

4. Зайцев, В. Ф. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / В. Ф. Зайцев, А. Д. Полянин. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.

5. Матвеев, Н. М. Сборник задач и упражнений по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Н. М. Матвеев. – Минск: Вышэйшая школа, 1987. – 319 с.

УДК 621.396

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИЙ ГЕРМЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Книга Н. А., Савелов И. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к обеспечению тепловых условий эксплуатации герметичных электронных устройств, работа которых осложняется отсутствием естественной конвекции и ограниченным теплообменом с окружающей средой. Дается характеристика основных методов отвода тепла: теплопроводности корпуса, жидкостного охлаждения, тепловых труб, фазопереходных материалов и активных систем на основе модулей Пельтье и принудительной циркуляции. Отмечаются их преимущества и ограничения, а также особенности применения в условиях повышенных требований к надежности, вибропрочности и температурной стабильности аппаратуры.

Ключевые слова: герметичные устройства, тепловой режим, системы охлаждения, фазопереходные материалы, надежность.

THERMAL MANAGEMENT OF HERMETICALLY SEALED ELECTRONIC DEVICES

Kniga N. A., Savelov I. N.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarusity

Abstract. The article considers approaches to ensuring the thermal conditions of hermetically sealed electronic devices, where the absence of natural convection and limited heat exchange with the environment complicate operation. A characterization of the main cooling methods is provided, including case heat conduction, liquid cooling, heat pipes, phase-change materials, and active systems based on Peltier modules and forced circulation. Their advantages and limitations are outlined, as well as the specific features of application under demanding conditions of reliability, vibration resistance, and temperature stability of electronic equipment.

Keywords: hermetic devices, thermal regime, cooling systems, phase-change materials, reliability.

*Адрес для переписки: Книга Н. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: catomile281@gmail.com*

Современные радиоэлектронные устройства характеризуются высокой степенью интеграции и ростом плотности размещения элементов, что сопровождается увеличением тепловыделения. Обеспечение оптимального теплового режима является одним из наиболее значимых факторов надежности, поскольку перегрев компонентов приводит к деградации материалов, изменению электрических характеристик и сокращению ресурса эксплуатации. По данным эксплуатационных наблюдений, доля тепловых отказов в сложных системах может достигать 40–50 % [1]. Особенно остро проблема проявляется в герметичных конструкциях, где естественная конвекция исключена, а теплообмен с окружающей средой ограничен. Дополнительную сложность создают тяжелые условия эксплуатации: вибрационные и ударные нагрузки, резкие перепады температуры, воздействие радиации и работа в условиях вакуума. Все это требует от разработчиков решений, обеспечивающих эффективный и устойчивый отвод тепла при сохранении герметичности и общей надежности аппаратуры.

Целью данной работы является оптимизация системы охлаждения герметичных электронных устройств при их функционировании в условиях интенсивного воздействия внешних воздействий.

Одним из самых распространенных технических решений рассеивания выделяемой тепловой

энергии в электронных устройствах является применение кондукции. Как показывает практика, эксплуатации электроники в сложных условиях и в больших радиоэлектронных системах, применяются несущие конструкции и защитные корпуса, выполненные из алюминиевых и медных сплавов, которые выполняют роль естественных теплоотводов, обеспечивая передачу энергии от внутренних источников к внешней поверхности. Достоинствами такого подхода являются простота, отсутствие энергопотребления и высокая надежность. Вместе с тем эффективность метода ограничена тепловыми нагрузками и условиями окружающей среды: при высокой температуре воздуха корпус перестает обеспечивать требуемый уровень охлаждения. Для снижения теплового сопротивления применяются термоинтерфейсные материалы, однако их долговременная стабильность ограничена процессами старения.

Для более мощных устройств применяются жидкостные методы охлаждения. Заполнение герметичного объема диэлектрическими жидкостями позволяет совместить теплопроводность с конвекционным переносом тепла, обеспечивая более равномерное температурное поле. Этот метод востребован в преобразовательных системах, радиочастотных усилителях и энергетических установках, где плотность тепловых потоков особенно высока [2]. Его преимуществом является

эффективность охлаждения, однако ограничивающими факторами остаются увеличение массы, усложнение процессов герметизации и необходимость обслуживания.

Значительное внимание уделяется методам, основанным на фазовых переходах.

Тепловые трубы и испарительные камеры используют скрытую теплоту испарения для переноса энергии от источника к стенкам корпуса. Эти системы отличаются высокой эффективностью и долговечностью, благодаря чему нашли применение в космической технике и телекоммуникационных системах [3]. Вместе с тем они технологически сложны и чувствительны к ориентации устройства в гравитационном поле. Близким по принципу методом является применение фазопереходных материалов, аккумулирующих тепло за счет плавления. Они позволяют сглаживать температурные пики в системах с переменной нагрузкой, но обладают ограниченной теплоемкостью и требуют восстановления исходной фазы.

Активные методы охлаждения находят применение в случаях, когда пассивных решений оказывается недостаточно. Наиболее известными являются термоэлектрические модули Пельтье, используемые в оптоэлектронных комплексах, лазерной аппаратуре и измерительных системах. Их достоинством является точность регулирования температуры, однако недостатками выступают энергопотребление и усложнение конструкции [4]. Другим направлением остаются системы с принудительной циркуляцией жидкого теплоносителя, которые обеспечивают интенсивный отвод тепла. Подобные решения применяются в военной электронике и энергетике, где тепловые потоки предельно высоки, но наличие подвижных элементов и необходимость дополнительного энергоснабжения ограничивают их использование в компактных устройствах.

Следует подчеркнуть, что эффективность охлаждения определяется не только выбранным методом, но и конструктивными решениями. На стадии проектирования используются тепловые расчеты и моделирование, позволяющие прогнозировать распределение температур и оптимизировать размещение компонентов. Такой подход обеспечивает снижение локальных перегревов еще на раннем этапе и повышает общую эффективность системы [5].

Современные разработки направлены на интеграцию интеллектуальных систем управления тепловыми процессами. Датчики температуры, термисторы и микроконтроллеры позволяют в реальном времени отслеживать тепловое состояние устройства и динамически регулировать работу активных элементов. Такой подход открывает возможности для создания адаптивных систем охлаждения, способных подстраиваться под переменные нагрузки и внешние условия, что особенно важно для космических и военных приложений.

Перспективным направлением остается применение новых материалов с уникальными тепловыми свойствами, включая нанокompозиты, графеновые покрытия и сплавы с управляемой анизотропией теплопроводности. Комбинация этих материалов с пассивными и активными методами охлаждения позволяет существенно повысить надежность, продлить ресурс эксплуатации и уменьшить габариты аппаратуры, сохраняя при этом требуемую температурную стабильность.

Таким образом, обеспечение тепловых условий в герметичных электронных устройствах представляет собой комплексную инженерную задачу, требующую сочетания пассивных и активных методов, конструктивной оптимизации и внедрения современных материалов и интеллектуальных систем управления. Комбинированный подход остается наилучшим решением для достижения высокой надежности и долговечности радиоэлектронной аппаратуры в условиях повышенных требований к температурной стабильности, вибропрочности и эксплуатационной надежности.

Литература

1. Булат, Л. П. Термоэлектрические охлаждающие устройства: учеб. пособие / Л. П. Булат, Е. В. Бузин. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 134 с.
2. Дульнев, Г. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г. Н. Дульнев, Э. М. Семяшкин. – Ленинград: Энергия, 1968. – 152 с.
3. Дульнев, Г. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры: учебник / Г. Н. Дульнев, Н. Н. Тарновский. – Ленинград: Энергия, 1975. – 200 с.
4. Майданик, Ю. Ф. Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства для систем охлаждения электроники / Ю. Ф. Майданик // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2005. – № 4. – С. 58–69.
5. Шарков, А. В. Системы охлаждения и термостатирования / А. В. Шарков, В. А. Кораблев, В. В. Герасюченко. – СПб.: Университет ИТМО, 2021. – 216 с.

УДК 530.182

ТОПОЛОГИЧЕСКИ НЕТРИВИАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ В МОДЕЛИ φ^4 С НАРУШЕНИЕМ ЛОРЕНЦ-ИНВАРИАНТНОСТИ И УЧЕТЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИССИПАЦИИ Князев М. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрена модификация нелинейного уравнения в модели φ^4 , в которой одновременно рассматриваются эффект нарушения Лоренц-инвариантности и возможность существования диссипативных процессов в различных пространственных точках системы в один и тот же времени. Построено явное