

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ТОКА 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, научный сотрудник.
E-mail: grinkevich-vova@mail.ru*

Термостолы применяются для научных исследований в химии и биологии. Существуют термостолы разных мощностей и размеров. Исполнительным элементом термостолы может быть резистивный нагревательный элемент, жидкий азот или элемент Пельтье. Для термостолы малой мощности наиболее подходящим исполнительным элементом является элемент Пельтье вследствие простоты его конструкции и малых размеров. Кроме того, элементы Пельтье применяются в управляемых термостатах малой мощности, автомобильных холодильниках, водяных кулерах и медицинских термостатах. Еще элементы Пельтье используются для охлаждения ПЗС-матриц в цифровых фотоаппаратах, стабилизации температуры лазера, управления скоростью химической реакции и температурных воздействий на растения для исследования их стрессоустойчивости. Элемент Пельтье может обеспечить температуру рабочей поверхности термостолы выше окружающей среды и ниже температуры окружающей среды, в отличие от резистивных нагревателей. Для поддержания стабильной температуры или формирования температурного профиля необходимо применять регулятор температуры. Управляющим фактором для элемента Пельтье является ток, величина которого влияет на температуру рабочей поверхности термостолы. В связи с этим возникает необходимость использования регулятора тока в термостолах на основе элемента Пельтье с целью обеспечения высокой точности. В данной статье обсуждается синтез регулятора тока, протекаемого через элемент Пельтье, с широтно-импульсным модулятором в канале управления. В качестве объекта управления используется схема с элементом Пельтье, который через сглаживающий фильтр подключен к импульсному мостовому усилителю. Для расчета регулятора тока применен метод разделения движений. Приведены графики переходных процессов по току и графики пульсаций напряжения на элементе Пельтье, полученные с помощью осциллографа. Рассмотрен вариант снижения уровня пульсаций, возникающих из-за шума датчика тока. Предлагаемая система управления током для элемента Пельтье может быть использована в устройствах формирования температурных воздействий на биофизические объекты.

* Статья получена 04 октября 2019 г.

Ключевые слова: термостоллик, элемент Пельтье, регулятор тока, метод разделения движений, сглаживающий фильтр, математическая модель, эмпирическая идентификация

ВВЕДЕНИЕ

Элементы Пельтье [1] применяют для конструирования термостатов малой мощности [2], исследования стрессоустойчивости растений [3], термостатирования лазеров, ПЗС-матриц и биоматериалов [4]. Также элементы Пельтье применяются в водяных кулерах, термоэлектрических холодильниках [5] и термостолликах [6]. Управляющим фактором устройств формирования температурных воздействий является ток, протекаемый через элемент Пельтье. Вообще говоря, регулирование температуры возможно без обратной связи по току с использованием коэффициента заполнения импульса ШИМ в качестве управляющего сигнала, однако для повышения точности регулирования температуры требуется использовать регулятор тока. Изменяя направление тока, протекаемого через элемент Пельтье, можно осуществить нагревание или охлаждение рабочей поверхности термостоллика.

В работе [7] рассмотрена возможность применения широтно-импульсного модулятора (ШИМ) [8] и сглаживающего фильтра для изменения тока, протекаемого через элемент Пельтье. Еще в статье [7] рассмотрена математическая модель сглаживающего фильтра и расчет регулятора тока для элемента Пельтье методом разделения движений [9, 10]. Однако в работе [7] рассматривалось только численное моделирование.

В настоящей работе исследуются процессы по току в физически реализованном термостоллике на основе элемента Пельтье и расчет регулятора тока для термостоллика методом разделения движений. Приведены графики переходных процессов без регулятора тока и с регулятором. Предлагаемая система управления током для элемента Пельтье может быть использована в устройствах формирования температурных воздействий на биофизические объекты [11].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе в качестве объекта управления рассматривается электрическая схема с источником напряжения, мостовым усилителем [12] и сглаживающим фильтром [13] с элементом Пельтье (рис. 1) для управления протекаемым через элемент Пельтье током. Для синтеза регулятора тока используется метод разделения движений.

Целью работы является расчет регулятора тока в цепи элемента Пельтье для рассматриваемой схемы на рис. 1, обсуждение результатов и возможности

практического применения. Требования к регулированию для системы стабилизации: нулевая статическая ошибка, перерегулирование не более 10 %, длительность переходного процесса не более 40 мс; для следящей системы: динамическая ошибка не более 20 % при изменении тока, нулевая статическая ошибка.

В электрической схеме элемент Пельтье рассматривается как последовательное соединение активного сопротивления R_{Pe} и ЭДС Зеебека E_{Sb} [14], где ЭДС Зеебека вычисляется по формуле

$$E_{Sb} = \alpha(T_{rads} - T_{wors}),$$

где E_{Sb} – ЭДС Зеебека; α – коэффициент Зеебека; T_{rads} – температура стороны элемента Пельтье, которая контактирует с радиатором; T_{wors} – температура стороны элемента Пельтье, контактирующей с объектом теплового воздействия. Например, для элемента Пельтье ТЕТС1-26318 при разности температур его сторон, равной 74 °С, ЭДС Зеебека может достигать 8,3 В. Поскольку тепловые процессы протекают значительно медленнее, чем изменение тока, ЭДС Зеебека будем считать возмущающим фактором.

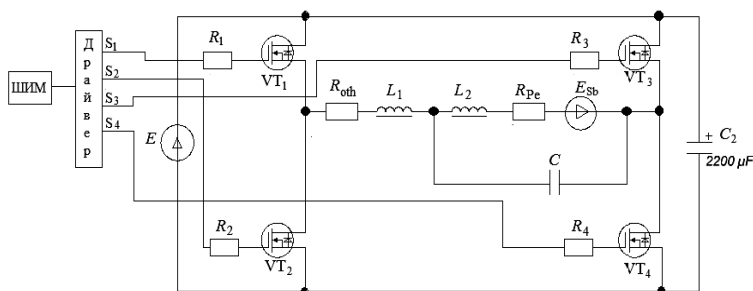


Рис. 1. Схема управления током, протекающим через элемент Пельтье, со сглаживающим фильтром третьего порядка

В качестве коммутационных элементов используются MOSFET-транзисторы [15] STP45N10F7, включенные по мостовой схеме. Конденсатор C используется металлопленочный B32774D4226K000, 22 мкФ, 450 В, 10 %. Конденсатор C_2 выбран электролитический ЕСАР (К50-35), 2200 мкФ, 100 В. В данной работе частота ШИМ равна 18 кГц, $L_1 = 3,3$ мГн, $L_2 = 0,1$ мГн, $C = 22$ мкФ, $R_{Pe} = 1,4$ Ом, $R_{oth} = 0,1$ Ом, $E = 29$ В.

На функциональной схеме (рис. 2) используются обозначения: I_d – желаемый ток, протекающий через элемент Пельтье; χ – выходной сигнал регулятора (коэффициент заполнения импульса ШИМ); v – выходной сигнал ШИМ, $S_1 - S_4$ – управляющие коммутационными элементами сигналы; U – напряжение, подаваемое на сглаживающий фильтр; I – ток, протекающий через элемент Пельтье.

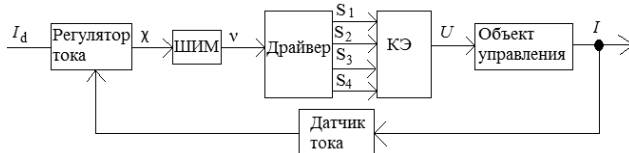


Рис. 2. Функциональная схема системы регулирования тока, протекающего через элемент Пельтье

Для расчета регулятора тока необходимо вывести математическую модель схемы с фильтром (рис. 1). В работе [7] рассматривался вывод математической модели для электрической схемы на рис. 1. Однако в работе [7] транзисторные ключи считались идеальными, сопротивление элемента Пельтье было взято из технических данных. Кроме того, имеется затруднение точного измерения сопротивления R_{oth} .

В работе [7] выполнен расчет регулятора тока с применением метода разделения движений. Однако в статье [7] рассматривалось только численное моделирование. В настоящей работе будут рассмотрены процессы по току для физически реализованного термостоллика на основе элемента Пельтье. В статье [7] сказано, что фильтр третьего порядка является более эффективным для снижения уровня пульсаций по току, чем фильтр второго порядка.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ С ЭЛЕМЕНТОМ ПЕЛЬТЬЕ

Для идентификации математической модели электрической схемы на рис. 1 рассмотрим переходные процессы по току I при различном коэффициенте заполнения импульса ШИМ.

Из рис. 3 видно, что математическую модель объекта управления можно аппроксимировать передаточной функцией первого порядка. После запуска модуль тока I увеличивается по экспоненциальному закону, далее медленно уменьшается из-за влияния ЭДС Зеебека (рис. 3). Однако ЭДС Зеебека изменяется значительно медленнее, чем ток I и коэффициент заполнения χ , по-

этому при расчете регулятора тока пренебрегаем влиянием ЭДС Зеебека E_{Sb} , считая ее возмущающим воздействием.

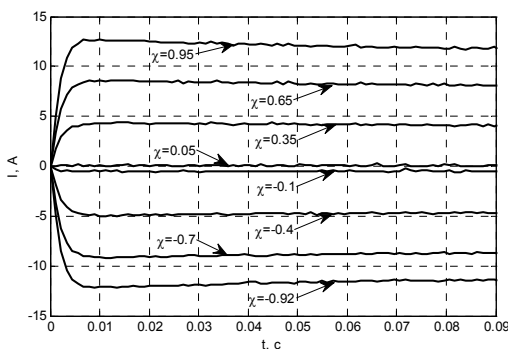


Рис. 3. Переходные процессы по току

Аппроксимируем математическую модель объекта управления передаточной функцией вида

$$W(s) = \frac{I(s)}{\chi(s)} = \frac{k}{Ts + 1}, \quad (1)$$

где $I(s)$ – изображение по Лапласу тока, протекающего через элемент Пельтье; $\chi(s)$ – изображение коэффициента заполнения импульса; k – коэффициент пропорциональности между током I и сигналом χ ; T – постоянная времени электрической схемы на рис. 1.

Реализуем объект, описываемый передаточной функцией (1), в программе Matlab:simulink. Эмпирически подберем параметры k и T так, чтобы процессы объекта, описываемого передаточной функцией (1), имели наименьшее отличие от переходных процессов на рис. 3. Такой подход можно назвать эмпирической идентификацией [16]. В результате $T = 0,002$ с, а k меняется в диапазоне от 2 А (при $\chi = 0,05$) до 13,5 А (при $\chi = 0,95$). Следовательно, электрическая схема с мостовым усилителем и сглаживающим фильтром имеет нелинейность, связанную с нелинейной вольт-амперной характеристикой транзисторов. По графикам на рис. 3 видно, что при $\chi < 0,35$ нелинейность слабая. Метод разделения движений позволяет управлять нелинейными объектами, объектами с нестационарными параметрами и отсутствием полной информации о параметрах, следовательно, метод разделения движений может быть применен для расчета регулятора тока, протекаемого через элемент Пельтье. Выберем $k = 13,5$ А.

В статье [1] была получена передаточная функция для схемы на рис. 1 в виде

$$W(s) = \frac{E}{A(s)}, \quad (2)$$

$$A(s) = L_1 CL_2 s^3 + (L_1 CR_{pe} + R_{oth} CL_2) s^2 + (CR_{pe} R_{oth} + L_1 + L_2) s + (R_{oth} + R_{pe}), \quad (3)$$

где L_1 – индуктивность первого дросселя; C – емкость конденсатора; L_2 – индуктивность второго дросселя; R_{pe} – электрическое сопротивление элемента Пельтье; R_{oth} – сумма электрических сопротивлений дросселя L_1 , транзисторных ключей и источника питания.

При $L_1 = 3,3$ мГн, $L_2 = 0,1$ мГн, $C = 22$ мкФ, $R_{pe} = 1,4$ Ом, $R_{oth} = 0,1$ Ом, $E = 29$ В характеристический полином (3) имеет один действительный и два комплексно-сопряженных корня. Постоянная времени, соответствующая действительному корню, $T_1 = 0,0022$ с. Постоянная времени, соответствующая комплексно-сопряженным корням, $T_2 = 0,000046$ с. Поскольку T_2 в 48 раз меньше T_1 , передаточную функцию (2) можно представить в виде

$$W(s) = \frac{E}{L_1 CL_2 (-s_1) \cdot |s_2|^2 \cdot (T_1 s + 1)}, \quad (4)$$

где s_1 – действительный корень, s_2 – комплексно-сопряженный корень. Коэффициент усиления передаточной функции (4) имеет вид

$$k_a = \frac{E}{L_1 CL_2 (-s_1) \cdot |s_2|^2}$$

при $L_1 = 3,3$ мГн, $L_2 = 0,1$ мГн, $C = 22$ мкФ, $R_{pe} = 1,4$ Ом, $R_{oth} = 0,1$ Ом, $E = 29$ В, $k_a = 20$ А.

Как видно, параметры электрической цепи на рис. 1, полученные в результате эмпирической идентификации, имеют отличие от расчетов с применением законов электротехники, как было предложено в работе [7], из-за идеализации коммутационных элементов и иных пренебрежений.

3. АНАЛИЗ ШУМА ДАТЧИКА ТОКА И ПУЛЬСАЦИЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЕ ПЕЛЬТЬЕ БЕЗ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Поскольку датчик тока на основе эффекта Холла является шумящим, нужно проанализировать график шума датчика тока (рис. 4). Как видно из рис. 5, датчик тока имеет шумы, для фильтрации которых требуется фильтр низких частот с постоянной времени более 0,002 с. Однако в таком случае постоянная времени фильтра низких частот превышает значение постоянной времени объекта управления, поэтому фильтрация сигнала с применением фильтра низких частот может ухудшить качество регулирования тока.

Рассмотрим пульсации напряжения на элементе Пельтье U_{pe} при $\chi = 0$ и $\chi = 0,2$. График на рис. 5 и 6 показывают, что уровень пульсаций напряжения на элементе Пельтье при $\chi = 0$ и $\chi = 0,2$ является достаточно малым.

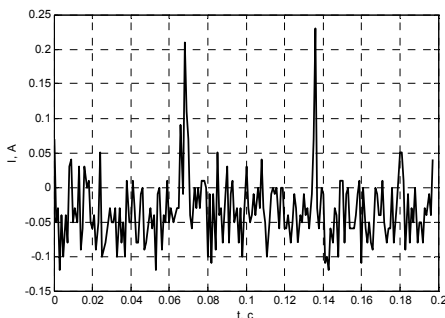


Рис. 4. Шум датчика тока ACS712

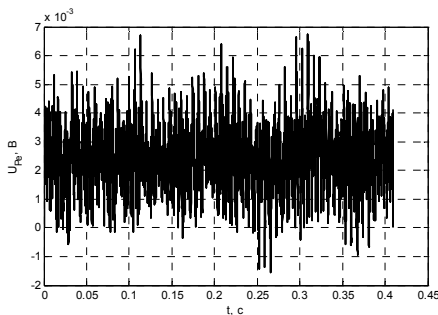


Рис. 5. Уровень пульсаций напряжения на элементе Пельтье при $\chi = 0$

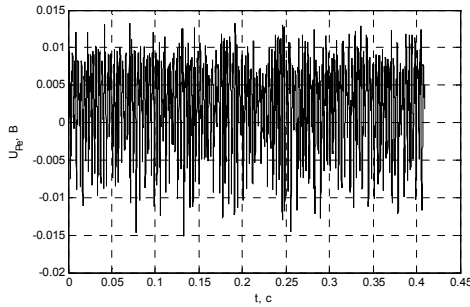


Рис. 6. Уровень пульсаций напряжения на элементе Пельтье в установившемся режиме при $\chi = 0,2$

4. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ТОКА

4.1. СИНТЕЗ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО РЕГУЛЯТОРА ТОКА

В соответствии с методикой синтеза стабилизирующих регуляторов по методу разделения движений для объекта первого порядка рассмотрим систему уравнений вида, где второе уравнение описывает объект управления:

$$\begin{cases} \mu \dot{\chi} = k_0 (T_d^{-1} (I_d - I) - \dot{I}), \\ \dot{I} = T^{-1} (-I + k\chi), \end{cases} \quad (5)$$

где μ – малый параметр; χ – коэффициент заполнения импульса ШИМ; k_0 – общий множитель коэффициентов регулятора тока; T_d – желаемая постоянная времени переходного процесса по току; I_d – желаемый ток; I – протекаемый через элемент Пельтье ток. После подстановки правой части второго уравнения системы (5) в первое уравнение системы (5) получим

$$\mu \dot{\chi} = k_0 T_d^{-1} (I_d - I) + k_0 T^{-1} I - k_0 T^{-1} k \chi. \quad (6)$$

Уменьшение параметра μ приводит к формированию быстрых процессов по сигналу χ и медленных – по току I . Введем быстрое время $t_f = t / \mu$. В таком случае уравнение (6) можно записать для быстрого времени в виде

$$\frac{d\chi}{dt_f} = k_0 T_d^{-1} (I_d - I) + k_0 T^{-1} I - k_0 T^{-1} k \chi.$$

Переменные I_d , I на интервале быстрого времени рассматриваются как постоянные величины. При $\mu > 0$ для устойчивости быстрых процессов необходимо выполнение условия $k_0 T^{-1} k > 0$ (например, $k_0 T^{-1} k = 1$). Таким образом, k_0 рассчитывается по формуле

$$k_0 = \frac{T}{k}.$$

Для параметра μ имеет место соотношение

$$\mu = \frac{T_d}{\eta},$$

где $\eta \geq 10$ (например, $\eta = 10$). После преобразования Лапласа для первого уравнения системы получим

$$\mu s \chi(s) = k_0 \left(T_d^{-1} (I_d(s) - I(s)) - s I(s) \right).$$

Выражая $\chi(s)$, получим

$$\chi(s) = \frac{k_0 (I_d(s) - I(s))}{\mu T_d s} - \frac{k_0 I(s)}{\mu}. \quad (7)$$

Уравнение (7) описывает регулятор, структура которого изображена на рис. 7. Коэффициенты регулятора, описываемого уравнением (7), рассчитываются по формулам

$$k_p = \frac{k_0}{\mu}, \quad k_i = \frac{k_0}{\mu T}$$

при $L_1 = 3,3$ мГн, $L_2 = 0,1$ мГн, $C = 22$ мкФ, $R_{pe} = 1,4$ Ом, $R_{oth} = 0,1$ Ом, $E = 29$ В, $k_p = 0,14$, $k_i = 14$.

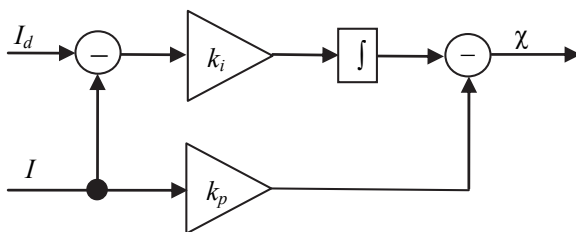


Рис. 7. Схема стабилизирующего регулятора тока

4.2. СИНТЕЗ СЛЕДЯЩЕГО РЕГУЛЯТОРА ТОКА

В соответствии с методикой синтеза следящих регуляторов по методу разделения движений для объекта первого порядка рассмотрим систему уравнений вида, где второе уравнение описывает объект управления:

$$\begin{cases} \mu \dot{\chi} = k_0 \left(T_d^{-1} (I_d - I) + (\dot{I}_d - \dot{I}) \right), \\ \dot{I} = T^{-1} (-I + k\chi). \end{cases} \quad (8)$$

После подстановки правой части второго уравнения системы (8) в первое уравнение системы (8) получим

$$\mu \dot{\chi} = k_0 T_d^{-1} (I_d - I) + k_0 T^{-1} \dot{I}_d + k_0 T^{-1} I - k_0 T^{-1} k \chi. \quad (9)$$

Уменьшение параметра μ приводит к формированию быстрых процессов по сигналу χ и медленных – по току I . Введем быстрое время $t_f = t / \mu$. В таком случае уравнение (9) можно записать для быстрого времени в виде

$$\frac{d\chi}{dt_f} = k_0 T_d^{-1} (I_d - I) + k_0 T^{-1} \dot{I}_d + k_0 T^{-1} I - k_0 T^{-1} k \chi.$$

Переменные I_d , I на интервале быстрого времени рассматриваются как постоянные величины. При $\mu > 0$ для устойчивости быстрых процессов необходимо выполнение условия $k_0 T^{-1} k > 0$ (например, $k_0 T^{-1} k = 1$). Таким образом, k_0 рассчитывается по формуле

$$k_0 = \frac{T}{k}.$$

Для параметра μ имеет место соотношение

$$\mu = \frac{T_d}{\eta},$$

где $\eta \geq 10$ (например, $\eta = 10$). После преобразования Лапласа для первого уравнения системы (8) получим

$$\mu s \chi(s) = k_0 \left(T_d^{-1} (I_d(s) - I(s)) + (s I_d(s) - s I(s)) \right).$$

Выражая $\chi(s)$, получим

$$\chi(s) = \frac{k_0 (I_d(s) - I(s))}{\mu T_d s} + \frac{k_0 (I_d(s) - I(s))}{\mu}. \quad (10)$$

Уравнение (10) описывает регулятор, структура которого изображена на рис. 8. Коэффициенты регулятора, описываемого уравнением (10), рассчитываются по формулам

$$k_p = \frac{k_0}{\mu}, \quad k_i = \frac{k_0}{\mu T}$$

при $L_1 = 3,3$ мГн, $L_2 = 0,1$ мГн, $C = 22$ мкФ, $R_{pe} = 1,4$ Ом, $R_{oth} = 0,1$ Ом, $E = 29$ В, $k_p = 0,14$, $k_i = 14$.

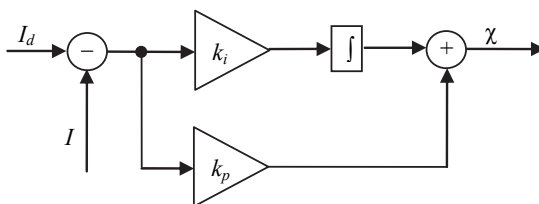


Рис. 8. Схема следящего регулятора тока

5. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ С РЕГУЛЯТОРОМ ТОКА

5.1. СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Рассмотрим переходные процессы в системе управления током с использованием стабилизирующего регулятора при $k_p = 0,14$, $k_i = 14$. По графикам на рис. 9, а и в видно, что переходные процессы соответствуют требованиям,

и видны шумы датчика тока, из-за которых возникают пульсации в управляющем сигнале χ (рис. 9, в). Из рис. 10, а видно, что пульсации напряжения на элементе Пельтье достигают 0,1 В. Для снижения уровня пульсаций попробуем уменьшить множитель k_0 в 1,4 раза, в результате чего $k_p = 0,1$, $k_i = 10$.

Как показывают графики на рис. 9, б и з, переходные процессы по току имеют такой же вид, как и на рис. 9, а и в. Уровень пульсаций напряжения на элементе Пельтье снизился после уменьшения коэффициентов регулятора (рис. 10, б).

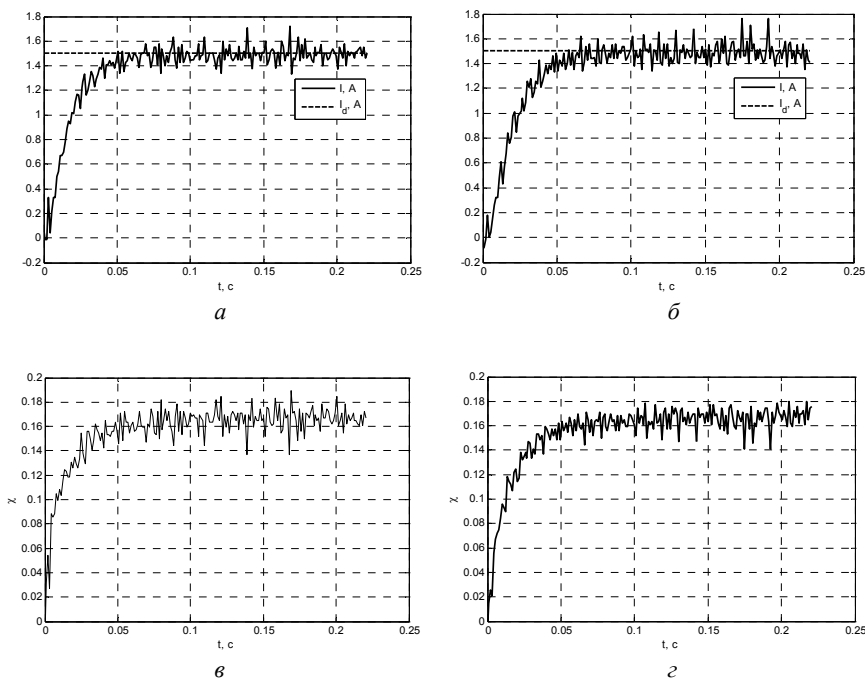


Рис. 9. Регулирование тока с применением стабилизирующего ПИ-регулятора без фильтрации шумов датчика:

а – переходные процессы по току I при $k_p = 0,14$ и $k_i = 14$; б – переходные процессы по току I при $k_p = 0,1$ и $k_i = 10$; в – переходные процессы по сигналу χ при $k_p = 0,14$ и $k_i = 14$; з – переходные процессы по сигналу χ при $k_p = 0,1$ и $k_i = 10$

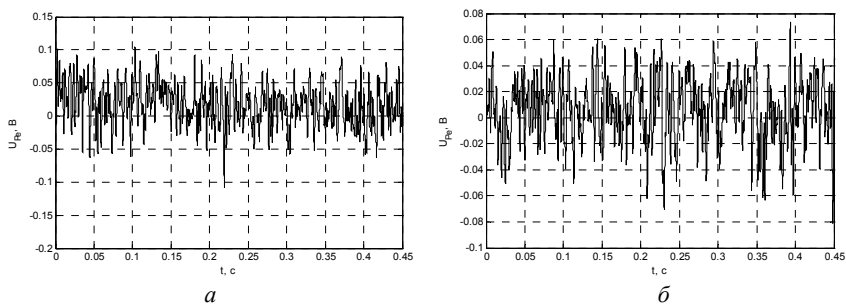


Рис. 10. Зарегистрированные осциллографом пульсации напряжения на элементе Пельтье при стабилизации тока I с применением регулятора, описываемого уравнением (7):

a – при $k_p = 0,14$, $k_i = 14$; b – $k_p = 0,1$, $k_i = 10$

Переходные процессы при изменяющемся желаемом токе соответствуют требованиям (графики на рис. 11, a и b).

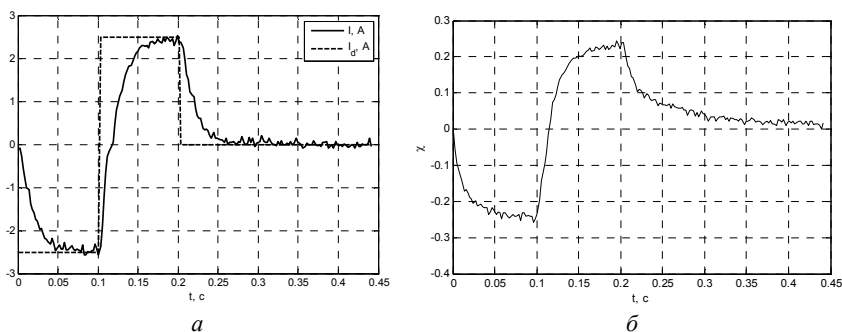


Рис. 11. Переходные процессы с регулятором, описываемым уравнением (7), при изменяющемся желаемом токе I_d :

a – переходные процессы по току I ; b – переходные процессы по сигналу χ

5.2. СО СЛЕДЯЩИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Рассмотрим переходные процессы по току I в системе управления током с использованием следящего регулятора при $k_p = 0,14$, $k_i = 14$. На графиках рис. 12, a и b видно, что процессы по току I соответствуют требованиям и

видны шумы датчика тока, из-за которых возникают пульсации в управляющем сигнале. Из рис. 13, *а* видно, что пульсации напряжения на элементе Пельтье достигают 0,13 В. Для снижения уровня пульсаций попробуем уменьшить множитель k_0 в 1,4 раза, в результате чего $k_p = 0,1$, $k_i = 10$.

Как показывают графики на рис. 12, *б* и *з*, процессы по току имеют мало отличий от процессов на рис. 12, *а* и *в*, однако уровень пульсаций по сигналу χ немного меньше. Уровень пульсаций напряжения на элементе Пельтье снизился после уменьшения коэффициентов регулятора (рис. 13, *б*).

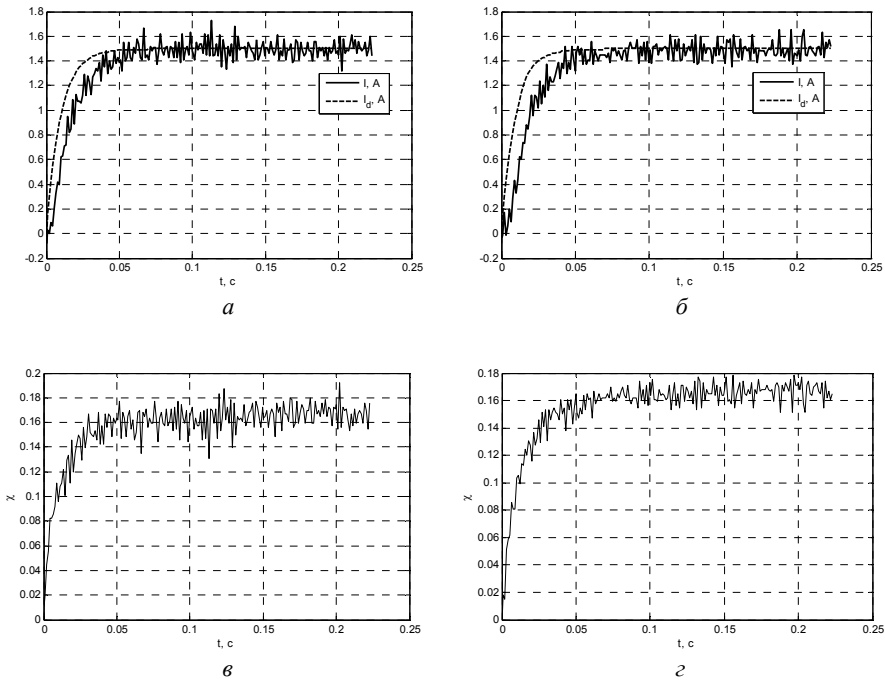


Рис. 12. Регулирование тока с применением следящего ПИ-регулятора без фильтрации шумов датчика:

а – переходные процессы по току I при $k_p = 0,14$ и $k_i = 14$; *б* – переходные процессы по току I при $k_p = 0,1$ и $k_i = 10$; *в* – переходные процессы по сигналу χ при $k_p = 0,14$ и $k_i = 14$; *з* – переходные процессы по сигналу χ при $k_p = 0,1$ и $k_i = 10$

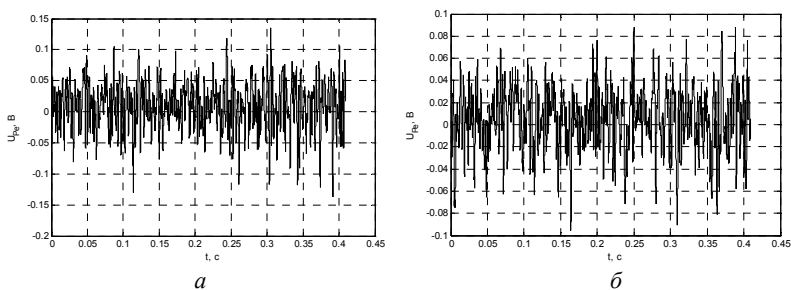


Рис. 13. Зарегистрированные осциллографом пульсации напряжения на элементе Пельтье при поддержании постоянного значения тока I с применением регулятора, описываемого уравнением (10):

a – при $k_p = 0,14$, $k_i = 14$; b – при $k_p = 0,1$, $k_i = 10$

Процессы по току I при изменяющемся желаемом токе соответствуют требованиям, что показывают графики на рис. 14, a и b .

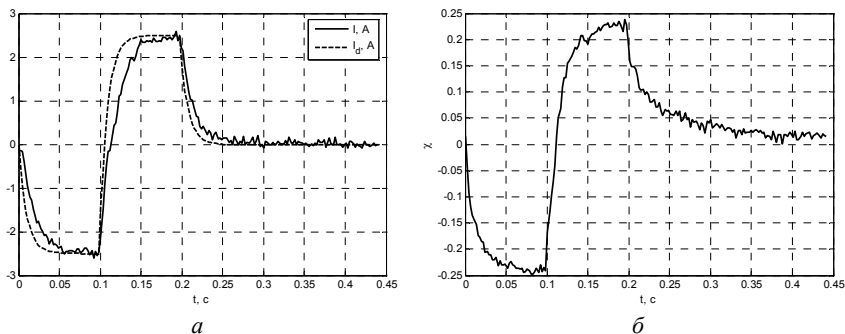


Рис. 14. Переходные процессы при изменяющемся желаемом токе I_d :

a – переходные процессы по току I ; b – переходные процессы по сигналу χ

ВЫВОД

По результатам работы видно, что метод разделения движений может быть использован для расчета регулятора тока в цепи с элементом Пельтье (рис. 9–14). Переходные процессы соответствуют заданным требованиям (рис. 9, 11, 12, 14). Ток регулировался с использованием ШИМ. Датчик тока имеет шумы (рис. 4), однако для их фильтрации с помощью фильтра низких

частот требуется постоянная времени более 0,002 с, которая превышает постоянную времени схемы с элементом Пельтье. В связи с этим применение фильтра низких частот в данной системе управления недопустимо. Имеются пульсации напряжения на элементе Пельтье (рис. 5, 6), которые возникают из-за ШИМ и шума датчика тока. Уменьшением общего множителя коэффициентов регулятора можно снизить уровень пульсаций напряжения на элементе Пельтье (рис. 10, 13).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены переходные процессы без регулятора тока. Оценена математическая модель электрической схемы, состоящей из источника тока, импульсного мостового усилителя и сглаживающего фильтра с элементом Пельтье. Синтезирован регулятор тока, протекающего через элемент Пельтье, методом разделения движений. Исследованы процессы в следящей системе и системе стабилизации. Рассмотрены пульсации напряжения на элементе Пельтье, возникающие из-за шума датчика и широтно-импульсного модулятора. Предложен способ снижения уровня пульсаций напряжения на элементе 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. *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.
5. *Тарукин Е.М.* Авторефрижераторы // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 6 (13). – С. 68–82.
6. Термостоллик для микроскопа на элементах Пельтье / Н.С. Безруков, А.Н. Одиреев, К.Ф. Килимиченко, Ю.М. Перельман // Системный анализ в медицине (САМ 2017): материалы XI международной научной конференции, 19–20 окт. 2017 г. – Благовещенск, 2017. – С. 47–52.

7. *Гринкевич В.А.* Синтез регулятора тока для элемента Пельтье // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С. 16–39. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-16-39.

8. *Юркевич В.Д.* Синтез нелинейных систем с ШИМ в канале управления на основе метода разделения движений // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1-1 (25). – С. 127–130.

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. *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.

12. *Охоткин Г.П., Романова Е.С.* Анализ законов коммутации ключей мостовой схемы импульсного преобразователя // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 3. – С. 142–149.

13. *Сорокин Г.А.* Фильтры нижних частот // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 100–107.

14. *Макфузова А.И., Травин Д.Д., Филимонова А.А.* Термоэлементы как дополнительные источники энергии на орбитальной станции // Научные исследования: от теории к практике. – № 5 (6). – С. 262–263.

15. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники. Ч. 1: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.

16. *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.

Гринкевич Владимир Анатольевич, научный сотрудник Сибирского федерального центра агробиотехнологий Российской академии наук. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления, расчет регуляторов для устройств на основе элемента Пельтье. Имеет три публикации. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-33-52

Current controller design for temperature controlled stage based on 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

Temperature stages are applied for scientific researches in chemistry and biology. Temperature stages with different size and power are exists. Executive element for temperature stage can be resistive heater, liquid nitrogen or Peltier element. Peltier element is the most advantage element for low-power temperature stages because of simple construction and small size. Besides Peltier elements are applied in low-power thermostat, car refrigerator, water cooler and medical thermostat design. Also Peltier elements are used for cooling CCD-matrix in digital cameras, stabilization temperature of laser, speed control of chemical reaction and temperature impacts on plants for research their stress tolerance. Peltier element can provide temperature of work side of thermal stage above ambient temperature or below ambient temperature, unlike resistive heaters. It is necessary to apply a temperature controller for thermal stabilization or thermal profiling. Control impact for Peltier element is current, which impact on work side temperature of thermal stage. Because it is necessary to use current controller in temperature stage based on Peltier element for provide high accuracy. In this article current controller design with pulse width modulator in control channel is discussed. Circuit with Peltier element, which connected to pulse-bridge amplifier over smoothing filter, is used as control object. Time-scale separation method is applied for current controller design. Diagrams of transient processes and voltage pulses on Peltier element are showed. Voltage pulses have got by oscilloscope. Variant of decrease voltage pulses, which occurred due to sensor noise, is described. This current control system for Peltier element may be use in devices for shape temperature impacts based on Peltier element.

Keywords: temperature stage, Peltier element, current controller, time-scale separation method, mathematical model, empiric identification

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

* Received 04 October 2019.

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. 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.
5. Tarukin E.M. Avtorefrizheratory [Refrigerators for car]. *Vestnik NGIEI – Herald NGIEI*, 2012, no. 6 (13), pp. 68–82.
6. 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, 2017, pp. 47–52. (In Russian).
7. Grinkevich V.A. Sintez regul'yatora toka dlya elementa Pel't'e [Current controller design for Peltier element]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 16–39. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-16-39.
8. Yurkevich V.D. Sintez nelineynykh sistem s ShIM v kanale upravleniya na osnove metoda razdeleniya dvizhenii [Design of nonlinear control systems with pulse-width modulation via time-scale separation]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2012, no. 1-1 (25), pp. 127–130.
9. Yurkevich V.D. Mnogokanal'nye sistemy upravleniya. Sintez lineynykh 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. 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.

12. Okhotkin G.P., Romanova E.S. Analiz zakonov kommutatsii klyuchi mostovoi skhemy impul'snogo preobrazovatelya [Analysis of commutation laws switches of bridge circuit of pulse converter]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta – Bulletin of the Chuvash University*, 2012, no. 3, pp. 142–149.

13. Sorokin G.A. Fil'try nizhnikh chastot [Filters of the lower frequencies]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika – Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 100–107.

14. Makfuzova A.I., Travin D.D., Filimonova A.A. Termoelementy kak dopolnitel'nye istochniki energii na orbital'noi stantsii [Thermoelements as additional energy source in orbital station]. *Nauchnye issledovaniya: ot teorii k praktike – Scientific research: from theory to practice*, 2015, no. 5 (6), pp. 262–263.

15. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki*. Ch. 1 [Fundamentals of power electronics. Pt. 1]. Novosibirsk. NSTU Publ., 1999. 199 p.

16. 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.

Для цитирования:

Гринкевич В.А. Синтез регулятора тока для термостоллика на основе элемента Пельтье // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 3–4 (96). – С. 33–52. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-33-52.

For citation:

Grinkevich V.A. Sintez regulatora toka dlya termostolika na osnove elementa Pel't'e [Current controller design for temperature controlled stage based on Peltier element]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3–4 (96), pp. 33–52. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-33-52.