

УДК 621.316.726

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ОХЛАЖДЕНИЕМ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА***Д.А. Прокофьев, В.В. Окунева, К.Б. Корнеев**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Прокофьев Д.А., Окунева В.В.,  
Корнеев К.Б., 2023

**Аннотация.** Описаны факторы, приводящие к неэффективной работе систем охлаждения трансформаторов, в частности автотрансформаторов. Перечислены восемь типов систем охлаждения, которые применяются в зависимости от мощности трансформатора, возникающих при его работе потерь мощности. Дан общий вид системы охлаждения трансформатора типа ДЦ. Указаны последствия, к которым приводит поддержание низких температур масла с учетом характерной загрузки трансформаторов. Сделан вывод, что внедрение программно-технических комплексов управления системой охлаждения с применением электронно-коммутируемых двигателей даст возможность увеличить эффективность охлаждения, ресурс трансформаторов, уменьшить энергопотребление, а следовательно, снизить экономические расходы на его обслуживание.

**Ключевые слова:** система охлаждения, автоматическое управление охлаждением, энергоэффективность подстанций, электронно-коммутируемые двигатели, программно-технический комплекс.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-61-69**

Анализ трансформаторного парка ПАО «Россети ФСК ЕЭС» показывает, что лишь у 15 % от общего числа трансформаторов есть современные системы управления охлаждением трансформаторов. Основная масса эксплуатируемых шкафов автоматики охлаждения трансформаторов (ШАОТ) относится к устаревшим модификациям (системы охлаждения типа Д и ДЦ), что приводит к повышенному расходу электроэнергии по данной составляющей структуры собственных нужд подстанций.

Потребление электроэнергии на охлаждение трансформаторов и автотрансформаторов характеризуется:

значительной унификацией оборудования систем охлаждения;

устаревшей элементной базой ШАОТ;

доступом персонала подстанций к настройкам ШАОТ и отсутствием технической возможности мониторинга фактически потребляемой электроэнергии;

зависимостью режимов работы системы охлаждения от загрузки трансформатора и температуры окружающего воздуха;

избыточностью установленных мощностей охладителей;

управлением режимами работы системы охлаждения без учета фактического состояния трансформатора.

Указанные факторы приводят к неэффективной работе систем охлаждения трансформаторов, в частности автотрансформаторов, что выражается в повышенном потреблении электроэнергии из-за избыточного охлаждения масла в системе.

Нормативные документы выделяют восемь типов систем охлаждения (таблица), которые применяются в зависимости от мощности трансформатора и возникающих при его работе потерь мощности.

#### Типы систем охлаждения маслонаполненных трансформаторов

Циркуляция масла	Охлаждение масла	Обозначение системы охлаждения	
		по ГОСТ	по МЭК
Естественная	Естественное воздушное	М	ONAN
	Принудительное воздушное	Д	ONAF
	Принудительное водяное	МВ	ONWF
Принудительная	Естественное воздушное	МЦ	OFAN
	Принудительное воздушное	ДЦ	OFAF
	Принудительное водяное	Ц	OFWF
Принудительная направленная	Принудительное воздушное	НДЦ	ODAF
	Принудительное водяное	НЦ	ODWF

На подстанциях ПАО «Россети ФСК ЕЭС» используются системы охлаждения типов М, Д, ДЦ и М/Д/ДЦ [1]. Как видно из диаграммы (рис. 1), наиболее энергоемки системы охлаждения типа ДЦ.

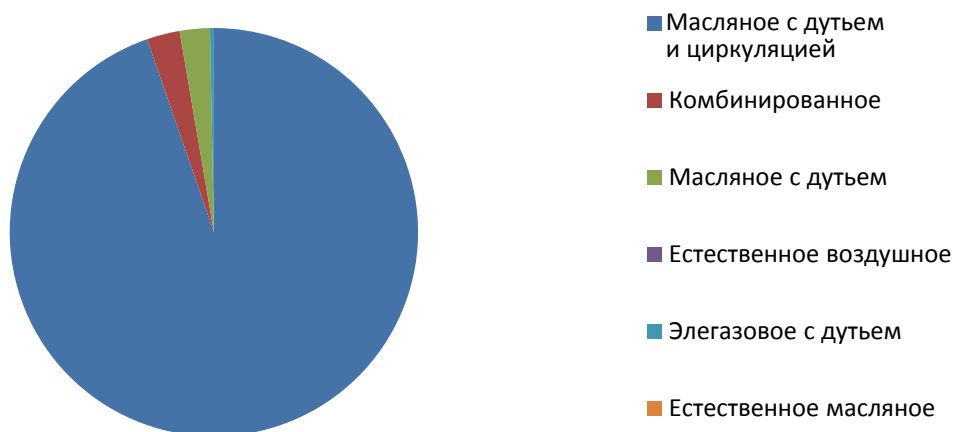


Рис. 1. Потребление электроэнергии различными типами систем охлаждения трансформаторов

Комбинированные системы охлаждения типа М/Д/ДЦ являются энергоэффективными в достаточной степени, а системы охлаждения типа Д имеют малую мощность установленных электродвигателей вентиляторов.

Система охлаждения трансформаторов и автотрансформаторов типа ДЦ характерна для подстанций ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» (рис. 2); применяется для трансформаторов, в частности автотрансформаторов, у которых выделяющиеся потери настолько значительны, что для их отвода приходится использовать специальные масляно-воздушные охладители, обдуваемые вентиляторами и оснащенные насосами для принудительной циркуляции масла. Благодаря такой циркуляции достигается более равномерное распределение температуры масла по высоте бака.

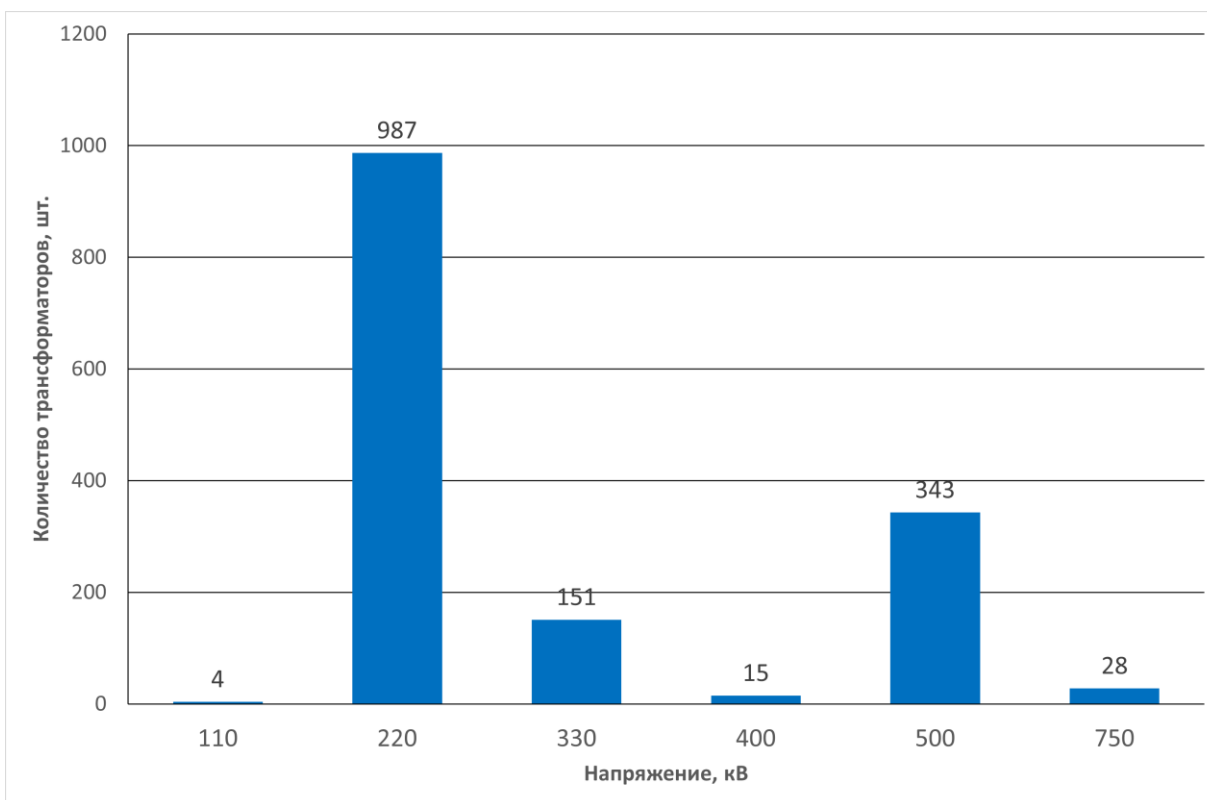


Рис. 2. Количество силовых трансформаторов, в частности автотрансформаторов, ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» с системой охлаждения типа ДЦ в зависимости от напряжения

На подстанциях ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» эксплуатируют 1 528 трансформаторов, в частности автотрансформаторов, напряжением от 110 до 750 кВ с системой охлаждения типа ДЦ [2].

Системы охлаждения типа ДЦ для трансформаторов, в частности автотрансформаторов, с различной установленной мощностью и рабочим напряжением имеют одинаковую конструкцию: масляный насос и теплообменник масло – воздух с принудительной циркуляцией воздуха, осуществляемой двумя вентиляторами (рис. 3). Охладители ДЦ имеют теплосъем 160–180 кВт и устанавливаются на трансформаторы в количестве, достаточном для обеспечения удаления излишков выделяющегося в трансформаторе тепла, обусловленных потерями «в стали» и «в меди».



Рис. 3. Общий вид системы охлаждения трансформатора типа ДЦ

Около 45 % трансформаторов, в частности автотрансформаторов, с системой охлаждения типа ДЦ оснащено четырьмя блоками охладителей. От двух до шести блоков установлено на 90 % трансформаторов с указанной системой охлаждения (рис. 4).

По причине значительной единичной мощности блоков-охладителей эффективность системы охлаждения меняется дискретно и сильно падает при низкой нагрузке трансформатора. Кроме того, при малых нагрузках трансформатора энергоэффективность системы охлаждения типа ДЦ ухудшается из-за постоянно работающих маслонасосов.

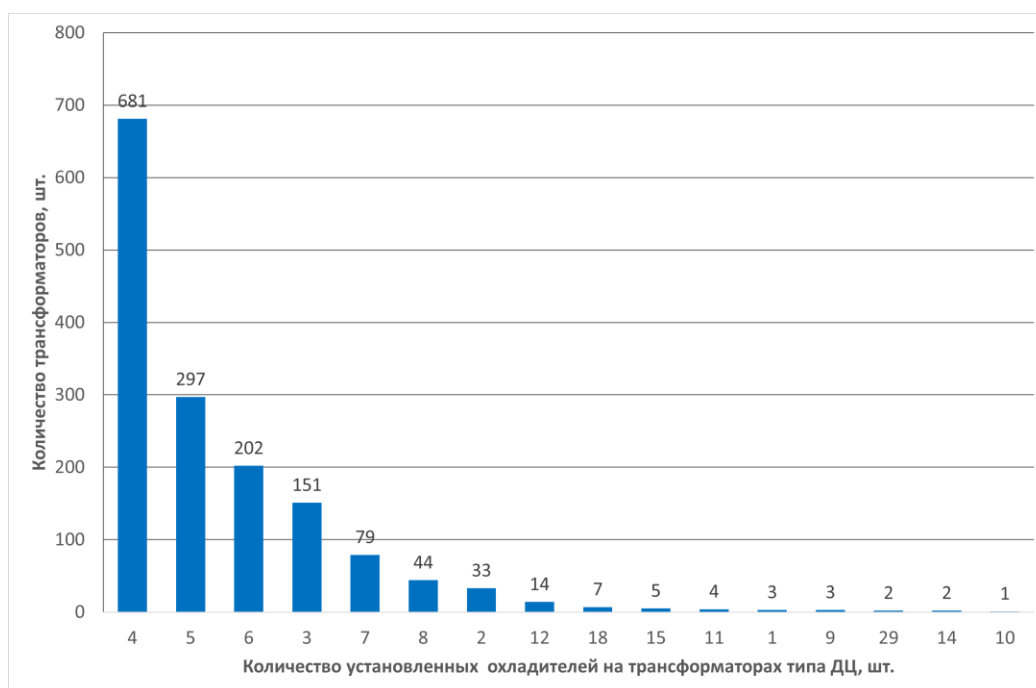


Рис. 4. Количество трансформаторов, в частности автотрансформаторов, ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» по количеству установленных блоков охладителей

По данным анализа энергоаудита за 2022 г. [2], около 80 % трансформаторов имеют среднегодовую загрузку не более 40 % и менее 1–2 % – температуру наиболее нагретой точки выше 98 °С.

Поддержание низких температур масла с учетом характерной загрузки трансформаторов ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» приводит к некоторым последствиям:

медленному старению изоляции (расчетный срок ее службы превышает срок службы остальных элементов конструкции трансформатора);

значительному расходу электроэнергии на охлаждение трансформатора, не приводящему к повышению надежности работы оборудования;

усиленному износу электродвигателей маслонасосов и вентиляторов и необходимости в их более частой замене.

В таких условиях увеличение энергоэффективности работы системы охлаждения может быть достигнуто через сдвиг уставок включения в зоны больших температур с учетом фактических режимов работы трансформаторов [3].

Системы охлаждения трансформаторов, в частности автотрансформаторов, типа ДЦ, имеющие потенциал повышения энергоэффективности, управляются ШАОТ.

Более чем на 80 % трансформаторов применяют устаревшие ШАОТ (рис. 5), не позволяющие гибко управлять электродвигателями систем охлаждения. Логика управления системами охлаждения различна для каждого трансформатора (и, следовательно, автотрансформатора). Такие шкафы могут обеспечивать каскадное включение охладителей поблочно. Другой вариант – производится включение всех маслонасосов системы охлаждения (за исключением резервного) при постановке трансформатора, в частности автотрансформатора, «под напряжение» с подключением необходимого количества пар вентиляторов в зависимости от условий работы трансформатора. В качестве входных данных для управления системами охлаждения могут использоваться сигналы термореле низкой точности, а также косвенные расчеты наиболее нагретой точки обмотки трансформатора (автотрансформатора) на основании данных о его нагрузке. Такие алгоритмы управления системами охлаждения трансформаторов (автотрансформаторов), использование приборов низкой точности и косвенных расчетов не обеспечивают оптимальных температурных режимов их работы систем охлаждения.

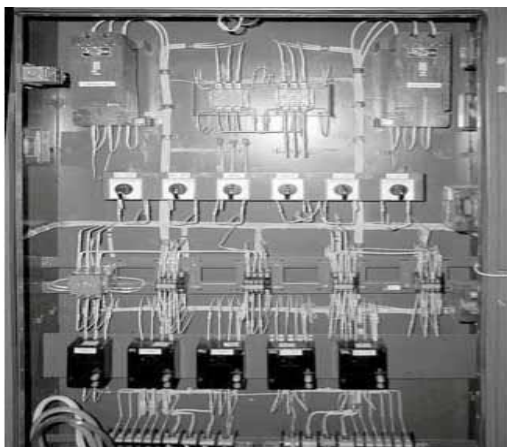


Рис. 5. Типовое исполнение ШАОТ

Анализ эксплуатируемого трансформаторного парка ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» позволяет сделать выводы:

1. Для более чем 75 % трансформаторного парка срок эксплуатации составляет 15 лет и более; такие трансформаторы, в частности автотрансформаторы, оснащены устаревшими, неэффективными системами управления охлаждением.

2. Наибольший вклад в потребление электроэнергии на охлаждение трансформаторов (автотрансформаторов) вносят системы охлаждения типа ДЦ, потребляющие более 90 % электроэнергии, поглощаемой системами охлаждения трансформаторов.

3. Основным потребителем электроэнергии являются системы охлаждения типа ДЦ (около 90 % потребляемой системами охлаждения энергии).

4. 90 % трансформаторов, оснащенных системой охлаждения типа ДЦ, включают в свой состав от двух до шести блоков охладителей.

5. Электродвигатели, применяемые в приводах элементов систем охлаждения типа ДЦ, имеют типовую электрическую мощность. Приводы маслонасосов – 4 кВт, приводы вентиляторов – 3 кВт [4].

Имеющаяся информация об алгоритмах работы, количестве и мощностях электродвигателей приводов систем охлаждения дает основания говорить о возможности и экономической целесообразности создания типовых решений для повышения энергоэффективности систем охлаждения, установленных на трансформаторах (в частности, автотрансформаторах). В качестве примера таких решений рассмотрим проект программно-технического комплекса управления системой охлаждения с применением электронно-коммутируемых двигателей (рис. 6). Данный вариант исполнения должен состоять из ряда блоков. Опишем их.

Блок электронно-коммутируемых двигателей – это электронно-коммутируемые двигатели с возможностью регулирования скорости вращения вала в зависимости от заданного алгоритма.

Блок контроля и связи комплектуется электроконтактным манометром и реле перепадов давления для увеличения эффективности работы системы охлаждения, блок опционален. Такой блок должен осуществлять совместную работу двух и более электронно-коммутируемых двигателей, обеспечивать их связь с блоком управления, а также предоставлять возможность подключения к существующей сети автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП).

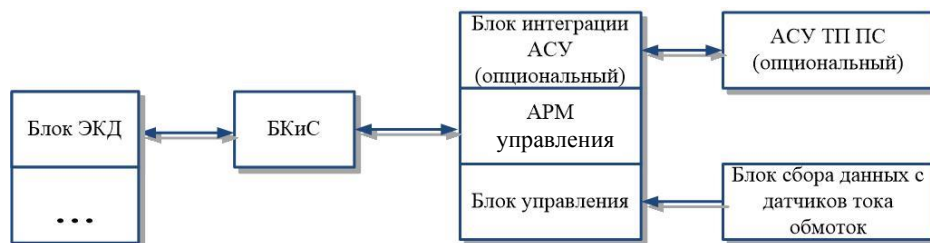


Рис. 6. Структурная схема программно-технического комплекса управления системой охлаждения с применением электронно-коммутируемых двигателей: ЭКД – электронно-коммутируемые двигатели; БКиС – блок контроля и связи; АРМ – автоматизированное рабочее место; ПС – подстанция

Датчики температуры передают температуру верхних слоев масла на блоке контроля и связи или в зависимости от комплектации. Эти датчики предназначены также для регулирования скорости вращения двигателями.

Электроконтактный манометр необходимо использовать для получения данных о состоянии работы маслонасосов трансформатора (при отключенном маслонасосе на охладителе ДЦ нет смысла включать вентиляторы).

Использование реле перепадов давления позволит получать информацию о необходимости прочистки радиатора. Данное реле не является обязательным в комплекте поставки и устанавливается при наличии технико-экономического обоснования его необходимости.

Блок сбора данных с датчиков тока обмоток предназначен для сбора данных с цифровых амперметров или с оптических датчиков измерения температур.

Блок интеграции с АСУ ТП обеспечивает передачу информации о работе системы охлаждения в АСУ ТП для отображения на мнемосхемах. Блок интеграции с АСУ ТП добавляется в конструкцию опционально.

Автоматизированное рабочее место управления обеспечивает местное управление режимами работы системы охлаждения, а также отображение ее состояния в целом, отдельных блоков и текущих режимов работы.

Блок управления осуществляет сбор сигналов с необходимых датчиков и реализацию алгоритма управления охладителями. Блок управления оборудован модулями ввода для дополнительных контактов.

В заключение отметим, что внедрение программно-технических комплексов управления системой охлаждения с применением электронно-коммутируемых двигателей позволит увеличить эффективность охлаждения, ресурс трансформаторов, уменьшить энергопотребление, а следовательно, снизить экономические расходы на его обслуживание. Всему этому также будет способствовать реализация комплексных мер по достижению эффективного и рационального охлаждения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция). Утверждено решением Совета директоров ПАО «ФСК ЕЭС» (протокол от 09.04.2020 № 496). Москва. 2020. 187 с.
2. Объем свободной трансформаторной мощности // Раскрытие информации в соответствии с постановлением Правительства РФ от 21.01.2004 № 24. ПАО «Россети ФСК ЕЭС». URL: [https://www.fsk-ees.ru/consumers/disclosures\\_in\\_accordance\\_with\\_government\\_decree\\_of\\_21\\_01\\_2004\\_24/obem\\_svobodnoy\\_transformatornoy\\_moshchnosti/](https://www.fsk-ees.ru/consumers/disclosures_in_accordance_with_government_decree_of_21_01_2004_24/obem_svobodnoy_transformatornoy_moshchnosti/) (дата обращения: 10.10.2022).
3. Русин А.Ю. Сокращение времени испытаний электрооборудования на надежность. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 3 (7). С. 60–68.
4. СТО 56947007-29.180.01.116-2012 (с изменениями от 13.10.2014) Инструкция по эксплуатации трансформаторов.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*ПРОКОФЬЕВ Денис Александрович* – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: prokofeae@mail.ru

*ОКУНЕВА Виктория Валерьевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

*КОРНЕЕВ Константин Борисович* – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: energy-tver@mail.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Прокофьев Д.А., Окунева В.В., Корнеев К.Б. Энергоэффективная система автоматического управления охлаждением силового трансформатора// Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 1 (17). С. 61–69.

**ENERGY EFFICIENT SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL  
OF POWER TRANSFORMER COOLING**

*D.A. Prokofev, V.V. Okuneva, K.B. Korneev*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The factors leading to inefficient operation of transformer cooling systems, in particular autotransformers, are described. There are 8 types of cooling systems that are used depending on the power of the transformer, the power losses that occur during its operation. A general view of the DC type transformer cooling system is given. The consequences of maintaining low oil temperatures, taking into account the characteristic loading of transformers, are indicated. It is concluded that the introduction of software and hardware complexes for controlling the cooling system using electronically switched motors will make it possible to increase the cooling efficiency, the resource of transformers, reduce energy consumption, and therefore reduce the economic costs of its maintenance.

**Keywords:** cooling system, automatic cooling control, energy efficiency of substations, electronically commutated motors, software and hardware complex.

**REFERENCES**

1. Regulations «On the Unified Technical Policy in the Electric Grid Complex» (new version). Approved by the decision of the Board of Directors of PJSC FGC UES (Protocol No. 496 dated April 9, 2020). Moscow. 2020. 187 p. (In Russian).



2. The volume of free transformer capacity. Disclosure of information in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation dated January 21, 2004 No. 24. PJSC Rosseti FGC UES. URL: [https://www.fsk-ees.ru/consumers/disclosures\\_in\\_accordance\\_with\\_government\\_decree\\_of\\_21\\_01\\_2004\\_24/obem\\_svobodnoy\\_transformatornoy\\_moshchnosti/](https://www.fsk-ees.ru/consumers/disclosures_in_accordance_with_government_decree_of_21_01_2004_24/obem_svobodnoy_transformatornoy_moshchnosti/) (date of access: 10.10.2022). (In Russian).
3. Rusin A.Yu. Reducing the time of testing electrical equipment for reliability. *Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical engineering and chemical technologies*. 2020. No. 3 (7), pp. 60–68. (in Russian).
4. STO 56947007-29.180.01.116-2012 (as amended on 10/13/2014) Operating instructions for transformers. (In Russian).

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*PROKOFEV Denis Alexandrovich* – master's student, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: prokofeae@mail.ru

*OKUNEVA Victoria Valerievna* – candidate of technical sciences, associate professor of the department of power supply and electrical engineering, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

*KORNEEV Konstantin Borisovich* – candidate of technical sciences, associate professor of the department of power supply and electrical engineering, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Prokofev D.A., Okuneva V.V., Korneev K.B. Energy efficient system of automatic control of power transformer cooling // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2022. No. 1 (17), pp. 61–69.