

УДК 621.314

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЗАМКНУТОЙ ЖИДКОСТНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ СИЛОВЫХ МОДУЛЕЙ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Марейченко Иван Вячеславович,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», директор
Электронная почта: niive@list.ru
Россия, г. Донецк

Поважнюк Андрей Николаевич,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», заведующий отделом электропривода
Электронная почта: niive@list.ru
Россия, г. Донецк

Дьяченко Андрей Иванович,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», младший научный сотрудник
Электронная почта: niive@list.ru
Россия, г. Донецк

Аннотация

Статья посвящена разработке комплексного метода оценки эффективности замкнутой жидкостной системы охлаждения силовых компонентов частотного преобразователя для взрывозащищенного промышленного электрооборудования. Применение электроприводов на базе статических преобразователей частоты в горной технике требует оптимизации теплоотведения и повышения надежности системы. Актуальность работы связана с необходимостью создания простого инженерного инструмента, который позволит оценивать эффективность замкнутых систем охлаждения, где ключевыми задачами являются моделирование и расчет температуры тепловых потоков.

Существующие методы оценки эффективности систем охлаждения имеют ограничения по точности и трудозатратам, что подчеркивается примерами альтернативных подходов, таких как применение графеновых пленок и использование фильтра Калмана. Однако, предлагаемый метод моделирует всю замкнутую систему в реальных условиях, с учетом сложных физических процессов, таких как конвекция, теплопроводность и циркуляция, что позволяет получить более точные данные о работе системы охлаждения.

В рамках исследования применялся вычислительный инструмент SolidWorks Flow Simulation для создания модели замкнутой системы, включающей ключевые элементы, такие как IGBT модули, циркуляционные насосы и радиаторы. В результате симуляций были получены траектории потоков и температурные поля, что позволило наглядно оценить эффективность тепловых потерь и принять обоснованные инженерные решения.

Ключевые слова: замкнутая система охлаждения, оценка эффективности, охлаждение силовых модулей, охлаждение IGBT-транзисторов, методика моделирования, термическая модель FEA.

APPROACH TO MODELING A CLOSED-LOOP LIQUID COOLING SYSTEM FOR FREQUENCY CONVERTER POWER MODULES

Mareichenko Ivan Vyacheslavovich,

State budgetary institution scientific-research, project-designing and technological institute of explosion proof and mine electrical equipment, director

E-mail: niive@list.ru

Russia, Donetsk

Povazhnyuk Andrey Nikolaevich,

State budgetary institution scientific-research, project-designing and technological institute of explosion proof and mine electrical equipment, head of the electric drive department

E-mail: niive@list.ru

Russia, Donetsk

Dyachenko Andrey Ivanovich,

State budgetary institution scientific-research, project-designing and technological institute of explosion proof and mine electrical equipment, junior research assistant

Email: niive@list.ru

Russia, Donetsk

ABSTRACT

The article is devoted to the development of a comprehensive method for evaluating the effectiveness of a closed liquid cooling system for power components of a frequency converter for explosion-proof industrial electrical equipment. The use of electric drives based on static frequency converters in mining requires optimization of heat dissipation and increased system reliability. The relevance of the work is related to the need to create a simple engineering tool that will allow evaluating the effectiveness of closed cooling systems, where the key tasks are modeling and calculating the temperature of heat flows.

Existing methods for evaluating the efficiency of cooling systems have limitations in terms of accuracy and labor costs, which is highlighted by examples of alternative approaches such as the use of graphene films and the use of a Kalman filter. However, the proposed method simulates the entire closed system in real conditions, taking into account complex physical processes such as convection, thermal conductivity and circulation, which allows for more accurate data on the operation of the cooling system.

The study used the SolidWorks Flow Simulation computing tool to create a closed-loop system model that includes key elements such as IGBT modules, circulation pumps, and radiators. As a result of the simulations, flow trajectories and temperature fields were obtained, which made it possible to visually assess the effectiveness of heat losses and make informed engineering decisions.

Keywords: closed cooling system, efficiency assessment, cooling of power modules, cooling of IGBT transistors, modeling methodology, FEA thermal model.

Введение. В современной горной технике прослеживается курс на применение регулируемых электроприводов на базе статических преобразователей частоты. Производственный опыт [1-2] подтверждает экономическую выгоду от внедрения таких решений. В настоящее время существует тенденция к уменьшению габаритных размеров преобразовательных устройств с повышением эффективности преобразования энергии. Это приводит к увеличению плотности мощности преобразовательных силовых компонентов [3] и, как следствие, к необходимости более эффективного теплоотвода.

В процессе разработки конструкции таких устройств ключевой задачей является моделирование и расчет системы охлаждения, в частности жидкостного типа. Особая трудность возникает при моделировании и расчете замкнутых систем охлаждения.

Разработка простого инженерного способа оценки эффективности конструкции замкнутой жидкостной системы принудительного охлаждения является актуальной и востребованной задачей.

Цель работы. Целью данной статьи является информирование о разработанном комплексном методе для оценки эффективности замкнутой жидкостной системы охлаждения силовых компонентов частотного преобразователя взрывозащищенного промышленного оборудования.

В ходе разработки станции управления электроприводом магистрального ленточного конвейера мощностью 500 кВт на напряжение 1140 В для отвода тепловых потерь применена замкнутая жидкостная принудительная система охлаждения, так как это одна из наиболее эффективных систем для обеспечения правильной работы управляющих цепей, а также для увеличения надежности и долговечности работы устройства. При такой мощности предполагаемая величина отводных тепловых потерь на силовых ключах составит 10,5 кВт.

Важно оценить способность выбранной конструкции системы охлаждения отвести и рассеять тепловые потери преобразователя частоты. Существуют различные методы такой оценки, отличающиеся трудоемкостью и точностью.

Например, в [4] рассматривается применение пленки из графена для более эффективной передачи тепла от IGBT модулей к ребристому радиатору водяного охлаждения. Также авторы привели сравнительный анализ распределения температуры в чипе IGBT до и после нанесения предлагаемой пленки. Данный метод интересен, но предполагает внесение изменений в конструкцию силового модуля, что в нашем случае недопустимо. В [5] описывается стационарный подход к оценке температуры охлаждающего потока на входе с использованием фильтра Калмана и данных от NTC-терморезисторов в условиях замкнутого контура. Разработана нелинейная тепловая модель для динамической оценки объемного расхода, учитывающая температуры IGBT, NTC и охлаждающей жидкости. Оценки состояния проверены и сравнены с результатами моделирования методом конечных элементов и испытаниями на стенде. В [6] представлен инструмент для оптимизации прямого водяного охлаждения мощных модулей,

основанный на моделировании методом вычислительной гидродинамики, что позволяет подбирать оптимальные решения в зависимости от профиля нагрузки и мощности насоса. Данный подход схож с нашим, но в нашем случае мы рассматриваем замкнутую систему охлаждения, где итерационные выходные значения температуры охлаждающей жидкости используются для корректировки входных начальных условий. Исследованные варианты нас не удовлетворяют, поскольку не учитывают конечную емкость теплоносителя системы охлаждения.

Для моделирования замкнутой системы охлаждения нами использовался вычислительный инструмент SolidWorks Flow Simulation, который позволяет моделировать потоковые процессы в текучих средах, при условии задания начальных условий для потока охлаждающей жидкости. В замкнутых системах входные начальные условия являются функцией выходных данных шагов итерации, что требует значительных вычислительных ресурсов для подобного моделирования.

Нами использован иной подход, который заключается в создании модели, с циркулирующим потоком с заданными свойствами, охватывающего объекты, излучающие и рассеивающие тепло, а именно: задание тепловых источников, создание эмулятора потока сред, отводящих тепловую энергию, и сред транспортировки тепла и анализ температурных полей контрольных поверхностей на основе температурных полей жидких и воздушных сред. Корректность полученных результатов оценена иным, расчетным методом.

Структурная схема замкнутой жидкостной системы представлена на рисунке 1. Схема включает в себя плиты охлаждения с расположенными на них электронными IGBT модулями (поз. 1), воздушный радиатор охлаждения (поз. 2), циркуляционный насос (поз. 3), вентилятор (поз. 4), трубопровод (поз. 5).

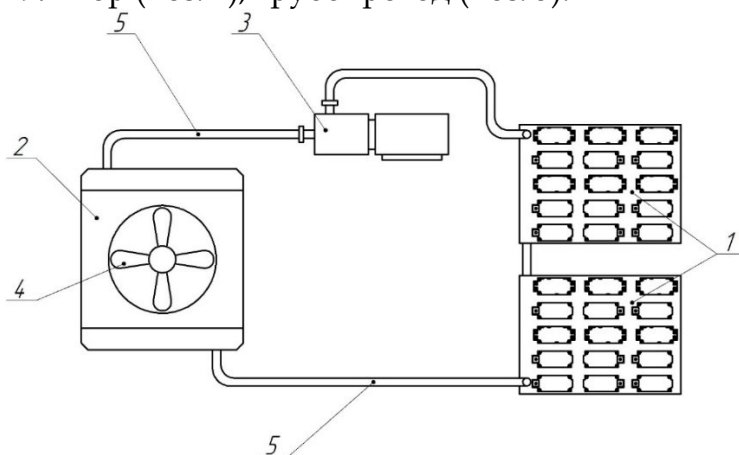


Рисунок 1 – Структурная схема замкнутой системы охлаждения

Модель источника тепла выполнена максимально детально, с учетом конструктивных особенностей и данных производителя продукции (рисунок 2).

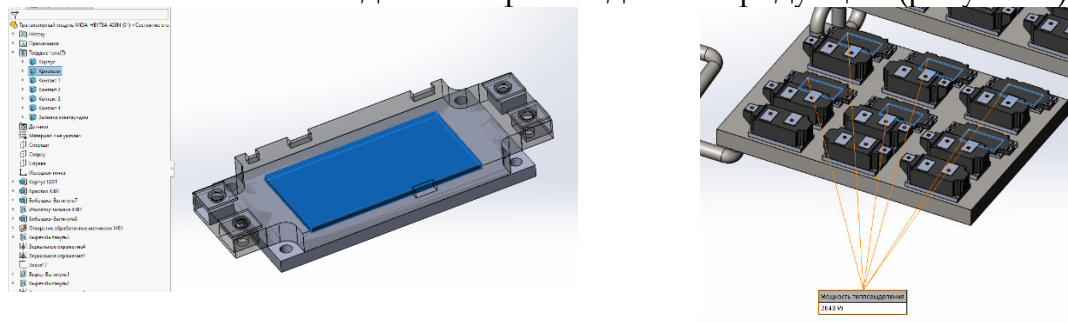


Рисунок 2 – Структура и тепловая мощность для IGBT транзистора

Эмуляция объекта, формирующего воздушный поток для отвода тепла из системы охлаждения (вентилятор), задается стандартными инструментами программы. Применяется инструмент «Внутренний вентилятор», для которого необходимо указать напорные характеристики требуемого объекта, представленные на рисунке 3.

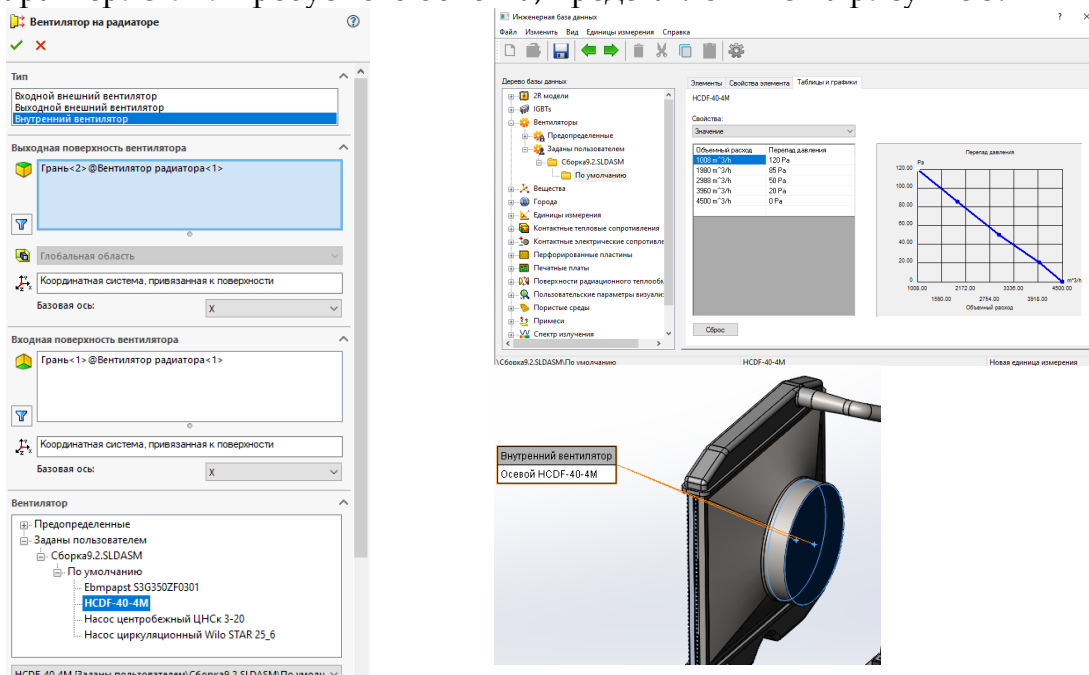


Рисунок 3 – Эмулятор воздушного потока (вентилятор)

Для эмуляции потока жидкости применяются те же инструменты, как и для вентилятора, с заданием напорной характеристики, представленной на рисунке 4.

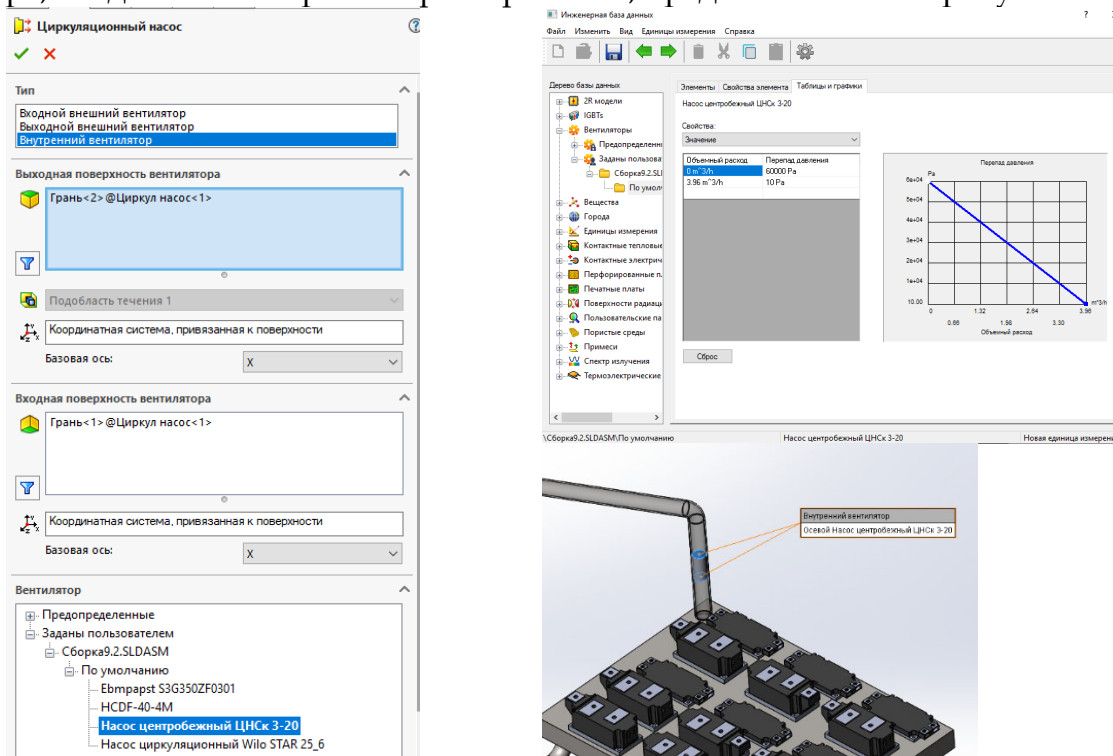


Рисунок 4 – Эмулятор потока жидкости (центробежный насос)

Такая созданная модель представлена на рисунке 5, позволяет выполнять полнофакторные исследования с учетом гравитационной составляющей при течении жидкости.

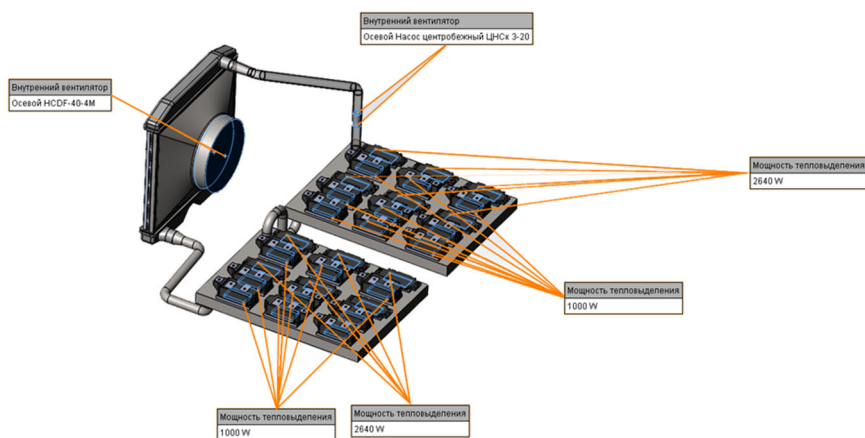


Рисунок 5 – Виртуальная модель замкнутой системы охлаждения

В качестве целей данного исследования модели заданы поверхности кристаллов полупроводников с получением траектории потоков и картин распределения нагрева на поверхности (рисунок 6, рисунок 7), позволяющие наглядно оценить эффективность отвода тепловых потерь системы охлаждения текущей конструктивной конфигурации ее исполнения и характеристики потока.

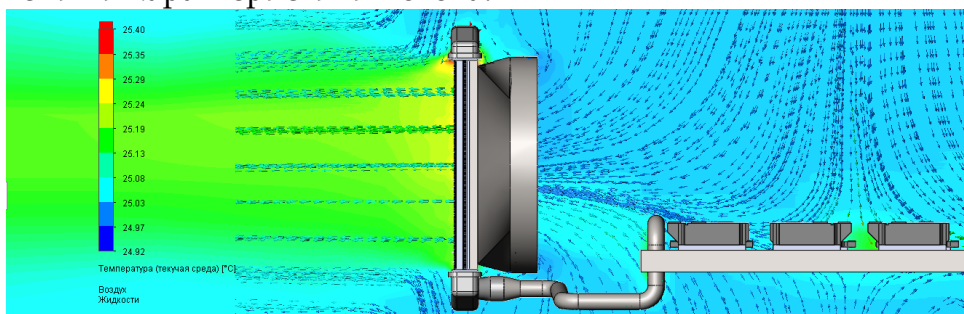


Рисунок 6 – Траектории потока и картина температурных полей воздушной среды

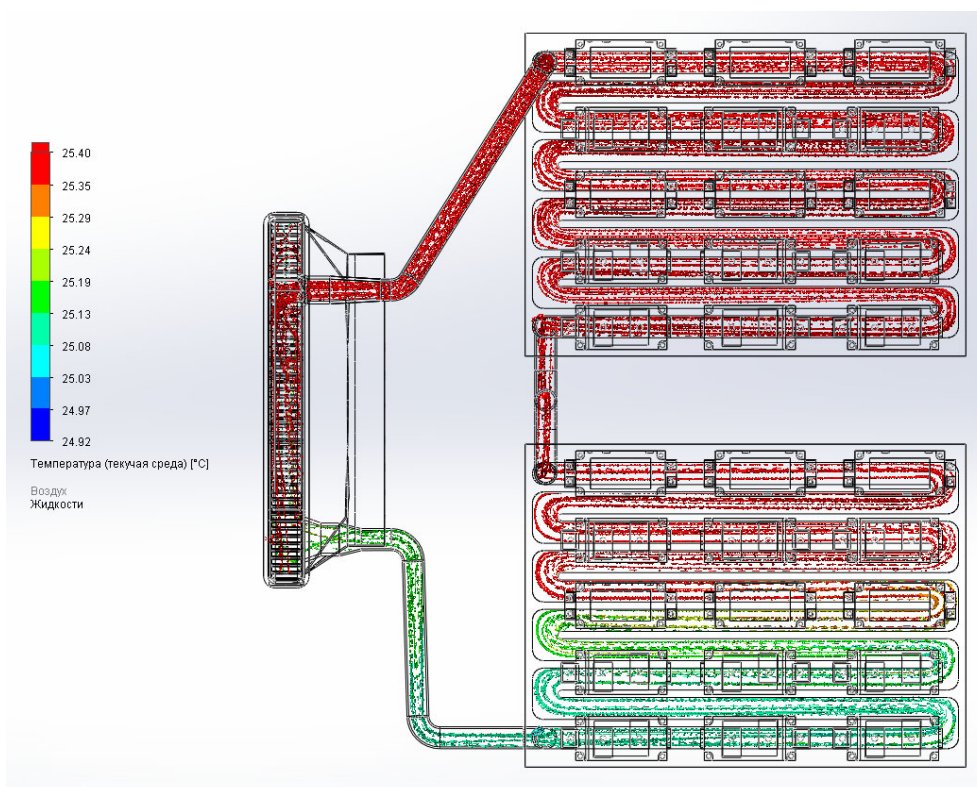


Рисунок 7 – Траектория потока жидкой среды

Для проверки достоверности полученных результатов [7] был использован специально разработанный метод оценки эффективности теплового обмена жидкостной системы на основе объектов излучения и поглощения тепловых потерь. Суть метода состоит в создании тепловой модели блока системы охлаждения и компонентов, задаваясь характеристиками выбранных (насоса, воздушного радиатора и вентилятора) при заданных тепловых потерях, полученных при расчете полупроводниковых элементов, и описывается хорошо известными выражениями [8].

Выводы. Выполненный расчет отличается от стандартных методов проведения тепловых расчетов систем охлаждения тем, что в данном методе смоделирована вся система охлаждения в замкнутом цикле такая, какой она будет сделана в реальности. Запущены одновременно все физические процессы в замкнутом цикле. Источники тепла, передача тепла как конвекцией, так и теплопроводностью между компонентами, участвующими в переносе тепла, принудительная циркуляция охлаждающей жидкости в замкнутом контуре с учетом гравитации, подачи насоса, изменением подачи и падением давления в следствии гидравлических сопротивлений, а также учет температуры уже отработанной жидкости в обратном трубопроводе, принудительная циркуляция воздушной среды посредством вентилятора, обдув радиатора и перенос тепла с ребер радиатора в окружающую среду. Выполненная симуляция предоставила достаточно данных для оценки работы выбранной системы охлаждения и принятия адекватного решения.

Рассмотренный метод существенно упростит и улучшит качество проведения тепловых расчетов систем охлаждения промышленных установок с замкнутой системой охлаждения простым и наглядным методом инженерными работниками.

Список литературы:

1. Вареник Е. А., Дубинский А. А., Бочаров М. К., Марейченко И. В., Налбатов В. Е. Взрывозащищенный рекуперативный частотно-регулируемый электропривод подземных подъемных машин / Е. А. Вареник, А. А. Дубинский, М. К. Бочаров, И. В. Марейченко, В. Е. Налбатов // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ / Под общей ред. аадемика НАН Украины Г.Г. Пивняка. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2008. – С. 216-220.
2. Вареник Е. А., Дубинский А. А., Марейченко И. В. Пути модернизации электрооборудования шахтных подземных машин / Е. А. Вареник, А. А. Дубинский, И. В. Марейченко // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2011. – С. 175-180.
3. Бемяк В. Л., Плащанский Л. А. Увеличение напряжения участковых сетей как способ повышения эффективности использования горных машин в высоконагруженных забоях угольных шахт // ГИАБ. 2007. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uvelichenie-napryazheniya-uchastkovyih-setey-kak-sposob-povysheniya-effektivnosti-ispolzovaniya-gornyh-mashin-v-vysokonagruzhennyh>.
4. H. Zhao, J. Bao, Y. Xu and W. Xu, "Optimal Design of Heat Dissipation Structure of IGBT Modules Based on Graphene," 2019 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), Shanghai, China, 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/CSTIC.2019.8755683.
5. M. Schumann, S. Ebersberger and K. Graichen, "Dynamic and Stationary State Estimation of Fluid Cooled Three-Phase Inverters," 2022 International Symposium on Power

- Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, Italy, 2022, pp. 171-178, doi: 10.1109/SPEEDAM53979.2022.9842247.
6. A. S. Bahman and F. Blaabjerg, "Optimization tool for direct water cooling system of high power IGBT modules," 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany, 2016, pp. 1-10, doi: 10.1109/EPE.2016.7695575.
 7. Марейченко, И. В., Николаенко, Д. И., Дьяченко, А. И., Поважнюк, А. Н. Разработка методики оценки эффективности работы замкнутой системы жидкостного охлаждения взрывозащищенного электрооборудования / И. В. Марейченко, Д. И. Николаенко, А. И. Дьяченко, А. Н. Поважнюк // Материалы круглого стола «О путях и методах повышения производительности и эффективности использования оборудования в (горной) промышленности» 29 мая 2025 г. — Донецк: 2025. — С. 49-56.
 8. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. / Кухлинг Х. — 2-е изд. — М.: Мир, 1985 — 520 с.

References:

1. Varenik E. A., Dubinsky A. A., Bocharov M. K., Mareichenko I. V., Nalbatov V. E. Explosion-proof regenerative frequency-controlled electric drive of underground lifting machines / E. A. Varenik, A. A. Dubinsky, M. K. Bocharov, I. V. Mareichenko, V. E. Nalbatov // Explosion-proof electrical equipment: Collection of scientific tr. UkrNIIVE / Under the general editorship . Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine G.G. Pivnyak. Donetsk: Yugo-Vostok, Ltd., 2008, pp. 216-220.
2. Varenik E. A., Dubinsky A. A., Mareichenko I. V. Ways to modernize the electrical equipment of underground mining machines / E. A. Varenik, A. A. Dubinsky, I. V. Mareichenko // Explosion-proof electrical equipment: Collection of scientific tr. UkrNIIVE. Donetsk: AIR LLC, 2011. pp. 175-180.
3. Belyak V. L., Plaschansky L. A. Increasing the voltage of district networks as a way to increase the efficiency of mining machinery in highly loaded coal mine faces // GIAB. 2007. No. 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uvelichenie-napryazheniya-uchastkovyh-setey-kak-sposob-povysheniya-effektivnosti-ispolzovaniya-gornyh-mashin-v-vysokonagruzhennyh>.
4. H. Zhao, J. Bao, Y. Xu and W. Xu, "Optimal Design of Heat Dissipation Structure of IGBT Modules Based on Graphene," 2019 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), Shanghai, China, 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/CSTIC.2019.8755683.
5. M. Schumann, S. Ebersberger and K. Graichen, "Dynamic and Stationary State Estimation of Fluid Cooled Three-Phase Inverters," 2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, Italy, 2022, pp. 171-178, doi: 10.1109/SPEEDAM53979.2022.9842247.
6. A. S. Bahman and F. Blaabjerg, "Optimization tool for direct water cooling system of high power IGBT modules," 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany, 2016, pp. 1-10, doi: 10.1109/EPE.2016.7695575.

7. Mareichenko, I. V., Nikolaenko, D. I., Dyachenko, A. I., Povazhnyuk, A. N. Development of a methodology for evaluating the effectiveness of a closed liquid cooling system for explosion-proof electrical equipment / I. V. Mareichenko, D. I. Nikolaenko, A. I. Dyachenko, A. N. Povazhnyuk // Materials of the round table "On ways and methods improving the productivity and efficiency of equipment use in the (mining) industry" May 29, 2025 – Donetsk: 2025. – pp. 49-56.
8. Kuhling H. Handbook of Physics: Translated from German. / Kuhling H. – 2nd ed. – Moscow: Mir, 1985 – 520 p.