

УДК 620.9

Станислав Олегович Хомутов

ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Барнаул, телефон (3852) 29-09-86, e-mail: khomutovso@altgtu.ru

Игорь Владимирович Белицын

ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, кандидат педагогических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Барнаул, телефон (3852) 29-07-76, e-mail: b_i_w@mail.ru

Александр Сергеевич Сабельников

ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Барнаул, e-mail: sabkvd@gmail.com

Олег Андреевич Степанов

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», доктор технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Тюмень, e-mail: stepanova@tyuiu.ru

Наталья Анатольевна Литвинова

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности, Россия, Тюмень, e-mail: litvinova2010-litvinova2010@yandex.ru

Юрий Константинович Шлык

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, Россия, Тюмень, e-mail: shlyk53@mail.ru

Синтез альтернатив по внедрению энергоэффективных трансформаторов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Комплексной Государственной программой Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности», утвержденной ПП РФ № 1473 от 09.10.2023 г., устанавливается цель по снижению энергоемкости ВВП РФ на 35 % к 2035 году. Программа обуславливает необходимость разработки механизмов применения товаров, объектов и технологий высокой энергетической эффективности и необходимость внедрения мер по снижению потерь электрической энергии. Самыми многочисленными являются сети 0,4–10 кВ, в этих сетях наблюдаются самые высокие технические потери, в среднем 10–15 %, при не улучшаемом уровне технических потерь в 4–5 %. Для достижения целевых показателей, снижения энергоемкости ВВП России и уменьшения потерь электрической энергии предлагается рассмотреть внедрение технологии энергоэффективных трансформаторов. Проблема заключается в том, что трансформаторы 10/0,4 кВ многочисленны, условия их работы и нагруженности различны. Стоимость таких трансформаторов на 15 % больше стоимости традиционных, это означает, что повсеместная замена приведет к значительному увеличению затрат сетевых компаний и, как следствие, к увеличению стоимости тарифа электрической энергии. Целью исследования является синтез и оценка альтернатив внедрения энергоэффективных трансформаторов для рационального выбора места установки, класса энергоэффективности и номинальной мощности при существующих ограничениях.

Материалы и методы. Для синтеза альтернатив по внедрению энергоэффективных трансформаторов использованы положения теории принятия решений, проведен анализ технической, экономической и правовой стороны вопроса, а также определены особенности и ограничения на примере территориальной сетевой организации ООО «Заринская сетевая компания». Использована оценка синтезированных альтернатив по показателям эффекта от внедрения, экономии потерь энергии, величины оплаты этих потерь и сроку окупаемости. Исходные данные и технические характеристики взяты из открытых источников, действующих государственных стандартов и стандартов организаций, а также предоставлены изготовителями. Способ расчета потерь разработан на основании методических указаний Министерства энергетики.

Результаты. Синтезированы и оценены альтернативы по внедрению энергоэффективных трансформаторов. Получены значения экономии потерь при замене классических трансформаторов на энергоэффективные, которые могут быть интерпретированы для других организаций. Получены значения экономии от оплаты сниженных потерь для сетевой организации ООО «Заринская сетевая компания». Выявлены характеристики, влияющие на эффективность внедрения энергоэффективных трансформаторов.

Выводы. Установлено, что эффективность внедрения энергоэффективных трансформаторов зависит от тарифа оплаты потерь энергии, коэффициента загрузки, величины характеристики и класса энергоэффективности, наиболее эффективным является замена трансформаторов с большим номиналом мощности и как можно большим коэффициентом загрузки. Разработка алгоритма определения таких трансформаторов позволит значительно увеличить эффект от их внедрения и сократить срок окупаемости.

Ключевые слова: энергоэффективный трансформатор, энергоэффективность, потери электрической энергии, условно-постоянные потери энергии, переменные потери энергии, коэффициент загрузки

Stanislav Olegovich Khomutov

Polzunov Altai State Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of Electrical Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Barnaul, telephone (3852) 29-09-86, e-mail: khomutovso@altgtu.ru

Igor Vladimirovich Belitsyn

Polzunov Altai State Technical University, Candidate of Pedagogical Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Barnaul, telephone (3852) 29-07-76, e-mail: b_i_w@mail.ru

Aleksandr Sergeevich Sabelnikov

Polzunov Altai State Technical University, Postgraduate student of Electrical Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Barnaul, e-mail: sabkvd@gmail.com

Oleg Andreevich Stepanov

Industrial University of Tyumen, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Tyumen, e-mail: stepanova@tyuiu.ru

Natalia Anatolievna Litvinova

Industrial University of Tyumen, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Techno-sphere Safety Department, Russia, Tyumen, e-mail: litvinova2010-litvinova2010@yandex.ru

Yuri Konstantinovich Shlyk

Industrial University of Tyumen, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Electrical Power Engineering Department, Russia, Tyumen, e-mail: shlyk53@mail.ru

Synthesis of alternatives for implementing energy efficient transformers

Abstract

Background. The Comprehensive State Program of the Russian Federation “Energy Saving and Improving Energy Efficiency” is approved by RF Government Resolution No. 1473 on 09.10.2023. It sets a goal to reduce the energy intensity of the GDP of the Russian Federation by 35% by 2035. The program requires the development of mechanisms of the use of goods, facilities and technologies of high energy efficiency, and the need to implement measures to reduce electricity losses. The 0,4–10 kV networks are the most numerous ones. These networks have the highest technical losses, on average 10–15 % with an unimproved level of 4–5 %. It is proposed to consider the introduction of energy efficient transformer technology to achieve the target indicators, reduce the energy intensity of Russia's GDP and electricity losses. The problem is that there are many 10/0,4 kV transformers, and their operating conditions and loads vary. The cost of such transformers is 15 % higher than traditional transformers. It means that widespread replacement will lead to a significant increase in the costs of grid companies and, thus to an increase in the cost of electricity tariffs. The purpose of this research is to synthesize and evaluate alternatives for implementing energy efficient transformers for rational selection of installation location, energy efficiency class and rated power under current limitation.

Materials and methods. To synthesize alternatives for implementation of energy-efficient transformers, the concepts of decision-making theory have been used. The authors have analyzed technical, economic and legal issues, and defined the features and limitations using a territorial network company LLC Zarinskaya Grid Company as an example. An assessment of synthesized alternatives has been used based on the indicators of effectiveness of implementation, energy loss savings, the amount of payment for these losses and the payback period. Initial data and technical specifications are taken from open sources, current state standards and standards of organizations, as well as provided by manufacturers. The method of calculation of losses has been developed based on methodical instructions of the Ministry of Energy.

Results. The alternatives for implementation of energy-efficient transformers have been synthesized and evaluated. The obtained values of loss savings when replacing classic transformers with energy-efficient ones can be interpreted for other organizations. The values of savings of the payment for reduced losses for LLC Zarinskaya Grid Company have been obtained. The characteristics that influence the efficiency of implementation of energy-efficient transformers are identified.

Conclusions. The authors have made a conclusion that the efficiency of implementation of energy-efficient transformers depends on the charge tariff of energy losses, the load factor, the value of the characteristic and energy efficiency class. The most effective way is to replace transformers with higher power ratings and the highest possible load factor. The development of an algorithm to determine such transformers will significantly increase the effectiveness of implementation and reduce the payback period.

Key words: energy efficient transformer, energy efficiency, electrical energy losses, conditional-constant energy losses, variable energy losses, load factor

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.039-045

Введение. Комплексная Государственная программа Российской Федерации (РФ) «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности», утвержденная ПП РФ № 1473 от 09.10.2023 г., устанавливает цель на снижение энергоемкости ВВП РФ на 35 % к 2035 г. Программа обуславливает необходимость разработки механизмов применения товаров, объектов и технологий высокой энергетической эффективности, а также необходимость внедрения мер по снижению потерь электрической энергии¹.

Целевые показатели по энергоэффективности обязательны для сетевых компаний, что требует внедрения дорогостоящего энергоэффективного оборудования. Рост затрат на такие технологии может привести к повышению тарифов на электроэнергию для потребителей. Для достижения целевых показателей, снижения энергоемкости ВВП России и уменьшения потерь электрической энергии предлагается рассмотреть внедрение технологии энергоэффективных трансформаторов (ЭЭТР) [1, 2, 3].

ЭЭТР представляет собой силовой трансформатор с улучшенными характеристиками потерь холостого хода и короткого замыкания². При этом ЭЭТР дороже классических силовых трансформаторов (СТР)³ [2].

За счет применения технологии ЭЭТР возможно добиться снижения технических потерь электрической энергии в распределительных сетях, что можно увидеть на примере сравнения характеристик ЭЭТР и СТР [4].

На сегодняшний день самыми многочисленными являются сети с уровнем напряжения 0,4–10 кВ, в этих сетях наблюдаются самые высокие технические потери, в среднем 10–15 %, при не улучшаемом уровне технических потерь в 4–5 %.

Проблема заключается в том, что трансформаторы 10/0,4 кВ многочисленны, условия их работы и нагруженности различны, поэтому судить об эффекте от осуществления слепой замены невозможно. Стоимость таких трансформаторов в среднем на 15 % больше стоимости традиционных, это означает, что повсеместная замена приведет к значительному увеличению затрат сетевых компаний и, как следствие, к увеличению стоимости тарифа электрической энергии.

Для получения наибольшего сбалансированного эффекта от внедрения ЭЭТР предлагается синтезировать альтернативы по внедрению ЭЭТР, которые позволят рассмотреть различные варианты внедрения, наиболее перспективные места установки ЭЭТР, где снижение потерь ощущалось

максимально. Важным моментом является определение применяемого класса энергоэффективности ЭЭТР и их номинальной мощности.

Методы исследования. Для решения задач многокритериальной оптимизации необходимо осуществить выбор наилучших альтернатив из всех возможных [5]. Синтез альтернатив осуществляется путем тщательного всестороннего анализа исследуемого явления [6, 7].

Начальный этап разработки альтернатив подразумевает создание как можно большего количества осуществимых решений. Выделяется два крайних варианта, а затем прорабатываются промежуточные решения. Одним из способов синтеза крайних альтернатив является выявление заведомо самой худшей и самой лучшей альтернативы. Данные крайние альтернативы являются границами искомых решений [8, 7].

В целях данного исследования предлагается синтезировать крайние альтернативы исходя из максимизации и минимизации затрат при замене СТР на ЭЭТР: вместо промежуточных вариантов определить гибкий вариант, который будет иметь настраиваемые параметры, с учетом определенных критериев и ограничений. Такие условия можно задать корректно в условиях конкретного предприятия. В качестве примера проведем выбор для трансформаторного парка 6–10/0,4 кВ ООО «Заринская сетевая компания» (ООО «ЗСК») [9]. Для этого выполним анализ технической, экономической и правовой сторон вопроса замены СТР на ЭЭТР, а также рассмотрим характеристики трансформаторного парка, которые выступят в качестве исходных данных для исследования [9].

Технические характеристики энергоэффективности действующих СТР имеют индекс Х1К1, характеристики ЭЭТР начинаются с индекса Х2К2 (СТО 34.01-3.2-011-2017⁴). Прочие технические характеристики трансформаторов регулируются ГОСТ Р 52719-2007.

Синтезированные альтернативы необходимо оценить, для того чтобы понять, какая из них является оптимальной. Оценивать альтернативы предлагается по следующим критериям:

1) *эффект от внедрения альтернативы в разнице потерь*, кВт·ч в год. Вычисляется по формуле

$$\Delta W_{\text{пот}} = W_{\text{СТР}} - W_{\text{ЭЭТР}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{СТР}}$ – суммарные потери холостого хода и короткого замыкания действующих силовых трансформаторов по классификации энергоэф-

¹ Постановление Правительства Российской Федерации закон от 09.09.2023 №1473 «Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации “Энергосбережение и повышение энергетической эффективности”».

² Постановление Правительства РФ от 17.06.2015 N 600 (ред. от 08.02.2022) «Об утверждении перечня объектов и технологий, которые относятся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности».

³ Коммерческое предложение на поставку энергоэффективных трансформаторов: [док. внутреннего пользования]; ОАО «Алтарнс». – Барнаул, 2023. – 1 с.

⁴ СТО 34.01-3.2-011-2017 Трансформаторы силовые распределительные 6–10 кВ мощностью 63–2500 кВА. Требования к уровню потерь холостого хода и короткого замыкания.

фективности Х1К1, кВт·ч в год; $W_{\text{ЭЭТР}}$ – суммарные потери холостого хода и короткого замыкания ЭЭТР по классификации энергоэффективности Х2К1, кВт·ч в год;

2) эффект от внедрения альтернативы в разнице оплаты потерь, тыс. руб. в год, для конкретной ТСО. Вычисляется по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{ПОТ}} = W_{\text{СТР}} \text{СТ}_{\text{ПОТ}} - W_{\text{ЭЭТР}} \text{СТ}_{\text{ПОТ}}, \quad (2)$$

где $\text{СТ}_{\text{ПОТ}}$ – стоимость оплаты потерь одного кВт·ч для исследуемой ТСО с НДС 20 %, тыс. руб.;

3) срок окупаемости альтернативы для рассматриваемой ТСО. Вычисляется по формуле

$$T_{\text{ОК}} = \frac{I}{\mathcal{E}_{\text{ПОТ}}}, \quad (3)$$

где I – величина инвестиций на реализацию альтернативы, тыс. руб.

Расчет годовых потерь, кВт·ч в год, в силовые трансформаторы производится по формуле

$$W_{\text{СТР}} = \sum N_i (W_{X_i} + W_{K3_i}), \quad (4)$$

где i – номинальная мощность трансформатора; N_i – общее количество СТР или ЭЭТР i -го уровня номинальной мощности; W_{X_i} – годовые условно-постоянные потери с характеристиками энергоэффективности Х1К1 или Х2К2 i -го уровня номинальной мощности; W_{K3_i} – годовые потери короткого замыкания с характеристиками энергоэффективности Х1К1 или Х2К2 i -го уровня номинальной мощности.

Расчет годовых условно-постоянных потерь энергии, кВт·ч в год, для двухобмоточного трансформатора с i -й номинальной мощностью не представляет труда и производится по формуле

$$W_X = \Delta P_X T_p \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2, \quad (5)$$

где ΔP_X – паспортные данные потерь мощности холостого хода; T_p – число часов работы в год; U – напряжение на высшей стороне трансформатора, кВ; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение высшей обмотки трансформатора, кВ.

Расчет нагрузочных потерь представляет некоторую сложность. Эти потери могут быть рассчитаны несколькими способами, в зависимости от наличия исходной информации⁵:

- 1) методом оперативных расчетов;
- 2) методом расчетных суток;
- 3) методом средних нагрузок;
- 4) методом числа часов наибольших потерь мощности;
- 5) методом оценки потерь по обобщенной информации о схемах и нагрузке сети.

Для расчета нагрузочных потерь электроэнергии в каждом элементе сетей могут приме-

няться методы 1 и 3, в зависимости от информационной обеспеченности, причем метод 1 считается более точным, но предъявляет более строгие требования к исходным данным на заданном промежутке времени, которые могут быть получены путем прямых непрерывных измерений. Трансформаторы 6–10 кВ несут массовый характер применения, в связи с чем метод 1 применить чрезвычайно трудозатратно.

Для метода 3 достаточно паспортных данных исследуемого оборудования и данных о расходе электроэнергии за базовый период. Так как данные о расходе электроэнергии отсутствуют, а переменные потери представляют собой нагрев проводника под действием электрического тока по закону Джоуля–Ленца, то переменные потери будут зависеть от квадрата тока и сопротивления проводника. Зная, что потеря мощности короткого замыкания ΔP_{K3} показывает потери мощности при 100 %-ной загрузке трансформатора, положим, что значения коэффициента загрузки $k_{\text{згр}} \in K = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$. Тогда формула расчета переменных потерь в трансформаторе, кВт·ч в год, может принять вид

$$W_{K3} = \Delta P_{K3} T_p k_{\text{згр}}, \quad (6)$$

где ΔP_{K3} – паспортные данные потерь мощности короткого замыкания; T_p – число часов работы в год; $k_{\text{згр}}$ – коэффициент загрузки.

Результаты исследования. Определим крайние альтернативы с позиции максимальных и минимальных затрат на инвестиционные вложения.

Альтернативу, подразумевающую максимальные инвестиционные вложения, назовем I, ее суть заключается в замене всех имеющихся СТР ООО «ЗСК» классом напряжения 10 кВ номинальной мощностью 100, 160, 250, 400, 630 и 1000 кВА на ЭЭТР. Замена прочих номинальных мощностей представляется нецелесообразной для исследования ввиду малочисленности и отсутствия данных о стоимости таких ЭЭТР. Всего трансформаторный парк ТСО насчитывает 816 единиц таких СТР с выбранными характеристиками. Из них 194 трансформатора установлены на двухтрансформаторных подстанциях 10 кВ. В нормальном режиме все без исключения двухтрансформаторные подстанции конкретной ТСО работают в режиме разделенной нагрузки, у каждого трансформатора нагрузка индивидуальная. При отказе одного из трансформаторов его замена производится в течение одних суток. Так как подавляющее время двухтрансформаторные подстанции работают в нормальном режиме с разделенной нагрузкой, то в целях данного исследования условимся считать такие трансформаторы единичными и независимыми друг от друга.

⁵ Приложение № 1 к инструкции по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям «Методика расчета технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям в базовом периоде».

Альтернатива I заведомо позволит выявить максимальный эффект от внедрения, наглядно покажет, насколько сократятся потери в трансформаторах и на какую неулучшаемую экономию затрат по оплате технологических потерь можно рассчитывать. Одновременно

данное решение покажет максимальные затраты на капиталовложения.

Оценка альтернативы I приведена в табл. 1 и рассчитана с использованием формул (1)–(6), при этом $k_{згр} = 0,5$.

Таблица 1. Исходные данные технико-экономических показателей сетевой организации и результаты оценки альтернативы I

№ п/п	Номинальная мощность, кВА	Количество, ед.	$\Delta W_{потI}$, кВт·ч в год	$\Delta \text{Э}_{потI}$, тыс. руб. в год	Инвестиции на ЭЭТР, тыс. руб.
1	100	144	154 841	768,12	28 195,92
2	160	140	225 044	1 108,03	38 074,40
3	250	172	344 662	1 711,94	54 296,96
4	400	209	676 495	3 320,7	92 248,42
5	630	127	661 949	3 216,96	67 741,80
6	1000	24	185 379	901,56	20 604,12
Всего		816	2 248 372	11 027,31	301 161,62

Срок окупаемости для альтернативы I составит $T_{окI} = 27$ лет.

Следующую альтернативу следует рассмотреть как минимальные инвестиционные вложения, не заменять СТР на ЭЭТР вовсе. Расчет данного варианта покажет максимальный ущерб от отплаты технических потерь и наибольшую величину потерь. Назовем вариант полного отказа от применения ЭЭТР альтернатива III. За расчетный период исследования был взят срок окупаемости $T_{окI} = 27$ лет, тогда $\Delta W_{потIII} = 60 706 051$ кВт·ч. За исследуемый промежуток времени придется понести затраты в размере $\Delta \text{Э}_{потIII} = 301$ млн руб., что равно полным затратам на инвестиции по приобретению ЭЭТР.

Рассчитанная оценка альтернативы III показывает максимальный убыток, который будет получен при отказе от применения ЭЭТР.

Теперь, когда границы определены, синтезируем промежуточную альтернативу II. Ввиду статуса ТСО, предприятию каждый год необходимо вводить новые объекты электросетевого хозяйства в рамках технологического присоединения, кроме того, производить замену неподлежащих капитальному ремонту трансформаторов после технологических нарушений. За период 5 лет (по 2022 год включительно) таких обязательных замен произведено, в среднем, по

10 единиц в год. Если такие трансформаторы соответствуют критериям по мощности и коэффициенту загрузки, применяемым в данном исследовании, то целесообразно рассмотреть замену на предлагаемые ЭЭТР.

Если подлежащие замене или вводимые вновь трансформаторы не соответствуют данным критериям, имеет смысл рассмотреть их замену на предлагаемые ЭЭТР.

В рассматриваемом парке организации не соответствующие критериям подлежащие замене или вводимые вновь трансформаторы практически отсутствуют. Их вклад в данное исследование оценивается как незначительный, и поэтому они не будут браться в расчет. Но при более обширном трансформаторном парке необходимо учитывать это обстоятельство.

Финансирование инвестиционных вложений можно осуществить за счет инвестиционной программы, пусть эти средства выступят как ограничения. Тогда необходимо определить такую комбинацию замены СТР на ЭЭТР, чтобы иметь максимальный эффект от внедрения.

Для этого были построены графики зависимости срока окупаемости и экономии потерь от коэффициента загрузки для различных номинальных мощностей ЭЭТР (рис. 1, 2).

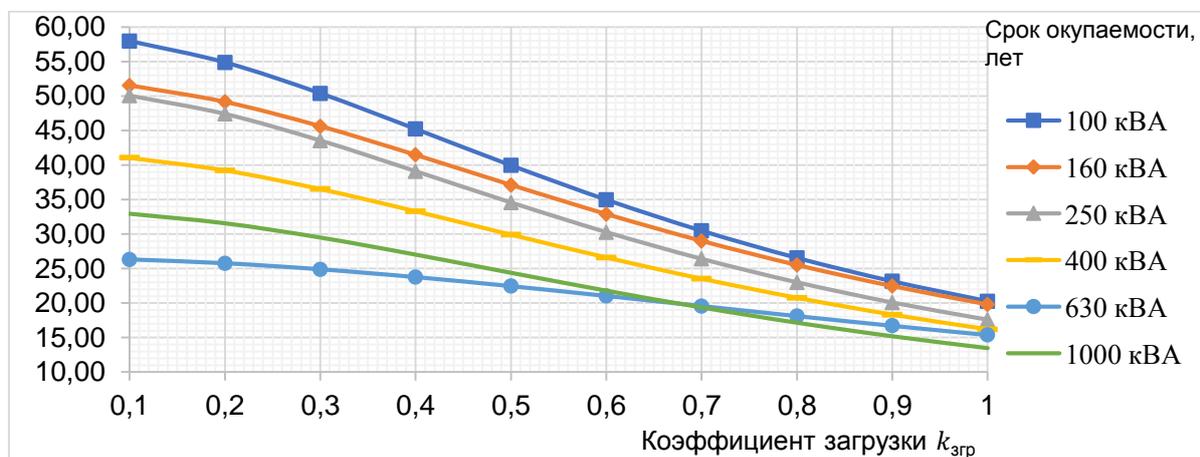


Рис. 1. График зависимости срока окупаемости от коэффициента загрузки

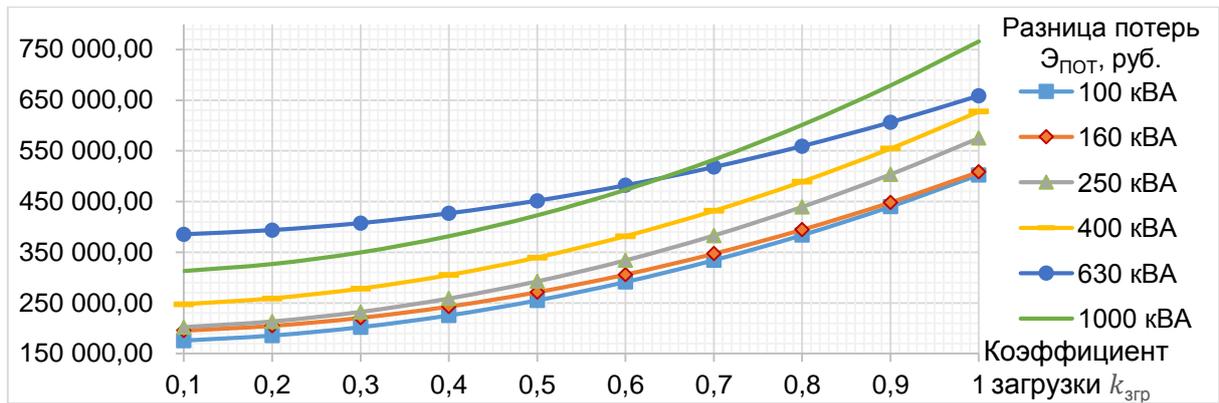


Рис. 2. График зависимости экономии потерь от коэффициента загрузки

Анализ графиков на рис. 1, 2 показал, что чем выше номинальная мощность ЭЭТР с характеристиками энергоэффективности X2K2 и чем выше коэффициент загрузки, тем больше экономия потерь от применения ЭЭТР и быстрее срок окупаемости.

Так, было выявлено, что при замене на ЭЭТР с коэффициентом загрузки в 100 % возможно добиться срока окупаемости в 12,5 лет. Причем при коэффициенте загрузки менее 67 % самым окупаемым будет являться трансформатор номинальной мощностью 630 кВА.

Планирование и бюджетирование сетевых организаций подразумевает пятилетние этапы. В связи с этим был проведен расчет замены всех СТР 630 кВА, срок службы которых превысил 25 лет (104 единицы). С учетом пятилетнего плана была запланирована замена по 21 трансформатору в год. Результаты оценки при выполнении альтернативы II в разрезе одного года и пятилетнего плана приведены в табл. 2.

При реализации альтернативы II срок окупаемости будет сокращен с 27 лет до $T_{окII} = 22$ года при $k_{згр} = 0,5$. При применении специального ал-

горитма для отыскания СТР с более высокой загрузкой можно добиться еще большего эффекта от внедрения ЭЭТР.

Выводы. Предложенный вариант синтеза альтернатив для внедрения энергоэффективных трансформаторов, а также способ оценки этих альтернатив с помощью расчета показателей эффекта от внедрения ЭЭТР позволили выявить самую эффективную альтернативу.

Самой эффективной является замена трансформаторов напряжением 10 кВ с большими номиналами 630–1000 кВА и высоким коэффициентом загрузки, что особенно актуально для единичных трансформаторов, работающих на выделенную нагрузку.

Разработка алгоритма для определения таких трансформаторов позволит значительно повысить эффективность внедрения и сократить сроки окупаемости. В этих же целях необходимо рассмотреть влияние манипуляции коэффициентом загрузки на эффективность замены СТР на ЭЭТР. Кроме того, эффективность внедрения энергоэффективных трансформаторов зависит от тарифа оплаты потерь энергии, коэффициента загрузки, величины характеристики и класса энергоэффективности.

Таблица 2. Данные для оценки альтернативы II

Наименование показателя	Единицы измерения	Первый год	По прошествии 5 лет
Потери энергии	кВт*ч	519,69	2 573 688
Оплата для СТР X1K1	тыс. руб.	2 369,77	11 736 017
Потери при применении энергоэффективных трансформаторов	кВт*ч	410,23	2 031 619
	руб.	1 870,65	9 264 183
Инвестиции на ЭЭТР X2K2	тыс. руб.	11 201,40	55 473 600
Эффект от внедрения ЭЭТР	кВт*ч	109,46	542 068
	тыс. руб.	499,12	2 471 833

Список литературы

1. **Сабельников А.С.** Перспективы снижения потерь электроэнергии за счет оптимизации выбора энергоэффективных трансформаторов // ЭНЕРГО-СТАРТ: материалы VI Междунар. молодежной науч.-практ. конф. в рамках Десятилетия науки и технологий в Российской Федерации, Кемерово, 17–22 ноября 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный

технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 230-1. – EDN JOVRDA.

2. **Дроздов Н.В., Ларин В.С., Филиппов А.Е.** К вопросу энергоэффективности распределительных трансформаторов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 4. – С. 41–46. – EDN UGCKTR.

3. **Дроздов Н.В., Ларин В.С., Филиппов А.Е.** О нормировании потерь и энергоэффективности распре-

делительных трансформаторов // Энергетик. – 2018. – № 3. – С. 13–17. – EDN YUJLAB.

4. **Белей В.Ф.** Анализ современного состояния и тенденций развития распределительных трансформаторов // Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2013: труды XI Междунар. науч. конф., Калининград, 25–27 сентября 2013 г. Ч. 1. – Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2013. – С. 373–376. – EDN ZEEWAJ.

5. **Вотякова Е.М., Гнатюк Б.А., Староверов Б.А.** Многокритериальный выбор высоковольтного выключателя для электрической подстанции на основе применения прямого метода анализа иерархии // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 5. – С. 70–75. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.070-075. – EDN WVOUJD.

6. **Колибаба О.Б., Козлова М.В., Гаряев А.Б.** Разработка критериев оценки эффективности методов обращения с твердыми коммунальными отходами // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 3. – С. 20–28. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.020-028. – EDN MPICEJ.

7. **Soumik D., Bipradas B., Balam D.** A DE Novo multi criteria heterogeneous group decision making approach for green performance assessment of CNC machine tools // *Decision Science Letters*. – 2024. – Vol. 2, No. 13. – P. 499–524. DOI: 10.5267/j.dsl.2023.12.007.

8. **Воробьев П.В.** Менеджмент: учеб. пособие. – Тольятти: ВЭГУ, 2009. – С. 225.

9. **Сабельников А.С., Зимина Л.А.** Внедрение энергоэффективных трансформаторов на примере крупнейших электросетевых компаний Алтайского края // Наука и молодежь: материалы XX Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых, Барнаул, 17–21 апреля 2023 г. Т. 1. Ч. 1. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2023. – С. 407–408. – EDN YABPOA.

References

1. Sabel'nikov, A.S. Perspektivy snizhenie poter' elektroenergii za schet optimizatsii vybora energoeffektivnykh transformatorov [Prospects for reducing electricity losses through optimization of energy-efficient transformer selection]. *Materialy VI Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «ENERGOSTART» v ramkakh Desyatiletiya nauki i tekhnologii v Rossiyskoy Federatsii, Kemerovo, 17–22 noyabrya 2023 g.* [ENERGO-START: materials of the VI International youth scientific-practical conference within the framework of the Decade of science and technology in the Russian Federation]. Kemerovo: Kuzbasskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. T.F. Gorbacheva, 2023, pp. 230-1. EDN JOVRDA.

2. Drozdov, N.V., Larin, V.S., Filippov, A.E. K voprosu energoeffektivnosti raspredelitel'nykh transformatorov [On the issue of energy efficiency of distribution

transformers]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2015, no. 4, pp. 41–46. EDN UGCKTR.

3. Drozdov, N.V., Larin, V.S., Filippov, A.E. O normirovaniy poter' i energoeffektivnosti raspredelitel'nykh transformatorov [On standardization of losses and energy efficiency of distribution transformers]. *Energetik*, 2018, no. 3, pp. 13–17. EDN YUJLAB.

4. Beley, V.F. Analiz sovremennogo sostoyaniya i tendentsiy razvitiya raspredelitel'nykh transformatorov [Analysis of current state and development trends of distribution transformers]. *Trudy XI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Innovatsii v nauke, obrazovanii i biznese – 2013»*, Kaliningrad, 25–27 sentyabrya 2013 g. Ch. 1 [Proceedings of the XI International scientific conference “Innovations in science, education and business – 2013”]. Kaliningrad: Kaliningradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2013, pp. 373–376. EDN ZEEWAJ.

5. Votyakova, E.M., Gnatyuk, B.A., Staroverov, B.A. Mnogokriterial'nyy vybor vysokovol'tnogo vyklyuchatelya dlya elektricheskoy podstantsii na osnove primeneniya pryamogo metoda analiza ierarkhii [Multicriteria selection of high-voltage circuit breaker for an electrical substation based on direct application of analytic hierarchy process method]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 5, pp. 70–75. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.070-075. EDN WVOUJD.

6. Kolibaba, O.B., Kozlova, M.V., Garyaev, A.B. Razrabotka kriteriev otsenki effektivnosti metodov obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami [Development of criteria for assessing the effectiveness of methods for handling municipal solid waste]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 3, pp. 20–28. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.020-028. EDN MPICEJ.

7. Soumik, D., Bipradas, B., Balam, D. A DE Novo multi criteria heterogeneous group decision making approach for green performance assessment of CNC machine tools. *Decision Science Letters*, 2024, vol. 2, no. 13, pp. 499–524. DOI: 10.5267/j.dsl.2023.12.007.

8. Vorob'ev, P.V. *Menedzhment* [Management]. Tol'yatti: VEGU, 2009, p. 225.

9. Sabel'nikov, A.S., Zimina, L.A. Vnedrenie energoeffektivnykh transformatorov na primere krupneyshikh elektrosetevykh kompaniy Altayskogo kraya [Implementation of energy-efficient transformers using the example of major power grid companies in altai region]. *Materialy XX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Nauka i molodezh'»*, Barnaul, 17–21 aprelya 2023 g. T. 1. Ch. 1 [Science and youth: proceedings of the XX All-Russia scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists]. Barnaul: Altayskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. I.I. Polzunova, 2023, pp. 407–408. EDN YABPOA.