

*АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

УДК 536.5: 62-97: 519.7

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-1-7-31

**СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ  
ДЛЯ ЭЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЕ\***

В.А. ГРИНКЕВИЧ

*630501, РФ, Новосибирская область, Новосибирский район, п. Краснообск, а/я 468, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, младший научный сотрудник. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru*

Управляемые термостаты и формователи температурных профилей применяются в научных исследованиях, управлении скоростью химических реакций, термостабилизации ПЗС-матриц, стабилизации длины волны лазера, хранении продуктов питания, лекарств. Существуют термостаты и формователи температурных профилей разных размеров, мощностей, конструкций. Преимуществом элемента Пельтье является его малая масса, небольшие геометрические размеры, простота конструкции. Однако элемент Пельтье имеет низкий КПД, меньшую мощность по сравнению с компрессорным холодильным контуром, а также меньший допустимый температурный диапазон по сравнению с резистивным нагревательным элементом. Элемент Пельтье может обеспечить температуру в термостате выше температуры окружающей среды или ниже. Обычно элементы Пельтье применяются в устройствах небольшой мощности, где есть ограничения в размерах и массе (например, в автомобильных холодильниках, в термостатах для транспортировки биоматериалов в небольших количествах, при исследовании биофизических объектов). Устройства на основе элемента Пельтье применяются для теплового массажа кожи человека, теплового воздействия на растения. С целью поддержания стабильной температуры и обеспечения высокой точности требуется использовать регулятор температуры для термостата на основе элемента Пельтье. Управляющим воздействием для элемента Пельтье является ток, величина которого влияет на температуру внутри термостата. В статье обсуждается методика синтеза регулятора температуры. В качестве входного воздействия рассматривается скачкообразный и трапецидальный температурный профиль. Расчет регулятора температуры основан на применении метода разделения движений. Приведены результаты численного моделирования системы управления температурой. Предполагаемая система управления температурой для элемента Пельтье может быть использована в формователях температурных воздействий на биофизические объекты.

**Ключевые слова:** термостат, формователь температурного профиля, элемент Пельтье, регулятор температуры, метод разделения движений, нелинейная система, математическая модель, численное моделирование

---

\* Статья получена 24 декабря 2018 г.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Элементы Пельтье [1] применяют для конструирования термостатов малой мощности [2], формирователей температурных воздействий на растения [3], термостатирования лазеров, ПЗС-матриц и биоматериалов [4]. Также элементы Пельтье применяются в формирователях температурного профиля, массажерах кожи человека, водяных кулерах и термоэлектрических холодильниках [5]. Управляемым фактором термостата или формирователя температурного профиля является температура его внутренней части. Поскольку элемент Пельтье может быть применен для поддержания стабильной температуры и формирования скачкообразного или непрерывного температурного профиля, возникает необходимость синтеза следящего, стабилизирующего или следящего с дополнительной инерционностью на входе регулятора.

Для измерения температуры внутри термостата применяют датчики температуры. С целью обеспечения требуемой точности и заданного качества переходных процессов необходимо выполнить синтез регулятора температуры.

Особенностью элемента Пельтье является его нелинейная динамическая характеристика, нестационарность параметров и отсутствие полной информации. В силу этого в работе применен метод разделения движений [6, 7]. В настоящей статье обсуждаются основные этапы синтеза и приведены результаты численного моделирования процессов в системе управления. Предполагаемая система управления температурой для элемента Пельтье может быть использована в формирователях температурных воздействий на биофизические объекты [8].

## **1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

В данной работе в качестве объекта управления рассматривается исполнительная часть формирования температурных воздействий (ИЧФТВ), которая включает в себя элемент Пельтье, теплопровод, объект тепловой обработки, радиатор.

Целью работы является расчет регулятора температуры для управляемого термостата на основе элемента Пельтье и численное моделирование системы управления. Общими требованиями для всех рассматриваемых вариантов является обеспечение нулевого перерегулирования, нулевой статической ошибки и заданного времени переходного процесса. Схема ИЧФТВ показана на рис. 1.

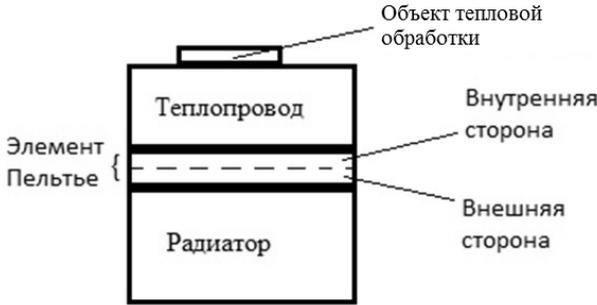


Рис. 1. Схема ИЧФТВ

В настоящей статье сторона элемента Пельтье, воздействующая на объект тепловой обработки, названа внутренней, противоположная ей сторона – внешней. Внутренняя сторона элемента Пельтье, теплопровод, объект тепловой обработки составляют внутреннюю часть ИЧФТВ; внешняя сторона элемента Пельтье и радиатор – внешнюю часть ИЧФТВ. Управляемой величиной является температура внутренней части ИЧФТВ. Схема системы управления приведена на рис 2.

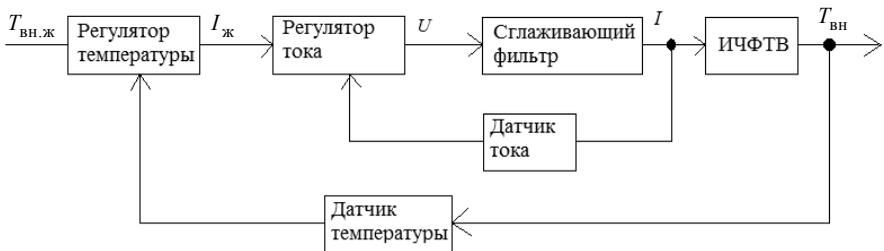


Рис. 2. Функциональная схема системы регулирования температуры

Для эффективного регулирования температуры рассматривается двухконтурная система управления, где процессы в контуре тока протекают значительно быстрее. Поэтому инерционностью контура управления током пренебрегаем при синтезе алгоритма управления для контура регулирования температуры.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ТЕРМОСТАТА

В работе [1] выведена математическая модель термостата на основе элемента Пельтье. Такая модель подходит и для формирователей температурных профилей на основе элемента Пельтье:

$$\frac{dT_{\text{вн}}}{dt} = \frac{\alpha IT_{\text{вн}}}{C_{\text{вн}}} + \frac{0,5I^2 R_{\text{эП}}}{C_{\text{вн}}} - \frac{\gamma T_{\text{вн}}}{C_{\text{вн}}} + \frac{\gamma T_{\text{внеш}}}{C_{\text{вн}}} + \frac{k_{\text{т.о вн}}(T_{\text{о.с}} - T_{\text{вн}})}{C_{\text{вн}}} + \frac{P_{\text{н}}}{C_{\text{вн}}}; \quad (1)$$

$$\frac{dT_{\text{внеш}}}{dt} = -\frac{\alpha IT_{\text{внеш}}}{C_{\text{внеш}}} + \frac{0,5I^2 R_{\text{эП}}}{C_{\text{внеш}}} + \frac{\gamma T_{\text{вн}}}{C_{\text{внеш}}} - \frac{\gamma T_{\text{внеш}}}{C_{\text{внеш}}} + \frac{k_{\text{т.о внеш}}(T_{\text{о.с}} - T_{\text{внеш}})}{C_{\text{внеш}}},$$

где  $T_{\text{вн}}$  – температура внутренней части устройства;  $t$  – время;  $\alpha$  – коэффициент Зеебека;  $I$  – протекаемый через элемент Пельтье ток;  $C_{\text{вн}}$  – теплоемкость внутренней части устройства;  $R_{\text{эП}}$  – электрическое сопротивление элемента Пельтье;  $\gamma$  – термическая проводимость элемента Пельтье;  $T_{\text{внеш}}$  – температура внешней части элемента Пельтье;  $k_{\text{т.о вн}}$  – термическая проводимость перехода «внутренняя часть – окружающая среда»;  $k_{\text{т.о внеш}}$  – термическая проводимость перехода «внешняя сторона элемента Пельтье – окружающая среда»;  $T_{\text{о.с}}$  – температура окружающей среды;  $C_{\text{внеш}}$  – теплоемкость внешней части. При этом полагается, что термическая проводимость внутренней части достаточно большая, температура в ней распространяется быстро, внутреннюю часть считаем равномерно нагретой.

Параметры математической модели (1), используемые при расчете коэффициентов регулятора и численном моделировании, приведены в таблице.

**Параметры при численном моделировании**

$\alpha$ , В/К	$\gamma$ , Вт/К	$R_{\text{эП}}$ , Ом	$C_{\text{вн}}$ , Дж/К	$C_{\text{внеш}}$ , Дж/К	$P_{\text{н}}$ , Вт	$T_{\text{о.с}}$ , К
0.081	2.1	1.25	45	276	0	293.15

Продолжение таблицы

$T_{\text{вн.нач}}$ , К	$T_{\text{внеш.нач}}$ , К	$k_{00}$ , Вт/К	$k_{01}$ , Вт/К <sup>2</sup>	$k_{10}$ , Вт/К	$k_{11}$ , Вт/К
293.15	293.15	0.01	0.0001	3	0.003

При этом имеют место следующие выражения:

$$k_{T.O \text{ ВН}} = k_{01} |T_{O.c} - T_{ВН}| + k_{00},$$

$$k_{T.O \text{ ВНЕШ}} = k_{11} |T_{O.c} - T_{ВНЕШ}| + k_{10}.$$

Из уравнений (1) видно, что данная модель является нелинейной, управляющим фактором является ток  $I$ , управляемой величиной – температура  $T_{ВН}$ . Результаты работы [1] показывают, что тепловые процессы без регулятора внутри термостата носят аperiodический характер.

Преобразуем первое уравнение системы (1) к виду

$$\frac{dT_{ВН}}{dt} = \left( \frac{\alpha T_{ВН}}{C_{ВН}} + \frac{0,5IR_{\text{ЭП}}}{C_{ВН}} \right) I + \frac{\gamma(T_{ВНЕШ} - T_{ВН})}{C_{ВН}} + \frac{P_{Н}}{C_{ВН}} + \frac{k_{T.O \text{ ВН}}(T_{O.c} - T_{ВН})}{C_{ВН}}. \quad (2)$$

Представим (2) в виде

$$\frac{dT_{ВН}}{dt} = g(T_{ВН}, I)I + q(T_{ВН}, T_{ВНЕШ}, P_{Н}, T_{O.c}), \quad (3)$$

где

$$g = \frac{\alpha T_{ВН}}{C_{ВН}} + \frac{0,5IR_{\text{ЭП}}}{C_{ВН}}. \quad (4)$$

$$q = \frac{\gamma(T_{ВНЕШ} - T_{ВН})}{C_{ВН}} + \frac{P_{Н}}{C_{ВН}} + \frac{k_{T.O \text{ ВН}}(T_{O.c} - T_{ВН})}{C_{ВН}}.$$

В рабочей области функции  $g(\cdot)$ ,  $q(\cdot)$  и их производные по времени являются ограниченными.

### 3. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ

При синтезе регулятора необходимо учитывать динамические свойства объекта управления, чтобы обеспечить точность и устойчивость системы управления. Существуют различные методы синтеза и настройки регуляторов: частотный метод, модальный метод, метод разделения движений, метод

локализации, процедура Циглера–Никольса, метод численной оптимизации. Особенностью элемента Пельтье является нестационарность параметров и отсутствие полной информации о параметрах, нелинейность динамической характеристики для процессов по температуре. Кроме того, имеются возмущающие факторы: теплообмен с окружающей средой и внешней стороной элемента Пельтье. Частотный и модальный метод применяются только для линейных объектов. Метод локализации не дает астатизма и требует вычисления производной такого же порядка, как и порядок объекта, что усиливает высокочастотные шумы. Поэтому наиболее подходящим является метод разделения движений. Для синтеза нелинейных систем возможно применение линеаризации обратными связями [9]. При синтезе регулятора методом разделения движений для объекта первого порядка получим структуру алгоритма управления в виде ПИ-регулятора [6]. При формировании непрерывного температурного профиля в работе используется следящий ПИ-регулятор. При формировании скачкообразного профиля или поддержания стабильной температуры предлагается использовать стабилизирующий ПИ-регулятор [6] или следящий с дополнительной инерционностью на входе.

### 3.1. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ПИ-РЕГУЛЯТОРА

Замкнутая система управления температурой описывается следующей системой уравнений, в которой второе уравнение является уравнением ПИ-регулятора:

$$\begin{cases} \dot{T}_{\text{вн}} = g(\cdot)I + q(\cdot), \\ \mu \dot{I} = k_0 \left( T^{-1} \cdot (T_{\text{вн.ж}} - T_{\text{вн}}) - \dot{T}_{\text{вн}} \right), \end{cases} \quad (5)$$

где  $k_0$  – общий множитель коэффициентов регулятора;  $T$  – желаемая постоянная времени переходного процесса по температуре;  $T_{\text{вн.ж}}$  – желаемая температура внутренней части устройства.

Подставляя правую часть первого уравнения системы (5) вместо  $\dot{T}_{\text{вн}}$  во втором уравнении системы (5), получаем выражение

$$\mu \dot{I} = k_0 \left( T^{-1} (T_{\text{вн.ж}} - T_{\text{вн}}) - g(\cdot)I - q(\cdot) \right). \quad (6)$$

Уменьшение параметра  $\mu$  приводит к формированию быстрых процессов по сигналу  $I$  и медленных процессов по сигналу  $T_{\text{вн}}$ , при этом  $\mu > 0$ .

Введем быстрое время  $t_f = t / \mu$ . В таком случае уравнение (6) можно записать для быстрого времени в виде

$$\frac{dI}{dt_f} = k_0 \left( T^{-1}(T_{\text{вн.ж}} - T_{\text{вн}}) - g(\cdot)I - q(\cdot) \right). \quad (7)$$

Функция  $q(\cdot)$  не зависит от тока, но зависит от переменных  $T_{\text{вн}}$ ,  $T_{\text{внеш}}$ ,  $T_{\text{о.с}}$ ,  $P_{\text{н}}$ , которые в быстром времени рассматриваются как постоянные. Таким образом, в быстром времени  $q(\cdot)$  тоже является постоянной величиной.

Преобразуем (7) к виду

$$\frac{dI}{dt_f} = -k_0 g(\cdot)I + \rho,$$

где

$$\rho = k_0 \left( T^{-1}(T_{\text{вн.ж}} - T_{\text{вн}}) - q(\cdot) \right).$$

Поскольку  $\rho$  содержит только постоянные в быстром времени величины, то и рассматривается также постоянной величиной в быстром времени.

Для элемента Пельтье «ТВ-199-1,4-0.6» допустим диапазон токов от  $-15,1$  до  $15,1$  А. С помощью численного моделирования процессов по температуре ИЧФТВ построим график зависимости  $g(\cdot)$  от тока  $I$  (рис. 3).

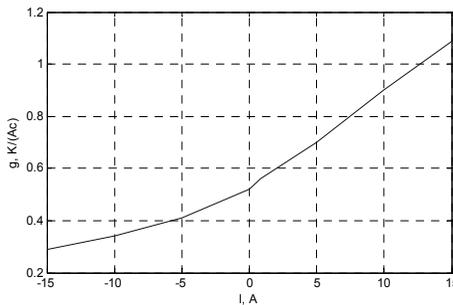


Рис. 3. График зависимости  $g(\cdot)$  от тока  $I$

Поскольку  $g(\cdot) > 0$  (рис. 3) в допустимом диапазоне тока  $I$ , то можно выбрать номинальный ток, для которого рассчитать  $g_{\text{ном}}$ . После расчета  $g_{\text{ном}}$

выбрать  $k_0$  такой, чтобы контур быстрых движений был устойчивым, например  $k_0 = 1 / g_{\text{НОМ}}$ . С этой целью выберем номинальную температуру внутренней части, равную 303,15 К (30 °С), для которой при параметрах, приведенных в табл. 1, номинальный ток равен 0,86 А. Для  $T_{\text{ВН}} = 30$  °С и  $I = 0,86$  А по формуле (4)  $g_{\text{НОМ}} = 0,56$ .

Преобразуем второе уравнение системы (5) в операторную форму:

$$\mu p I = k_0 \left( T^{-1} (T_{\text{ВН.Ж}} - T_{\text{ВН}}) - p T_{\text{ВН}} \right).$$

Выражая  $I$ , получим

$$I = k_0 \left( \frac{(T_{\text{ВН.Ж}} - T_{\text{ВН}})}{\mu T p} - \frac{T_{\text{ВН}}}{\mu} \right). \quad (8)$$

Полученное выражение соответствует структуре ПИ-регулятора, для которого коэффициенты рассчитываются по следующим формулам:

$$k_p = \frac{k_0}{\mu}, \quad k_I = \frac{k_0}{\mu T}. \quad (9)$$

Структурная схема регулятора, описываемая формулой (8), изображена на рис. 4. Для расчета параметра  $\mu$  выберем степень разделения движений  $\eta = 10$  и рассчитаем  $\mu$  по формуле

$$\mu = \frac{T}{\eta}.$$

Выберем желаемую постоянную времени  $T = 4$  с, для которой  $\mu = 0,4$  с,  $k_p = 1,4$ ,  $k_I = 0,35$ .

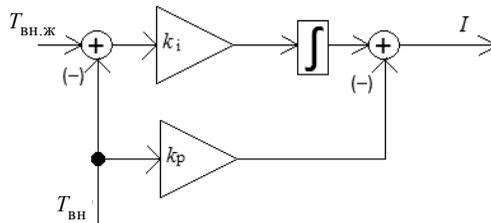


Рис. 4. Структурная схема стабилизирующего ПИ-регулятора

### 3.2. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ СЛЕДЯЩЕГО ПИ-РЕГУЛЯТОРА

Замкнутая система управления температурой описывается следующей системой уравнений, в которой второе уравнение является уравнением следящего ПИ-регулятора:

$$\begin{cases} \dot{T}_{\text{ВН}} = g(\cdot)I + q(\cdot), \\ \mu \dot{I} = k_0(T^{-1}e + \dot{e}), \end{cases} \quad (10)$$

где  $e$  – ошибка регулирования;  $T$  – желаемая постоянная времени по ошибке регулирования.

Учитывая, что  $e = T_{\text{ВН.Ж}} - T_{\text{ВН}}$  и  $\dot{e} = \dot{T}_{\text{ВН.Ж}} - \dot{T}_{\text{ВН}}$ , из системы уравнений (10) получим

$$\begin{cases} \dot{T}_{\text{ВН}} = g(\cdot)I + q(\cdot), \\ \mu \dot{I} = k_0(T^{-1}e + \dot{T}_{\text{ВН.Ж}} - \dot{T}_{\text{ВН}}). \end{cases} \quad (11)$$

Подстановка правой части первого уравнения системы (11) на место второго  $\dot{T}_{\text{ВН}}$  во втором уравнении этой системы даст следующее уравнение:

$$\mu \dot{I} = k_0(T^{-1}e + \dot{T}_{\text{ВН.Ж}} - g(\cdot)I + q(\cdot)). \quad (12)$$

При этом предполагается, что  $\dot{T}_{\text{ВН.Ж}}$  ограничена некоторой величиной.

Введем быстрое время  $t_f = t / \mu$ . В таком случае уравнение (12) для быстрого времени можно записать в виде

$$\frac{dI}{dt_f} = k_0(T^{-1}e + \dot{T}_{\text{ВН.Ж}} - g(\cdot)I - q(\cdot)). \quad (13)$$

Функция  $q(\cdot)$  зависит от переменных  $T_{\text{ВН}}$ ,  $T_{\text{ВН.Ж}}$ ,  $T_{0,с}$ ,  $P_{\text{н}}$ , которые в быстром времени рассматриваются как постоянные величины. Таким образом, в быстром времени  $q(\cdot)$  тоже является постоянной величиной. При этом  $\dot{T}_{\text{ВН.Ж}}$  и  $e$  на интервале переходных процессов подсистемы быстрых движений рассматриваются как постоянные величины.

Запишем (13) в виде

$$\frac{dI}{dt_f} = -k_0 g(\cdot) I + \rho,$$

где

$$\rho = k_0 \left( T^{-1} (T_{\text{вн.ж}} - T_{\text{вн}}) + \dot{T}_{\text{вн.ж}} - q(\cdot) \right).$$

Поскольку  $\rho$  содержит только постоянные члены в быстром времени, то также рассматривается постоянной величиной в быстром времени.

Так как  $g(\cdot)$  в допустимом диапазоне токов  $I$  является знакопостоянной (рис. 3), то при номинальной температуре  $T_{\text{вн}}$  можно выбрать  $g_{\text{ном}}$  и рассчитать коэффициент  $k_0$ , как описано в разделе 3.1.

Запишем второе уравнение системы (10) в операторной форме:

$$\mu p I = k_0 (T^{-1} e + p e),$$

из которого выразим ток  $I$ :

$$I = k_0 \left( \frac{1}{\mu T p} + \frac{1}{\mu} \right) e. \quad (14)$$

Уравнение (14) описывает ПИ-регулятор, коэффициенты которого имеют вид (9).

Структурная схема ПИ-регулятора, описываемая уравнением (14), изображена на рис. 5.

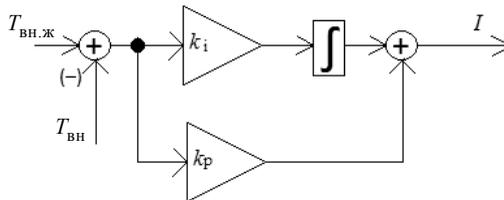


Рис. 5. Структурная схема следящего ПИ-регулятора

В силу инерционности элемента Пельтье при подаче желаемого скачкообразного температурного профиля на вход следящего регулятора возникает

нехватка ресурса управления, из-за чего переходные процессы не будут соответствовать требованиям. Для решения этой задачи необходимо скачкообразный температурный профиль подавать на вход регулятора через апериодическое звено (рис. 6), постоянная времени которого равна желаемой постоянной времени  $T$ .

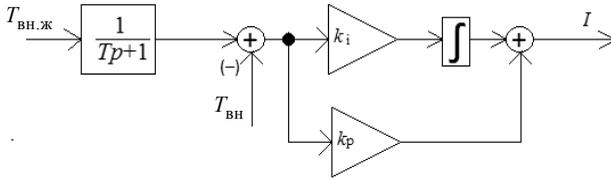


Рис. 6. Структурная схема следящего ПИ-регулятора с апериодическим звеном на входе

### 3.3. РАСЧЕТ КОМПЕНСАТОРА ИНЕРЦИОННОСТИ

Полагая, что температурный датчик является апериодическим звеном, передаточная функция датчика имеет вид

$$W_{\text{сен}}(p) = \frac{1}{T_{\text{сен}}p + 1}.$$

Для компенсации инерционности апериодического звена нужно применить форсирующее звено, но поскольку идеальное форсирующее звено нереализуемо и в реальных системах имеются шумы, знаменатель передаточной функции компенсатора инерционности содержит фильтрующий полином  $A_f$  на порядок выше полинома числителя компенсирующего звена. Для расчета постоянной времени  $T_f$  фильтрующего полинома нужно применить метод разделения движений. Причем постоянная времени  $T_f$  должна быть больше максимальной постоянной времени шумов в 10 и более раз. Таким образом, передаточная функция компенсатора инерционности рассчитывается по формулам:

$$W_{CI}(p) = \frac{W_{\text{сен}}^{-1}(p)}{A_f(p)}, \quad W_{CI}(p) = \frac{T_{\text{сен}}p + 1}{T_f^2 p^2 + 2T_f p + 1}.$$

Постоянная времени  $T_f$  рассчитывается по формуле

$$T_f = \min(T_d, T_{\text{сен}}) / 10 .$$

При численном моделировании выберем постоянную времени  $T_{\text{сен}} = 2$  с и  $T_f = 0,2$  с. Выполним численное моделирование с инерционным датчиком при желаемой постоянной времени  $T_d = 4$  с и  $T_d = 10$  с. Коэффициенты регулятора при постоянной времени  $T_d = 4$  с равны  $k_p = 1,4$ ,  $k_I = 0,35$ , а при  $T_d = 10$  с равны  $k_p = 0,56$ ,  $k_I = 0,056$ . Структурная схема системы с компенсатором инерционности показана на рис. 7.



Рис. 7. Функциональная схема системы регулирования температуры с компенсатором инерционности

#### 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

График изменения температуры окружающей среды.

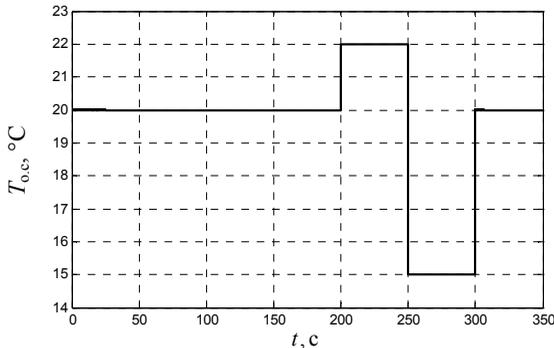


Рис. 8. График изменения температуры окружающей среды

#### 4.1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМ РЕГУЛЯТОРОМ БЕЗ УЧЕТА ИНЕРЦИОННОСТИ ДАТЧИКА

Переходные процессы соответствуют требованиям (рис. 9, 12). Сигнал по току (рис. 11, 14) не имеет пульсаций в установившемся режиме и не достигает ограничения, т. е. модуль тока не превышает 15,1 А. При непрерывном желаемом температурном профиле имеется заметная скоростная ошибка (рис. 12).

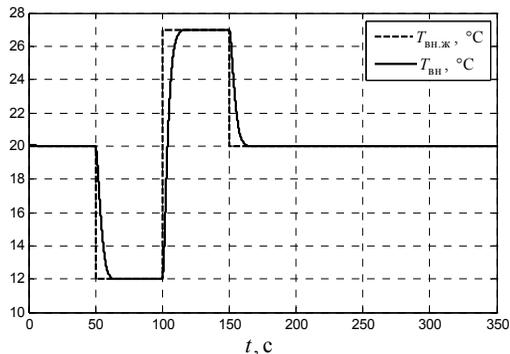


Рис. 9. Переходные процессы по температуре при желаемом скачкообразном температурном профиле со стабилизирующим регулятором без учета инерционности датчика

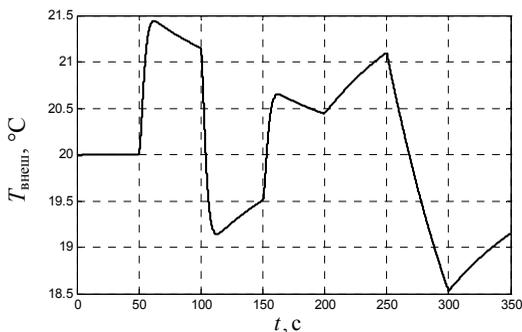


Рис. 10. График температуры внешней стороны элемента Пельтье при желаемом скачкообразном температурном профиле со стабилизирующим регулятором без учета инерционности датчика

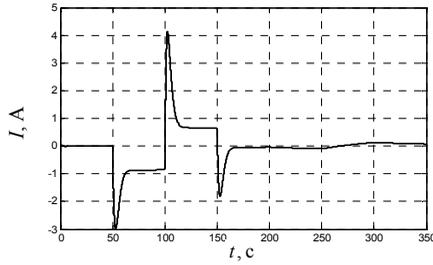


Рис. 11. Переходные процессы по току при желаемом скачкообразном температурном профиле со стабилизирующим регулятором без учета инерционности датчика

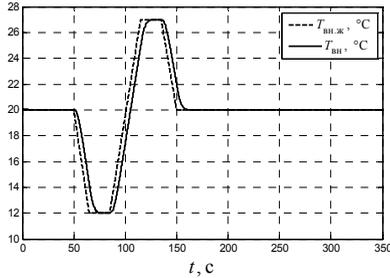


Рис. 12. Переходные процессы по температуре при желаемом непрерывном температурном профиле со стабилизирующим регулятором без учета инерционности датчика

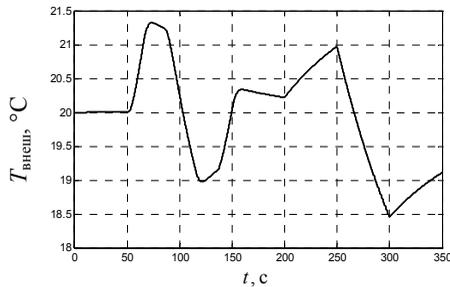


Рис. 13. График температуры внешней стороны элемента Пельтье при желаемом непрерывном температурном профиле со стабилизирующим регулятором без учета инерционности датчика

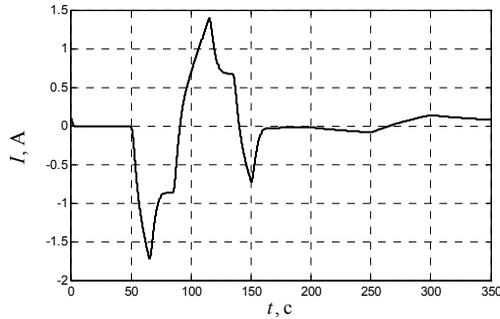


Рис. 14. Переходные процессы по току при желаемом непрерывном температурном профиле со стабилизирующим регулятором без учета инерционности датчика

#### 4.2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СО СЛЕДЯЩИМ РЕГУЛЯТОРОМ БЕЗ УЧЕТА ИНЕРЦИОННОСТИ ДАТЧИКА

Переходные процессы по температуре (рис. 15) для скачкообразного профиля не соответствуют требованиям, и сигнал по току (рис. 17) достигает ограничения. Для непрерывного температурного профиля переходные процессы по температуре (рис. 18) соответствуют требованиям, и скоростная ошибка значительно меньше, чем для стабилизирующего регулятора. Сигнал по току при непрерывном температурном профиле не достигает ограничения (рис. 20).

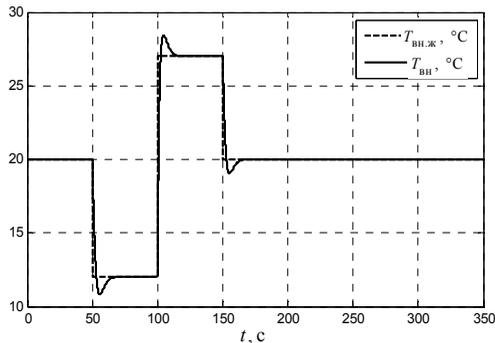


Рис. 15. Переходные процессы по температуре при желаемом скачкообразном температурном профиле со следящим регулятором без учета инерционности датчика

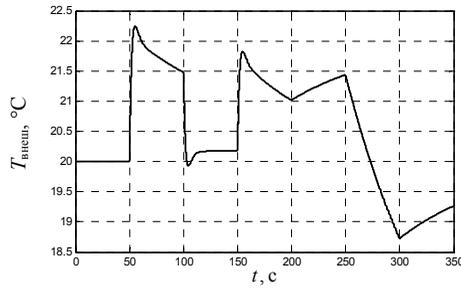


Рис. 16. График температуры внешней стороны элемента Пельтье при желаемом скачкообразном температурном профиле со следящим регулятором без учета инерционности датчика

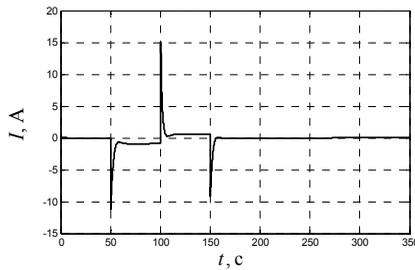


Рис. 17. Переходные процессы по току при желаемом скачкообразном температурном профиле со следящим регулятором без учета инерционности датчика

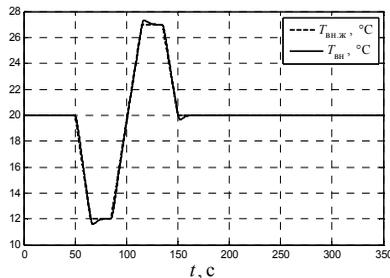


Рис. 18. Переходные процессы по температуре при желаемом непрерывном температурном профиле со следящим регулятором без учета инерционности датчика

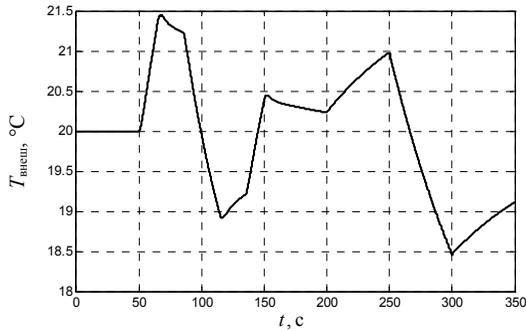


Рис. 19. График температуры внешней стороны элемента Пельтье при желаемом непрерывном температурном профиле со следящим регулятором без учета инерционности датчика

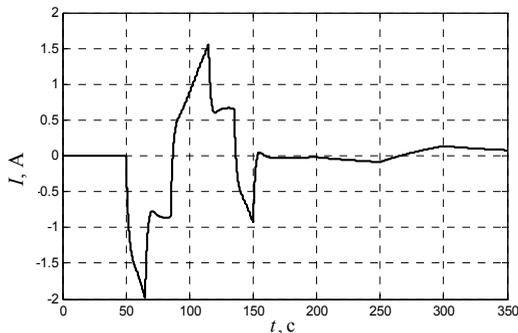


Рис. 20. Переходные процессы по току при желаемом непрерывном температурном профиле со следящим регулятором без учета инерционности датчика

#### 4.3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМ РЕГУЛЯТОРОМ И ИНЕРЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ БЕЗ КОМПЕНСАТОРА ИНЕРЦИОННОСТИ ДАТЧИКА С $T_d = 10$ с

Переходные процессы моделирования по температуре (рис. 21) соответствуют требованиям. В переходных процессах по току (рис. 23) имеется несколько колебаний, но если желаемая постоянная времени в 10 раз превысит постоянную времени датчика температуры, этих колебаний не будет.

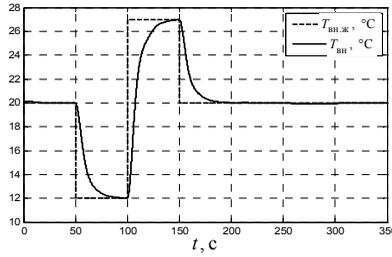


Рис. 21. Переходные процессы по температуре при скачкообразном температурном профиле со стабилизирующим регулятором и инерционным датчиком без компенсатора инерционности датчика с  $T_d = 10$  с

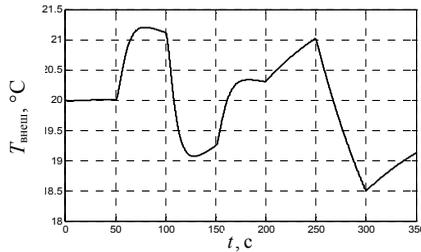


Рис. 22. График температуры внешней стороны элемента Пельтье при желаемом скачкообразном температурном профиле со стабилизирующим регулятором и инерционным датчиком без компенсатора инерционности датчика с  $T_d = 10$  с

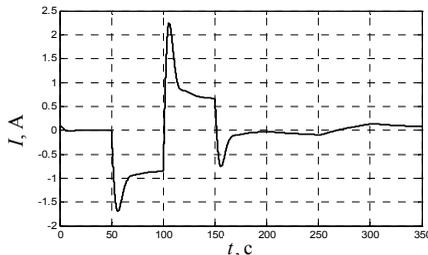


Рис. 23. Переходные процессы по току при скачкообразном температурном профиле со стабилизирующим регулятором и инерционным датчиком без компенсатора инерционности датчика с  $T_d = 10$  с

#### 4.4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМ РЕГУЛЯТОРОМ И ИНЕРЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ БЕЗ КОМПЕНСАТОРА ИНЕРЦИОННОСТИ ДАТЧИКА С $T_d = 4$ с

Переходные процессы моделирования по температуре (рис. 24) представляют собой затухающие колебания. Переходные процессы по току (рис. 26) имеют колебательный характер.

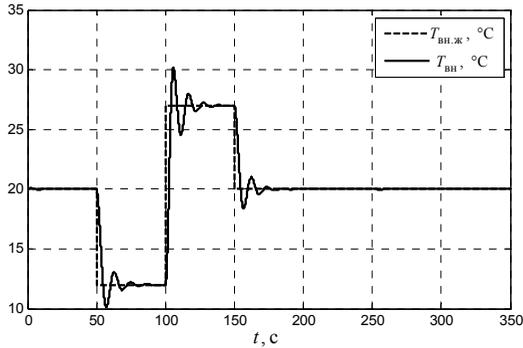


Рис. 24. Переходные процессы по температуре при формировании скачкообразного температурного профиля со стабилизирующим регулятором и инерционным датчиком без компенсатора инерционности датчика с  $T_d = 4$  с

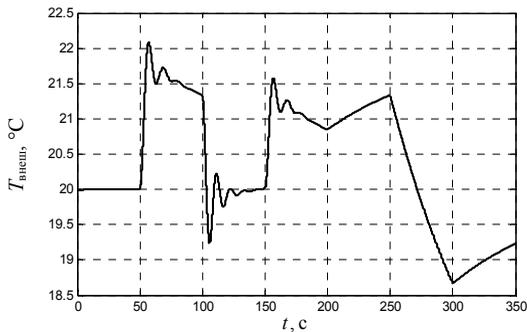


Рис. 25. График температуры внешней стороны элемента Пельтье при формировании скачкообразного температурного профиля со стабилизирующим регулятором и инерционным датчиком без компенсатора инерционности датчика с  $T_d = 4$  с

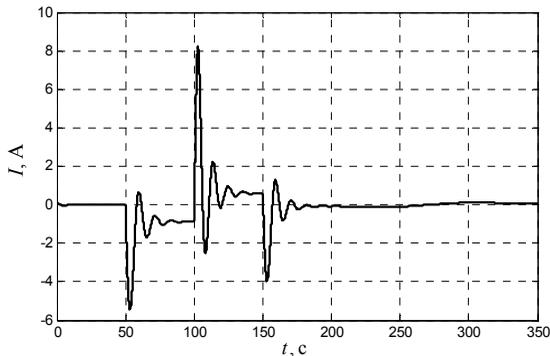


Рис. 26. Переходные процессы по току при формировании скачкообразного температурного профиля со стабилизирующим регулятором и инерционным датчиком без компенсатора инерционности датчика с  $T_d = 4$  с

#### 4.5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СО СТАБИЛИРУЮЩИМ РЕГУЛЯТОРОМ И ИНЕРЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ С КОМПЕНСАТОРОМ ИНЕРЦИОННОСТИ ДАТЧИКА С И $T_d = 4$ с

Переходные процессы моделирования по температуре (рис. 26) соответствуют требованиям. Сигнал по току (рис. 28) не достигает ограничений.

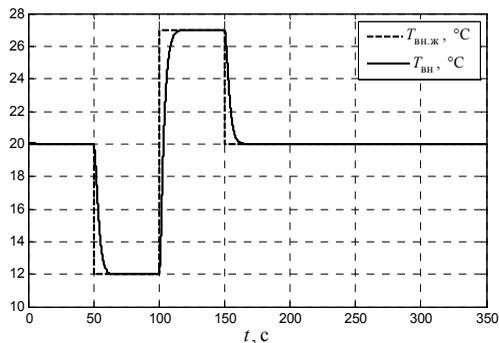


Рис. 27. Переходные процессы по температуре при формировании скачкообразного температурного профиля со стабилизирующим регулятором и инерционным датчиком с компенсатором инерционности датчика с  $T_d = 4$  с

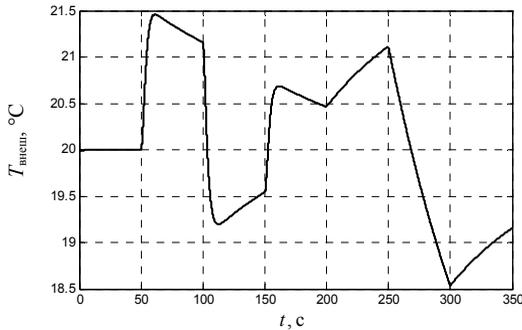


Рис. 28. График температуры внешней стороны элемента Пельтье при формировании скачкообразного температурного профиля со стабилизирующим регулятором и инерционным датчиком с компенсатором инерционности датчика с  $T_d = 4$  с

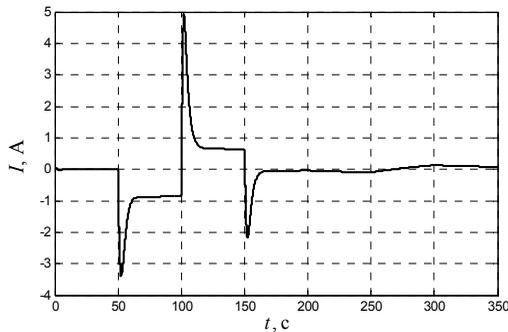


Рис. 29. Переходные процессы по току при формировании скачкообразного температурного профиля со стабилизирующим регулятором и инерционным датчиком с компенсатором инерционности датчика с  $T_d = 4$  с

## 5. ВЫВОД ПО ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

По результатам численного моделирования видно, что метод разделения движений может быть использован для расчета регулятора температуры для термостата или формирователя температурного профиля на основе элемента Пельтье. При формировании непрерывного температурного профиля лучше

использовать следящий регулятор с целью снижения скоростной ошибки, как видно на рис. 12 и 16. При формировании скачкообразного профиля нужно использовать стабилизирующий регулятор или следящий регулятор с аperiодическим звеном на входе регулятора, как видно из рис. 9 и 15. Если желаемая постоянная времени переходного процесса по температуре в 5 и более раз превышает постоянную времени датчика, то можно пренебрегать инерционностью датчика, что следует из рис. 21 и 23. Если постоянная времени датчика соизмерима с желаемой постоянной времени переходного процесса, то нужно вводить компенсатор инерционности (см. рис. 24–29).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы стабилизирующий и следящий регулятор температуры для управляемого термостата на основе элемента Пельтье методом разделения движений. Следящий регулятор обеспечивает очень малую скоростную ошибку, что следует из результатов численного моделирования. В случае малого отличия постоянной времени переходного процесса от постоянной времени датчика нужно использовать компенсирующее звено. Предложенная методика расчета компенсатора инерционности датчика может быть использована для синтеза регулятора температуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гринкевич В.А.* Исследование математической модели термостата на основе элемента Пельтье // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 3 (89). – С. 62–77. – DOI: 10.717212/2307-6879-2017-62-77.
2. Полупроводниковый термостат для лабораторных исследований «ТС-20» / И.П. Егорова, Ю.И. Иванов, С.Н. Колесников, Г.И. Сидоров // Известия ТРТУ. – 2002. – № 6 (29). – С. 121–123.
3. *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.
4. *Магомедов Д.А., Хазамова Л.А., Миснахов И.Ш.* Малогабаритный термостат для перевозки биоматериалов // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. – СПб., 2015. – С. 458–460.
5. *Тарукин Е.М.* Авторефрижераторы // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 6 (13). – С. 68–82.

6. Юркевич В.Д. Многоканальные системы управления. Синтез линейных систем управления с разнотемповыми процессами: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 183 с.

7. 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.

8. Сероклинов Г.В. Задачи автоматизации экспериментальных исследований сложных биофизических объектов // Методы и технические средства исследований физических процессов в сельском хозяйстве: сборник научных трудов СибФТИ / Сибирское отделение РАСХН, Сибирский физико-технический институт аграрных проблем. – Новосибирск, 2001. – С. 46–53.

9. Филишов В.Ю. Нелинейный объект: линеаризация обратными связями // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 2 (92). – С. 36–80. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-2-36-80.

**Гринкевич Владимир Анатольевич**, младший научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий Российской академии наук, магистрант кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-1-7-31

## Temperature controller design for Peltier element\*

V.A. Grinkevich

*Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies, PO Box 468, Krasnoobsk, Novosibirsk district, Novosibirsk region, 630501, Russian Federation, Researcher. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru*

Controlled thermostats and thermal profiler are applied in different applications such as scientific researches, control of chemical reaction speed, thermal stabilization of CCD-matrix, laser wave-length stabilization, food and drugs storage. There are thermostats of different size, power, structure, and thermal profilers. Peltier element advantages are small weight, size and simple construction. However, Peltier element is characterized by low energy conversion efficiency, low power in comparison with compressor refrigerant circuit and small temperature band in comparison with resistive heater. Peltier element can provide working area tempera-

---

\* Received 24 December 2018.

ture of thermostat above ambient temperature or below ambient temperature. Usually, Peltier element is applied in low power devices, where size and weight are limited. There are examples of Peltier element applications at design of automobile refrigerators, thermostats for bio-materials transportation in small amount and for research of biophysical objects. Devices, which based on Peltier element, can be applied for thermal massage of human skin or thermal impact on various plants. For temperature stabilization and provision high accuracy is required to use temperature controller for thermostat based on Peltier element. Controlling factor for Peltier element is current. Current value have an influence on inside thermostat temperature. In this article the temperature controller design procedure is discussed. The reference input signal of thermal profile may have step form or trapezium form. Temperature controller is designed by time-scale separation method. Computer simulation results for temperature control system are shown. This temperature control system for Peltier element may be used in thermal impact driver on biophysical objects.

**Keywords:** Thermostat, thermal profiling, thermal profiler, Peltier element, temperature controller, time-scale separation method, non-linear system, mathematical model, numeric simulation

## REFERENCES

1. Grinkevich V.A. Issledovanie matematicheskoi modeli termostata na osnove elementa Pel't'e [Research on mathematical model of thermostat based on Peltier element]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 3 (89), pp. 62–77. DOI: 10.717212/2307-6879-2017-62-77.
2. Egorova I.P., Ivanov Yu.I., Kolesnikov S.N., Sidorov G.I. Poluprovodnikovyi termostat dlya laboratornykh issledovaniy "TC-20" [Semiconductor thermostat for laboratory researches "TC-20"]. *Izvestiya TRTU – Izvestiya TSURE*, 2002, no. 6 (29), pp. 121–123.
3. Seroklinov G.V., Gun'ko A.V. [Information technology for research biological potential changing by temperature affect] *Trudy XII mezhdunarodnoi konferentsii "Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya", APEP-2014: v 7 t.* [[12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2014: Proceedings: in 7 vol.], Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2014, vol. 7, pp. 72–75. (In Russian).
4. Magomedov D.A., Khazamov L.A., Mispakhov I.Sh. Malogabaritnyi termostat dlya perevozki biomaterialov [Small-size thermostat for transportation of biological materials]. *Nizkotemperaturnye i pishchevye tekhnologii v XXI veke* [Low-temperature and food technologies in XXI century]. St. Petersburg, 2015, pp. 458–460.
5. Tarukin E.M. Avtorefrizheratory [Autorefrigerators]. *Vestnik NGIEI – Bulletin NGIEI*, 2012, no. 6 (13), pp. 68–82.

6. Yurkevich V.D. *Mnogokanal'nye sistemy upravleniya. Sintez lineinykh sistem upravleniya s raznotempovymi protsessami* [Multi-input-multi-output control systems. Design of linear control systems with multi-time scale motions]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 183 p.

7. 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.

8. 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] Novosibirsk, 2001, pp. 46–53.

9. Filiushov V.Yu. Nelineinyi ob"ekt: linearizatsiya obratnymi svyazyami [Examples of structural transformation of nonlinear object]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 2 (92), pp. 36–80. DOI: 10.17212/2307-68792018-2-36-80.

Для цитирования:

Гринкевич В.А. Синтез регулятора температуры для элемента Пельтье // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 1 (94). – С. 7–31. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-1-7-31.

For citation:

Grinkevich V.A. Sintez regulatora temperatury dlya elementa Pel'te [Temperature controller design for Peltier element]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (94), pp. 7–31. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-1-7-31.