

Т.И. Третьяков, П.А. Попов, М.Е. Комнатнов

## Экспериментальное исследование системы нагрева и охлаждения испытательного контейнера климатической экранированной камеры

Представлены результаты экспериментального исследования системы нагрева и охлаждения элемента испытательного контейнера климатической экранированной камеры. Выполнено исследование временной зависимости температуры элемента испытательного контейнера при его нагреве группой элементов Пельтье. Приведены вычисления количества теплоты и мощности в процессе нагрева и охлаждения элемента Пельтье.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, элемент Пельтье, ТЕМ-ячейка, радиатор, теплообмен, контур охлаждения.

Для проведения совместных испытаний на электромагнитную совместимость и климатические воздействия электронной компонентной базы радиоэлектронных средств разрабатывается климатическая экранированная камера (КЭК) [1]. Контроль и поддержание температуры внутри испытательного контейнера (ИК) КЭК в виде ТЕМ-ячейки обеспечиваются посредством системы терморегулятора. В основе системы терморегулятора лежит устройство управления [2, 3], работающее по принципу пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора, а также система нагрева и охлаждения. Нагрев и охлаждение стенок ИК выполняется с помощью элементов Пельтье (ЭП), размещенных на поверхности стенок ТЕМ-ячейки. На данном этапе разработки КЭК требуется экспериментальное исследование работы системы терморегулятора с жидкостным охлаждением ЭП для получения зависимости температуры нагрева ИК от времени, расчета количества теплоты и мощности нагрева и охлаждения ЭП.

Цель работы – представить результаты экспериментального исследования системы терморегулятора КЭК с жидкостным охлаждением ЭП.

### Структурная схема системы нагрева и охлаждения ИК КЭК

Для обеспечения равномерного нагрева и охлаждения ИК используется группа из 24 ЭП, расположенных на каждой из сторон ТЕМ-ячейки (рис. 1).

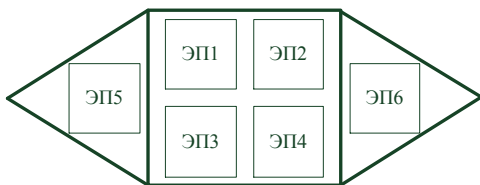


Рис. 1. Вид сбоку ТЕМ-ячейки с размещенными на ее поверхности ЭП

Для изменения температуры  $T$  в диапазоне значений от  $-50$  до  $+150$  °С в системе терморегулятора КЭК используются внешний и внутренний контуры охлаждения. Хладагент внешнего контура охлаждается при температуре ниже  $0$  °С, что позволяет обеспечивать отвод тепла от внутреннего контура, в котором в качестве охлаждающей жидкости выступает

95% раствор этилового спирта. Отвод тепла от ЭП осуществляется с помощью алюминиевых радиаторов размером  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>, размещенных на одной из сторон ЭП. Через радиаторы проходят медные трубки, соединенные с внутренним охлаждающим контуром (рис. 2).

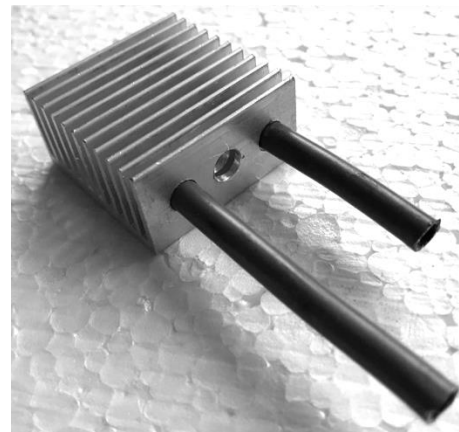


Рис. 2. Охлаждающий радиатор для ЭП

При охлаждении или нагреве ИК между ним и ЭП происходит процесс теплообмена, при котором большая часть отведенного тепла передается холодной стороне ЭП, из-за чего увеличивается температура горячей стороны. При циркуляции спиртового раствора во внутреннем контуре происходит отведение тепла от радиатора (Р1), охлаждающего горячую сторону ЭП. Тепло, отведенное внешним контуром от внутреннего контура, рассеивается в окружающей среде с помощью радиатора (Р2). При нагреве стенки ИК тепло, выделяемое горячей стороной ЭП, передается на ИК, а радиатор Р1 защищает ЭП от перегрева. Структурная схема системы нагрева и охлаждения ИК представлена на рис. 3.

### Измерение параметров работы системы терморегулятора КЭК

При проведении экспериментальной части исследования системы терморегулятора КЭК использован элемент испытательного контейнера КЭК в виде стола ТЕМ-ячейки из медной пластины размером  $98 \times 98$  мм<sup>2</sup> с толщиной 2 мм. На поверхность пластины в местах размещения ЭП, а также между охла-

жающими радиаторами и ЭП нанесен слой теплопроводящей пасты.

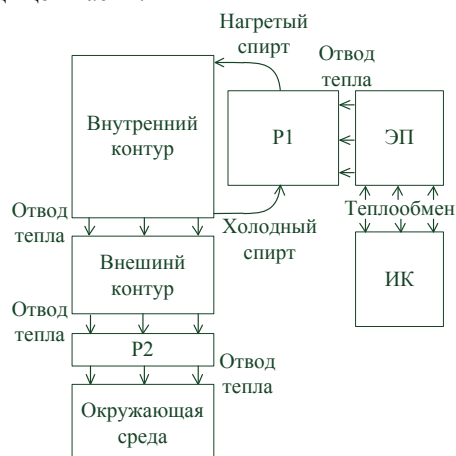


Рис. 3. Структурная схема системы нагрева и охлаждения стенок ИК КЭК

Медные трубки, размещенные в отверстиях радиаторов, соединялись с внутренним охлаждающим контуром из силиконовых трубок, подключенных к помпе для циркуляции спиртового раствора в контуре. Емкость со спиртовым раствором, в который погружалась помпа, размещалась внутри морозильной камеры, выступающей в роли внешнего охлаждающего контура с температурой  $T = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Напряжение электропитания ЭП  $U = 12\text{ В}$ . Электропитание осуществлялось с помощью блока питания мощностью  $P = 1000\text{ Вт}$ . Отслеживание температуры происходило с помощью цифрового датчика температуры DS18B20, размещенного на поверхности стола ТЕМ-ячейки. Макет испытательной установки системы терморегулятора КЭК представлен на рис. 4.

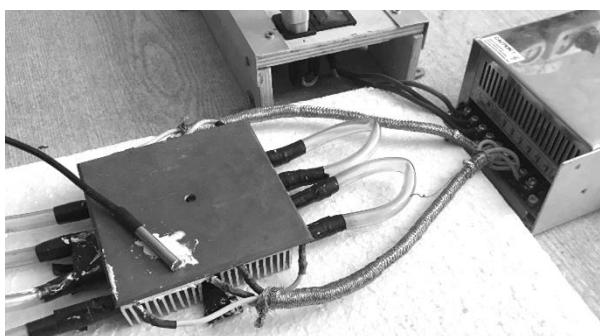


Рис. 4. Макет испытательной установки системы терморегулятора КЭК

Температура охлаждающей жидкости внутреннего контура, в момент времени  $t = 0\text{ с}$  составляла  $T_{\text{спирта}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура медной пластины  $T_1 = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Циркуляция жидкости во внутреннем контуре осуществлялась с помощью водяной помпы со скоростью  $4\text{ л/м}$ .

Во время работы системы охлаждения установлено, что температура медной пластины с начального значения  $T(t_0) = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$  увеличилась до  $T(t_{\text{охл1}}) = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  при  $t_{\text{охл1}} = 40\text{ с}$ . Дальнейшее снижение температуры с течением времени не наблюдалось.

Во время работы системы нагрева-установлено, что до момента времени  $t_{\text{нагр1}} = 138\text{ с}$  наблюдается линейный рост температуры с  $T(t_0) = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T(t_{\text{нагр1}}) = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в момент времени  $t_{\text{нагр2}} = 180\text{ с}$  температура медной пластины достигла значения  $T(t_{\text{нагр2}}) = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , однако с момента времени  $t_{\text{нагр2}}$  до  $t_{\text{нагр3}} = 269\text{ с}$  наблюдается линейное снижение температуры до значения  $T(t_{\text{нагр3}}) = +100\text{ }^{\circ}\text{C}$  без дальнейшего изменения (рис. 5).

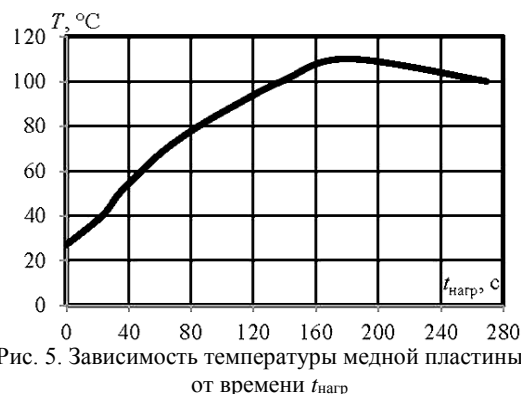


Рис. 5. Зависимость температуры медной пластины  $T$  от времени  $t_{\text{нагр}}$

#### Расчет количества теплоты и мощности нагрева и охлаждения ЭП

Выполнен расчет количества теплоты, отведенной от медной пластины:

$$Q = c \times m \times (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где  $c = 380\text{ Дж/кг}\times^{\circ}\text{C}$  – удельная теплоемкость меди,  $m = 0,189\text{ кг}$  – масса медной пластины;  $(T_1 - T_2)$  – разность температур на поверхности пластины [4].

Согласно выражению (1), количество теплоты, отведенной от медной пластины при ее охлаждении с  $T(t_0) = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T(t_{\text{охл1}}) = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , составило  $Q_{\text{охл}} = 864\text{ Дж}$ . При нагреве медной пластины с  $T(t_0) = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T(t_{\text{нагр1}}) = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , количество подведенной теплоты составило  $Q_{\text{нагр}} = 5256\text{ Дж}$ .

Выполнен расчет мощности, необходимой для нагрева или охлаждения медной пластины:

$$P = \frac{Q}{t}, \quad (2)$$

где  $Q$  – количество теплоты,  $t$  – время нагрева или охлаждения [4]. При отведении от медной пластины количества теплоты  $Q_{\text{охл}} = 864\text{ Дж}$  за время  $t_{\text{охл}} = t_{\text{охл1}} - t_0 = 40\text{ с}$  мощность охлаждения ЭП  $P_1 = 21,6\text{ Вт}$ . При передаче медной пластине количества теплоты  $Q_{\text{нагр}} = 5256\text{ Дж}$  за время  $t_{\text{нагр}} = t_{\text{нагр1}} - t_0 = 138\text{ с}$  мощность нагрева ЭП  $P_2 = 38,1\text{ Вт}$ . Данные расчеты отражают мощность нагрева и охлаждения системы без учета потерь, вызванных процессами теплообмена медной пластины с окружающей средой.

На рис. 6 представлен график зависимости мощности нагрева или охлаждения ЭП от разности температур между двумя сторонами ЭП, при токе питания  $I = 7\text{ А}$ . Видно, что мощности охлаждения  $P_1 = 21,6\text{ Вт}$  соответствует разность температур в  $41,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а мощности нагрева  $P_2 = 38,1\text{ Вт}$  соответствует разность температур в  $29,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Согласно [5], максимально допустимая разность температур между противоположными сторонами

ЭП  $\Delta T = 70$  °С. Сопоставив данную информацию с полученными данными, можно сделать выводы, что данная конфигурация системы охлаждения ЭП нуждается в некоторых доработках для обеспечения достаточного охлаждения горячей стороны ЭП, необходимого для получения более низких температур (порядка  $T = -40$  °С) на поверхности медной пластины, выступающей в роли ИК.

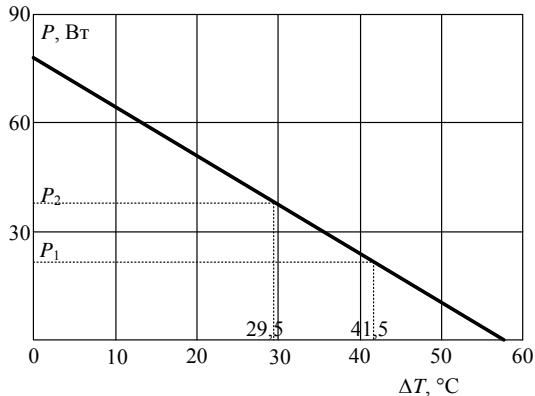


Рис. 6. Зависимость мощности нагрева (или охлаждения) ЭП  $P$  от разницы температур на противоположных сторонах ЭП [5]

Однако с функцией нагрева медной пластины, система нагрева и охлаждения в данной конфигурации, справилась полностью, нагрев пластину до  $T=100$  °С, учитывая то, что максимальная температура нагрева ЭП  $T = 100$  °С, согласно [5]. Для достижения  $T = 150$  °С система также нуждается в доработках, одной из которых может являться добавление вспомогательного нагревательного элемента, который будет дополнительно подводить тепло к ИК в момент работы системы в режиме нагрева и отключаться при переходе системы в режим охлаждения.

Основным недостатком системы охлаждения является малая площадь соприкосновения медных труб с охлаждающими радиаторами. Для решения данной проблемы планируется использование алюминиевых или медных блоков водяного охлаждения вместо охлаждающих радиаторов. Данные блоки имеют размер  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup> с толщиной 12 мм, что позволяет разместить их на поверхности ЭП, обеспечивая наиболее эффективный теплообмен за счет увеличения площади соприкосновения с ЭП.

Температура замерзания охлаждающей жидкости внутреннего контура, в роли которой выступает 95% раствор этилового спирта, согласно материалам, представленным в пособии [6],  $T = -114$  °С. Для улучшения показателей отвода тепла внутренним контуром от ЭП спиртовой раствор может быть охлажден до более низких температур. Для этого необходимо использовать более эффективный способ отвода тепла внешним контуром от внутреннего, а также следует увеличить время охлаждения спиртового раствора.

### Заключение

Таким образом, представлены результаты экспериментального исследования системы нагрева и охлаждения элемента ИК КЭК. Приведены вычисления количества теплоты и мощности в процессе нагрева и охлаждения ЭП, а также получено значение максимальной температуры охлаждения. Результаты измерений температуры элемента ИК при нагреве показали полное использование потенциала ЭП согласно его технической документации. Для достижения более низких температур в режиме охлаждения требуется замена радиаторов ЭП на блоки водяного охлаждения. Кроме того, следует увеличить время охлаждения спиртового раствора для большего снижения его температуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162) в ТУСУРе.

### Литература

1. Комнатнов М.Е. Камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний электронных компонентов / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – Т. 23, № 3. – С. 84–91.
2. Терморегулятор для климатической экранированной камеры / А.А. Собко, М.Е. Комнатнов // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Томск: В-Спектр, 2015. – Т. II. – С. 59–62.
3. Усовершенствование платы терморегулятором климатической экранированной камеры / А.А. Собко, М.Е. Комнатнов // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Томск: В-Спектр, 2016. – Т. I. – С. 225–226.
4. Эрдман С.В. Техническая термодинамика и теплотехника. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 87 с.
5. Specification of Thermoelectric Module TEC1-12712S // Thermoamic Electronics. – URL: <http://thermonamic.com/TEC1-12712S-English.pdf>
6. Шишкова Ю.В. Вопросы спиртометрии в фармацевтической технологии / Ю.В. Шишкова, В.А. Лиходед, А.В. Браженко, З.Р. Нова, Ф.Х. Кильдияров, В.В. Петрова. – Уфа: Изд-во ГБОУ ВПО БГМУ Минздрава России, 2014. – 73 с.

### Третьяков Тимур Игоревич

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [henos19039@gmail.com](mailto:henos19039@gmail.com)

### Попов Павел Андреевич

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [tonot88@gmail.com](mailto:tonot88@gmail.com)

### Комнатнов Максим Евгеньевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-6463-2889  
Эл. почта: [maxmek@mail.ru](mailto:maxmek@mail.ru)