

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная  
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

221-1

**20-22 октября 2022 года**

---

**УДК 621.314**

А.Н. ПАЮСОВ, студент гр. ЭПм-211 (КузГТУ)

Научный руководитель Т.Л. ДОЛГОПОЛ, доцент (КузГТУ)  
г. Кемерово

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Единая энергетическая система России (ЕЭС России) – это огромная электроэнергетическая система, объединяющая 71 региональную энергосистему. В её состав входит 911 электростанций, мощностью свыше 5 МВт каждая, с общей установленной мощностью порядка 246000 МВт [3]. Помимо этого, немаловажную роль в этой системе играет маслонаполненное оборудование.

Маслонаполненное оборудование, к которому относятся и силовые трансформаторы, нашло широкое применение как на объектах электроснабжения (станциях и подстанциях), так и в электрическом хозяйстве промышленных предприятий.

На сегодняшний день, трансформаторы являются неотъемлемой частью системы электроснабжения предприятия, так как они определяют качество и надежность электроснабжения технологических процессов. Они используются на понижающих подстанциях, в распределительных пунктах, устанавливаются непосредственно в помещениях цехов и служат для того, чтобы понизить напряжение для требуемого для технологического оборудования уровня.

Согласно технической документации заводов-изготовителей нормативный срок службы масляных трансформаторов составляет приблизительно 25 лет. В настоящее время у большей части распределительных трансформаторов срок службы подходит к концу, либо период их эксплуатации значительно превысил указанный заводом-изготовителем срок.

При работе трансформатора имеют место потери, которые можно разделить на две составляющие:

- потери холостого хода, возникающие при намагничивании и перемагничивании магнитопровода (условно постоянные потери);
- потери короткого замыкания, происходящие в обмотках (нагрузочные потери).

Повлиять на снижение потерь холостого хода возможно за счет:

- использования стали с улучшенными магнитными свойствами;

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная  
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

221-2

20-22 октября 2022 года

---

---

- совершенствования технологии изготовления магнитной системы;
- усовершенствования конструкции сердечника.

Большая часть распределительных масляных трансформаторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, это трансформаторы типа ТМ. В данной статье будет произведена оценка целесообразности замены трансформаторов ТМ номинальной мощности 1600 и 2500 кВА на современные энергоэффективные трансформаторы серий ТМГ, ТМГА и ТСЗГЛ.

**Силовые трансформаторы марки ТМГ.** Главное отличие данных трансформаторов от марки ТМ, является то, что внутренний объем бака, заполняемый полностью трансформаторным маслом, выполняется в герметическом исполнении. Ввиду данной особенности не происходит увлажнения и окисления масла, а также отсутствует шламообразование. Перед заливкой масло проходит этап дегазации и в течение всего периода эксплуатации сохраняет требуемые свойства. Достоинством герметичных трансформаторов является отсутствие необходимости забора пробы масла и проведения профилактических, текущих и капитальных ремонтов в течение всего срока эксплуатации трансформатора (25 лет).

**Силовые трансформаторы с аморфным сердечником марки ТМГА.** Одним из эффективных способ снижения потерь является использование в трансформаторах аморфной стали, которую получают путем резкого охлаждения нагретой тонкой стальной ленты.

Одной из составляющих магнитных потерь являются потери на вихревые токи, величина которых зависит от удельного электрического сопротивления материала магнитной системы и от толщины листов, из которых собираются пакеты стержней и ярм магнитопровода. У аморфной стали удельное электрическое сопротивление более, чем в два раза выше, чем у традиционной холоднокатаной электротехнической стали, а толщина листов составляет всего 0,025 мм, т.е. на порядок меньше, чем у электротехнической (0,23-0,35 мм). Это обуславливает значительное снижение потерь холостого хода в аморфных трансформаторах, которые в три раза меньше, чем в трансформаторах ТМГ. Потери короткого замыкания также меньше у аморфных трансформаторов. Стоимость аморфных трансформаторов на 30 – 35% больше стоимости трансформаторов типа ТМГ.

**Сухие силовые трансформаторы марки ТСЗГЛ.** Данный тип трансформаторов оснащен обмотками, которые залиты геофолью – эпоксидным компаундом с кварцевым наполнителем, имеющим класс нагревостойкости – F (155°C). Воздух обладает меньшей электрической прочностью, чем трансформаторное масло, поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают большими, чем в масляных.

# V Всероссийская (с международным участием) молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»

221-3

20-22 октября 2022 года

---

Кроме этого, из-за меньшей теплопроводности воздуха, по сравнению с маслом, электромагнитные нагрузки активных материалов в сухих трансформаторах меньше, чем в масляных, что приводит к увеличению сечения проводов обмотки и магнитопровода. Как следствие этого, масса активных частей (обмоток и магнитопровода) сухих трансформаторов больше, чем масляных. Сухие трансформаторы в меньшей степени, чем масляные, выдерживают перегрузочные режимы работы, и они дороже масляных.

Сухие трансформаторы, в отличии от трансформаторов масляного исполнения, не нуждаются в дополнительном техническом обслуживании (контроля уровня масла, проведения физико-химических анализов) и являются экологически чистыми.

В качестве сравнения взяты следующие трансформаторы, технические характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Технические характеристики трансформаторов

№ п/п	Тип трансформатора	Номиналь- ная мощ- ность $S_{nm}$ , кВА	Номи- нальное напряже- ние $U_n$ , кВ	Потери холостого хода, $P_{xx}$ , кВт	Потери ко- роткого за- мыкания, $P_{kz}$ , кВт
1	ТМГ-1600/10	1600	10/0,4	2,15	14,5
2	ТМГ-2500/10	2500	10/0,4	2,6	26,5
3	ТМГА-1600/10	1600	10/0,4	0,63	14,5
4	ТМГА-2500/10	2500	10/0,4	0,75	17,4
5	ТСЗГЛ-1600/10	1600	10/0,4	3,2	11,3
6	ТСЗГЛ-2500/10	2500	10/0,4	4,6	17,5

Потери активной мощности в трансформаторе определяются по формуле:

$$\Delta P_m = P_{xx} + \beta^2 P_{kz}, \text{ кВт} \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент загрузки трансформатора.

Расчет годовых потерь электроэнергии в трансформаторе производится по формуле:

$$\Delta W_m = P_{xx} T_e + \beta^2 P_{kz} \tau, \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (2)$$

где  $T_e$  – число часов работы трансформатора в году, ч;  $\tau$  – время максимальных потерь, условное число часов, в течение которых максимальный ток, протекающий непрерывно, создает потери энергии, равные действительным потерям энергии за год, для продолжительности смены в 8 часов и трех сменах  $T_e=6600$  ч.

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная  
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»  
20-22 октября 2022 года**

---

221-4

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_m}{10000}\right) \cdot 8760, \text{ ч} \quad (3)$$

где  $T_m$  – время использования максимума нагрузки, условное число часов, в течение которых работа с максимальной нагрузкой передает за год столько энергии, сколько при работе по действительному графику, ч.

Эксплуатационные затраты определяются по формуле:

$$\mathcal{E} = T \cdot \Delta W_m, \text{ руб} \quad (4)$$

где  $T$  – тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч.

В расчетах использован одноставочный тариф (I ценовая категория) по нерегулируемой цене электроэнергии на розничном рынке в размере  $T=4,026$  руб/кВт·ч. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2  
Результаты расчета капитальных и эксплуатационных затрат

Тип трансформатора	Рассчитанные параметры			
	$\Delta P_m$ , кВт	$\Delta W_m$ , кВт·ч	$\mathcal{E}$ , руб.	$K$ , руб.
TM-1600	12,23	79956	321902	-
TM-2500	18,85	123103	495612	-
TMГ-1600	10,31	67344	271128	958 000
TMГ-2500	17,51	114304	460188	1 464 000
TMГА-1600	8,79	57312	230739	1 245 400
TMГА-2500	10,54	68735	276728	1 903 200
TCЗГЛ-1600	9,56	62544	251801	1 373 500
TCЗГЛ-2500	14,44	94512	380504	1 799 900

Срок окупаемости определяем по формуле:

$$T_{ok} = \frac{K}{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}, \text{ лет} \quad (5)$$

где  $K$  – капитальные затраты, руб.;  $\mathcal{E}_1$  – капитальные затраты при использовании трансформатора марки TM, руб.;  $\mathcal{E}_2$  – капитальные затраты при использовании альтернативной марки трансформатора, руб.

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная  
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»  
20-22 октября 2022 года**

---

221-5

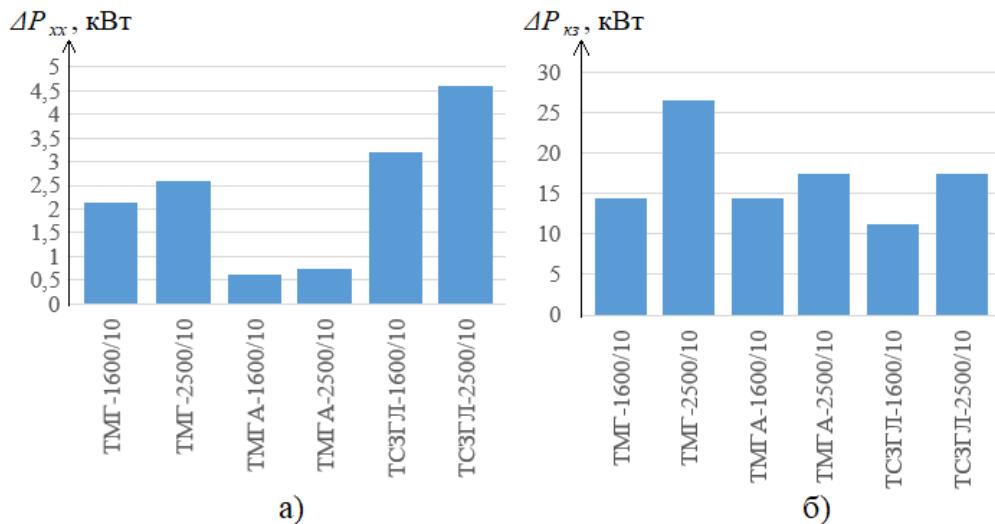


Рис. 1. Сравнение потерь холостого хода (а) и короткого замыкания (б) для выбранных типов трансформаторов

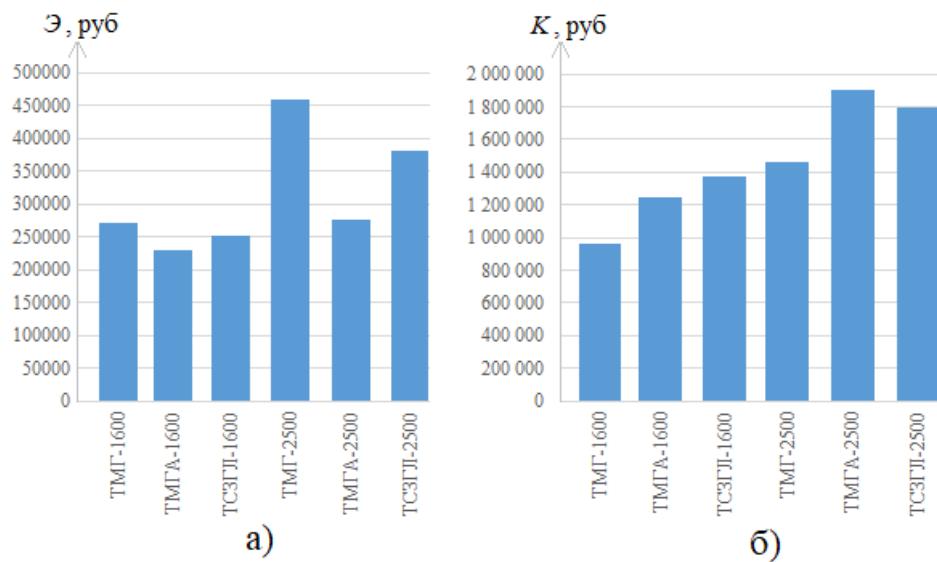


Рис. 2. Сравнение эксплуатационных (а) и капитальных (б) затрат для выбранных типов трансформаторов

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная  
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»  
20-22 октября 2022 года**

---

---

221-6

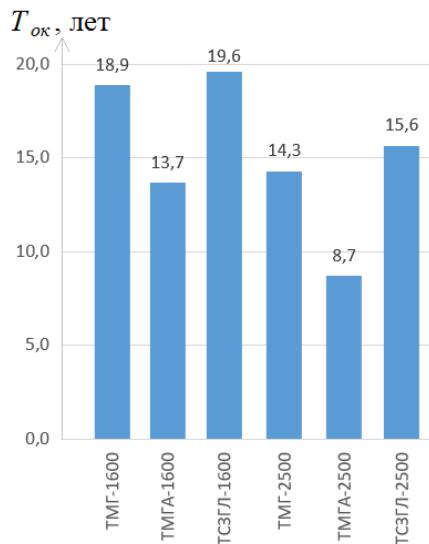


Рис. 3. Сравнение сроков окупаемости для выбранных типов трансформаторов

**Вывод:** Для замены выработавшего свой ресурс трансформатора марки ТМ мощностью 1600 и 2500 КВА были рассмотрены три альтернативных варианта. На основе проведенных расчетов было выявлено, что трансформаторы марки ТМГА имеют меньшие эксплуатационные затраты. Ввиду меньших сроков окупаемости применение данного варианта является наиболее экономически целесообразным.

Список литературы:

1. Силовые трансформаторы. Справочная книга/Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат 2004. – 616 с.
2. Электрические машины: Трансформаторы: Учебное пособие для электротехнических специальностей вузов/Б.Н. Сергеенков, В.М. Киселёв, Н.А. Акимова; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. Шк., 1989. – 352 с.: ил.
3. Системный оператор единой энергетической системы [Электронный ресурс]; официальный сайт, 2022. – режим доступа: <https://www.sous.ru/functioning/ees/ups2022/>
4. Чичинский М.Н. Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния // «Энергетик». - №11. – 2000.

Информация об авторах:

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная  
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»  
20-22 октября 2022 года**

---

---

221-7

Паюсов Арсений Николаевич, студент гр. ЭПм-211, КузГТУ, 650000,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, д.28, [арсеній.пайусов.кузгту@гміл.ком](mailto:arsenij.payusov.kuzgtu@gmail.com)

Долгопол Татьяна Леонидовна, доцент, КузГТУ, 650000, г. Кемерово,  
ул. Весенняя, д.28, [tdolgopol@yandex.ru](mailto:tdolgopol@yandex.ru)