

Контур с пульсирующей циркуляцией жидкого теплоносителя для охлаждения масляного трансформатора

А.Г.Бажанов, В.Е. Бойков

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, Саранск

Аннотация: В работе предложена модель контура с пульсирующей циркуляцией жидкого теплоносителя для охлаждения масляного трансформатора и исследована зависимость коэффициента теплопередачи от частоты пульсации жидкости в нагреваемом контуре. В результате проведенных экспериментов установлено, что амплитуда давлений остается практически неизменной до частоты 0,45 Гц, затем резко уменьшается и при частоте 0,9 Гц составляет примерно 12,5 кПа. Также установлено, что в нагреваемом контуре (1 контур) разность температур превышает разность температур в греющем контуре (2 контур), что связано с тем, что скорость течения жидкости в греющем контуре превышает скорость течения в нагреваемом контуре. Проведенный теоретический расчет показал, что в предложенной модели коэффициент теплопередачи достигает максимума при частоте пульсации 0,6 Hz и составляет $133,675 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Ключевые слова: энергоэффективность, масляный трансформатор, рекуперация тепла, теплообменник, охлаждение трансформатора.

Введение

Трансформаторы – это одни из самых распространенных элементов энергетических систем. Для более выгодной передачи энергии на дальние расстояния используют трехфазные масляные трансформаторы или группу однофазных [1-3].

Для лучшего отведения тепла от масляного трансформатора используются радиаторы или охладители. При их применении увеличивается объем необходимого для охлаждения масла, увеличиваются габариты, и повышается стоимость трансформатора. Снизить нагрев трансформатора можно с помощью применения различных типов охлаждающих систем [4-6].

Одним из способов снижения нагрева может быть способ увеличения коэффициента теплопередачи охладителя за счет пульсирующей циркуляции жидкого теплоносителя [7-9]. В работе предложена модель контура с пульсирующей циркуляцией жидкого теплоносителя для охлаждения масляного трансформатора и исследована зависимость коэффициента теплопередачи от частоты пульсации жидкости в нагреваемом контуре.

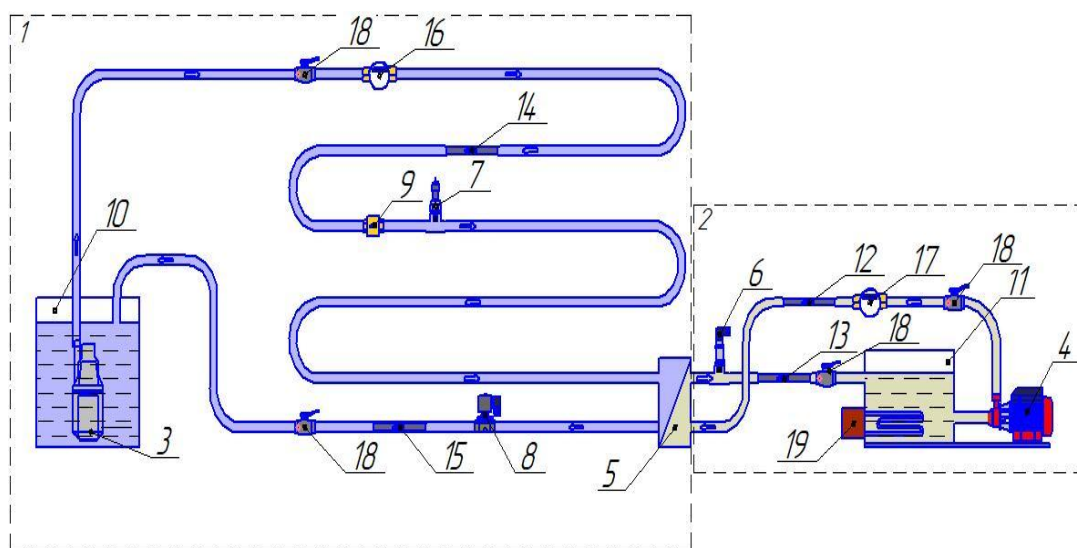
Эксперимент

В работе была предложена модель контура с пульсирующей циркуляцией жидкого теплоносителя для охлаждения масляного трансформатора, общий вид которой представлен на рис. 1.



Рис. 1. – Модель контура с пульсирующей циркуляцией жидкого теплоносителя для охлаждения масляного трансформатора

На рис. 2 представлена функциональная схема контура с пульсирующей циркуляцией жидкого теплоносителя для охлаждения масляного трансформатора. Данная схема работает следующим образом. Из бака с водой 10, насосом 3, жидкость подается в разгонную линию, проходя через теплообменник 5, перед электромагнитным клапаном 8. После электромагнитного клапана 8 нагреваемый пульсирующий поток жидкости возвращается в бак 10. В это же время нагретое тэном 19 масло из бака 11 перегоняется насосом 4, также проходит через теплообменник 5, охлаждается до температуры, не превышающей $+70^{\circ}\text{C}$ и возвращается в бак 11. Для измерения и записи величин давления и температуры в греющем и нагреваемом контурах была разработана система управления и сбора данных.



1 – нагреваемый контур; 2 – греющий контур; 3 – насос для циркуляции воды; 4 – поверхностный насос Quattro Elementi Giardino для циркуляции масла; 5 – пластинчатый теплообменник; 6 – датчик давления ONI; 7 – датчик давления НК3022; 8 – соленоидный электромагнитный клапан; 9 – обратный клапан; 10 – бак с водой; 11 – бак с маслом; 12 – датчик температуры на подаче масла; 13 – датчик температуры на обратке масла; 14 – датчик температуры на подаче воды; 15 – датчик температуры на обратке воды; 16 – счетчик расхода воды; 17 – счетчик расхода масла; 18 – краны; 19 – электронагреватель

Рис. 2. – Функциональная схема контура с пульсирующей циркуляцией жидкого теплоносителя для охлаждения масляного трансформатора

Она используется для согласования ввода в ПК соответствующих сигналов от датчиков давления и температуры в экспериментальной установке.

На рис.3 представлен общий вид системы блока управления и сбора данных.

На рис. 4 представлена принципиальная схема модуля управления и сбора данных. В систему управления и сбора данных входят следующие элементы:



Рис. 3. – Общий вид системы блока управления и сбора данных

1. Модуль ESP8266 NodeMcu v3 Lua с WiFi - платформа на основе ESP8266 для создания различных устройств интернета (IoT). Модуль отправляет и получает информацию либо в локальную сеть, либо в интернет при помощи Wi-Fi.

2. Микросхемы ArduinoNano v3.0 - проектировалась Gravitech для проведения лабораторных работ в сфере радиоэлектроники и робототехники.

3. Микросхема ADS1115 — 16-битный аналого-цифровой преобразователь с I2C интерфейсом.

4. Реле электромеханическое 250V 10 A. 4- канал 5V.

5. Блок питания 24В, 5А.

6. Блок питания 5В, 10А.

Результаты и их обсуждение

В работе были проведены исследования зависимости давления от времени в стационарном и импульсном режимах при различных частотах пульсаций охлаждающей жидкости (рис. 5, 6).

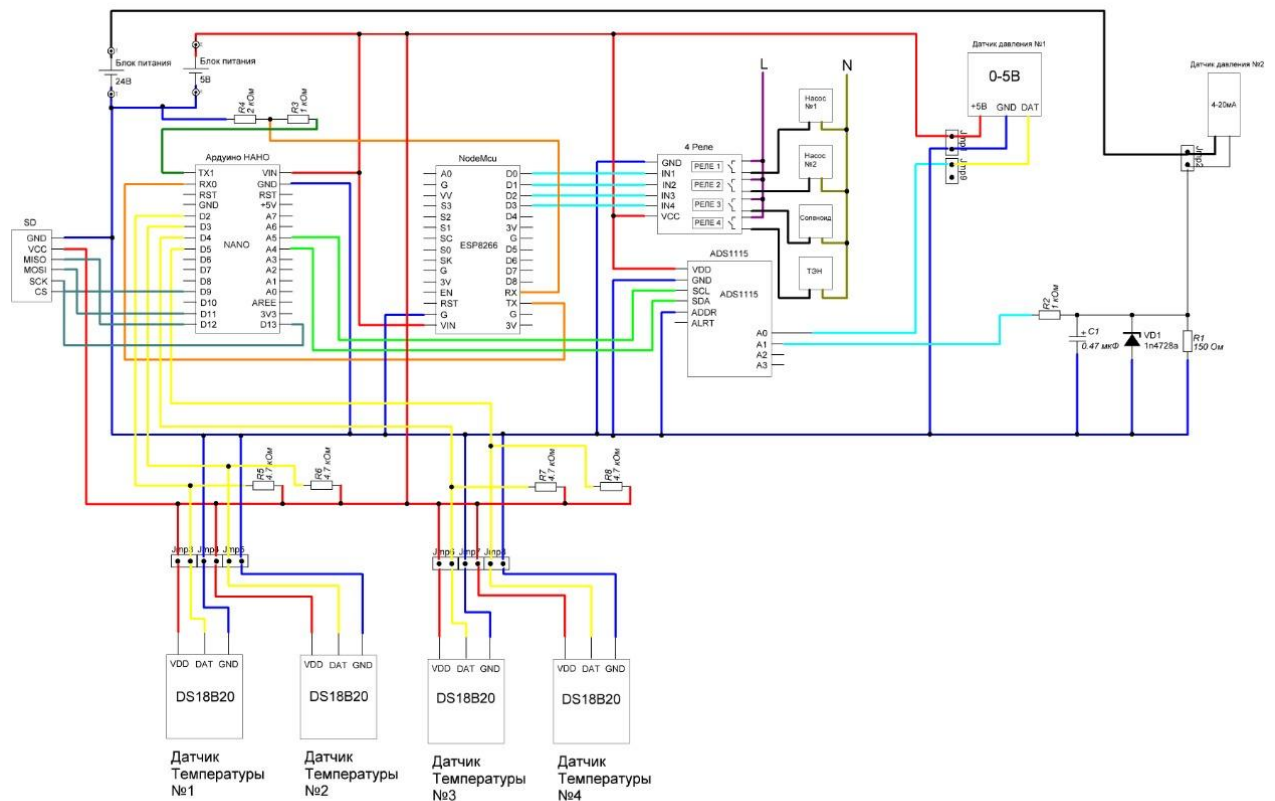


Рис. 4. – Принципиальная схема модуля управления и сбора данных

Также исследовались зависимости разности температур на входе и выходе греющего и нагреваемого контура от частоты пульсации охлаждающей жидкости (рис. 7). Из эксперимента были получены значения температуры и расхода для стационарного режима охлаждения: температура воды на входе в теплообменник $t'_2 = 36,13^\circ\text{C}$, температура воды на выходе - $t''_2 = 41,31^\circ\text{C}$, температура горячего масла на входе в теплообменник $t'_1 = 49,75^\circ\text{C}$, температура горячего масла на выходе - $t''_1 = 47,88^\circ\text{C}$, расход

трансформаторного масла $V_1 = 0,37 \text{ л/с}$, расход воды $V_2 = 0,08 \text{ л/с}$, применяемые пластины теплообменника: материал сталь X18H10T.

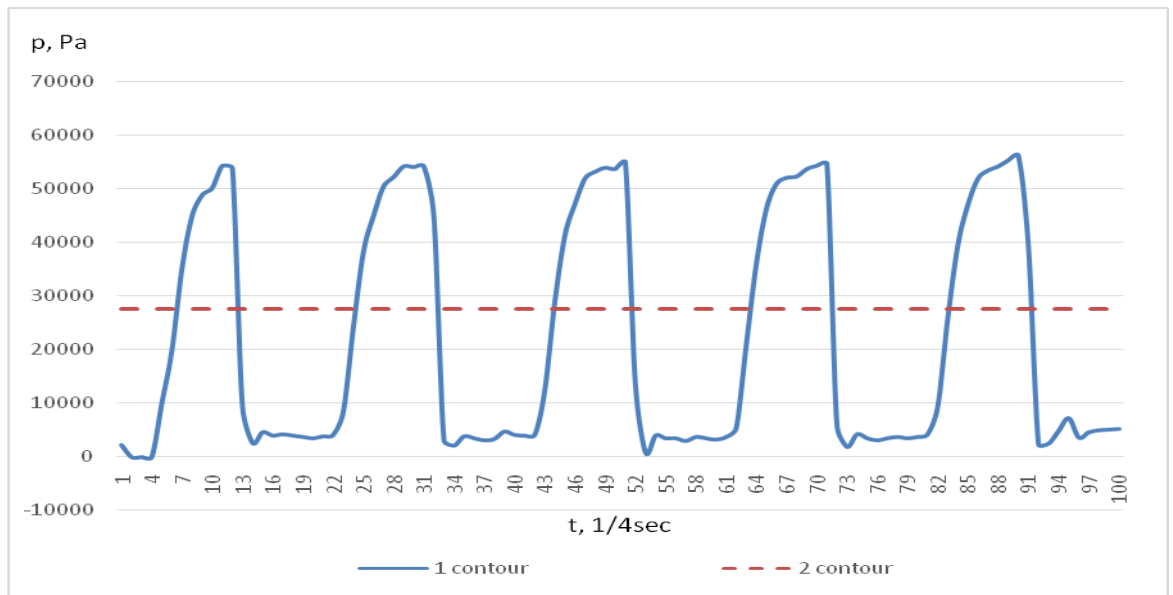


Рис. 5. – Зависимость скачков давления от времени при частоте 0,15 Гц

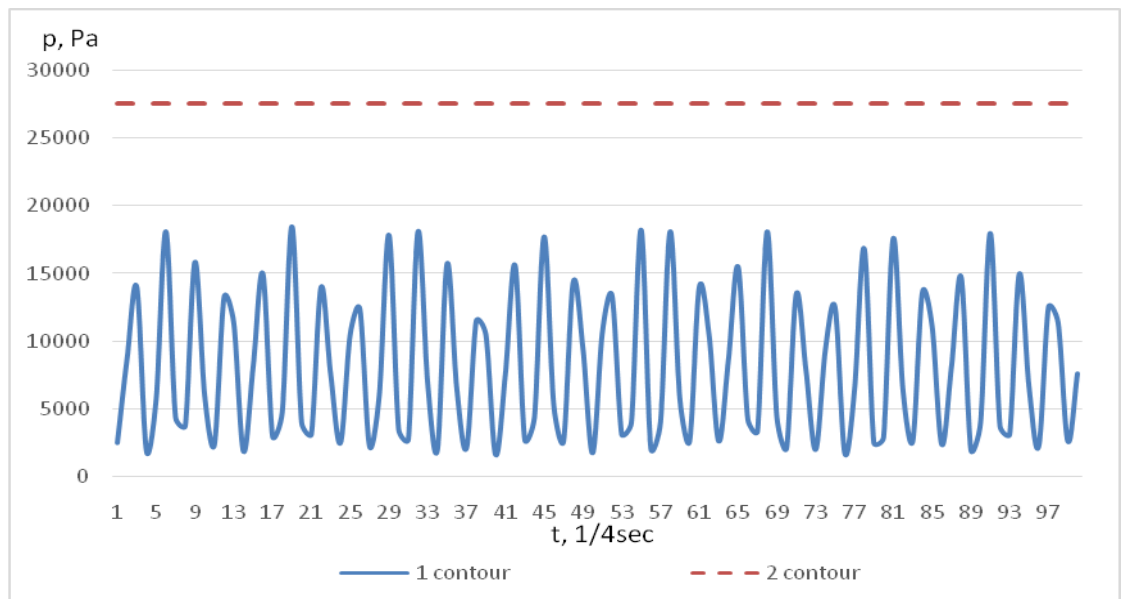


Рис. 6. – Зависимость скачков давления от времени при частоте 0,9 Гц

Для заданных параметров был проведен тепловой расчет пластинчатого теплообменника в стационарном режиме и рассчитан коэффициент теплопередачи теплообменника $K = 130,824 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Проведенные

аналогичные расчеты для следующих частот: 0,15 Гц; 0,30 Гц; 0,45 Гц; 0,6 Гц; 0,75 Гц; 0,9 Гц показали, что число Рейнольдса не превышает 2000, поэтому формула для расчета числа Нуссельта остается неизменной.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что с увеличением частоты амплитуда колебаний давления остается практически неизменной до частоты 0,45 Гц, затем резко уменьшается и при частоте 0,9 Гц составляет примерно 12,5 кПа. Также в результате исследований установлено, что на нагреваемом контуре (1 контур) разность температур превышает разность температур на греющем контуре (2 контур) (рис. 7).

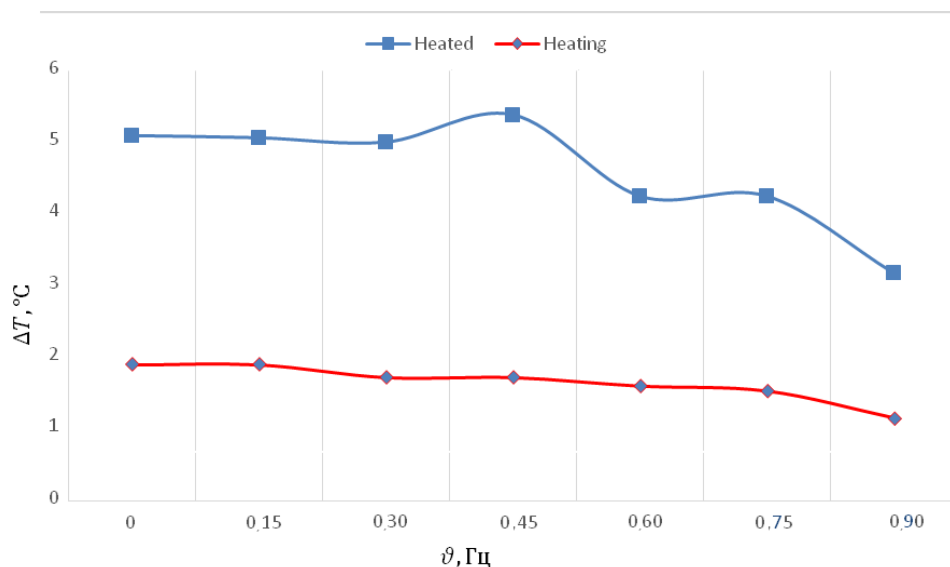


Рис. 7. – Зависимость разности температур на входе и выходе греющего и нагреваемого контура от частоты

Это связано с тем, что скорость течения жидкости во втором контуре превышает скорость течения в первом контуре. Далее производился тепловой расчет теплообменника при пульсирующем режиме работы охлаждающей жидкости [10-11]. Проведенный теоретический расчет коэффициента теплопередачи показал, что при стационарном режиме течения охлаждающей жидкости коэффициент теплопередачи составляет $130,824 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

(рис.8). Далее с увеличением частоты коэффициент теплопередачи уменьшается, достигает минимума при частоте 0,45 Гц и далее снова возрастает и достигает максимума при частоте 0,6 Гц и составляет 133,675. При дальнейшем увеличении частоты коэффициент теплопередачи начинает уменьшаться и становится минимальным при частоте 0,9 Гц. При более высоких частотах коэффициент теплопередачи практически не меняется.

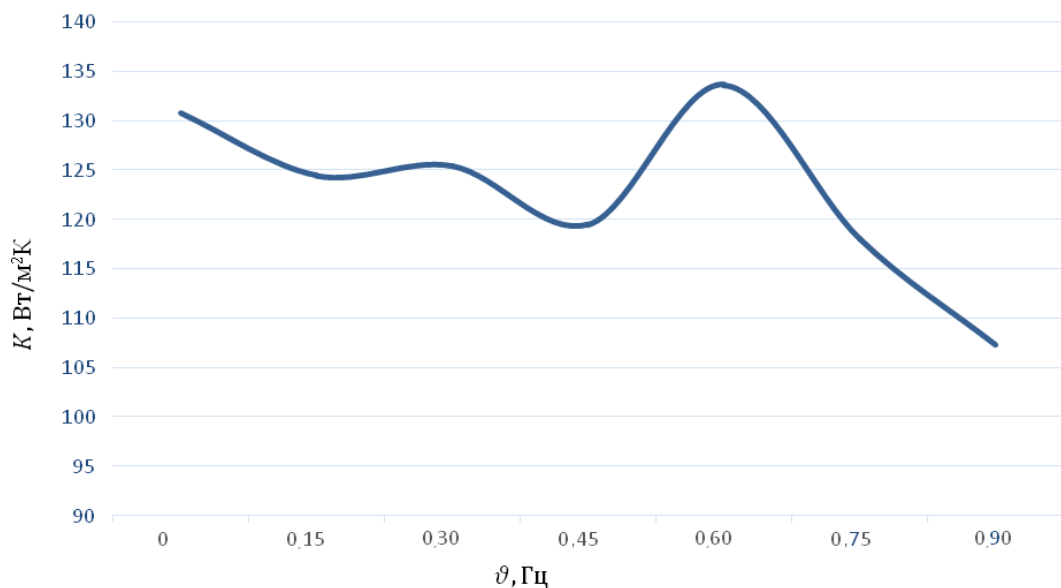


Рис. 8. – Зависимость коэффициента теплопередачи от частоты.

Заключение и выводы

В работе разработана модель контура с пульсирующей циркуляцией жидкого теплоносителя для охлаждения масляного трансформатора. Экспериментальная модель позволяет осуществлять охлаждение трансформаторного масла при различных частотах пульсации жидкости в нагреваемом контуре.

В результате проведенных экспериментов и теоретического расчета коэффициента теплопередачи можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные исследования показали, что амплитуда давлений остается практически неизменной до частоты 0,45 Гц, затем резко уменьшается и при частоте 0,9 Гц составляет примерно 12,5 кПа.

2. Установлено, что на нагреваемом контуре (1 контур) разность температур превышает разность температур на греющем контуре (2 контур), что связано с тем, что скорость течения жидкости в греющем контуре превышает скорость течения в нагреваемом контуре.

3. Проведенный теоретический расчет коэффициента теплопередачи показал, что при стационарном режиме течения охлаждающей жидкости коэффициент теплопередачи составляет $130,824 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Далее с увеличением частоты коэффициент теплопередачи уменьшается, достигает минимума при частоте 0,45 Hz и далее снова возрастает и достигает максимума при частоте 0,6 Hz и составляет $133,675 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. При дальнейшем увеличении частоты коэффициент теплопередачи начинает уменьшаться и становится минимальным при частоте 0,9 Hz.

Литература

1. Быстрицкий Г.Ф. Электроснабжение. Силовые трансформаторы. М.: "Юрайт", 2016. 261 с.
2. Kassi K.S., Fofana I., Meghnefi F., Yeo Z. Impact of local overheating on conventional and hybrid insulations for power transformers // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22, №5. Pp. 2543 – 2553.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб. "Питер", 2012. 320 с.
4. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. М.: "Энергия", 2013. 179 с.
5. Тарле, Г.Е. Ремонт и модернизация систем охлаждения силовых масляных трансформаторов. М.: "Энергия", 2014. 192 с.

6. Tenbohlen S., Schmidt N., Khandan S. et al. Investigation of Thermal Behavior of an Oil Directed Cooled Transformer Winding // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 42, №99. Pp. 1 – 2.
7. Левцев А. П., Импульсные системы теплоснабжения и водоснабжения. Саранск: Изд-во Мордов. Университета, 2015. 172 с.
8. Левцев А. П., Кудашев С. Ф., Макеев А. Н., Лысяков А. И. Влияние импульсного режима течения теплоносителя на коэффициент теплопередачи в пластинчатом теплообменнике системы горячего водоснабжения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С. 89-97, URL: science-education.ru/116-12664.
9. Левцев А.П., Целяев А.В. Интенсификация теплопередачи опытного образца перекрестноточного микроканального теплообменника // Инновации и инвестиции. 2021. №8. С. 116-120.
10. Бажанов А.Г., Прокопов Н.Г. Импульсная регенерация катионита в натрий-катионовом фильтре // Инженерный вестник Дона. 2021. №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7195.
11. Бажанов А.Г., Уездин А.В. Разработка комбинированного теплоисточника с внешней камерой и промежуточным контуром на углекислом газе // Инженерный вестник Дона. 2022. №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7612.

References

1. Bystrickij G.F. Elektrosnabzhenie. Silovye transformatory [Power transformers]. М.: "YUrajt", 2016. 261 p.
 2. Kassi K.S., Fofana I., Meghnefi F., Yeo Z. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22, №5. Pp. 2543 – 2553.
 3. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory [Introduction to electromechanics. DC machines and transformers]. S-Pb. "Piter", 2012. 320 p.
-

4. Kish L. Nagrev i ohlazhdenie transformatorov [Heating and cooling transformers]. M.: "Energiya", 2013. 179 p.
5. Tarle, G.E. Remont i modernizaciya sistem ohlazhdeniya silovyh maslyanyh transformatorov [Repair and modernization of cooling systems for power oil transformers]. M.: "Energiya", 2014. 192 p.
6. Tenbohlen S., Schmidt N., Khandan S. et al. IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 42, №99. Pp. 1 – 2.
7. Levcev A. P., Impul'snye sistemy teplosnabzheniya i vodosnabzheniya [Impulse heating and water supply systems]. Saransk: Izd-vo Mordov. Universiteta, 2015. 172 p.
8. Levcev A. P., Kudashev S. F., Makeev A. N., Lysyakov A. I. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. № 2. pp. 89-97, URL: science-education.ru/116-12664.
9. Levcev A.P., Celyaev A.V. Innovacii i investicii. 2021. №8. pp. 116-120.
10. Bazhanov A.G., Prokopov N.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. №9 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7195.
11. Bazhanov A.G., Uezdin A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №5 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7612.