

---

## 2.4. ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

---

### ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.4.2)

УДК 621.311:338.24

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-11-16

#### Применение новых силовых трансформаторов: экономические показатели

Д.А. Воденников, Ю.В. Жилкина

Методы экономического анализа и оптимизации — основные элементы при анализе экономической эффективности и возможности использования трансформаторов инновационной конструкции. Для сравнительного анализа потерь трансформаторов выполнено математическое моделирование районной электрической сети с учётом применения традиционной и инновационной конструкций трансформаторов. В качестве инструмента моделирования использовано программное обеспечение MS Excel, RastrWin. Проведены расчеты экономических показателей при замене существующих трансформаторов традиционной конструкции на инновационные аморфные трансформаторы. Смоделирована замена трансформаторов в районной электрической сети, рассчитаны потери аморфных трансформаторов по традиционным методикам.

*Ключевые слова:* короткое замыкание, потери, аморфные магнитные материалы, высокотемпературные сверхпроводниковые материалы, трансформатор, энергосбережение, энергоэффективность.

*Для цитирования:* Воденников Д.А., Жилкина Ю.В. Применение новых силовых трансформаторов: экономические показатели // Вестник МЭИ. 2023. № 1. С. 11—16. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-11-16.

#### Application of New Power Transformers: Economic Indicators

D.A. Vodennikov, Yu.V. Zhilkina

Economic analysis and optimization methods are the main elements in analyzing the economic efficiency and possibility of using transformers of innovative design. For comparative analysis of the losses in transformers, a regional electrical network is modeled for the cases of applying transformers of conventional and innovative designs. The MS Excel and RastrWin software packages are used as a modeling tool. Assessments of the economic indicators obtained when the existing transformers of conventional design are replaced by innovative amorphous core transformers are carried out. The replacement of transformers in a regional electrical network is simulated, and the losses in amorphous core transformers are evaluated using conventional techniques.

*Key words:* short-circuit fault, losses, amorphous magnetic materials, high-temperature superconducting materials, transformer, energy saving, energy efficiency.

*For citation:* Vodennikov D.A., Zhilkina Yu.V. Application of New Power Transformers: Economic Indicators. Bulletin of MPEI. 2023;1: 11—16. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-11-16.

## Введение

Использование в отечественных электрических сетях и системах электроснабжения (ЭССЭ) устаревших конструкций трансформаторов не отвечает уровню теоретических научно-технических решений и практических технологических принципов современной электротехники, что, несомненно, тормозит технический прогресс в электроэнергетике. Это непосредственным образом отражается на реализации широко декларируемых положений об энергосбережении и энергоэффективности как в потреблении, так и в процессах передачи и распределения электроэнергии.

Одна из задач в сфере остро назревшей модернизации распределительных электрических сетей заключается в повышении их технико-экономической эффективности. В первую очередь — посредством снижения технологических потерь на передачу электрической энергии, значительная часть которых присутствует в силовых трансформаторах напряжением 10(6)/0,4 кВ. Следовательно, возникла необходимость обращения внимания проектных и эксплуатирующих организаций на вопросы рационального выбора новых силовых трансформаторов для замены физически и морально устаревших.

Компьютерные эксперименты, поставленные в ряде исследований в России в 2007 — 2012 гг. для характерных типичных режимов и конфигураций ЭССЭ 10 кВ и ниже, показали, что обобщенные результаты по потерям мощности оцениваются от 11 до 27,5% по различным регионам. Аналогичные показатели наблюдаются и в странах Евросоюза, где по отдельным группам электроустановок, в частности в трансформаторах распределительных сетей, они достигают уровня 17% от общего валового потребления, а иногда существенно превышают приведенные значения [1].

Таким образом, зарубежный и отечественный опыт говорит о необходимости дальнейших интенсификации исследований и реализации применения эффективных с точки зрения снижения потерь режимных и организационных мероприятий. Практически ни одно энергообъединение ни в нашей стране, ни за рубежом не может гарантировать, что его технико-экономический потенциал в этом направлении реализован полностью.

Кардинальное снижение потерь электрической мощности и энергии (ПЭМЭ) может быть получено только благодаря широкому применению инновационного электрооборудования, обладающего высокоеффективными характеристиками в основных электроэнергетических технологических процессах производства, передачи и преобразования параметров электрической энергии. Из большого числа типов, групп и конструкций подобных электроустановок можно выделить управляемые источники реактивной мощности, линии электропередачи, силовые трансформаторы (СТ) и другие конструкции, использующие эффект высокотемпературной сверхпроводимости,

трансформаторы ЭССЭ с сердечниками из инновационных аморфных сплавов (АМТ) [2].

С технико-экономической точки зрения использование АМТ в настоящее время является одним из наиболее перспективных путей снижения ПЭМЭ. Об этом убедительно говорит опыт их эксплуатации в США, Индии, Японии, Норвегии, Словакии и других странах [3].

Какому трансформатору отдать предпочтение при проведении конкурсной процедуры? Как оценить финансовые потери эксплуатирующей организации за время использования трансформатора? Выбрать тот, который имеет меньшую закупочную цену, но большие потери энергии, или трансформатор лучшего качества, с меньшими потерями, но стоящий дороже? Или же оставить в эксплуатации старый? Эти вопросы возникают в сетевых организациях на протяжении многих лет.

## Сравнение стоимости эксплуатации

Актуальный ответ можно получить, определив величину полной цены каждого из приобретаемых трансформаторов, состоящую из их закупочной цены и цены потерь энергии за период дальнейшей эксплуатации трансформатора. Авторами взят метод экономического анализа путем сравнения двух трансформаторов [4].

К примеру, разница в закупочной цене трансформаторов 10/0,4 кВ ТМ-400/10 производства ГК «Электрощит» (г. Самара) и АТМГ-400/10 производства ГК «Трансформер» (г. Подольск) составляет порядка 60000 руб., а разница цены потерь — не менее 700000 руб.

Для точных расчетов выбраны следующие трансформаторы: традиционный ТМ-400/10 и с магнитопроводом из аморфного сплава АТМГ-400/10 такой же мощности, паспортные данные приведены в табл. 1. Результаты расчетов по указанному методу представлены в табл. 2.

В настоящем случае разница цены потерь энергии в трансформаторах за 30 лет его эксплуатации составила  $At_1 - At_2 = 1026886,443$  руб., что в четыре раза больше стоимости самого трансформатора с аморфным магнитопроводом.

Технические расчеты нагрузочных потерь показали, что их величина зависит от уровня загрузки трансформатора относительно номинальной [5]. Для определения экономического эффекта при работе трансформаторов с разными коэффициентами загрузки выполнены расчеты по эффективности и окупаемости эксплуатации традиционных и инновационных конструкций по годам с учетом инфляции, принятой равной 7%, результаты расчетов продемонстрированы на графиках рис. 1 — 4 [6].

При закупках новых типов трансформаторов дополнительными затратами на приобретение АМТ сетевыми компаниями будет считаться сумма, равная разнице в цене ТСТ и АМТ. Стоимость ТСТ так или иначе закладывается в программы строительства, модернизации и технического перевооружения электрических сетей, и эта разница в цене выглядит как доплата к су-

Таблица 1

## Паспортные данные сравниваемых трансформаторов

Паспортные данные	Марка трансформатора	
	ТМ-400/10	АТМГ-400/10
Номинальная мощность $S_{\text{ном}}$ , кВА	400	400
Потери активной мощности при холостом ходе $\Delta P_{\text{XX}}$ , Вт	830	161
Потери реактивной мощности при холостом ходе $\Delta Q_{\text{XX}}$ , ВАр	5600	312
Потери короткого замыкания $\Delta P_{\text{K3}}$ , Вт	4400	4457
Ток холостого хода $I_{\text{XX}}$ , %	1,6	0,078
Напряжение короткого замыкания $\Delta U_{\text{K3}}$ , %	4,5	3,6

Таблица 2

## Сравнение стоимости эксплуатации традиционного трансформатора и трансформатора с магнитопроводом из аморфного сплава

Параметры	Марка трансформатора	
	ТМ-400/10	АТМГ-400/10
Полная цена $C_{\text{п}}$ , руб	2 049 941	1 081 854
Закупочная цена $C$ , руб	196000	254800
Цена потерь энергии в трансформаторе за время его эксплуатации $A$ , руб	1853940,582	827054,1393
Потери мощности холостого хода $P_{\text{XX}}$ , кВт	0,83	0,161
Количество часов в году $T$ , ч	8760	8760
Потери мощности короткого замыкания $P_{\text{K3}}$ , кВт	4,4	4,457
Максимальная нагрузка $S_{\text{max}}$ , кВА	280	280
Номинальная мощность $S_{\text{ном}}$ , кВА	400	400
Время потерь $\tau$ , ч	1500	1500
Цена одного кВт в первый год эксплуатации $c$ , руб	1,45	1,45
Ежегодный относительный прирост цены одного кВт $\Delta_c$ , руб	0,07	0,07
Срок эксплуатации $t$ , лет	30	30
Коэффициент загрузки $K_3$	0,7	0,7

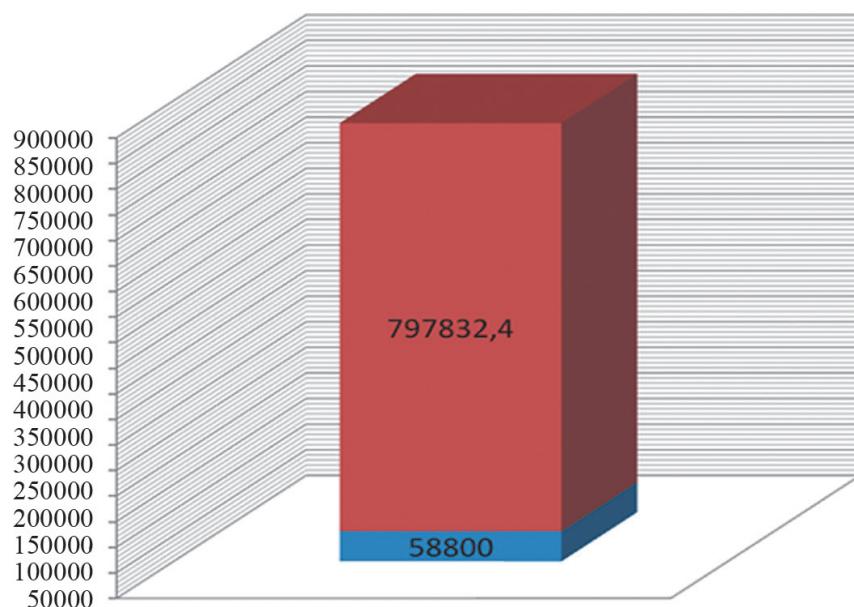


Рис. 1. Экономия при использовании трансформатора с магнитопроводом из аморфного сплава:

■ — чистая выгода, руб.; ■ — разница в цене, руб.

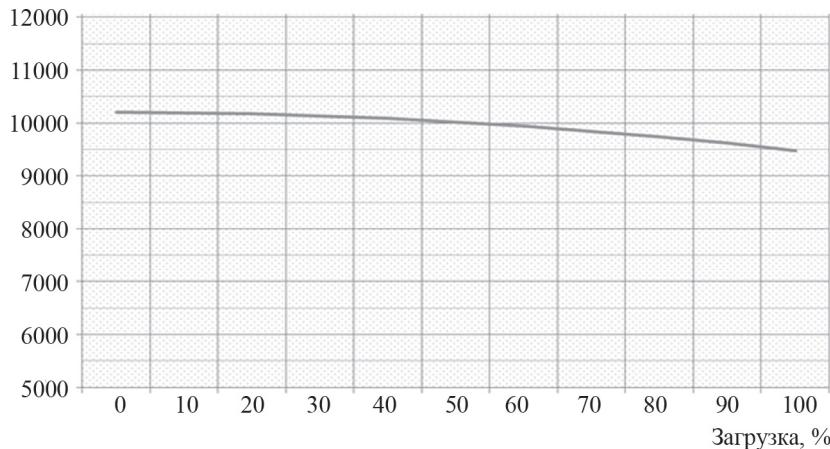


Рис. 2. Годовая выгода (руб.) от использования АМТ

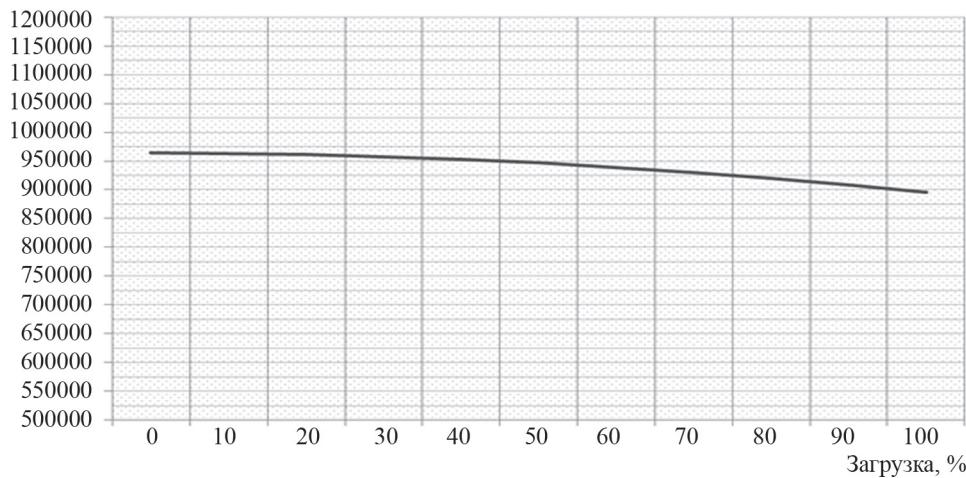
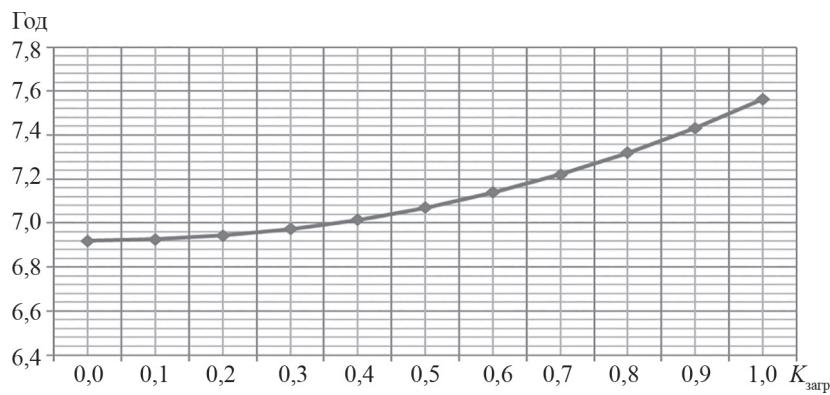


Рис. 3. Выгода (руб.) от использования АМТ в течение жизненного цикла

Рис. 4. Зависимость окупаемости от  $K_{загр}$ 

ществующим расходам, номинально заложенным [7]. Из диаграмм рис. 1 — 4 видно, что при дополнительных капитальных затратах сетевых компаний на сумму 58800 руб. в течение жизненного цикла трансформатора общая экономия составит 974908,94 руб. что почти в четыре раза больше стоимости самого АТМГ.

Для оценки экономического эффекта от применения АМТ найдена стоимость потерь в течение эксплуатации. Для компьютерного эксперимента взяты

трансформаторы ТМ-400/10 и АТМГ-400/10 с учетом их цен. Все экономические прогнозы проводились относительно двух данных моделей трансформаторов. Для расчетов использован тариф на потери для сетевых компаний, сформированный РЭК Самарской области на 2014 г.: 1,25 — для летнего периода и 1,75 — для зимнего. В итоге взят среднегодовой — 1,45. Для выбранных трансформаторов выполнена оценка объемов потерь электроэнергии за год при ра-

боте с различными коэффициентами загрузки ( $K_z$ ). На рис. 2 представлен график годовой экономии в руб. от использования АМТ по сравнению с ТСТ (следует обратить внимание на незначительную зависимость от значений  $K_z$ ).

Оценена экономия за весь жизненный цикл с учетом ежегодного пересмотра РЭК тарифов, рост тарифов был принят также за 7%, что по сути можно считать пренебрежением высокими темпами реального роста, в результате получились значения, изображенные на рис. 3. За жизненный цикл принят срок службы трансформатора в течение 30 лет.

С учетом полученных результатов по расчетам экономического эффекта в течение эксплуатации АМТ установлена окупаемость нового типа трансформаторов (см. рис. 4).

Как следует из данных рис. 2 — 4, отличия в экономической эффективности при разных коэффициентах загрузки трансформатора невелики.

Сделан расчет чистого дисконтированного дохода NPV для трансформатора АТМГ-400/10, ставка дисконтирования равна 7%, в качестве дохода рассмотрена годовая экономия от использования новой конструкции магнитопровода по сравнению с традиционной. Результаты даны на рис. 5, из которого видно, что окупаемость разницы в цене традиционного и инновационного трансформаторов за счет экономии на потерях

выявляется уже на шестом году эксплуатации, а полной стоимости — на пятнадцатом.

### Выводы

Анализ продемонстрировал имеющуюся сложность соответствия расчетных и измеренных изготовителем трансформатора показателей потерь холостого хода значениям, выявляющимся в процессе эксплуатации. Они возникают из-за повышенных относительно номинальных напряжений, действующих на первичную обмотку трансформатора.

Именно в таких сложившихся условиях очевидна необходимость проведения мероприятий по исключению недостоверных данных о потерях мощности в паспортах трансформаторов и, особенно, в тендерной документации. К данным мероприятиям следует отнести обязательную проверку (измерение при участии покупателя и продавца) аттестованной лабораторией указанных параметров, а также последующие жесткие санкции к поставщику трансформаторов с реальными потерями энергии, превышающими значения, приведенные в паспортных или тендерных документах.

Из результатов расчета делается конечный вывод относительно конкретной ситуации с заменой распределительных трансформаторов, на основании чего и составляется требуемый план-график. В среднем затраты на замену окупаются за 5...7 лет.

### Л и т е р а т у р а

1. Гольдштейн В.Г., Инаходова Л.М., Казанцев А.А., Молочников Е.Н. Анализ эксплуатационных свойств трансформаторов с сердечниками из аморфных материалов и защита их с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». 2013. № 4. С. 149—157.

2. Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Чернова Н.В. Определение параметров симметрирующих трансформаторов // Промышленная энергетика. 2015. № 1. С. 54—59.

3. Инаходова Л.М., Казанцев А.А. Сравнительный анализ технико-экономических показателей трансформаторов с различным исполнением сердечника // Актуальные научные вопросы современности: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Липецк, 2013. С. 19—21.

4. Водениников Д.А., Жилкина Ю.В. Исследовательский комитет В3 «Подстанции и электроустановки» // Энергетика за рубежом. Приложение к журналу «Энергетик». 2022. № 1—2. С. 89—96.

5. Баженов Н.Г., Филина О.А., Озерова Е.Ю. Влияния характеристик трансформаторов на качество автоматического регулирования в системах электроснабжения // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 62—67.

### References

1. Gol'dshteyn V.G., Inakhodova L.M., Kazantsev A.A., Molochnikov E.N. Analiz Ekspluatatsionnykh Svoystv Transformatorov s Serdechnikami iz Amorfnykh Materialov i Zashchita Ikh s Pomoshch'yu Nelineynykh Ogranichiteley Perenapryazheniy. Vestnik Samarskogo Gos. Tekhn. Un-ta. Seriya «Tekhnicheskie Nauki». 2013;4:149—157. (in Russian).

2. Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Chernova N.V. Opredelenie Parametrov Simmetriruyushchikh Transformatorov. Promyshlennaya Energetika. 2015;1:54—59. (in Russian).

3. Inakhodova L.M., Kazantsev A.A. Sravnitel'nyy Analiz Tekhniko-ekonomiceskikh Pokazateley Transformatorov s Razlichnym Ispolneniem Serdechnika. Aktual'nye Nauchnye Voprosy Sovremennosti: Materialy Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. Lipetsk, 2013:19—21. (in Russian).

4. Vodennikov D.A., Zhilkina Yu.V. Issledovatel'skiy Komitet V3 «Podstantsii i Elektrostanovki». Energetika za Rubezhom. Prilozhenie k Zhurnalu «Energetik». 2022; 1—2:89—96. (in Russian).

5. Bazhenov N.G., Filina O.A., Ozerova E.Yu. Vliyaniyu Kharakteristik Transformatorov na Kachestvo Avtomaticheskogo Regulirovaniya v Sistemakh Elektro-snabzheniya. Vestnik MEI. 2019;5:62—67. (in Russian).

6. **Назаров В.В.** Распределительные трансформаторы 10(0,6)/0,4 кВ. Ключевые вопросы выбора // Новости электротехники. 2013. – № 6(84). С. 46—48.

7. **Баширов М.Г., Прахов И.В., Хисматуллин А.С., Хуснуддинова И.Г.** Совершенствование методов оценки технического состояния силовых трансформаторов // Промышленная энергетика. 2018. № 7. С. 2—10.

6. **Nazarov V.V.** Raspredelitel'nye Transformatory 10(0,6)/0,4 kV. Klyuchevye Voprosy Vybora. Novosti Elektrotehniki. 2013;6(84):46—48. (in Russian).

7. **Bashirov M.G., Prakhov I.V., Khismatullin A.S., Khusnuddinova I.G.** Sovershenstvovanie Metodov Otsenki Tekhnicheskogo Sostoyaniya Silovykh Transformatorov. Promyshlennaya Energetika. 2018;7:2—10. (in Russian).

**Сведения об авторах:**

**Водеников Дмитрий Александрович** — ПАО «Россети Московский регион»

**Жилкина Юлия Викторовна** — кандидат экономических наук, ПАО «Россети ФСК ЕЭС», e-mail: ZhilkinaYV@mes-centra.ru

**Information about authors:**

**Vodennikov Dmitriy A.** —PJSC «Rosseti Moscow Region»

**Zhilkina Yuliya V.** — Ph.D. (Economic), PJSC «Rosseti FGC UES», e-mail: ZhilkinaYV@mes-centra.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 14.04.2022

**The article received to the editor:** 14.04.2022

**Статья принята к публикации:** 24.10.2022

**The article has been accepted for publication:** 24.10.2022