

УДК 62-65

Расчет тепловых потерь в комбинированной фильтрокомпенсирующей установке

А. В. Агунов¹, А. А. Карабанов², И. А. Терехин¹, И. А. Баранов¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», Российская Федерация, 196641, Санкт-Петербург, п. Металлострой, промзона «Металлострой», 3/2

Для цитирования: Агунов А. В., Карабанов А. А., Терехин И. А., Баранов И. А. Расчет тепловых потерь в комбинированной фильтрокомпенсирующей установке // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 92–103. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-92-103

Аннотация

Цель: Выполнить расчет тепловых потерь в комбинированной фильтрокомпенсирующей установке и провести оценку возможности применения воздушного охлаждения. **Методы:** Математическое и компьютерное моделирование расчета тепловых потерь комбинированной фильтрокомпенсирующей установки с учетом основных параметров преобразователя. **Результаты:** В работе представлены схемы и основные отличия установок компенсации реактивной мощности, применяемые в настоящее время на электрифицированных участках железных дорог. Выполнен расчет тепловых потерь комбинированной фильтрокомпенсирующей установки с учетом основных параметров преобразователя СГРМ на базе транзисторов IGBT. В программном комплексе ANSIS 18.2 разработана имитационная модель шкафа преобразователя и выполнен тепловой расчет охладителя. **Практическая значимость:** Результаты расчета тепловых потерь подтвердили возможность использования воздушного охлаждения в представленной комбинированной фильтрокомпенсирующей установке мощностью до 15 Мвар.

Ключевые слова: Комбинированная фильтрокомпенсирующая установка, устройство компенсации реактивной мощности, компенсация реактивной мощности, статический генератор реактивной мощности, расчет тепловых потерь, IGBT транзистор, тепловые потери, воздушное охлаждение.

Введение

В последние годы на сети железных дорог РФ с целью компенсации реактивной мощности нагрузки и снижения потерь в контактной сети стали широко применяться устройства компенсации реактивной мощности на базе преобразователей с транзисторами IGBT, мощность которых может достигать 20 Мвар [1]. В преобразователях такой мощности возникают значительные потери в виде тепловой энергии, которые могут превышать 300 кВт. Основные потери возникают в полупроводниковых приборах, их величина зависит от режима работы устройства компенсации реактивной мощности и связана с необходимостью регулирования. Тяговая нагрузка имеет активно-индуктивный характер, поэтому целесообразно разделить компенсации на две части: стационарную, с неизменной мощностью компенсации и регулируемую на основе преобразователя с транзисторами IGBT.

Преобразователь может обеспечить выработку реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного характера, что позволяет более полно использовать возможности преобразователя при меньшей мощности [2].

Основные отличия и состав оборудования комбинированной фильтрокомпенсирующей установки

Основное отличие комбинированной фильтрокомпенсирующей установки (КФКУ) от устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ) и устройства компенсации реактивной мощности с плавным регулированием (УКРМП) заключается в том, что КФКУ состоит из фильтрующего устройства (ФУ) и преобразователя (статический генератор реактивной мощности — СГРМ), которые включены параллельно. Схема КФКУ позволяет организовать компенсацию реактивной мощности с меньшими потерями на большую мощность, например, КФКУ мощностью 20 Мвар состоит из ФУ (10 Мвар) и СГРМ (10 Мвар). Схемы применяемых установок компенсации реактивной мощности изображены на рис. 1.

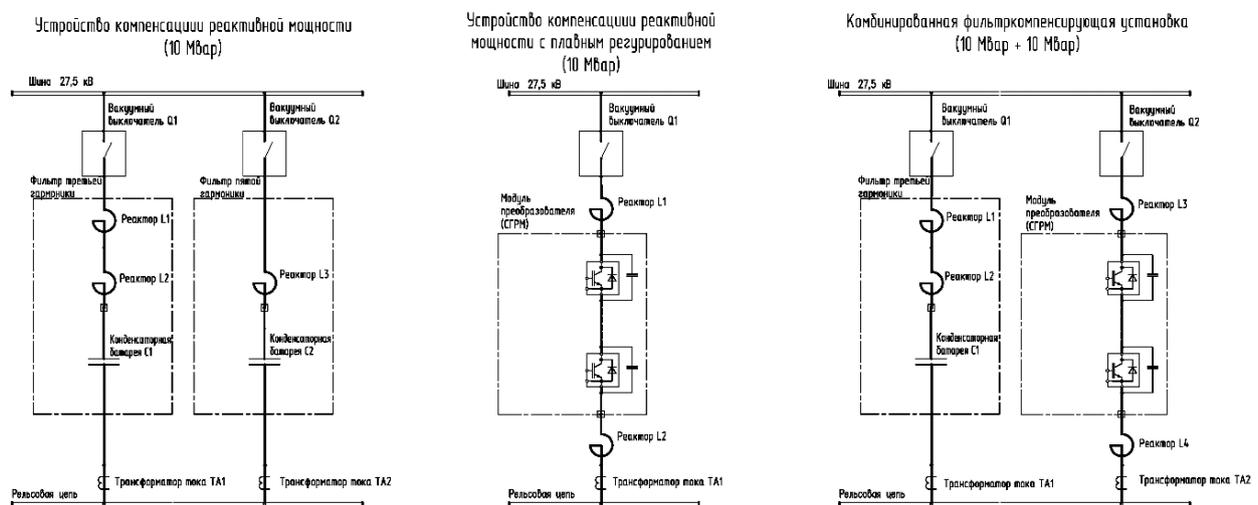


Рис. 1. Схемы применяемых установок компенсации реактивной мощности

Расчет тепловых потерь и определение основных параметров преобразователя

Расчет тепловых потерь и определение основных параметров преобразователя выполним для СГРМ на базе транзисторов IGBT мощностью 10 Мвар.

Большая часть подобного оборудования содержит жидкостное охлаждение, что является для подобного оборудования наиболее целесообразным. Однако по причине того, что устройства компенсации реактивной мощности, как правило, устанавливаются в местах расположения постов секционирования и (или) тяговых

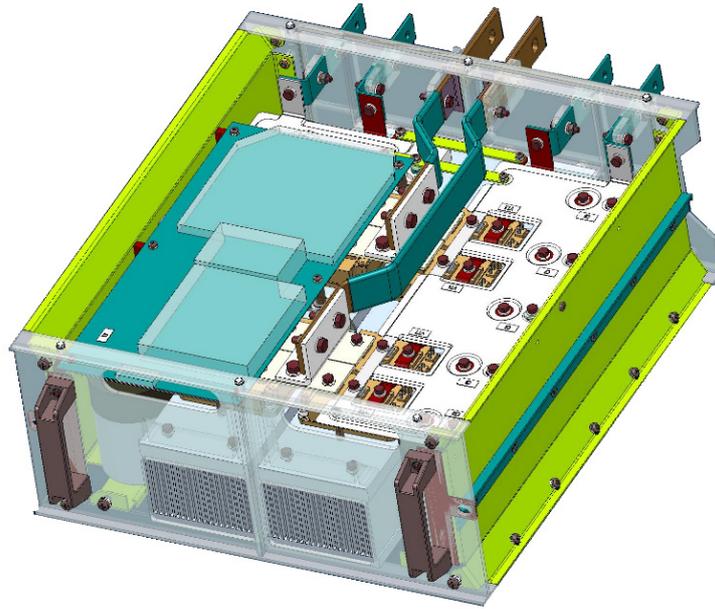


Рис. 2. Внешний вид силового модуля преобразователя

подстанций, которые находятся на значительном удалении от населенных пунктов вдоль путей железной дороги, то обслуживание и поддержание оборудования в рабочем состоянии преобразователя с жидкостным охлаждением становится очень проблематичным. Поэтому, принимая во внимание условия эксплуатации оборудования, предпочтение отдается воздушному охлаждению.

Для расчета тепловых потерь необходимо определить основные параметры СГРМ, выбрать номинальную мощность и подобрать необходимое силовое оборудование (транзисторы IGBT, конденсаторы, реакторы и т. д.). Для упрощения выполним расчет тепловых потерь в преобразователе КФКУ для отдельного шкафа преобразователя (ШП), где основными источниками тепловыделения являются транзисторы IGBT, установленные в силовых модулях. Расчетное количество транзисторов в одном ШП — 56 шт. (7 силовых модулей, в каждом силовом модуле по 8 транзисторов).

Транзисторы IGBT разместим в силовом модуле (рис. 2).

Параметры транзисторов IGBT (для расчетов используем прибор: 2MBI200VH-170-50):

- максимально допустимая температура перехода — $T_j = 150 \text{ }^\circ\text{C}$;
- тепловое сопротивление «переход — корпус» — $R_{th} = 0,0125 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$;
- размеры контактной поверхности — $A \times B = 62 \times 108 \text{ мм}$;
- прямое падение напряжения при $I_{cp} = 200\text{А}$ и $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ — $U_f = 2,4 \text{ В}$.

Для рассеяния тепла, выделяемого модулем IGBT, будем использовать в расчетах алюминиевый охладитель со следующими характеристиками:

- размер контактной части охладителя — $A \times B = 500 \times 120 \text{ мм}$;

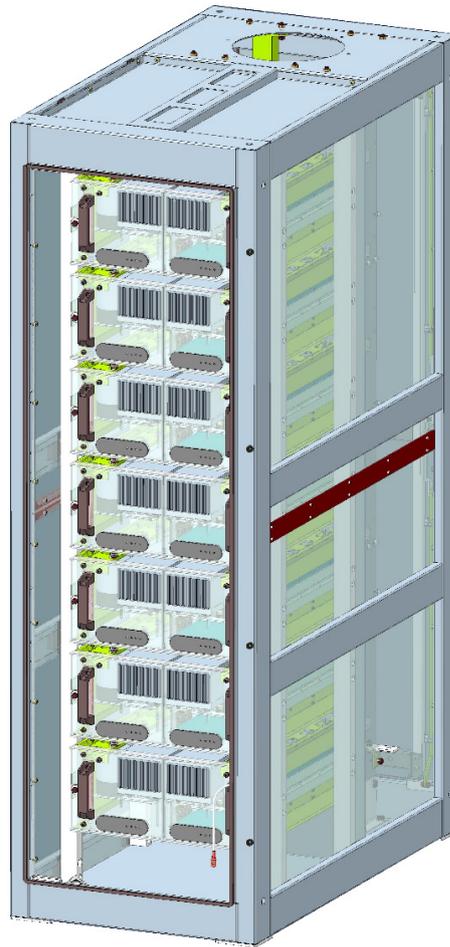


Рис. 3. Внешний вид шкафа преобразователя с установленными внутри силовыми модулями

– тепловое сопротивление охладителя при естественной вентиляции составляет — $R_{s-a} = 0,083 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

– толщина основания — $h = 23 \text{ мм}$;

– общая высота охладителя — $H = 112 \text{ мм}$.

Температуру окружающей среды — T_a примем $40 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Размещение силовых модулей в ШП изображено на рис. 3.

Потери в IGBT в проводящем состоянии согласно [3] рассчитываются по формуле:

$$P_{SS} = I_{CP} U_f \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \right), \quad (1)$$

где I_{CP} — максимальный ток, А;

$D = 0,95$ — максимальная скважность;

U_f — прямое падение напряжения в IGBT в насыщенном состоянии при $I_{CP} = 200 \text{ А}$ и $T_j = 125 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$P_{SS} = 200 \cdot 2,4 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{9,42} \right) = 108,4 \text{ Вт.}$$

Потери IGBT при коммутации согласно [3] рассчитываются по формуле:

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \left(\frac{(I_{CP}U_{CC})(t_{c(on)} + t_{c(off)})f_{SW}}{2} \right), \quad (2)$$

где $t_{c(on)}$, $t_{c(off)}$ — продолжительность переходных процессов по цепи коллектора IGBT на открывание $t_{c(on)}$ и закрывание $t_{c(off)}$ транзистора (примем расчетное значение $t_{c(on)} = 0,3-0,4$ мкс; $t_{c(off)} = 0,6-0,7$ мкс);
 U_{CC} — напряжение на коллекторе IGBT, В (коммутируемое напряжение, равное напряжению звена постоянного тока для системы АИН — ШИМ);
 f_{SW} — частота коммутаций ключей, Гц (частота ШИМ), в нашем случае 500 Гц.

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{(200 \cdot 500) \cdot (0,4 \cdot 10^{-6} + 0,7 \cdot 10^{-6}) \cdot 500}{2} = 24,2 \text{ Вт.}$$

Потери обратного диода FWD в проводящем состоянии согласно [3] рассчитываются по формуле:

$$P_{DS} = I_{EP}U_E \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \right), \quad (3)$$

где $I_{EP} \approx I_{CP}$ — максимальная амплитуда тока через обратный диод, А;
 U_E — прямое падение напряжения на диоде (в проводящем состоянии) при I_{EP} , В.

$$P_{DS} = 200 \cdot 2,25 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{9,42} \right) = 101,6 \text{ Вт.}$$

Результирующие потери IGBT с обратным диодом FWD:

$$P_T = P_{SS} + P_{SW} + P_{DS}; \quad (4)$$

$$P_T = 108,4 + 24,2 + 101,6 = 234,2 \text{ Вт.}$$

Получаем суммарные потери в ШП:

$$P_{\text{ШП}} = P_T \cdot 56;$$

$$P_{\text{ШП}} = 234,2 \cdot 56 = 13115,2 \text{ Вт.}$$

Расчет охладителя

Расчет максимально допустимого теплового сопротивления в соответствии с [3] производится по формуле:

$$R_{s-a}^{\max} = R_{ja} - R_{jc} - R_{cs} = \frac{T_j - T_a}{P} - R_{jc} - R_{cs}. \quad (6)$$

В соответствии с формулой (6) расчета теплового сопротивления одного транзистора:

$$R_{TH\text{тр}} = \frac{150 - 40}{209} - 0,0125 = 0,513 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Следовательно, при установке 4 транзисторов на одном охладителе получаем:

$$R_{TH\text{тр}}^4 = \frac{\left(\frac{150 - 40}{209} - 0,0125 \right)}{4} = 0,128 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Определения условий охлаждения прибора должно удовлетворять условию:

$$R_{s-a} \leq R_{TH\text{тр}}. \quad (7)$$

В соответствии с условием (7) $0,083 \leq 0,128$ выбранный охладитель можно использовать только при условии естественного охлаждения.

Расчет тепловыделения охладителя

Температура перехода транзистора по [3] рассчитывается следующим образом:

$$T_j = T_a + \left(R_{th(j-c)} + R_{c-s} + R_{s-a} \right) \cdot P_T, \quad (8)$$

где T_a — температура охлаждающей среды;

$R_{th(j-c)}$ — тепловое сопротивление переход — корпус;

R_{c-s} — тепловое сопротивление корпус — охладитель;

R_{s-a} — тепловое сопротивление охладитель — охлаждающая среда.

При $T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_{TH_{\text{тр}}} = 0,128 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ (с учетом, что используются 4 транзистора на одном охладителе), $R_{c-s} = 0,1 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, $R_{s-a} = 0,083 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ получаем:

$$T_j = 40 + (0,128 + 0,1 + 0,083) \cdot 234,2 = 112,83 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}} .$$

Тепловой расчет охладителя с использованием компьютерного моделирования в пакете ANSYS 18.2

Задача стационарной трехмерной теплопроводности решалась с помощью трехмерных конечно-элементных моделей, построенных в пакете ANSYS 18.2 [4].

На приведенных ниже рисунках представлены расчетные температурные поля при охлаждении приборов при различных условиях охлаждения.

Тепловой расчет охладителя при постоянной температуре окружающей среды $400 \text{ }^\circ\text{C}$ показан на рис. 4. Максимальная температура в месте перехода корпус — охладитель — $104 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тепловой расчет силового модуля, при условии температуры окружающей среды $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и направленного потока воздуха с скоростью 2 м/с , показан на рис. 5. Максимальная температура в месте перехода корпус — охладитель — $77,13 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тепловой расчет ШП с установленными силовыми модулями, при условии температуры окружающей среды $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и работе вытяжного вентилятора с максимальной производительностью $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$, показан на рис. 6. Максимальная температура в месте перехода корпус — охладитель — $88,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

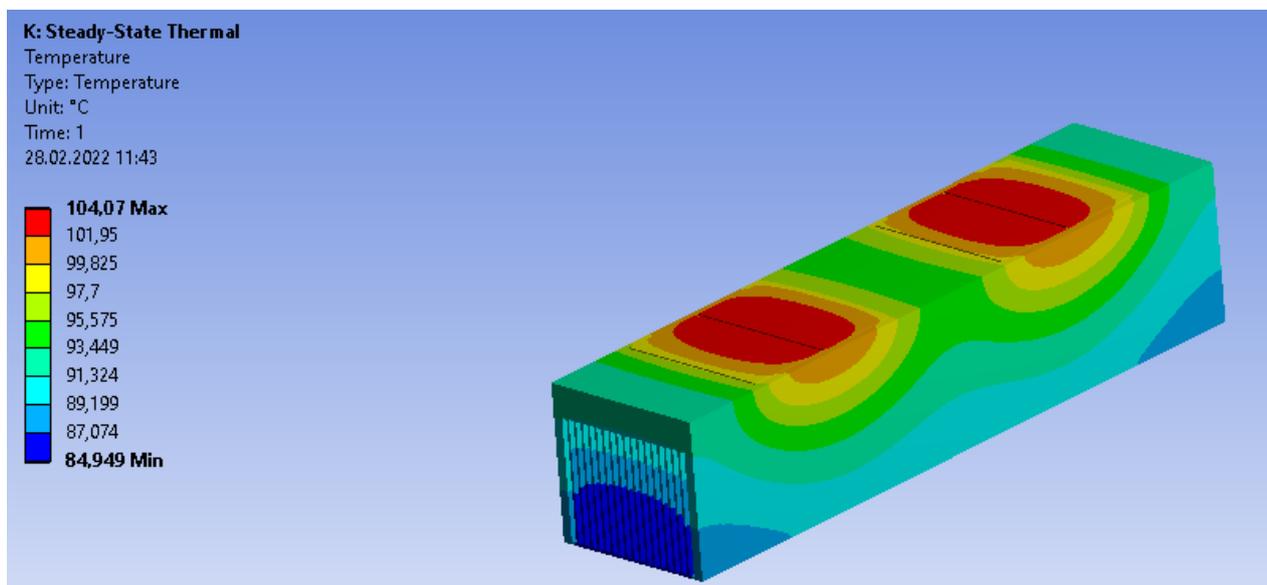


Рис. 4. Тепловой расчет охладителя при постоянной температуре окружающей среды $400 \text{ }^\circ\text{C}$

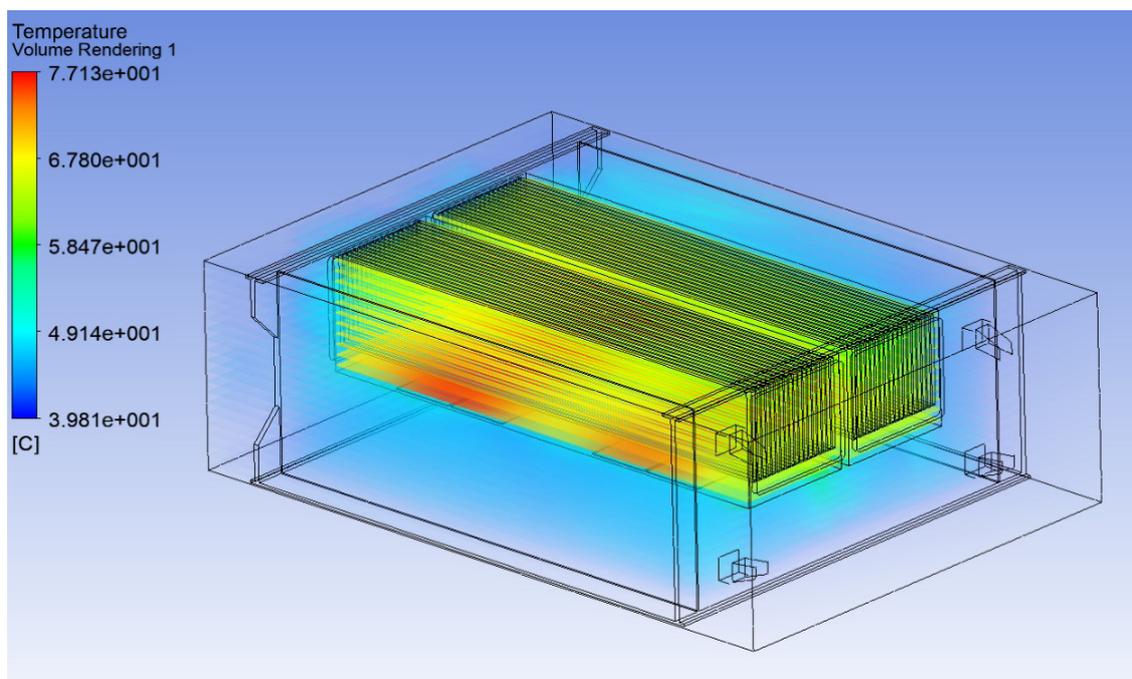


Рис. 5. Тепловой расчет силового модуля

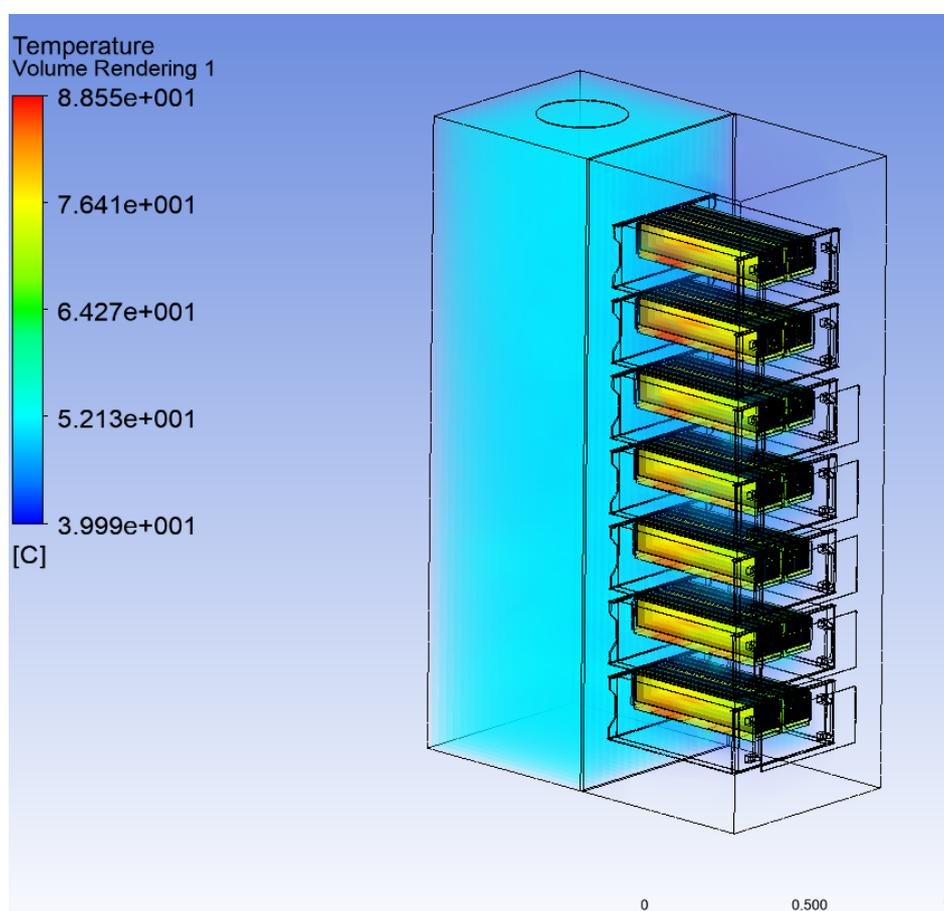


Рис. 6. Тепловой расчет ШП с установленными силовыми модулями

Суммарные потери преобразователя (СГРМ)

Рассчитаем потери на тепловую энергию в преобразователе (СГРМ) при расчетной мощности 10 Мвар:

$$P_{\text{СГРМ}} = P_{\text{ШП}} \cdot n, \quad (9)$$

где n — количество шкафов в преобразователе, шт.

$$P_{\text{СГРМ}} = 13\,115,2 \cdot 9 = 118\,036 \text{ Вт} = 118,03 \text{ кВт.}$$

Компоновочные решения КФКУ и выводы

Как показывают расчеты и практический опыт, потери на тепловую энергию только в одном преобразователе (СГРМ), состоящем из девяти шкафов, при номинальной мощности 10 Мвар, составляют более 120 кВт (с учетом потерь на нагрев шин и конденсаторов).

Для полноты расчета тепловых потерь рассмотрим вариант планировки КФКУ, рис. 7, где определим тепловые потери в остальных компонентах устройства.

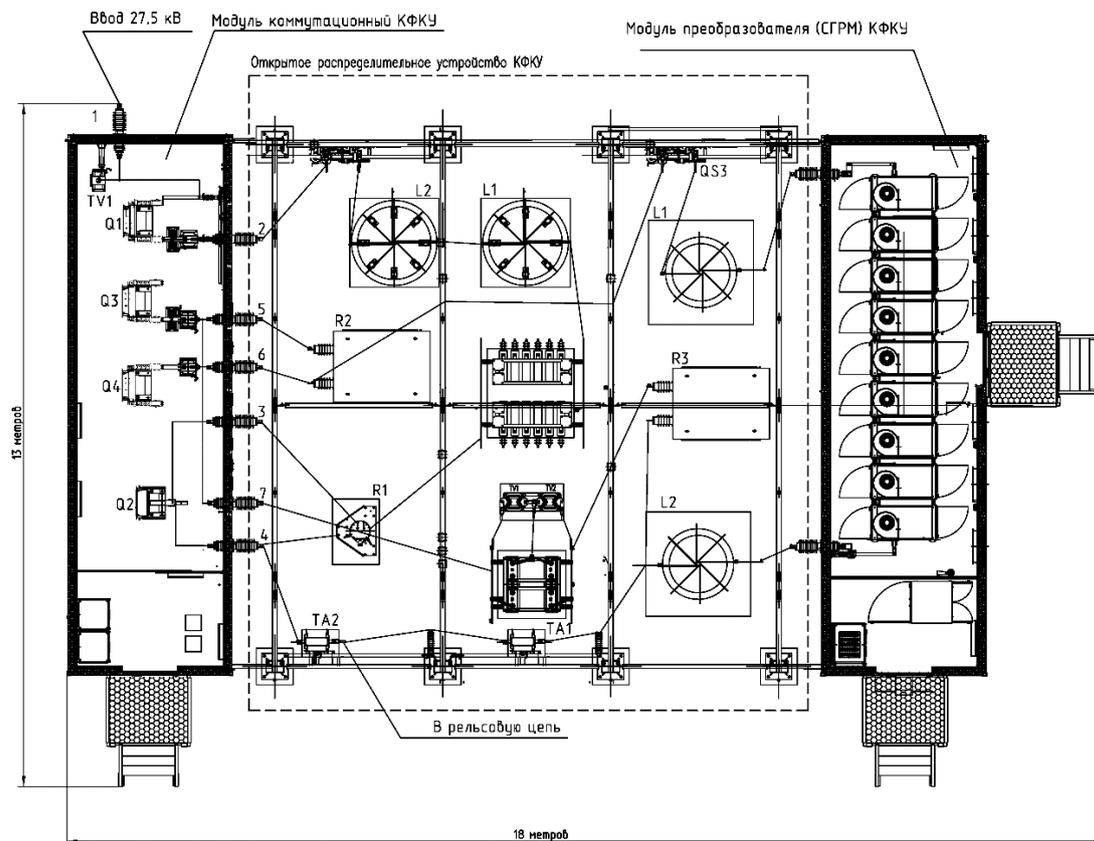


Рис. 7. Планировка оборудования КФКУ

Конденсаторная батарея (статический фильтр) состоит из 20 шт. конденсаторов типа КЭПФ-8,5-300-2УХЛ1 ОАО СКЗ КВАР (4,6 Мвар по первой гармонике).

Средние потери в стационарном режиме при номинальном напряжении и частоте и температуре окружающего воздуха 20 °С — 0,13 Вт/квар. Потери в конденсаторной батарее (4,6 Мвар) будут составлять: 0,13 Вт/квар · 4600 квар ≈ 600 Вт.

При номинальной мощности в стационарном фильтре 10 Мвар потери будут ≈ 1,3 кВт.

Реактор фильтровый типа РФОС-35-220-81 У1.

Потери в фазе реактора при номинальном токе (170 А — 50 Гц и 140 А — 150 Гц) с учетом высших гармоник и при температуре обмоток реактора не более 115 °С ≈ 23,7 кВт.

В КФКУ применяется четыре таких реактора, где суммарные потери в реакторах будут ≈ 94,8 кВт.

Ошиновка КФКУ (ФУ 10 Мвар + СГРМ 10 Мвар) состоит из медного провода М300. Сечение: $S = 300 \text{ мм}^2$. Длина: $L = 75 \text{ м}$.

Активное сопротивление ошиновки:

$$R_{\text{ош}} = \rho \cdot \frac{L}{S}, \quad (10)$$

где ρ — удельное сопротивление меди, Ом · мм²/м;

L — длина ошиновки, м;

S — площадь поперечного сечения проводника ошиновки, мм².

$$R_{\text{ош}} = 0,017 \cdot \frac{75}{300} = 4,26 \text{ мОм.}$$

Активные потери в ошиновке:

$$P_{\text{ош}} = I^2 R_{\text{ош}}, \quad (11)$$

где I — рабочий ток, А.

$$P_{\text{ош}} = 400^2 \cdot 4,26 \cdot 10^{-3} \approx 750 \text{ Вт.}$$

Таким образом, суммарные потери на тепловую энергию КФКУ будут равны: 120 кВт (СГРМ) + 1,3 кВт (конденсаторная батарея) + 94,8 кВт (реакторы) + 0,75 кВт (ошиновка), т. е. 216,85 кВт.

Заключение

Расчет потерь на тепловую энергию в КФКУ в наиболее тяжелом режиме работы как минимум в 1,5 раза меньше потерь в типовом применяемом устройстве компенсации на базе IGBT. При этом при номинальных значениях мощности компенсации потери в контактной сети снижаются на 10–15 %. Выполненный расчет тепловых потерь показывает о возможности применения воздушного охлаждения, однако на более мощных преобразователях (свыше 15 Мвар) необходимо использовать жидкостное охлаждение.

Библиографический список

1. Патент № 2790740 Российская Федерация. Устройство управления комбинированной установкой поперечной емкостной компенсации / Л. А. Герман, А. А. Максимова, А. А. Карabanов. опубли. 28.02.2023. Бюл. № 7.
2. Герман Л. А. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, К. С. Субханвердиев, Л. А. Герман // Режимная автоматика. Часть 2. — Нижний Новгород: СамГУПС, 2020. — 85 с.
3. Железко Ю. С. Потери электроэнергии реактивная мощность качество электроэнергии / Ю. С. Железко // Руководство для практических расчетов. — М.: ЭНАС, 2009. — 70 с.
4. ANSYS — универсальная программная система анализа методом конечных элементов для решения пространственных задач, теплопередачи, теплообмена, а также механики и гидравлики. Версия ПО — ANSYS 18.2. Вертакова Ю. В. Альтернативная энергетика. Развитие зеленой экономики в энергетике // Энергетическая безопасность: сб. науч. ст. II Междунар. молодежного конгресса. — Курск: ЗАО «Университетская книга», 2017. — С. 24–26.

Дата поступления: 03.04.2023

Решение о публикации: 25.04.2023

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, проф.; alexagunov@mail.ru

КАРАБАНОВ Артем Александрович — инженер-электромеханик; karabanov.art@yandex.ru

ТЕРЕХИН Илья Александрович — канд. техн. наук, доц.; terekhin@pgups.ru

БАРАНОВ Иван Александрович — аспирант; baranov@pgups.ru

Calculation of Heat Losses in The Combined Filter-Compensating Unit

A. V. Agunov¹, A. A. Karabanov², I. A. Terekhin¹, I. A. Baranov¹

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²NIIEFA-ENERGO, LLC, 3/2, Industrial zone “Metallostroy”, Metallostroy Village, St. Petersburg, 196641, Russian Federation

For citation: Agunov A. V., Karabanov A. A., Terekhin I. A., Baranov I. A. Calculation of Heat Losses in The Combined Filter-Compensating Unit. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 92–103. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-92-103

Summary

Purpose: To calculate heat losses in the combined filter-compensating unit and to assess the possibility of using air cooling. **Methods:** Mathematical and computer modeling are used to calculate heat losses of combined filter-compensating unit with regard to the main parameters of the converter. **Results:** The paper presents schemes and the main differences of reactive power compensation installations, used nowadays on the electrified sections of railroads. The calculation of thermal losses of combined filter-compensating installation with regard to the main parameters of the Static Var Generator (SVG) converter on the basis of IGBT transistors has been performed. In the software package ANSYS 18.2 a simulation model of the converter cabinet has been developed and the thermal calculation of the cooler has been performed. **Practical significance:** Results of calculation of thermal losses confirmed the possibility of using air cooling in the presented combined filter-compensating unit with capacity up to 15 Mvar.

Keywords: Combined filter-compensating unit, reactive power compensation device, reactive power compensation, static reactive power generator, calculation of heat losses, IGBT transistor, heat losses, air cooling.

References

1. German L. A., Maksimova A. A., Karabanov A. A. *Ustroystvo upravleniya kombinirovannoy ustanovkoy poperechnoy emkostnoy kompensatsii* [Control device for a combined installation of transverse capacitive compensation]. Patent RF, no. 2790740, 2023. (In Russian)
2. German L. A., Subkhanverdiev K. S., German L. A. *Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka* [Automation of power supply of the AC traction network]. *Rezhimnaya avtomatika. Chast' 2* [Regime automatics. Part 2]. Nizhniy Novgorod: SamGUPS Publ., 2020, 85 p. (In Russian)
3. Zhelezko Yu. S. *Poteri elektroenergii reaktivnaya moshchnost' kachestvo elektroenergii* [Energy losses reactive power quality of electricity]. *Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Guide for practical calculations]. Moscow: ENAS Publ., 2009, 70 p. (In Russian)
4. *ANSYS — universal'naya programmnaya sistema analiza metodom konechnykh elementov dlya resheniya prostranstvennykh zadach, teploperedachi, teploobmena, a takzhe mekhaniki i gidravliki. Versiya PO — ANSYS 18.2.* Vertakova Yu. V. *Al'ternativnaya energetika. Razvitie zelenoy ekonomiki v energetike. Energeticheskaya bezopasnost': sb. nauch. st. II Mezhdunar. molodezhnogo kongressa* [ANSYS is a universal software system for finite element analysis for solving spatial problems, heat transfer, heat transfer, as well as mechanics and hydraulics. The software version is ANSYS 18.2. Vertakova Yu. V. *Alternative energy. Development of green economy in the energy sector. Energy security: coll. scientific Art. II Intern. youth congress*]. Kursk: ZAO "Universitetskaya kniga" Publ., 2017, pp. 24–26. (In Russian)

Received: April 03, 2023

Accepted: April 25, 2023

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Artem A. KARABANOV — Electrical Mechanical Engineer; karabanov.art@yandex.ru

Ilya A. TEREKHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; terekhin@pgups.ru

Ivan A. BARANOV — Postgraduate Student; baranov@pgups.ru