

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ТРАНСФОРМАТОРА С КРИОГЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ *

С.Е. ШЕИН

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры технической теплофизики. E-mail: ser1998qwert@gmail.com

Одна из актуальных задач в области энергосбережения сегодня – экономия потерь электрической энергии в трансформаторных установках, на которые приходится до 50 % потерь. При прохождении электрического тока по проводнику с конечным сопротивлением возникают потери энергии на выделение теплоты. Одним из способов решения данной проблемы является переход на обмотки, работающие в режиме высокотемпературной сверхпроводимости. Благодаря этому на обмотках трансформатора не выделяется теплота, следовательно, нет необходимости в устаревших сложных системах охлаждения трансформатора, энергетически малоэффективных. Также при достижении эффекта сверхпроводимости реализуется процесс ограничения токов короткого замыкания, что обеспечивает безопасную эксплуатацию трансформатора [3]. В настоящее время появились соответствующие материалы, которые позволяют получать условия сверхпроводимости при температуре жидкого азота, что существенно проще и дешевле, чем при работе на жидком гелии [1–3]. Данный вид трансформатора компактен, поэтому может использоваться в военной и гражданской технике для получения постоянного или переменного тока высокого напряжения, например на крупных морских судах, либо в электрообеспечении мегаполисов. Одной из проблем при реализации работы такой установки является разработка эффективной системы тепловой защиты обмоток и сердечника с учетом нестационарности тепловых процессов, позволяющей длительное время работать в условиях положительных температур окружающей среды. В данной работе рассмотрены процессы теплопередачи через стенку прототипа трансформатора из полимерных материалов и выведена зависимость расхода жидкого хладагента от толщины изоляции.

Ключевые слова: криостат, теплообмен, жидкий азот, трансформатор, полимерные материалы, криогеника, тепловая изоляция, сверхпроводимость

* Статья получена 02 октября 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Теплотехнический расчет и определение оптимальных материалов для изготовления криостата и теплоизоляции позволяет уменьшить расход жидкого азота за счет уменьшения теплопритоков от внешней среды, а варьируя теплоемкость и массу криостата и используя для расчета различные материалы, можно уменьшить количество теплоты, необходимое для выхолаживания (предварительного охлаждения) трансформатора.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для расчета процесса сложного радиационно-конвективного теплообмена через многослойную стенку криостата используется дифференциальное уравнение теплопроводности для стационарного процесса в плоской стенке, уравнение Ньютона–Рихмана и закон Фурье (для учета теплопередачи теплопроводностью) и Стефана–Больцмана (для учета радиационного теплообмена):

$$\frac{\delta^2 t}{\delta x^2} = 0,$$

$$Q = \alpha F \cdot \Delta T,$$

$$Q = -\lambda \cdot \text{grad}(T),$$

$$Q = \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

2. РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Решая уравнения теплопроводности в программной среде Mathcad, можно определить объемные расходы жидкого азота, а также построить графическую зависимость этого параметра от толщины изоляции.

Зная толщины слоев и коэффициенты теплопроводности, можно получить коэффициент теплопередачи теплопроводностью через многослойную стенку с внешней и с внутренней стороны криостата:

$$k1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{\delta_{cr}}{\lambda_{cr}} + \frac{\delta_{izo}}{\lambda_{izo}} + \frac{\delta_{N2}}{\lambda_{N2}} + \frac{1}{\alpha_{N2}}} = 0.738 \text{ [Вт/м}^2 \cdot \text{град]},$$

$$k2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{\delta_{cr}}{\lambda_{cr}} + \frac{1}{\alpha_{N2}}} = 3.839 \text{ [Вт/м}^2 \cdot \text{град]}.$$

Удельные тепловые потоки от теплопередачи теплопроводностью через многослойную стенку определяются из уравнения Ньютона–Рихмана:

$$q1 = k1(T_{sreda} - T_{N2}) = 160.709 \text{ [Вт/м}^2\text{]},$$

$$q2 = k2(T_{serdec} - T_{N2}) = 482.726 \text{ [Вт/м}^2\text{]}.$$

Удельные тепловые потоки от радиационного теплообмена определяются из уравнения Стефана–Больцмана:

$$q_{r1} = \varepsilon_{pr} c_0 \left[\left(\frac{T_{sreda}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{N2}}{100} \right)^4 \right] = 371.914 \text{ [Вт/м}^2\text{]},$$

$$q_{r2} = \varepsilon_{pr} c_0 \left[\left(\frac{T_{serdec}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{N2}}{100} \right)^4 \right] = 82.101 \text{ [Вт/м}^2\text{]}.$$

Полные тепловые потоки определяются с учетом двух удельных тепловых потоков:

$$Q1 = (q1 + q_{r1})S1 = 138.482 \text{ [Вт]},$$

$$Q2 = (q2 + q_{r2})S2 = 73.427 \text{ [Вт]}.$$

Зная полные теплопотоки, плотность и коэффициент удельного парообразования жидкого азота, можно определить объемные расходы хладагента:

$$G_v = \frac{Q1 + Q2}{r_{N2} \cdot \rho_{N2}} 10^6 \cdot 60^2 = 4744 \text{ [мл/ч]}.$$

А также количество жидкого азота, необходимое для выхолаживания сосуда:

$$V_{vh} = \frac{\rho_{cr} \cdot V_{cr} \cdot c_{cr} (T_{sreda} - T_{N2})}{r_{N2} \cdot \rho_{N2}} 10^3 = 3.288 \text{ [л]}.$$

Изменяя толщину изоляции, можно уменьшать тепловые потоки, а следовательно, и расход жидкого азота (рис. 1).

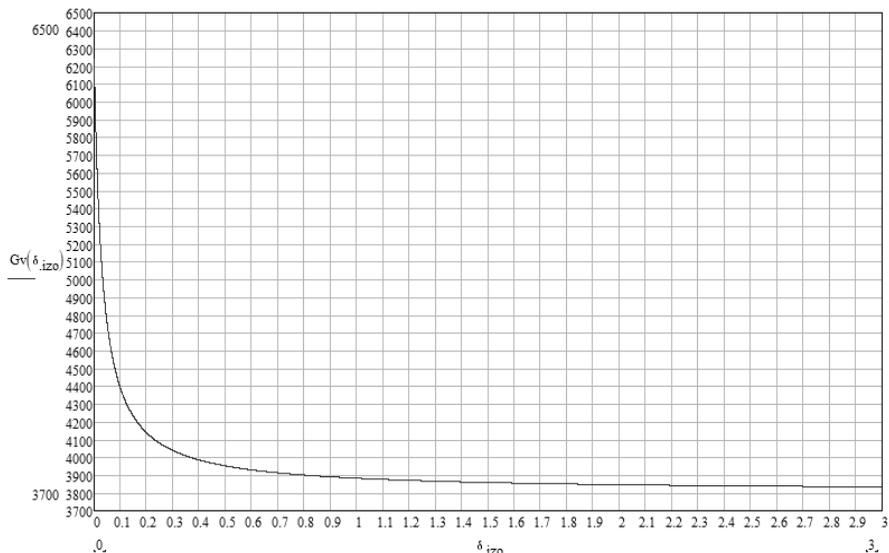


Рис. 1. Зависимость объемного расхода жидкого азота G_v [мл\ч] от толщины изоляции δ_{izo} [м]

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

В данной работе была спроектирована 3D-модель криостата для жидкого азота, которая в дальнейшем может быть изготовлена с помощью аддитивных технологий (3D-принтер) или собрана из листов ABS пластика. В программной системе с использованием метода конечно-элементного анализа (МКЭ) Ansys Workbench было смоделировано воздействие фазового процесса кипения жидкого азота (-195.75 °C) на процессы теплопроводности внутренних стенок криостата из ABS-пластика (с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0.26$ Вт/м·К [5, 8]) во внешней среде с температурой 20 °C и получены распределения температур и тепловых потоков (рис. 2–6). Полученные данные могут служить основой для разработки теплоизоляции с помощью рубашки из отработанного газообразного азота [6, 12]. Данный криостат будет использоваться для собранного на кафедре энергообеспечения производств НГТУ прототипа однофазного трансформатора (рис. 5, 6) с высокотемпера-

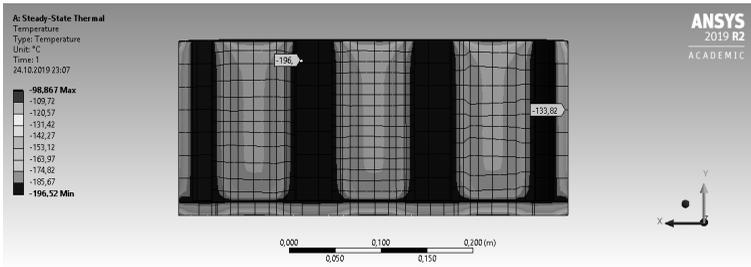


Рис. 2. Распределение температур в сечении трехфазного трансформатора

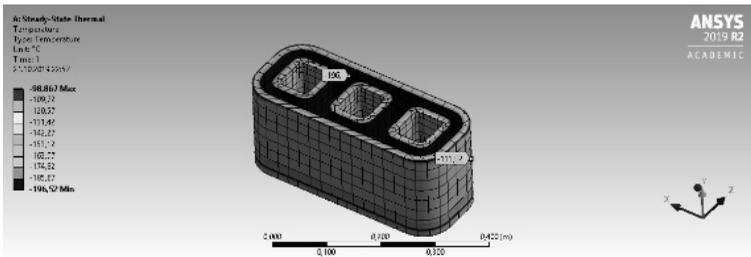


Рис. 3. Распределение температур на поверхности трехфазного трансформатора

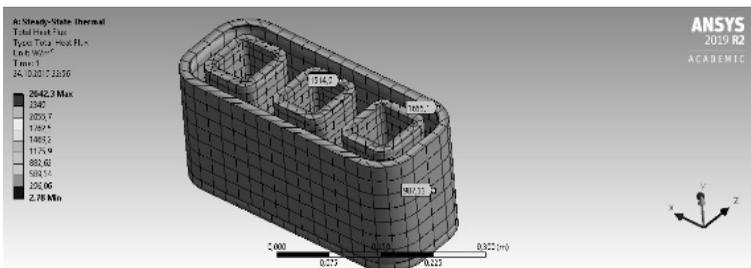


Рис. 4. Распределение тепловых потоков, проходящих через стенки трехфазного трансформатора

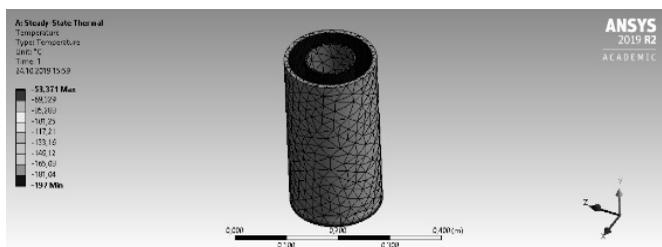


Рис. 5. Распределение температур на поверхности однофазного трансформатора

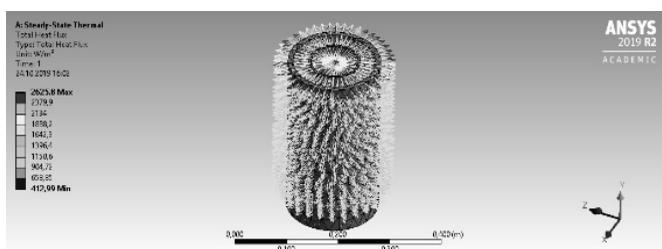


Рис. 6. Тепловые потоки проходящие через стенки однофазного трансформатора

турной сверхпроводящей (ВТСП) обмоткой, и в дальнейшем планируется создание более мощного трехфазного трансформатора (рис. 2–4) по такому же принципу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были исследованы процессы теплопередачи с учетом радиационного теплообмена через многослойную стенку однофазного трансформатора и определены зависимости расхода жидкого азота от толщины изоляции и необходимый объем хладагента для выхолаживания сосуда перед запуском трансформатора. Определены температуры поверхностей криостата и тепловые потоки с использованием метода конечно-элементного анализа (МКЭ) в программном пакете Ansys Workbench.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбачев М.В. Тепломассообмен: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 441 с.

2. Манусов В.З., Орлов Д.В. Оценка технического состояния трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой по методу анализа иерархий // Новое в российской электроэнергетике. – 2018. – № 5. – С. 17–30.
3. Манусов В.З., Павлюченко Д.А., Ахьёев Д.С. Анализ процессов ограничения токов короткого замыкания трансформатором с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – № 1 (33). – С. 1–7.
4. Гинзбург В., Андриюшин Е. Сверхпроводимость. – М.: Альфа-М, 2006. – 112 с.
5. Новиченок Н.Л., Шульман З.П. Теплофизические свойства полимеров. – Минск: Наука и техника, 1971. – 120 с.
6. Шеин С.Е., Чичиндаев А.В. Исследование эффективности тепловой изоляции в трансформаторе с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой // Наука. Промышленность. Оборона: труды 20 Всероссийской научно-технической конференции, Новосибирск, 17–19 апр. 2019 г.: в 4 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – Т. 1. – С. 189–192.
7. Применение полимерных композиционных материалов в криогенном оборудовании / НПО «Криогенмаш»; сост. Л.А. Буров. – М., 1987. – 55 с.
8. Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Пластические массы: свойства и применение: справочник. – 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1978. – 384 с.
9. Солнцев Ю.П., Ермаков Б.С., Слепцов О.И. Материалы для низких и криогенных температур: энциклопедический справочник. – СПб.: Химиздат, 2008. – 770 с.
10. Вентура Г., Ризегари Л. Искусство криогеники: низкотемпературная техника в физическом эксперименте, промышленных и аэрокосмических приложениях: пер. с англ. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 336 с.
11. Скотт Р.Б. Техника низких температур: пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 417 с.
12. Чичиндаев А.В., Шеин С.Е. Исследование эффективности тепловой изоляции в трансформаторе с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой // 35 Сибирский теплофизический семинар: Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых: тезисы докладов, Новосибирск, 27–29 авг. 2019 г. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2019. – С. 244.
13. Kalsi S. Applications of high temperature superconductors to electric power equipment. – Hoboken, NJ: Wiley; Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011. – 332 p.
14. Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
15. Новицкий Л.А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. – М.: Машиностроение, 1975. – 204 с.

16. Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. – М.: Энергия, 1977. – 289 с.

17. Микулин Е.И. Криогенная техника. – М.: Машиностроение, 1969. – 137 с.

Шейн Сергей Евгеньевич, студент кафедры технической теплофизики. Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – процессы теплообмена в твердых телах, холодильные машины. E-mail: ser1998qwert@gmail.com

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-187-196

Development of heat protection for cryogen cooled transformer*

S.E. Shein

630073, Russian Federation, Novosibirsk, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk State Technical University, student department of technical thermophysics. Email: ser1998qwert@gmail.com

One of the urgent tasks in the field of energy saving today is the saving of electric energy losses in transformer plants, which account for up to 50% of losses. When an electric current passes through a conductor with a finite resistance, energy losses are generated by the release of heat. One way to solve this problem is to switch to windings operating in the high-temperature superconductivity mode. Due to this, heat is not released on the transformer windings, therefore, there is no need for outdated complex transformer cooling systems that are energy inefficient. Also, when the effect of superconductivity is achieved, the process of limiting short circuit currents is implemented, which ensures the safe operation of the transformer [3]. At present, corresponding materials have appeared that make it possible to obtain superconductivity conditions at the temperature of liquid nitrogen, which is much simpler and cheaper than when working on liquid helium [1-3]. This type of transformer is compact, therefore, it can be used in military and civilian equipment to obtain direct or alternating current of high voltage, for example, on large sea vessels, or in power supply of megacities. One of the problems in implementing the work of such an installation is the development of an effective thermal protection system for the windings and the core, taking into account the non-stationary nature of thermal processes, which allows working for a long time in conditions of positive ambient temperatures. In this paper, heat transfer processes through the wall of a prototype transformer made of polymer materials are considered, and the dependence of the flow of liquid refrigerant on the thickness of the insulation is derived.

Keywords: cryostat, heat transfer, liquid nitrogen, transformer, polymeric materials, cryogenics, thermal insulation, superconductivity

* Received 02 October 2019.

REFERENCES

1. Gorbachev M. V. Gorbachev M.V. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2015. 441 p.
2. Manusov V.Z., Orlov D.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya transformatorov s vy-sokotemperaturnoi sverkhprovodyashchei obmotkoi po metodu analiza ierarkhii [Evaluation of the technical condition of transformers with a high-temperature superconducting winding by the method of hierarchy analysis]. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike – New in the Russian Electrical Power-Engineering*, 2018, no. 5, pp. 17–30.
3. Manusov V.Z., Pavlyuchenko D.A., Ahyoev J.S. Analiz protsessov ograni-cheniya tokov korotkogo zamykaniya transformatorom s vysokotemperaturnymi sverkhprovodyashchimi obmotkami [Analysis of processes for limiting short-circuit currents by a transformer with high-temperature superconducting windings]. *Problemy regional'noi energetiki – Problems of the Regional Energetics*, 2017, no. 1 (33), pp. 1–7. (In Russian).
4. Ginzburg V., Andryushin E. *Sverkhprovodimost'* [Superconductivity]. Moscow, Al'fa-M Publ., 2006. 112 p.
5. Novichenok N.L., Shul'man Z.P. *Teplofizicheskie svoystva polimerov* [Thermophysical properties of polymers]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1971. 120 p.
6. Shein S.E., Chichindaev A.V. [Study of the efficiency of thermal insulation in a transformer with a high-temperature superconducting winding]. / *Nauka. Promyshlennost'. Oborona: trudy 20 Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Science. Industry. Defense], Novosibirsk, April 17–19, 2019, vol. 1, pp. 189–192. (In Russian).
7. Burov L.A., comp. *Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov v kriogenom oborudovanii* [The use of polymer composite materials in cryogenic equipment]. NPO “Cryogenmash”. Moscow, 1987. 55 p.
8. Katsnel'son M.Yu., Balaev G.A. *Plasticheskie massy: svoystva i primeneniye: spravochnik* [Plastics: properties and applications: reference]. 3rd ed., revised. Leningrad, Khimiya Publ., 1978. 384 p.
9. Solntsev Yu.P., Ermakov B.S., Sleptsov O.I. *Materialy dlya nizkikh i kriogennykh temperatur: entsiklopedicheskii spravochnik* [Materials for low and cryogenic temperatures. Encyclopedic reference]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2008. 770 p.
10. Ventura G., Risegari L. *The art of cryogenics: low-temperature experimental techniques*. Amsterdam, Boston, Elsevier, 2008 (Russ. ed.: Ventura G., Rizegari L. *Iskusstvo kriogeniki. Nizkotemperaturnaya tekhnika v fizicheskoy eksperimente, promyshlennykh i aerokosmicheskikh prilozheniyakh*. Dolgoprudnyi, Intellect Publ., 2011. 336 p.).

11. Scott R.B. *Cryogenic engineering. Prepared for the Atomic Energy Commission*. Princeton, NJ, Van Nostrand, 1959 (Russ. ed.: Skot R.B. *Tekhnika nizkikh temperature*. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1962. 417 p.).
12. Chichindaev A.V., Shein S.E. [Research on the efficiency of thermal insulation in a transformer with a high-temperature superconducting winding]. *35 Sibirskii teplofizicheskii seminar* [35th Siberian Thermophysical Seminar], Novosibirsk, August 27–29, 2019. Novosibirsk, IT SB RAS Publ., 2019, p. 244. (In Russian).
13. Kalsi S. *Applications of high temperature superconductors to electric power equipment*. Hoboken, NJ, Wiley, Piscataway, NJ, IEEE Press, 2011. 332 p.
14. Malkov M.P. *Spravochnik po fiziko-tehnicheskim osnovam kriogeniki* [Handbook of the physical and technical foundations of cryogenics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 432 p.
15. Novitskii L.A. *Teplofizicheskie svoistva materialov pri nizkikh temperaturakh* [Thermophysical properties of materials at low temperatures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 204 p.
16. Grigor'ev V.A., Pavlov Yu.M., Ametistov E.V. *Kipenie kriogennykh zhidkostei* [Boiling of cryogenic liquids]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 289 p.
17. Mikulin E.I. *Kriogennaya tekhnika* [Cryogenic technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 137 p.

Для цитирования:

Шейн С.Е. Разработка тепловой защиты для трансформатора с криогенным охлаждением // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 3–4 (96). – С. 187–196. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-187-196.

For citation:

Shein S.E. Razrabotka teplovoi zashchity dlya transformatora s kriogennym okhlazhdeniem [Development of heat protection for cryogen cooled transformer]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3–4 (96), pp. 187–196. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-187-196.