

ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ УСТРОЙСТВА ЛОКАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЛЯ МОРСКИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ РОССИЙСКОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

В. Ж. Куклин^{1,а}, М. А. Кочаров^{1,б}, Е. А. Тихонов^{2,в}, А. Д. Коцаренко^{1,г}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация

² Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Российская Федерация

^а ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2332-895X>, ✉ vzh.kuklin@gmail.com

^б ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5235-8484>, kocharov@niisi.ras.ru

^в ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1941-127X>, tihonov@petrsu.ru

^г ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9227-2661>, akots@cs.niisi.ras.ru

Аннотация: в условиях санкционных ограничений и стратегической задачи освоения Арктической зоны ключевым приоритетом российского судостроения становится обеспечение технологического суверенитета в области судовых электроэнергетических систем (ИЭЭС). В работе представлены результаты этапа НИОКР по разработке устройств локальной автоматизации (УЛА) на базе отечественного микроконтроллера K5500BK018. Основной проблемой при использовании данной элементной базы в агрессивной морской среде является обеспечение надежного теплоотвода в условиях пассивной вентиляции при температурах окружающего воздуха до 60 °С. Целью исследования была оценка теплового состояния опытных образцов УЛА и оптимизация конструкции корпуса для исключения перегрева критических компонентов. Методология работы основана на численном моделировании сопряженного теплообмена и гидродинамики в пакете SOLIDWORKS Flow Simulation. Проведена проверка сеточной сходимости, учтено тепловое излучение методом дискретного переноса (Discrete Transfer), использованы анизотропные свойства материалов печатных плат.

В ходе расчетов выявлено превышение допустимой температуры микроконтроллера K5500BK018 в базовой конструкции корпуса. Для устранения перегрева предложена модернизация корпуса с организацией дополнительных вентиляционных отверстий. Результаты показали, что модернизация обеспечила увеличение массового расхода воздуха в зоне тепловыделения на 57,5%, что позволило снизить максимальную температуру микроконтроллера до 84,48 °С при температуре окружающей среды 60 °С (предельное значение — 85 °С). Установлено, что предложенная конструкция обеспечивает надежную работу устройств без применения активных систем охлаждения и радиаторов. Полученные результаты подтверждают возможность серийного производства конкурентоспособных отечественных УЛА для морских ИЭЭС, что вносит вклад в импортозамещение и повышение технологической безопасности отрасли в условиях глобальной нестабильности цепочек поставок.

Ключевые слова: импортозамещение, судовая автоматика, морские электроэнергетические системы, Багет-ПЛК, Комдив-МК, АЦП AD7606В, тепловое состояние, численное моделирование, технологический суверенитет.

Благодарности: работа выполнена в рамках темы «1023032900401-5-1.2.1 Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения (FNEF-2024-0002)», реализуемой НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по тематическому плану НИОКР, выполняемых в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ).

Для цитирования: Куклин В. Ж., Кочаров М. А., Тихонов Е. А., Коцаренко А. Д. Оценка теплового состояния устройства локальной автоматизации для морских электроэнергетических систем на базе российской элементной базы. *Успехи кибернетики*. 2026;7(2):74–83.

Поступила в редакцию: 30.04.2026.

В окончательном варианте: 18.06.2026.

THERMAL ANALYSIS OF A LOCAL AUTOMATION UNIT IN MARINE INTEGRATED ELECTRICAL POWER SYSTEMS USING DOMESTIC COMPONENTS

V. Zh. Kuklin^{1,a}, M. A. Kocharov^{1,b}, E. A. Tikhonov^{2,c}, A. D. Kotsarenko^{1,d}

¹ Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation

² Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation

^a ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2332-895X>, ✉ vzh.kuklin@gmail.com

^b ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5235-8484>, kocharov@niisi.ras.ru

^c ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1941-127X>, tikhonov@petrsu.ru

^d ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9227-2661>, akots@cs.niisi.ras.ru

Abstract: we studied the development of local automation devices (LADs) for marine integrated electric power systems (IEES) under conditions of technological sovereignty requirements in the Russian shipbuilding industry. We focused on LAD prototypes based on the domestic microcontroller K5500VK018 and analyzed thermal constraints associated with their operation in harsh marine environments. We examined heat dissipation under passive ventilation conditions at ambient air temperatures up to 60 °C and evaluated the thermal state of the devices. We also optimized the enclosure design to prevent overheating of critical components.

We used numerical simulation of conjugate heat transfer and fluid dynamics implemented in SolidWorks Flow Simulation. We performed grid convergence analysis, accounted for thermal radiation using the Discrete Transfer method, and incorporated anisotropic thermal properties of printed circuit board materials. We found that the baseline enclosure design caused the K5500VK018 microcontroller to exceed its maximum allowable operating temperature. We proposed a modified enclosure design with additional ventilation openings.

We showed that the modified design increased the mass airflow rate in the heat-generating zone by 57.5% and reduced the maximum microcontroller temperature to 84.48 °C at an ambient temperature of 60 °C (limit: 85 °C). We demonstrated that the proposed design ensures reliable operation of the device without active cooling systems or heat sinks. The results confirm the feasibility of mass production of domestic LADs for marine IEES and indicate improved technological independence in the context of global supply chain instability.

Keywords: import substitution, marine automation, marine power systems, BAGET-PLC, Komdiv-MK, AD7606B ADC, heat transfer state, computer-aided simulation, technological sovereignty.

Acknowledgements: this work was carried out within the framework of the Mathematical Modeling of Multiscale Dynamic Processes and Virtual Environment Systems R&D project No. 1023032900401-5-1.2.1 (FNEF-2024-0002), conducted at the NRC “Kurchatov Institute” – SRISA under a government order.

Cite this article: Kuklin V. Zh., Kocharov M. A., Tikhonov E. A., Kotsarenko A. D. Thermal Analysis of a Local Automation Unit in Marine Integrated Electrical Power Systems Using Domestic Components. *Russian Journal of Cybernetics*. 2026;7(2):74–83.

Original article submitted: 30.04.2026.

Revision submitted: 18.06.2026.

Введение

Современное российское судостроение, ориентированное на освоение Арктической зоны и развитие флота с интегрированными электроэнергетическими системами (ИЭЭС), сталкивается с критической зависимостью от импортного оборудования. Хотя ведущие зарубежные производители ИЭЭС для судостроения, такие как АБВ (Швейцария), а также Siemens Energy (Германия) и GE Marine (США) [1] не полностью ограничили поставки через третьи страны, но высокая стоимость и главное — низкая надежность таких логистических цепочек ставят перед отечественной наукой задачу импортозамещения данного типа оборудования.

Особого внимания требует необходимость соответствия жестким требованиям к оборудованию, работающему в условиях морской среды: устойчивость к вибрациям, широкому температурному диапазону, повышенной влажности и соленой атмосфере, а также обеспечение высочайшей

надежности и отказоустойчивости в соответствии с правилами Российского морского регистра судоходства (РМРС) и другой нормативной документации [2, 3]. Важность этого направления подчеркивается в Стратегии развития судостроительной промышленности Российской Федерации на период до 2035 года [4–6].

Так как температурные режимы работы морских судов могут быть достаточно высокими (до 60 °С), то определение теплового режима и выбор системы охлаждения электронного блока являются крайне важными техническими задачами, решение которых обеспечит надежность и безотказность работы компонентов устройств локальной автоматизации (УЛА).

На данном этапе выполнения НИОКР решены следующие задачи:

- 1) разработана конструкция корпуса для опытного комплекта устройств локальной автоматизации;
- 2) разработана численная модель, учитывающая мощности тепловыделения микросхем и позволяющая рассчитывать поля температур как воздуха, так и твердых компонентов, а также поля скоростей движения воздуха как вокруг, так и внутри корпуса из-за естественной конвекции;
- 3) выполнена оценка теплового состояния устройства в диапазоне температур окружающего воздуха от 40 до 60 °С;
- 4) выполнена модернизация корпуса устройства, улучшающая условия пассивной вентиляции и обеспечивающая температурный режим, исключающий перегрев тепловыделяющих микросхем во всем диапазоне эксплуатационных температур.

Материалы и методы

Функциональная нагрузка на УЛА включает следующее: контроль электрических параметров (U , I , $\cos(\varphi)$ и т.д.), защиту от аварийных режимов (перегрузка, короткое замыкание, асимметрия фаз), автоматическую синхронизацию генераторов, балансировку активной и реактивной мощности. Диапазон рабочих температур согласно РМРС составляет от –25 °С до +55 °С. Примем максимальную температуру — 60 °С. Внешний вид разработанного устройства представлен на рисунке 1.

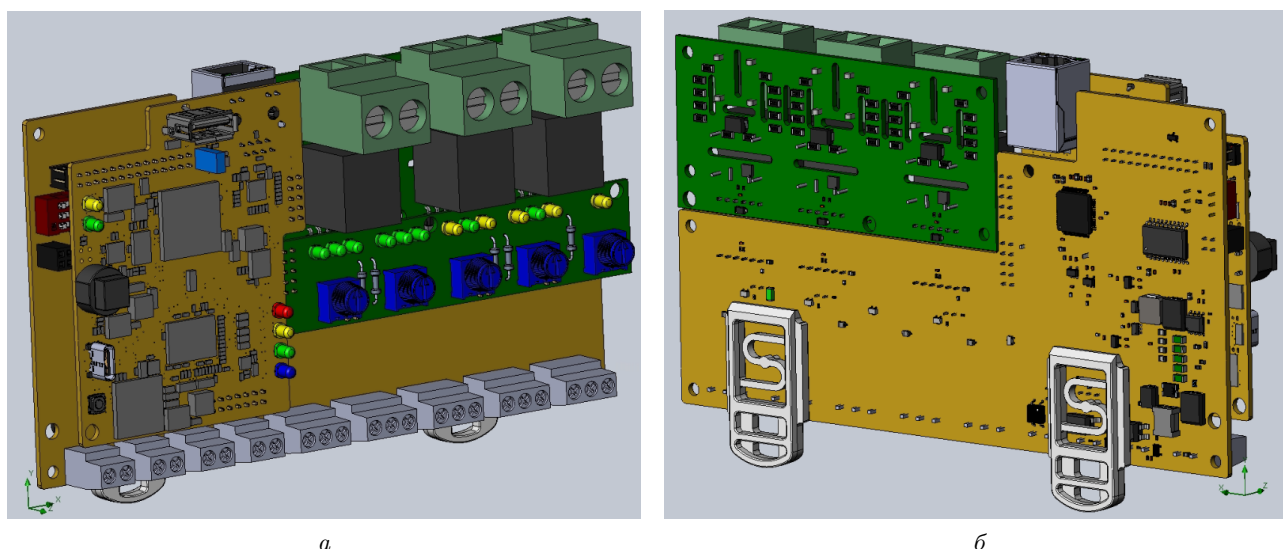


Рис. 1. Внешний вид разработанного устройства: а — передняя сторона; б — задняя сторона

В качестве аппаратной платформы для разработки компонентов УЛА выбран микропроцессорный модуль, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» [7]. Основные тепловыделяющие микросхемы следующие:

- 1) ОЗУ DDR3 MT41K256M16TW-107-IT:P — 512 Мбайт (рисунок 2, А);
- 2) микроконтроллер — K5500BK018 (300 МГц, ядро с архитектурой КОМДИВ64, совместимой с MIPS64) (рисунок 2, В);
- 3) аналогово-цифровой преобразователь AD7606B (рисунок 2, С).

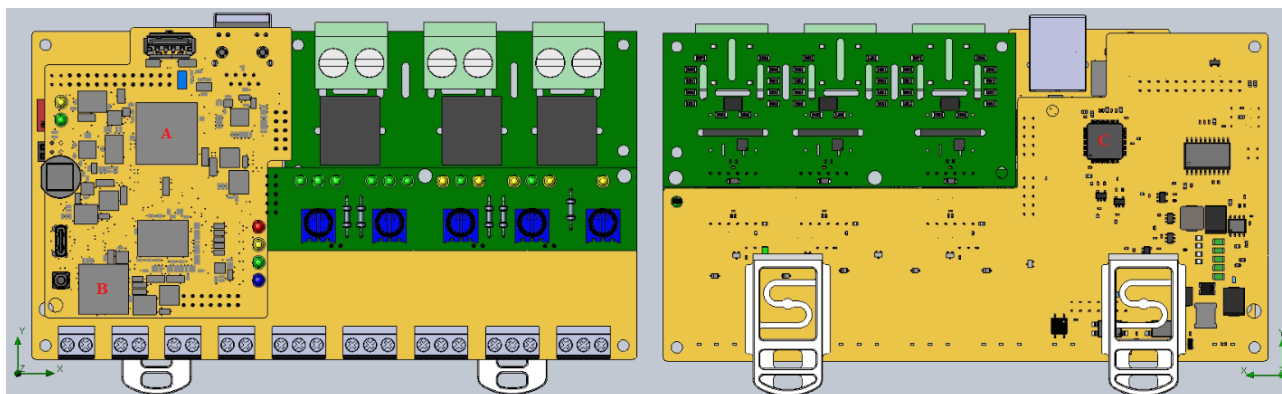


Рис. 2. Источники тепла разработанного устройства: А — МТ41К256М16ТW-107-IT:P; В — К5500ВК018; С — АЦП AD7606В

Спроектированный корпус устройства, состоящий из основы и крышки, показан на рисунке 3.

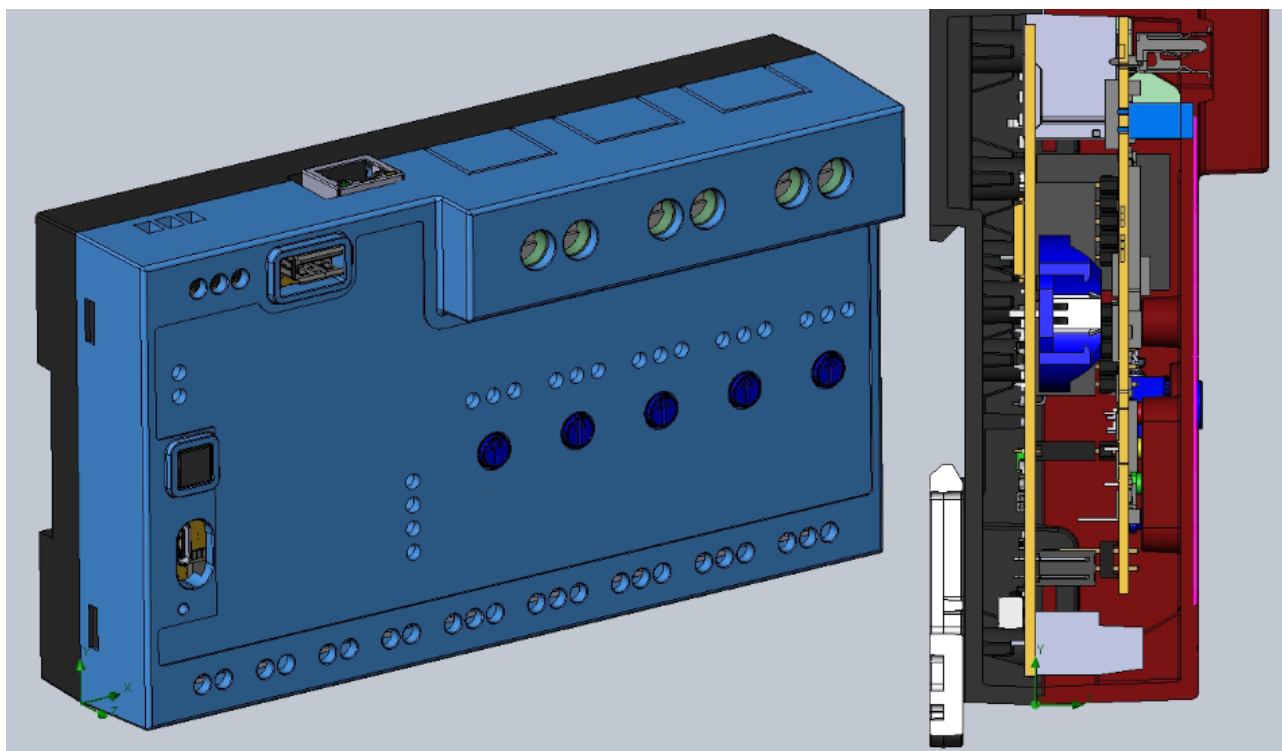


Рис. 3. Корпус устройства

Мощность тепловыделения и допустимые температуры источников указаны в таблице 1.

Таблица 1

Мощности тепловых источников и предельные значения температур

Источник	Мощность тепловыделения, Вт	Предельная температура, °C
K5500BK018	0,5128	85
MT41K256M16TW-107-IT:P	0,3699	95
АЦП AD7606B	0,1800	85

Для моделирования теплового состояния используем систему численного моделирования

FlowSimulation [8, 9]. Важнейшим этапом построения расчетной модели является построение расчетной сетки и проверка сеточной сходимости, а также задание теплофизических свойств [10]. При этом использовалось локальное мельчение расчетной сетки в объемах тепловыделяющих компонентов (таблица 2).

Таблица 2

Настройки расчетной сетки

Тип сетки	Уровень разрешения расчетной сетки
Базовая сетка	0,5128
Тепловыделяющие компоненты	0,3699
Печатные платы	0,1800

Внешний вид расчетной сетки в сечении, пересекающем тепловыделяющие компоненты, представлен на рисунках 4 и 5.

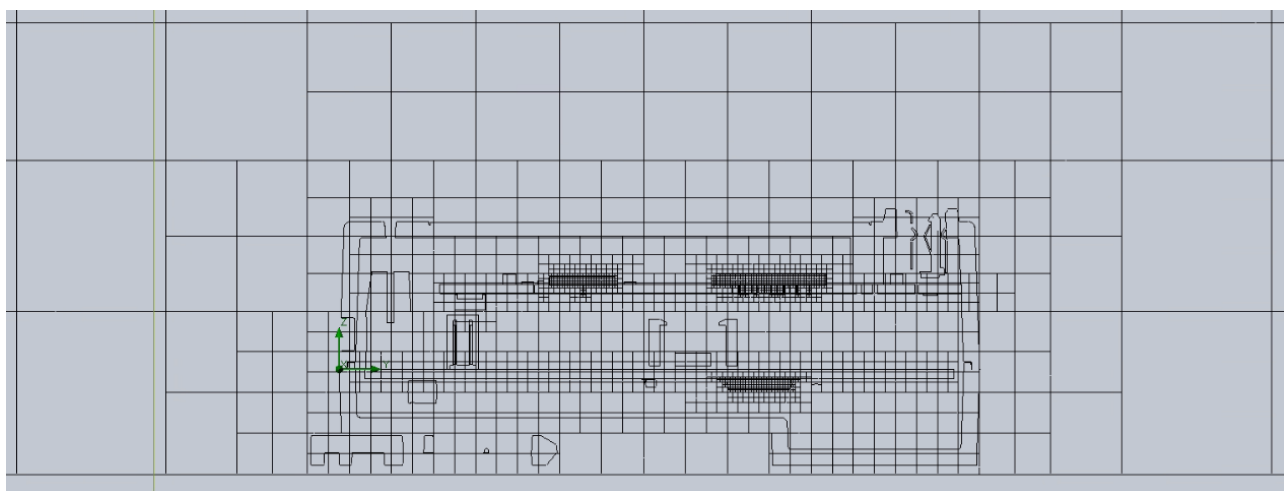


Рис. 4. Вид расчетной сетки в сечении, пересекающем тепловыделяющие компоненты

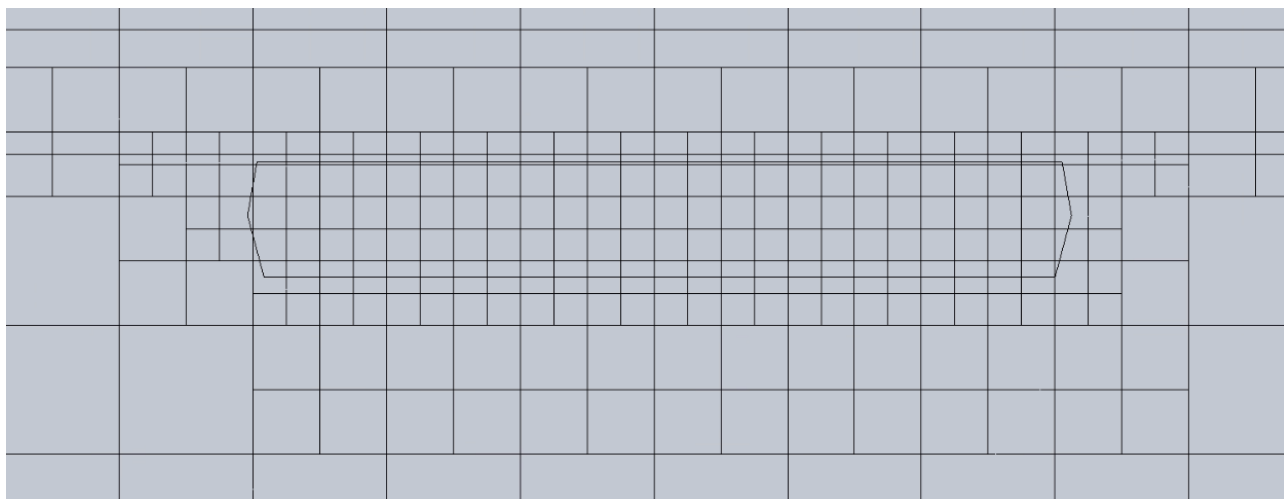


Рис. 5. Вид расчетной сетки в зоне АЦП AD7606B

Результаты расчета сеточной сходимости представлены на рисунке 6.

Как видно, сеточная сходимость достигается при уровне разрешения базовой сетки — 7 и минимальном зазоре улучшения канала — 0,02 м. Внешний вид расчетной сетки в сечении представлен на рисунках 7 и 8.

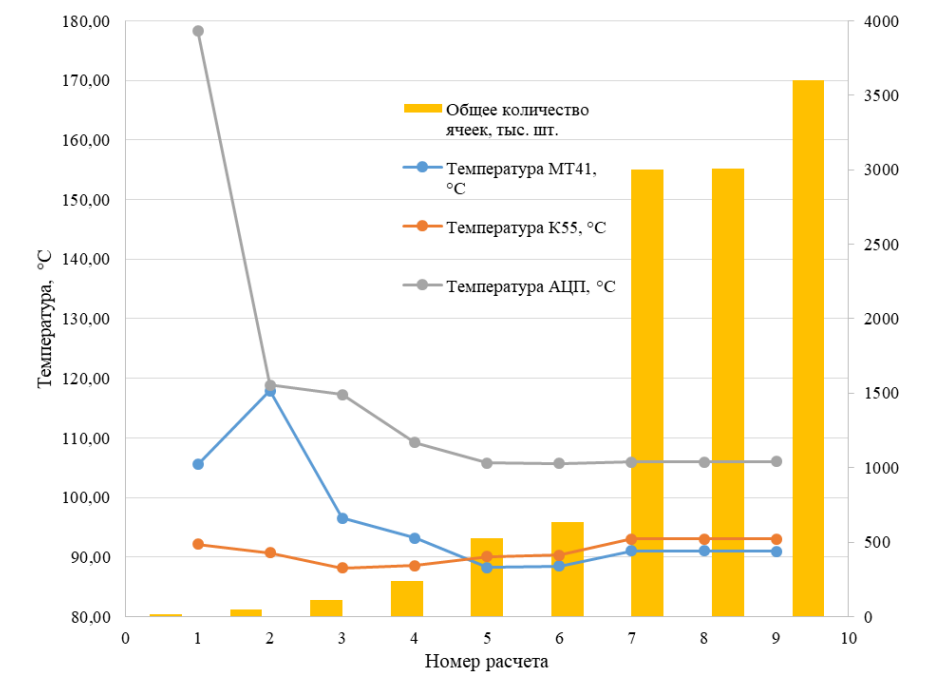


Рис. 6. Результаты расчета сеточной сходимости

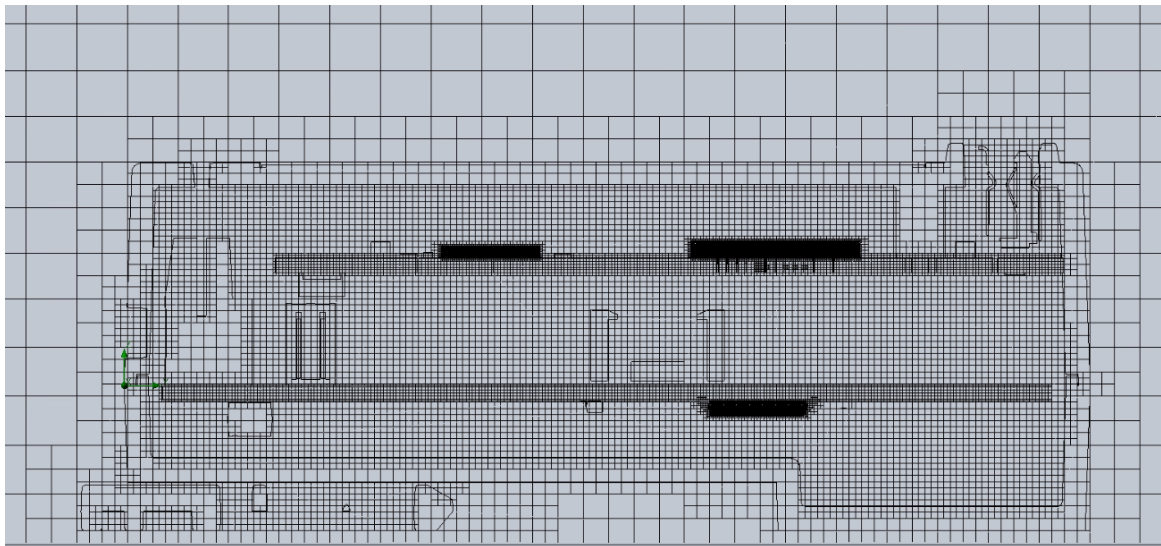


Рис. 7. Вид расчетной сетки в сечении, пересекающем тепловыделяющие компоненты

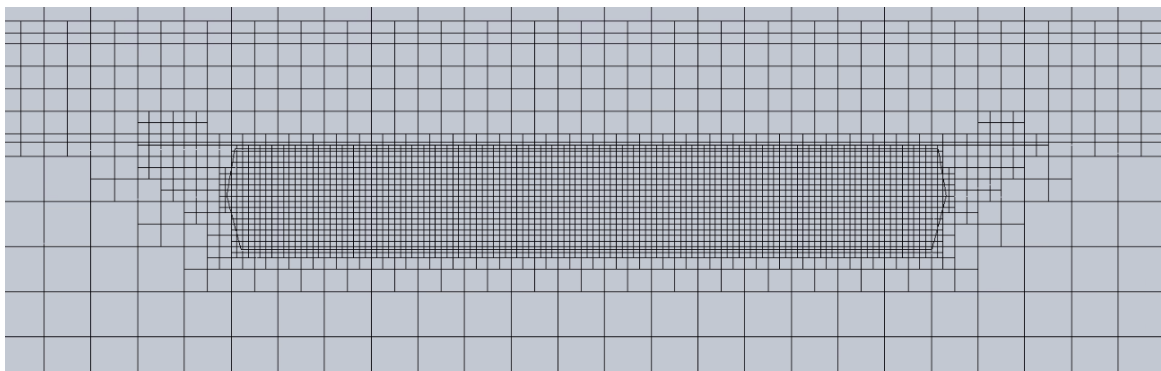


Рис. 8. Вид расчетной сетки в зоне АЦП AD7606B

Для учета влияния излучения используем метод дискретного переноса. Для расчета излучения используются все поверхности сборки при коэффициенте эмиссии, равном 0,9. Материал печатных плат — FR4 HiTg.

Результаты

Результаты серии расчетов с постепенным понижением температуры с 60 °С представлены на рисунке 9.

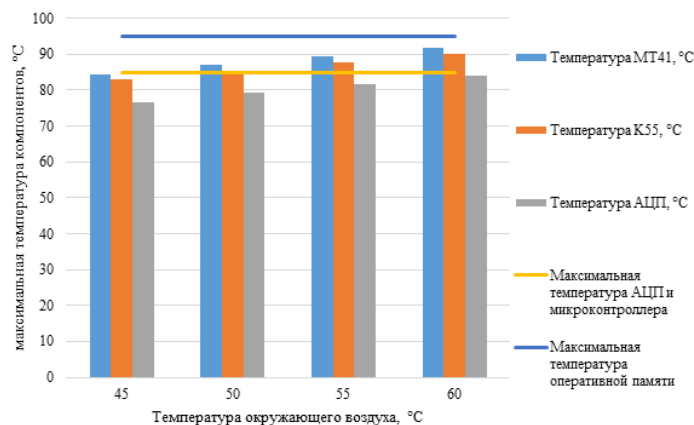


Рис. 9. Результаты расчетов

Поля распределения температур по поверхности корпуса и конвекционные потоки вокруг представлены на рисунке 10.

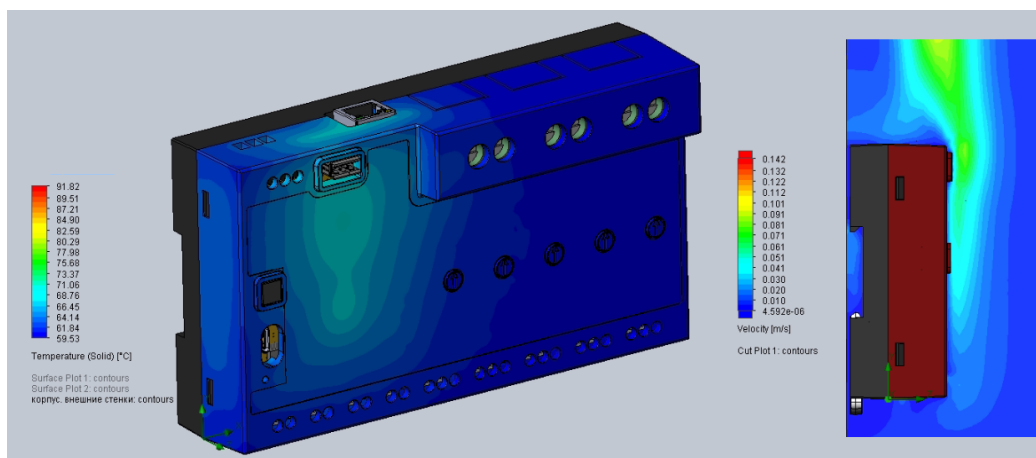


Рис. 10. Поля распределения температур по поверхности корпуса и конвекционные потоки вокруг

Поля распределений температур печатных плат показаны на рисунке 11.

Как видно из рисунков, температурные нагрузки на переднюю плату значительно выше. Это связано как с большей мощностью тепловыделения (передняя плата — 0,8827 Вт, задняя — 0,180 Вт), так и с особенностями течения воздуха внутри корпуса (рис. 12).

В нижней части корпуса под источниками тепловыделения были выполнены дополнительные вентиляционные отверстия (рис. 13) для входа воздуха.

Результаты расчета с модернизированным корпусом представлены на рисунке 14.

Максимальная температура микроконтроллера при температуре окружающего воздуха 60 °С составляет 84,48 °С и не превышает допустимого значения.

Для оценки расхода воздуха определим массовый расход воздуха через поверхность, показанную на рисунке 15.

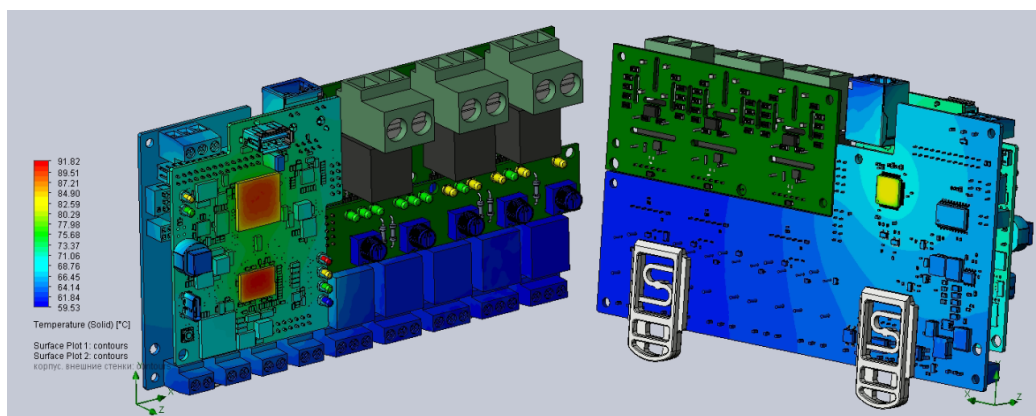


Рис. 11. Поля распределений температур печатных плат

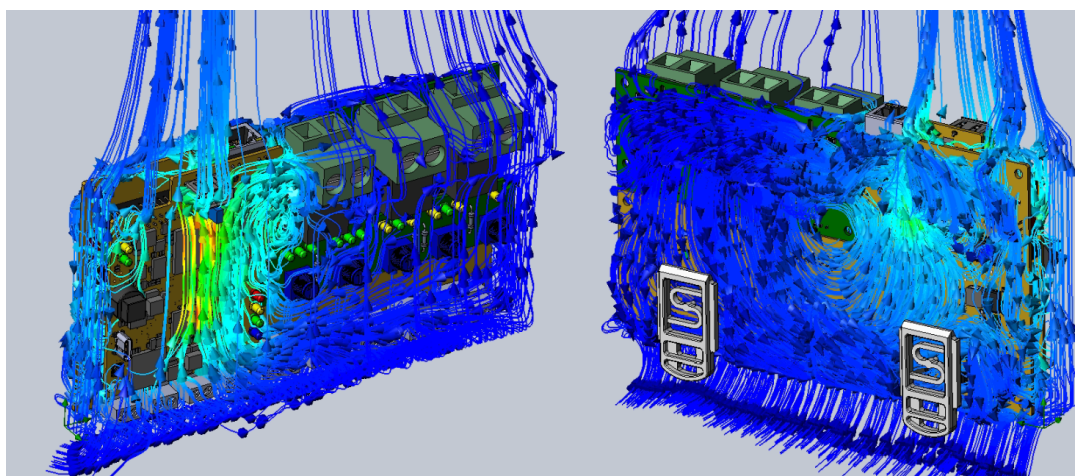


Рис. 12. Линии тока воздуха внутри корпуса устройства

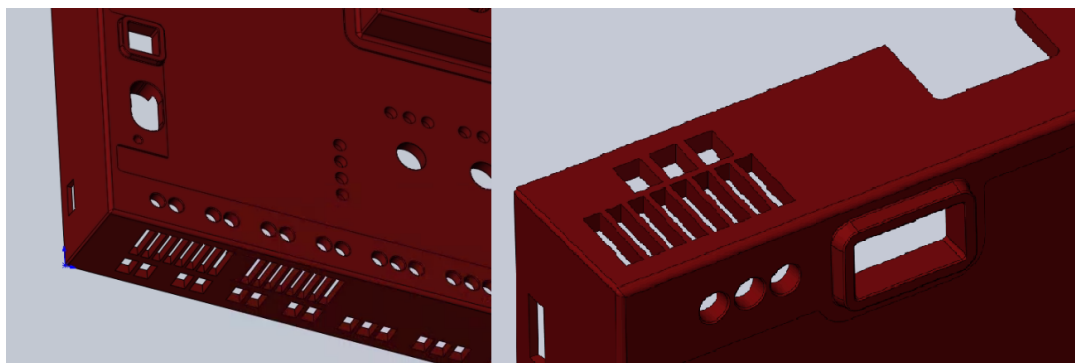


Рис. 13. Дополнительные вентиляционные отверстия в нижней и верхней частях корпуса

Данная поверхность полностью перекрывает зазор между корпусом и печатной платой. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3

Расчет массового расхода воздуха

Тип корпуса	Массовый расход воздуха, кг/с	Отклонение, %
Базовый корпус	3,46526E-06	0
Модернизированный корпус	5,45891E-06	57,5

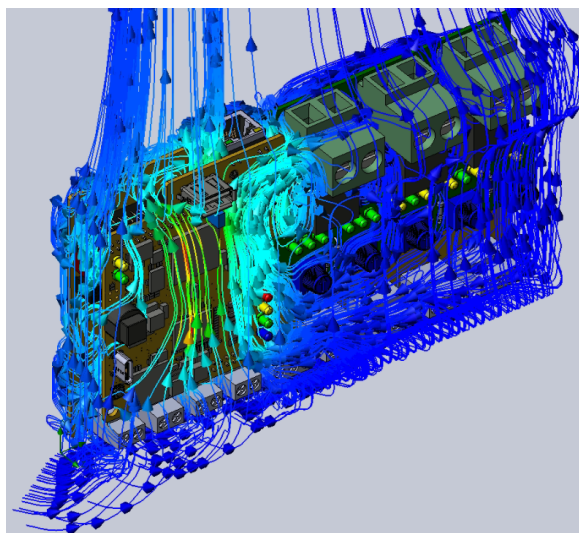


Рис. 14. Линии тока внутри устройства с модернизированным корпусом

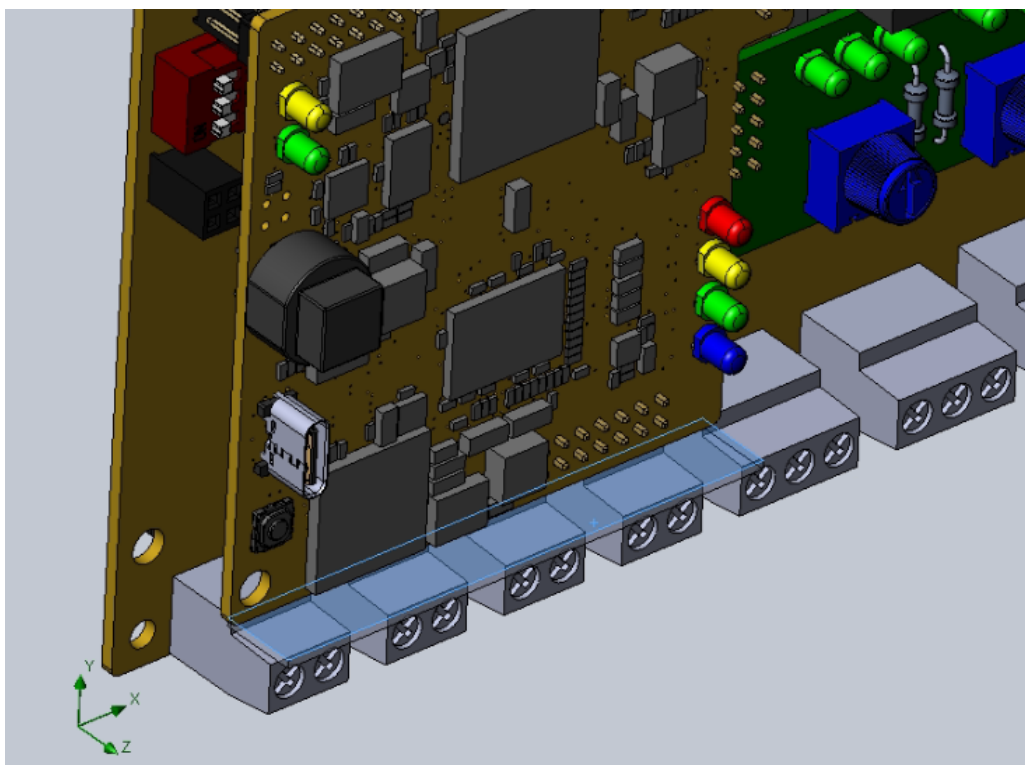


Рис. 15. Поверхность для оценки массового расхода воздуха

Как видим, расход воздуха в зоне размещения микроконтроллера в модернизированном корпусе вырос более чем на 50%. Данное обстоятельство объясняет снижение максимальной температуры микроконтроллера до приемлемых значений.

Обсуждение и заключение

В рамках выполненного этапа НИОКР впервые применена платформа на базе отечественного микроконтроллера K5500BK018 в составе морских УЛА. Предложена унифицированная архитектура, позволяющая на одной аппаратной базе реализовать 7 функционально различных устройств. Разработаны и изготовлены макетные образцы электронных устройств. Разработаны детали корпуса, которые обеспечивают пассивную систему охлаждения тепловыделяющих компонентов: микроконтроллера, оперативной памяти и АЦП. Результаты показали недостаточный теплоотвод от микроконтроллера K5500BK018 и превышение его максимальной температуры бо-

лее чем на 5 °С. Модернизация корпуса с организацией входного и выходного вентиляционных отверстий в зоне размещения микроконтроллера позволила снизить максимальную расчетную температуру до 84,48 °С при максимальной температуре, равной 85 °С.

Работа выполнена в рамках комплексной темы «1023032900401-5-1.2.1 Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения (FNEF-2024-0002)», реализуемой НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по тематическому плану НИОКР, выполняемых в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ), вносит вклад в обеспечение технологического суверенитета и формирует основу для серийного производства конкурентоспособного оборудования в условиях глобальной нестабильности цепочек поставок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thongam J. S., Tarbouchi M., Okou A. F., Bouchard D., Beguenane R. All-Electric Ships – A Review of the Present State of the Art. *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. 2013;1–8. DOI: 10.1109/ever.2013.6521626.
2. Морской регистр судоходства. Режим доступа: <https://rs-class.org/>.
3. ГОСТ Р 58095.12–2020. Судовое электрооборудование. Часть 12. Требования к устройствам автоматики. М.: Стандартинформ; 2020.
4. Стратегия развития судостроительной промышленности Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 14.12.2020 № 3614-р. Режим доступа: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012170013>.
5. Иванов А. Б., Петров С. Н. Импортозамещение в судовой автоматике: вызовы и решения. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение*. 2024;2:45–58. DOI: 10.18698/0236-3941-2024-2-45-58.
6. Козлов Д. В. Применение отечественных микроконтроллеров в промышленной автоматике *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2025;1:12–21.
7. БАГЕТ-ПЛК1-01: Платформа программно-логического управления на базе отечественного микроконтроллера. М.: НИЦ «Курчатовский институт»; 2023.
8. Boukhanouf R., Haddad A. A CFD Analysis of an Electronics Cooling Enclosure for Application in Telecommunication Systems. *Applied Thermal Engineering*. 2010;30(16):2426–2434. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.06.012.
9. Dipu Md N., Apu M. H., Chowdhury P. P. Optimization of the Desktop CPU's Straight Heatsink via CFD Simulation by Solidworks Flow Simulation. *International Journal of Pioneering Technology and Engineering*. 2025;4:1–16. DOI: 10.56158/jpte.2025.113.4.01.
10. Семенов А. Б., Куцбах А. А., Муранов А. Н., Семенов Б. И. Разработка методики математического моделирования процесса литья под давлением полимеров, наполненных металлическими порошками. *Технология металлов*. 2019;1:9–16. DOI: 10.31044/1684-2499-2019-1-0-9-16.