

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.314.212:621.3.027.5

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-67-75>**Анализ загрузки и распределения потерь электроэнергии в силовых трансформаторах напряжением 6-10 кВ***А.В. Виноградов^{1,5}, А.В. Виноградова², А.В. Букреев³, А.А. Лансберг⁴*^{1, 2, 3, 4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия⁵ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия^{1, 5} winaleksandr@gmail.com² alinawin@gmail.com³ alexziend@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>⁴ [lansbergaa@vk.com](https://vk.com/lansbergaa); <https://orcid.org/0000-0002-2834-6092>

Аннотация. Силовые трансформаторы 6-10/0,4 кВ, питающие сельские электрические сети 0,4 кВ, работают с низкими значениями коэффициентов загрузки, что приводит к значительным потерям электроэнергии. Оптимизация загрузки силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ позволит повысить их энергоэффективность. С целью оценки загрузки и потерь электроэнергии в силовых трансформаторах с высшим напряжением 6-10 кВ сельских электрических сетей в Орловском районе электрических сетей (РЭС) филиала ПАО «Россети Центр»–«Орёлэнерго» проведен анализ статистических данных диспетчерских журналов оперативно-технологической группы РЭС нагрузки силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ электрических сетей за 2016-2022 гг. В результате установлено, что 880 силовых трансформаторов (74% от общего количества) работают с коэффициентом загрузки не более 20%. Среди силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ с номинальными мощностями 63, 100, 160 и 250 кВА коэффициент загрузки не более 20% имеют 72-77%. Установлено, что в силовых трансформаторах 6-10/0,4 кВ Орловского РЭС годовые потери электроэнергии холостого хода в 1,8-2,9 раза превышают потери короткого замыкания. Выявлено, что доля потерь холостого хода для разных номинальных мощностей силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ составляет 65-74% от общих годовых потерь электроэнергии. Оценка загрузки силовых трансформаторов позволила разработать ряд мероприятий по сокращению потерь электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ Орловского РЭС: отключение трансформаторов, имеющих сезонную нагрузку; замена недогруженных и перегруженных трансформаторов на трансформаторы необходимой мощности; перевооружение парка силовых трансформаторов 6-10 кВ на современные силовые трансформаторы с энергоэффективностью класса Х2К2 и выше.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, номинальная мощность, коэффициент загрузки, потери холостого хода, потери короткого замыкания, энергоэффективность силовых трансформаторов, загрузка силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ

Для цитирования: Виноградов А.В., Виноградова А.В., Букреев А.В., Лансберг А.А. Анализ загрузки и распределения потерь электроэнергии в силовых трансформаторах напряжением 6-10 кВ // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 67-75. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-67-75>

ORIGINAL PAPER

Analysis of the load of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV*A.V. Vinogradov^{1,5}, A.V. Vinogradova², A.V. Bukreev³, A.A. Lansberg⁴*^{1, 2, 3, 4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia⁵ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia^{1, 5} winaleksandr@gmail.com² alinawin@gmail.com³ alexziend@gmail.com⁴ [lansbergaa@vk.com](https://vk.com/lansbergaa)

Abstract. Power transformers 6-10/0.4 kV feeding 0.4 kV rural electric networks operate with low load factors. This leads to significant electricity losses. Optimization of the load of 6-10/0.4 kV power transformers will increase their energy efficiency. To assess the load and loss of electricity in power transformers with a higher voltage of 6-10 kV

of rural electric networks in the Orel district of electric networks (DEN) of the branch of PJSC Rosseti Tsentr – Orelenergo, the authors carried out an analysis of statistical data obtained from operational and technological group dispatcher logs on the load of power transformers 6-10/0.4 kV of electric networks for 2016-2022. As a result, it was found that 880 power transformers (74% of the total number) operate with a load factor of less than 20%. Among the 6-10/0.4 kV power transformers with rated powers of 63, 100, 160, and 250 kVA, the load factor of less than 20% accounts for 72-77%. It is established that in power transformers 6-10/0.4 kV of the Orel DEN, annual losses of idle power are 1.8-2.9 times higher than the short circuit losses. It is revealed that the share of idling losses for different nominal capacities of power transformers 6-10/0.4 kV is 65-74% of the total annual electricity losses. The assessment of the load of power transformers is necessary to develop a number of measures to reduce electricity losses in the 0.4 kV electrical networks of the Orel DEN: disconnecting transformers with seasonal loads; replacing underloaded and overloaded transformers with transformers of the required capacity; re-equipping the fleet of 6-10 kV power transformers with modern power transformers with energy efficiency of class X2K2 and higher.

Keywords: power transformers, rated power, load factor, no-load losses, short circuit losses, energy efficiency of power transformers, load of power transformers 6-10/0.4 kV

For citation: Vinogradov A.V., Vinogradova A.V., Bukreev A.V., Lansberg A.A. Analysis of the load of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):67-75. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-67-75>

Введение. Повысить эффективность функционирования силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ можно оптимизацией их загрузки и применением технических средств и способов мониторинга электрических параметров сетей для рационального выбора электрооборудования и управления их конфигурацией [1].

Проблема низкой загрузки силовых трансформаторов обусловлена несоответствием потребляемой мощности заявленной мощности потребителей. Согласно Постановлению Правительства РФ от 27 декабря 2004 г. № 861 физические лица до июля 2022 г. могли указывать в заявке на технологическое присоединение мощность до 15 кВт включительно, оплачивая за присоединение одинаковую стоимость – 550 руб. При этом фактически потребляемая мощность зачастую оказывалась ниже заявленной. Сетевые организации рассчитывали мощность трансформаторов и необходимый резерв данной мощности, исходя из суммарной заявленной мощности потребителей, что приводило к низкой загрузке трансформаторов.

Для оптимизации загрузки распределительных силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ рассматриваются как теоретические аспекты повышения степени загрузки оборудования [2], так и практические рекомендации: например, оптимизация режимов сетей по напряжению и реактивной мощности [3], отключение одного из малозагруженных трансформаторов [4], оптимизация точек размыкания распределительных сетей 35 кВ и ниже [5], замена недогруженных трансформаторов на трансформатор меньшей мощности [6] и устаревших трансформаторов на энергоэффективные [7].

Разработана методика точной оценки степени загрузки силовых трансформаторов 6(10)/0,4 кВ

с помощью данных, получаемых от интеллектуальных систем учета электроэнергии, которая на 30...60% повышает точность определения коэффициента загрузки трансформатора по сравнению с методами режимных замеров и заявленной мощности [1].

Для снижения потерь холостого хода силовых трансформаторов предлагается осуществлять электроснабжение потребителей от одного из двух параллельно включенных трансформаторов 20-35/0,231-0,4 кВ разной номинальной мощности [8] (например, 500 кВА и 2000 кВА), что позволит в разные периоды времени года и суток добиться оптимальных коэффициентов загрузки.

Аналогичные мероприятия предложены на примере высоковольтных силовых трансформаторов с высшим напряжением 110 кВ [9]. Также на примере трансформаторов с высшим напряжением 35-220 кВ предлагается реализовать мероприятия по повышению коэффициента загрузки, что позволит сократить потери на 2210543,36 кВт·ч и снизить их долю с 2,1 до 1,47% от общего отпуска электроэнергии [10].

Оптимальный выбор количества и номинальной мощности силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ в зависимости от мощности подключенной нагрузки позволяет сделать математические выражения [11].

На примере электрических сетей Осинского района, обслуживаемого ОАО «Иркутская сетевая компания», в 2019 г. было произведено 137 замеров нагрузки трансформаторов сельских электрических сетей, из которых 34 замера осуществлялись на трансформаторах номинальной мощностью 63 кВА, 43 – на трансформаторах 100 кВА, 26 – на трансформаторах 160 кВА [12]. Выявлено, что среднее значение коэффициента загрузки по всей номенклатуре номинальных мощностей составляет 18,8%,

что значительно ниже рекомендуемых производителями 85...95%. Для увеличения энергоэффективности силовых трансформаторов нами предложено сократить число трансформаторов с одновременным изменением конфигурации распределительных сетей 0,4 кВ.

Низкая загрузка трансформаторов наблюдается и среди наиболее часто применяемых в филиале в ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» силовых трансформаторов 6-10 кВ. Неэффективное использование вследствие этого трансформаторного парка приводит в итоге к неоправданному росту тарифов на электроэнергию и снижению энергоэффективности систем электроснабжения.

Цель исследований: анализ загрузки и потерь электроэнергии в силовых трансформаторах с высшим напряжением 6-10 кВ сельских электрических сетей, эксплуатируемых филиалом ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго».

Материалы и методы. Согласно диспетчерским журналам оперативно-технологической группы РЭС в Орловском районе электрических сетей (РЭС) филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» за 2016-2022 гг. произведено 1194 оперативных замеров нагрузок и напряжений на стороне низкого напряжения 0,4 кВ силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ.

Оперативные замеры производились при производстве плановых и аварийных отключений воздушных линий (ВЛ) 0,4 кВ, подключенных к трансформаторным подстанциям (ТП) 6-10/0,4 кВ для планирования мероприятий по техническому перевооружению, реконструкции объектов электросетевого комплекса и возможности присоединения новых потребителей к действующим электрическим сетям. Замеры осуществлялись с использованием токовых клещей, измеряющих полное значение тока, протекающего по проводнику. Данные замеры производились в связи с тем, что приборы учёта, устанавливаемые

на стороне низкого напряжения силового трансформатора 6-10/0,4 кВ, не оснащены средствами дистанционной передачи измерений, производят измерения для всей ТП в целом, что в случае подключения к ней нескольких отходящих ВЛ 0,4 кВ не позволяет сделать вывод о загрузке каждой из линий.

Методика определения коэффициента загрузки трансформатора и составляющих потерь в нём. В оперативном журнале содержатся сведения об оперативных замерах на одной из ТП, от которой отходят 3 ВЛ 0,4 кВ, а мощность установленного силового трансформатора составляет 100 кВА. Результаты замеров нагрузки представлены в таблице 1.

Методом измерения с использованием токоизмерительных клещей полная мощность (S_{ϕ} , ВА), например, для фазы А, вычисляется по формуле¹:

$$S_{\phi, A} = I_{\phi, A} \cdot U_{\phi, A}, \quad (1)$$

где $I_{\phi, A}$ – измеренное значение тока фазы А, А; $U_{\phi, A}$ – измеренное значение напряжения фазы А, В.

Полная мощность, потребляемая одной из ВЛ 0,4 кВ ($S_{ВЛ 0,4 \text{ кВ}}$, ВА), определяется по формуле:

$$S_{ВЛ 0,4 \text{ кВ}} = S_{\phi, A} + S_{\phi, B} + S_{\phi, C}, \quad (2)$$

где $S_{\phi, A}$ – полная мощность, протекающая по фазе А, ВА; $S_{\phi, B}$ – полная мощность, протекающая по фазе В, ВА; $S_{\phi, C}$ – полная мощность, протекающая по фазе С, ВА.

Ввиду того, что полная мощность двухобмоточного трехфазного трансформатора почти равномерно распределяется на три фазы, то есть для трансформатора номинальной мощностью 100 кВА мощность каждой фазы будет приблизительно равна 33,3 кВА, действующую загрузку трансформатора ($S_{\text{действ. СТ}}$, ВА), можно определить по формуле:

$$S_{\text{действ. СТ}} = S_{ВЛ 0,4 \text{ кВ } \text{№} 1} + S_{ВЛ 0,4 \text{ кВ } \text{№} 2} + \dots + S_{ВЛ 0,4 \text{ кВ } n}, \quad (3)$$

где $S_{ВЛ 0,4 \text{ кВ } \text{№} 1}$, $S_{ВЛ 0,4 \text{ кВ } \text{№} 2}$ и $S_{ВЛ 0,4 \text{ кВ } n}$ – полная мощность ВЛ 0,4 кВ № 1, ВЛ 0,4 кВ № 2 и n-й ВЛ 0,4 кВ, подключённых к силовому трансформатору 6-10/0,4 кВ, ВА.

Оперативные замеры нагрузок и напряжений на воздушных линиях 0,4 кВ, отходящих от трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ

Таблица 1

Real-time measurements of loads and voltages on 0.4 kV overhead lines outgoing from 10/0.4 kV transformer substations

Table 1

Диспетчерский номер воздушной линии 0,4 кВ <i>Dispatching number of the 0.4 kV overhead line</i>	Оперативные замеры / Real-time measurements					
	Токи, фаза, А / Currents, Amp			Напряжения, фаза, В / Voltage, V		
	А	В	С	А	В	С
ВЛ 0,4 кВ № 1 / Overhead line 0,4 kV № 1	13	13	10	230	230	234
ВЛ 0,4 кВ № 2 / Overhead line 0,4 kV № 2	22	20	21	230	230	234
ВЛ 0,4 кВ № 3 / Overhead line 0,4 kV № 2	9	10	30	230	230	234

¹ Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.

Исходя из полной нагрузки, протекающей на стороне низкого напряжения 0,4 кВ силового трансформатора 6-10/0,4 кВ, можно рассчитать коэффициент загрузки силового трансформатора (β_3 , %) по формуле²:

$$\beta_3 = \frac{S_{\text{действ.СТ}}}{S_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность силового трансформатора, ВА.

С учётом полученных для исследуемой выборки коэффициентов загрузки было произведено статистическое распределение загрузок силовых трансформаторов по диапазонам: 0...20%; 20...40%; 40...60%; 60...80%; 100% и более. Определены максимальные, минимальные и среднеарифметические коэффициенты загрузки для разных номинальных мощностей силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ.

Значение среднеарифметического коэффициента загрузки, например, для трансформатора с номинальной мощностью 100 кВА ($\beta_{3,\text{ср.взв}}^{100 \text{ кВА}}$, %), определялось по формуле²:

$$\beta_{3,\text{ср.арф.}}^{100 \text{ кВА}} = \frac{\sum \beta_3^i}{n}, \quad (5)$$

где $\sum \beta_3^i$ – коэффициент загрузки i -го силового трансформатора мощностью 100 кВА, %; n – количество коэффициентов загрузки трансформаторов мощностью 100 кВА, ед.

Аналогичным образом определяются значения среднеарифметических коэффициентов загрузки силовых трансформаторов для других номинальных мощностей силовых трансформаторов.

Наиболее достоверным для разных номинальных мощностей силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ будут являться средневзвешенные коэффициенты загрузки. Например, значение средневзвешенного коэффициента загрузки силового трансформатора 6-10/0,4 кВ с номинальной мощностью 100 кВА ($\beta_{3,\text{ср.взв}}^{100 \text{ кВА}}$, %) с учётом полученных статистических диапазонов загрузки можно определить по формуле¹:

$$\beta_{3,\text{ср.взв}}^{100 \text{ кВА}} = \frac{n \cdot 20\% + m \cdot 40\% + p \cdot 60\% + k \cdot 80\%}{n + m + p + k + l + t + b} + \frac{l \cdot 100\% + t \cdot 120\% + b \cdot n\%}{n + m + p + k + l + t + b}, \quad (6)$$

где n, m, p, k, l, t, b – количество силовых трансформаторов номинальной мощностью 100 кВА с загрузкой, соответственно, до 20%, от 20 до 40%, от 40 до 60%, от 60 до 80%, от 80 до 100%, от 100 до 120%, с n -й загрузкой, ед.

² Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.

Аналогичным образом определены средневзвешенные коэффициенты загрузки для всего диапазона номинальных мощностей силовых трансформаторов, эксплуатируемых в филиале ПАО «Россети Центр»–«Орёлэнерго».

С учётом полученных средневзвешенных коэффициентов загрузки можно определить годовые потери электроэнергии ($W_{\text{эз}}$, кВт·ч) в двухобмоточных трёхфазных силовых трансформаторах 6-10/0,4 кВ²:

$$W_{\text{эз}} = P_{\text{хх}} \cdot t + P_{\text{кз}} \cdot (\beta_{3,\text{ср.взв}}^{100 \text{ кВА}})^2 \cdot \tau_{\text{max}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{хх}}$ – паспортные данные потерь холостого хода в силовом трансформаторе, кВт; t – число часов в году, 8760; $P_{\text{кз}}$ – паспортные данные потерь холостого хода в силовом трансформаторе, кВт; τ_{max} – время максимальных потерь мощности, ч.

Потери электроэнергии определяются для силовых трансформаторов, номинальная мощность которых соответствует действующему ГОСТ 9680-77 «Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более» и по которым имеется достаточная статистическая выборка данных о замерах нагрузки и напряжений, а именно: 63, 100, 160, 250, 400 и 630 кВА. На трансформаторах данных номинальных мощностей было произведено от 32 до 333 оперативных замеров нагрузок и напряжений.

В работе [13] отражен анализ технических характеристик силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ, находящихся в эксплуатации в филиале ПАО «Россети Центр»–«Орёлэнерго». Было выявлено, что среди 6206 ед. оборудования 4528 силовых трансформаторов, составляющих 73% от общего количества, имеют схему соединения обмоток «Звезда-звезда» с нулевым проводом и нулевой группой соединения обмоток (Y/Y_н-0). Среди 6206 трансформаторов филиала ПАО «Россети Центр»–«Орёлэнерго» 5156 – типа ТМ, что составляет 83% от общего количества. Примем допущение, что все замеры нагрузки производились на трансформаторах ТМ со схемой и группой соединения обмоток Y/Y_н-0.

Паспортные значения потерь холостого хода и короткого замыкания силовых трансформаторов разных номинальных мощностей конструкций ТМ³ представлены в таблице 2. Данные использовались в расчёте годовых потерь электроэнергии в соответствии с формулой (7).

Результаты и их обсуждение. Статистические данные о нагрузках силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ Орловского РЭС филиала ПАО «Россети Центр»–«Орёлэнерго» показали, что преимущественно загрузка трансформаторов не превышает 20% (табл. 3).

Анализ загрузки наиболее часто применяемых в данном филиале силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ проведен на основе данных более ранних исследований авторов [13]. Выявлено, что распределительные электрические сети 0,4 кВ питаются от понижающих трансформаторных подстанций (ТП) 6-10/0,23-0,4 кВ, в которых установлено 6206 силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ. Наиболее часто используемые

мощности – 63 кВА (853 шт.), 100 кВА (1454 шт.), 160 кВА (1252 шт.), 250 кВА (802 шт.) (рис. 1).

Согласно результатам замеров (рис. 1) наиболее часто эксплуатируемые в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» силовые трансформаторы 6-10/0,4 кВ в большинстве случаев имеют коэффициент загрузки 72...77%. Работают с полной загрузкой 1...2% электроустановок, с нагрузкой, превышающей номинальную мощность трансформатора, – 1%.

Технические характеристики силовых трансформаторов 6-10 кВ со схемой и группой соединения обмоток Y/Y_n-0

Table 2

Technical characteristics of 6-10 kV power transformers with circuit and winding connection group Y/Y_n-0

Трансформаторы серии ТМ / Transformers of the TM series				
Мощность, кВА Power, kVA	Сочетание напряжений, кВ / Combination of voltages, kV		Потери КЗ, Вт Short circuit losses, W	Потери ХХ, Вт No-load losses, W
	ВН	НН		
63	6-10	0,4	1280	220
100	6-10	0,4	1970	290
160	6-10	0,4	2650	400
250	6-10	0,4	3700	550
400	6-10	0,4	5400	800
630	6-10	0,4	7600	1010

Таблица 3

Распределение коэффициентов загрузки силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ Орловского РЭС

Table 3

Distribution of load coefficients of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV of the Orel DEN

Мощность трансформатора, кВА Transformer power, kVA	Количество замеров, ед. Number of measurements, units.	Распределение количества трансформаторов по коэффициенту загрузки, ед. Distribution of the number of transformers by load factor, units.					
		0-20%	20-40%	40-60%	60-80%	80-100%	>100%
10	2	0	2	0	0	0	0
16	1	1	0	0	0	0	0
25	16	4	3	0	2	2	5
30	2	2	0	0	0	0	0
40	8	5	3	0	0	0	0
60	32	21	9	2	0	0	0
63	133	101	21	7	4	0	0
100	333	240	61	15	11	4	2
160	324	235	64	11	7	5	2
180	7	7	0	0	0	0	0
250	219	168	38	6	5	2	0
320	1	1	0	0	0	0	0
400	76	58	13	5	0	0	0
630	38	35	3	0	0	0	0
1000	2	2	0	0	0	0	0
Итого / Total	1194	880	217	46	29	13	9

³ Новые технологии. Силовые трансформаторы, подстанции, электрооборудование и пр. URL: <https://transelektro.nt-rt.ru/?ysclid=lfwdlojypo86783165> (дата обращения: 31.03.2023).

В Орловском РЭС имеются трансформаторы с номинальной мощностью 25, 63, 100, 160, 250, 400, 630 и 1000 кВА, а также 60 кВА (не входит в ГОСТ 9680-77),

которые работают в режиме холостого хода (рис. 2). Для номинальных мощностей силовых трансформаторов 1000 и 16 кВА, а также мощностей 320, 180

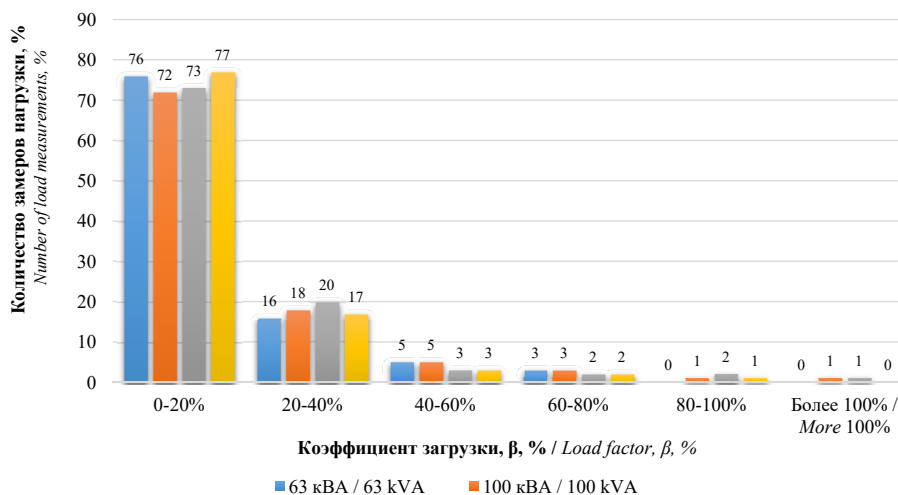


Рис. 1. Распределение силовых трансформаторов 6-10 кВ по нагрузке в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго», % от общего количества

Fig. 1. Distribution of 6-10 kV power transformers by load in the branch of PJSC Rosseti Center-Oreleno (% of the total number)

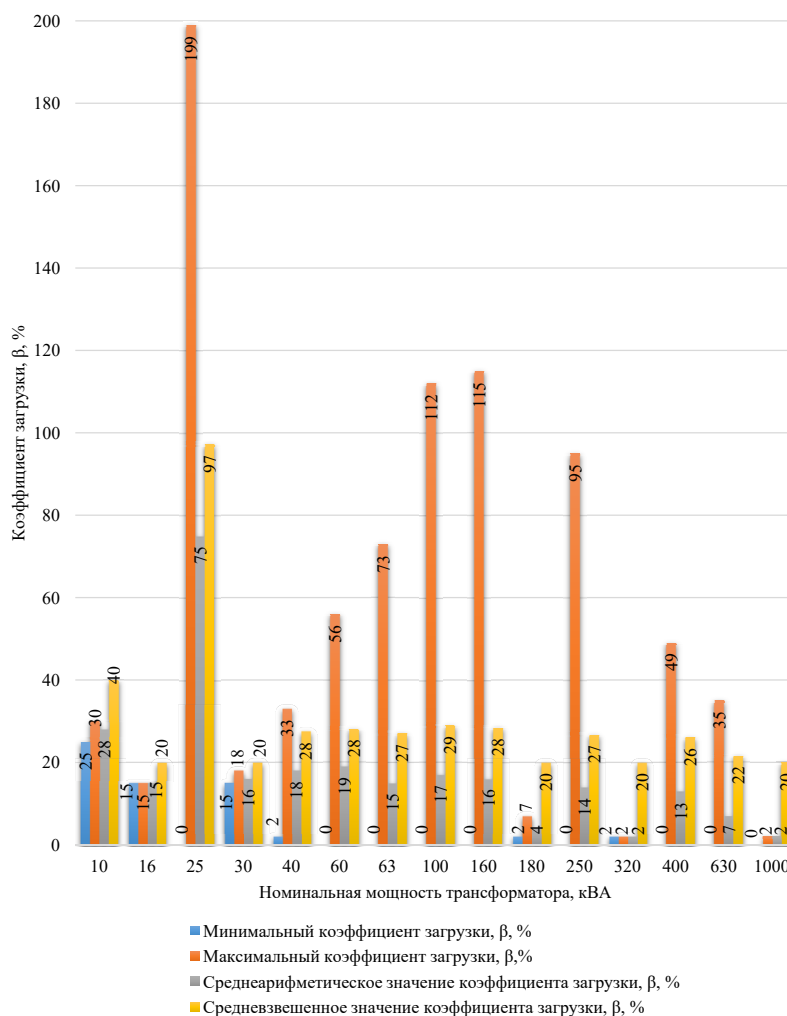


Рис. 2. Коэффициент загрузки силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ Орловского РЭС

Fig. 2. Load factor of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV of the Orel DEN

и 30 кВА (не входят в ГОСТ 9680-77) коэффициент загрузки не превышал значения 20%. Для трансформаторов 100, 160 и 250 кВА были зафиксированы коэффициенты загрузки от 95 до 115%, а для одного трансформатора номинальной мощностью 25 кВА была зафиксирована двухкратная перегрузка со значением коэффициента загрузки 199%, которая согласно пункту 5.3.15 Правил технической эксплуатации электростанций и сетей может продолжаться не более 10 мин.

Минимальные значения среднеарифметических коэффициентов загрузки (2%) характерны для силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ с номинальной мощностью 320 и 1000 кВА. Наибольшее значение среднеарифметического коэффициента загрузки (75%) характерно для силовых трансформаторов номинальной мощностью 25 кВА ввиду работы одного из них с 2-кратной перегрузкой во время замера.

Полученные по формуле (6) расчётные значения средневзвешенных коэффициентов загрузки (рис. 2) использовались для расчёта годовых потерь электроэнергии, вызванных составляющими холостого хода (XX) и короткого замыкания (КЗ), в силовых трансформаторах в соответствии с формулой (7) и паспортными данными трансформаторов, представленными в таблице 2. Результаты расчётов потерь представлены в таблице 4.

В результате расчётов потерь электроэнергии в силовых трансформаторах выявлено, что потери холостого хода в 1,8...2,9 раза превышают потери электроэнергии, вызванные составляющей короткого замыкания. Это обусловлено низкими значениями коэффициентов загрузки силовых трансформаторов

6-10/0,4 кВ, осуществляющих электроснабжение сельских коммунально-бытовых потребителей Орловской области. Значительная доля потерь электроэнергии от составляющей холостого хода обуславливает большие затраты электросетевой организации филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» на компенсацию потерь электроэнергии в собственных электрических сетях.

Таким образом, часть бюджета, выделяемая электросетевой компании в рамках ежегодной инвестиционной программы, расходуется нерационально, в то время как могла быть направлена на модернизацию электросетевых объектов и техническое перевооружение объектов электросетевого комплекса.

Доля потерь электроэнергии от составляющей холостого хода для разных номинальных мощностей силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ составляет 65...74% от общих потерь. Полученные соотношения потерь обуславливают необходимость реализации организационных мероприятий по замене силовых трансформаторов на ТП 6-10/0,4 кВ.

Отметим, что в теоретических расчётах были учтены паспортные данные, характерные для новых трансформаторов. Ввиду длительной эксплуатации и возможного ухудшения магнитных свойств сердечников трансформаторов потери холостого хода могут быть еще больше [14].

Для оценки нагрузки и планирования мероприятий по реконструкции электрических сетей, в том числе по замене силовых трансформаторов, актуальным является внедрение технических средств и способов мониторинга электрических параметров сельских сетей⁴.

Таблица 4

Результаты расчётов годовых потерь электроэнергии в силовых трансформаторах 6-10/0,4 кВ Орловского РЭС по средневзвешенному коэффициенту загрузки

Table 4

Calculation data on annual electricity losses in power transformers 6-10/0.4 kV of the Orel DEN by the weighted average load factor

Номинальная мощность силового трансформатора, кВА <i>Rated power of the power transformer, kVA</i>	Годовые потери электроэнергии от составляющей холостого хода, кВт·ч (%) <i>Annual electricity losses from idling component, kW·h (%)</i>	Годовые потери электроэнергии от составляющей короткого замыкания, кВт·ч (%) <i>Annual electricity losses from short-circuit component, kW·h (%)</i>	Суммарные годовые потери электроэнергии, кВт·ч <i>Total annual electricity losses, kW·h</i>
63	1927 (70)	822 (30)	2749
100	2540 (64)	1447 (36)	3988
160	3504 (65)	1876 (35)	5380
250	4818 (68)	2305 (32)	7123
400	7008 (69)	3211 (31)	10219
630	8848 (74)	3100 (26)	11948

⁴ Виноградов А.В. Принципы управления конфигурацией сельских электрических сетей и технические средства их реализации: Монография. Орёл: Изд-во «Картуш», 2022. 392 с.

Отметим, что поправки, внесенные 24 марта 2023 г. в Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2004 г. № 861, изменили порядок осуществления технологического присоединения. Увеличение стоимости за 1 кВт присоединяемой мощности будет стимулировать потребителей более взвешенно подходить к выбору заявляемой мощности и в перспективе позволит повысить коэффициенты загрузки силовых трансформаторов сельских электрических сетей.

Для сокращения потерь электроэнергии в электрических сетях филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» намечены к реализации следующие технические мероприятия: отключение трансформаторов, имеющих сезонную нагрузку; замена недогруженных и перегруженных трансформаторов на трансформаторы необходимой мощности; техперевооружение парка силовых трансформаторов 6-10 кВ на современные трансформаторы классов энергоэффективности Х2К2 и выше

с уменьшенными потерями холостого хода и короткого замыкания, выпускаемые в соответствии с СТО 34.01-3.2-011.2017 ПАО «Россети».

Выводы

1. Силовые трансформаторы 6-10/0,4 кВ, питающие сельские электрические сети 0,4 кВ, работают с низкими значениями коэффициентов загрузки, что приводит к значительным потерям электроэнергии.

2. В Орловском РЭС филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» 74% силовых трансформаторов работают с коэффициентом загрузки не более 20%. Потери холостого хода в 1,8...2,9 раза превышают потери электроэнергии, вызванные составляющей короткого замыкания. Доля потерь электроэнергии от составляющей холостого хода для разных номинальных мощностей силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ составляет 65...74% от общих потерь электроэнергии за год.

Список литературы

1. Мусаев Т.А., Хабибуллин М.Н., Шагеев С.Р., Федоров О.В. Разработка методики точной оценки фактической загрузки трансформаторов 6(10)-0,4 кВ с помощью данных от интеллектуальных систем учёта электрической энергии // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2022. № 4 (73). С. 22-27. EDN: MMBXUR.
2. Фурсанов М.И., Радкевич В.Н. Об оптимальных режимах работы силовых трансформаторов // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика*. 2008. № 2. С. 32-38. EDN: SGQIQZ.
3. Слатинова М.Н. Повышение энергоэффективности при распределении электроэнергии рациональной загрузкой трансформаторов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2010. № 1. С. 271-276. EDN: MVDZQH.
4. Alyunov A.N., Vyatkina O.S., Akhmetova I.G., Pentuc R.D., Sakipov K.E. Issues on optimization of operating modes of power transformers. *E3S Web of Conferences*. 2019;124:02015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402015>
5. Bajracharya G., Koltunowicz T., Negenborn R.R., Djairam D., De Shutter B., Smith J.J. Optimization of Transformer Loading Based on Hot-Spot Temperature Using a Predictive Health Model. *Proceedings of the 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnostics*. Japan: Tokyo, 2010. Pp. 914-917.
6. Renedo C.J., Santisteban A., Ortiz F., Olmo C., Ortiz A. Evaluation of the Optimal Connection of Power Transformers in the Substations of a Hospital. *Energies*. 2018;11(2):419. <https://doi.org/10.3390/en11020419>
7. Tang Z., Li Zh., Wei J. Research on load optimization management and application of power transformers. *Proceedings. SPIE12598, Eighth International Conference on Energy Materials and Electrical Engineering (ICEMEE2022)*. 2023;125982Z. <https://doi.org/10.1117/12.2673040>
8. Kaya Z., İmal N., Gökhasan O. On power transformers energy efficiency based load transfer analysis. *International Journal of Energy Applications and Technologies*. 2018;5(3):115-118. <https://doi.org/10.31593/ijeat.442589>
9. Хоменко И.В., Березка С.К., Поляков И.В. Анализ оптимальных режимов работы силовых трансформаторов

References

1. Musaev T.A., Khabibullin M.N., Shageev S.R., Fedorov O.V. Development of a methodology for accurate assessment of the actual load of transformers 6(10)-0.4 kV using data from intelligent electric energy metering systems. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2022;4:22-27. (In Rus.)
2. Fursanov M.I., Radkevich V.N. About the optimal operating modes of power transformers. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2008;2:32-38. (In Rus.)
3. Slatinova M.N. Improving energy efficiency in the distribution of electricity by rational loading of transformers. *Izvestiya TulGU, Tekhnicheskie Nauki*. 2010;1:271-276. (In Rus.)
4. Alyunov A.N., Vyatkina O.S., Akhmetova I.G., Pentuc R.D., Sakipov K.E. Issues on optimization of operating modes of power transformers. *E3S Web of Conferences*. 2019;124:02015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402015>
5. Bajracharya G., Koltunowicz T., Negenborn R.R., Djairam D., De Shutter B., Smith J.J. Optimization of Transformer Loading Based on Hot-Spot Temperature Using a Predictive Health Model. *Proceedings of the 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnostics*. Tokyo. Japan. 2010. pp. 914-917.
6. Renedo C.J., Santisteban A., Ortiz F., Olmo C., Ortiz A. Evaluation of the Optimal Connection of Power Transformers in the Substations of a Hospital. *Energies*. 2018;11(2):419. <https://doi.org/10.3390/en11020419>
7. Tang Z., Li Zh., Wei J. Research on load optimization management and application of power transformers. *Proceedings. SPIE12598, Eighth International Conference on Energy Materials and Electrical Engineering (ICEMEE2022)*. 2023;125982Z. <https://doi.org/10.1117/12.2673040>
8. Kaya Z., İmal N., Gökhasan O. On power transformers energy efficiency based load transfer analysis. *International Journal of Energy Applications and Technologies*. 2018;5(3):115-118. <https://doi.org/10.31593/ijeat.442589>
9. Khomenko I., Berezka S., Poliakov I. Analysis of optimum operating modes of power transformers under operating conditions. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2016;6:70-73. (In Rus.) 10.20998/2074-272X.2016.6.12

в условиях эксплуатации // Электротехника і Електромеханіка. 2016. № 6. С. 70-73. EDN: XEQDUX.

10. Мироненко Ю.Е. Оценка эффективности загрузки силовых трансформаторов на примере центрального энергорайона Амурской области // Научные исследования. 2017. № 7 (18). С. 5-8. EDN: YUIAJN.

11. Трушников А.Л., Радкевич В.Н. Выбор рациональных режимов работы силовых трансформаторов по условию минимума потерь активной мощности // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2006. № 1 (24). С. 23-29. EDN: PYSMPP.

12. 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>

13. Лансберг А.А., Виноградов А.В., Виноградова А.В. Структура парка силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ на примере электросетевой организации филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго», обслуживающей сельские электрические сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 5. С. 34-45. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-34-45>

14. Балабин А.А., Волчков Ю.Д. Повышение достоверности расчёта потерь электроэнергии в трансформаторах 10(6)/0,4 кВ // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. № 4. С. 22-23. EDN: KLTКМН.

Информация об авторах

Александр Владимирович Виноградов^{1,5}, д-р техн. наук., доцент; winaleksandr@gmail.com

Алина Васильевна Виноградова², канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; alinawin@gmail.com

Алексей Валерьевич Букреев³, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; alexziend@gmail.com

Александр Александрович Лансберг⁴, специалист, магистрант; lansbergaa@vk.com

^{1,2,3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

⁵ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Критерии авторства

А.В. Виноградов – научное руководство, концептуализация, верификация данных, доработка текста.

А.В. Виноградова – концептуализация, анализ полученных данных, доработка текста

А.В. Букреев – ресурсы, методология, визуализация

А.А. Лансберг – формальный анализ, подготовка текста статьи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 11.05.2023, после рецензирования 19.06.2023, принята к публикации 11.09.2023

10. Mironenko Yu.E. Evaluating the efficiency of loading power transformers as exemplified by the central power district of the Amur region. *Nauchnye Issledovaniya*. 2017;7:5-8. (In Rus.)

11. Trushnikov A.L., Radkevich V.N. Selection of rational modes of operation of power transformers according to the condition of minimum loss of active power. *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. P.O. Sukhogo*, 2006;1:23-29. (In Rus.)

12. Naumov I.V., Karamov D.A., Tretyakov A.N., Yakupova M.A., Fedurinova E.S. Study of the loading of power transformers in rural power supply systems. *Nadezhnost i Bezopasnost Energetiki*. 2020;13(4):282-289. (In Rus.)

13. Lansberg A.A., Vinogradov A.V., Vinogradova A.V. Structure of the range of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV as exemplified by the electric grid organization of the branch of PJSC “Rosseti Center”-“Orelenergo” serving rural electric networks. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Energetiki*. 2021;23(5):34-45. (In Rus.)

14. Balabin A.A., Volchikov Yu.D. Increasing the reliability of the calculation of electricity losses in transformers 10(6)/0.4 kV. *Mekhanizatsiya i Elektrifikatsiya Selskogo Khozyaystva*. 2009;4:22-23. (In Rus.)

Information about the authors

Aleksandr V. Vinogradov^{1,5}, DSc (Eng), Associate Professor; winaleksandr@gmail.com

Alina V. Vinogradova², CSc (Eng), Associate Professor; alinawin@gmail.com

Aleksei V. Bukreev³, CSc (Eng), Senior Researcher; alexziend@gmail.com

Aleksandr A. Lansberg⁴, Specialist, MSc student; lansbergaa@vk.com

^{1,2,3,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM;

⁵ 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russia

⁵ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

Author contribution

A.V. Vinogradov – scientific supervision, conceptualization, data verification, text revision.

A.V. Vinogradov – conceptualization, data analysis, text revision

A.V. Bukreev – resources, methodology, visualization.

A.A. Lansberg – formal analysis, original draft preparation

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 11.05.2023; revised 19.06.2023; accepted 11.09.2023