Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций
Кафедра радиоэлектронных средств защиты информации

Работа допущена к защите
зав. кафедрой
_____С.Б. Макаров
"___"_____2015 г.

ВЫПУСКНАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Тема: « Разработка блока питания на основе термогенераторного модуля»

Направление: 210400 – Телекоммуникации

Выполнил: студент гр.43427/2 Титов С.В.
Руководитель: доц. Груздев А.С.

Санкт-Петербург
2015

Реферат

Данная работа посвящена разработке блока питания на основе термоэлектрического модуля

В ходе работы была разработана принципиальная схема, печатная плата и произведен сравнительный анализ работы различных моделей термогенераторных модулей (ТГМ) при различных температурных режимах.

Объем работы составляет 31 страница. В работе содержится 19 рисунков, 5 таблиц, а также 3 приложения.

Оглавление

Реферат 2
Введение 4
1. Основные принципы работы ТЭГ 5
1.1 Термоэлектрический эффект 5
1.2 Термоэлектрические модули 7
1.2.1 Принцип работы термоэлектрического модуля 7
1.2.2 Применение термоэлектрическсих модулей на основе элементов Пельтье 10
1.2.3 Виды термоэлектрических модулей 11
1.2.4 Особенности применения ТГМ 14
1.2.5. Установка термогенераторных модулей 15
1.3. Постановка задач работы 16
2. Разработка принципиальной схемы блока питания 16
2.1. Разработка схемы на основе DC/DC преобразователя LTC3109 16
2.2. Расчет основных параметров ТГМ 20
3.3. Выводы по разделу 2 20
3. Экспериментальные исследования работы ТЭГ при различной разности температур 21
3.1. Структурная схема ТЭГ 21
3.2. Результаты экспериментальных исследований 22
3.2.1.Основные формулы и соотношения для определения параметров ТЭГ 22
3.3. Результаты испытаний макета источника питания на базе ТЭГ 27
3.3. Выводы по разделу 3 29
Заключение 30
Библиографический список 31

Введение

В настоящее время весьма актуальной является задача повышения надежности работы термоэлектрических преобразователей, нашедших широкое применение в радиоэлектронике, электроэнергетике, холодильной технике. Термоэлектрические преобразователи могут работать как в режиме генераторов электроэнергии, преобразуя тепло в электроэнергию, и как холодильники, трансформируя электроэнергию в холод.

Термоэлектрические преобразователи по техническим, эксплуатационным и экологическим характеристикам, а также по удельной стоимости преобразования энергии, за исключением эффективности преобразования энергии, превосходят существующие генераторы электроэнергии и охлаждающие приборы компрессорного типа. По этой причине термоэлектрические приборы нашли свою нишу только в тех областях техники, где максимальные значения мощности преобразования не превышают 500-1000 Вт, или там, где предъявляются высокие требования к долговечности, надежности и высокой стойкости приборов к внешним воздействиям, причем дальнейшее расширение областей применения термоэлектрических преобразователей связано с увеличением термоэлектрической добротности полупроводниковых материалов.

Целью данной работы является разработка блока питания на основе ТГМ.

Первый раздел работы посвящен обзору основных принципов работы ТЭГ и ТГМ, а также постановке задач работы. А также выбору ТГМ для проведения эксперимента.

Во втором разделе разработана принципиальная схема и монтажная плата блока питания на основе ТГМ. Также произведен сравнительный анализ модулей по их основным характеристикам.

Третий раздел посвящен обработке экспериментальных данных и сравнительному анализу выбранных модулей в различных температурных режимах.

1. Основные принципы работы ТЭГ

1.1 Термоэлектрический эффект

Термоэлектрический эффект (или эффект Зеебека) объясняется следующим образом: при нагревании одного конца стержня из металла или полупроводника, между его горячим и холодным концами возникает разность потенциалов, величина которой и знак могут быть различны.Соединив два проводника, изготовленных из разных материалов, в замкнутую цепь и нагревая точку соединения проводников, образующих термоэлемент (термопару) (рис.1.1), получим в цепи э.д.с., определяемую разностями потенциалов, возникающих в используемых проводниках при их неравномерном нагреве. [1]

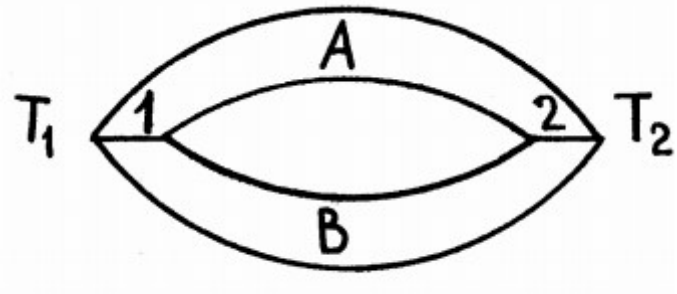

Рис.1.1 Термопара из двух проводников

Величина возникающей термо-ЭДС в первом приближении зависит только от материала проводников и температур горячего (T_1) и холодного (T_2) контактов.

В небольшом интервале температур термо-ЭДС (E) можно считать пропорциональной разности температур:

$$E = \alpha_{12}(T_2 - T_1), \qquad (1.1)$$

где α_{12} — термоэлектрическая способность пары (или коэффициент термо-ЭДС).

В простейшем случае коэффициент термо-ЭДС определяется только материалами проводников, однако, строго говоря, он зависит и от температуры α_{12} , и в некоторых случаях с изменением температуры меняет знак.

Более корректное выражение для термо-ЭДС:

$$\varepsilon = \int_{T1}^{T2} \alpha_{12}(T)\, dT \qquad (1.2)$$

Если вдоль проводника существует градиент температур, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном; в полупроводниках в дополнение к этому концентрация электронов проводимости растет с температурой. В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному и на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остаётся не скомпенсированный положительный заряд. Процесс накопления заряда продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет поток электронов в обратном направлении, равный первичному, благодаря чему установится равновесие.

ЭДС, возникновение которой описывается данным механизмом, называется объёмной ЭДС.

Обратный данному эффект получил название эффекта Пельтье. При наблюдении этого эффекта через полупроводник с исходной постоянной температурой всего образца пропускают постоянный ток, который создает разность температур между проводниками A и B (рис.1.2)

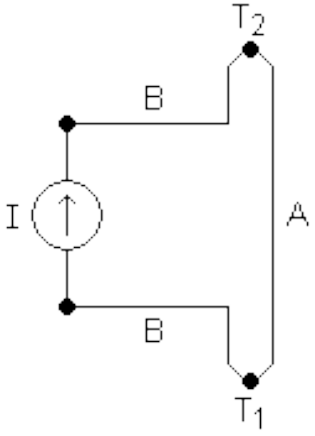

Рис.1.2 Иллюстрация эффекта Пельтье

вследствие выделения тепла на одном контакте (горячий контакт) и поглощения тепла на втором(холодный контакт). Коэфициент Пельтье(П), определяется формулой

$$П = Q/J, \qquad (1.3)$$

где Q-количества тепла выделяющееся за 1с в одном контакте и поглощаемое в другом, а J-ток, проходящий через образец. [2]

Эффект Пельтье более заметен у полупроводников, это свойство используется в элементах Пельтье.

Причина возникновения явления Пельтье заключается в следующем. На контакте двух веществ имеется контактная разность потенциалов, которая создаёт внутреннее контактное поле. Если через контакт протекает электрический ток, то это поле будет либо способствовать прохождению тока, либо препятствовать. Если ток идёт против контактного поля, то внешний источник должен затратить дополнительную энергию, которая выделяется в контакте, что приведёт к его нагреву. Если же ток идёт по направлению контактного поля, то он может поддерживаться этим полем, которое и совершает работу по перемещению зарядов. Необходимая для этого энергия отбирается у вещества, что приводит к охлаждению его в месте контакта.

На данном эффекте базируется принцип действия термоэлектрического преобразователя- элемента Пельтье.

1.2 Термоэлектрические модули

1.2.1 Принцип работы термоэлектрического модуля

Модуль Пельтье представляет собой термоэлектрический холодильник, состоящий из последовательно соединенных полупроводников p- и n-типа, образующих p-n и n-p-переходы (рис.1.3). В соответсвии с теорией [4] при пропускании тока I через рассматриваемый термоэлемент в направлении, указанном стрелкой, на n-p-переходе (холодном спае) поглощается, а на p-n (горячем спае) выделяется тепло Пельтье согласно зависимости

$$Q_П = ΠI \qquad (1.4)$$

При этом охлаждаемый спай имеет температуру $T_х$, а нагреваемый $T_г$. Если температуру нагреваемого спая поддерживать постоянной за счет теплоотвода, то между спаями возникает стационарная разность температур

$$ΔT=T_г-T_х \qquad (1.5)$$

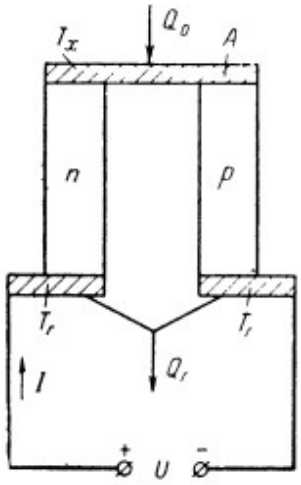

Рис. 1.3 Полупроводниковый термоэлемент

Тепловая нагрузка на холодный спай Q_0 состоит из теплоты Q_1, обусловленной источником тепла, находящимся внутри термостатируемого объема, и теплоты, поступающей в термостатируемый объем из окружающей среды Q2.

Уравнение теплового баланса для холодного спая может быть записано в виде (рис. 1.4,а):

$$Q_т+0,5Q_{дж}+Q_0=Q_П, \qquad (1.6)$$

где $Q_0=Q_1+Q_2$, а $0,5\ Q_{дж}=0,5I^2r$

При изменении направления тока (рис.1.4,б) места выделения и поглощения тепла взаимно меняются[3].

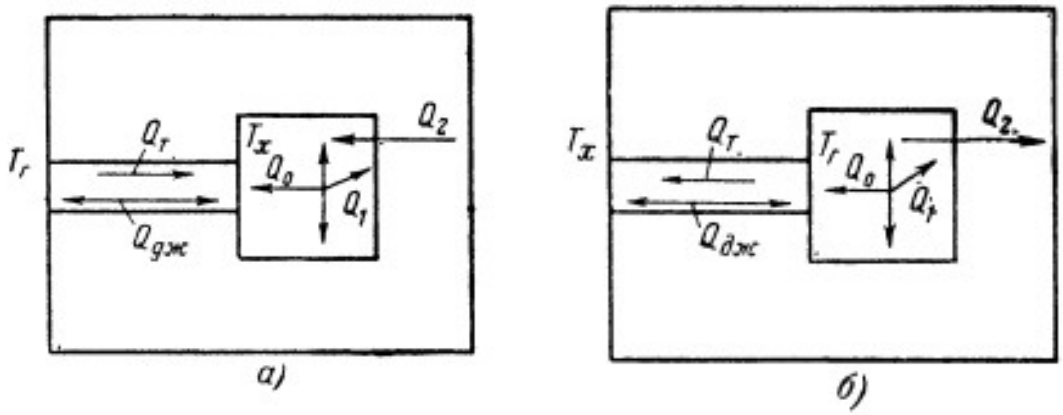

Рис.1.4 Направления тепловых потоков в ветви термоэлемента. а-охлаждение внутреннего объема; б- нагрев внутреннего объема

Решая равенство (1.6) относительно перепада температур на концах термоэлемента, получим выражение вида:

$$T_г - T_х = \Delta T = \frac{\Pi I - 0{,}5 I^2 r - Q_0}{Z} \qquad (1.7)$$

Типичный модуль обеспечивает значительный температурный перепад, который составляет несколько десятков градусов. При соответствующем принудительном охлаждении нагревающегося радиатора второй радиатор - холодильник, позволяет достичь отрицательных значений температур.

Главная характеристика термоэлектрического охлаждающего устройства - это эффективность охлаждения

$$Z = \frac{\alpha^2}{r \cdot \lambda} \qquad (1.8)$$

где α – коэффициент термо-ЭДС;
r – удельное сопротивление;
λ – удельная теплопроводность полупроводника.

Параметр Z – функция температуры и концентрации носителей заряда, причем для каждой заданной температуры существует оптимальное значение концентрации, при которой величина Z максимальна. Максимальное снижение температуры связано с величиной эффективности выражением:

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} \cdot Z \cdot T^2 \qquad (1.9)$$

где T – температура холодного спая термоэлемента.

Чем больше значение Z для отдельных ветвей, тем больше значение,

$$Z = \left(\alpha_1 + \alpha_2\right)^2 / \left(\sqrt{\rho_1 \lambda_1} + \sqrt{\rho_2 \lambda_2}\right)^2 \qquad (1.10)$$

которое определяет КПД всего термоэлемента. Целесообразно выбирать полупроводники с наибольшими значениями подвижности и с минимальной теплопроводностью. Введение в полупроводник тех или иных примесей – основноедоступное средство изменять его показатели (α, ρ, λ)в желательную сторону.

С учетом выражения (1.8) равенства (1.6) и (1.7) можно записать в виде

$$Q_0=0{,}5I^2r - \frac{a^2}{rZ}\Delta T \qquad (1.11)$$

$$\Delta T= \frac{Z}{a^2} r\ (\Pi I - 0{,}5 I^2\ r - Q_0) \qquad (1.12)$$

На рис.5 показана зависимость максимального перепада температур в функции параметра эффективности и температуры горячего спая[3].

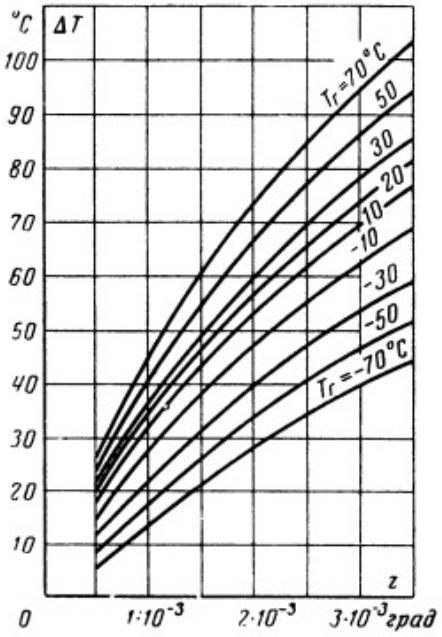

рис.1.5 Зависимость максимального перепада температур от параметра эффективности и температуры горячего спая[3].

Из рис.1.5 видно, что с повышением параметра эффективности максимальная разность температур спаев растет. Естественно с увеличением ΔТ расширяется сфера возможного применения термоэлектрических устройств.

1.2.2 Применение термоэлектрическсих модулей на основе элементов Пельтье

Среди основных областей применения ТГМ можно выделить следующие:

- утилизация бросового тепла на транспортных установках (автомобилях, судах);

- автономное обеспечение энергией электронных блоков для водяных котлов и мусоросжигательных установок;
- катодная защита газовых трубопроводов;
- преобразование тепла природных источников - геотермальные воды и т.п. в электрическую энергию;
- автономное питание маломощных электрических устройств.

Основные направления практического использования эффекта Пельтье в полупроводниках: получение холода для создания термоэлектрических охлаждающих устройств, подогрев для целей отопления, термостатирование, управление процессом кристаллизации в условиях постоянной температуры.

Термоэлектрический метод охлаждения обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами охлаждения. Термоэлектрические устройства отличаются простотой управления, возможностью тонкого регулирования температуры, бесшумностью, высокой надежностью работы.

Элементы Пельтье применяются в ситуациях, когда необходимо охлаждение с небольшой разницей температур, или энергетическая эффективность охладителя не важна. Например элементы Пельтье применяются в маленьких автомобильных холодильниках, так как применение компрессора в этом случае невозможно из-за ограниченных размеров и кроме того необходимая мощность охлаждения невелика.

Кроме того, элементы Пельтье применяются для охлаждения устройств с зарядовой связью в цифровых фотокамерах. За счёт этого достигается заметное уменьшение теплового шума при длительных экспозициях (например, в астрофотографии). Многоступенчатые элементы Пельтье применяются для охлаждения приёмников излучения в инфракрасных сенсорах.

Также элементы Пельтье часто применяются для охлаждения и термостатирования диодных лазеров, с тем, чтобы стабилизировать длину волны излучения.

В приборах, при низкой мощности охлаждения, элементы Пельтье часто используются как вторая или третья ступень охлаждения. Это позволяет достичь температур на 30 – 40° K ниже, чем с помощью обычных компрессионных охладителей (до -80 для одностадийных холодильников и до -120 для двухстадийных).

1.2.3 Виды термоэлектрических модулей

Для определенных целей используются различные ТГМ. Рассмотрим характеристики и основные свойства некоторых из них. На рис.1.6 изображены конфигурации исполнения генераторных ТГМ.

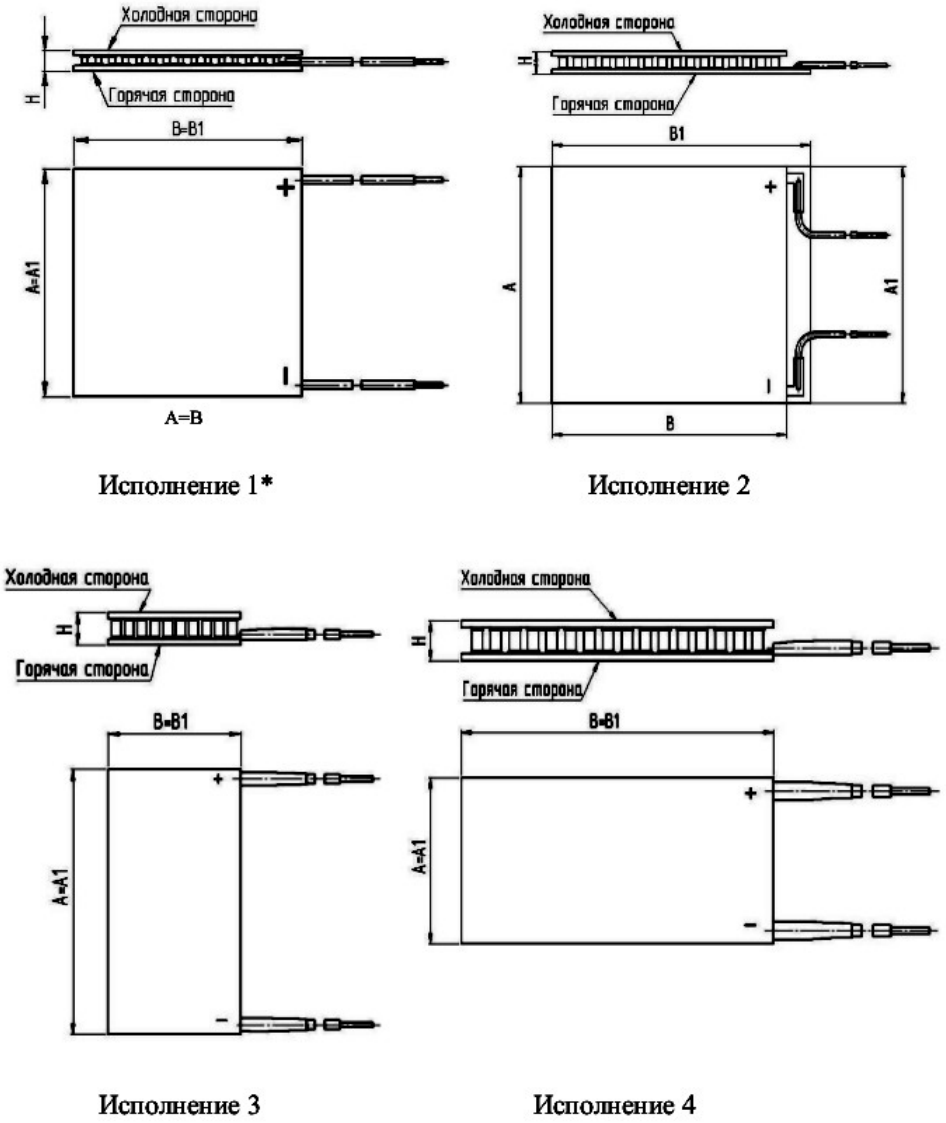

Рис. 1.6 Конфигурация исполнения генераторных ТГМ [5]

испо

Для обозначения термогенераторных модулей используется универсальное сокращение вида: **ТГМ-N-C-h**, где:

ТГМ – сокращенное обозначение изделия – термоэлектрический генераторный модуль;

N – количество термоэлектрических пар в модуле;

C – длина ребра основания термоэлектрического элемента (в миллиметрах);

h – высота термоэлектрического элемента (в миллиметрах).

Например, в модуле ТГМ-127-1.0-2.5: 127 термоэлектрических пар (254 термоэлектрических элементов), каждый элемент имеет поперечное сечение 1,0х1,0 мм и высоту 2,5 мм.[5]

В при разработке блока питания мы будем рассматривать два вида ТГМ, параметры которых представлены в таблица 1.1 [5]. ТГМ являются продукцией ИПФ «Криотерм» (г. Санкт-Петербург).

Таблица 1.1 Параметры модельных ТГМ

Тип модуля	Размеры			Электрическое сопротивление[1], R, Ом	Тепловое сопротивление, R_t, К/Вт
	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм		
ТГМ-287-1,0-2,5	40	40	4,8	8,7	1,93
ТГМ-199-1,4-0,8	40	40	3,2	0,95	0,45

ТГМ характеризуется следующими параметрами:

электрическим сопротивлением

$$R = 2N\rho\frac{h}{a^2} = 2N\rho\gamma, \qquad (1)$$

где N – число пар ветвей,

h – высота ветви,

a – сторона поперечного сечения ветви,

$\gamma = \frac{h}{a^2}$ – геометрический фактор,

ρ – удельное электрическое сопротивление ветви (величина порядка 10^{-5} Ом·м);

тепловой проводимостью K_m:

$$K_m = 2N\frac{\lambda_T}{\gamma}, \qquad (2)$$

где λ_T– коэффициент теплопроводности ветви (величина порядка 1.5 Вт/(м·К));

коэффициентом Зеебека α:

$$\alpha = 2N\alpha_T,$$

где α_T – коэффициент Зеебека одной ветви (величина порядка 200 мкВ/К).

[1]При температуре обеих сторон ТЭМ 22 °С

1.2.4 Особенности применения ТГМ

Для получения наибольшей эффективности и надежности работы ТГМ необходимо руководствоваться следующими ключевыми принципами:

Горячая и холодная поверхности, на которые будет установлен модуль, должны иметь высокую плоскостность: не хуже 20 мкм в базовом варианте.

Генераторный модуль должен быть соответствующим образом установлен между источником тепла и холодным радиатором. Для достижения наилучшего результата и сохранения работоспособности генераторного модуля в течение срока эксплуатации необходимо обеспечить усилие сжатия порядка 1–1,5 кН для модуля размером 40х40 мм. Для оптимизации нагрузки в период эксплуатации целесообразно использовать пружины совместно с резьбовыми соединениями (будет описано ниже).

Температура горячей стороны ТГМ не должна превышать заданную в спецификации (для выбранных тестируемых ТЭМ до 300 ^{o}C).

Край металлической поверхности источника тепла, соприкасающейся с ТГМ, должен выходить за границы модуля, желательно на 10 мм и более с каждой стороны.

Температура поверхности модуля должна быть максимально равномерной. В случае если источник тепла и/или радиатор холодной стороны изготовлены не из меди, рекомендуется применять промежуточные медные пластины для предотвращения неравномерного температурного поля.

Для увеличения потока тепла, проходящего через модуль, диаметр стягивающих болтов конструкции термоэлектрического генератора должен быть по возможности минимальным. Материал болтов желательно выбирать с минимальной теплопроводностью (например, нержавеющая сталь).

Для обеспечения наилучшего теплового контакта ТГМ с источником тепла и радиатором холодной стороны необходимо применять теплопроводную пасту. Слой термопасты должен быть по возможности минимальным для сохранения прямого контакта между керамической поверхностью модуля и металлом (рисунок1.7).



Рисунок 1.7 Прямой механический контакт керамики с металлом через термопасту. [5]

Для получения максимальной генерируемой мощности конкретный тип модуля должен быть выбран с учетом характеристик элементов конструкции ТЭГ, радиатора, интерфейсных материалов. Важной характеристикой является его тепловое сопротивление R_t (таблица3.4).

1.2.5. Установка термогенераторных модулей

Существует два наиболее распространенных способа установки модуля в конструкцию ТЭГ: с помощью болтового прижима и с помощью пайки.

Второй вариант установки модулей, как правило, применяется для маломощных ТЭГ, работающих на небольших перепадах температур со средней эффективностью преобразования. Механическая прочность таких конструкций невысока из-за относительной массивности радиатора.

Наибольшее распространение получил простой способ установки ТГМ с помощью резьбовых стягивающих болтов (шпилек). Необходимость обеспечения прижимного усилия, с одной стороны, и необходимость работы с максимально допустимым для модуля перепадом температур между горячей и холодной сторонами, с другой, заставляют искать решения, позволяющие компенсировать тепловое расширение и обеспечить равномерное усилие сжатия модуля в широком интервале температур. Одним из наиболее перспективных способов установки ТГМ, повышающим долговечность и эффективность ТЭГ, является применение стандартной конструкции с резьбовым соединением, компенсирующим тепловое расширение пружин, которые обеспечивают равномерность сжатия в диапазоне рабочих температур до 300 °С с усилием от 1 до 1,5 кН (для модуля размером 40х40 мм).

На рисунке 1.8 приведен вариант установки ТГМ с помощью компенсирующих пружин (сила сжатия приведена для модуля размером 40х40 мм).

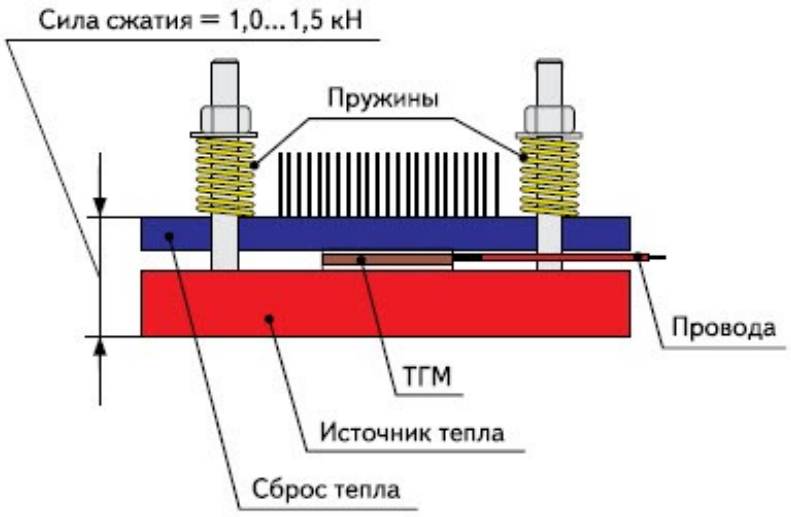

Рисунок 1.8 Установка модуля с применением спиральных пружин. [5]

1.3. Постановка задач работы

Целью данной работы является разработка блока питания на основе термогенераторного модуля (ТГМ). Основными задачами, решаемыми в данной работе, являются:

1. Разработать питающий модуль, обеспечивающий автономное питание беспроводных систем передачи данных и микроконтроллера от (ТГМ) на основе эффекта Зеебека;
2. Разработать печатную плату блока питания.
3. Проанализировать работу полученного источника питания и экспериментально определить его основные параметры.

Для разработки блока питания для микроконтроллерного устройства с автономным питанием на основе термогенераторного модуля были выбраны модули ТГМ-287-1,0-2,5 и ТГМ-199-1,4-0,8.

2. Разработка принципиальной схемы блока питания

2.1. Разработка схемы на основе DC/DC преобразователя LTC3109

Одной из задач, решаемых в ходе данной работы, было разработать блок питания, обеспечивающий автономное питание микроконтроллера от термоэлектрического генератора (ТЭГ). Таким образом, была разработана принципиальная схема блока питания (Приложение 1).

Требования по питанию термоэлектрических генераторов (ТЭГ) в качестве первичного источника питания диктуют использование

специализированной микросхемы LTC3109 [6], позволяющей получить требуемое выходное напряжение с достаточной точностью и мощностью.

LTC3109 – высоко-интегрированный DC/DC повышающий преобразователь разработанный для применения в низковольтных источниках, таких как ТЭГ. Применение LTC3109 позволяет использовать режим работы ТЭГ при небольших перепадах температур между обкладками (≤25 ºС).

Работа микросхемы обеспечивается при входном напряжении начиная с 35 мВ, что соответствует перепаду температуры на ТЭГ ΔT=1 ºС, однако мощность, получаемая в таком режиме от ТЭГ недостаточна для питания системы беспроводной передачи данных и может использоваться только во вспомогательном режиме. Необходимую мощность можно получить в униполярной схеме включения (Рис. 2.1) при перепаде температуры на ТЭГ ΔT≥20 ºС. Используемый при этом трансформатор должен иметь коэффициент трансформации от 1:7 до 1:20.[6]

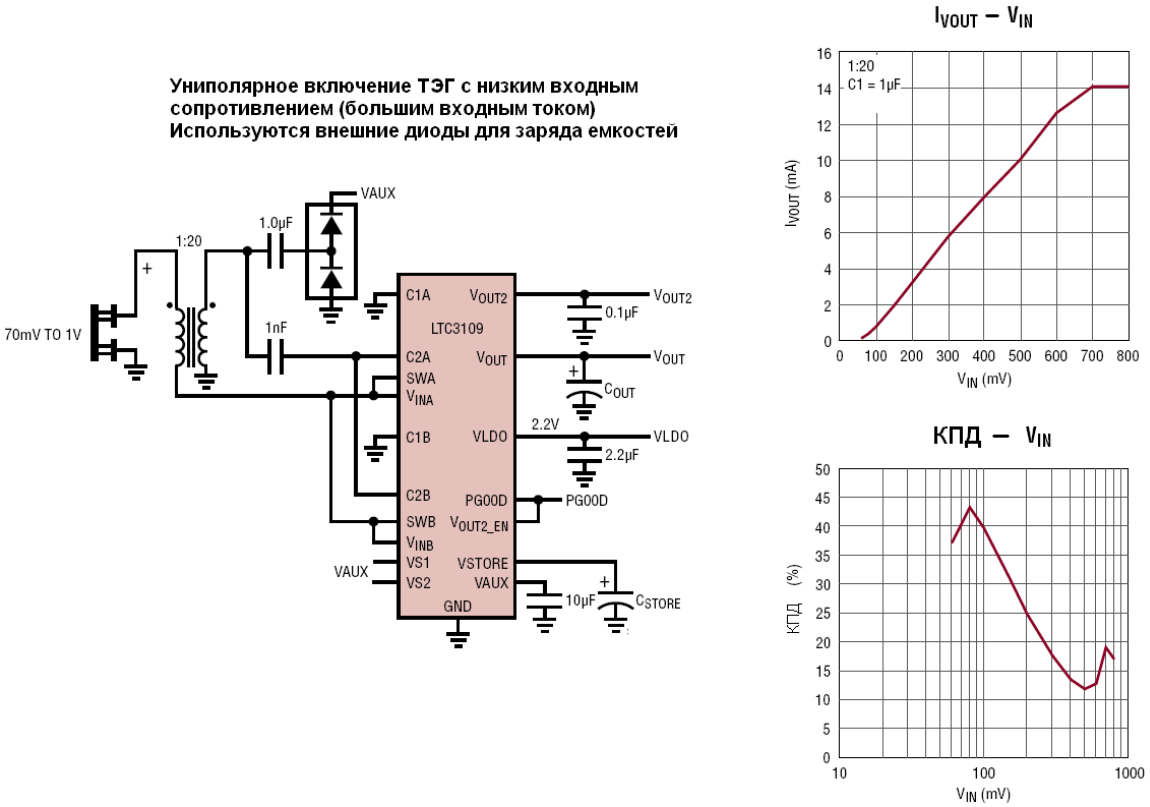

Рис 2.1 Схема включения ТЭГ и микросхемы LTC3109[6]

Применение беспроводных систем передачи данных требует большого пикового тока, в нашем случае он достигает 80 мА. Для питания в таких условиях используется накопительная емкость C_{store}, напряжение этой емкости поддерживается выше основного и в данной схеме составляет примерно 5.25 вольт. В качестве накопительной емкости используется ионистор 1.5-5Ф. К дополнительным функциям можно отнести:

наличие низковольтного питания V_{LDO}, обеспечивающего 2.2 В при максимальном токе 5 мА для питания низкопотребляющих схем;

наличие управляемого выхода VOUT2 напряжением с которого можно управлять с помощью сервисного входа VOUT_EN. Напряжение на этом выходе равно основному VOUT и может использоваться для питания беспроводных систем передачи информации;

наличием выхода PGOOD, логический уровень на котором соответствует готовности устройства.

Временные диаграммы напряжений представлены на Рис. 2.2.

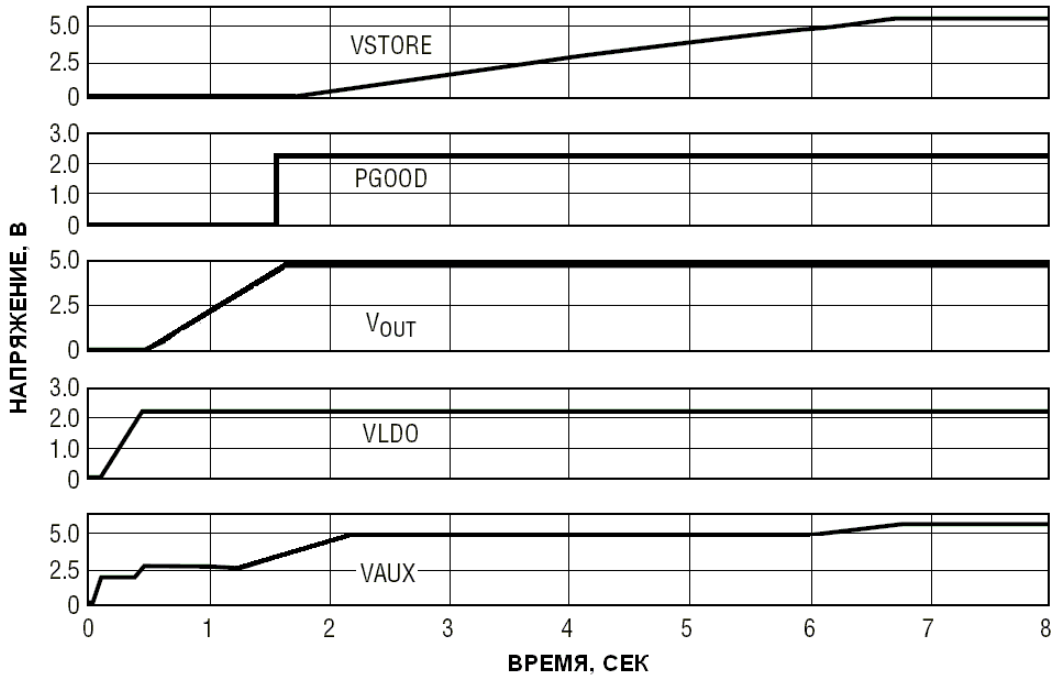

Рис. 2.2 Временные диаграммы напряжений на выводах микросхемы LTC3109[6]

Электрические параметры схемы при униполярном включении представлены на Рис. 2.3. Последовательное эквивалентное сопротивление такого конденсатора должно быть минимальным, рекомендуется параллельное соединение нескольких конденсаторов различной емкости.

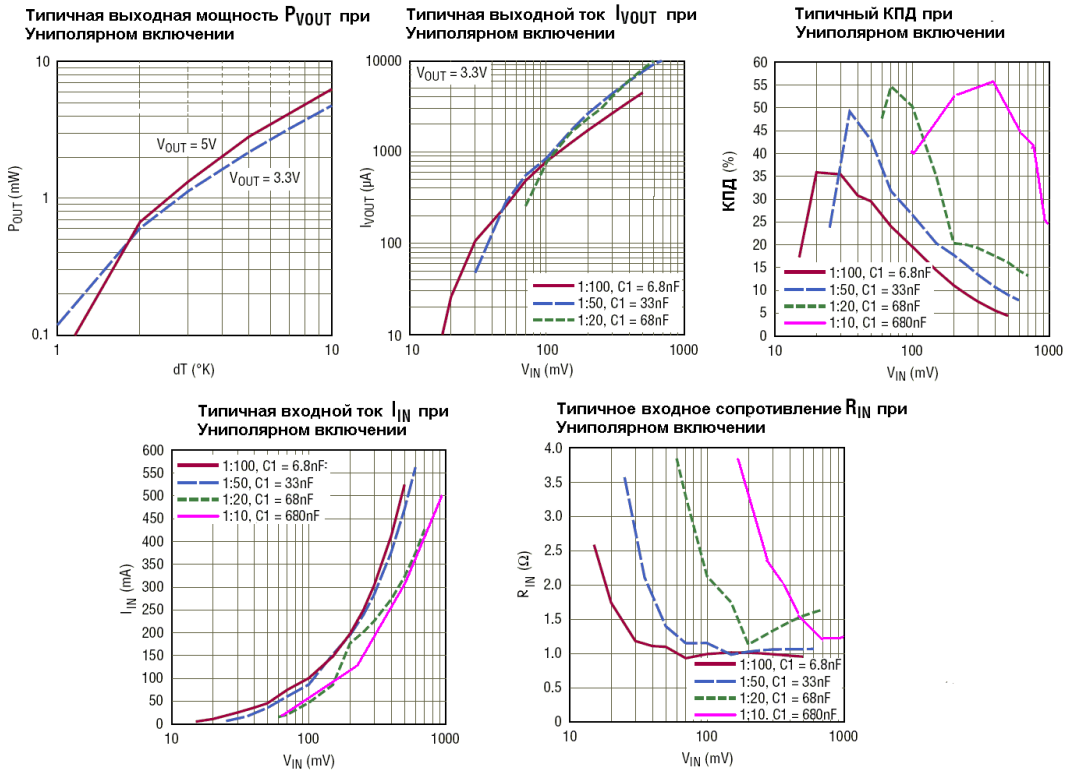

Рис. 2.3 Электрические параметры при униполярном включении микросхемы LTC3109[6]

Монтажная плата содержит микросхему LTC3109 (D1) которую возможно использовать как в униполярном так и двухполярном включении (с двумя трансформаторами).

Для выпрямления используются внешние диоды 1N4148 (VD1, VD2). Возможно использование и внутренней схемы выпрямления, коммутационные соединения при этом осуществляются с помощью перемычек R1-R7. Модуль ТЭГ подключается к разъему XR1. С помощью перемычки JP1 выбирается выходное напряжение микросхемы D1 на выводах VOUT и VOUT2(3.3 или 5 вольт). В качестве потребителя электроэнергии выступает микроконтроллер DD2 (stm32f051rct), напряжение питания которого поступает с вывода VLDO микросхемы D1, равное 2,2В. Микроконтроллер так же управляет выходом VOUT2 с микросхемы D1 Для индикации также используются светодиод VD3.

Печатная плата выполнена из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита размером 60*80 мм.(Приложение 2). Большинство электронных компонентов предназначены для поверхностного монтажа, за исключением ионисторов, оксидных конденсаторов большой ёмкости и разъёмов. Печатная плата имеет защитную маску, выполненную лаком. Полный список используемых компонентов представлен в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 Список компонентов блока питания на основе ТГМ.

	Наименование	Обозначение	Номинал	Кол-во
1	1N4148	VD1, VD2	MELF-D5023-2009	2
2	C0805	C9,C15,C16, C20,C22	0.1мкФ	5
3	C0805	C10	1мкФ	1
4	C0805	C13,C17,C18, C19, C21	2.2мкФ	5
5	C0805	C23, C24	15пФ	2
6	C0805	C3,C8	470пФ	2
7	C0805	C1,C11	1000пФ	2
8	JP3*2.54	JP1	PIN3	1
9	Клемма винтовая	XR1,XR2, XR3	5MM	3
10	L0805	L1	10мкГн	1
11	LED0805	VD3		1
12	LTC3109EGN	D1	TSOP20	1
13	R0805	R1,R2,R3,R4, R5,R6,R7	0	7
14	R0805	R14	470 Ом	1
15	STM32F103R	DD2	LQFP64	1
16	TANTAL_A	C14	22 мкФ*7В	1
17	TANTAL_C	C4	47мкФ*7В	1
18	TANTAL_C	C7	220мкФ*7В	1
19	TRANS LPR6235	T1, T2	1:10	2
20	Кнопка тактовая	SW1	TS_KEY	1
21	ZQ_HC49SM	ZQ1	8 МГц	1
22	ИОНИСТОР	C2, C5	1.5Ф*5.5В	2

2.2. Расчет основных параметров ТГМ

Из соотношений (1.13), (1.14)и (1.15) были рассчитаны параметры для ТГМ-199-1,4-0,8 и ТГМ-287-1,0-2,5(таблица 2.2)

Таблица 2.2 Основные параметры ТГМ

Параметры	ТГМ-199-1,4-0,8	ТГМ-287-1,0-2,5

Электрическое сопротивление R, Ом	1,62	9,18
Тепловая проводимость $K_{m.}$, Вт/К	1,46	0,34
Коэффициент Зеебека α, мкВ/К	0,0796	0,1148

3.3. Выводы по разделу 2

1. Была разработана принципиальная схема блока питания.
2. Была разработана печатная плата блока питания
3. Проведен сравнительный анализ параметров ТГМ-199-1,4-0,8 и ТГМ-287-1,0-2,5.

3. Экспериментальные исследования работы ТЭГ при различной разности температур

3.1. Структурная схема ТЭГ

Для анализа работы ТЭГ и определения его основных параметров была разработана схема установки (рис 3.1)

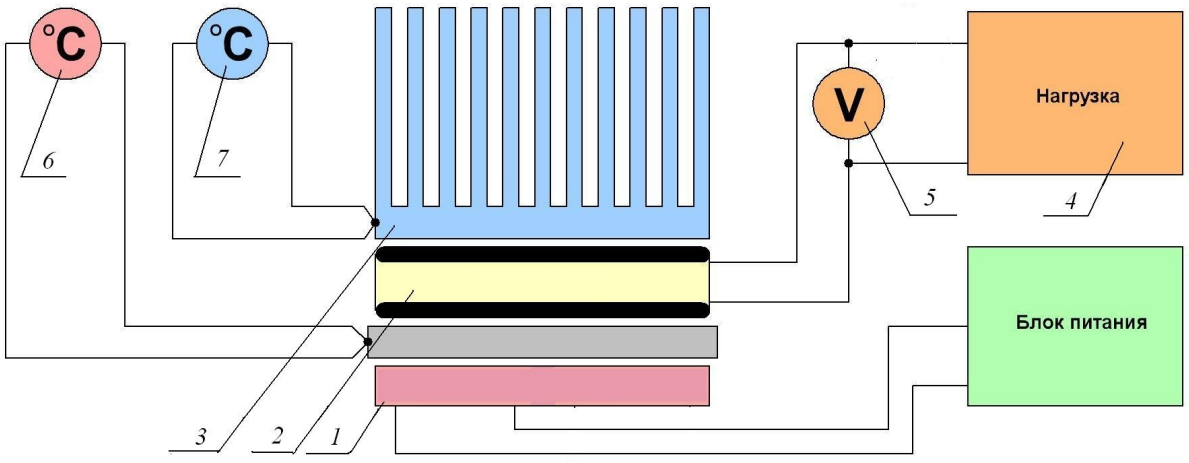

Рисунок 3.1 Схема экспериментальной установки.

Основными элементами установки являются:

1 – источник тепла (печь накаливания с блоком питания Б5 3005), диапазон рабочих температур варьируется от 25 до 200 ºС;
2 – термогенераторный модуль (ТГМ);
3 – пластинчатый алюминиевый радиатор, обдуваемый вентилятором (рисунок3.12).
4 – нагрузочное устройство (магазин сопротивлений Р32);
5 – вольтметр;
6, 7 – электронные термометры.

Устройство и принцип работы установки следующие: источник тепла подводит тепловой поток Q_h к горячей стороне ТГМ, радиатор отводит от холодной стороны ТГМ тепловой поток Q_c. ТГМ преобразует разность значений температур горячей и холодной сторон в электричество, которое передается на нагрузочное устройство.

Экспериментальная установка снабжена измерительными приборами: вольтметром В7-34А для измерения падения напряжения на внешней нагрузке, электронными термометрами М-838 для замера температуры на входе и выходе тепла 6, 7

3.2. Результаты экспериментальных исследований

3.2.1.Основные формулы и соотношения для определения параметров ТЭГ

Для того чтобы создать разность температур на сторонах генераторного модуля, к его горячей стороне необходимо подвести тепловой поток Q_h, а с холодной стороны отвести тепловой поток Q_c, причем их разность, по закону сохранения энергии, составит вырабатываемую электрическую мощность P:

$$P = Q_h - Q_c. \quad (3)$$

На внешней нагрузке $R_н$ ТЭГ создает напряжение U, равное термо-ЭДС, за вычетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении генератора:

$$U = E_{\text{ТЭДС}} - IR \text{ или } IR_{\text{н}} = E_{\text{ТЭДС}} - IR. \quad (4)$$

Сила тока I в цепи определяется выражением:

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R + R_н} = \frac{\alpha \Delta T}{R(1+m)}, \quad (5)$$

где $$m = R_н / R. \quad (6)$$

Напряжение на нагрузке равно:

$$U = IR_н = \alpha \Delta T \frac{m}{1+m}. \quad (7)$$

Мощность, отдаваемая во внешнюю цепь, можно вычислить по следующей формуле:

$$P = IR = \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{R} \frac{m}{(1+m)^2}. \quad (8)$$

Эффективность работы термоэлектрического генератора оценивается коэффициентом полезного действия:

$$\eta = \frac{P}{Q_h}. \quad (9)$$

Величину Q_h можно найти из рассмотрения уравнения теплового баланса. К горячей стороне ТЭГ, помимо тепла Q_h, поступает половина джоулева тепла, выделяющегося в ветви термоэлемента. С другой стороны, в силу эффекта Пельтье, на горячем спае поглощается количество теплоты, равное $\alpha I T_h$. Кроме того, в ветви действует механизм теплопроводности от горячих спаев к холодным. В итоге можно записать следующее выражение:

$$Q_h + \frac{1}{2} I^2 R = \alpha I T_h + K_m \Delta T \quad \textit{или}$$

$$Q_h = K_m \Delta T \left(1 + \frac{Z T_h}{1+m} - \frac{1}{2} \frac{Z \Delta T}{(1+m)^2} \right), \quad (10)$$

где $Z = \frac{\alpha}{R + K_m}$ – параметр термоэлектрической добротности, которой оценивается эффективность полупроводникового материала.

Величина Q_c определяется следующей зависимостью:

$$Q_c = K_m \Delta T (1 + \frac{Z T_c}{1+m} + \frac{1}{2} \frac{Z \Delta T}{(1+m)^2}. \quad (11)$$

Коэффициент полезного действия η выражается соотношением:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{1}{1 + \frac{1}{m} + \frac{1}{Z T_h} \frac{(m+1)^2}{m} - \frac{1}{2} \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{1}{m}} \quad (12)$$

Из формулы видно, что коэффициент полезного действия термоэлектрического генератора определяется через КПД цикла Карно и множитель, зависящий от m, Z и температур спаев T_h и T_c. Данный множитель меньше 1, и при современном качестве полупроводниковых материалов составляет ~ 1/6≈0.17.

Ниже приведены результаты испытаний двух образцов ТГМ в нескольких режимах (таблица 3.1).

Таблица 3.1Режимы температурных испытаний.

ΔT, K	T_c, ºC	T_h, ºC
25	25	50
50	25	75

75	30	105
100	35	135
125	45	170
150	50	200

Испытания проводились при изменении разности температур от 25 до 150 ºС с шагом 25 ºС. Для обеспечения эффективной работы ТГМ необходимо обеспечить максимально допустимую разность температур между сторонами модуля.

Величина приложенной нагрузки варьировалась в пределах 1÷5000 Ом.

На рисунке 3.2 – 3.6 представлены экспериментальные зависимости падения напряжения от сопротивления нагрузки.

В таблице 3.2 рассчитаны максимальные параметры двух исследуемых образцов ТГМ.

Анализ полученных данных показывает, что напряжение на ТГМ быстро растет при увеличении параметра m до 1 и далее выходит на насыщение. Как и следовало ожидать, на ТГМ-287 было получено большее значение выходного напряжения, что объясняется большим количеством термопар и, следовательно, термо-ЭДС.

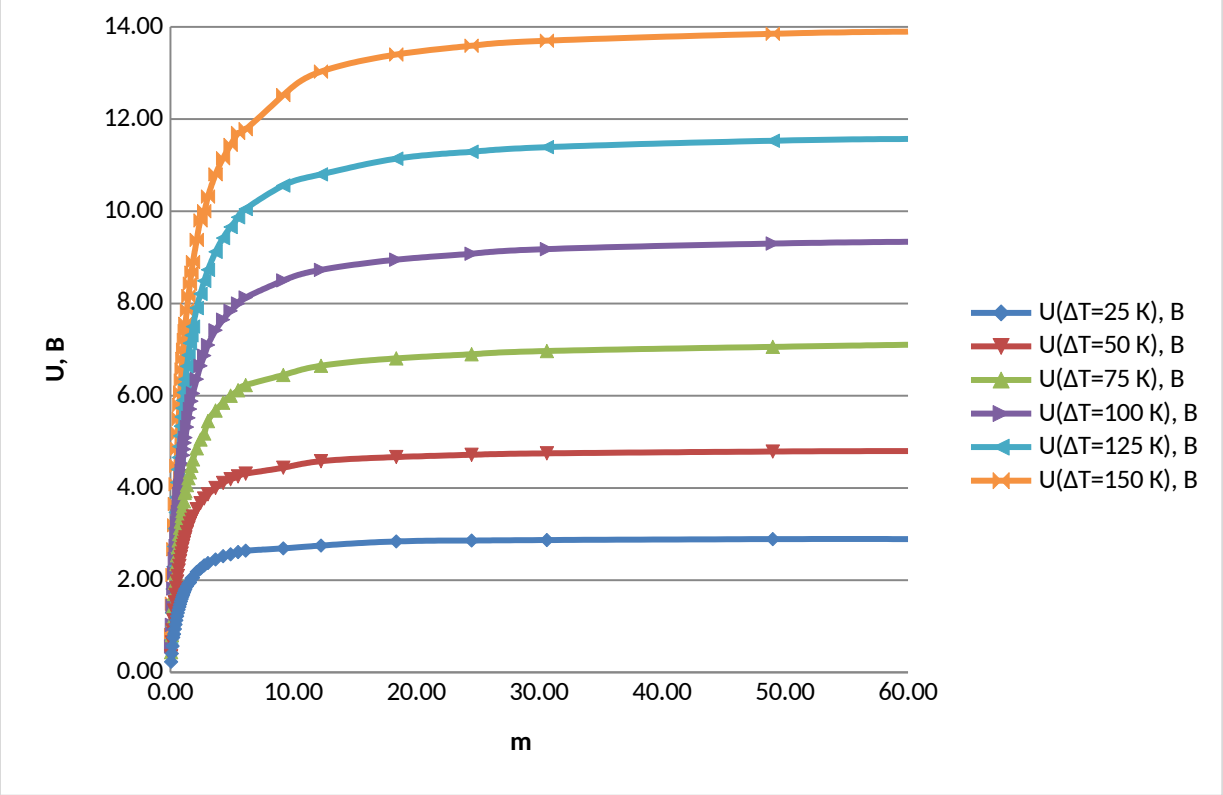

Рисунок 3.2 График зависимости U(В) от параметра m (см. (6)) для ТГМ-287-1,0-2,5.

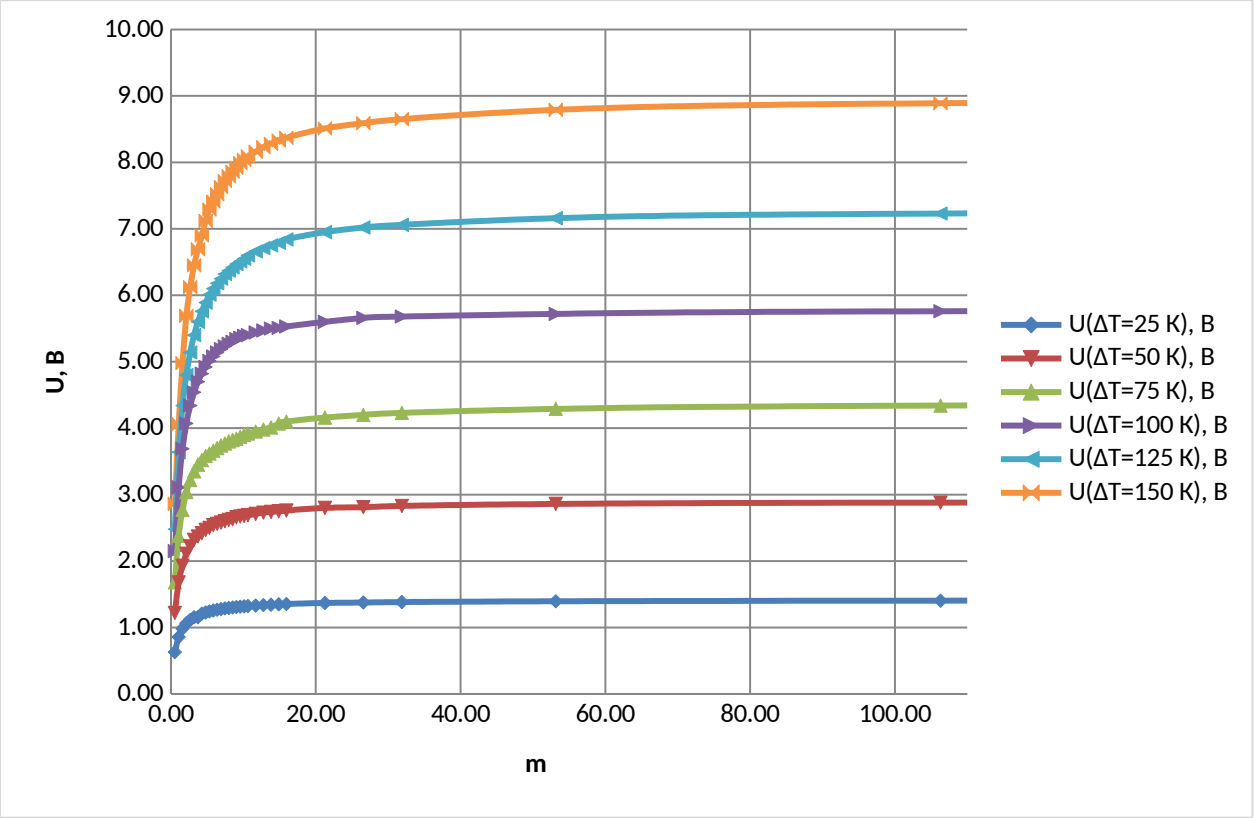

Рисунок 3.3 График зависимости U(В) от параметра m (см. (6)) для ТГМ-199-1,4-0,8.

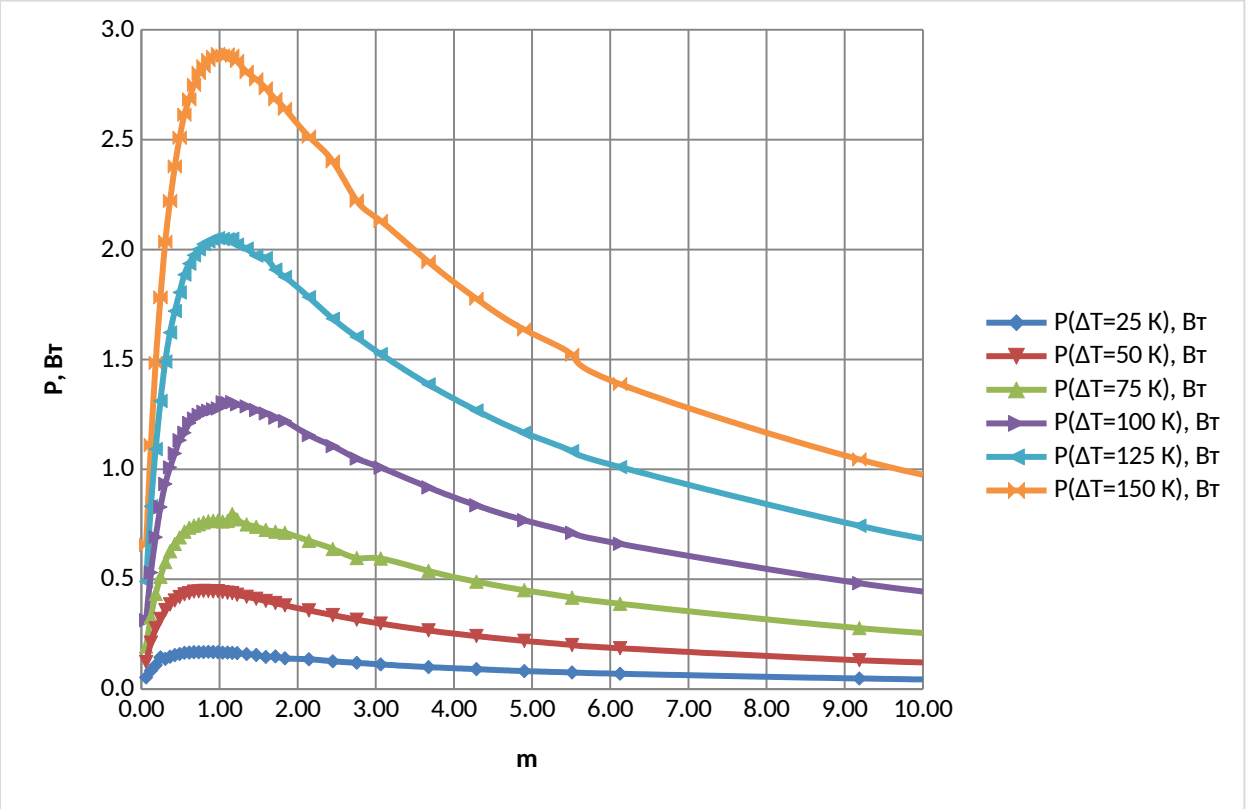

Рисунок 3.4 График зависимости P (Вт) от сопротивления нагрузки ТГМ-287-1,0-2,5.

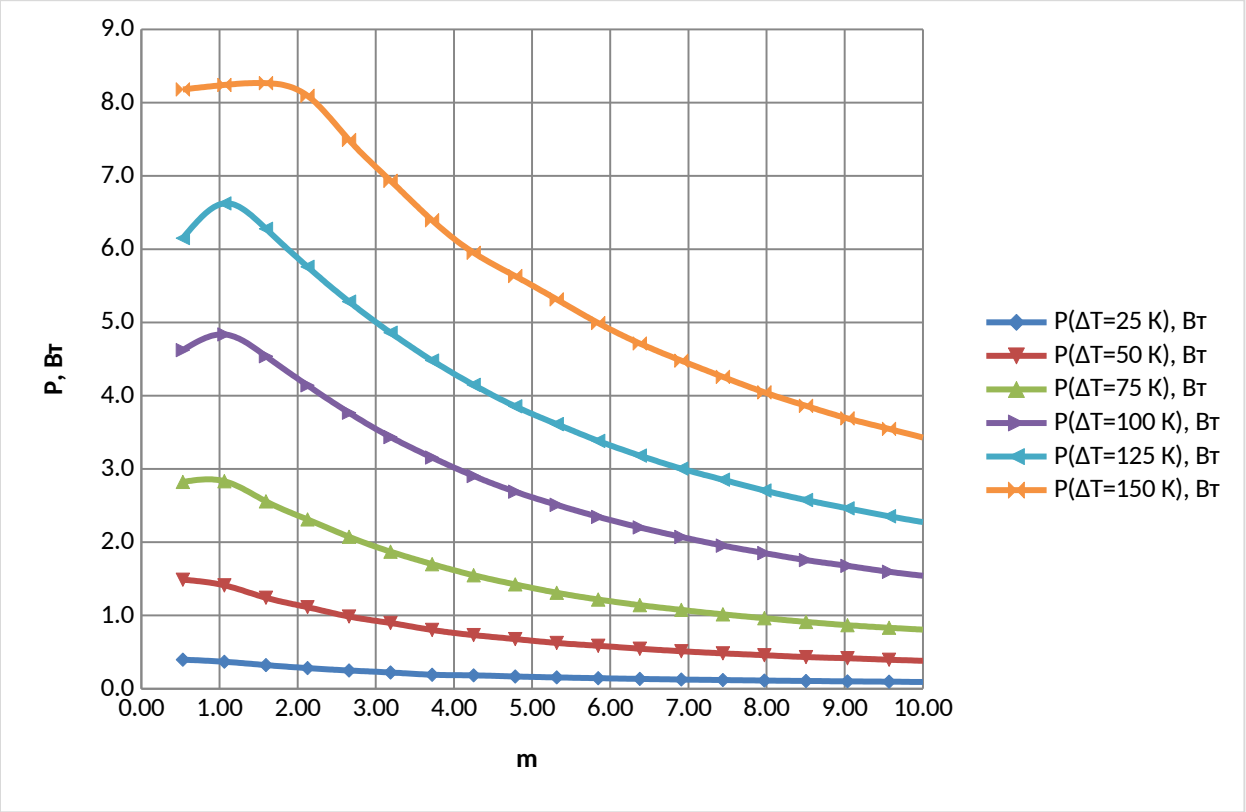

Рисунок 3.5 График зависимости P (Вт) от сопротивления нагрузки ТГМ-199-1,4-0,8.

Таблица 3.2 Максимальные параметры ТГМ.

ΔT, K	Pmax, Вт (ТГМ-199-1,4-,08)	η (при Pmax), % (ТГМ-199-1,4-0,8)	Pmax, Вт (ТГМ-287-1,0-2,5)	η (при Pmax), % (ТГМ-287-1,0-2,5)
25	0,3969	0,54	0,1694	1,32
50	1,4884	1,08	0,4468	2,44
75	2,8322	1,63	0,7661	3,37
100	4,8361	2,17	1,3049	4,17
125	6,6248	2,71	2,0521	4,80
150	8,2668	3,25	2,8900	5,39

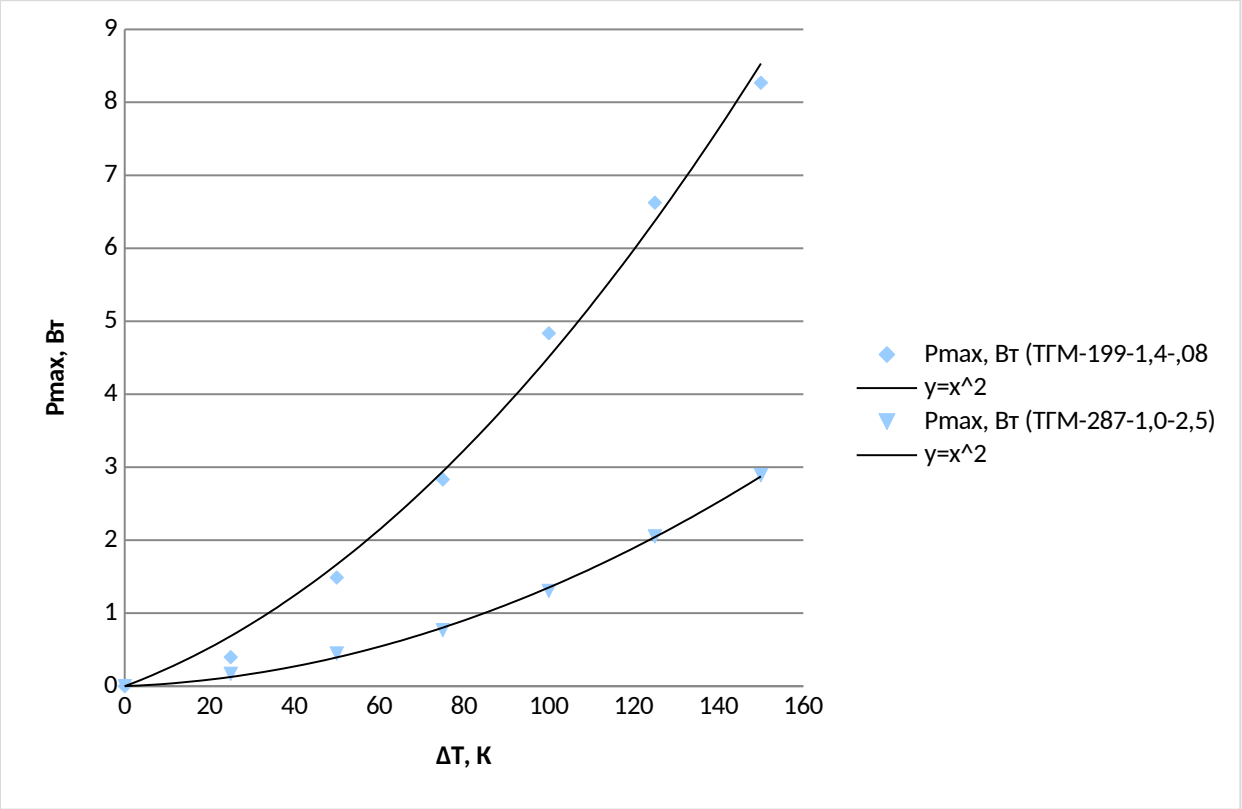

Рисунок 3.6 Зависимость максимальной вырабатываемой ТГМ мощности от разницы температур.

Значения выходного напряжения и силы тока с увеличением разности температур возрастают в линейной пропорции. Электрическая мощность на нагрузке прямо пропорциональна квадрату разности температур ΔT (рисунок 3.6).

Для достижения максимальной мощности значение электрического сопротивления нагрузки должно быть равно значению внутреннего сопротивления генераторного модуля в условиях эксплуатации, т.е. m=1.

Выбирая определенным образом параметр m, можно изменять КПД, и при этом будет изменяться электрическая мощность, которую можно получить с термоэлектрического генератора.

Максимальную мощность с ТЭГ можно получить при равенстве внешней и внутренней нагрузок (m=1), а максимальный КПД достигается при m, равном:

$$m = \sqrt{1 + Z\frac{T_c + T_h}{2}} \approx 1.3 - 1.4 .$$

3.3. Результаты испытаний макета источника питания на базе ТЭГ

Испытания проводились на макетной плате (Рисунок 3.7). В качестве испытательного модуля использовался ТЭГ ТГМ-199-1,4-0,8. Нагрев осуществлялся с помощью нагревателя, расположенного непосредственно на печатной плате, охлаждение с помощью радиатора. Необходимая мощность подводилась к нагревателю с помощью лабораторного блока питания.

Разность температур, полученная в результате испытаний, составила от 8 до 38ºС. Выходное напряжение микросхемы LTC3109 было выбрано 5 вольт. Сопротивление нагрузки составляло 300 Ом. Полученные результаты испытаний представлены в Таблице3.7 и Рисунке3.8.



Рисунок 3.7 Вид испытательного стенда макета источника питания.

Таблица 3.7 Результат испытания макета с микросхемой LTC3109.

Мощность нагревателя, Вт	Разность температур, °С	Входное напряжение, В	Ток нагрузки, мА	Напряжение нагрузки, В
18	8	0,255	3	0,9
25	11	0,385	6,5	2,0
35	16	0,395	9,1	2,7
48	22	0,81	8,5	2,6
65	29	0,76	14,8	4,4
85	38	0,73	15	4,5

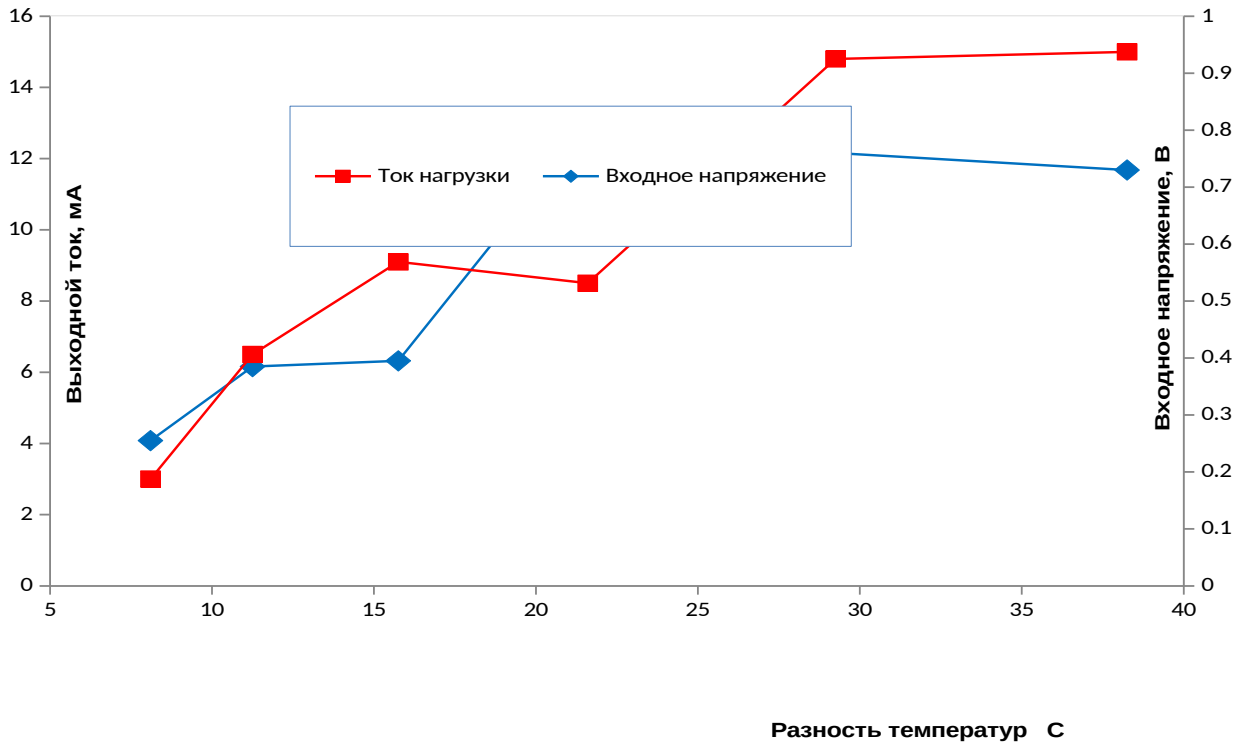

Рисунок 3.8 Параметры напряжения и тока макета с микросхемой LTC3109.

Анализ полученных данных показывает, что ток с преобразователя быстро растет при увеличении разности температур и далее выходит на насыщение, которое для данной микросхемы составляет 15 мА. Входное напряжение модуля при разности температур больше 20 °С стабилизируется на уровне 0.7-0.8 вольт. За счет накопления энергии в конденсаторе модуль может выдать пиковый ток до 100 мА, однако в длительном режиме способен выдавать средний ток только 15 мА. Для получения большего тока от этого же модуля ТГМ можно применить повышающий преобразователь напряжения, например, max1674, обеспечивающий выходной ток до 300 мА, при входном напряжении от 0.7 вольт. При этом основное питание микроконтроллера осуществляется от микросхемы LTC3109, что дает возможность работы при малых перепадах температур (меньше 10°С). Работа устройства в данном случае может быть разделена на низкопотребляющий (5-10°С<ΔТ<20°С) и основной режим работы (при ΔТ>20°С).

3.3. Выводы по разделу 3

1. Для достижения максимальной мощности значение электрического сопротивлении нагрузки должно быть равно значению внутреннего сопротивления генераторного модуля в условиях эксплуатации, т.е. m=1.

2. Выбирая определенным образом параметр *m*, можно изменять КПД, и при этом будет изменяться электрическая мощность, которую можно получить с термоэлектрического генератора.

3. В ходе работы были получены экспериментальные зависимости мощности выделяющейся на нагрузке при различных температурных режимах.

4. В результате сравнения характеристик для двух модулей был выбран ТГМ-199-1,4-0,8.

5. Применяя данный модуль в заданном температурном диапазоне можно добиться мощности, выделяемой на нагрузке порядка 8 Вт.

Заключение

В ходе данной работы был разработан блок питания на основе термоэлектрического генератора. Были выбраны необходимые ТГМ для проведения эксперимента.

Также разработана принципиальная схема и печатная плата ТЭГ. Произведен сравнительный анализ модулей по их основным характеристикам.

Проведена настройка опытных образцов элементов беспроводной информационной сети.

Проведено испытание опытных образцов элементов беспроводной информационной сети и макета источника питания.

Учитывая существующие стандарты для обеспечения бесперебойного питания маломощных интегральных микросхем, а именно напряжение питания от 2,2 В до 5 В и потребляемая мощность порядка 250 мВт, можно сделать вывод о принципиальной возможности применения ТГМ в качестве автономного источника питания. Характеристики модельных ТГМ полностью покрывают требуемый диапазон значений, как по напряжению питания, так и по мощности, при этом диапазон изменений температуры очень широк.

Библиографический список

[1] А.С. Бернштейн «Термоэлектрические генераторы» 1956г. Государственное энергетическое издательство г. Ленинград

[2] Као К., Хуанг В. «Перенос электронов в твердых телах.Часть 1» 1984г. Издательство «Мир» г. Москва

[3] О.И. Ильярский, Н.П. Удалов «Термоэлектрические элементы» 1970г. Издательство «Энергия» г. Москва

[4] Иоффе А.Ф. «Полупроводники» 1955г.
Издательство АН ССР

[5] Кораблев В. А., Тахистов Ф. Ю., Шарков А. В. Прикладная физика. Термоэлектрические модули и устройства на их основе: Учебное пособие / Под ред. проф. А. В. Шаркова. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003. – 46 с.

[5] Термоэлектрические модули и устройства на их основе: справ. пособие. – СПб.: ИПФ «Криотерм», 2004. – 53 с.

[6]http://www.farnell.com/datasheets/1747533.pdf