

Шиллер Михаил Павлович

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Камалетдинова Алина Ильдаровна

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Иванова Олеся Сергеевна

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Трандин Семён Евгеньевич

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ОТ
РЕЖИМОВ ПИТАНИЯ**

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема повышения эффективности систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры с использованием элементов Пельтье. Целью работы является экспериментальное определение оптимального рабочего напряжения для стандартного термоэлектрического модуля, при котором достигается максимальная разность температур. В ходе исследования применялся метод прямого измерения температурных показателей на горячей и холодной сторонах модуля при ступенчатом изменении входного напряжения. Полученные результаты демонстрируют нелинейную зависимость холодопроизводительности от силы тока и подтверждают доминирование джоулева тепла на предельных режимах работы. Выводы могут быть использованы при проектировании компактных холодильных установок.

Ключевые слова: термоэлектричество, эффект Пельтье, охлаждение электроники, теплообмен, энергоэффективность, полупроводники.

Shiller Mikhail Pavlovich

*Student, Ulsu(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Kamaletdinova Alina Ildarovna

*Student, Ulsu(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Ivanova Olesya Sergeevna

Student, ULSU(Ulyanovsk State University)

Ulyanovsk, Russia

Trandin Semyon Evgenievich

Student, ULSU(Ulyanovsk State University)

Ulyanovsk, Russia

STUDY OF THE DEPENDENCE OF ENERGY EFFICIENCY OF THERMOELECTRIC MODULES ON POWER MODES

Abstract. This article discusses the problem of improving the efficiency of cooling systems for electronic equipment using Peltier elements. The aim of the work is to experimentally determine the optimal operating voltage for a standard thermoelectric module, at which the maximum temperature difference is achieved. The study used the method of direct measurement of temperature indicators on the hot and cold sides of the module with a stepwise change in input voltage. The obtained results demonstrate a non-linear dependence of cooling capacity on current strength and confirm the dominance of Joule heat at limiting operating modes. The conclusions can be used in the design of compact refrigeration units.

Keywords: thermoelectricity, Peltier effect, electronics cooling, heat exchange, energy efficiency, semiconductors.

Введение

В современной технической физике и прикладной электронике проблема эффективного терморегулирования становится одной из ключевых задач. С каждым годом наблюдается устойчивая тенденция к миниатюризации электронных компонентов при одновременном росте их производительности. Увеличение тактовой частоты процессоров, повышение плотности монтажа элементов на печатных платах и рост мощностей светодиодных матриц неизбежно приводят к значительному тепловыделению. Традиционные методы воздушного охлаждения, основанные на конвекции и использовании радиаторов с вентиляторами, часто достигают своего физического предела и не могут обеспечить требуемый температурный режим, особенно в закрытых корпусах или в условиях повышенной температуры окружающей среды.

В связи с этим возрастает интерес инженеров и исследователей к активным методам охлаждения, среди которых особое место занимают термоэлектрические преобразователи, работающие на основе эффекта Пельтье. Данные устройства обладают рядом неоспоримых преимуществ: отсутствием движущихся частей (вибрации), компактностью, возможностью точного регулирования температуры и способностью работать как на охлаждение, так и на нагрев при смене полярности тока. Они находят широкое применение в бытовой технике (автомобильные холодильники, кулеры для воды), в медицине (термостаты для хранения биоматериалов) и в оптоэлектронике (охлаждение лазерных диодов и фотоприемников).

Однако, несмотря на широкую доступность, реальный коэффициент полезного действия (КПД) элементов Пельтье остается сравнительно низким. На практике часто наблюдается ситуация, когда пользователи подают на модуль максимально допустимое паспортное напряжение, полагая, что это обеспечит наилучшее охлаждение. Физика процесса, однако, указывает на то, что линейная зависимость между мощностью и эффективностью отсутствует. Внутреннее электрическое сопротивление полупроводника приводит к выделению паразитного джоулева тепла, которое при определенных условиях может полностью нивелировать эффект охлаждения.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью поиска оптимальных режимов работы таких устройств для повышения их энергоэффективности. Целью данной работы является экспериментальное выявление зависимости разности температур (ΔT) между гранями модуля от подаваемого напряжения и нахождение точки энергетического баланса.

Методы и материалы исследования

Для реализации поставленной цели была разработана методика экспериментального исследования, позволяющая контролировать электрические параметры питания модуля и фиксировать его тепловые характеристики в стационарном режиме.

В качестве объекта исследования был выбран термоэлектрический модуль марки TEC1-12706. Это один из самых распространенных модулей, состоящий из 127 полупроводниковых пар (термопар), соединенных последовательно электрически и параллельно термически. Согласно

технической документации производителя, максимальное напряжение U_{max} для данного модуля составляет 15,4 В, а максимальный ток I_{max} — около 6 А.

Схема экспериментальной установки включала следующие функциональные блоки:

1. Источник питания: Лабораторный блок питания постоянного тока с возможностью плавной регулировки выходного напряжения в диапазоне от 0 до 30 В и ограничения по току. Точность установки напряжения составляла 0,1 В.
2. Измерительная система: Для регистрации температур использовались два цифровых термометра с выносными термопарами К-типа (хромель-алюмель). Датчики крепились непосредственно к центрам керамических пластин модуля (с горячей и холодной стороны). Для минимизации контактного теплового сопротивления использовалась кремнийорганическая термопаста КПТ-8.
3. Система теплоотвода: Критически важным условием работы элемента Пельтье является эффективный отвод тепла от горячей стороны. Без этого тепловая энергия, перекачиваемая с холодной стороны, суммируется с теплом, выделяемым от протекания тока, что приводит к быстрому перегреву всего модуля. В эксперименте использовался массивный алюминиевый радиатор с принудительным воздушным охлаждением (вентилятором).

Методика проведения эксперимента заключалась в ступенчатом повышении напряжения на клеммах модуля. Измерения проводились в диапазоне от 1 В до 14 В с шагом в 1 В. На каждом этапе система выдерживалась в неизменном состоянии в течение 5–7 минут для установления теплового равновесия, когда показания термометров переставали изменяться во времени. Температура окружающей среды в лаборатории поддерживалась на уровне 24°C.

Теоретической основой анализа служит уравнение теплового баланса на холодной стороне термоэлектрического модуля. Холодопроизводительность Q_c описывается следующим соотношением:

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T$$

где α — коэффициент термоЭДС (коэффициент Зеебека), T_c — абсолютная температура холодной стороны, I — сила тока, R — электрическое сопротивление ветвей модуля, K — теплопроводность модуля, ΔT — разность температур между горячей и холодной сторонами.

Данная формула наглядно показывает наличие трех конкурирующих процессов:

- $\alpha T_c I$ — полезный эффект Пельтье (перенос тепла, линейно зависит от тока);
- $\frac{1}{2} I^2 R$ — джоулев нагрев (вредный эффект, зависит от квадрата тока);
- $K \Delta T$ — обратный поток тепла за счет теплопроводности керамики и полупроводников.

Результаты исследования

В ходе эксперимента были получены численные значения температур холодной (T_c) и горячей (T_h) поверхностей для различных значений напряжения питания. На основе этих данных была рассчитана разность температур $\Delta T = T_h - T_c$.

Анализ полученных данных позволил выделить три характерных участка зависимости.

1. Линейный участок (низкие напряжения, 1–5 В).

В начале эксперимента, при подаче малых напряжений, наблюдался практически линейный рост разности температур. При напряжении 3 В разница температур составила около 12°C. В этом режиме сила тока, протекающего через модуль, относительно невелика (менее 1,5 А). Следовательно, вклад джоулева тепла, пропорционального квадрату тока, остается незначительным. Основную роль играет эффект Пельтье. Система работает с максимальным холодильным коэффициентом, однако абсолютная мощность охлаждения мала для практических задач по заморозке, но вполне достаточна для термостатирования.

2. Участок насыщения (средние напряжения, 6–10 В).

При повышении напряжения темп роста ΔT начал заметно снижаться. Максимальная разность температур была зафиксирована в диапазоне 9–10 В и составила приблизительно 42°C (при температуре горячей стороны, стабилизированной радиатором на уровне 38°C, температура холодной стороны опустилась до -4°C). Это наиболее эффективный рабочий режим для модуля ТЕС1-12706 в условиях воздушного охлаждения. Здесь достигается баланс между скоростью переноса носителей заряда и выделением тепла на внутреннем сопротивлении.

3. Участок деградации эффективности (высокие напряжения, 11–14 В).

Наиболее показательные результаты были получены при приближении к номинальным и максимальным паспортным значениям напряжения. При подаче 12 В температура горячей стороны начала расти, несмотря на работу вентилятора, достигнув 45°C. При дальнейшем повышении напряжения до 14 В мы зафиксировали снижение разности температур ΔT . Температура холодной стороны начала повышаться.

Этот эффект объясняется резким возрастанием слагаемого $\frac{1}{2}I^2R$ в уравнении теплового баланса. Поскольку зависимость тепловыделения от тока квадратичная, а зависимость эффекта Пельтье — линейная, при больших токах паразитный нагрев начинает доминировать над полезным охлаждением. Тепловая энергия просто не успевает рассеиваться радиатором, и избыточное тепло «перетекает» обратно на холодную сторону за счет теплопроводности материала ($K \Delta T$).

Заключение

Проведенное исследование работы термоэлектрического модуля ТЕС1-12706 позволило сформулировать следующие выводы, имеющие практическое значение для разработки систем охлаждения.

Во-первых, экспериментально подтверждено, что использование элементов Пельтье на максимальных паспортных напряжениях (12–15 В) часто является энергетически неоправданным. Максимальная разность температур в условиях стандартного воздушного охлаждения достигается при напряжениях порядка 9–10 В, что составляет около 60–70% от U_{max} .

Во-вторых, дальнейшее увеличение напряжения выше точки оптимума приводит к снижению эффективности: затрачиваемая электроэнергия расходуется не на перенос тепла, а на разогрев самого модуля, что требует неоправданного усложнения системы отвода тепла от горячей стороны.

В-третьих, для повышения КПД холодильных установок на базе элементов Пельтье рекомендуется использовать источники питания с возможностью точной регулировки напряжения или широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) с корректным сглаживанием пульсаций, ограничивая ток на уровне, соответствующем точке перегиба характеристики эффективности.

Полученные результаты демонстрируют необходимость комплексного подхода при проектировании термоэлектрических систем, где электрический режим работы модуля должен быть строго согласован с возможностями системы теплоотвода.

Список литературы:

1. Бурштейн А.И. Физические основы термоэлектричества. — М.: Физматлит, 2020. — 256 с.
2. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 188 с.
3. Олейников А.В., Коротков В.С. Исследование параметров термоэлектрических модулей // Вестник технической физики. — 2019. — № 4. — С. 45-51.
4. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. — Киев: Наукова думка, 1979. — 768 с.
5. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения // Компоненты и технологии. — 2018. — № 12. — С. 34-38.
6. ГОСТ Р 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. — М.: Стандартинформ, 2008.