

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ

УДК 536.5: 62-97: 519.7

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕРМОСТАТА НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЕ*

В.А. ГРИНКЕВИЧ

630501, РФ, Новосибирская область, Новосибирский район, Краснообск, а/я 468, Сибирский физико-технический институт, Сибирский федеральный научный центр агроботехнологий РАН, младший научный сотрудник. E-mail: grinkevich-yova@mail.ru

При проектировании термостатов малой мощности и малых размеров могут быть использованы элементы Пельтье, так как такие термостаты меньше по размерам и массе по сравнению с компрессорным холодильным контуром. Применение элемента Пельтье позволяет обеспечить температуру в термостате как выше, так и ниже температуры окружающей среды в отличие от резистивных нагревательных элементов. Такие термостаты применяются для термостатирования приборов с зарядовой связью (ПЗС-матриц) в цифровых фотоаппаратах, лазеров, электронных компонентов, биоматериалов, растений, лекарств. Термоэлектрические термостаты могут применяться в научных исследованиях, например, для формирования температурных воздействий на растения при исследовании стрессоустойчивости от различных внешних факторов. Термоэлектрическими термостатами можно формировать температурные воздействия на семена растений для улучшения их посевных качеств, в том числе всхожести, энергии прорастания. Также элемент Пельтье применяется в автомобильных холодильниках, медицинских термостатах. В данной работе рассматривается построение математической модели и численное моделирование температурных процессов в термостате на основе элемента Пельтье без регулятора. Математическая модель необходима для анализа свойств переходных процессов в термостате, а также для последующего синтеза регулятора. Полученная математическая модель термостата на основе элемента Пельтье учитывает возможность работы термоэлектрического термостата в режиме нагревания и в режиме охлаждения. В сравнении с известными в литературе математическими моделями предлагаемая модель более полно учитывает явления в термостате (например, эффект Зеебека), а также учитывает процессы теплообмена с окружающей средой, что позволяет точнее описывать температурные процессы в термостате. На основе полученной математической модели было проведено численное моделирование в программе Matlab:Simulink. Результаты численного моделирования позволили оценить вид и время переходных процессов в термостате, возможный диапазон изменения температур в термостате, рабочий диапазон тока через элемент Пельтье. Полученные данные могут быть использованы для решения задачи синтеза системы управления температурным режимом термостата.

* Статья получена 08 июня 2017 г.

Ключевые слова: элемент Пельтье, термостат, регулирование температуры, математическая модель, нелинейная система, численное моделирование

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-3-62-77

ВВЕДЕНИЕ

Существует множество технических задач, где нужно формировать температурные воздействия, поддерживать заданную температуру или заданный закон изменения температуры. Для таких целей применяют термостаты. Термостаты бывают компрессорные, термоэлектрические. В термоэлектрических термостатах используется элемент Пельтье [1]. Термоэлектрические термостаты, как правило, маломощные. Их применяют для термостатирования ПЗС-матриц, лазеров, электронных компонентов, растений, биоматериалов. Так же термоэлектрические термостаты применяются для формирования температурных воздействий. По изменению биопотенциала растений определяется устойчивость к температурным воздействиям [2–4]. Температурные воздействия на семена повышают их всхожесть, энергию прорастания. Для этой цели могут быть использованы термостаты на основе элемента Пельтье. Однако встречаются технические задачи, где существующие термостаты не подходят по конструкции, размерам, характеристикам. Для эффективной термостабилизации требуется математическая модель, чтобы применить известные методы расчета регуляторов [5–7]. Также математическая модель необходима для подбора источников питания для элементов Пельтье, схемотехнической реализации регулятора. Существуют работы [8–13], где описывается математическая модель термостата на основе элемента Пельтье, но многие из них не учитывают все возможности и все явления в термостате (например, теплообмен с окружающей средой). Многие модели учитывают только возможность охлаждения. В данной работе рассматривается модель, которая более полно учитывает явления, происходящие в термоэлектрическом термостате, учитывает возможность как нагревания, так и охлаждения.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОСТАТА

В термостате на основе элемента Пельтье присутствуют физические явления: эффект Пельтье [14], выделение джоулевого тепла, теплопроводность, эффект Зеебека [15], эффект Томсона [17], теплообмен с окружающей средой, термомагнитные явления. Эффект Пельтье заключается в том, что одна сторона охлаждается, другая нагревается. Эффект Зеебека проявляется в возникновении ЭДС от разности температур. Эффект Томсона и термомагнитные явления имеют малое влияние, поэтому в модели не учтены.

Страна элемента Пельтье, которая термостатирует объект, названа внутренней, противоположная ей – внешней. Внутренняя страна элемента Пельтье, теплопровод и объект термостатирования составляют внутреннюю часть термостата. Внешняя страна элемента Пельтье и радиатор составляют внешнюю часть термостата.

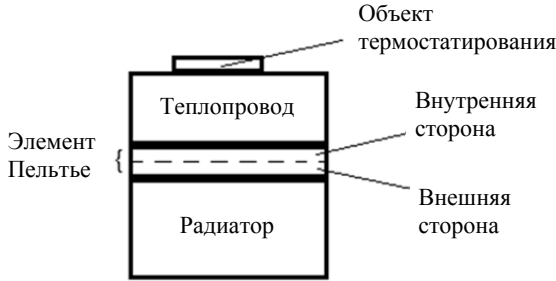


Рис. 1. Схема термостата на основе элемента Пельтье

Рассмотрим уравнение теплового баланса для термостата на основе элемента Пельтье, которое представим в следующем виде:

$$P_{\text{вну}} = P_{\text{вну.п}} + P_{\text{Дж.вну}} + P_{\text{т}} + P_{\text{наг}} + P_{\text{т.о.вну}}, \quad (1)$$

$$P_{\text{вне}} = P_{\text{вне.п}} + P_{\text{Дж.вне}} - P_{\text{т}} + P_{\text{т.о.вне}},$$

где $P_{\text{вну}}$ – тепловая мощность на внутренней части термостата; $P_{\text{вну.п}}$ – мощность, обуславливаемая эффектом Пельтье, на внутренней стороне элемента Пельтье; $P_{\text{Дж.вну}}$ – мощность джоулевого тепла, выделенного на внутренней части элемента Пельтье; $P_{\text{т}}$ – мощность теплопроводности от внешней стороны к внутренней; $P_{\text{наг}}$ – мощность тепловой нагрузки термостата; $P_{\text{т.о.вну}}$ – мощность теплообмена внутренней части термостата с окружающей средой; $P_{\text{вне}}$ – тепловая мощность на внешней части термостата; $P_{\text{вне.п}}$ – мощность, обуславливаемая эффектом Пельтье, на внешней стороне; $P_{\text{Дж.вне}}$ – мощность джоулевого тепла, выделенного на внешней части элемента Пельтье; $P_{\text{т.о.вне}}$ – мощность теплообмена внешней части термостата с окружающей средой.

В первом приближении можно принять, что джоулево тепло равномерно распределяется в элементе Пельтье, таким образом

$$P_{\text{вну}} = P_{\text{вну.п}} + 0,5P_{\text{Дж}} + P_{\text{т}} + P_{\text{наг}} + P_{\text{т.о.вну}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{вне}} = P_{\text{вне.п}} + 0,5P_{\text{Дж}} - P_{\text{т}} + P_{\text{т.о.вне}},$$

где $P_{дж}$ – мощность джоулевого тепла, выделившегося в элементе Пельтье.

В соответствии с методикой расчета полупроводниковых охлаждающих устройств [8] получим следующие соотношения:

$$P_{вну.П} = \alpha IT_{вну}, \quad (3)$$

$$P_{вне.П} = \alpha IT_{вне}, \quad (4)$$

$$P_{дж} = I^2 R_{эп}, \quad (5)$$

$$P_T = \gamma(T_{вне} - T_{вну}), \quad (6)$$

где α – коэффициент Зеебека; I – сила тока, протекающего через элемент Пельтье; $T_{вну}$ – температура внутренней части термостата; $T_{вне}$ – температура внешней части термостата; $R_{эп}$ – электрическое сопротивление элемента Пельтье; γ – термическая проводимость элемента Пельтье.

Из закона Ньютона–Рихмана [17] следует

$$P_{т.о.вну} = k_{т.о.вну}(T_{о.с} - T_{вну}), \quad (7)$$

$$P_{т.о.вне} = k_{т.о.вне}(T_{о.с} - T_{вне}), \quad (8)$$

где $k_{т.о.вну}$ – параметр теплообмена внутренней части термостата с окружающей средой; $T_{о.с}$ – температура окружающей среды; $k_{т.о.вне}$ – параметр теплообмена внешней части термостата с окружающей средой.

Параметры $k_{т.о.вну}$, $k_{т.о.вне}$ зависят от геометрии, цвета и химического состава радиатора, состава окружающей среды, скорости движения окружающей среды, разности температур радиатора и окружающей среды.

Подставив формулы (3), (4), (5), (6), (7), (8) в выражение (2), получим

$$P_{вну} = \alpha IT_{вну} + 0,5I^2 R_{эп} + \gamma(T_{вне} - T_{вну}) + P_{наг} + k_{т.о.вну}(T_{о.с} - T_{вну}), \quad (9)$$

$$P_{вне} = -\alpha IT_{вне} + 0,5I^2 R_{эп} - \gamma(T_{вне} - T_{вну}) + k_{т.о.вне}(T_{о.с} - T_{вне}).$$

Мощность с температурой связана выражением (10):

$$P = C \frac{dT}{dt}, \quad (10)$$

где P – тепловая мощность, C – теплоемкость, T – температура, t – время.

Из формул (9) и (10) получим

$$\frac{dT_{\text{вну}}}{dt} = \frac{\alpha IT_{\text{вну}}}{C_{\text{вну}}} + \frac{0,5I^2 R_{\text{эл}}}{C_{\text{вну}}} + \frac{\gamma(T_{\text{вне}} - T_{\text{вну}})}{C_{\text{вну}}} + \frac{P_{\text{наг}}}{C_{\text{вну}}} + \frac{k_{\text{т.о.вну}}(T_{\text{о.с}} - T_{\text{вну}})}{C_{\text{вну}}}, \quad (11)$$

$$\frac{dT_{\text{вне}}}{dt} = -\frac{\alpha IT_{\text{вне}}}{C_{\text{вне}}} + \frac{0,5I^2 R_{\text{эл}}}{C_{\text{вне}}} + \frac{\gamma(T_{\text{вне}} - T_{\text{вну}})}{C_{\text{вне}}} + \frac{k_{\text{т.о.вне}}(T_{\text{о.с}} - T_{\text{вне}})}{C_{\text{вне}}}, \quad (12)$$

здесь $C_{\text{вну}}$ – теплоемкость внутренней части термостата, $C_{\text{вне}}$ – теплоемкость внешней части термостата;

$$C_{\text{вну}} = C_{\text{вну.П}} + C_{\text{т.п}} + C_{\text{о.т}}, \quad (13)$$

$$C_{\text{вне}} = C_{\text{вне.П}} + C_{\text{р}}, \quad (14)$$

где $C_{\text{вну.П}}$ – теплоемкость стороны элемента Пельтье во внутренней части термостата, $C_{\text{т.п}}$ – теплоемкость теплопровода, $C_{\text{о.т}}$ – теплоемкость объекта термостатирования, $C_{\text{вне.П}}$ – теплоемкость стороны элемента Пельтье во внешней части термостата, $C_{\text{р}}$ – теплоемкость радиатора.

Управляющим воздействием в данной модели является ток I . От направления тока зависит, будет происходить нагревание внутренней части термостата или охлаждение внутренней части термостата. Ток, при котором будет происходить нагревание внутренней стороны, принят за положительный, противоположный – за отрицательный. Управляемой величиной является температура внутренней части термостата $T_{\text{вну}}$. Температура внешней части $T_{\text{вне}}$ используется только как переменная состояния термостата. Параметры данной модели являются нестационарными, для конкретного термостата параметры следует определять экспериментально.

Если элемент Пельтье подключен к источнику напряжения E , то из-за влияния эффекта Зеебека ток вычисляется по формуле

$$I = \frac{E - E_{\text{Зб}}}{R_{\text{ост}} + R_{\text{эл}}} = \frac{E - \alpha(T_{\text{вне}} - T_{\text{вну}})}{R_{\text{ост}} + R_{\text{эл}}} \quad (15)$$

где E – ЭДС источника, $E_{\text{Зб}}$ – ЭДС Зеебека, $R_{\text{ост}}$ – активное сопротивление источника и проводов.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОСТАТА

На внешней стороне элемента Пельтье устанавливают радиатор. Однако одного радиатора не всегда достаточно для обеспечения требуемого теплообмена. Для улучшения используют вентилятор или водяные трубки. В некоторых случаях можно установить радиатор больше по размеру, но это также не всегда возможно. При использовании вентилятора процессы достаточно сильно отличаются, поэтому при численном моделировании рассмотрены варианты с большим радиатором без вентилятора и малым радиатором с вентилятором. С помощью элемента Пельтье можно термостатировать как объекты, которые выделяют тепло, так и объекты, которые не выделяют тепло. Элемент Пельтье характеризуется допустимой разностью температур между охлаждающей и нагревающей стороной, превышение которой приводит к выходу из строя элемента Пельтье.

При численном моделировании в данной работе использовались параметры элемента Пельтье TEC1-12706. Параметры α , γ , $R_{\text{эл}}$ взяты из технических данных [18]. Теплоемкость сторон элемента Пельтье взята из [19]. Теплоемкость радиатора рассчитывается по соотношению $C = cm$, где c – удельная теплоемкость, m – масса. Удельная теплоемкость c берется из справочных данных [20]. Параметры α , γ , $R_{\text{эл}}$, $C_{\text{вну}}$, $C_{\text{вне}}$ приняты стационарными при численном моделировании. Параметры теплообмена с окружающей средой $k_{\text{т.о.вну}}$ и $k_{\text{т.о.вне}}$ оценены экспериментально. В качестве теплопровода взят алюминиевый параллелепипед, площадь основания которого равна площади пластины элемента Пельтье. Масса параллелепипеда равна 26 г.

Параметры теплообмена с окружающей средой $k_{\text{т.о.вну}}$ и $k_{\text{т.о.вне}}$ оценены экспериментально. Для этого радиатор нагревался. Далее при охлаждении радиатора на воздухе проводились измерения с помощью температурных датчиков и специализированной платы Arduino. Измерялась температура с интервалом в одну секунду. Таким образом получен массив температур. Методом конечных разностей получен массив производных температур. Измерена температура окружающей среды. Далее по формуле (10) получен массив мощностей теплообмена с окружающей средой. По формулам (7), (8) рассчитаны массивы численных значений параметров теплообмена $k_{\text{т.о.вну}}$, $k_{\text{т.о.вне}}$. По массивам численных значений методом аппроксимации полиномом определены выражения для параметров теплообмена $k_{\text{т.о.вну}}$, $k_{\text{т.о.вне}}$.

На рис. 2 и 3 приведены результаты численного моделирования при изменении тока во времени для случая с большим радиатором без вентилятора с объектом термостатирования, который не выделяет тепло. Параметры термостата, которые использовались при численном моделировании, приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметры при численном моделировании для случая с бóльшим радиатором без вентилятора

α , мВ/К	γ , Вт/К	$R_{\text{ЭП}}$, Ом	$C_{\text{вну}}$, Дж/К	$C_{\text{вне}}$, Дж/К	$P_{\text{наг}}$, Вт	$T_{\text{ос}}$, К
49.6	0.562	2	52.7677	389.159	0	283.15

Таблица 2

Параметры при численном моделировании (продолжение)

$T_{\text{вну.нач}}$, К	$T_{\text{вне.нач}}$, К	k_{00} , Вт/К	k_{01} , Вт/К ²	k_{10} , Вт/К	k_{11} , Вт/К
283.15	283.15	0.005	0.00004	0.3881	0.0031

Параметр теплообмена внутренней части термостата с окружающей средой рассчитывается по формуле

$$k_{\text{то.вну}} = k_{01} |T_{\text{ос}} - T_{\text{вну}}| + k_{00}. \quad (16)$$

Параметр теплообмена внешней части термостата с окружающей средой рассчитывается по формуле

$$k_{\text{то.вне}} = k_{11} |T_{\text{ос}} - T_{\text{вне}}| + k_{10}. \quad (17)$$

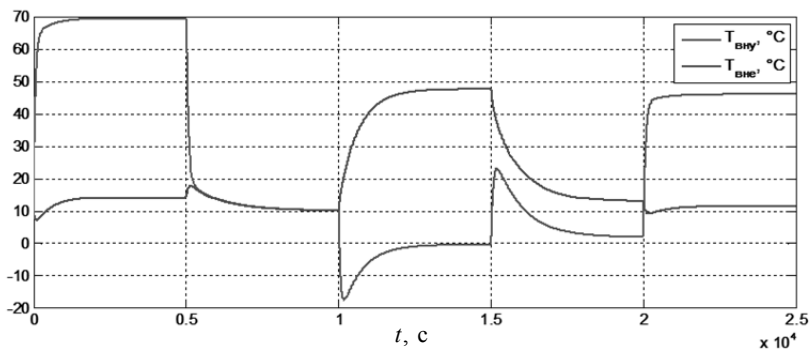


Рис. 2. График температур при изменении тока во времени для случая с бóльшим радиатором без вентилятора

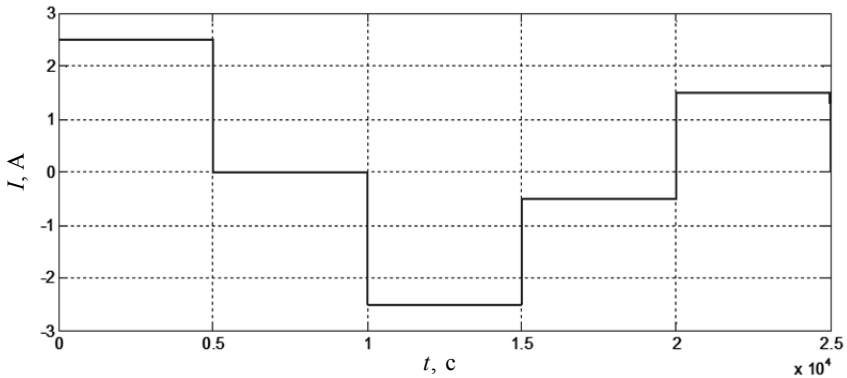


Рис. 3. График изменения тока во времени

На рис. 4 показана зависимость установившихся температур от тока для случая с большим радиатором с вентилятором с объектом термостатирования, который не выделяет тепло.

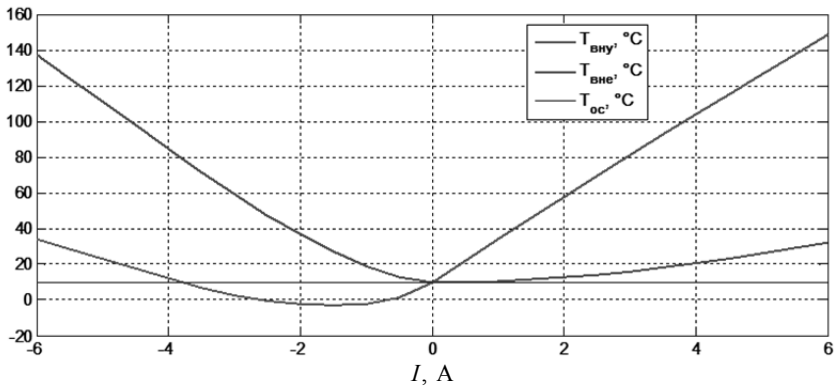


Рис. 4. Графики установившихся температур

На рис. 2 и 5 приведены результаты численного моделирования при изменении тока во времени для случая с меньшим радиатором с вентилятором с объектом термостатирования, который не выделяет тепло. График изменения тока показан на рис. 2. Параметры термостата, которые использовались при численном моделировании, приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Параметры при численном моделировании для случая с меньшим радиатором и вентилятором

α , мВ/К	γ , Вт/К	$R_{эл}$, Ом	$C_{вну}$, Дж/К	$C_{вне}$, Дж/К	$P_{наг}$, Вт
49.6	0.562	2	52.7677	276.3	0

Таблица 4

Параметры при численном моделировании (продолжение)

$T_{ос}$, К	$T_{вну.нач}$, К	$T_{вне.нач}$, К	k_{00} , Вт/К	k_{01} , Вт/К ²	$k_{то.вне}$, Вт/К
283.15	283.15	283.15	0.005	0.00004	2.9

Параметр теплообмена внутренней части термостата с окружающей средой рассчитывается по формуле (16).

Изменение тока во времени показано на рис. 5.

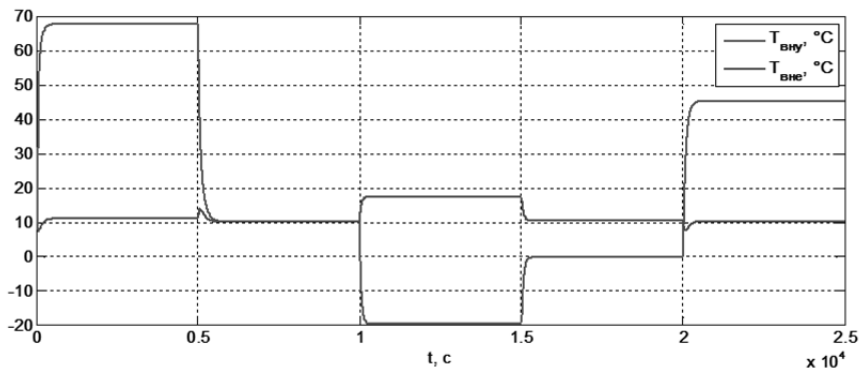


Рис. 5. График температур при изменении тока во времени для случая с меньшим радиатором и вентилятором

На рис. 6 показана зависимость установившихся температур от тока для случая с меньшим радиатором с вентилятором с объектом термостатирования, который не выделяет тепло.

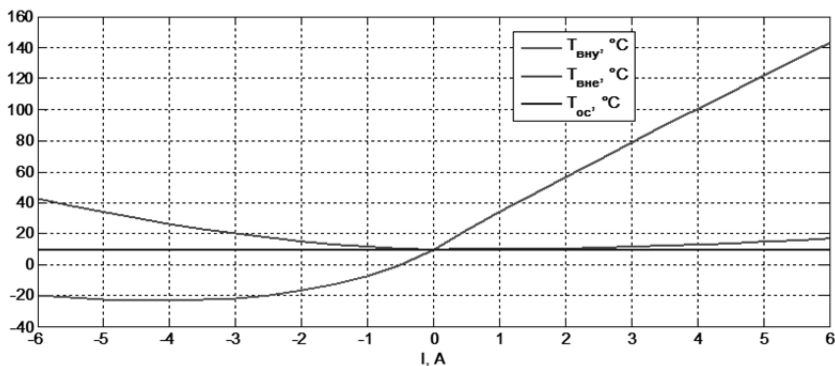


Рис. 6. Графики установившихся температур

ВЫВОД ПО ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

Без использования вентилятора термостат с рассматриваемыми параметрами при охлаждении эффективно работает только при токе от -1.5 А до 0 А. При этом удалось достигнуть температуру всего на 13 °C ниже температуры окружающей среды. Это сильно ограничивает применение. С использованием вентилятора термостат значительно эффективнее работает при охлаждении. Удалось достигнуть температуру на 22 °C ниже температуры окружающей среды. Существуют диапазоны токов, когда разность температур сторон превышает допустимую. Для элемента Пельтье TEC1-12706 она равна 70 °C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выведена математическая модель для термостата на основе элемента Пельтье. В этой модели учтены эффект Пельтье, эффект Зеебека, выделение джоулевого тепла, теплопроводности, теплообмен с окружающей средой. Полученная математическая модель термостата на основе элемента Пельтье в дальнейшем будет использована для решения задачи синтеза регуляторов тока и температуры, например, путем применения метода разделения движений [5–7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Элемент Пельтье [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D0%9F%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%8C%D0%B5 (дата обращения: 24.11.2017).

2. Сероклинов Г.В., Гунько А.В. Информационные технологии при исследовании изменения биопотенциала растений от действия температуры // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014): труды XII международной конференции, 2–4 октября 2014 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 7. – С. 72–75.

3. Сероклинов Г.В. Задачи автоматизации экспериментальных исследований сложных биофизических объектов // Методы и технические средства исследований физических процессов в сельском хозяйстве / Сибирский физико-технический институт аграрных проблем. – Новосибирск, 2001. – С. 46–53.

4. Сероклинов Г.В., Савченко О.Ф., Андреев А.Ю. Методология исследования объектов сельскохозяйственного производства на основе виртуальных средств измерений // Информационные технологии, информационные измерительные системы и приборы в исследовании сельскохозяйственных процессов: материалы Международной научно-практической конференции «Агроинфо-2003». – Новосибирск, 2003. – С. 252–256.

5. Yurkevich V.D. PWM controller design based on singular perturbation technique: a case study of buck-boost DC-DC converter // Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, August 28 – September 2, 2011. – Milan, 2011. – P. 9739–9744.

6. Zinoviev G.S., Yurkevich V.D., Gordeev A.A. PWM current controller design for multi-level DC-DC converter via singular perturbation technique // The 12th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2011), Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2011: proceedings. – Novosibirsk, 2011. – P. 390–398.

7. Юркевич В.Д. Синтез систем стабилизации для неаффинных по управлению нелинейных динамических объектов на основе формирования разнотемповых процессов // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16–19 июня 2014 г.: труды. – М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 353–363.

8. Покорный Е.Г., Щербина А.Г. Расчет полупроводниковых охлаждающихся устройств. – Л.: Наука, 1969. – 204 с.

9. Соловьев А.Л. Параметрический синтез регуляторов с широтно-импульсной модуляцией по методу разделения движений: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2002. – 190 л.

10. *Guiatni M., Kheddar A.* Modeling identification and control of Peltier thermoelectric modules for telepresence [Electronic resource] // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2011. – Vol. 133 (3). – P. 031010. – URL: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKewjysc27hffTAhXMDZoKHeFGAqsQFggqMAA&url=https%3A%2F%2Fsaturne.lirmm.fr%2Fcontent%2Fdownload%2F8802%2F134594%2Ffile%2FPaper_018_JDSMC_2011.pdf&usq=AFQjCNFyTcGPcG9kVII6AQf0Z8MLLm9UIA&sig2=T9ksE62D20n6nIZS5UCe3Q (accessed: 24.11.2017).
11. *Аунг П.З.* Определение условий получения максимальной энергетической эффективности элементом Пельтье // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. – 2016. – № 3 (20). – С. 153–158.
12. Исследование теплофизических процессов в системе краткосрочного хранения и транспортировки биологических материалов / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, М.А. Хазамова, И.Ш. Миспахов // Вестник Международной академии холода. – 2014. – № 3. – С. 10–14.
13. *Белова О.В., Чернышов О.В.* Метод математического моделирования тепловых источников в термоэлектрических элементах Пельтье // Научное приборостроение. – Т. 14, № 1. – С. 51–57.
14. Эффект Пельтье [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%9F%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%8C%D0%B5 (дата обращения: 24.11.2017).
15. Эффект Зеебека [Электронный ресурс]. – URL: <http://thermointech.ru/tech/effekt-zeebeka/> (дата обращения: 24.11.2017).
16. Эффект Томсона [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%A2%D0%BE%D0%BC%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0 (дата обращения: 24.11.2017).
17. Закон Ньютона-Рихмана [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%9D%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B0_%E2%80%944_%D0%A0%D0%B8%D1%85%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B0 (дата обращения: 24.11.2017).
18. Thermoelectric cooler TEC1-12706 [Electronic resource]. – URL: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/227422/ETC2/TEC1-12706.html> (accessed: 27.11.2017).
19. Физический практикум. Ч. 2. Электричество и магнетизм. Колебания и волны: учебное пособие для вузов / В.В. Ларионов, В.И. Веретельник, Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – 254 с.

20. Удельная теплоемкость [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D1%91%D0%BC%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C (дата обращения: 27.11.2017).

Гринкевич Владимир Анатольевич, младший научный сотрудник Сибирского физико-технического института аграрных проблем и Сибирского физико-технического института. Основное направление научных исследований – разработка устройств формирования температурных воздействий на биологические объекты. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru

Research on mathematical model of thermostat based on Peltier element*

V.A. Grinkevich

Siberian Physical-Technical Institute of Agrarian Problems, PO Box 468, Krasnoobsk, Novosibirsk district, Novosibirsk region, 630501, Russian Federation, Researcher. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru

Peltier elements can be used to design low-power thermostats and small size thermostats, because these thermostats smaller in size than compressor refrigerant circuit. Application of Peltier element allows to provide temperature as above ambient temperature so bellow ambient temperature, unlike resistive heaters. So thermostats are applied for thermostating CCD matrix in digital cameras, lasers, electronic components, biological materials, plants, medicine. Thermoelectric thermostats may be used in scientific research, for example, to form temperature impacts on plants for research stress resistance of plants by different external factors. May to form temperature impacts on plants' seeds for improve their seed qualities so as germination. Also Peltier elements are applied in car refrigerators, medical thermostats. Composition of mathematical model and numeric simulation of temperature processes in thermostat based Peltier elements without controllers is considered in this work. Mathematical model is necessary for analysis of transition processes in thermostats and for synthesis controller. Mathematical model for thermostat based Peltier element, which have composited in this work, takes into account possibility of work in heating mode and cooling mode. Proposed model more fully takes into account phenomenon in thermostat, for example, Seebeck effect, heat exchange with environment, that allow more precisely to describe temperature processes in thermostat. Numeric simulation has carried out based model, which has composited in this work, by software «Matlab:Simulink». Results of numerical simulation had allowed view and time of transition processes in thermostats, temperature band in thermostats, which is possible, operating

* Received 08 June 2017.

band of current. Getted data may be used for the solution of task of synthesis of control system of thermostat temperature mode.

Keywords: Peltier element, thermostat, control of temperature, mathematical model, non-linear system, numeric modeling

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-3-62-77

REFERENCES

1. Element Pel'te [Peltier element]. *Vikipediya* [Wikipedia]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D0%9F%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%8C%D0%B5 (accessed 24.11.2017).
2. Seroklinov G.V., Gun'ko A.V. [Information technologies for researching of biopotential change of plants from the action of temperature]. *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya (APEP-2014): trudy XII mezhdunarodnoi konferentsii* [12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2014: Proceedings], Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2014, vol. 7, pp. 72–75. (In Russian).
3. Seroklinov G.V. Zadachi avtomatizatsii eksperimental'nykh issledovaniy slozhnykh biofizicheskikh ob"ektov [Tasks of automation experimental researching of complex biophysical objects]. *Metody i tekhnicheskie sredstva issledovaniy fizicheskikh protsessov v sel'skom khozyaistve* [Methods and technical facilities of researching of physical processes in agriculture]. Siberian Physical-Technical Institute of Agrarian Problems. Novosibirsk, 2001, pp. 46–53.
4. Seroklinov G.V., Savchenko O.F., Andreev A.Yu. [Methodology of investigation of objects of agricultural Manufacture based on virtual means of measurement]. *Informatsionnye tekhnologii, informatsionnye izmeritel'nye sistemy i pribory v issledovaniy sel'skokhozyaistvennykh protsessov: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Agroinfo-2003"* [Information technologies, information measuring systems and devices in the study of agricultural processes. Materials of the International Scientific and Practical Conference "Agroinfo-2003"]. Novosibirsk, 2003, pp. 252–256. (In Russian).
5. Yurkevich V.D. PWM controller design based on singular perturbation technique: a case study of buck-boost DC-DC converter. *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, Milan, Italy, August 28 – September 2, 2011, pp. 9739–9744.
6. Zinoviev G.S., Yurkevich V.D., Gordeev A.A. PWM current controller design for multi-level DC-DC converter via singular perturbation technique. *The 12th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2011)*, Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2011, pp. 390–398.

7. Yurkevich V.D. [Synthesis stabilization systems for non-affine by control non-linear dynamic objects based organizations didderent rate processes]. *XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [Proceedings of the XII All-Russian meeting on problems of management VSPU-2014], Moscow, 16–19 June 2014, pp. 353–363. (In Russian).

8. Pokornyi E.G., Shcherbina A.G. *Raschet poluprovodnikovyykh okhlaydayushchikhsya ustroystv* [Calculation of semiconductor cooling devices]. Leningrad, Nauka Publ., 1969. 204 p.

9. Solov'ev A.L. *Parametricheskii sintez regulyatorov s shirotno-impul'snoi modulyatsiei po metodu razdeleniya dvizhenii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Parametric synthesis of regulators with pulse-width modulation by the method of separation of movements. Ph.D eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2002. 190 p.

10. Guiatni M., Kheddar A. Modeling identification and control of Peltier thermoelectric modules for telepresence. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2011, vol. 133 (3), p. 031010. Available at [https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKewjysc27hffTAhXMDZoKHeFGAqsQFggqMAA&url=https%3A%2F%2Fsaturne.lirmm.fr%2Fcontent%2Fdownload%2F8802%2F134594%2Ffile%2FPaper_018_JDSMC_2011.pdf&usq=AFQjCNFyTcGPcG9kVII6AQf0Z8MLLm9UIA&sig2=T9ksE62D20n6nIZS5UCe3Q] (accesed 24.11.2017).

11. Aung P.Z. Opredelenie uslovii polucheniya maksimal'noi energeticheskoi ef-fektivnosti elementom Pel't'e [Determination of producing maximum energy efficiency Peltier element]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii – Proceedings of the South-West State University. Technics and Technologies*, 2016, no. 3 (20), pp. 153–158.

12. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Khazamova M.A., Mispakhov I.Sh. Issledovanie teplofizicheskikh protsessov v sisteme kratkosrochnnogo khraneniya i transportirovki biologicheskikh materialov [Researchingof thermophysical processes in the system of short-term storage and transport of biological materials]. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda – Vestnik of International Academy of Refrigeration*, 2014, no. 3, pp. 10–14.

13. Belova O.V., Chernyshov O.V. Metod matematicheskogo modelirovaniya teplovykh istochnikov v termoelektricheskikh elementakh Pel't'e [Method of mathematical modeling of thermal sources in thermoelectric Peltier elements]. *Nauchnoe priborostroenie – Scientific Instrumentation*, 2004, vol. 14, no. 1, pp. 51–57.

14. *Effekt Pel't'e* [Peltier effect]. *Vikipediya* [Wikipedia]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%9F%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%8C%D0%B5] (accesed: 24.11.2017).

15. *Effekt Zeebeka* [Seebeck effect]. Available at: <http://thermointech.ru/tech/effekt-zeebeka/> (accessed 24.11.2017).
16. *Effekt Tomsona* [Thomson effect]. *Vikipediya* [Wikipedia]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%A2%D0%BE%D0%BC%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0 (accessed 24.11.2017).
17. *Zakon N'yutona-Rikhmana* [Newton-Richman's Law]. *Vikipediya* [Wikipedia]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%9D%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B0_%E2%80%94%D0%A0%D0%B8%D1%85%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B0 (accessed 24.11.2017).
18. *Thermoelectric cooler TEC1-12706*. Available at: <http://www.alldata-sheet.com/datasheet-pdf/pdf/227422/ETC2/TEC1-12706.html> (accessed 27.11.2017).
19. Larionov V.V., Veretel'nik V.I., Tyurin Yu.I., Chernov I.P. *Fizicheskii praktikum. Ch. 2. Elektrichestvo i magnetizm. Kolebaniya i volny* [Physical Practice. Pt. 2. Electricity and magnetism. Oscillations and waves]. Tomsk, TSU Publ., 2004. 254 p.
20. *Udel'naya teploemkost'* [Specific heat]. *Vikipediya* [Wikipedia]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D1%91%D0%BC%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C (accessed 27.11.2017).