

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 536.5: 62-97: 519.7

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-55-74

Синтез регулятора температуры для термостолика на основе элемента Пельтье*

В.А. ГРИНКЕВИЧ

630501, РФ, Новосибирская область, Новосибирский район, Краснообск, а/я 468,
Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН

grinkevich-vova@mail.ru

Управляемые термостаты и термостолики применяются в различных приложениях: научные исследования, управление скоростью химических реакций, термостабилизация ПЗС-матриц в цифровых фотоаппаратах, стабилизация длины волны лазера, хранение продуктов питания, лекарств. Существуют термостаты и термостолики разных размеров, мощностей и конструкций. Преимуществом элемента Пельтье являются 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 на рабочей поверхности термостолика выше или ниже температуры окружающей среды. 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 термостолика на основе элемента Пельтье. Управляющим воздействием для элемента Пельтье является ток, величина которого влияет на температуру рабочей поверхности элемента Пельтье. В настоящей статье рассматривается применение эмпирической идентификации термостолика на основе элемента Пельтье, обсуждается синтез регулятора температуры с применением метода разделения движений и эмпирической подстройки для управляемого термостолика на основе элемента Пельтье, приведены графики воспроизведения температурного профиля. Предлагаемая система управления температурой для устройств на основе элемента Пельтье может быть использована в формирователях температурных воздействий на биофизические объекты.

Ключевые слова: термостолик, температурный профиль, эмпирическая идентификация, элемент Пельтье, регулятор температуры, метод разделения движений, нелинейная система, математическая модель

ВВЕДЕНИЕ

Элементы Пельтье [1] применяются для конструирования термостатов малой мощности [2], формирователей температурных воздействий на растения [3, 4], термостатирования лазеров, ПЗС-матриц и биоматериалов [5].

* Статья получена 05 ноября 2019 г.

Также элементы Пельтье применяются в формирователях температурного профиля [6], массажерах кожи человека, водяных кулерах, управляемых термостолках [7] и термоэлектрических холодильниках [8]. Температурным профилем называется закон изменения температуры от времени.

В настоящей статье в качестве объекта управления рассматривается управляемый термостолк на основе элемента Пельтье. С целью обеспечения требуемой точности и других технических требований необходимо применить регулятор температуры.

Особенностью элемента Пельтье является его нелинейная статическая характеристика, нестационарность параметров и отсутствие полной информации. В силу этого в данной работе применен метод разделения движений [9, 10].

В статье обсуждается получение структуры математической модели и эмпирическая оценка параметров выведенной модели; показано отличие математической модели реального устройства на основе элемента Пельтье от математической модели, выведенной в работе [1]; рассматриваются основные этапы расчета ПИД-регулятора для термостолка на основе элемента Пельтье, а также качество воспроизведения температурного профиля с применением ПИД-регулятора, полученного в данной статье, и ПИ-регулятора, предложенного в работе [11].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей работе в качестве объекта управления рассматривается термостолк (рис. 1). Управляемой величиной является температура рабочей поверхности термостолка, а управляющим фактором – протекаемый через элемент Пельтье ток. Термостолк должен поддерживать стабильную температуру, формировать температурную кривую T_d , показанную на рис. 4. Схема термостолка показана на рис. 1.

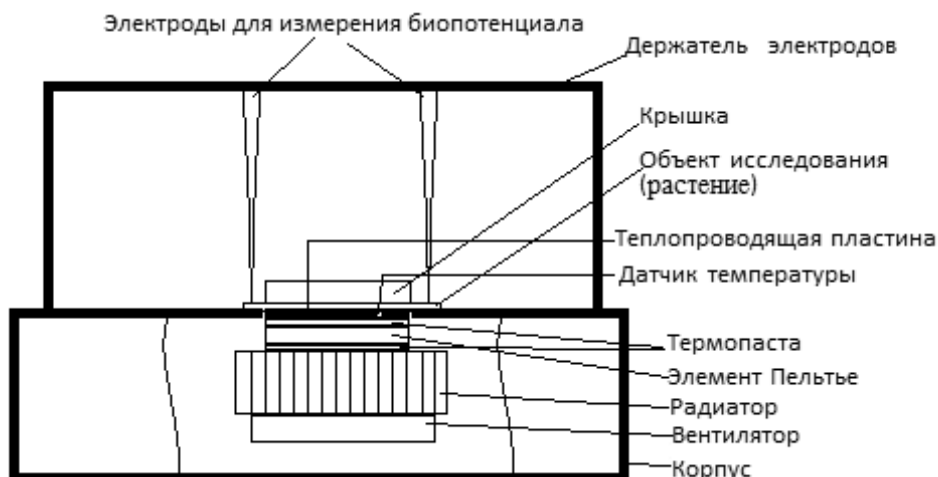


Рис. 1. Схема термостолка

Fig. 1. The diagram of the temperature stage

Сторона элемента Пельтье воздействующая на объект исследования названа рабочей стороной, противоположная ей сторона – радиаторной. Рабочая сторона элемента Пельтье, теплопроводящая пластина, датчик температуры, объект исследования составляют рабочий объем термостолка. Внешняя сторона элемента Пельтье и радиатор составляют радиаторный объем термостолка. Функциональная схема системы управления приведена на рис. 2.

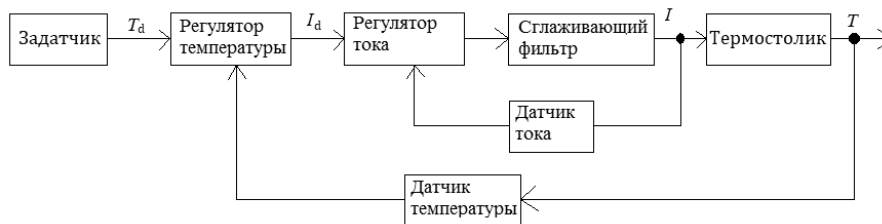


Рис. 2. Функциональная схема системы регулирования температуры

Fig. 2. The block diagram of the temperature control system

Задатчик состоит из формирователя ломаной линии и сглаживающего звена (рис. 3). Из-за инерционности тепловых процессов невозможно реализовать температурный профиль вида ломаных линий (T_b), показанный на рис. 4. В связи с этим в задатчике имеется сглаживающее звено для преобразования ломаной линии (T_b) в гладкую (T_d), показанную на рис. 4. Сглаживающее звено представляет собой апериодическое звено второго порядка с постоянной времени, равной 4 с.

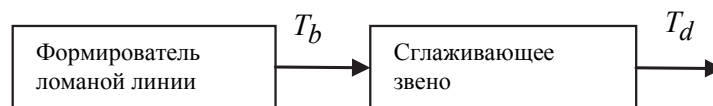


Рис. 3. Структурная схема задатчика

Fig. 3. The block diagram of the setpoint generator

Целью работы является расчет регулятора температуры для управляемого термостолка на основе элемента Пельтье и анализ переходных процессов при регулировании температуры. Техническими требованиями является обеспечение динамической ошибки при формировании сглаженного температурного профиля в области квазилинейного изменения температуры (рис. 4) не более 10 %, в области перехода (рис. 4) не более 20 %, погрешность стабилизации температуры 0,1 °С и максимально возможная скорость изменения температуры в области, где T_b меняется скачкообразно (рис. 4).

Для эффективного регулирования температуры рассматривается двухконтурная система управления, где процессы в контуре управления током протекают значительно быстрее, чем в контуре регулирования температурой. Поэтому инерционностью контура управления током пренебрегаем при синтезе регулятора температуры, считая, что $I_d = I$. Полагая, что переходные процессы в датчике температуры протекают значительно быстрее, чем на ра-

бочей поверхности термостолка, инерционностью датчика температуры пренебрегаем.

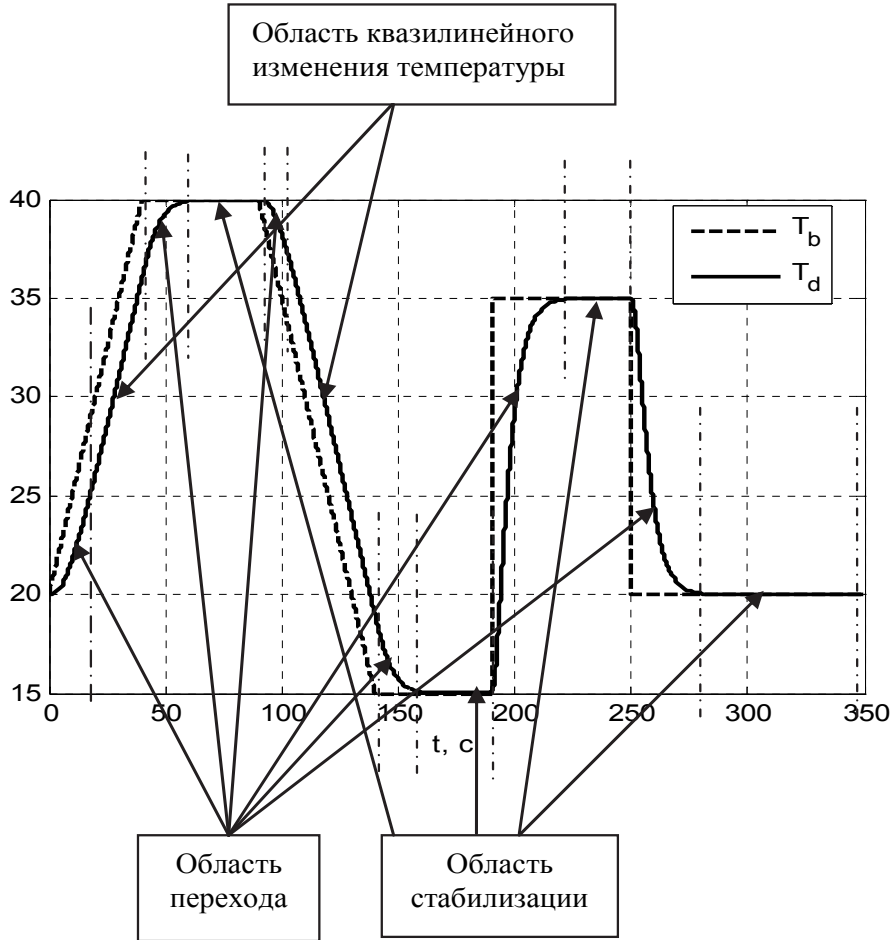


Рис. 4. Вид заданного температурного профиля (T_d), температурного профиля вида ломаных линий (T_b)

Fig. 4. The view of the desired temperature profile (T_d), the broken line temperature profile (T_b)

Регуляторы тока и температуры реализованы программно на микроконтроллере STM32F100RBT6. Для получения дискретной математической модели регулятора температуры применен метод конечных разностей.

Для синтеза регулятора необходимо получить математическую модель объекта управления. В работе [1] была получена математическая модель управляемого термостата на основе элемента Пельтье, однако в ней не рассматривались динамика распространения тепла по рабочему объему и конструктивные особенности. Также в работе [1] рассматривалось численное моделирование. В настоящей работе требуется рассмотреть график изменения температуры физически реализованного термостолка при различных заданных токах, сравнить его с результатами, полученными в работе [1], при необходимости идентифицировать математическую модель термостолка.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ТЕРМОСТОЛИКА

В статье [1] было сказано, что математическая модель управляемого термостата на основе элемента Пельтье является нелинейной с нестационарными параметрами и отсутствием полной информации о параметрах.

Для оценки математической модели термостоллика на основе элемента Пельтье рассмотрим переходные процессы при разных токах (рис. 5, в) и сравним переходные процессы с результатами численного моделирования в работе [1].

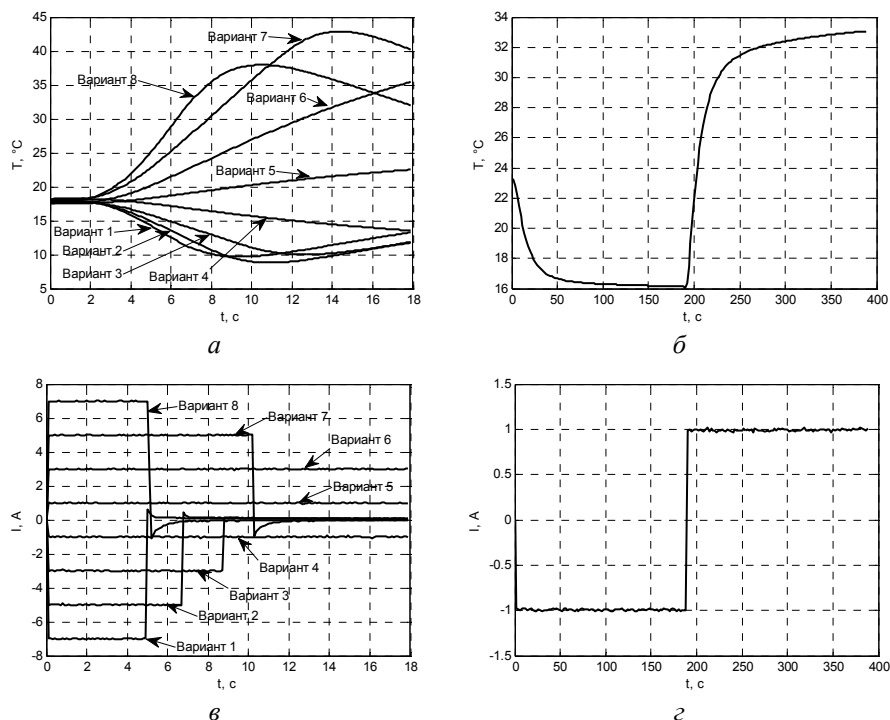


Рис. 5. Переходные процессы при заданном токе:

a – графики изменения температуры при соответствующих вариантах задания тока на рис. 5, в; *б* – график изменения температуры при заданном токе на рис. 5, г; *в* – варианты заданных токов для исследования нелинейности объекта управления; *г* – график тока при исследовании переходного процесса по температуре

Fig. 5. Transient processes at the desired current:

a is the plots of the temperature change with the given set currents in Fig. 5, в; *б* is the plot of the temperature change with the set current in Fig. 5, г; *в* is the given set currents for studying the non-linearity of the control object output response; *г* is the plot of the current in studying the temperature transient process

Как видно из рис. 5, термостоллик является нелинейным объектом управления, имеет порядок выше первого и запаздывание. Также переходные процессы на рис. 5 имеют отличия от численного моделирования, рассмотренного в работе [1]. Следовательно, для более точной оценки математической модели термостоллика [7] с учетом конструктивных особенностей и динамики распространения тепла [12] по рабочему объему требуется идентификация [13] термостоллика. Однако идентификация нелинейных

объектов на данный момент является затруднительной. Для эффективной идентификации математической модели термостоллика на основе элемента Пельтье желательнее измерять не только температуру рабочего объема, но и оценивать температурное поле [14] рабочего и радиаторного объема термостоллика, что усложняет техническую реализацию процедуры идентификации.

Поэтому в настоящей работе рассматривается эмпирическая идентификация математической модели термостоллика с применением программного обеспечения Matlab:simulink. Эмпирическая идентификация представляет собой ручной подбор параметров математической модели, так чтобы график изменения температуры при численном моделировании имел как можно меньше отличий от графика, полученного при измерении температуры термостоллика (рис 5). Эмпирическая идентификация не является оптимальной, однако для расчета регулятора методом разделения движений допускается неполная информация о параметрах математической модели объекта управления.

В настоящей работе идентификация термостоллика состоит из двух частей: получение структуры математической модели термостоллика и оценка ее параметров. Сравнивая графики на рис. 5 и в работе [1], будем полагать, что температура рабочей поверхности термостоллика связана с температурой поверхности элемента Пельтье следующим соотношением:

$$T_c \frac{dT}{dt} + T = T_{\text{раб.с}}(t - t_{\text{зап}}), \quad (1)$$

где T_c – постоянная времени распространения тепла по рабочему объему термостоллика; T – температура рабочей поверхности термостоллика в кельвинах; t – время; $T_{\text{раб.с}}$ – температура рабочей стороны элемента Пельтье в кельвинах; $t_{\text{зап}}$ – время запаздывания.

В статье [1] получена нелинейная математическая модель второго порядка для термостата на основе элемента Пельтье. В работе [11] рассматривалась возможность упрощения математической модели устройства на основе элемента Пельтье до первого порядка. С учетом распространения тепла по рабочему объему, при котором температура рабочей поверхности описывается выражением (1), упрощенная математическая модель термостоллика имеет второй порядок. Таким образом, представим модель термостоллика в виде

$$T_c \frac{dT}{dt} + T = T_{\text{раб.с}}(t - t_{\text{зап}}),$$

$$\frac{dT_{\text{раб.с}}}{dt} = \frac{(a_1 T + a_2 I)I + a_4(T_{\text{ос}} - T_{\text{раб.с}})}{a_3}, \quad (2)$$

где a_1 – параметр, учитывающий эффект Пельтье; a_2 – параметр, учитывающий электрическое сопротивление элемента Пельтье; a_3 – параметр, учи-

тывающий теплоемкость рабочего объема; a_4 – параметр, учитывающий теплообмен с окружающей средой; T_{oc} – температура окружающей среды в кельвинах. При эмпирической идентификации получены значения параметров: $a_1 = 0.07$ В/К, $a_2 = 0.8$ Ом, $a_3 = 30$ Дж/К, $a_4 = 3$ Вт/К, $t_{зап} = 1.5$ с, $T_c = 4$ с.

Полагая, что время запаздывания значительно меньше длительности переходного процесса инерционной части, при расчете регулятора пренебрежем запаздыванием и рассмотрим уравнение объекта управления в виде (3).

$$a_3 T_c \frac{d^2 T}{dt^2} + a_3 \frac{dT}{dt} = (a_2 I + a_1 T) I + a_4 (T_{oc} - T_{раб.с}). \quad (3)$$

Запишем (3) в виде

$$\ddot{T} + T_c^{-1} \dot{T} = a_3^{-1} T_c^{-1} (a_2 I + a_1 T) I + a_3^{-1} T_c^{-1} a_4 (T_{oc} - T_{раб.с}).$$

Объект управления, описываемый системой уравнений (2), можно представить структурной схемой (рис. 6), которая представляет собой последовательное соединение нелинейного элемента и линейной части. Линейная часть состоит из линейной инерционной части и звена запаздывания.

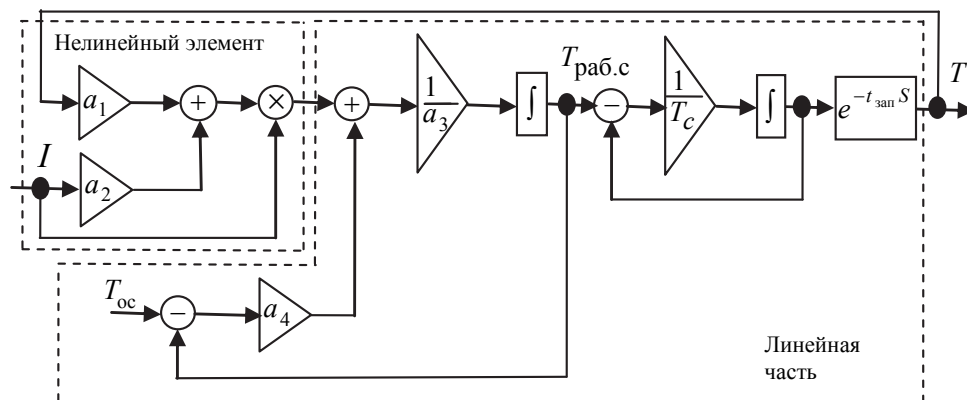


Рис. 6. Структурная схема математической модели термостолика

Fig. 6. The block diagram of the mathematical model of the temperature stage

Процедура определения параметров термостолика:

- 1) в память ЭВМ записана переходная характеристика термостолика при различных токах (рис. 5);
- 2) в программе Matlab:simulink реализован объект, описываемый формулой (3);
- 3) эмпирическим подбором параметров модели (3) добивались меньшего различия между переходной характеристикой термостолика и объекта, описываемого формулой (3).

3. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ

В статье [11] рассмотрено применение метода разделения движений для синтеза регулятора температуры, однако в ней рассматривалось численное моделирование без учета динамики распространения тепла по рабочему объему. В интернет-ресурсе [15] предлагалась эмпирическая настройка коэффициентов регулятора.

В настоящей работе рассматривается применение метода разделения движений для физически реализованного термостолка с учетом динамического распределения тепла по рабочему объему и сравнение результатов с методикой расчета регулятора в статье [11].

3.1. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

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

$$\begin{cases} \ddot{T} + T_c^{-1}\dot{T} = a_3^{-1}T_c^{-1}(a_2I + a_1T)I + a_3^{-1}T_c^{-1}a_4(T_{oc} - T_{раб.с}), \\ \mu^2\ddot{I} + 2d_1\mu\dot{I} = k_0(M_d^{-2}(T_d - T) + a_dM_d^{-1}(\dot{T}_d - \dot{T}) + (\ddot{T}_d - \ddot{T})), \end{cases} \quad (4)$$

где μ – малый параметр; $d_1 = 2$; k_0 – общий множитель коэффициентов регулятора; M_d – желаемая постоянная времени переходного процесса по температуре; T_d – желаемая температура рабочей поверхности термостолка, $a_d = 2$.

Запишем первое уравнение системы (4) в виде

$$\ddot{T} = -T_c^{-1}\dot{T} + a_3^{-1}T_c^{-1}(a_2I + a_1T)I + a_3^{-1}T_c^{-1}a_4(T_{oc} - T_{раб.с}). \quad (5)$$

Подставляя правую часть выражения (5) на место \ddot{T} во втором уравнении системы (4), получаем выражение

$$\mu^2\ddot{I} + 2d_1\mu\dot{I} = \Psi - k_0a_3^{-1}T_c^{-1}(a_2I + a_1T)I, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \Psi = & k_0(M_d^{-2}(T_d - T) + a_dM_d^{-1}(\dot{T}_d - \dot{T})) + \\ & + k_0\ddot{T}_d + k_0T_c^{-1}\dot{T} - a_3^{-1}T_c^{-1}a_4k_0(T_{oc} - T_{раб.с}). \end{aligned}$$

Уменьшение параметра μ приводит к формированию быстрых процессов по току I и медленных процессов по температуре T , при этом $\mu > 0$. Введем быстрое время $t_f = t / \mu$. В таком случае уравнение (6) для быстрого времени можно записать в виде

$$\frac{d^2I}{dt_f^2} + 2d_1\frac{dI}{dt_f} = \Psi - k_0a_3^{-1}T_c^{-1}(a_2I + a_1T)I,$$

где Ψ , T на интервале быстрого времени рассматриваются как постоянные величины. Для устойчивости подсистемы быстрых движений необходимо выполнение условия $k_0 a_3^{-1} T_c^{-1} (a_2 I + a_1 T) > 0$, например $k_0 a_3^{-1} T_c^{-1} (a_2 I + a_1 T) = 1$.

Выполним преобразование Лапласа для второго уравнения системы (4)

$$\mu^2 s^2 I + 2d_1 \mu s I = k_0 \left(M_d^{-2} \left((T_d - T) + a_d M_d^{-1} s (T_d - T) \right) + s^2 (T_d - T) \right). \quad (7)$$

Выражение (7) можно представить в виде (8)

$$I = k_0 \left(k_p + \frac{k_I}{s} + \frac{k_d s}{\tau s + 1} \right) (T_d - T). \quad (8)$$

Полученное уравнение соответствует структуре ПИД-регулятора, для которого коэффициенты рассчитываются по формулам (9)

$$k_p = \frac{a_d d_1 M_d - \mu}{\mu d_1^2 M_d^2}, \quad k_I = \frac{1}{\mu d_1 M_d^2}, \quad k_d = \frac{\mu^2 + d_1^2 M_d^2 - a_d d_1 \mu M_d}{\mu d_1^3 M_d^2}, \quad \tau = \frac{\mu}{d_1}. \quad (9)$$

Структурная схема регулятора, описываемого формулой (8), изображена на рис. 7. Параметр μ рассчитывается по формуле

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

Выберем желаемую постоянную времени $M_d = 4$ с, для которой $\mu = 0.4$ с, $k_p = 0.61$, $k_I = 0.078$, $k_d = 1.13$, $\tau = 0.2$.

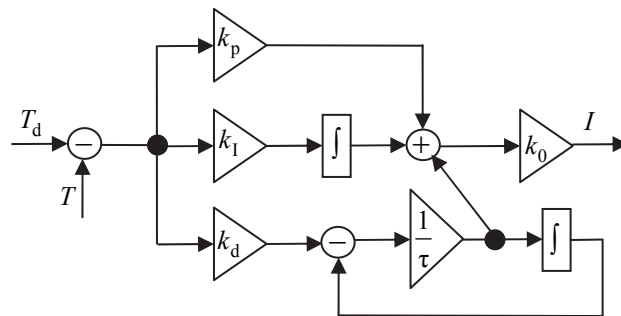


Рис. 7. Структурная схема ПИД-регулятора

Fig. 7. The block diagram of a PID-controller

Рассмотрим несколько вариантов выбора k_0 для ПИД-регулятора.

1. Выберем рабочую точку $I = -1$ А, $T = 16$ °С = 289,15 К из графика на рис. 5, б и з, для которой $k_0 = 5.3$. По результатам формирования температурного профиля, показанным на рис. 11, а и в, видно, что система является неустойчивой. Причинами неустойчивости являются пренебрежение запаздыванием и иные неучтенные факторы.

2. Известно, что уменьшением общего коэффициента [16] ПИД-регулятора можно ввести систему в область устойчивости. В связи с этим проверим работу системы с общим коэффициентом $k_0 = 0.56$. Как показывают результаты на рис. 11, б и з, система является устойчивой, однако имеется перерегулирование.

3. Исследуем возможность применения переменного коэффициента, который вычисляется по формуле

$$k_0 = \frac{a_3 T_c}{a_2 I + a_1 T}. \quad (10)$$

Как показывает график изменения температуры на рис. 12, а и в, система является неустойчивой.

4. Рассмотрим формирование температурного профиля при переменном общем коэффициенте, рассчитываемом по формуле

$$k_0 = \frac{0.2 a_3 T_c}{a_2 I + a_1 T}. \quad (11)$$

Как показывают результаты на рис. 12, б и з, система является устойчивой, воспроизведение температурного профиля в квазилинейной области и стабилизация соответствуют техническим требованиям, однако при сглаженном скачкообразном задании изменение температуры резко замедляется при достижении 85 % от разности между предыдущим и настоящим значением стабилизации температуры. В связи с этим не обеспечивается максимально возможная скорость изменения температуры.

5. Эмпирически модифицируем формулу расчета общего коэффициента, чтобы получить быстрое нарастание температуры до значения стабилизации. В результате получена следующая формула для расчета коэффициента k_0 :

$$k_0 = \frac{0.2 a_3 T_c}{1.56 a_2 I + a_1 T}. \quad (12)$$

3.2. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПИ-РЕГУЛЯТОРА

В статье [11] рассматривалась возможность применения ПИ-регулятора для устройств на основе элемента Пельтье. Структурная схема ПИ-регулятора представлена на рис. 8.

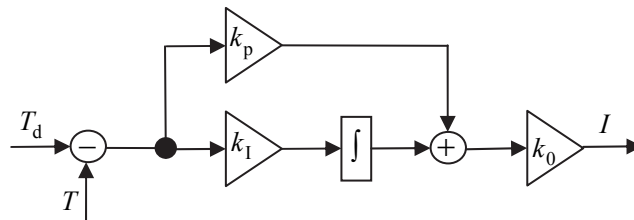


Рис. 8. Структурная схема ПИ-регулятора

Fig. 8. The block diagram of a PI-controller

Упрощенная математическая модель термостата на основе элемента Пельтье, выведенная в работе [11], имеет вид

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\alpha T + 0.5IR_{\text{ЭП}}}{C} I + q(\cdot),$$

где α – коэффициент Зеебека; $R_{\text{ЭП}}$ – сопротивление элемента Пельтье; C – теплоемкость рабочего объема термостоллика; q – функция, учитывающая теплообмен с окружающей средой и радиаторным объемом.

Коэффициенты ПИ-регулятора, схема которого изображена на рис. 8, рассчитываются по формулам

$$k_p = \frac{1}{\mu}, \quad k_i = \frac{1}{\mu M_d}.$$

При $M_d = 4$ с и $\mu = 0.4$ $k_p = 2.5$, $k_i = 0.625$. Рассмотрим несколько вариантов выбора k_0 для ПИ-регулятора.

1. Выберем рабочую точку $I = -1$ А, $T = 16$ °С = 289.15 К из графика на рис. 5, б и г, для которой рассчитаем k_0 по формуле

$$k_0 = \frac{C}{0.5R_{\text{ЭП}}I + \alpha T}. \quad (13)$$

При $C = 30$ Дж/К и $R_{\text{ЭП}} = 1.6$ Ом $\alpha = 0.07$ В/К, $k_0 = 1.5$.

По результатам формирования температурного профиля, показанным на рис. 9, а и в, видно, что система является неустойчивой. Причинами неустойчивости являются пренебрежение запаздыванием и иные неучтенные факторы.

2. Известно, что уменьшением общего коэффициента ПИ-регулятора можно достичь устойчивости системы. В связи с этим проверим работу системы с общим коэффициентом $k_0 = 0.08$. Как показывают результаты на рис. 9, б и г, система является устойчивой, однако имеется перерегулирование.

3. Исследуем возможность применения переменного общего коэффициента, который вычисляется по формуле (13). Как показывают графики на рис. 10, а и в, система является неустойчивой.

4. Исследуем возможность применения переменного общего коэффициента, который рассчитывается по формуле

$$k_0 = \frac{0.05C}{0.5R_{\text{ЭП}}I + \alpha T}. \quad (14)$$

Как показывают результаты на рис. 10, б и г, система является устойчивой, но имеется большая динамическая ошибка.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

4.1. С ПРИМЕНЕНИЕМ ПИ-РЕГУЛЯТОРА

Рассматривается формирование температурного профиля с применением ПИ-регулятора. Показаны графики изменения температуры с постоянным (рис. 9) и переменным (рис. 10) общим коэффициентом. Видно, что после расчета коэффициентов ПИ-регулятора требуется поднастройка общего коэффициента (рис. 9, 10).

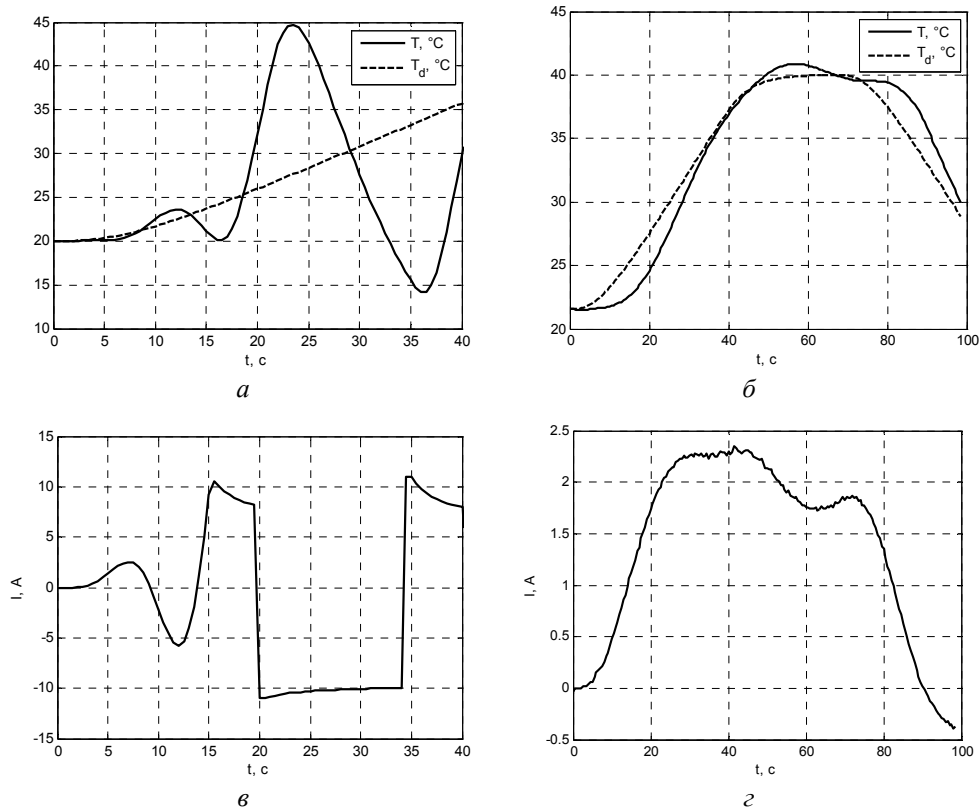


Рис. 9. Графики формирования температурного профиля с ПИ-регулятором с постоянным общим коэффициентом:

a – график изменения температуры при коэффициенте $k_0 = 1.5$; $б$ – график изменения температуры при коэффициенте $k_0 = 0.08$; $в$ – график процесса по току при коэффициенте $k_0 = 1.5$; $г$ – график процесса по току при коэффициенте $k_0 = 0.08$

Fig. 9. The plots of temperature profile shaping with the PI-controller with constant shared coefficient:

a is the plot of the temperature change with the coefficient $k_0 = 1.5$; $б$ is the plot of the temperature change with the coefficient $k_0 = 0.08$; $в$ is the plot of the current change with the coefficient $k_0 = 1.5$; $г$ is the plot of the current change with the coefficient $k_0 = 0.08$

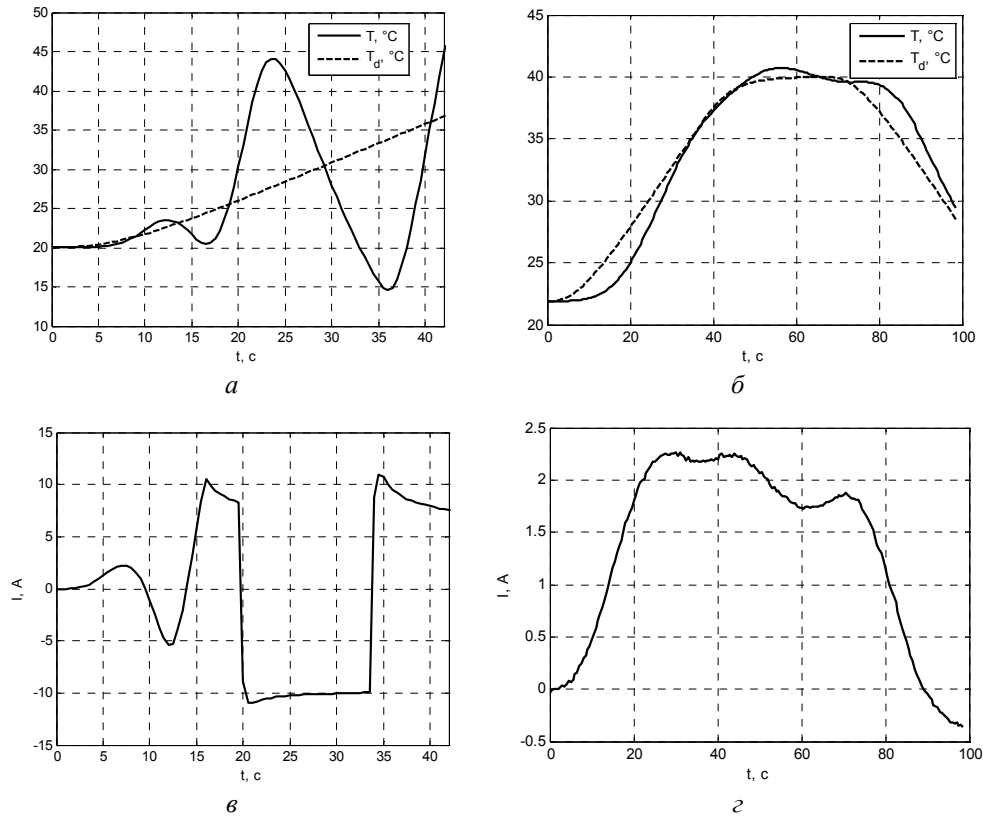


Рис. 10. Графики формирования температурного профиля с ПИ-регулятором с переменным общим коэффициентом:

a – график изменения температуры при общем коэффициенте регулятора k_0 , рассчитываемом по формуле (13); $б$ – график изменения температуры при общем коэффициенте регулятора k_0 , рассчитываемом по формуле (14); $в$ – график процесса по току при коэффициенте k_0 , рассчитываемом по формуле (13); $г$ – график процесса по току при коэффициенте k_0 , рассчитываемом по формуле (14)

Fig. 10. The plots of the temperature profile shaping with the PI-controller with variable shared coefficient:

a is the plot of the temperature change with the shared coefficient k_0 calculated by the formula (13); $б$ is the plot of the temperature change with the shared coefficient k_0 calculated by the formula (14); $в$ is the plot of the current change with the coefficient k_0 calculated by the formula (13); $г$ is the plot of the current change with the coefficient k_0 calculated by the formula (14)

4.2. С ПРИМЕНЕНИЕМ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

В данном пункте рассматривается формирование температурного профиля с применением ПИД-регулятора. Показаны графики изменения температуры с постоянным (рис. 11) и переменным (рис. 12 и 13) общим коэффи-

циентом. Видно, что после расчета коэффициентов ПИД-регулятора методом разделения требуется поднастройка общего коэффициента (рис. 11 и 12) или модификация формулы вычисления общего коэффициента (рис. 13). Для увеличения скорости изменения температуры при скачкообразном задании сигнала T_b может потребоваться дополнительная модификация вычисления общего коэффициента, что показывают графики на рис. 13.

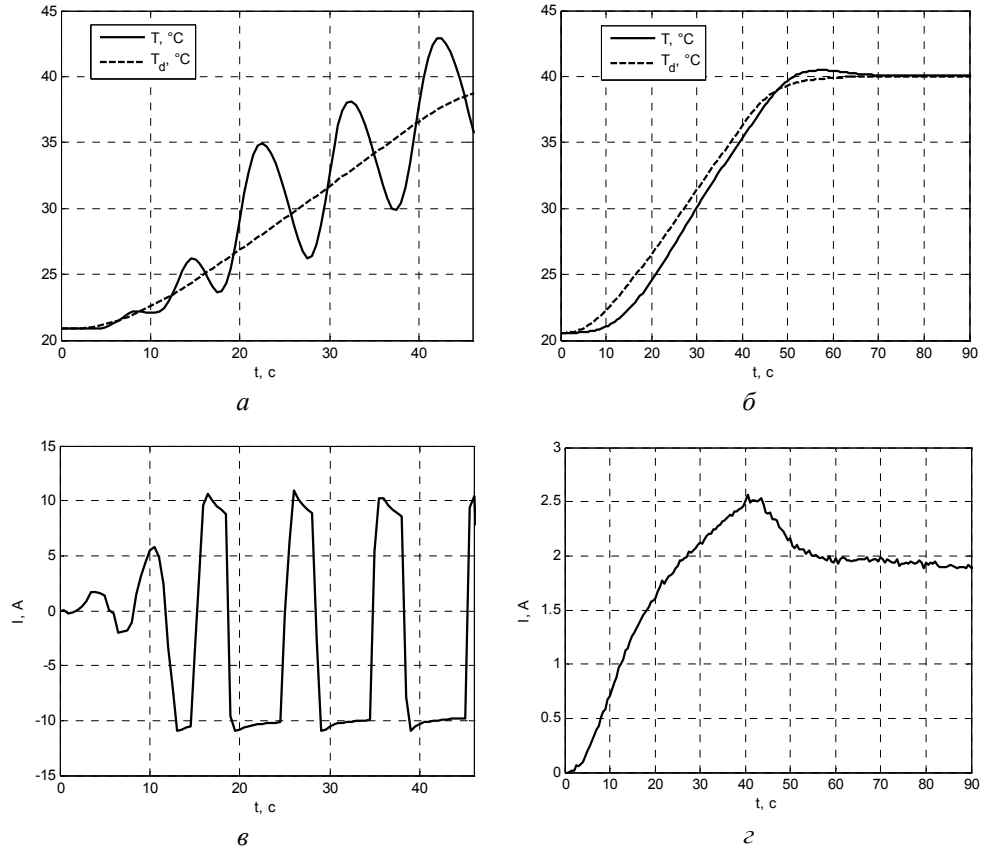


Рис. 11. Графики формирования температурного профиля с ПИД-регулятором с постоянным общим коэффициентом:

a – график изменения температуры при коэффициенте $k_0 = 6.7$; $б$ – график изменения температуры при коэффициенте $k_0 = 0.56$; $в$ – график процесса по току при коэффициенте $k_0 = 6.7$; $г$ – график процесса по току при коэффициенте $k_0 = 0.56$

Fig. 11. The plots of the temperature profile shaping with the PID-controller with constant shared coefficient:

a is the plot of the temperature change with the coefficient $k_0 = 6.7$; $б$ is the plot of the temperature change with the coefficient $k_0 = 0.56$; $в$ the plot of the current change with the coefficient $k_0 = 6.7$; $г$ is the plot of the current change with the coefficient $k_0 = 0.56$

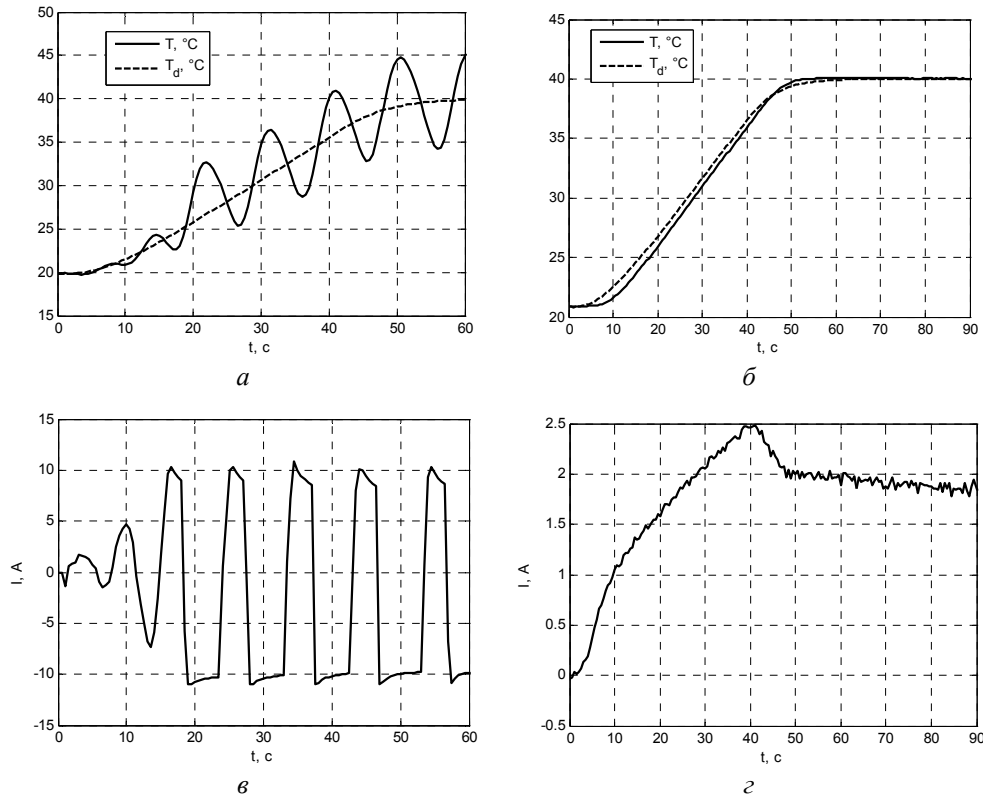


Рис. 12. Графики формирования температурного профиля с ПИД-регулятором с переменным общим коэффициентом:

a – график изменения температуры при общем коэффициенте регулятора k_0 , рассчитываемом по формуле (10); $б$ – график изменения температуры при общем коэффициенте регулятора k_0 , рассчитываемом по формуле (11); $в$ – график процесса по току при коэффициенте k_0 , рассчитываемом по формуле (10); $г$ – график процесса по току при коэффициенте k_0 , рассчитываемом по формуле (11)

Fig. 12. The plots of the temperature profile shaping with the PID-controller with variable shared coefficient:

a is the plot of the temperature change with the shared controller coefficient k_0 , calculated by the formula (10); $б$ is the plot of the temperature change with the controller coefficient k_0 calculated by the formula (11); $в$ is the plot of the current change with the coefficient k_0 calculated by the formula (10); $г$ is the plot of the current change with the coefficient k_0 calculated by the formula (11)

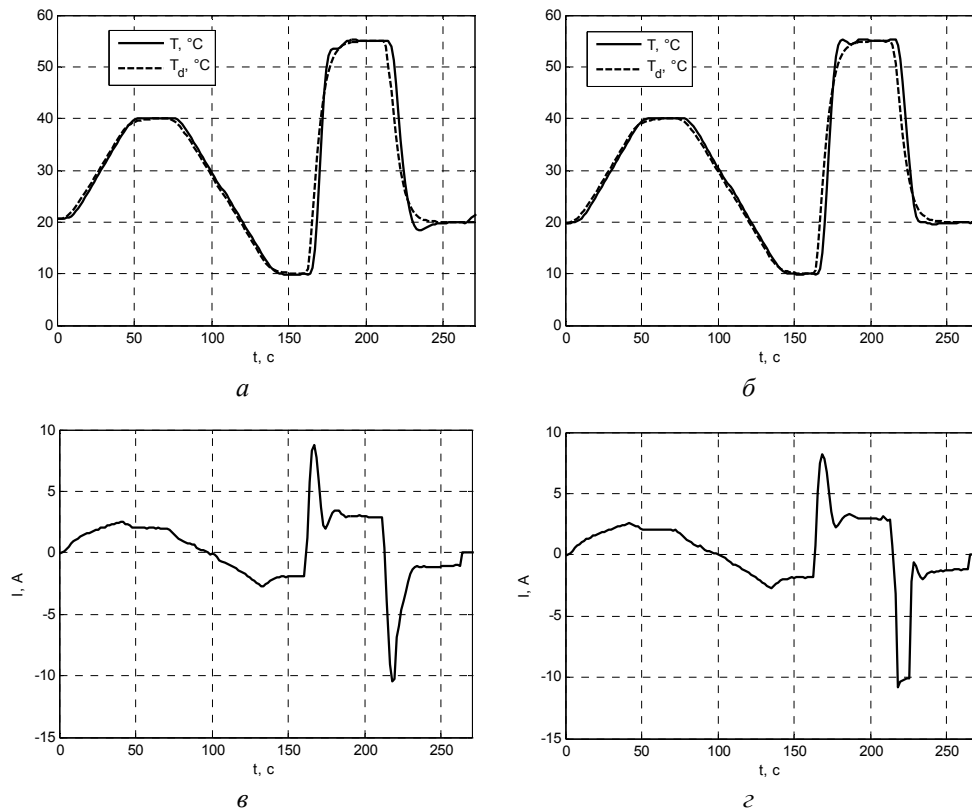


Рис. 13. Графики формирования температурного профиля с различной скоростью изменения температуры с ПИД-регулятором с переменным общим коэффициентом:

a – график изменения температуры при общем коэффициенте регулятора k_0 , рассчитываемом по формуле (11); *б* – график изменения температуры при общем коэффициенте регулятора k_0 , рассчитываемом по формуле (12); *в* – график процесса по току при коэффициенте k_0 , рассчитываемом по формуле (11); *г* – график процесса по току при коэффициенте k_0 , рассчитываемом по формуле (12)

Fig. 13. The plots of the temperature profile shaping with the differential speed of temperature change with the PID-controller with the variable shared coefficient:

a is the plot of the temperature change with the shared controller coefficient k_0 calculated by the formula (11); *б* is the plot of the temperature change controller with the shared controller coefficient k_0 calculated by the formula (12); *в* is the plot of the current change with the coefficient k_0 calculated by the formula (11); *г* is the plot of the current change with the coefficient k_0 calculated by the formula (12)

5. ВЫВОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ

По результатам формирования температурного профиля видно, что метод разделения движений может быть использован для расчета регулятора температуры для управляемого термостоллика и иных формирователей температурного профиля на основе элемента Пельтье. Вследствие запаздывания, использования упрощенной математической модели объекта управления по-

сле расчета коэффициентов регулятора методом разделения движений необходимо дополнительно подстроить общий коэффициент регулятора, что видно из рис. 9–13. Использование переменного общего коэффициента регулятора снижает динамическую ошибку, что видно из рис. 9–12. Применение ПИД-регулятора позволяет улучшить формирование заданного профиля, что следует из рис. 9–13. Для систем невысокой точности можно применять ПИ-регулятор температуры, что показывают графики изменения температуры на рис. 9 и 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выведена математическая модель термостолика на основе элемента Пельтье с учетом динамики распространения тепла по рабочему объему термостолика и выявлено отличие математической модели, полученной в работе [1]. Оценены параметры полученной математической модели с применением эмпирической идентификации. Проведено сравнение качества воспроизведения температурного профиля для системы с ПИ-регулятором и ПИД-регулятором. Рассмотрены пути подстройки общего коэффициента регулятора в случае неустойчивости системы или большой динамической ошибки при расчете коэффициентов регулятора методом разделения движений. Исследовано качество воспроизведения температурного профиля с постоянным и переменным коэффициентом регулирования.

Предлагаются задачи дальнейшего изучения: выбор или разработка алгоритма идентификации математической модели управляемого термостата на основе элемента Пельтье, анализ алгоритмов автоматической настройки регулятора температуры для термостолика на основе элемента Пельтье.

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: 10.17212/2307-6879-2017-3-62-77.
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. *Сероклинов Г.В.* Задачи автоматизации экспериментальных исследований сложных биофизических объектов // Методы и технические средства исследований физических процессов в сельском хозяйстве: сборник научных трудов СибФТИ. – Новосибирск, 2001. – С. 46–53.
5. *Магомедов Д.А., Хазамова Л.А., Миспахов И.Ш.* Малогабаритный термостат для перевозки биоматериалов // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. – СПб., 2015. – С. 458–460.
6. *Парфенов А.* Температурный профиль конвекционной пайки. Что это такое? // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – № 2 (30). – С. 29–30.
7. Термостолик для микроскопа на элементах Пельтье / Н.С. Безруков, А.Н. Одириев, К.Ф. Килимиченко, Ю.М. Перельман // Системный анализ в медицине (САМ 2017): материалы XI международной научной конференции, 19–20 октября 2017 г. – Благовещенск, 2017. – С. 47–52.
8. *Тарукин Е.М.* Авторефрижераторы // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 6 (13). – С. 68–82.

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

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

11. 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.

12. Лобанов И.Е. Точные аналитические решения нелинейной нестационарной обратной задачи теплопроводности для тела с низким коэффициентом теплопроводности // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2010. – № 3. – С. 72–74.

13. Замятин С.В., Плотников Д.А., Гончаров В.И. Идентификация нелинейных объектов на основе вещественного интерполяционного метода // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, № 5. – С. 66–69.

14. 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.

15. Оборудование, технологии, разработки: web-сайт. – URL: <http://mypractic.ru/> (дата обращения: 23.12.2019).

16. Синчинов Н.В., Лазарев М.В. Методы подбора коэффициентов ПИД-регулятора в процессе достижения устойчивости двухколесного самобалансирующегося робота // Студенческая наука Подмосквю: материалы международной научной конференции молодых ученых, 25–26 апреля 2017 г. – Орехово-Зуево, 2017. – С. 599–601.

Гринкевич Владимир Анатольевич, научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агроботехнологий Российской академии наук. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления. Имеет 6 публикаций. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru

Grinkevich Vladimir A., researcher in the Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Science. The main field of his scientific research is automatic control theory. He has 6 scientific publications. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru.

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-55-74

Temperature controller design for the temperature controlled stage based on the Peltier element*

V.A. GRINKEVICH

Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies Russian Academy of Science, PO Box 468, Krasnoobsk, Novosibirsk District, Novosibirsk Region, 630501, Russian Federation
grinkevich-vova@mail.ru

Abstract

Controlled thermostats and temperature stages are applied in different applications such as scientific research, control of chemical reaction speed, thermal stabilization of CCD-matrix in digital cameras, laser wave-length stabilization, as well as food and drugs storage. There are thermostats and temperature stages of different size, power and structure. Advantages of the Peltier element include small weight, size and simple construction. However, the Peltier element is characterized by low energy conversion efficiency, low power in comparison with the compressor refrigerant circuit and a small temperature range in comparison with the resistive

* Received 05 November 2019.

heater. The Peltier element can provide a working area temperature of the temperature stage above ambient or below ambient temperature. Usually, the Peltier element is applied in low power devices, where size and weight are limited. The Peltier element can be applied in designing automobile refrigerators, thermostats for biomaterials transportation in small amounts and for research on biophysical objects. Devices based on the Peltier element, can be applied for thermal massage of human skin or a thermal impact on various plants. For temperature stabilization and provision of high accuracy it is required to use a temperature controller for the temperature stage based on the Peltier element. Current has a control action on the Peltier element. Its value affects the working area temperature of the Peltier element. In this article, the application of an empiric identification of a mathematical model of the temperature stage based on the Peltier element is considered. The temperature controller synthesis by using the time-scale separation method and empiric adjustment for the temperature controlled stage based on the Peltier element is discussed in the paper. Diagrams of the thermal profile representation are showed. This temperature control system for devices based on the Peltier element can be used in generating temperature impacts on biophysical objects.

Keywords: temperature stage, thermal profile, empiric identification, Peltier element, temperature controller, time-scale separation method, non-linear system, mathematical model

REFERENCES

1. Grinkevich V.A. Issledovanie matematicheskoi modeli termostata na osnove elementa Pel't'e [Research on mathematical model for 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: 10.717212/2307-6879-2017-3-62-77.
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]. *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya (APEP-2014)* [12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE)-34006 proceedings], Novosibirsk, October 2–4, 2014, vol. 7, pp. 72–75. (In Russian).
4. 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.
5. Magomedov D.A., Khazamova 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.
6. Parfenov A. Temperaturnyi profil' konveksionnoi paiki. Chto eto takoe? [Thermal profile of convection soldering. What is it?]. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti = Technologies in Electronic Industry*, 2009, no. 2 (30), pp. 29–30.
7. Bezrukov N.S., Odireev A.N., Kilimichenko K.F., Perelman J.M. [Heating table for microscope based on the Peltier element]. *Sistemnyi analiz v meditsine (SAM 2017): materialy XI mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [System analysis in medicine (SAM 2017): Proceedings of XI International Scientific Conference], Blagoveshchensk, October 19–20, 2017, pp. 47–52. (In Russian).
8. Tarukin E.M. Avtorefrizheratory [Refrigerators for car]. *Vestnik NGIEI = Herald NGIEI*, 2012, no. 6 (13), pp. 68–82.
9. Yurkevich V.D. *Mnogokanal'nye sistemy upravleniya. Sintez lineinykh sistem upravleniya s raznotempovymi protsessami* [Design of linear control systems with multi-time scale motions]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 183 p.

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

11. Grinkevich V.A. Sintez regulyatora 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.

12. Lobanov I.E. Tochnye analiticheskie resheniya nelineinoi nestatsionarnoi obratnoi zadachi teploprovodnosti dlya tela s nizkim koeffitsientom teploprovodnosti [Exact analytical solutions of a nonlinear nonstationary inverse problem of heat conduction for a body with low heat conduction coefficient]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsonnaia tekhnika = Russian Aeronautics*, 2010, no. 3, pp. 72–74. (In Russian).

13. Zamyatin S.V., Plotnikov D.A., Goncharov V.I. Identifikatsiya nelineinykh ob"ektov na osnove veshchestvennogo interpolatsionnogo metoda [Identification of nonlinear objects on the basis of the material interpolation method]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 5, pp. 66–69.

14. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Hazamova M.A., Mispahov I.Sh. Issledovanie teplofizicheskikh protsessov v sisteme kratkosrochnogo khraneniya i transportirovki biologicheskikh materialov [Thermal processes in short-term storage and transportation of biological materials]. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda = Journal of International Academy of Refrigeration*, 2014, no. 3, pp. 10–14.

15. *Oborudovanie, tekhnologii, razrabotki* [Equipment, technologies, developments]. Website. Available at: <http://mypractic.ru/> (accessed 23.12.2019).

16. Sinchinov N.V., Lazarev M.V. [Selection methods coefficients of PID-controller to achievement of steady-state of two-wheeled self-balancing robot]. *Studencheskaya nauka Podmoskov'yu: materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchennykh* [Student science for Moscow region: conference proceedings], 25–26 April 2017. Orekhovo-Zuevo, 2017, pp. 599–601. (In Russian).

Для цитирования:

Гринкевич В.А. Синтез регулятора температуры для термостоллика на основе элемента Пельтье // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 1 (78). – С. 55–74. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-55-74.

For citation:

Grinkevich V.A. Sintez regulyatora temperatury dlya termostolika na osnove elementa Pel'te [Temperature controller design for the temperature controlled stage based on the Peltier element]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 1 (78), pp. 55–74. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-55-74.