app/media/INTAS_transformers_descr.pdf).

2. Naumov I. V., Gantulga D., Shevchenko M. V. Investigation of

operation modes of electric networks of low observability in Mongolia / Vestnik Irgsha 2016; 73: 140–147. (in Russ).

3. Vinogradov A. V., Vinogradova A. V., Bolshev V. E., Ward M. O., Makhyanova N. V., Dolomaniuk L. V. Justification for creating a mobile complex to assess electric energy loss in power transformers during the operation process / E3S Web of Conferences 124, 02009 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402009>

4. Zeynep Kaya, Nazim İmal. On power transformers energy efficiency based load transfer analysis / International Journal of Energy Applications and Technologies, December 2018 // doi: 10.31593/ijeat.442589

5. Khomenko I. V., Berezka S. K., Poliakov I. V. Analysis of optimum operating modes of power transformers under operating conditions / Electrical Engineering and Electromechanics.2016.no 6 pp. 70–73// doi:10.20998-2074-272X.2016.6.12.

6. Baidak Yu., Matukhno V., Chaikovskiy V. Energie efficient transformers with various load graphics for the consumers of electric power / Refrigeration Engineering and Technology 52(2), June 2016// doi: 10.21691/ret.v52i2.59.

7. Power distribution Transformers 6–10 kV with a capacity of 63–2500 kVA. Requirements for the level of no-load and short-circuit losses / Joint-stock company "Russian networks". One HUNDRED 34.01-3.2-011-2017 (date of introduction 12.04.2017) (in Russ).

8. Alyunov A. N., Vyatkina O. S., Akhmetova I. G., Pentiu R. D., Sakipov K. E. Issues on optimization of operating modes of power transformers / E3S Web of Conferences 124, 02015 (2019).

9. By Edvard. Losses in the power transmission system and short, medium and long line model analysis / Home / Technical Articles / Transformers / Transmission and Distribution / <https://electrical-engineering-portal.com/losses-power-transmission-system>, February, 21st 2018.

10. Gracheva E. I., Naumov O. V., Fedotov E. A. Influence of load capacity of power transformers on their operational characteristics / Kazan state power engineering University, Kazan // Energy issues 2017; 19 (7–8): 71–77 (in Russ).

11. Ivakin V. N., Kovalev V. D., Magnitsky A. A. energy efficiency Regulation of distribution transformers // Unified grid energy 2017; 5 (34): 20–31 (in Russ).

12. Kotov G. N. Losses in a power transformer and how to reduce them [Text] / G. Kotov // Radioamator 2016; 2: 14–17 (in Russ).

