



**СТРУКТУРА ПАРКА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВЫСШИМ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-10 КВ НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ФИЛИАЛА ПАО «РОССЕТИ ЦЕНТР»-«ОРЕЛЭНЕРГО», ОБСЛУЖИВАЮЩЕЙ СЕЛЬСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ**

Лансберг А.А.<sup>1,3</sup>, Виноградов А.В.<sup>2,3</sup>, Виноградова А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», г. Орел, Россия

<sup>2</sup>ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, г. Орел, Россия

*schkolamolen@gmail.com*

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Оценка парка силовых трансформаторов 6-10/0,23-0,4 кВ на примере филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго». МЕТОДЫ. В работе был произведен анализ парка силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» в части их количества, схем и групп соединения обмоток, номинальной мощности, сроков нахождения в эксплуатации, а также классов энергоэффективности с учетом действующих стандартов организации ПАО «Россети». РЕЗУЛЬТАТЫ. По результатам исследования было выявлено, что среди парка трансформаторов филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», численность которого составляет 6026 единиц, 4528 (73% от общего количества) трансформаторов имеют схему и группу соединения обмоток  $Y/Y_0$ . Самыми многочисленными являются трансформаторы с номинальными мощностями 63 кВА, 100 кВА, 160 кВА, 250 кВА (соответственно 853, 1454, 1252, 802 единиц оборудования). Также выявлено, что только 268 трансформаторов из 6206, т.е. 4,3% от общего количества, соответствуют стандарту ПАО «Россети» в части современных требований к уровню класса энергоэффективности. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложен вариант стратегии замены силовых трансформаторов в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», в рамках которого осуществляется замена трансформаторов с заданной конструкцией, схемой и группой соединения обмоток, номинальными мощностями и классами энергоэффективности. Реализация предложенного в работе варианта стратегии позволит добиться снижения суммарных потерь электроэнергии на 2,3%, а также повысить долю энергоэффективных трансформаторов в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» с 4,3% до 20,4%.

**Ключевые слова:** силовые трансформаторы; энергосбережение; повышение энергоэффективности; потери.

**Для цитирования:** 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»-«Орелэнерго», обслуживающей сельские электрические сети // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 5. С. 34-45. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-34-45.

**THE STRUCTURE OF THE PARK OF POWER TRANSFORMERS WITH A HIGHER VOLTAGE OF 6-10 KV ON THE EXAMPLE OF THE ELECTRIC GRID ORGANIZATION OF THE BRANCH OF PJSC «ROSSETI CENTER»-«ORELENERGO», SERVING RURAL ELECTRIC NETWORKS**

Lansberg A.A.<sup>1,3</sup>, Vinogradov A.V.<sup>2,3</sup>, Vinogradova A.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Filial PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo», Orel, Russia

<sup>2</sup>FGBNU «Federal Scientific Agroengineering Center VIM», Moscow, Russia

<sup>3</sup>FSBEI HE «Orel State Agrarian University», Orel, Russia

*schkolamolen@gmail.com*

**Abstract:** THE PURPOSE. Evaluation of the power transformer fleet 6-10/0,23-0,4 kV on the example of a branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo». METHODS. In the work, based on

*the database of the branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo», an analysis was made of the fleet of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV in terms of their number, circuits and groups of connection of windings, rated power, terms of service, as well as energy efficiency classes, taking into account the current standards of the technical organization of PJSC «Rosseti». RESULTS. According to the results of the study, it was revealed that among the transformer fleet of the branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo», the number of which is 6026 units, 4528 (73% of the total number) transformers have a circuit and a group of winding connections Y/Y0. The most numerous are transformers with rated capacities of 63 kVA, 100 kVA, 160 kVA, 250 kVA (respectively 853, 1454, 1252, 802 pieces of equipment). It was also revealed that only 268 transformers out of 6206, i.e. 4.3% of the total amount comply with the standard of PJSC «Rosseti» in terms of modern requirements for the level of energy efficiency class. CONCLUSION. A variant of the strategy for replacing power transformers in the branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo» is proposed, within the framework of which transformers with a given design, circuit and winding connection group, rated capacities and energy efficiency classes are replaced. The implementation of the strategy proposed in the work will make it possible to reduce total electricity losses by 2.3%, as well as increase the share of energy-efficient transformers from 4.3% to 20.4% in the branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo».*

**Keywords:** power transformers; energy saving; energy efficiency improvement; losses.

**For citation:** Lansberg AA, Vinogradov AV, Vinogradova AV. The structure of the park of power transformers with a higher voltage of 6-10 Kv on the example of the electric grid organization of the branch of pjsc «Rosseti center»-«Orelenergo», serving rural electric networks. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(5):34-45. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-34-45.

### **Введение**

Силовые трансформаторы 6-10/0,23-0,4 кВ – это один из наиболее массовых элементов систем электроснабжения сельских потребителей. Анализ парка трансформаторов электросетевых организаций позволяет делать выводы об энергоэффективности и надёжности электрических сетей данных организаций. Так, согласно [1] потери в трансформаторах 6-10 кВ на примере филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» составляют порядка 12,3% от всех технологических потерь электроэнергии по филиалу. Доля отказов оборудования трансформаторных подстанций 6-10/0,4 кВ по отношению ко всем видам отказов в электрических сетях этого класса напряжения составляет порядка 8-9%, при этом доля отказов силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ составляет порядка 3-4% [2]. Значения, как потерь электроэнергии, так и количества отказов оборудования зависят от применяемых его типов и марок. Замена устаревшего оборудования позволяет также значительно снизить потери электроэнергии, и повысить надёжность электроснабжения потребителей.

Усилия учёных и фирм – производителей трансформаторов направлены на совершенствование их конструкции, как в части повышения надёжности, так и повышения их энергоэффективности. В частности, одним из эффективных мероприятий по снижению потерь в магнитопроводах трансформаторов является применение аморфных сплавов вместо традиционных электротехнических [3], что позволяет снизить технические потери в трансформаторах в несколько раз. К настоящему времени передовыми странами по производству таких трансформаторов являются Китай, США, Индия, Япония, Южная Корея. Трансформаторы из аморфных сплавов имеют потери ХХ и КЗ в 2 раза меньшие, чем изготавливаемые из электротехнической стали. В РФ также были предприняты попытки изготовления подобных трансформаторов заводами: ООО «Тольятинский трансформатор», ЗАО «Трансфомер», ОАО «Электрозавод», ЗАО «Группа СВЭЛ», ЗАО ГК «Электроцит – ТМ Самара», однако их повсеместное промышленное внедрение стало затруднительным в связи с тем, что стоимость одной единицы оборудования была примерно в 3 раза выше трансформатора из электротехнической стали, что связано с отсутствием в стране крупномасштабного производства аморфных сталей.

На потери электроэнергии в силовых трансформаторах, на показатели их надёжности оказывает влияние и срок нахождения в эксплуатации. Исследования влияния срока нахождения в эксплуатации на надёжность приведены в работах [4-5], где представлен анализ частоты отказов трансформаторов, выполнена оценка качества масла трансформаторов, длительно находящихся в эксплуатации.

Трансформаторы, длительно находящиеся в эксплуатации, характеризуются также повышенными потерями электроэнергии в них, что обусловлено увеличением потерь холостого хода, поэтому часто варианту последующей эксплуатации трансформатора с периодическими ремонтами целесообразно предпочесть установку нового силового трансформатора [6].

Следует отметить, что для минимизации числа отказов трансформаторов также необходимо совершенствовать и мероприятия по их техническому обслуживанию и ремонту, увеличивать количество диагностических мероприятий по контролю состояния электрооборудования [7], использовать методы раннего обнаружения дефектов, методы оценки истории эксплуатационных воздействий [8].

В реальности выбор мероприятий по повышению надёжности силовых трансформаторов и снижению потерь электроэнергии в них на уровне сетевых организаций сводится, как правило, к выполнению своевременного технического обслуживания трансформаторов, их диагностике и замене на трансформаторы, имеющие лучшие характеристики по сравнению с используемыми ранее. При ведении этой работы по определённому плану необходимо, в первую очередь, владеть информацией о текущем состоянии парка трансформаторов, то есть о количестве эксплуатируемых трансформаторов, их параметрах, сроках нахождения в эксплуатации. Не исключением является и филиал ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», в котором также имеется значительное количество эксплуатируемых силовых трансформаторов 6-10 кВ. Анализ парка трансформаторов позволяет эффективно планировать стратегии замены трансформаторов для минимизации потерь электроэнергии в них, снижения их отказов, а также снижения затрат, связанных с их обслуживанием и ремонтом.

Целью работы является оценка парка трансформаторов 6-10/0,23-0,4 кВ, на примере филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго».

#### **Материалы и методы**

Для проведения исследования были использованы данные о технических характеристиках, сроках нахождения в эксплуатации и других показателях силовых трансформаторов классов напряжения 6-10/0,23-0,4 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» по состоянию на сентябрь 2021 года. На момент проведения исследования было зарегистрировано 6206 единиц силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ. Анализировались типы и марки применяемых трансформаторов, их технические характеристики.

Классификация трансформаторов по схемам и группам соединения обмоток осуществлялась в соответствии с указанными в «ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия» допустимыми для двухобмоточных трансформаторов класса напряжения 6-10 кВ схемами и группами соединения обмоток. Для классификации трансформаторов по номинальной мощности был использован ряд значений, представленных в «ГОСТ 9680-77. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более. Ряд номинальных мощностей», ГОСТ 9680-61 «Трансформаторы (и автотрансформаторы) силовые мощностью от 10 кВА и выше. Ряды номинальных мощностей».

Для снижения потерь электроэнергии в электрических сетях организацией ПАО «Россети» реализуется политика по установке энергоэффективных трансформаторов, потери холостого хода и короткого замыкания в которых не превышают заданных значений. В связи с этим необходимо оценить энергоэффективность трансформаторов 6-10 кВ, эксплуатируемых в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго». Заданные значения параметров потерь холостого хода и короткого замыкания представлены в стандарте «СТО 34.01-3.2-011-2017. Стандарт организации ПАО «Россети». Трансформаторы силовые распределительные 6-10 кВ мощностью 63-2500 кВА. Требования к уровню потерь холостого хода и короткого замыкания. Дата введения: 12.04.2017».

#### **Результаты**

При анализе парка трансформаторов «Орелэнерго» по срокам нахождения в эксплуатации все трансформаторы были разбиты на три группы: до 25 лет; 25-50 лет; более 50 лет. Результаты анализа сроков нахождения в эксплуатации силовых трансформаторов представлены на рисунке 1.

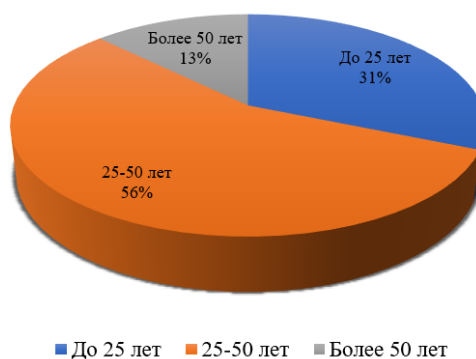


Рис. 1. Анализ парка трансформаторов 6-10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» по срокам нахождения в эксплуатации.

Fig. 1. Analysis of the 6-10 kV transformer fleet of the branch of PJSC Rosseti Center-Orelenrgo by the terms of being in operation.

В ходе анализа было выявлено: среди 6206 единиц оборудования срок нахождения в эксплуатации до 25 лет имеют 1942 трансформатора, что составляет 31% от общего количества; от 25 до 50 лет – 3479 единиц оборудования или 56%; более 50 лет находятся в эксплуатации 785 трансформаторов, т.е. оставшиеся 13% от общего количества. Таким образом, 69% трансформаторов находятся в эксплуатации более 25-ти лет, что говорит о необходимости ускоренной работы по обновлению трансформаторного парка, поскольку, как уже отмечалось, длительно эксплуатирующиеся трансформаторы имеют повышенные потери и более высокую частоту отказов.

В 2021 году в эксплуатацию было введено 30 новых трансформаторов типа ТМГ, а самый длительно эксплуатирующийся трансформатор (71 год) единичной мощностью 400 кВА, введенный в эксплуатацию в 1950-м году, установлен на комплектной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ с диспетчерским наименованием КТП 10/0,4 кВ «Серебряная нить», осуществляющей питание швейной фабрики в Северном районе города Орла.

Среди всего парка трансформаторов лишь 180 единиц имеют напряжение высокой стороны 6 кВ, остальные 6026 – 10 кВ. При этом на низшее напряжение 0,23 кВ выполнены 255 трансформаторов, а на 0,4 кВ – 5951. Всего в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» имеется 8 трансформаторов с высшим напряжением 6 кВ, выполненных на вторичное напряжение 0,23 кВ и установленных на производственных предприятиях, распределительных пунктах 6 кВ.

Схема и группа соединения трансформаторов влияет на эффективность защиты их от коротких замыканий на стороне 0,4 кВ предохранителями 10 кВ, значения токов короткого замыкания в сети 0,4 кВ и на другие параметры [9]. Распределение трансформаторов по схемам и группам соединения обмоток представлено на рисунке 2.

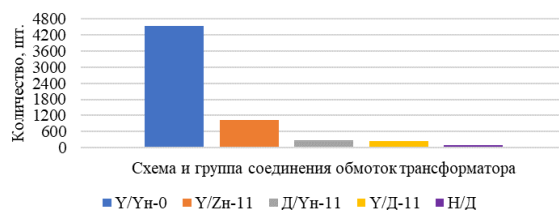


Рис. 2. Количественный анализ парка силовых трансформаторов класса напряжения 6-10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» по схемам и группам соединения обмоток.

Fig. 2. Quantitative analysis of the fleet of power transformers of voltage class 6-10 kV of the branch of PJSC Rosseti Center-Orelenrgo by schemes and groups of connection of windings.

Больше всего (4528 единицы, т.е. 73%) трансформаторов имеют схему соединения обмоток звезда-звезда с нулевым проводом и нулевой группой соединения обмоток. Трансформаторы со схемой соединения звезда – зигзаг с нулевым проводом и 11-й группой составляют 17% (1024 единицы). Схемы соединения треугольник – звезда с нулевым проводом и звезда – треугольник с 11 группой соединения обмоток используются, соответственно, в 290-а и 251-м трансформаторах, составляющих 5% и 4% от общего количества. При этом среди имеющихся трансформаторов имеется 112 единиц, у которых схема и группа соединения не указана (Н/Д), преимущественно это старые длительно

находящиеся в эксплуатации трансформаторы зарубежного производства и трансформаторы с алюминиевыми обмотками типов ТСМА и ТМА.

Важным параметром парка трансформаторов является распределение их по номинальной мощности, представленное на рисунке 3. Среди всех имеющихся трансформаторов класса напряжения 6-10 кВ имеется по одному трансформатору с номинальными мощностями 32 кВА, 1250 кВА и 2500 кВА. Номинальную мощность 200 кВА имеют 2 трансформатора, 320 кВА – 5 единиц, 560 кВА – 6 единиц. Наибольшее количество трансформаторов характеризуются номинальными мощностями 100 кВА, 160 кВА, 63 кВА, 250 кВА, соответственно, это 1454, 1252, 853 и 802 единицы. Среди парка трансформаторов есть те, мощность которых не входит в «ГОСТ 9680-77. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более. Ряд номинальных мощностей». Это значения 20 кВА, 30 кВА, 32 кВА, 50 кВА, 60 кВА, 180 кВА, 200 кВА, 315 кВА, 560 кВА, 1250 кВА. Их общее количество 747 единиц, что составляет 12% от общего парка силовых трансформаторов 6-10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго». Суммарная мощность силовых трансформаторов 6-10 кВ составляет 953,166 МВА. Среднеарифметическое значение мощности одного трансформатора составляет 153,6 кВА.

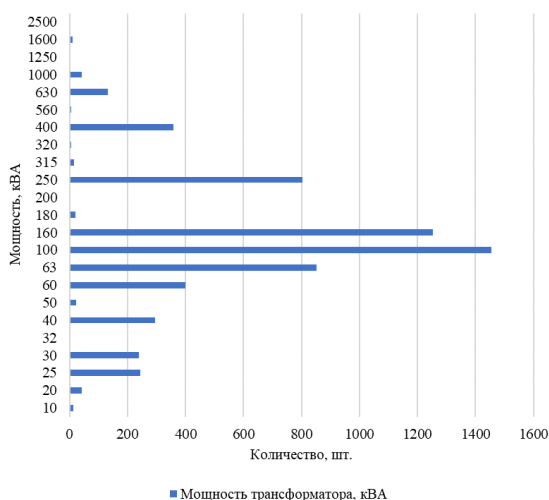


Рис. 3. Анализ парка трансформаторов филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» по номинальной мощности

Fig. 3. Analysis of the transformer fleet of the branch of PJSC Rosseti Center-Orelenergo by nominal capacity

Потери холостого хода в трансформаторе являются постоянными и не зависят от его загрузки. Суммарные потери холостого хода, определенные по паспортным данным всех трансформаторов 6-10 кВ Орёлэнерго, составляют 4720 кВт, что приводит к потерям электроэнергии в размере порядка 41345 МВт·ч/год. Снизить это значение возможно заменой трансформаторов на более энергоэффективные. Текущее распределение парка силовых трансформаторов по классам энергоэффективности представлено на рисунке 4.

Среди всех находящихся в эксплуатации трансформаторов класса напряжения 6-10 кВ лишь 268 соответствуют современным требованиям по энергосбережению, что составляет 4% от общего количества, остальные 5938 трансформаторов имеют класс энергоэффективности ниже Х2К2. К классу Х2К2 относятся 238 единиц трансформаторов, к классу Х1К1 – 3755 единиц. Из всего парка 1423 трансформатора имеют потери холостого хода и короткого замыкания большие, чем значения классов Х1 и К1, поэтому не имеют класса энергоэффективности.

В настоящее время, согласно технической политике ПАО «Россети», требуется устанавливать трансформаторы класса энергоэффективности не ниже Х2К2. За рубежом эти требования ещё жёстче. Так, в 2007 году принят стандарт «NF EN 50464-1-2007. Three-phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2 500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV - Part 1: general requirements. BSI, 2007», который для каждого значения единичной номинальной мощности трансформатора устанавливает пять уровней потерь холостого хода (ХХ), обозначаемых А0, В0, С0, D0 и Е0, а также четыре уровня потерь короткого замыкания (КЗ), обозначаемых Ак, Вк, Ск, Dк. Согласно Постановлению «COMMISSION REGULATION (EU) No 548/2014 of 21 May 2014 on implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to small, medium and large power transformers» с 01.07.2015 года был введен запрет на ввод в эксплуатацию распределительных силовых трансформаторов единичной мощностью до 1000 кВА с

потерями больше уровня  $A_0C_k$  и мощностью свыше 1000 кВА с потерями выше  $A_0B_k$ , а с 01.07.2021 года – уровня  $A_0^{-10\%}A_k$ , то есть потери XX на 10% меньше, чем для уровня  $A_0$  по стандарту EN 50464-1.

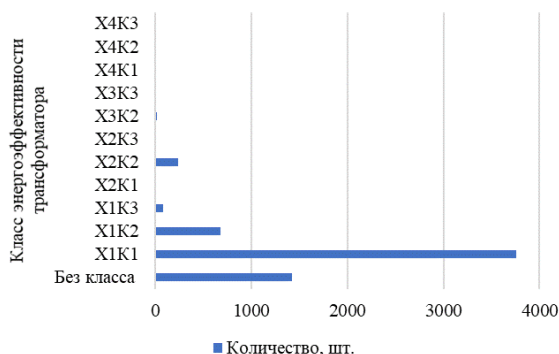


Рис. 4. Анализ парка трансформаторов филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» по классам энергоэффективности

Fig. 4. Analysis of the transformer fleet of the branch of PJSC Rosseti Center-Oreleno by energy efficiency classes

В начале 2017 года в действие был введен международный стандарт «IEC/TS 60076-20 (2017). Power transformers - Part 20: Energy efficiency», который устанавливает требования в части потерь XX и КЗ. Стандарт повторяет требования Постановления Совета Европы №548/2014.

При внедрении энергоэффективных трансформаторов можно добиться значительного сокращения потерь холостого хода и короткого замыкания. На рисунке 5 показано сравнение потерь холостого хода силовых трансформаторов, изготавливаемых в соответствии с классом энергоэффективности X2 СТО 34.01-3.2-011-2017, ГОСТ 27360-87, классом энергоэффективности  $B_0$  EN 50464-1 и китайских трансформаторов производства DESUN group.

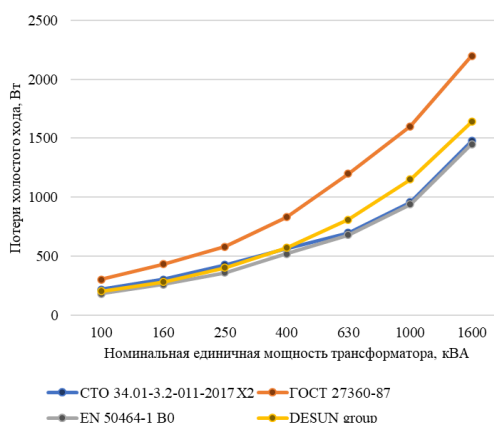


Рис. 5. Сравнение потерь холостого хода силовых трансформаторов, изготавливаемых в соответствии с классом энергоэффективности X2 СТО 34.01-3.2-011-2017, ГОСТ 27360-87, классом энергоэффективности  $B_0$  EN 50464-1 и китайских трансформаторов производства DESUN group.

Fig. 5. Comparison of no-load losses of power transformers manufactured in accordance with the energy efficiency class X2 SRT 34.01-3.2-011-2017, GOST 27360-87, energy efficiency class  $B_0$  EN 50464-1 and Chinese transformers manufactured by DESUN group.

В настоящее время происходит постепенное обновление парка трансформаторов по всем организациям ПАО «Россети». Согласно данным дирекции энергосбережения филиала ПАО «Россети Центр и Приволжье» с 2018 года наибольшее количество энергосберегающих трансформаторов было установлено в филиале «Орелэнерго» (166 единиц). Сведения, об установленных в филиалах ПАО «Россети Центр и Приволжье» энергосберегающих трансформаторах представлены в таблице 1.



Таблица 1

Количество трансформаторов, установленных в филиалах ПАО «Россети Центр и Приволжье» с 2018 года с указанием доли трансформаторов с классом энергоэффективности X2K2 и выше

Наименование филиала	Всего трансформаторов 10(6)/0,4	В т.ч. установленных с 2018 года (Распространяются требования СТО)	X2K2 и выше	
	шт.	шт.	шт.	%
<b>ВСЕГО:</b>	<b>186 799</b>	<b>11 504</b>	<b>2 058</b>	<b>18%</b>
Белгородэнерго	17 525	718	360	50%
Брянскэнерго	6 674	252	100	40%
Воронежэнерго	12 503	747	289	39%
Костромаэнерго	6 871	235	47	20%
Курскэнерго	9 236	350	105	30%
Липецкэнерго	10 023	335	66	20%
Орёлэнерго	6 206	294	166	56%
Смоленскэнерго	10 666	549	157	29%
Тамбовэнерго	6 647	249	87	35%
Тверьэнерго	12 426	441	156	35%
Ярэнерго	10 368	562	138	25%
Владимирэнерго	5 477	676	12	2%
Ивэнерго	3 772	357	22	6%
Калугаэнерго	9 465	1 173	73	6%
Кировэнерго	9 443	489	55	11%
Мариэнерго	3 141	28	12	43%
Нижегородэнерго	18 288	1 143	87	8%
Рязаньэнерго	7 007	309	7	2%
Тулаэнерго	9 083	778	47	6%
Удмуртэнерго	11 978	1 819	72	4%

Все трансформаторы 6-10 кВ филиала Орелэнерго имеют естественную циркуляцию воздуха и масла. Среди 6206 трансформаторов 5156 – типа ТМ. Простое герметичное исполнение ТМГ имеют 577 единиц. При этом трансформаторов серии ТМГ11 – 162, ТМГ12 – 10, ТМГ21 – 2, ТМГ33 -16. На балансе электросетевой организации имеются также 35 энергосберегающих трансформаторов серии ТМГэ, а также более 113 трансформаторов усовершенствованной серии ТМГэ2. Также имеются 7 трансформаторов типа ТМА с алюминиевыми обмотками, 2 трансформатора типа ТМВМ с естественной циркуляцией масла и принудительной циркуляцией воды, предназначенных для металлургического производства, 8 герметичных трансформаторов с алюминиевыми обмотками типа ТМГА, 1 герметичный трансформатор с устройством крепления на столбе типа ТМГС, 6 герметичных ТМГФ и 2 обычных ТМФ трансформаторов с расположением вводов и основных элементов для КТП, а также 14 трансформаторов с защитой при помощи азотной подушки типа ТМЗ и 69 трансформатором ТСМА с магнитопроводом из холоднокатаной стали и алюминиевыми обмотками.

Среди всех вышеперечисленных моделей наиболее эффективными являются силовые трансформаторы герметичного исполнения типа (ТМГ) в связи с тем, что они не требуют обслуживания на протяжении всего срока службы, не нуждаются в лабораторных исследованиях трансформаторного масла, взятии проб масла на анализ, регенерации масла и ревизий при эксплуатации. Трансформаторы типа ТМГ значительно более компактные и легкие по сравнению с другими вариантами конструктивных исполнений трансформаторов и их технические характеристики совершенствуются при выпуске новых серий. Так, в трансформаторах ТМГ серии 12 при среднесуточном коэффициенте загрузки 0,7 для трансформаторов единичной номинальной мощностью 400 кВА, 630 кВА, 1000 кВА, удавалось добиться годовой экономии потерь электроэнергии в размере 7,5 тыс. кВт/час, 5,8 тыс. кВт/час, 5,2 тыс. кВт/час соответственно [10]. При этом энергоэффективность данных

трансформаторов ниже требуемых в настоящее время значений согласно «СТО 34.01-3.2-011-2017. Стандарт организации ПАО «Россети». Трансформаторы силовые распределительные 6-10 кВ мощностью 63-2500 кВА. Требования к уровню потерь холостого хода и короткого замыкания».

Помимо отечественных трансформаторов в трансформаторном парке Орёлэнерго имеются также и иностранные модели трансформаторов 6-10 кВ. Так, имеются 2 экземпляра трансформаторов типов *FTDO* с единичными мощностями 1250 и 50 кВА с высшим напряжением 6 кВ. В настоящее время трансформаторы таких типов не производятся. Также среди иностранных трансформаторов имеются 15 штук типа *TTU-AL*, произведенных в Румынии в 1974-1988 годах [11]. Среди парка имеющихся трансформаторов есть также 2 трансформатора типа *ТОН*, 3 трансформатора типа *TON* и 1 трансформатор типа *ТО-314*, произведенные в Братиславе в Чехословакии в 1980-1987 годах [12], 4 трансформатора типа *NT*, произведенных в Югославии в 1970-1979 годах и 1 трансформатор типа *ТОЕ*, произведенный в Швеции. Также имеются 5 китайских трансформаторов, один из которых типа *3Tm100-12* был произведен в прошлом веке в 1969 году, и 4 новых трансформатора, произведенные в 2010 году гонконгской компанией *DESUN group* для установки на подстанции «Западная» 110/10/6 кВ: 2 трансформатора типа *S11-M* единичной мощностью 250 кВА и 2 трансформатора типа *SJD-M* единичной мощностью 630 кВА [13].

#### **Обсуждение**

Исходя из результатов исследований было выявлено, что наибольшее количество находящихся в эксплуатации силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ имеют номинальные мощности 63 кВА, 100 кВА, 160 кВА и 250 кВА. По данным управления инвестиций филиала имеется возможность, с учетом объемов финансирования, производить ежегодно замену порядка ста наиболее длительно находящихся в эксплуатации неэнергоэффективных трансформаторов на современные энергоэффективные трансформаторы классов *X2K2* и выше. Предлагается вариант стратегии замены, согласно которому замена осуществляется на трансформаторы:

- ТМГ-33-63/10/0,4 кВ *X2K2 Y/Zn*;
- ТМГ-33-100/10/0,4 кВ *X2K2 Y/Zn*;
- ТМГ-33-160/10/0,4 кВ *X2K2 Y/Zn*;
- ТМГ-33-250/10/0,4 кВ *X2K2 Y/Zn*.

Предположим, что закупки среди вышеперечисленных трансформаторов будут производиться равномерно, то есть будет закупаться по 25 трансформаторов каждого типа в год, в результате чего, за 10 лет (к 2031 году) в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» будет эксплуатироваться по 250 энергоэффективных трансформаторов каждого типа. Таким образом, на рисунке 6 представлена общая структура парка силовых трансформаторов с учетом повышения доли в нем энергоэффективного оборудования. При введении в эксплуатацию 1000 энергоэффективных силовых трансформаторов с номинальной мощностью 63 кВА, 100 кВА, 160 кВА, 250 кВА удастся увеличить долю энергоэффективных трансформаторов с 4,3% до 20,4%, то есть с 268 до 1268 единиц. При этом для трансформаторов мощностью 63 кВА повышение доли энергоэффективного оборудования составит 262%, т.е. с 155 единиц количество увеличится до 405 единиц, для 100 кВА – 610%, с 49 единиц до 299, для 160 кВА – 758%, т.е. с 38 единиц до 288 единиц, для 250 кВА – 1290%, т.е. с 21 единицы до 271 единицы.

Реализацию данных мероприятий по техпереворужению позволит только для данной тысячи единиц оборудования снизить суммарные потери холостого хода с 387,5 кВт до 279,25 кВт, то есть на 108,25 кВт; потери электроэнергии удастся снизить с 3394,5 МВт·ч/год до 2446,23 МВт·ч/год, то есть на 948,27 МВт·ч/год. В целом для парка силовых трансформаторов филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» удастся добиться снижения суммарных потерь мощности холостого хода с 4720 кВт до 4612 кВт и потерь электроэнергии с 41345 МВт·ч/год до 40397 МВт·ч/год (на 2,3%). Результаты замены силовых трансформаторов в соответствии с предложенной стратегией представлены на рисунке 6.



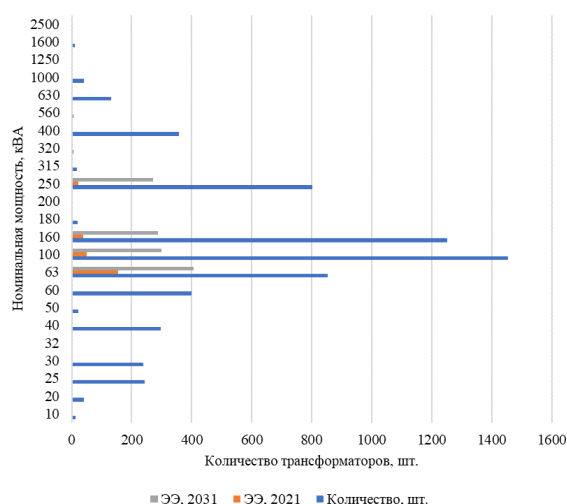


Рис. 6. Количество силовых трансформаторов в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» и доля энергоэффективного оборудования с учетом планируемой политики техперевооружения.

Fig. 6. The number of power transformers in the branch of PJSC Rosseti Center-Orelenenergo and the share of energy-efficient equipment, taking into account the planned policy of technical re-equipment.

Эффект от реализации предложенных мероприятий по обновлению парка силовых трансформаторов филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» заключается в экономии на потерях электроэнергии. Экономический эффект от замены трансформаторов ежегодно будет увеличиваться за счет снижения потерь холостого хода. Так, при замене 100 трансформаторов с номинальными мощностями 63, 100, 160, 250 кВА согласно предложенной стратегии, возможно добиться снижения мощности потерь холостого хода на 10,825 кВт и, соответственно, потерь электроэнергии на 94827 кВт·ч/год. При стоимости тарифа на услугу по передаче электроэнергии, равной 2,54 руб/кВт·ч, экономия составит 240,86 тыс. руб/год. Ежегодно экономия будет увеличиваться на такую же сумму и на десятый год будет составлять примерно 2,41 млн. руб/год. Суммарный эффект за 10-летний срок реализации стратегии составит 13,2 млн. рублей.

На рисунке 7 представлена динамика изменения годового экономического эффекта за счет реализации предложенной стратегии техперевооружения.

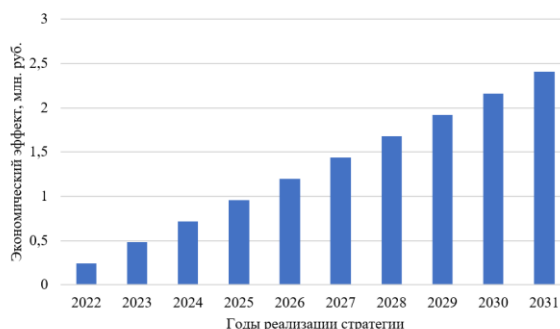


Рис. 7. Экономический эффект от реализации предложенной стратегии по замене силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» на энергоэффективные

Fig. 7. The economic effect of the implementation of the proposed strategy to replace power transformers with a higher voltage of 6-10 kV of the branch of PJSC Rosseti Center-Orelenenergo with energy-efficient

### Заклучение

1. В ходе анализа парка силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» выявлено, что парк состоит из 6206 силовых трансформаторов, в том числе 4528 единицы, (73%) имеют схему соединения обмоток звезда-звезда с нулевым проводом и нулевой группой соединения обмоток. Наибольшее количество трансформаторов имеют номинальные мощности 100 кВА (1454 шт), 160 кВА (1252 шт), 63 кВА (853 шт), 250 кВА (802 шт). Среди всех находящихся в эксплуатации

трансформаторов класса напряжения 6-10 кВ лишь 268 соответствуют современным требованиям по энергосбережению класса энергоэффективности Х2К2, что составляет 4% от общего количества. Было выявлено, что среди парка трансформаторов 5156 имеют конструктивное исполнение ТМ. На основе паспортных данных были определены суммарные потери мощности холостого хода, составляющие 4720 кВт, которые обуславливают ежегодные потери электроэнергии холостого хода 41345 МВт·ч.

2. На основе анализа литературы было выявлено, что в настоящее время наиболее эффективным конструктивным исполнением силовых трансформатора является герметичное исполнение – ТМГ-33, а схема и группа соединения обмоток звезда-зигзаг с нулевым проводом и 11 группой соединения позволяет наиболее эффективно обеспечить защиты силового трансформатора со стороны высокого напряжения предохранителями и обеспечить повышение качества электроэнергии в сетях низкого напряжения 0,4 кВ, имеющих однофазных потребителей.

3. Предложен вариант стратегии замены силовых трансформаторов в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», предполагающий за 10-летний период установку 1000 трансформаторов с номинальными мощностями 63, 100, 160 и 250 кВА исполнения ТМГ-33, со схемой и группой соединения обмоток Y/Zn-11. В ходе реализации данной стратегии удастся добиться снижения суммарных потерь электроэнергии на 2,3%. Ежегодно рост снижения мощности потерь холостого хода составит 10,825 кВт и, соответственно, потерь электроэнергии 94827 кВт·ч/год. При стоимости тарифа на услугу по передаче электроэнергии, равной 2,54 руб/кВт·ч, ежегодный рост экономии составит 240,86 тыс. руб/год. Суммарный эффект за 10-летний срок реализации стратегии составит 13,2 млн. рублей.

4. Выполненный анализ трансформаторного парка в перспективе позволяет, после проведения дополнительных исследований, также предложить другие стратегии его обновления и провести обоснование наиболее рациональных из них, определять повреждаемость конкретных типов трансформаторов, оценивать другие параметры, характеризующие эксплуатационные и статистические характеристики трансформаторного парка.

#### Литература

1. Виноградов А.В., Бородин М.В., Волченков Ю.А., Пешехонова Ж.В. Совершенствование деятельности по энергосбережению и по осуществлению технологических присоединений филиала ОАО «МРСК Центра»-«Орёлэнерго». Монография. ...Орел: Изд-во ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2015. 196 с.
2. Васильев А.Н., Виноградов А.В., Виноградова А.В., Большев В.Е., Скитёва И.Д. Анализ количества и причин отключений в электрических сетях 0,38...10 кВ // Инновации в сельском хозяйстве. №4(29). 2018. с. 8-18.
3. Хавроничев С.В., Сошинов А.Г., Галушак В.С., Копейкина Т.В. Современные тенденции применения аморфных сплавов в магнитопроводах силовых трансформаторов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. №12(4). С. 607-610.
4. Vezir Rexhepi. An Analysis of Power Transformer Outages and Reliability Monitoring. Energy Procedia. V. 141. December 2017. Pp. 418-422. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.053>.
5. El-Harbawi, M., Al-Mubaddel, F. Risk of Fire and Explosion in Electrical Substations Due to the Formation of Flammable Mixtures. Sci Rep 10, 6295 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63354-4>.
6. Балабин А.А. О целесообразности проведения капитального ремонта силовых трансформаторов с разборкой магнитопровода // В сборнике: Энерго- и ресурсосбережение XXI век. Сборник материалов 9-ой международной научно-практической интернет-конференции. 2011. С. 104-107.
7. Хисматуллин А.С., Вахитов А.Х., Феоктистов А.А. Мониторинг и ремонт промышленных силовых трансформаторов по техническому состоянию // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 4(2). С. 271-274.
8. Левин В.М., Керимкулов Н.Н. Экспресс-оценка состояния силовых трансформаторов для обеспечения эксплуатационной надежности // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4(32). С. 101-109.
9. Алевтина Федоровская, Владимир Фишман. Силовые трансформаторы 6(10)/0,4 кВ. Особенности применения различных схем соединения обмоток. Новости ЭлектроТехники. №1 (127). 2021. Информационно-справочное издание. Доступно по:

<http://news.elteh.ru/arh/2009/60/07.php> Дата обращения 24.10.2021.

10. Электрощит Самара. Трансформаторы. Силовые с масляной и сухой изоляцией. Доступно по: <https://www.electroshield.ru/upload/iblock/683/Transformatory-silovye-dlya-sayta.pdf>. Ссылка активна на 24 октября 2021.

11. Проектант. Трансформатор TTU-AL-100/10. Доступно по: <https://www.proektant.org/index.php?topic=16989.0>. Ссылка активна на 27 сентября 2021.

12. Трансформатор BEZ bratislava TON. Доступно по: <https://metaprom.ru/board-equipment/sankt-peterburg/id900069-transformator-bez-bratislava-ton-394-22>. Ссылка активна на 27 сентября 2021.

13. S11-M и S11-MR DESUN. Силовые трансформаторы. Доступно по: <https://silovoytransformator.ru/6-10-kv/s11-m-i-s11-mr-desun.html>. Ссылка активна на 18 сентября 2021.

#### Авторы публикации

**Лансберг Александр Александрович** – инженер отдела энергосбережения и повышения энергоэффективности филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго».

**Виноградов Александр Владимирович** – д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией электроснабжения и теплообеспечения ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», профессор кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.

**Виноградова Алина Васильевна** – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ».

#### References

1. Vinogradov AV, Borodin MV, Volchenkov YuA, et al. *Improvement of energy saving activities and implementation of technological connections of the branch of OJSC «IDGC of Centre»-«Orelenargo»*. Monograph. ... Orel: Publishing House of the Oryol State University, 2015. - 196 p.
2. Vasiliev AN, Vinogradov AV, Vinogradova AV, et al. Analysis of the number and causes of outages in electrical networks 0.38...10 kV. *Innovations in agriculture*. 2018;4(29):8-18.
3. Khavronichev SV, Soshinov AG, Galushchak VS, et al. Current trends in the use of amorphous alloys in magnetic circuits of power transformers. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2015;12(4):607-610.
4. Vezir Rexhepi. *An Analysis of Power Transformer Outages and Reliability Monitoring*. Energy Procedia. №141. December 2017;418-422. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.053>.
5. El-Harbawi M, Al-Mubaddel F. *Risk of Fire and Explosion in Electrical Substations Due to the Formation of Flammable Mixtures*. Sci Rep 10. 6295 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63354-4>.
6. Balabin AA. On the feasibility of major repairs of power transformers with disassembly of the magnetic circuit. *In the collection: Energy and resource conservation of the XXI century. Collection of materials of the sixth International Scientific and Practical Internet Conference*. 2011. pp. 104-107.
7. Khismatullin AS, Vakhitov AKh, Feoktistov AA. Monitoring and repair of industrial power transformers according to technical condition. *Modern high-tech technologies*. 2016;4(2):271-274.
8. Levin VM, Kerimkulov NN. Express assessment of the state of power transformers to ensure operational reliability. *The system. Methods. Technologies*. 2016;4(32):101-109.
9. Alevtina Fedorovskaya, Vladimir Fishman. Features of the application of various winding connection schemes. *Electrical Engineering News*. 2021;1(127). Information and reference edition. Available at: <http://news.elteh.ru/arh/2009/60/07.php>. Accessed: 24 October 2021.
10. Electrical panel Samara. Transformers. *Power with oil and dry insulation*. Available at: <https://www.electroshield.ru/upload/iblock/683/Transformatory-silovye-dlya-sayta.pdf>. Accessed: 24 October 2021.
11. *The designer. Transformer TTU-AL-100/10*. Available at: <https://www.proektant.org/index.php?topic=16989.0>. Accessed: 27 September 2021.

12. *Transformer BEZ bratislava TON*. Available at: <https://metaprom.ru/board-equipment/sankt-peterburg/id900069-transformator-bez-bratislava-ton-394-22>. Accessed: 27 September 2021.

13. *S11-M and S11-MR DESUN. Power transformers*. Available at: <https://silovoytransformator.ru/6-10-kv/s11-m-i-s11-mr-desun.html>. Accessed: 18 September 2021.

#### **Authors of the publication**

*Alexander A. Lansberg* – The branch of PJSC Rosseti Center-Orelenergo.

*Alexander V. Vinogradov* – Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

*Alina V. Vinogradova* – Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

*Получено* *07.10.2021г.*

*Отредактировано* *14.10.2021г.*

*Принято* *15.10.2021г.*