

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.314.222.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-31-38



Обзорная статья / Review article

**Повышение эффективности работы силовых трансформаторов
за счет интенсификации их охлаждения во время работы**
М.В. Шамаров¹, В.И. Алёшин¹, И.А. Калмыков¹, А.М. Шамаров²

¹Кубанский государственный технологический университет,
¹350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия,

²Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,
²115054, Москва, Стремянный переулок, 36, Россия

Резюме. Целью исследования является разработка рекомендаций по оптимизации систем охлаждения силовых трансформаторов с целью повышения их эффективности и снижения потерь при трансформации электроэнергии. **Метод.** В ходе исследования проводился термодинамический и сравнительный анализ существующих методов охлаждения электротрансформаторов с целью выявления преимуществ и недостатков систем охлаждения. **Результат.** Представлены различные схемы охлаждения и системы утилизации теплоты трансформации. Обосновано, что существуют низкотемпературные системы, способные существенно повысить технические характеристики трансформатора, не прибегая к столь низким температурам. Учитывая особенность работы фреоновых холодильных машин, когда холодильный агент, например, R134a и смазочное масло взаимно растворяются друг в друге, образуя «двухслойный пирог», и заполняют всю холодильную систему, можно представить трансформатор элементом холодильной машины (испарителем). **Вывод.** Применение инновационных методов охлаждения может значительно повысить эффективность работы электрических трансформаторов при одновременном увеличении их КПД.

Ключевые слова: оптимизация теплообмена, схема отбора тепла, температура, трансформатор, холодильная машина

Для цитирования: М.В. Шамаров, В.И. Алёшин, И.А. Калмыков, А.М. Шамаров. Повышение эффективности работы силовых трансформаторов за счет интенсификации их охлаждения во время работы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):31-38. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-31-38

**Improving the efficiency of power transformers
by intensifying their cooling during operation**

M.V. Shamarov¹, V.I. Aleshin¹, I.A. Kalmykov¹, A.M. Shamarov²

¹Kuban State Technological University,
¹2 Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia,

²G.V. Plekhanov Russian Economic University,
²36 Stremyanny lane, Moscow 115054, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop recommendations for optimizing cooling systems for power transformers in order to increase their efficiency and reduce losses during electric power transformation. **Method.** The study included a thermodynamic and comparative analysis of existing methods of cooling electric transformers in order to identify the advantages and disadvantages of cooling systems. **Result.** Various cooling schemes and transformation heat recovery systems are presented. It is substantiated that there are low-temperature systems that can significantly improve the technical characteristics of a transformer without resorting to such low temperatures. Considering the peculiarity of freon refrigeration machines, when a refrigerating agent, for example, R134a and lubricating oil mutually dissolve in each oth-

er, forming a "two-layer cake", and fill the entire refrigeration system, a transformer can be considered an element of a refrigeration machine (evaporator). **Conclusion.** The use of innovative cooling methods can significantly improve the efficiency of electric transformers while simultaneously increasing their efficiency.

Keywords: heat exchange optimization, heat extraction scheme, temperature, transformer, refrigeration machine

For citation: M.V. Shamarov, V.I. Aleshin, I.A. Kalmykov, A.M. Shamarov. Improving the efficiency of power transformers by intensifying their cooling during operation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):31-38. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-31-38

Введение. Без электрической энергии невозможно представить себе жизнь современного общества. Это - энергоснабжение промышленных предприятий и работа бытовых приборов, удобный электрический транспорт и исследования космоса. Человечество научилось получать электроэнергию, используя различные технологические варианты. Это природные силы ветра и энергия волн, использование углеводородного сырья и, наконец, атомная энергетика. Электроэнергию удобно передавать на большие расстояния, изменять параметры электрического тока, и практически невозможно обойтись без её трансформации. При трансформации электроэнергии, т.е. изменении напряжения, силы тока, параметров магнитного поля всегда существуют потери, достигающие больших значений. Они, в основном, связаны с увеличением температурных показателей работы трансформаторов, что может вызвать их перегрев и создание аварийных ситуаций. Поэтому электрические трансформаторы необходимо охлаждать. Учитывая гигантское количество использования электроэнергии, не трудно понять, что даже небольшие улучшения в работе трансформаторов, в частности, системе их охлаждения, может привести к значительному экономическому эффекту [1, 3].

Постановка задачи. Целью исследования является анализ существующих методов охлаждения электротрансформаторов, выявление преимуществ и недостатков систем охлаждения, а также разработка рекомендаций по оптимизации систем охлаждения с целью повышения их эффективности и снижения потерь при трансформации электроэнергии.

Методы исследования. При проведении исследования были рассмотрены различные системы охлаждения трансформаторов, включая традиционную систему охлаждения с использованием трансформаторного масла, оптимизацию теплообмена с помощью различных устройств и конструктивных решений, а также инновационных решений, такие как охлаждение с использованием криогенных устройств.

Для сравнительного анализа использовались такие критерии, как энергоэффективность, стоимость внедрения и эксплуатации. Методы исследования включали в себя анализ научной литературы о работе различных систем охлаждения трансформаторов в реальных условиях эксплуатации, аналитические методы исследования режимов работы трансформатора с различными системами охлаждения [1- 7].

Обсуждение результатов. Исследование показало, что применение инновационных методов охлаждения может значительно повысить эффективность работы электрических трансформаторов при одновременном увеличении их КПД, поскольку появляется возможность увеличения полезной нагрузки на трансформатор. В частности, использование систем охлаждения с применением парокомпрессионной холодильной машины с использованием в качестве испарителя корпуса трансформатора и проведенный обзор показал на патентную чистоту предлагаемого способа охлаждения [3, 12, 14, 20, 21]

При производстве и передачи электроэнергии конечному потребителю в настоящее время используются следующие компоненты электрической сети (рис. 1):

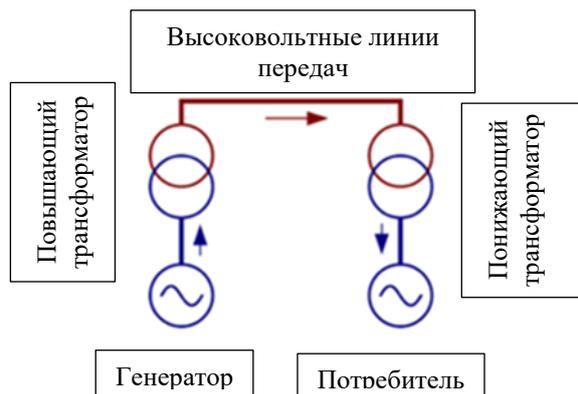


Рис. 1 - Принципиальная схема производства, передачи и потребления электроэнергии
Fig. 1 - Schematic diagram of production, transmission and consumption of electric power

Тепловые электростанции – производят электричество путем превращения тепловой энергии от сгорания органического топлива сначала в механическую энергию, а затем в электрическую. Является самым распространенным способом, однако есть опасения истощения невозобновляемых природных ресурсов, а также экологическое загрязнение атмосферы диоксидом углерода окисью углерода, окислами серы, углеводородами, огромными количествами твердых частиц (зола) и другими вредными веществами.

Тепловые электростанции – производят электричество путем превращения тепловой энергии от сгорания органического топлива сначала в механическую энергию, а затем в электрическую. Является самым распространенным способом, однако есть опасения истощения невозобновляемых природных ресурсов, а также экологическое загрязнение атмосферы диоксидом углерода окисью углерода, окислами серы, углеводородами, огромными количествами твердых частиц (зола) и другими вредными веществами.

Гидроэлектростанции - производят электричество, используя механическую энергию потока (напора) воды, которая затем с помощью гидроагрегата преобразуется в электроэнергию. Данный способ для производства электрической энергии использует возобновляемые природные ресурсы, поэтому стоимость электроэнергии становится значительно ниже, чем при использовании других видов электростанций. Главным недостатком является зависимость от большого количества воды (близость реки, водопада и т.п.).

Атомные электростанции, на которых энергия атомного распада преобразуется в электрическую. Данный способ обладает большей мощностью и экологически чище предыдущих. Однако при аварии последствия будут катастрофическими [1, 2, 5, 10, 11].

Указанные способы являются традиционными, но на данный момент набирают популярность альтернативные источники, среди них: ветроэнергетика – использует энергию ветра для производства энергии; солнечная энергетика – преобразует солнечный свет в электроэнергию; геотермальная энергетика – использует термальные подземные воды и горячие источники; водородная энергетика – в качестве топлива используется водород; волновая и приливная энергетика – в данном способе применяется естественная кинетическая энергия ветровых волн и морских приливов [1, 3, 4, 7].

На тепловых электрических станциях питающий газ поступает по газопроводу в паровой котел. В котле газ сгорает и нагревает воду, проходящую по специальным трубкам котла. При нагревании вода превращается в перегретый пар, который затем поступает в паровую турбину. Пар поступает внутрь на лопатки турбины и начинает вращать ротор генератора, создавая в обмотках статора переменный электрический ток.

Таким образом, тепловая энергия пара превращается в механическую энергию, а затем в генераторе в электрическую. Через повышающий трансформатор и понижающую трансформаторную подстанцию электроэнергия по линиям электропередач поступает потребителям. Отработавший в турбине пар направляется в конденсатор, где превращается

в воду и возвращается в котел. Используется обратная система водоснабжения, для охлаждения воды на ТЭЦ используются вентиляторные и башенные градирни [2, 11, 13].

Полученная электрическая энергия поступает на распределительное устройство – электроустановку, предназначенную для приема и распределения электрической энергии, содержащая электрические аппараты, шины и вспомогательные устройства и далее подается на линию электропередачи (ЛЭП), которая является одним из компонентов электрической сети, предназначенная для передачи или распределения электроэнергии по проводам на расстояние. При передаче энергии на дальние расстояния имеются потери электроэнергии, которые зависят от силы тока, для уменьшения потерь снижают силу тока многократно повышая напряжение в сети с помощью трансформатора.

В конструкцию трансформаторов входят следующие основные составные части. Корпус трансформатора представляет собой металлическую сварную конструкцию прямоугольной формы, состоящую из бака и крышки. Наружная поверхность корпуса трансформатора окрашена порошковой краской светлого цвета. Соединение крышки и бака в разъеме – болтовое. Уплотнение разъема – прокладка из маслобензостойкой резины.

Бак распределительного трансформатора состоит из верхней рамы, гофрированных стенок и дна. На боковой стенке дна бака предусмотрен ventиль для слива масла и два контакта заземления. В баке устанавливается активная часть трансформатора, включающая обмотки низкого и высокого напряжения, изоляции, отводов, переключающее устройство и др. Для увеличения отвода теплоты от разогретого трансформаторного масла можно использовать замену воздушного обдува, например, водяным охлаждением, т.к. теплоемкость воды более чем в 4 раза выше теплоёмкости воздуха. Такие системы охлаждения известны и используются для трансформаторов мощностью 160 МВА и выше. Чем мощнее установка, тем быстрее должна работать система охлаждения [3, 17, 19, 20].

В настоящее время разрабатываются новые конструкции трансформаторов с обмотками, охлаждаемыми до очень низких температур. Трансформаторы, использующие принцип сверхпроводимости (криогенные трансформаторы), будут иметь небольшую транспортную массу при мощности 1000 МВт и выше [4, 21].

Трансформатор силовой масляной типа ТМН-СЭЩ с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН) общего назначения мощностью от 1000 до 6300 кВА напряжением до 35 кВ включительно имеет трехфазные двухобмоточные катушки, предназначенные для передачи и распределения электроэнергии переменного тока в электросетях, является наиболее распространенным типом. Основная часть остова – магнитопровод. Обмотки выполняются из алюминиевого провода прямоугольного сечения и межслоевой изоляции из кабельной бумаги [5, 12, 16, 18].

На промышленных предприятиях наиболее распространены силовые трансформаторы с масляным охлаждением, когда магнитопровод с обмотками погружен в масляную ванну. Тепло, выделяющееся в обмотках и магнитных линиях трансформатора, воспринимается маслом, а затем передается окружающему воздуху через корпусные поверхности и радиаторы. При этом организуется естественная циркуляция масла внутри трансформатора. Количество теплоты, воспринимаемое маслом и передающееся в атмосферу, зависит от ряда причин. В общем случае, в процессе трансформирования электрической энергии часть энергии теряется в трансформаторе на покрытие потерь. Потери в трансформаторе разделяются на электрические и магнитные и могут быть рассчитаны [6, 11, 13, 14].

В трансформаторах с естественным охлаждением масла при номинальной нагрузке устройства средняя температура масла в верхних слоях достигает 80°C, в нижних слоях составляет 30 - 35°C, в средней части – 65 -70°C [7]. Понижая температуру обмоток можно увеличить полезную мощность трансформации, увеличить КПД устройства.

Интенсифицировать теплообмен, т.е. увеличить коэффициент теплоотдачи α_v со стороны охлаждающего воздуха, можно ребрением наружной теплообменной поверхности или установкой вентиляторов обдува (рис. 2).

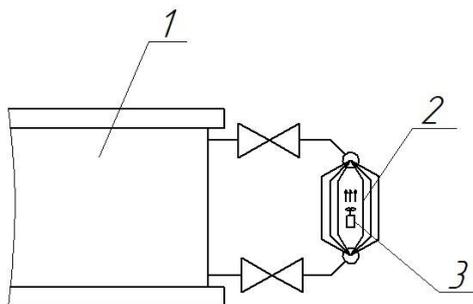


Рис. 2 - Схема системы охлаждения с дутьем и естественной циркуляцией масла
 1 - бак трансформатора; 2 - радиаторы охладителя; 3 - вентилятор обдува
Fig. 2 - Scheme of cooling system with blowing and natural oil circulation
 1 - transformer tank; 2 - cooler radiators; 3 - blower fan

В трансформаторах с воздушным дутьем, радиаторы продуваются воздухом от нескольких электрических вентиляторов, расположенных внутри каждого радиатора в пространстве между их трубами.

Интенсифицировать теплообмен со стороны охлаждаемого масла, т.е. увеличить коэффициент теплоотдачи α_m , можно установив в теплообменных трубках специальные турбулизаторы или увеличить скорость движения масла в трубках охладителя (рис. 3).

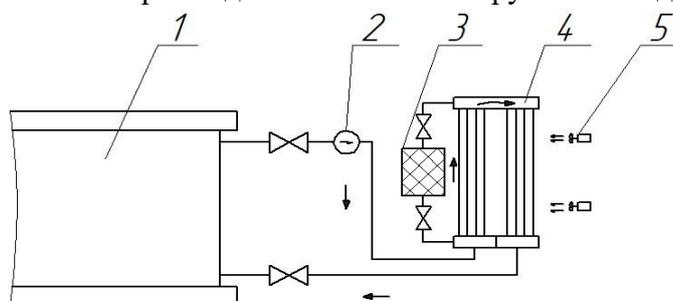


Рис. 3 - Схема системы охлаждения с дутьем и принудительной циркуляцией масла:
 1 - бак трансформатора; 2 - масляный насос; 3 - адсорбционный фильтр;
 4 - охладитель; 5 - вентилятор обдува

Fig. 3 - Schematic diagram of a cooling system with forced oil circulation and blowing:
 1 - transformer tank; 2 - oil pump; 3 - adsorption filter; 4 - cooler; 5 - blower fan

Разработаны различные схемы охлаждения и системы утилизации теплоты трансформации. В зависимости от типа, количества и мощности, установленных трансформаторов, их нагрузки, требуемой тепловой производительности, вида используемого теплоносителя в системе отопления (трансформаторное масло, вода, воздух) и удалённости потребителей могут применяться различные схемы отбора тепла: с непосредственной подачей нагретого масла в систему отопления; с нагревом воды в масловодяном теплообменнике; с нагревом воды посредством теплового насоса; с нагревом воздуха в масловоздушном теплообменнике; с непосредственным отводом нагретого воздуха от охлаждающих радиаторов; с нагревом воздуха в водовоздушном теплообменнике.

Схемы отбора тепла для системы воздушного отопления основаны на использовании теплоты вентиляционных выбросов системы охлаждения трансформаторов и являются перспективными для подстанций без обслуживающего персонала, а также закрытых подстанций. Они сочетают в себе простоту конструкции и надежность, не требуют регулировки и какого-либо надзора [8, 9, 15, 16, 19].

Для интенсивного охлаждения трансформатора уже используются холодильные машины и даже криогенная техника (жидкий азот, минус 196⁰С), однако применение криогенных температур ограничено (только для мощных трансформаторов, повышенные требования к надежности криогенной системы, высокая стоимость проекта).

Привлекательной является ниже приведенная схема охлаждения (рис. 4). Известно, что при работе фреоновых холодильных машин масло из компрессора уносится в холодильную систему, т.к. фреон и масло взаиморастворимы и в системе циркулирует смесь этих веществ. Т.к. взаиморастворимость неизбежна, то можно рассматривать электрический масляный трансформатор как испаритель холодильной машины, а объектом охлаждения электрические обмотки [9].

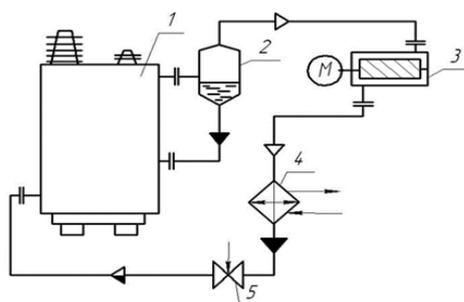


Рис. 4 - Принципиальная схема охлаждения трансформатора холодильной машиной:
1- бак трансформатора (испаритель), 2 – отделитель масла, 3 – винтовой компрессор,
4 – конденсатор, 5 – дроссельное устройство

Fig. 4 - Schematic diagram of transformer cooling by a refrigeration machine: 1 - transformer tank (evaporator), 2 - oil separator, 3 - screw compressor, 4 - condenser, 5 - throttle device

При прохождении фреона через бак трансформатора, жидкий фреон, воспринимая теплоту от охлаждаемого масла (обмоток трансформатора), кипит, изменяя своё агрегатное состояние, и совершает холодильный эффект. Пары фреона с капельным маслом покидая бак, отделяются от масла в отделителе масла и всасываются компрессором.

После сжатия в компрессоре пары холодильного агента охлаждаются и конденсируются в конденсаторе, передавая теплоту в окружающую среду (возможна утилизация). Проходя дроссельное устройство, жидкий холодильный агент дросселируется, резко снижая свою температуру, и вновь поступает в бак трансформатора (испаритель) для совершения холодильного эффекта. При использовании винтового или спирального компрессора использование отделителя жидкости не обязательно. Мощность холодильной машины определяется потерями при трансформации энергии и граничными температурными условиями работы холодильной машины.

Вывод. Таким образом, отвод тепла, обусловленного потерями в силовых трансформаторах, является одним из возможных путей экономии капитальных затрат за счет снижения количества трансформаторов в связи с увеличением их мощностных характеристик. Для решения вопроса о технико-экономической целесообразности снижения потерь и возможных размерах такого снижения необходимо принимать во внимание ряд факторов, а также конкретные условия производства и передачи электроэнергии, сложившиеся в каждом конкретном регионе.

Библиографический список:

1. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Введение в специальность Электроэнергетика и электротехника – СПб: Университет ИТМО, 2016 – 108 с.
2. Тепловые электрические станции: учебник для вузов. / Т 343 В.Д. Буров, Е.В. Дорохов, Д.П. Елизаров и др.; под ред. В.М. Лавыгина, А.С. Седлова, СВ. Цанева. - 3-е изд., стереот. - М.: Издательский дом МЭИ, 2009. - 466 с: ил.
3. Голунов А.М. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов М. –Л.: Энергия, 1964. – 152 с.
4. Боднар В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1983.-176с., (Трансформаторы; Вып.40). Под ред. Г. Е. Тарле.
5. Быстрицкий, Г. Ф. Электроснабжение. Силовые трансформаторы : учебное пособие для среднего профессионального образования / Г.Ф. Быстрицкий, Б.И. Кудрин. - 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. - 201 с.

6. Воротницкий В. Э., Люблин А. С. Использование потерь силовых трансформаторов. – М.: ЭНАС, 1995. – 172 с.
7. Швед П. и др. Утилизация тепловых потерь силовых трансформаторов с помощью тепловых насосов// Техническая электродинамика, 1993. № 5. С 47-49.
8. Гиршин С.С. и др. Влияние температуры обмоток на нагрузочные потери активной мощности в силовых трансформаторах подстанций //Омский научный вестник, №2, 2013г.
9. Устройство для охлаждения силового трансформатора/В.И. Алёшин, М.В. Шамаров, И.А. Калмыков, А.М. Шамаров. – Патент РФ на изобретение № 2820081. Заявл.13.10.2023, № 2023126247. Оpubл. 28.05.2024.
10. Калачев О.В., Юдин Л.Ю. "Вентиляция и охлаждение силовых трансформаторов с соблюдением правил промышленной безопасности в помещениях объектов электроэнергетики"/ Журнал «Промышленные и строительные технологии», Выпуск №6 (8), март 2016.
11. Шек О.А., Беляевский Р.В., Способы охлаждения силовых трансформаторов. Электроцех. 2019, №5.
12. Способ испарительного охлаждения компрессора холодильной установки Шляховецкий В.М., Черных А.И., Шляховецкий Д.В., Шамаров М.В. Патент на изобретение RU 2117222 С1, 10.08.1998. Заявка № 96114535/06 от 16.07.1996.
13. Баширов М.Г. Повышение эффективности охлаждения силовых масляных трансформаторов/ Баширов М.Г., Минлибаев М.Р., Хисматуллин А.С.//Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. 2014. №2.
14. Крышка блока цилиндров многорядного компрессора Шляховецкий В.М., Шамаров М.В. Патент на изобретение RU 2139447 С1, 10.10.1999. Заявка № 97105117/06 от 02.04.1997.
15. Шефер Д.Н., Киреев Д.Б., Беспрозванных А.С., Колмаков В.О. Модернизация тяговых подстанций с применением трансформаторов с форсированным охлаждением//Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», №9/2022.
16. Шамаров М.В. Анализ массогабаритных показателей поршневого компрессора для передвижной компрессорной станции / М.В. Шамаров, М.Ю. Мелёхина // В сборнике: Современные технологии машиностроительного производства, инновационные направления развития компрессорной техники и газоразделительных систем. сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию ОАО «Компрессорный завод «БОРЕЦ». ФГБОУ ВПО «КубГТУ», ОАО «Компрессорный завод «БОРЕЦ», ООО «Издательский Дом - Юг». 2013. С. 50-53.
17. Шамаров М.В. Мембранная абсорбционная холодильная установка // В книге: Инновационные направления интеграции науки, образования и производства. Сборник тезисов докладов участников I Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Е.П. Масюткина. 2020. С. 209-211.
18. Шамаров М.В. Особенности математической модели холодильного поршневого компрессора с внешним кипящим охлаждением/ М.В. Шамаров, Ю.С. Беззаботов // В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции. 2020. С. 976-980.
19. Шамаров М.В. Использование прикладного моделирования при проектировании каскадной холодильной установки/М.В. Шамаров, А.М. Шамаров//В сборнике: Материалы пула научно-практических конференций. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского; Керченский государственный морской технологический университет; Луганский государственный педагогический университет; Луганский государственный университет имени Владимира Даля. Керчь, 2023. С. 214-218.
20. ГОСТ 11677–85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
21. ГОСТ 14209–85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки.

References:

1. Demidova G.L., Lukichev D.V. Introduction to the Specialty Electric Power Engineering and Electrical Engineering – SPb: ITMO University, 2016;108. (In Russ.)
2. Thermal Power Plants: Textbook for Universities. Т 343 V.D. Burov, E.V. Dorokhov, D.P. Elizarov et al.; edited by V.M. Lavigin, A.S. Sedlov, S.V. Tsanev. - 3rd ed., stereot. - М.: MPEI Publishing House, 2009;466. (In Russ.)
3. Golunov A.M. Cooling Devices of Oil Transformers M.-L.: Energy, 1964;152 (In Russ.)
4. Bodnar V.V. Load capacity of power oil transformers. Moscow: Energoatomizdat, 1983;176, (Transformers; Issue 40). Ed. by G. E. Tarle. (In Russ.)
5. Bystritsky, G.F. Power supply. Power transformers: a textbook for secondary vocational education / G.F. Bystritsky, B.I. Kudrin. - 2nd ed., corrected. and additional - Moscow: Yurait Publishing House, 2024: 201 (In Russ.)
6. Vorotnitsky V.E., Lyublin A.S. Use of power transformer losses. - Moscow: ENAS, 1995:172. (In Russ.)

7. Shved P. et al. Utilization of heat losses of power transformers using heat pumps. *Technical Electrodynamics*, 1993;5: 47-49. (In Russ.)
8. Girshin S.S. et al. Effect of winding temperature on load losses of active power in power transformers of substations. *Omsk Scientific Bulletin*, 2013; 2. (In Russ.)
9. Device for cooling a power transformer / V.I. Aleshin, M.V. Shamarov, I.A. Kalmykov, A.M. Shamarov. - Russian Federation Patent for Invention No. 2820081. Claimed. 13.10.2023, No. 2023126247. Published. 28.05.2024. (In Russ.)
10. Kalachev O.V., Yudin L.Yu. "Ventilation and cooling of power transformers in compliance with industrial safety regulations in the premises of electric power facilities" *Industrial and Construction Technologies Magazine* March 2016; 6(8). (In Russ.)
11. Shek O.A., Belyaevsky R.V., Methods of cooling power transformers. *Electrical workshop*. 2019;5. (In Russ.)
12. Method of evaporative cooling of a refrigeration unit compressor Shlyakhovetsky V.M., Chernykh A.I., Shlyakhovetsky D.V., Shamarov M.V. Patent for invention RU 2117222 C1, 10.08.1998. Application No. 96114535/06 dated 16.07.1996. (In Russ.)
13. Bashirov M.G. Increasing the cooling efficiency of power oil transformers. Bashirov M.G., Minlibaev M.R., Khismatullin A.S. *Oil and gas business: electronic scientific journal*. 2014: 2. (In Russ.)
14. Cylinder block cover of a multi-row compressor Shlyakhovetsky V.M., Shamarov M.V. Patent for invention RU 2139447 C1, 10.10.1999. Application No. 97105117/06 dated 04/02/1997. (In Russ.)
15. Modernization of traction substations using transformers with forced cooling. Shefer D.N., Kireev D.B., Besprozvannykh A.S., Kolmakov V.O. *Scientific online journal Stolypin Bulletin* 2022;9. (In Russ.)
16. Shamarov M.V. Analysis of weight and size indicators of a piston compressor for a mobile compressor station. M.V. Shamarov, M.Yu. Melekhina // In the collection: Modern technologies of mechanical engineering production, innovative directions in the development of compressor equipment and gas separation systems. collection of reports of the International scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of JSC Compressor Plant BORETS. FGBOU HPE KubSTU, JSC Compressor Plant BORETS, LLC Publishing House - Yug. 2013: 50-53. (In Russ.)
17. Shamarov M.V. Membrane absorption refrigeration unit. In the book: Innovative directions of integration of science, education and production. Collection of abstracts of reports of participants of the I International scientific and practical conference. General editor E.P. Masyutkin. 2020:209-211. (In Russ.)
18. Shamarov M.V. Features of the mathematical model of a refrigeration piston compressor with external boiling cooling. M.V. Shamarov, Yu.S. Bezbebotov. *Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on the materials of the third international scientific and practical conference*. 2020: 976-980. (In Russ.)
19. Shamarov M.V. Use of applied modeling in the design of a cascade refrigeration unit. M.V. Shamarov, A.M. Shamarov. *Proceedings of the pool of scientific and practical conferences. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky; Kerch State Marine Technological University; Lugansk State Pedagogical University; Lugansk State University named after Vladimir Dal Lugansk State University. Kerch*. 2023: 214-218. (In Russ.)
20. GOST 11677–85 Power transformers. General specifications. (In Russ.)
21. GOST 14209–85 General-purpose oil power transformers. Permissible loads. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Шамаров Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; schmax@mail.ru; ORCID 0000-0001-7520-8621

Алешин Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; vladimir01121946@mail.ru.

Калмыков Илья Алексеевич, студент 3 курса очной формы обучения; schmax@mail.ru

Шамаров Артем Максимович, студент 3 курса очной формы обучения; schmax@mail.ru

Information about authors:

Maxim V. Shamarov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technological Equipment and Life Support Systems; schmax@mail.ru; ORCID 0000-0001-7520-8621

Vladimir I. Aleshin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technological Equipment and Life Support Systems; vladimir01121946@mail.ru

Илья А. Kalmykov, 3rd year full-time student; schmax@mail.ru

Artem M. Shamarov, 3rd year full-time student; schmax@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 08.10.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.12.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 15.01.2025.