

УДК: 519.633.2

DOI: 10.53816/23061456\_2022\_3-4\_47

## ОПТИМИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЕ

### OPTIMIZATION SUPPLY VOLTAGE OF PELTIER ELEMENT

*Канд. техн. наук К.С. Кулаков, И.К. Бородин, В.С. Помазов*

*Ph.D. K.S. Kulakov, I.K. Borodin, V.S. Pomazov*

*АО «НПО Спецматериалов»*

В данной статье представлены результаты численного моделирования термоэлектрического эффекта. На основе параметрического исследования получены значения оптимального напряжения питания элемента Пельтье в случае отсутствия вынужденной конвекции. Определена величина скорости обдува области горячего перехода для полного рассеивания перекачиваемой энергии. Создана динамическая модель нагрева корпуса с размещённым внутри электронным оборудованием. На основе данных об оптимальной рабочей температуре которого были построены графики изотерм, где абсцисса и ордината представлены, толщиной теплоизоляции и мощностью внутреннего тепловыделения. На основе которых, учитывая стоимость теплоизоляционных материалов и климатического оборудования, можно добиться минимизации затрат на изготовление.

**Ключевые слова:** элемент Пельтье, напряжение питания, вынужденная конвекция, теплоизоляция.

This article presents the results of numerical simulation of the thermoelectric effect. Based on a parametric study, the values of the optimal supply voltage of the Peltier element were obtained in the absence of forced convection. The blowing velocity of the hot transition area is determined for the complete dissipation of the pumped energy. A dynamic model of case heating with electronic equipment placed inside has been created. Based on the data on the optimal operating temperature of which, isotherm graphs were constructed, where the abscissa and ordinate are represented, the thickness of the thermal insulation and the power of internal heat release, on the basis of which, taking into account the cost of thermal insulation materials and climatic equipment, it is possible to minimize manufacturing costs.

**Keywords:** the Peltier element, supply voltage, forced convection, thermal insulation.

На сегодняшний день проблема тепловой стабилизации электронного оборудования (ЭО) становится одной из важнейшей. Даже незначительные перепады температуры могут привести к увеличению шумов, изменению порогов срабатывания компараторов, номиналов резисторов и конденсаторов. Выход за пределы рабочего температурного диапазона может существенно изменить входные и выходные характеристики транзистора и даже привести к его тепловому пробую [1].

Все способы охлаждения ЭО можно разделить на пассивные и активные. Для первых характерен отвод тепла за счёт излучения, теплопроводности и конвекции. В этом случае тепловыделяющий элемент с помощью термопасты соединяют с радиатором из металла с высоким коэффициентом теплопроводности. Таким образом существенно увеличивается площадь охлаждаемой детали электронного оборудования. Для второго — принудительное охлаждение с помо-

щью вентиляторов или холодильников (компрессорных или термоэлектрических).

Основными минусами компрессорных холодильников являются наличие движущихся деталей и крупные габариты. Таким образом, наиболее приемлемым способом охлаждения современной электронной аппаратуры является термоэлектрическое, основанное на эффекте Пельтье.

Суть явления заключается в том, что при подаче постоянного тока в цепь, состоящую из двух разнородных проводников в местах их контактов, в зависимости от направления тока, будет выделяться или поглощаться энергия.

Причина возникновения термоэлектрического эффекта заключается в том, что средняя энергия электронов в проводниках разная. Таким образом, переходя с более низкого энергетического уровня на более высокий, электроны отбирают энергию у фононов кристаллической решетки. Соответственно, место контакта охлаждается.

Разнородность проводников математически описывается с помощью таких параметров, как коэффициент Зеебека  $S_1$  и  $S_2$ .

Величина перекачиваемой с помощью электронного газа энергии  $Q$  от холодного перехода к горячему за время  $t$  выражается следующим образом:

$$Q = (S_1 - S_2) \cdot T \cdot I \cdot t. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что мощность охлаждения прямо пропорционально току  $I$  циркулирующему в цепи. Но при увеличении тока также растет мощность выделения тепла  $P$  по закону Джоуля-Ленца

$$P = R \cdot I^2.$$

Таким образом, возникает риск превращения охлаждающей стороны Пельтье элемента в нагреватель.

Для нивелирования данного эффекта и определения оптимального напряжения питания необходимо произвести параметрическое исследование. Критерием оптимального напряжения питания будет являться минимальная температура холодной стороны.

В качестве моделируемого объекта будет выступать элемент Пельтье, в котором роль разнородных проводников будут играть медь и теллурид висмута (рис. 1).

На рис. 2, 3 видно, что чем дальше горячий переход расположен от холодного, тем меньше теплоты передается последнему.

Таким образом, увеличение расстояния между переходами позволяет питать элемент большим напряжением и, соответственно, увеличивать его мощность.

Увеличения расстояние между переходами ведет к увеличению общего сопротивления и габаритов конструкции. Таким образом, необходима активная система теплоотвода с горячей стороны, которая осуществлена в современных термоэлектрических сборках [2].

Таким образом, следующей актуальной задачей является определение параметров, при которых перекачиваемая электронным газом энергия полностью рассеивается в окружающей среде. Благодаря этому достигается максимальная эффективность работы Пельтье элемента исходя из принципа Ле Шателье [3].

На рис. 4 представлено распределение потенциала в элементе с площадью контакта  $1 \text{ мм}^2$  и расстоянием между переходами  $6 \text{ мм}$ , горячая сторона которого подвергается вынужденной конвекции за счет обдува.

На рис. 5 представлена зависимость максимальной температуры горячей стороны и минимальной холодной в зависимости от скорости потока воздуха вблизи горячего перехода.

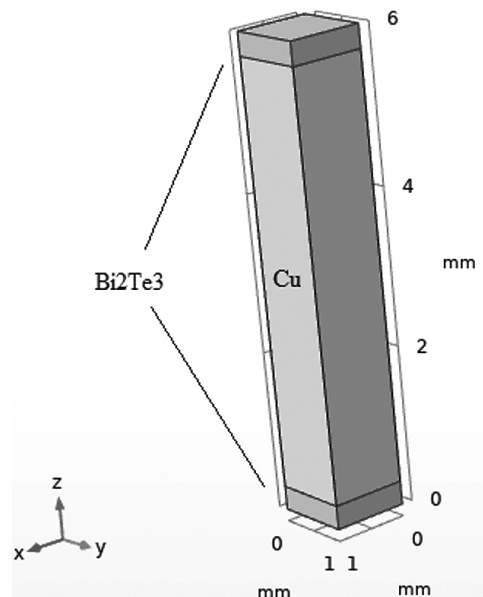


Рис. 1. Геометрия моделируемого элемента Пельтье

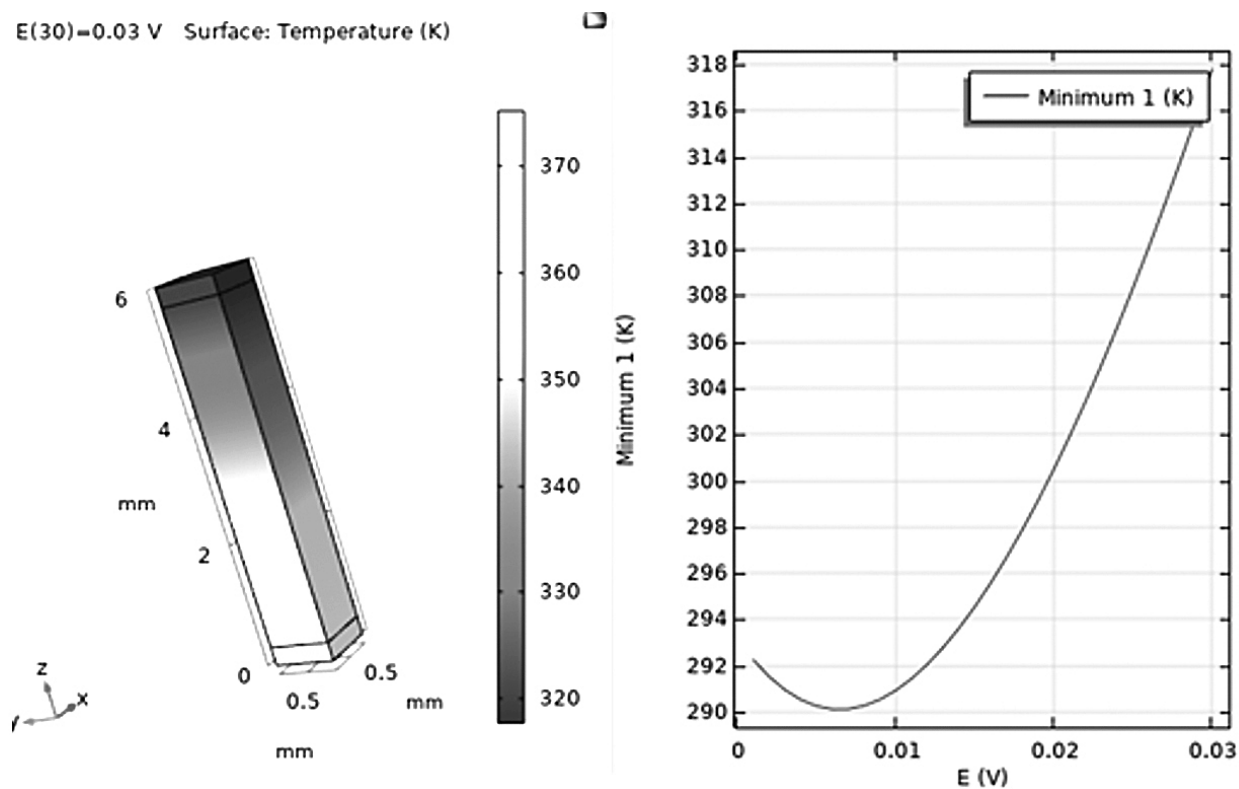


Рис. 2. Распределение температуры (слева) и график зависимости минимальной температуры от напряжения питания (справа) для элемента Пельтье с расстоянием между переходами 6 мм

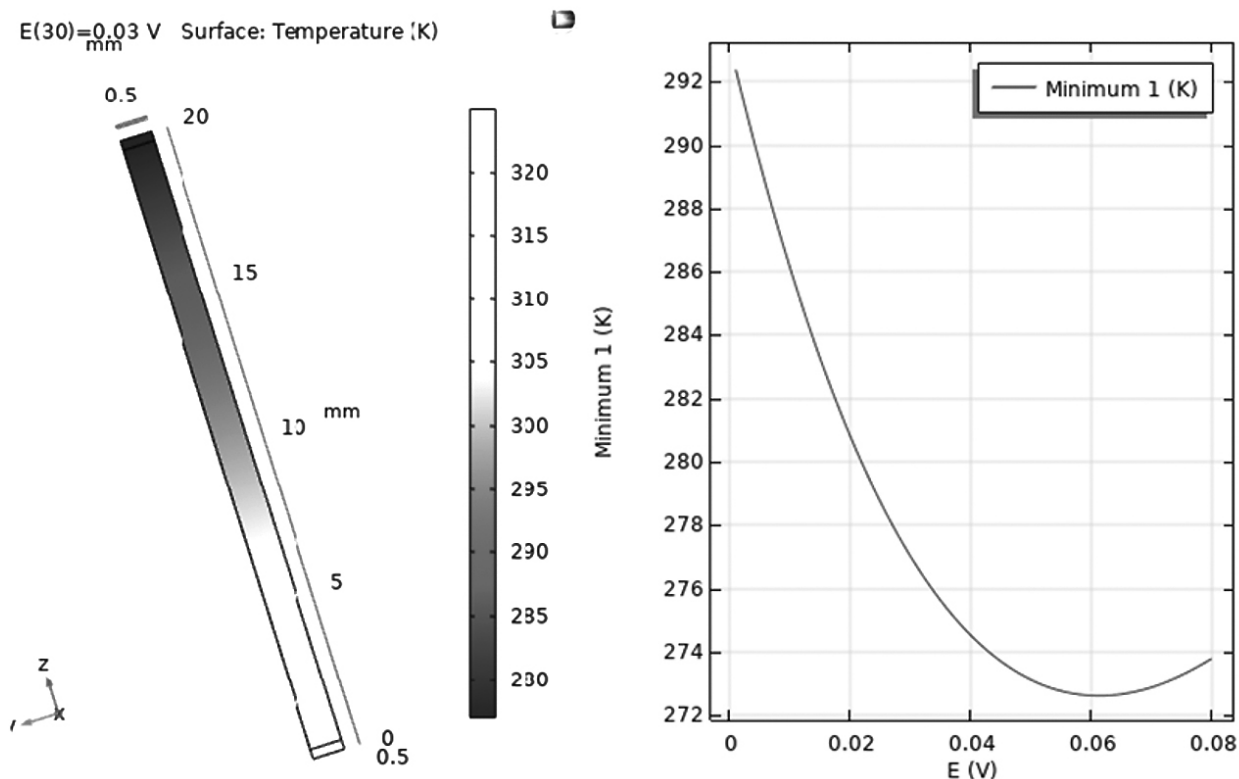


Рис. 3. Распределение температуры (слева) и график зависимости минимальной температуры от напряжения питания (справа) для элемента Пельтье с расстоянием между переходами 20 мм

По данным рис. 5 можно сделать вывод, что для полного отвода передаваемой на горячий переход энергии необходима достаточно высокая скорость обдува [4, 5]. Таким образом, зная паспортные данные вентиляторов, можно оценить КПД термоэлектрической сборки.

Изменив направление протекания тока в схеме последовательно соединенных Пельтье элементов, можно поменять ролями горячий и холодный переход. Таким образом, преимуществом использования термоэлектрических сборок является лёгкость переключения из режима охлаждения в режим обогрева и наоборот [6]. Это позволяет устанавливать их в качестве климатического оборудования на готовые изделия, работающие в различных экстремальных погодных условиях [7].

На рис. 6 продемонстрирован корпус с размещенным внутри электронным оборудованием, работающий в условиях крайнего севера.

Можно наблюдать, что из-за наличия массивного блока конденсаторов прогрев внутренней области занимает продолжительное время  $t$ , которое аналитически можно рассчитать по формуле:

$$t = \frac{\sum C \Delta T}{P + \alpha S \Delta T},$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи воздуха;  $P$  — мощность тепловыделения;  $S$  — площадь

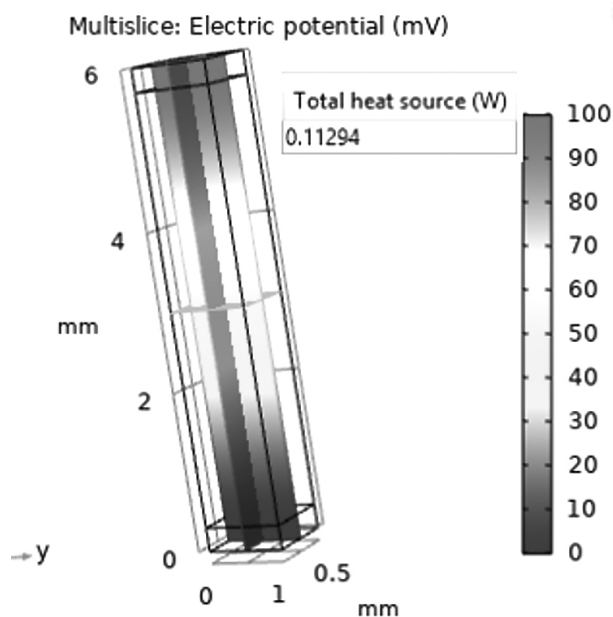


Рис. 4. Распределение потенциала в Пельтье элементе и значение полной потребляемой мощности

поверхности корпуса;  $\Delta T$  — разность конечной и начальной температуры;  $C$  — теплоемкость различных компонентов установки.

На рис. 7 представлены графики зависимости температуры внутри корпуса в зависимости от суммарной мощности тепловыделения.

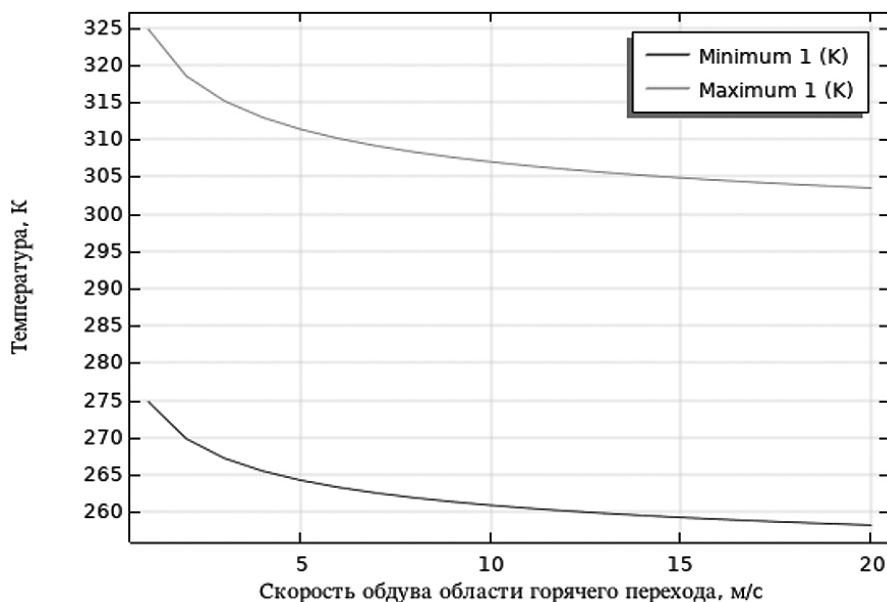


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры горячей стороны и минимальной холодной в зависимости от скорости потока воздуха вблизи горячего перехода

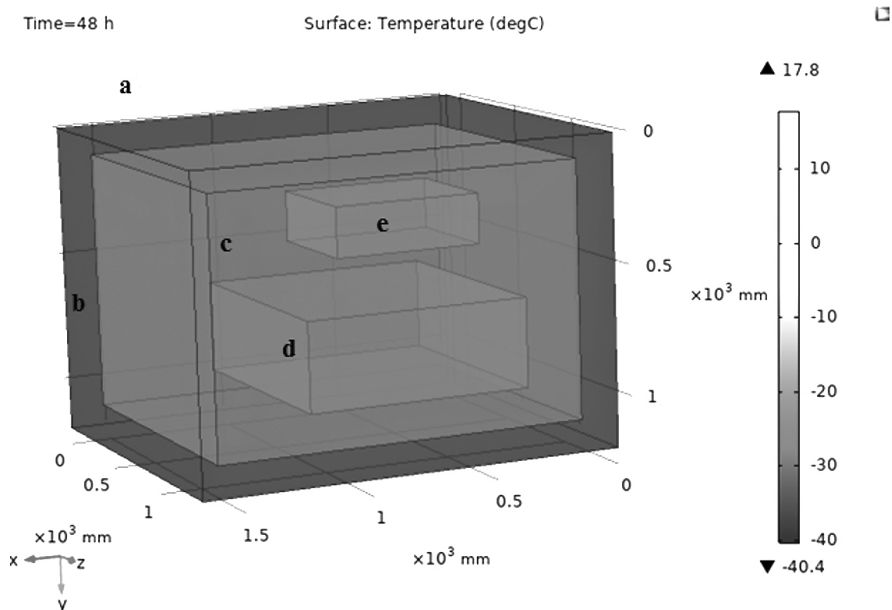


Рис. 6. Распределение температуры в упрощенной модели рабочей установки, эксплуатируемой в условиях крайнего севера: *a* — окружающая среда с температурой  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и средней скоростью ветра  $5\text{ м/с}$ ; *b* — теплоизоляционный слой из вспененного полиуретана; *c* — внутренняя воздушная область; *d* — блок алюминиевых конденсаторов; *e* — блок электронного оборудования с суммарным тепловыделением

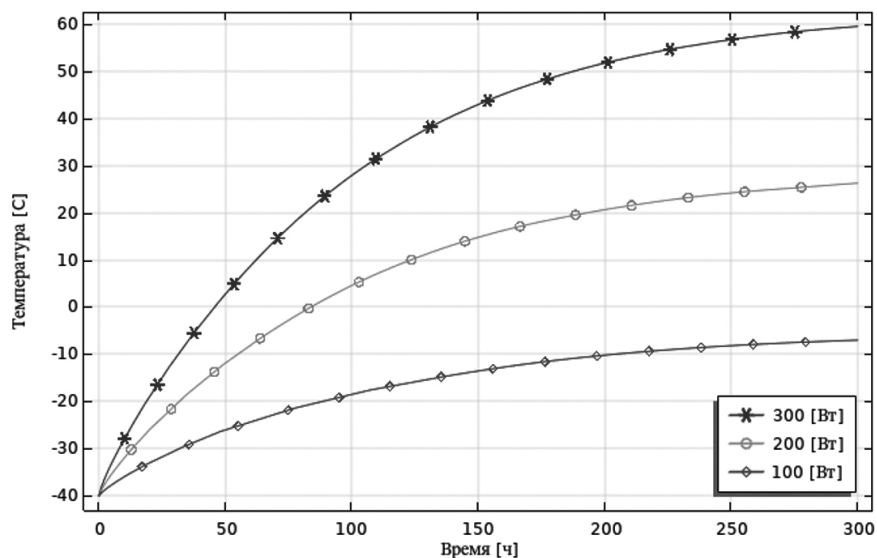


Рис. 7. Временная зависимость температуры внутри корпуса с толщиной теплоизоляционного слоя  $100\text{ мм}$  для различных мощностей тепловыделения

Численная модель опирается на уравнения переноса, которые описывают циркуляцию воздушных масс внутри корпуса [8, 9, 12, 13]:

$$\rho \cdot \frac{du}{dt} + \rho \cdot (u \cdot \nabla) u = f + (\rho - \rho_0) g;$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot u) = 0$$

где  $f$  — объёмная сила Архимеда;  $\rho$  — плотность воздуха;  $u$  — скорость переноса.

Важно учесть, что тепловыделение внутри корпуса складывается из вынужденных потерь вследствие работы электрического оборудования и мощности климатического оборудования. Таким образом, для минимизации затрат при изготовлении готового изделия и для достижения

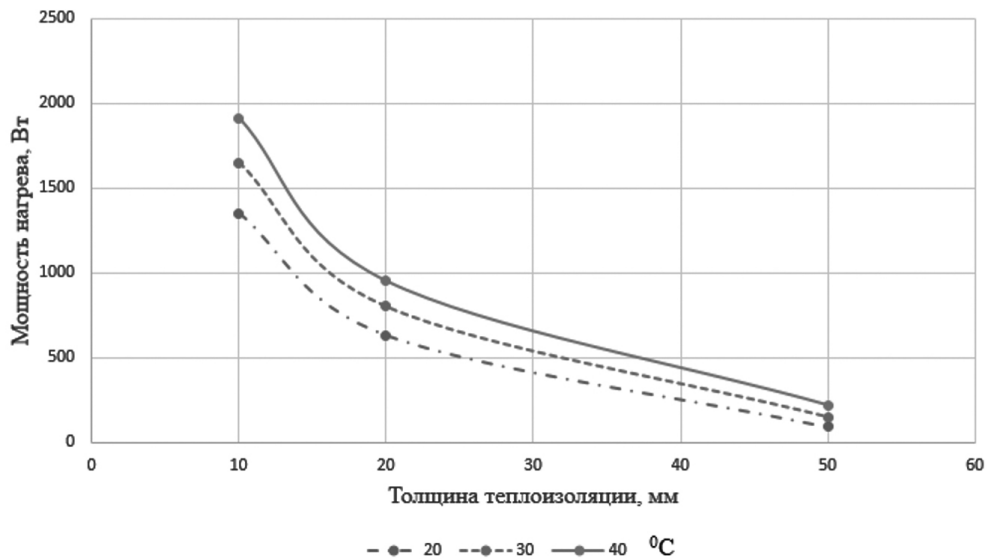


Рис. 8. Графики изотерм, соответствующие установившимся температурам внутри установки в зависимости от толщины её теплоизоляционного слоя из вспененного полиуретана и суммарной мощности тепловыделения

оптимальной рабочей температуры необходимо определить достаточную мощность внутреннего теплового выделения в зависимости от толщины теплоизолирующего корпуса слоя вспененного полиуретана. Результаты подобного расчета приведены на рис. 8.

По приведенным изотермам можно заключить, что при работе в условиях крайнего севера для поддержания рабочей температуры внутри эксплуатируемого устройства достаточно 50 мм толщины теплоизоляционного слоя. Роль же климатической системы может выполнять само электрическое оборудование, размещенное внутри корпуса.

В этом случае установка термоэлектрических модулей помимо удорожания конструкции [10, 11] приведет к избыточному нагреву, что может негативно сказаться на работе электронных компонентов.

### Выводы

Определено оптимальное напряжение питания элемента Пельтье в случае естественной конвекции.

Произведен расчёт максимальной температуры горячей стороны при фиксированном напряжении питания в зависимости от скорости обдува.

Сделан вывод о возможности расчёта КПД термоэлектрической сборки.

Создана динамическая модель нагрева корпуса с размещенным внутри электронным оборудованием.

Построены графики изотерм в координатах толщины теплоизоляционного слоя и мощности внутреннего тепловыделения.

### Литература

1. [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Биполярный транзистор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Биполярный_транзистор) (дата обращения 22.03.22).
2. Тахистов Ф.Ю. Расчёт параметров термоэлектрических модулей. Доклады 8 Международного семинара. Ноябрь 2002 г. — СПб.: ФТИ, 2002. С. 44–57.
3. [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Принцип Ле Шателье-Брауна](https://ru.wikipedia.org/wiki/Принцип_Ле_Шателье-Брауна) (дата обращения 22.03.22).
4. Шостаковский П. Г. Разработка термоэлектрических систем охлаждения и термостатирования с помощью компьютерной программы KRYOTHERM // Компоненты и технологии. 2010. С. 21–29.
5. Гершберг И.А., Тахистов Ф.Ю. Выбор оптимального ТЭМ в зависимости от условий внешнего теплообмена // Термоэлектрики и их применения. Доклады IX Межгосударственного семинара. Ноябрь 2004 г. — СПб.: ФТИ, 2004. С. 141–154.

6. Шостаковский П.Г. Современные термоэлектрические источники питания электронных устройств. Компоненты и технологии. 2015. № 1. С. 34–41.

7. Тахистов Ф. Ю., Гершберг И. А. Оптимизация параметров термоэлектрического генераторного модуля с учетом эффективности теплообмена на сторонах модуля // Термоэлектрики и их применения. Доклады XI Межгосударственного семинара (ноябрь 2008 г.). — СПб.: ФТИ, 2008. С. 242–254.

8. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Термоэлектрические\\_материалы](https://ru.wikipedia.org/wiki/Термоэлектрические_материалы) (дата обращения 22.03.22).

9. [https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth\\_telluride](https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth_telluride) (дата обращения 22.03.22).

10. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Симплекс-метод> (дата обращения 22.03.22).

11. Гнусин П.И. Исследование эффективности элемента Пельтье при различных режимах работы // Videonauka. 2016. № 1 (1). С. 20–27.

12. Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Валиев И.И. Применение термоэлектрического эффекта для увеличения интенсивности охлаждения электрооборудования // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 20. С. 70–72.

13. Белов О.В., Чернышев А.В. Метод математического моделирования тепловых источников в термоэлектрических элементах Пельтье // Научное приборостроение. 2004. Том 14. № 1. С. 51–57.

### References

1. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Bipolar\\_transistor](https://ru.wikipedia.org/wiki/Bipolar_transistor) (accessed 22.03.22).

2. Takhistov F.Yu. Calculation of parameters of thermoelectric modules. Reports of the 8th International Seminar. November 2002. — St. Petersburg: FTI, 2002. Pp. 44–57.

3. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Le\\_Chatelier-Brown\\_principle](https://ru.wikipedia.org/wiki/Le_Chatelier-Brown_principle) (accessed 03.22.22).

4. Shostakovskii P.G. Development of thermoelectric cooling and temperature control systems using the KRYOTHERM computer program // Components and technologies. 2010. Pp. 21–29.

5. Gershberg I.A., Takhistov F.Yu. Selection of the optimal TEM depending on the conditions of external heat transfer // Thermoelectrics and their applications. Reports of the IX Interstate Seminar. November 2004. — St. Petersburg: FTI, 2004. Pp. 141–154.

6. Shostakovskiy P.G. Modern thermoelectric power supplies for electronic devices. Components and technologies. 2015. No. 1. Pp. 34–41.

7. Takhistov F.Yu., Gershberg I.A. Optimization of the parameters of a thermoelectric generator module taking into account the efficiency of heat transfer on the sides of the module // Thermoelectrics and their applications. Reports of the XI Interstate Seminar (November 2008). — St. Petersburg: FTI, 2008. Pp. 242–254.

8. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_materials](https://ru.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_materials) (accessed 22.03.22).

9. [https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth\\_telluride](https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth_telluride) (accessed 03.22.22).

10. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Simplex\\_method](https://ru.wikipedia.org/wiki/Simplex_method) (accessed 22.03.22).

11. Gnusin P.I. Investigation of the efficiency of the Peltier element in various operating modes // Videonauka. 2016. No. 1 (1). Pp. 20–27.

12. Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Valiev I.I. Application of the thermoelectric effect to increase the intensity of cooling of electrical equipment // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2015. V. 18. No. 20. Pp. 70–72.

13. Belov O.V., Chernyshev A.V. Method of mathematical modeling of heat sources in Peltier thermoelectric elements // Scientific Instrumentation. 2004. Vol. 14. No. 1. Pp. 51–57.