

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

А.В. Дмитриев¹, О.С. Дмитриева¹, И.Н. Мадышев²

¹ Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия,

² Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

Трансформаторы входят в состав основного оборудования электростанций, повышающих, понижающих и распределительных подстанций, различного вида преобразовательных устройств. В процессе эксплуатации масляных трансформаторов могут возникнуть повреждения или дефекты, своевременное выявление которых позволит принять меры по предупреждению их развития и сохранению работоспособности оборудования. К тяжелым последствиям приводят повреждения обмоток и главной изоляции трансформаторов из-за нарушений в работе системы охлаждения. Существующие охлаждающие устройства не всегда являются эффективными. Разработана дополнительная система охлаждения силового трансформатора с термоэлектрическими преобразователями. Принцип их работы основан на том, что в ночное время при минимальной температуре окружающего воздуха в емкости накапливается холод за счет образования на развитой поверхности ребер термоэлектрических преобразователей слоя водяного льда, таяние которого используется в самый жаркий период времени суток для дополнительного охлаждения трансформаторного масла в системе охлаждения трансформатора. Описаны два режима работы разработанного устройства. Представлено математическое описание процесса охлаждения воды. Проанализированы результаты исследований по оценке изменения теплового потока, отводимого с помощью вертикальных грунтовых теплообменников, от разных параметров. Результаты исследований показали возможность использования предлагаемой системы жидкостного охлаждения силовых масляных трансформаторов с помощью термоэлектрических модулей и ВГТО. Система позволит дополнительно в моменты пиковых тепловых нагрузок отводить до 50 % тепла. Повышение мощности трансформатора в зависимости от его рабочих характеристик составит 25–40 %.

Ключевые слова: трансформатор, теплообменник, охлаждение, термоэлектрический преобразователь, тепловой поток.

Введение

Воздействие на силовой трансформатор тока подмагничивания как постоянного, так и в виде импульса существенно изменяет режим его работы, т. е. магнитная система переходит в режим насыщения. В этом режиме увеличивается тепловая мощность, рассеиваемая в баке трансформатора, приводя его к повышенному нагреву. При этом ускоряется процесс старения изоляции обмоток, что приводит к снижению ресурса и надежности трансформатора [1–4].

Существующие системы охлаждения силовых масляных трансформаторов не обеспечивают достаточно эффективный отвод тепла от изоляции обмоток при кратковременных существенных перегрузках [5–7]. Поэтому, как правило, основной причиной отказов трансформаторов вследствие тепловой перегрузки являются межвитковые короткие замыкания в обмотках [8–10].

Разработка дополнительной системы охлаждения силовых масляных трансформаторов

В связи с этим необходима разработка дополнительной системы охлаждения силовых мас-

ляных трансформаторов, способных обеспечить снижение пиковой нагрузки и ее равномерное распределение в течение всей продолжительности работы за счет аккумуляции холода в часы, соответствующие минимальной тепловой нагрузке. Примером конструктивного оформления такой системы является использование дополнительной емкости, оборудованной каскадом полупроводниковых термоэлектрических модулей (преобразователей), которые представляет собой термоэлектрический холодильник, имеющий последовательно соединенные полупроводники p - и n -типа, образующих p - n - и n - p - переходы между керамическими пластинами. В свою очередь, каждый из таких переходов имеет тепловой контакт с одним из двух радиаторов. В результате прохождения электрического тока определенной полярности образуется перепад температур между радиаторами модуля: один радиатор работает как холодильник, другой радиатор нагревается и служит для отвода тепла [11–14].

В нижнюю часть бака масляного трансформатора I вмонтирован змеевик 7, предназначенный для дополнительного охлаждения силового трансформатора жидкостью – водой, находящейся внут-

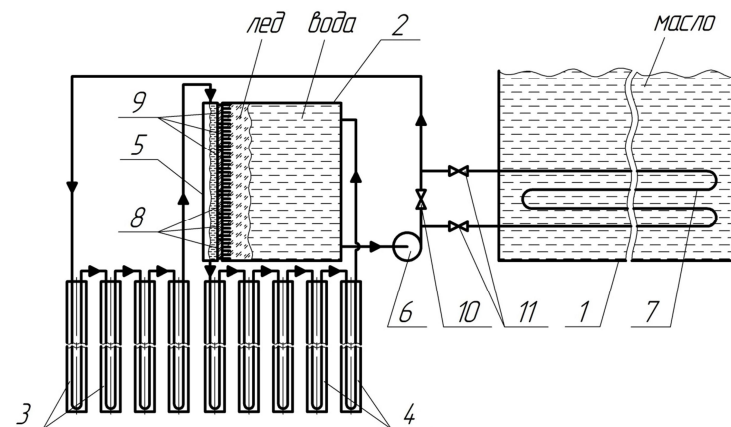


Рис. 1. Дополнительная система охлаждения силового трансформатора: 1 – бак трансформатора; 2 – емкость; 3, 4 – вертикальные теплообменники (ВГТО); 5 – вертикальный канал квадратной или прямоугольной формы; 6 – насос; 7 – змеевик; 8 – термоэлектрические модули; 9 – ребра, служащие для формирования слоя льда; 10, 11 – запорная арматура

ри емкости 2. К наружной поверхности одной из стенок емкости 2 прикреплены термоэлектрические модули 8, холодная сторона которых используется для теплопередачи охлаждаемой жидкости, находящейся внутри емкости 2. При этом с целью формирования наибольшей толщины слоя льда на внутренней поверхности емкости 2 (со стороны термоэлектрических модулей 8) выполнено оребрение 9 (рис. 1).

Для эффективного отвода тепла с нагретой стороны термоэлектрических модулей 8 установлен вертикальный канал квадратной или прямоугольной формы 5. Предварительное охлаждение циркулирующей воды происходит в вертикальных грунтовых теплообменниках 3 и 4, выполненных в виде U-образных труб, вмонтированных в пробуренные скважины глубиной от 10 до 100 м [15].

Разработанная авторами настоящей статьи дополнительная система охлаждения силовых масляных трансформаторов имеет два режима работы. Первый режим – режим накопления холода используется в часы работы трансформатора, соответствующие небольшой тепловой нагрузке. В этом режиме вода, находящаяся в емкости 2, насосом 6 при закрытой запорной арматуре 11 подается на предварительное охлаждение в первую секцию ВГТО 3. Затем вода поступает в вертикальный канал 5, где происходит отвод тепла от нагретых поверхностей термоэлектрических модулей 8. Пленка жидкости, стекающая по вертикальной поверхности канала 5, наиболее эффективно снимает избыток теплоты, обеспечивая при этом пониженную температуру на холодной стороне термоэлектрических модулей 8. За счет этого на внутренней поверхности емкости 2 на выполненном оребрении 9 происходит кристаллизация воды и наращивание слоя льда. Далее вода, нагретая в вертикальном канале 5, поступает на дополнительное охлаждение во вторую секцию ВГТО 4,

после чего направляется в верхнюю часть емкости 2. Таким образом, за счет работы термоэлектрических модулей 8 происходит аккумуляция холода в емкости 2 при постоянной циркуляции охлаждающей воды.

Второй режим работы соответствует высоким тепловым нагрузкам работы трансформатора, т. е., как правило, высоким температурам окружающего воздуха. В этом случае охлажденная вода из емкости 2 насосом 6 при закрытой запорной арматуре 10 поступает в змеевик 7, расположенный в нижней части бака трансформатора 1. Вода, циркулирующая по змеевику 7, охлаждает трансформаторное масло в баке 1 и далее подается в те же устройства, что и при первом режиме работы. Таким образом, дополнительное жидкостное охлаждение нижней части бака трансформатора приводит к повышению эффективности охлаждения трансформаторного масла в часы наибольшей тепловой нагрузки, предотвращая выход из строя силовых трансформаторов.

Расчетные данные и результаты исследований

Для определения конструктивных и режимных параметров работы ВГТО, предназначенных для предварительного охлаждения воды перед подачей в емкость используется математическая модель, предложенная в работе [16]. Согласно этой модели, общее решение задачи теплообмена в ВГТО для условия переменной температуры поверхности скважины приводится к частному решению для постоянной температуры. В этом случае теплоперенос в аппарате описывается системой уравнений:

$$Q = G_m c_p (t_{L1} - t_{L2}); \quad (1)$$

$$Q = 2k_l \pi L n (t_L - t_G),$$

где Q – тепловой поток, Вт; G_m – массовый расход

теплоносителя (воды), кг/с; c_p – удельная массовая теплоемкость воды, Дж/(кг·К); t_{L1} – температура воды на входе в ВГТО, К; t_{L2} – температура воды на выходе из ВГТО, К; k_l – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К); L – длина ВГТО (глубина скважины), м; n – количество ВГТО; t_L – средняя температура воды в ВГТО, К; t_G – температура грунта, К.

Линейный коэффициент теплопередачи с учетом термического сопротивления слоя заполнителя скважины можно определить по формуле:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha d_1} + \frac{1}{2\lambda_s} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_z} \ln \frac{d_2 + 2\delta_z}{d_2}}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); λ_s – коэффициент теплопроводности материала трубы ВГТО, Вт/(м·К); λ_z – коэффициент теплопроводности заполнителя скважины, Вт/(м·К); d_1 – внутренний диаметр трубы ВГТО, м; d_2 – наружный диаметр трубы ВГТО, м; δ_z – толщина слоя заполнителя скважины, м.

Коэффициент теплоотдачи при обтекании прямых труб можно найти по известным уравнениям [17, 18] в зависимости от режима течения теплоносителя:

– при развитом турбулентном течении ($Re > 10\,000$):

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{st}} \right)^{0,25}; \quad (3)$$

– при переходном режиме ($2300 < Re < 10\,000$) более точная зависимость получена в работе [19, 20]:

$$Nu = 3,66 + 0,0855 (Re - 2320)^{2/3} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{st}} \right)^{0,25}; \quad (4)$$

– при вязкостно-гравитационном режиме ($Re < 2300, Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5$):

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{st}} \right)^{0,25}; \quad (5)$$

– при вязкостном режиме ($Re < 2300, Gr \cdot Pr < 8 \cdot 10^5$):

$$Nu = 3,66 \left(\frac{\mu}{\mu_{st}} \right)^{0,14}, \quad (6)$$

где Nu – число Нуссельта; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; Gr – число Грасгофа; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

Система уравнений (1) решалась методом последовательных приближений с использованием замыкающих уравнений подобия (3)–(6). В качестве грунтовых теплообменников приняты U-образные полиэтиленовые трубы диаметром 50×4,6 мм. Теплопроводность труб принималась равной 0,38 Вт/(м·К). Трубы расположены в скважине диаметром 200 мм. Теплопроводность материала заполнителя скважины 2,3 Вт/(м·К). Проектный расчет ВГТО выполнен с учетом возможности до-

полнительного отвода тепла от силового трансформатора, равной 150 кВт. При этом расчетная температура грунта составляла 8 °С, температуры теплоносителя на входе и на выходе из ВГТО 40 и 20 °С соответственно.

При заданных условиях общая расчетная длина ВГТО составила 783 м. В связи с этим при проведении исследовательских расчетов длина ВГТО (глубина скважины) составляла 50 м, количество – 8. Оценочные расчеты проводились для труб диаметрами 32×3,0 мм, 50×4,6 мм, 75×6,8 мм при различных температурах грунта. Разность температур теплоносителя на входе и на выходе из ВГТО изменялась от 10 до 30 °С. Результаты численных исследований показали, что на величину теплового потока, дополнительно отводимого от трансформатора, существенное влияние оказывают температурные характеристики теплоносителя, грунта (приемника теплоты), а также конструктивные размеры U-образных труб ВГТО.

На рис. 2 представлено изменение теплового потока, отводимого с помощью ВГТО, в зависимости от температуры грунта при различных разностях температур охлаждаемой воды на входе и на выходе из ВГТО. Из графика видно, что увеличение температуры воды на входе в ВГТО до 50 °С, соответствующее разности температур 30 °С, приводит к повышению теплового потока на 17,6–31,1 % по сравнению с начальной температурой воды в 40 °С. При этом снижение температуры грунта также приводит к росту количества переданного в него тепла. Стоит отметить, что температура воды на выходе из ВГТО принималась постоянной ($t_{L2} = 20$ °С).

При увеличении количества переданного тепла в ВГТО повышается требуемый расход охлаждаемого агента (рис. 3). Так, например, при температуре грунта 10 °С повышение температуры воды на выходе из ВГТО с 20 до 25 °С приводит к росту ее массового расхода на 50,6 %. При этом увеличение теплового потока составляет всего лишь 13 %. Основная доля повышения массового расхода теплоносителя связана с уменьшением разности его температуры на входе и на выходе из ВГТО.

Из данных, представленных на рис. 4, видно, что вклад термического сопротивления теплопроводности стенки трубы ВГТО в общее термическое сопротивление при исследуемых параметрах может достигать 78 %. При увеличении разности температур охлаждаемой воды на входе и на выходе из ВГТО наблюдается снижение отношения R_{st}/R_{Σ} , однако, не более чем на 0,52 %.

Увеличение диаметра трубы ВГТО при прочих равных условиях приводит к росту количества переданного тепла (рис. 5). Это связано с увеличением поверхности теплообмена в ВГТО. Стоит отметить, что данные получены при разности температур воды на входе и на выходе из ВГТО, равной 20 °С.

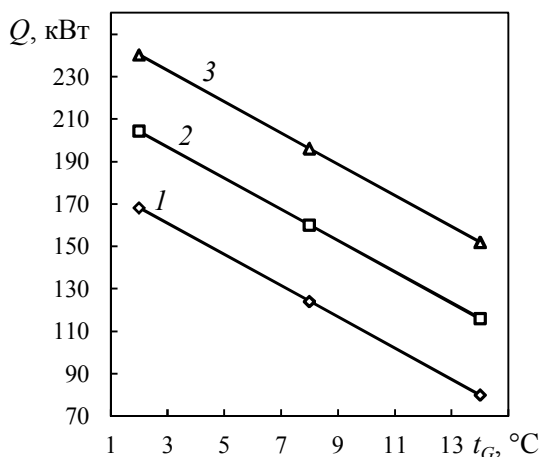


Рис. 2. Изменение теплового потока, отводимого с помощью ВГТО, в зависимости от температуры грунта при разностях температур теплоносителя на входе и на выходе из ВГТО $\Delta t, ^\circ\text{C}$: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30

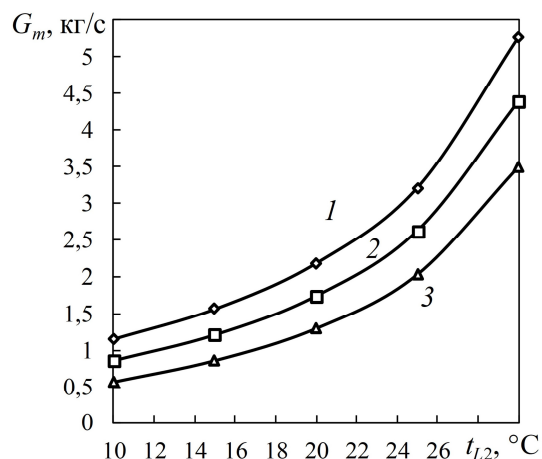


Рис. 3. Изменение массового расхода охлаждаемой воды в зависимости от ее температуры на выходе из ВГТО при различной температуре грунта $t_G, ^\circ\text{C}$: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15

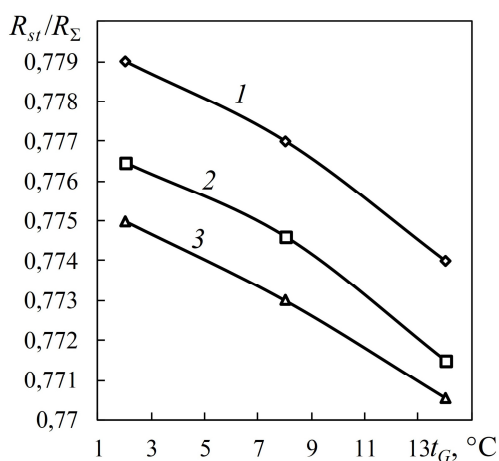


Рис. 4. Отношение термического сопротивления теплопроводности стенки трубы ВГТО к общему термическому сопротивлению в зависимости от температуры грунта при разностях температур теплоносителя на входе и на выходе из ВГТО $\Delta t, ^\circ\text{C}$: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30

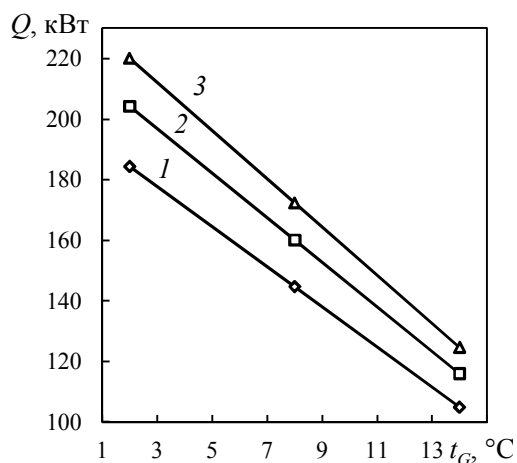


Рис. 5. Изменение теплового потока, отводимого с помощью ВГТО, в зависимости от температуры грунта при разных размерах труб $d_2 \times \delta, \text{мм}$: 1 – 32×3,0; 2 – 50×4,6; 3 – 75×6,8

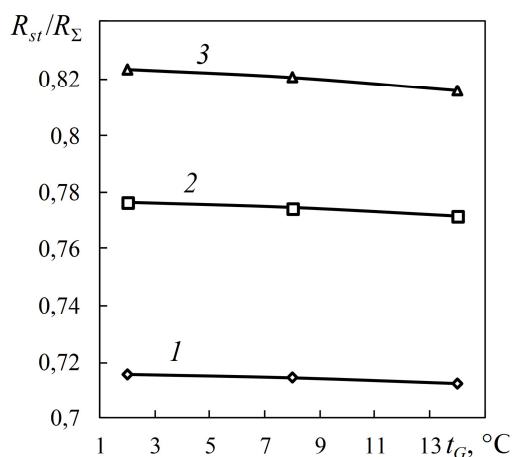


Рис. 6. Отношение термического сопротивления теплопроводности стенки трубы ВГТО к общему термическому сопротивлению в зависимости от температуры грунта при разных размерах труб $d_2 \times \delta, \text{мм}$: 1 – 32×3,0; 2 – 50×4,6; 3 – 75×6,8

Анализируя данные, представленные на рис. 6, видно, что уменьшение диаметра и толщины стенки трубы ВГТО приводит к снижению вклада термического сопротивления теплопроводности стенки в общее термическое сопротивление. Так, например, при уменьшении размера трубы с 75×6,8 до 32×3,0 мм наблюдается снижение вклада термического сопротивления теплопроводности стенки на 14,5–15,0 % в зависимости от температуры грунта.

Заключение

Проведенные численные исследования позволяют произвести подбор наиболее рациональных режимных и конструктивных параметров работы ВГТО, включенных в систему дополнительного охлаждения масляных трансформаторов. При этом установлено, что основное сопротивление теплопередаче сосредоточено в стенках труб ВГТО, изготовленных из полиэтилена. В связи с этим целесообразным является замена полиэтиленовых труб, например, на стальные. Это позволит увеличить тепловой поток, отводимый в ВГТО в десятки раз, либо при достаточном тепловом потоке существенно снизить поверхность теплообмена.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что использование предлагаемой системы жидкостного охлаждения силовых масляных трансформаторов с помощью термоэлектрических модулей и ВГТО позволит дополнительно в моменты пиковых тепловых нагрузок отводить до 50 % тепла. При этом ожидаемое повышение мощности трансформатора в зависимости от его рабочих характеристик составит 25–40 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-4522.2018.8 (договор № 14.Z56.18.4522-МК от 17 января 2018 г.).

Литература

1. Киш, Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Л. Киш; пер. с венг. М.А. Бики; под ред. Г.Е. Тарле. – М.: Энергия, 1980. – 180 с.
2. Готтер, Г. Нагревание и охлаждение электрических машин / Г. Готтер; пер. с нем. под ред. В.В. Мальцева. – М.: Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 264 с.
3. Тепловая нагрузка бака силового трансформатора при глубоком насыщении магнитной системы / В.В. Вахнина, В.Н. Кузнецов, В.А. Шаповалов, Д.А. Кретов // Вектор науки ТГУ. – 2011. – № 4. – С. 74–79.
4. Use of health index and reliability data for transformer condition assessment and fleet ranking / P. Picher, J.F. Boudreau, A. Manga et al. // 45th CIGRE Session, Paris (France), 2014, report A2_101.
5. Голунов, А.М. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов / А.М. Голунов, Н.С. Сеценко. – М.: Энергия, 1976. – 214 с.
6. Yun, S.-Y. Development of overload evaluation system for distribution transformers using load monitoring data / S.-Y. Yun, C.-H. Park, I.-K. Song // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2013. – Vol. 44, iss. 1. – P. 60–69. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.07.006
7. Numerical investigation of oil flow and temperature distributions for ON transformer windings / X. Zhang, Z. Wang, Q. Liu et al. // Applied Thermal Engineering. – 2018. – Vol. 130. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.092
8. Сушков, В.В. Моделирование тепловых процессов и диагностирование силовых трансформаторов систем электроснабжения нефтяных месторождений / В.В. Сушков, А.А. Зябкин // Промышленная энергетика. – 2013. – № 2. – С. 39–42.
9. Calculation of the lowest currents caused by turn-to-turn short-circuits in power transformers / A. Wiszniewski, K. Solak, W. Rebizant, L. Schiel // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2018. – Vol. 95. – P. 301–306. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.08.028
10. Analysis of anti-short circuit strength on windings for ITER-PPEN power transformer / Z. Yang, P. Fu, J. Jiang et al. // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 121. – P. 319–324. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.05.033
11. Булат, Л.П. Термоэлектрическое охлаждение: состояние и перспективы / Л.П. Булат // Холодильная техника. – 2004. – № 8. – С. 2–7.
12. Dmitriev, A.V. Prospects for the Use of Additional Cooling System for the Oil-Immersed Transformers with Thermoelectric Transducers / A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, I.N. Madyshev // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 95. – P. 15008. DOI: 10.1051/mateconf/20179515008
13. Sajid, M. An overview of cooling of thermoelectric devices / M. Sajid, I. Hassan, A. Rahman // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 78. – P. 15–22. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.098
14. Weerasinghe, R. Numerical and experimental investigation of thermoelectric cooling in down-hole measuring tools; a case study / R. Weerasinghe, T. Hughes // Case Studies in Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 10. – P. 44–53. DOI: 10.1016/j.csite.2017.02.002
15. Пат. 169927 Российская Федерация. Термоэлектрическое устройство для охлаждения жидкости / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев, А.Н. Николаев; заявитель и патентообладатель Казан. нац. иссл. техн. ун-т. – № 2016119822; заявл. 23.05.2016; опублик. 06.04.2017, Бюл. № 10. – 2 с.
16. Филатов, С.О. Работа теплообменников утилизации теплоты грунта / С.О. Филатов, В.И. Володин // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2011. – № 3. – С. 179–184.
17. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу

процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – М.: Альянс, 2013. – 576 с.

18. Lee, M. Nusselt number correlation for natural convection from vertical cylinders with triangular fins / M. Lee, H.J. Kim, D.-K. Kim // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 93. – P. 1238–1247. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.105

19. Heat and mass transfer / F. Kreith, R.F. Boehm,

et. al.; Ed. Frank Kreith. – Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. – 288 p.

20. Определение коэффициента конвективной теплоотдачи в трубе при переходном режиме течения и больших числах Грасгофа / Г.М. Михайлов, В.Г. Михайлов, Л.А. Кондакова, Л.С. Рева // *Теоретические основы химической технологии*. – 2007. – Т. 41, № 4. – С. 439–441. DOI: 10.1134/S0040579507040124

Дмитриев Андрей Владимирович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань; ieremiada@gmail.com.

Дмитриева Оксана Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, кафедра «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань; ja_deva@mail.ru.

Мадышев Ильнур Наиллович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, кафедра «Оборудование пищевых производств», Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань; ilnyr_91@mail.ru.

Поступила в редакцию 1 февраля 2018 г.

DOI: 10.14529/power180108

USE OF ADDITIONAL COOLING OF OIL TRANSFORMERS IN THE JOINT OPERATION OF THERMOELECTRIC CONVERTERS AND GROUND-COUPLED HEAT EXCHANGERS

A.V. Dmitriev¹, ieremiada@gmail.com,

O.S. Dmitrieva¹, ja_deva@mail.ru,

I.N. Madyshev², ilnyr_91@mail.ru

¹ Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation,

² Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

Transformers belong to the main equipment of power plants, raising, lowering and distribution substations, as well as various types of converter devices. In the process of operating oil transformers, damage or defects can occur, the timely detection of which enables taking measures to prevent their furtherance and to keep the equipment intact. Severe consequences are caused by damage to the windings and main insulation of the transformers as it might bring about malfunctions in the cooling system. Existing cooling devices are not always efficient. We have developed a complementary cooling system for power transformers with thermoelectric converters. The operating principle of the device is based on the following: at night, when the ambient temperature is the lowest, water ice is produced the melting of which keeps the transformer oil cold in the hottest daytime. Two operating states of the developed device are described. We also herein present a mathematical description of the water cooling process. We have analyzed the results of studies consisting in evaluating the alteration in the heat flow drawn by vertical ground-coupled heat exchangers. The results of the research show it is possible to use the system for thermoelectric module- and VGHE-enabled liquid cooling of power oil transformers that will allow to draw up to 50% of heat at peak thermal loads, whereas the transformer power is expected to increase by 25–40% depending on the specifications.

Keywords: transformer, heat exchanger, cooling, thermoelectric converter, heat flow.

References

1. Kish L. *Nagrev i okhlazhdenie transformatorov* [Heating and Cooling of Transformers]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 180 p.

2. Gotter G. *Nagrevanie i okhlazhdenie elektricheskikh mashin* [Heating and Cooling of Electrical Machines]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1961. 264 p.

3. Vakhnina V.V., Kuznetsov V.N., Shapovalov V.A., Kretov D.A. [Thermal Load of the Power Transformer

- Tank with Deep Saturation of the Magnetic System]. *Vektor nauki TGU* [Vector of Science of TSU], 2011, no. 4, pp. 74–79. (in Russ.)
4. Picher P., Boudreau J.F., Manga A., Rajotte C., Tardif C., Bizier G., Di Gaetano N., Garon D., Girard B., Hamel J.F., Proulx S. Use of Health Index and Reliability Data for Transformer Condition Assessment and Fleet Ranking. *45th CIGRE Session, Paris (France)*, 2014, report A2_101.
 5. Golunov A.M., Seshchenko N.S. *Okhlazhdayushchie ustroystva maslyanykh transformatorov* [Cooling Devices of Oil Transformers]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 214 p.
 6. Yun S.-Y., Park C.-H., Song I.-K. [Development of Overload Evaluation System for Distribution Transformers Using Load Monitoring Data]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, vol. 44, iss. 1, pp. 60–69. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.07.006
 7. Zhang X., Wang Z., Liu Q., Jarman P., Negro M. [Numerical Investigation of Oil Flow and Temperature Distributions for ON Transformer Windings]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 130, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.092
 8. Sushkov V.V., Zhabkin A.A. [Modeling Thermal Processes and Diagnosis of Power Transformers in Oil-Field Power Supply Systems]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 2013, no. 2, pp. 39–42. (in Russ.)
 9. Wiszniewski A., Solak K., Rebizant W., Schiel L. [Calculation of the Lowest Currents Caused by Turn-to-Turn Short-Circuits in Power Transformers]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, vol. 95, pp. 301–306. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.08.028
 10. Yang Z., Fu P., Jiang J., Liu X., Huang Y., Liu Q., Liu D. [Analysis of Anti-short Circuit Strength on Windings for ITER-PPEN Power Transformer]. *Fusion Engineering and Design*, 2017, vol. 121, pp. 319–324. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.05.033
 11. Bulat L.P. [Thermoelectric Cooling: State and Prospects]. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration Engineering], 2004, no. 8, pp. 2–7. (in Russ.)
 12. Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N. Prospects for the Use of Additional Cooling System for the Oil-Immersed Transformers with Thermoelectric Transducers. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 95, p. 15008. DOI: 10.1051/mateconf/20179515008
 13. Sajid M., Hassan I., Rahman A. An Overview of Cooling of Thermoelectric Devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 78, pp. 15–22. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.098
 14. Weerasinghe R., Hughes T. Numerical and Experimental Investigation of Thermoelectric Cooling in Down-Hole Measuring Tools; a Case Study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2017, vol. 10, pp. 44–53. DOI: 10.1016/j.csite.2017.02.002
 15. Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N., Nikolaev A.N. *Termoelektricheskoe ustroystvo dlya okhlazhdeniya zhidkosti* [Thermoelectric Device for Liquid Cooling]. Patent RF, no. 169927, 2017.
 16. Filatov S.O., Volodin V.I. [Operation of Ground-Coupled Heat Exchangers]. *Trudy BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv* [Proceedings of BSTU. Chemistry and Technology of Inorganic Substances], 2011, no. 3, pp. 179–184. (in Russ.)
 17. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Cases and Problems for Courses in Chemistry Technology Processes and Machines]. Moscow, Al'yanS Publ., 2013. 576 p.
 18. Lee M., Kim H.J., Kim D.-K. [Nusselt Number Correlation for Natural Convection from Vertical Cylinders with Triangular Fins]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 93, pp. 1238–1247. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.105
 19. Kreith F., Boehm R.F. et al. *Heat and Mass Transfer*. Boca Raton, CRC Press LLC, 1999. 288 p.
 20. Mikhailov G.M., Mikhailov V.G., Kondakova L.A., Reva L.S. [Finding the Factor of Convective Heat Transfer in a Pipe for Transient Flow at High Grashof Numbers]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2007, vol. 41, no. 4, pp. 414–416. DOI: 10.1134/S0040579507040124

Received 1 February 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Дмитриев, А.В. Использование дополнительного охлаждения масляных трансформаторов при совместной работе термоэлектрических преобразователей и грунтовых теплообменников / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 61–67. DOI: 10.14529/power180108

FOR CITATION

Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N. Use of Additional Cooling of Oil Transformers in the Joint Operation of Thermoelectric Converters and Ground-Coupled Heat Exchangers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 61–67. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180108