

ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPPUTER ENGINEERING  
AND CONTROL

УДК 51-7: 62-52

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-39-60

## **Синтез регулятора для нелинейных объектов с запаздыванием методом разделения движений с применением критериев устойчивости\***

**В.А. ГРИНКЕВИЧ**

630501, РФ, Новосибирская область, Новосибирский район, Краснообск, а/я 463,  
Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН

[grinkevich-vova@mail.ru](mailto:grinkevich-vova@mail.ru)

Регуляторы и обратная связь применяются во многих технических задачах (например, поддержание заданной температуры внутри термостата, стабилизация скорости вращения электродвигателя). Для синтеза регуляторов широко применяются различные методы (например, метод разделения движений, частотный метод, процедура Циглера–Никольса). Однако частотный метод применяется для линейных объектов с пренебрежимо малым запаздыванием. При применении процедуры Циглера–Никольса не задается требуемое качество переходного процесса. При управлении объектов с запаздыванием иногда применяют упредитель Смита. Однако при не полностью известной математической модели применение упредителя Смита может быть затруднено. Существует работа, где рассматривается применение метода разделения движений с запаздыванием. Однако предложенный в той работе метод расчета требует решения системы из четырех нелинейных уравнений для объекта второго порядка. Поэтому в настоящей работе исследуется возможность более простого способа расчета регулятора, а именно возможность применения критерия Михайлова при синтезе регулятора по методу разделения движений для нелинейных объектов с запаздыванием. Также в статье рассмотрено применение критерия Найквиста с более простой процедурой расчета, чем предложенная ранее. В статье сравниваются значения коэффициентов регулятора, полученных с применением критерия Найквиста и критерия Михайлова. Критерий Михайлова и критерий Найквиста применяются для оценки устойчивости подсистемы быстрых движений. В статье рассматривается вывод формул расчета параметров регулятора, синтезируемого с помощью метода разделения движений, для нелинейных объектов с запаздыванием первого и второго порядка с применением критерия Михайлова. Исследуются переходные процессы с помощью численного моделирования. Приведены графики процессов. Выяснено, какими параметрами регулятора нужно улучшать качество переходных процессов при наличии запаздывания. Результаты этой работы могут быть применены при проектировании самонастраивающихся регуляторов для объектов с запаздыванием. Нелинейными объектами с запаздыванием являются элемент Пельтье, стенд прочностных испытаний летательных аппаратов, термостат, оборудование для проката металла. Приводятся годографы Михайлова для объектов с запаздыванием.

---

\* Статья получена 23 сентября 2020 г.

**Ключевые слова:** объект с запаздыванием, нелинейный объект, метод разделения движений, критерий Михайлова, годограф Михайлова, критерий Найквиста, регулятор, элемент Пельтье

## ВВЕДЕНИЕ

Существуют задачи, где требуется управление процессами. Например, в термостатах [1] требуется поддержание заданной температуры. В автономных источниках электропитания [2–4] требуется стабилизация выходного напряжения. Для исследования реакции растения на тепловое воздействие применяется термостоллик [5], который может генерировать температурный профиль [6]. Для таких задач требуется применение обратной связи и расчет регулятора [7–9]. Также применение обратной связи и регулятора применяется для автоматизации технологических процессов и производств [10].

Метод разделения движений [5, 7, 11–14] широко применяется при синтезе регуляторов для линейных и нелинейных объектов управления. В учебном пособии [7] расписывается расчет регулятора для линейных объектов без запаздывания. Для линейных объектов с запаздыванием в учебном пособии рекомендуется применять предиктор Смита [15]. Однако для нелинейных объектов с нестационарными параметрами и отсутствием полной информации о математической модели применение предиктора Смита может не гарантировать заданное качество переходного процесса. Применение метода разделения движений для нелинейных объектов рассматривается в работах [5–14]. В статье [5] рассматривается расчет регулятора температуры для генератора температурного профиля на основе элемента Пельтье с применением метода разделения движения и эмпирической подстройкой общего коэффициента для снижения колебательности, возникаемой из-за наличия запаздывания в объекте управления. Однако эмпирические методы [16] не всегда являются эффективными. В статье [12] рассматривается применение метода разделения движений для объекта с запаздыванием с применением критерия Найквиста. Однако для объекта второго порядка способ, предложенный в статье [12], требует решения систем четырех нелинейных уравнений, что является затрудненным.

Поэтому в настоящей работе рассматривается расчет регулятора для нелинейных объектов с запаздыванием с помощью метода разделения движений и критерия Михайлова [8], а также расчет регулятора с применением критерия Найквиста [8], но с более простой процедурой, чем в [12]. Однако для объекта второго порядка рассмотрен способ с применением системы из двух нелинейных уравнений, в отличие от изложенного в [12]. Проведено численное моделирование. Приведены графики переходных процессов. Предложенные методы могут быть использованы для расчета регулятора для термостоллика на основе элемента Пельтье и других устройств с запаздыванием.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является исследование возможности применения критерия Михайлова для оценки устойчивости подсистемы быстрых движений, вывод формул для расчета параметров регулятора для нелинейных объектов

первого и второго порядка с запаздыванием с помощью метода разделения движений с применением критерия Михайлова и сравнение параметров регулятора, полученных по критерию Найквиста, с параметрами, полученными по критерию Михайлова.

В работе [5] предложена задача «Проектирование самонастраивающегося регулятора» для элемента Пельтье. Результаты указанной работы могут быть использованы при проектировании самонастраивающихся регуляторов, автоматизации расчета регуляторов и иметь эффективность выше, чем эмпирические методы [16].

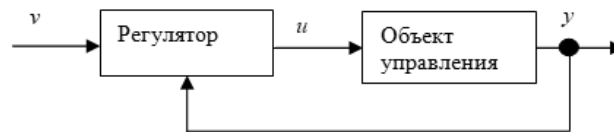


Рис. 1. Структурная схема системы управления с обратной связью

Fig. 1. Block diagram of the feedback control system

Схема систем управления с обратной связью показана на рис 1.

## 2. РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТА ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО КРИТЕРИЮ МИХАЙЛОВА

В учебном пособии [7] рассматривается вывод математической модели регулятора, рассчитываемого по методу разделения движений, для объекта первого порядка.

Уравнение объекта первого порядка имеет вид

$$\frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t) + M(t),$$

где  $y$  – выходная величина объекта управления;  $t$  – время;  $a_0$  – параметр, учитывающий постоянную времени переходного процесса;  $b_0$  – коэффициент передачи;  $u$  – управляющее воздействие;  $M$  – возмущение. Для нелинейного объекта  $b_0$  не является постоянным коэффициентом и может зависеть от  $y$ ,  $u$ ,  $t$ . Однако  $b_0$  и его производная по времени должны меняться в ограниченном диапазоне значений.

Уравнение регулятора для следящей системы первого порядка имеет вид

$$\mu \frac{du(t)}{dt} = k_0 \left( \frac{y_d(t) - y(t)}{T_d} + \frac{d}{dt}(y_d(t) - y(t)) \right), \quad (1)$$

где  $\mu$  – малый параметр;  $k_0$  – общий коэффициент регулятора;  $y_d$  – желаемая (заданная) выходная величина;  $T_d$  – желаемая постоянная времени.

Уменьшение параметра  $\mu$  приводит к формированию быстрых процессов по управляющему воздействию  $u$  и медленных процессов по выходной величине  $y$ . При этом  $\mu > 0$ .

В учебном пособии [7] рекомендуется выбирать  $b_0 k_0 = 1$  для систем без запаздывания. При таком выборе постоянная времени контура быстрых движений  $T_f$  равна малому параметру  $\mu$ . Для обеспечения требуемого качества переходного процесса по выходной величине  $y$  необходимо выполнение следующего условия:

$$T_d / T_f = \eta, \quad \eta \geq 10,$$

где  $\eta$  – степень разделения движений.

Однако при наличии запаздывания может отсутствовать возможность обеспечения  $\eta \geq 10$ . Также при наличии запаздывания выбор  $b_0 k_0 = 1$  при  $\mu = T_d / \eta$  и  $\eta \geq 10$  может быть невозможным. Однако при  $\eta$  в диапазоне от 2,5 до 10 переходные процессы по выходной величине могут с небольшим отклонением соответствовать заданным требованиям, и в таком случае может повыситься реакция системы на возмущение.

Уравнение объекта первого порядка с запаздыванием имеет вид

$$\frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t - t_{\text{зап}}) + M(t), \quad (2)$$

где  $t_{\text{зап}}$  – время запаздывания. Подставляя (2) в (1), получим

$$\mu \frac{du(t)}{dt} = k_0 \left( \frac{y_d(t) - y(t)}{T_d} + \frac{dy_d(t)}{dt} - (-a_0 y(t) + b_0 u(t - t_{\text{зап}}) + M(t)) \right).$$

Запишем последнее уравнение в виде

$$\mu \frac{du(t)}{dt} = -k_0 b_0 u(t - t_{\text{зап}}) + \psi, \quad (3)$$

где

$$\psi = k_0 \left( \frac{y_d(t) - y(t)}{T_d} + \frac{dy_d(t)}{dt} - (-a_0 y(t) + M(t)) \right).$$

В статье [12] рассматривался расчет регулятора по методу разделения движений для систем с запаздыванием с применением критерия Найквиста. Однако способ, предложенный в статье [12], для систем второго порядка сводится к решению системы из четырех нелинейных уравнений, что является затруднительным. В связи с этим в настоящей статье рассматривается применение критерия Михайлова для расчета регулятора по методу разделения движений для систем с запаздыванием.

Структура регулятора, описываемого уравнением (1), показана на рис 2, для которого  $k_p = 1/\mu$ ,  $k_i = 1/(\mu T_d)$ ,  $\mu = T_d / \eta$ ,  $\eta = 10$ . Коэффициент  $k_0$  необходимо выбрать таким, чтобы контур быстрых движений был устойчивым, имел низкую колебательность и переходные процессы в контуре медленных движений соответствовали заданным требованиям.

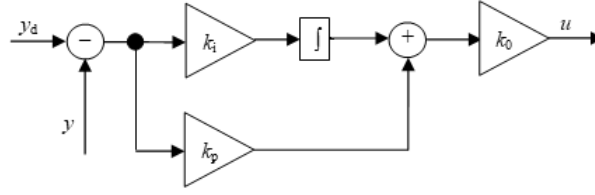


Рис. 2. Структурная схема следящего ПИ-регулятора

Fig. 2. Block diagram of the tracking PI-controller

Необходимым условием для обеспечения требуемого качества переходного процесса в подсистеме медленных движений является устойчивость и низкая колебательность подсистемы быстрых движений.

Обозначим  $k_1 = k_0 b_0$  и введем быстрое время  $t_f = t / \mu$ . В таком случае уравнение (3) можно записать для быстрого времени в виде

$$\frac{du(t_f)}{dt_f} = -k_1 u \left( t_f - \frac{t_{\text{зап}}}{\mu} \right) + \psi. \quad (4)$$

На интервале быстрого времени переменные  $y_d$ ,  $y$ ,  $M$ , входящие в  $\psi$ , рассматриваются как постоянные величины. Выполним преобразование Лапласа для уравнения (4):

$$su = -k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s} u + \psi.$$

Далее получим передаточную функцию контура быстрых движений

$$W(s) = \frac{u(s)}{\psi(s)} = \frac{1}{s + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}}. \quad (5)$$

Знаменатель передаточной функции (5) имеет вид

$$F(s) = s + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}.$$

После замены  $s$  на  $\omega i$ , где  $i$  – мнимая единица, получим

$$F(\omega i) = \omega i + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)\omega i}. \quad (6)$$

Запишем (6) в виде

$$F(\omega i) = \omega i + k_1 (\cos(-t_{\text{зап}}\omega / \mu) + \sin(-t_{\text{зап}}\omega / \mu)i).$$

Для устойчивости системы первого порядка без запаздывания необходимо, чтобы годограф Михайлова [8] начинался на вещественной оси в точке  $a_1 > 0$  и стремился к бесконечности в первом квадранте (рис 3). Для систем с запаздыванием, описываемых передаточной функцией (5), при  $k_1 > 0$  годограф Михайлова имеет вид, показанный на рис. 4 и 5. Для устойчивости таких систем необходимо, чтобы годограф Михайлова начинался на вещественной оси в точке  $k_1 > 0$  и не проходил через четвертый квадрант (рис. 4, а) или проходил через четвертый квадрант и через точку на интервале от 0 до  $k_1$ ,

переходя в первый квадрант (рис. 4, б). Если годограф Михайлова для системы с запаздыванием, описываемой передаточной функцией (5), начинается на вещественной оси в точке  $k_1 > 0$ , затем проходит в четвертый квадрант и через точку  $(0, 0)$  переходит во второй квадрант (рис. 5, а), то система находится на границе устойчивости. Если годограф Михайлова для системы с запаздыванием, описываемой передаточной функцией (5), начинается на вещественной оси в точке  $k_1 > 0$ , затем проходит в четвертый квадрант, потом через мнимую ось проходит в третий квадрант (рис. 5, б), то система неустойчива. Если годограф Михайлова не обращается в отрицательную мнимую полуплоскость (рис. 4, а), то система обладает большим запасом устойчивости, чем в случае, показанном на рис. 4, б, поэтому при выборе  $k_1$  воспользуемся случаем на рис. 4, а:

$$\omega i + \sin(-t_{\text{зап}} \omega / \mu) i > 0, \quad (7)$$

$$\omega > k_1 \sin(t_{\text{зап}} \omega / \mu).$$

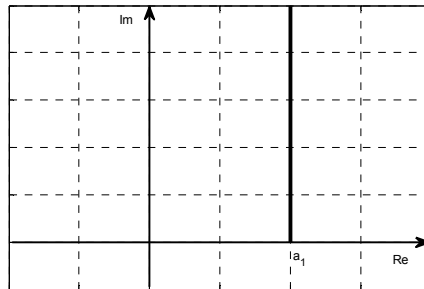


Рис. 3. Годограф Михайлова для устойчивой системы первого порядка без запаздывания

Fig. 3. The Mikhailov hodograph of the steady state first-order system without a transport delay

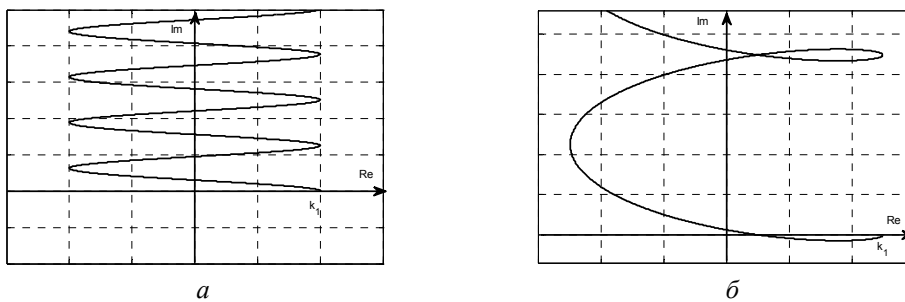


Рис. 4. Годограф Михайлова для устойчивой системы, описываемой передаточной функцией (5):

а – с большим запасом устойчивости; б – с меньшим запасом устойчивости

Fig. 4. The Mikhailov hodograph of the steady state system described by the transfer function (5):

a is further from the edge of a steady state; б is nearer to the edge of a steady state

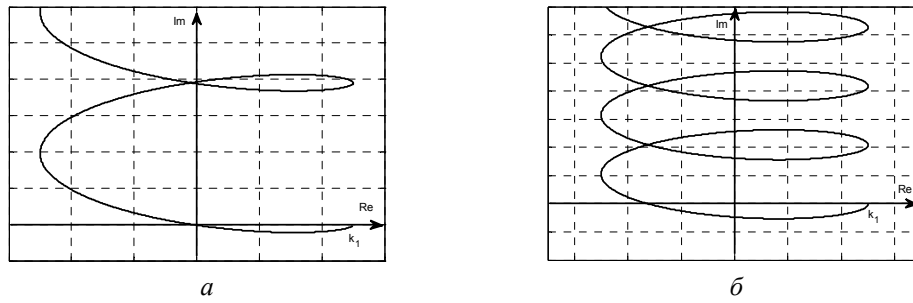


Рис. 5. Годограф Михайлова для системы первого порядка, описываемой передаточной функцией (5):

*a* – система на границе устойчивости; *б* – неустойчивая система

Fig. 5. The Mikhailov hodograph of the first-order system described by the transfer function (5):

*a* is system on the edge of a steady state; *b* is system a non steady state

Из математики известно, что если при каких-либо значениях  $\omega$  значение синуса больше значения линейной функции, то значение синуса будет больше при значениях  $\omega \approx 0$ . Также известно, что при  $t_{\text{зап}} \omega / \mu \approx 0$  имеет место  $\sin(t_{\text{зап}} \omega / \mu) \approx t_{\text{зап}} \omega / \mu$ . В результате получим

$$\omega > k_1 t_{\text{зап}} \omega / \mu. \quad (8)$$

Таким образом,  $k_1 < \mu / t_{\text{зап}}$ .

Далее проведем численное моделирование для объекта управления, описываемого уравнением (2), для которого  $a_0 = 0,25$ ,  $b_0 = 0,6 + 0,05u(t - t_{\text{зап}}) + 0,1y(t)$ ,  $t_{\text{зап}} = 1,5$  с. В таком случае  $k_0 = k_1 / (0,6 + 0,05u(t - t_{\text{зап}}) + 0,1y(t))$ . Зададим желаемую постоянную времени переходного процесса  $T_d = 4$  с. В таком случае  $\mu = 0,4$  с,  $k_p = 2,5$ ,  $k_i = 0,625$ .

По результатам численного моделирования (рис. 12–14) рекомендуется выбирать  $k_1 = 0,5\mu / t_{\text{зап}}$ , однако этот выбор не является четко обязательным, и при расчете регулятора для конкретного объекта может потребоваться дополнительная подстройка  $k_1$ .

### 3. РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТА ВТОРОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО КРИТЕРИЮ МИХАЙЛОВА

В учебном пособии [7] рассматривается вывод математической модели регулятора, рассчитываемого по методу разделения движений, для объекта второго порядка.

Уравнение объекта второго порядка имеет вид

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t) + M(t),$$

где  $y$  – выходная величина объекта управления;  $t$  – время;  $a_1, a_0$  – параметры, характеризующие переходный процесс;  $b_0$  – коэффициент передачи;  $u$  – управляющее воздействие;  $M$  – возмущение. Для нелинейного объекта  $b_0$  не является постоянным коэффициентом и может зависеть от  $y, u, t$ . Однако  $b_0$  и его производная по времени должны меняться в ограниченном диапазоне значений.

Обозначим  $\theta(t) = y_d(t) - y(t)$ . Уравнение регулятора для следящей системы второго порядка имеет вид

$$\mu^2 \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + d_1 \mu \frac{du(t)}{dt} = k_0 \left( \frac{\theta(t)}{T_d^2} + \frac{a_d}{T_d} \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} \right), \quad (9)$$

где  $\mu$  – малый параметр;  $d_1 = 2$ ;  $k_0$  – общий коэффициент регулятора;  $y_d$  – желаемая (заданная) выходная величина;  $T_d$  – желаемая постоянная времени;  $a_d = 2$ .

Уравнение объекта второго порядка с запаздыванием имеет вид

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t - t_{\text{зап}}) + M(t). \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), получим

$$\mu^2 \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + d_1 \mu \frac{du}{dt} = -k_0 b_0 u(t - t_{\text{зап}}) + \psi(t), \quad (11)$$

$$\psi = k_0 \left( \frac{\theta(t)}{T_d^2} + \frac{a_d}{T_d} \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{d^2 y_d(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy_d(t)}{dt} + a_0 y_d(t) - M(t) \right).$$

Введем  $k_1 = k_0 b_0$  и запишем уравнение (11) для быстрого времени в виде

$$\frac{d^2 u(t_f)}{dt_f^2} + d_1 \frac{du(t_f)}{dt_f} = -k_1 u \left( t_f - \frac{t_{\text{зап}}}{\mu} \right) + \psi. \quad (12)$$

На интервале быстрого времени переменные  $y_d, y, M$ , входящие в  $\psi$ , рассматриваются как постоянные величины.

Структура регулятора, описываемого уравнением (9), приведена на рис. 6. В уравнении (9)  $k_p, k_i, k_d, \tau$  рассчитываются по формулам:

$$k_p = \frac{a_d d_1 T_d - \mu}{\mu d_1^2 T_d^2}, \quad k_i = \frac{1}{\mu d_1 T_d^2}, \quad k_d = \frac{\mu^2 + d_1^2 T_d^2 - a_d d_1 \mu T_d}{\mu d_1^3 T_d^2}, \quad \tau = \frac{\mu}{d_1}.$$



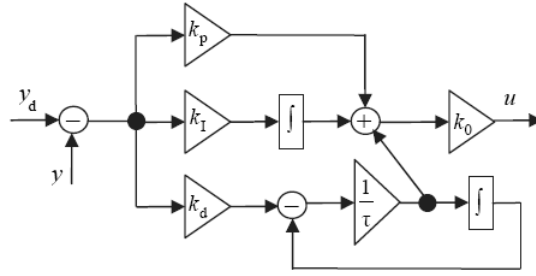


Рис. 6. Структурная схема следящего ПИД-регулятора

Fig. 6. Block diagram of the tracking PID-controller

Выполним преобразование Лапласа для уравнения (12):

$$s^2 u(s) + d_1 s u = -k_0 b_0 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s} u + \psi.$$

Далее получим передаточную функцию контура быстрых движений

$$W(s) = \frac{u(s)}{\psi(s)} = \frac{1}{s^2 + d_1 s + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}}. \quad (13)$$

Знаменатель передаточной функции (13) имеет вид

$$F(s) = s^2 + d_1 s + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}.$$

После замены  $s$  на  $\omega i$  получим

$$F(\omega i) = -\omega^2 + d_1 \omega i + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)\omega i}. \quad (14)$$

Запишем (14) в виде

$$F(\omega i) = -\omega^2 + d_1 \omega i + k_1 (\cos(-(t_{\text{зап}}/\mu)\omega) + \sin(-(t_{\text{зап}}/\mu)\omega)i).$$

Для устойчивости системы второго порядка без запаздывания необходимо, чтобы годограф Михайлова начинался на вещественной оси в точке  $a_1 > 0$ , затем пошел в первый квадрант, далее через мнимую ось – во второй квадрант и стремился к бесконечности во втором квадранте (рис. 7). Для систем с запаздыванием, описываемых передаточной функцией (13), при  $k_1 > 0$  годограф Михайлова имеет вид, показанный на рис. 8 и 9. Для устойчивости таких систем необходимо, чтобы годограф Михайлова начинался на вещественной оси в точке  $k_1 > 0$ , затем пошел в первый квадрант (рис. 8, а), далее через мнимую ось – во второй квадрант и стремился к бесконечности во втором квадранте, или начинался на вещественной оси в точке  $k_1 > 0$ , затем пошел в четвертый квадрант, затем, пересекая вещественную ось в точке на интервале от 0 до  $k_1$ , пошел в первый квадрант, далее

через мнимую ось – во второй квадрант и стремился к бесконечности во втором квадранте (рис. 8, б). Если годограф Михайлова для системы с запаздыванием, описываемой передаточной функцией (13), начинается на вещественной оси в точке  $k_1 > 0$ , затем проходит в четвертый квадрант и через точку  $(0, 0)$  переходит во второй квадрант (рис. 9, а), то система находится на границе устойчивости. Если годограф Михайлова для системы с запаздыванием, описываемой передаточной функцией (13), начинается на вещественной оси в точке  $k_1 > 0$ , затем проходит в четвертый квадрант, потом через мнимую ось проходит в третий квадрант (рис. 9, б), то система неустойчива. Если годограф Михайлова не обращается в отрицательную мнимую полуплоскость (рис. 8, а), то система обладает большим запасом устойчивости, чем в случае на рис. 8, б, поэтому при выборе  $k_1$  воспользуемся случаем на рис. 8, а:

$$d_1 \omega i + k_1 \sin(-(t_{\text{зап}} / \mu) \omega) i > 0, \quad (15)$$

$$d_1 \omega > k_1 \sin((t_{\text{зап}} / \mu) \omega).$$

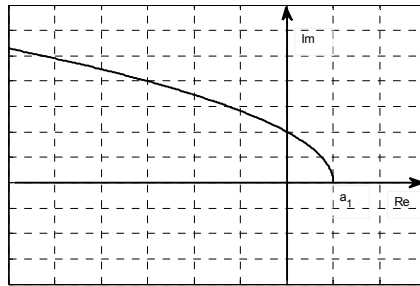


Рис. 7. Годограф Михайлова для устойчивой системы второго порядка без запаздывания

Fig. 7. The Mikhailov hodograph the steady state second-order system without a transport delay

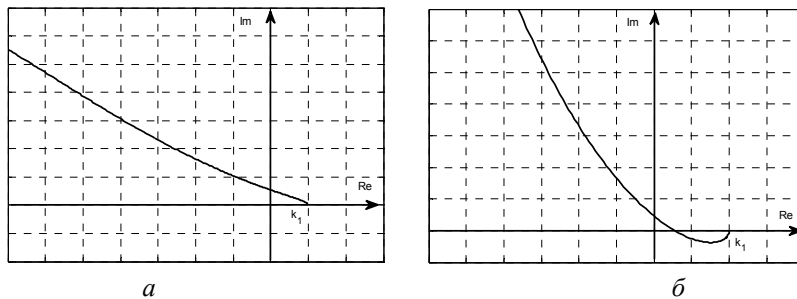


Рис. 8. Годограф Михайлова для устойчивой системы, описываемой передаточной функцией (13):

а – с большим запасом устойчивости; б – с меньшим запасом устойчивости

Fig. 8. The Mikhailov hodograph of the steady state system described by the transfer function (13):

a is further from the edge of a steady state; б is nearer to the edge of a steady state

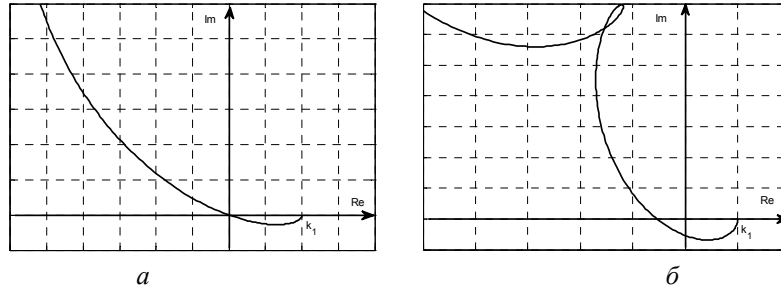


Рис. 9. Годограф Михайлова для системы второго порядка, описываемой передаточной функцией (13):

$a$  – система на границе устойчивости;  $b$  – неустойчивая система

Fig. 9. The Mikhailov hodograph of the second-order system described by the transfer function (13):

$a$  is system on the edge of a steady state;  $b$  is system a non steady state

Из (15) видно, что устойчивость и качество переходных процессов возможно обеспечить с помощью параметров  $d_1$ ,  $k_1$  или  $\mu$ . Однако требуется исследовать влияние параметров  $d_1$ ,  $k_1$  и  $\mu$  на процессы по управляемой величине  $y$ .

Из математики известно, что если при каких-либо значениях  $\omega$  значение синуса больше значения линейной функции, то значение синуса будет больше при значениях  $\omega \approx 0$ . Также известно, что при  $t_{\text{зап}} \omega / \mu \approx 0 \sin(t_{\text{зап}} \omega / \mu) \approx t_{\text{зап}} \omega / \mu$ . В результате получим

$$d_1 \omega > k_1 (t_{\text{зап}} / \mu) \omega. \quad (16)$$

Из (16) получим, что при заданных  $k_1 = 1$ ,  $\mu = 0,1T_d$  нужно выбирать  $d_1 > k_1 t_{\text{зап}} / \mu$ ; при заданных  $d_1 = 2$ ,  $\mu = 0,1T_d$  нужно выбирать  $k_1 < d_1 \mu / t_{\text{зап}}$ ; при заданных  $d_1 = 2$ ,  $k_1 = 1$  нужно выбирать  $\mu > k_1 t_{\text{зап}} / d_1$ .

В качестве нелинейного объекта второго порядка с запаздыванием возьмем математическую модель устройства на основе элемента Пельтье, полученную в статье [17]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T}{dt^2} + \frac{1}{T_c} \frac{dT}{dt} = \frac{b_1}{T_c} T(t - t_{\text{зап}}) I(t - t_{\text{зап}}) + \frac{b_2}{T_c} \times \\ \times I^2(t - t_{\text{зап}}) + \frac{b_3}{T_c} (T_{\text{ос}}(t - t_{\text{зап}}) - T(t - t_{\text{зап}})), \end{aligned} \quad (17)$$

где  $T$  – температура рабочей поверхности лабораторного термостоллика на основе элемента Пельтье, измеряемая в кельвинах;  $T_c = 2,56$  с;  $b_1 = 0,00157$  А<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>;  $I$  – протекаемый через элемент Пельтье ток;  $b_2 = 0,0261$  А<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>;  $b_3 = 0,0615$  с<sup>-1</sup>;  $T_{\text{ос}}$  – температура окружающей среды, измеряемая в кельвинах.

Математическую модель (17) можно описать уравнением (10), для которого  $a_1 = 1/T_c$ ,  $a_0 = b_3/T_c$ ,  $b_0 = (b_1T(t-t_{\text{зап}}) + b_2I(t-t_{\text{зап}}))/T_c$ ,  $M(t) = b_3T_{\text{ос}}(t-t_{\text{зап}})/T_c$ ,  $y = T$ ,  $u = I$ . В таком случае  $k_0 = k_1T_c / (b_1T(t-t_{\text{зап}}) + b_2I(t-t_{\text{зап}}))$ . Зададим желаемую постоянную времени переходного процесса  $T_d = 4$  с.

По результатам численного моделирования (рис. 15–20) рекомендуется выбирать  $k_1 = 0,5d_1\mu/t_{\text{зап}}$ ,  $d_1 = 2$ ,  $\mu = 0,1T_d$  или  $d_1 = 2k_1t_{\text{зап}}/\mu$ ,  $k_1 = 1$ ,  $\mu = 0,1T_d$ . Однако этот выбор не является четко обязательным, и при расчете регулятора для конкретного объекта может потребоваться дополнительная подстройка  $k_1$ . Исходя из результатов численного моделирования не рекомендуется снижать колебательность системы путем выбора параметра  $\mu$  при  $k_1 = 1$  и  $d_1 = 2$ .

#### 4. РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ КРИТЕРИЯ НАЙКВИСТА

Структурная схема подсистемы быстрых движений, описываемой уравнением (4), для объекта первого порядка показана на рис. 10.

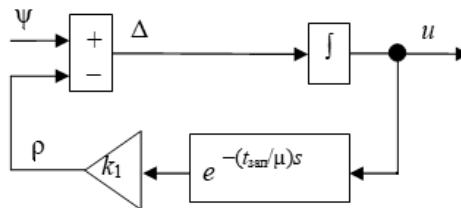


Рис. 10. Структурная схема подсистемы быстрых движений для объекта первого порядка

Fig. 10. Block diagram of the fast motions subsystem for a first-order object

Согласно логарифмическому критерию Найквиста [8] для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы ФЧХ разомкнутой системы не достигала значения  $-\pi$  рад или достигала его четное количество раз на частотах, где ЛАЧХ больше нуля. При этом выходом разомкнутой системы является сигнал  $\rho$ , а входом – сигнал  $\Delta$  (рис. 10).

Запишем передаточную функцию разомкнутой системы для схемы на рис. 10:

$$W_{\rho/\Delta}(s) = \frac{k_1}{s} e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}, \quad (18)$$

$$W(\omega i) = \frac{k_1}{\omega i} e^{-(t_{\text{зап}}\omega/\mu)i}.$$

Если ФЧХ разомкнутой системы, описываемой передаточной функцией (18), больше  $-\pi$  на частоте, где ЛАЧХ равна нулю (АЧХ равна единице), то замкнутая система устойчивая:

$$\left| \frac{k_1}{\omega_c i} e^{-(t_{\text{зап}} \omega_c / \mu) i} \right| = 1. \quad (19)$$

Из (19) получаем  $k_1 = \omega_c$ . ФЧХ системы, описываемой передаточной функцией (18),

$$\varphi(\omega_c) = -0,5\pi - t_{\text{зап}} \omega_c / \mu > -\pi. \quad (20)$$

Перенесем  $-\pi$  в правую часть неравенства (20) и обозначим

$$\varphi_0(\omega_c) = 0,5\pi - t_{\text{зап}} \omega_c / \mu,$$

где  $\varphi_0$  – область устойчивости по фазе. Поскольку при  $\varphi_0 = 0,5\pi$  частота среза будет равна нулю, то получим область устойчивости  $0 < \varphi_0 < 0,5\pi$ . Выберем  $\varphi_0 = 0,9$ . При  $\varphi_0 = 0,9$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $t_{\text{зап}} = 1,5$  с получим  $k_1 = 0,18$ .

При расчете  $k_1$  с применением критерия Михайлова было проведено численное моделирование при  $k_1 = 0,26$ ,  $k_1 = 0,13$  и  $k_1 = 0,013$  и выяснено, что подходящим является  $k_1 = 0,13$ . Следовательно, при применении критерия Найквиста требуется исследовать переходные процессы с разными значениями  $\varphi_0$  и выбрать наиболее подходящий  $\varphi_0$ .

Структурная схема подсистемы быстрых движений, описываемой уравнением (12), для объекта второго порядка показана на рис. 11.

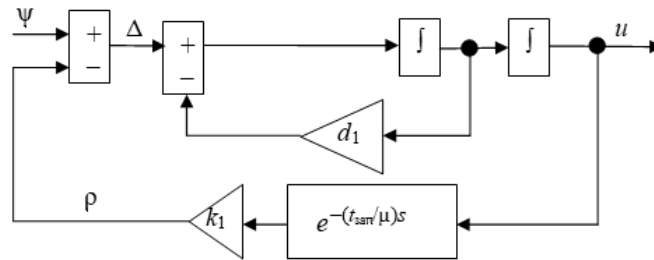


Рис. 11. Структурная схема подсистемы быстрых движений для объекта второго порядка

Fig. 11. The block diagram of the fast motions subsystem for a second-order object

Запишем передаточную функцию разомкнутой системы для схемы на рис. 11:

$$W(s) = \frac{\rho(s)}{\Delta(s)} = \frac{k_1}{(s + d_1)s} e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}, \quad (21)$$

$$W(\omega i) = \frac{k_1}{(\omega i + d_1)\omega i} e^{-(t_{\text{зап}}\omega/\mu)i}.$$

Если ФЧХ разомкнутой системы, описываемой передаточной функцией (21), больше  $-\pi$  на частоте, где ЛАЧХ равна нулю (АЧХ равна единице), то замкнутая система устойчивая:

$$\left| \frac{k_1}{(\omega_c i + d_1)\omega_c i} e^{-(t_{\text{зап}}\omega_c/\mu)i} \right| = 1. \quad (22)$$

Из (21) получаем

$$k_1 = \omega_c \sqrt{\omega_c^2 + d_1^2}.$$

ФЧХ системы, описываемой передаточной функцией (21),

$$\varphi(\omega_c) = -\arctg(\sqrt{1/d_1}\omega_c) - 0,5\pi - t_{\text{зап}}\omega_c/\mu > -\pi. \quad (23)$$

Перенесем  $-\pi$  в правую часть неравенства (23) и обозначим

$$\varphi_0(\omega_c) = -\arctg(\sqrt{1/d_1}\omega_c) + 0,5\pi - t_{\text{зап}}\omega_c/\mu,$$

где  $\varphi_0$  – область устойчивости по фазе. Поскольку при  $\varphi_0 = 0,5\pi$  частота среза будет равна нулю, то получим область устойчивости  $0 < \varphi_0 < 0,5\pi$ . При  $\varphi_0 = 0,9$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $t_{\text{зап}} = 1,5$  с получим  $k_1 = 0,27$ . Рассчитанный коэффициент  $k_1$  по критерию Найквиста для объекта второго порядка почти соответствует  $k_1$ , рассчитанному при применении критерия Михайлова, при  $\varphi_0 = 0,9$ . При расчете  $d_1$  при заданных  $k_1$  и  $\mu$  решить систему из уравнений (22) и (23) будет сложнее.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 5.1. ДЛЯ ОБЪЕКТА ПЕРВОГО ПОРЯДКА

На рис. 12–14 показаны процессы в системе управления объектом первого порядка. Из результатов численного моделирования видно, что при уменьшении  $k_1$  снижается колебательность системы (рис. 12 и 13), однако при сильном уменьшении  $k_1$  процессы не соответствуют требованиям (рис. 15). Подходящим выбором является  $k_1 = 0,5\mu/t_{\text{зап}}$ .

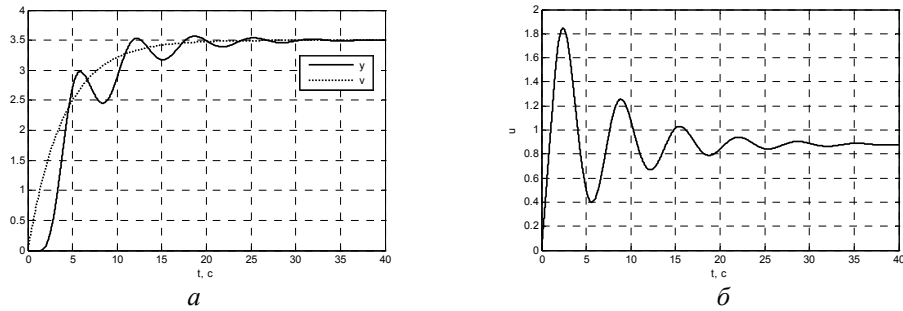


Рис. 12. Переходные процессы в системе управления объекта первого порядка при  $k_1 = \mu / t_{\text{зап}}$ :

$a$  – по выходной величине  $y$ ;  $b$  – по управляющему воздействию  $u$

Fig. 12. Transient processes in the first-order object control system at  $k_1 = \mu / t_{\text{зап}}$ :

$a$  is the output signal  $y$ ;  $b$  is the actuating signal  $u$

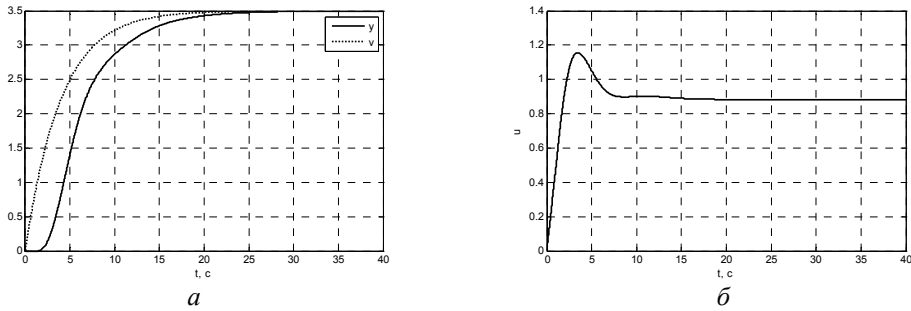


Рис. 13. Переходные процессы в системе управления объекта первого порядка при  $k_1 = 0,5\mu / t_{\text{зап}}$ :

$a$  – по выходной величине  $y$ ;  $b$  – по управляющему воздействию  $u$

Fig. 13. Transient processes in the first-order object control system at  $k_1 = 0,5\mu / t_{\text{зап}}$ :

$a$  is the output signal  $y$ ;  $b$  is the actuating signal  $u$

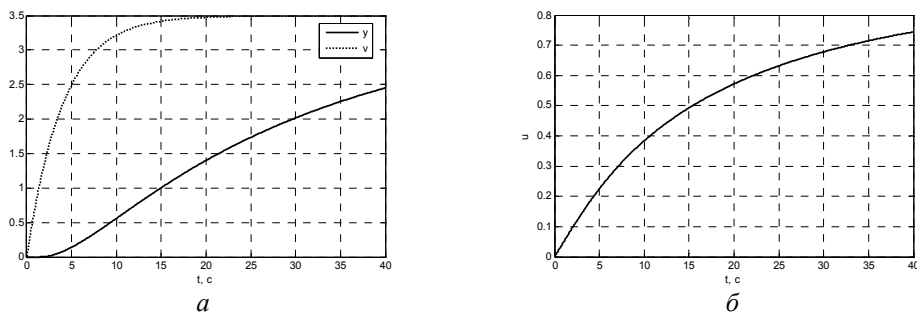


Рис. 14. Переходные процессы в системе управления объекта первого порядка при  $k_1 = 0,05\mu / t_{\text{зап}}$ :

$a$  – по выходной величине  $y$ ;  $b$  – по управляющему воздействию  $u$

Fig. 14. Transient processes in the first-order object control system at  $k_1 = 0,05\mu / t_{\text{зап}}$ :

$a$  is the output signal  $y$ ;  $b$  is the actuating signal  $u$

## 5.2. ДЛЯ ОБЪЕКТА ВТОРОГО ПОРЯДКА

На рис. 15–20 показаны процессы в системе управления объектом второго порядка, температура приводится в градусах Цельсия, однако при расчетах использовалась температура в кельвинах.

Из результатов численного моделирования видно, что при  $d_1 = 2$ ,  $\mu = 0,4$  с при уменьшении  $k_1$  снижается колебательность системы (рис. 15 и 16), однако при сильном уменьшении  $k_1$  процессы не соответствуют требованиям (рис. 17). Подходящим выбором является  $k_1 = 0,5\mu / t_{\text{зап}}$ . Также колебательность можно снижать путем увеличения параметра  $d_1$  при  $k_1 = 1$ ,  $\mu = 0,4$  с (рис. 18 и 19). Из графиков на рис. 20 видно, что не следует уменьшать колебательность системы управления с помощью изменения параметра  $\mu$ .

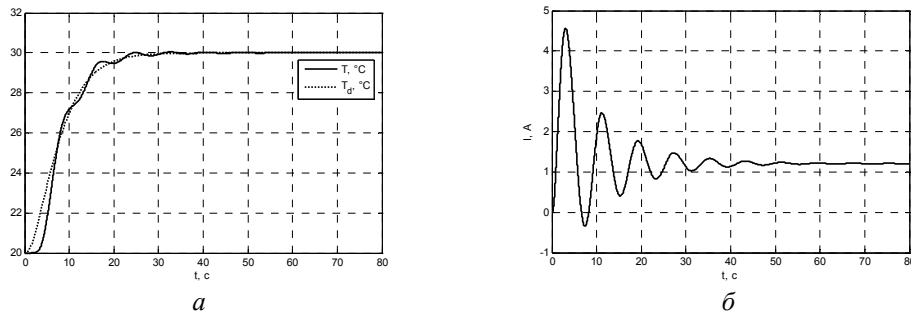


Рис. 15. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при  $d_1 = 2$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $k_1 = d_1\mu / t_{\text{зап}}$ :

$a$  – по температуре  $T$  (выходной величине);  $b$  – по току (управляющему воздействию)

Fig. 15. Transient processes in the second-order object control system at  $d_1 = 2$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $k_1 = d_1\mu / t_{\text{зап}}$ :

$a$  is temperature  $T$  processes (output signal);  $b$  is current processes (actuating signal)

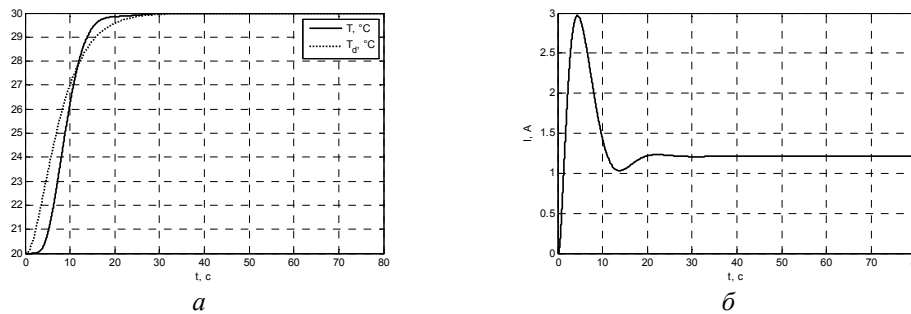


Рис. 16. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при  $d_1 = 2$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $k_1 = 0,5d_1\mu / t_{\text{зап}}$ :

$a$  – по температуре  $T$  (выходной величине);  $b$  – по току (управляющему воздействию)

Fig. 16. Transient processes in the control system of a second-order object at  $d_1 = 2$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $k_1 = 0,5d_1\mu / t_{\text{зап}}$ :



$a$  is temperature  $T$  processes (output);  $\bar{b}$  is current processes (actuating signal)

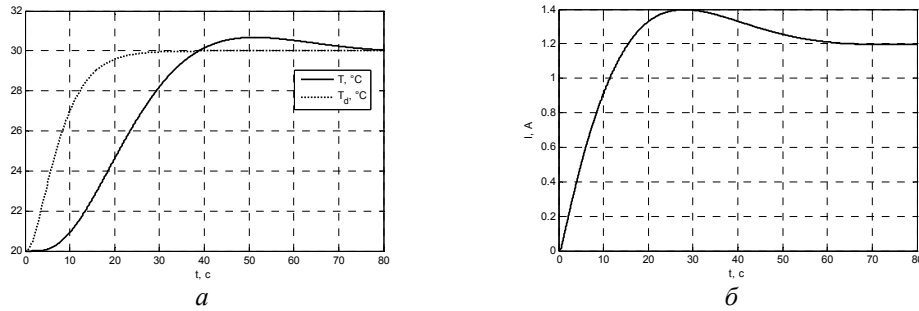


Рис. 17. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при  $d_1 = 2$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $k_1 = 0,05d_1\mu / t_{\text{зап}}$ :

$a$  – по температуре  $T$  (выходной величине);  $\bar{b}$  – по току (управляющему воздействию)

Fig. 17. Transient processes in the second-order object control system at  $d_1 = 2$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $k_1 = 0,05d_1\mu / t_{\text{зап}}$ :

$a$  is temperature  $T$  processes (output);  $\bar{b}$  is current processes (actuating signal)

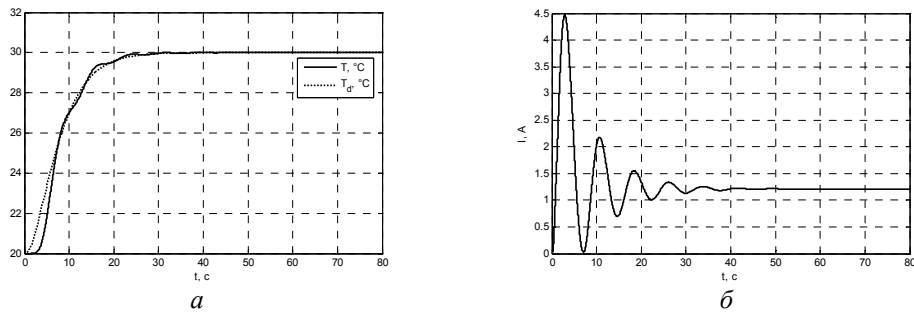


Рис. 18. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при  $d_1 = k_1 t_{\text{зап}} / \mu$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $k_1 = 1$ :

$a$  – по температуре  $T$  (выходной величине);  $\bar{b}$  – по току (управляющему воздействию)

Fig. 18. Transient processes in the second-order object control system at  $d_1 = k_1 t_{\text{зап}} / \mu$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $k_1 = 1$ :

$a$  is  $T$  temperature processes (output);  $\bar{b}$  is current processes (actuating signal)

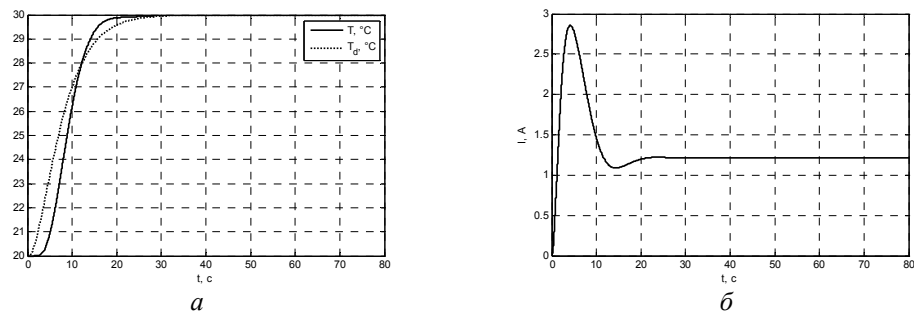


Рис. 19. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при  $d_1 = 2k_1 t_{\text{зап}} / \mu$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $k_1 = 1$ :

$a$  – по температуре  $T$  (выходной величине);  $\bar{b}$  – по току (управляющему воздействию)

Fig. 19. Transient processes in the second-order object control system at  $d_1 = 2k_1 t_{\text{зап}} / \mu$ ,  $\mu = 0,4$  с,  $k_1 = 1$ :

$a$  is  $T$  temperature processes (output);  $\delta$  is current processes (actuating signal)

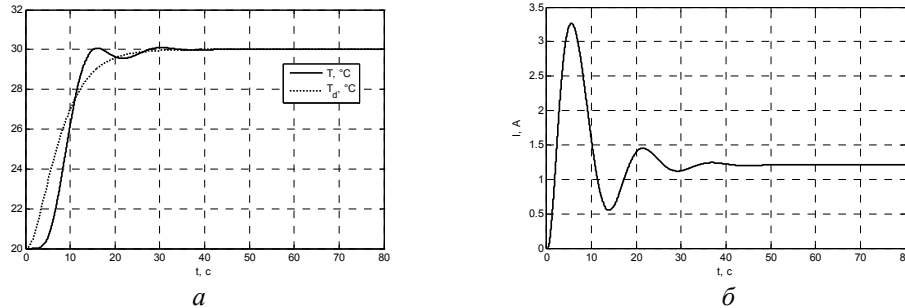


Рис. 20. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при  $d_1 = 2$ ,  $\mu = 2k_1 t_{\text{зап}} / d_1$ ,  $k_1 = 1$ :

$a$  – по температуре  $T$  (выходной величине);  $\delta$  – по току (управляющему воздействию)

Fig. 20. Transient processes in the second-order object control system at  $d_1 = 2$ ,  $\mu = 2k_1 t_{\text{зап}} / d_1$ ,  $k_1 = 1$ :

$a$  is temperature  $T$  processes (output),  $\delta$  is current processes (actuating signal)

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам работы видно, что метод разделения движений может быть применен для расчета регулятора для нелинейных систем с запаздыванием даже в случаях, когда невозможно обеспечить степень разделения движений более или равную 10. Переходные процессы соответствуют требованиям (рис. 13, 16, 18, 19). Даны рекомендации по расчету параметра  $k_1$  для регулятора для объекта первого и второго порядка и по расчету параметра  $d_1$  для объекта второго порядка. При этом не рекомендуется регулировать качество переходных процессов изменением параметра  $\mu$  (см. рис. 20).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность применения критерия Михайлова для оценки устойчивости подсистемы быстрых движений. Выведены формулы для расчета параметров регулятора для нелинейных объектов первого и второго порядка с запаздыванием с помощью метода разделения движений. Синтезированы регуляторы для нелинейного объекта первого порядка с запаздыванием и второго порядка с запаздыванием с помощью метода разделения движений с применением критерия Михайлова и критерия Найквиста. Выполнено сравнение параметров регулятора, полученных при использовании критерия Найквиста и критерия Михайлова. Проведено численное моделирование. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании самонастраивающихся регуляторов для объектов с запаздыванием (например, для элемента Пельтье).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Опыт разработки и применения источников питания для систем автономного энергообеспечения / В.М. Алашкин, Ю.А. Батраков, Б.И. Туманов, А.Н. Кукушкин, П.И. Николенко, С.Д. Севрук, В.Г. Удалцов // Электрохимическая энергетика. – 2006. – Т. 6, № 3. – С. 160–161.
3. Аксенов Е.А., Юркевич В.Д. Синтез каскадной системы управления для преобразователя Кука // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 3 (81). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-7-20.
4. Shtein D.A., Klassen S.V., Klassen T.S., Konyakhin V.S. Multiport push-pull/S3R/S4R DC-DC converter for spacecraft power systems // 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Chemal, Russia, 2020. – P. 400–406. – DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153547.
5. 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.
6. Парфенов А. Температурный профиль конвекционной пайки. Что это такое? // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – № 2 (30). – С. 29–30.
7. Юркевич В.Д. Многоканальные системы управления. Синтез линейных систем управления с разнотемповыми процессами: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 183 с.
8. Востриков А.С., Французова Г.А., Гаврилов Е.Б. Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования: учебное пособие. – 5-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 476 с.
9. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического управления. – 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
10. Лускань О.А. Механизация и автоматизация производственных процессов на основе применения импульсных конвейеров с роликовым настилом // Механика XXI века. – 2010. – № 9. – С. 59–63.
11. 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.
12. Юркевич В.Д. Расчет типовых регуляторов для нелинейных систем с запаздыванием методом разделения движений // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1 (25). – С. 122–126.
13. Юркевич В.Д. Синтез нелинейных систем с ШИМ в канале управления на основе метода разделения движений // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1 (25). – С. 127–130.
14. Колегов М.А., Юркевич В.Д. Расчет параметров ПИ-регулятора для неаффинной по управлению системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – № 2 (64). – С. 13–18.
15. Жмудь В.А. Численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim: новые структуры и методы: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 259 с. – ISBN 978-5-7782-3063-7.
16. Оборудование. Технологии. Разработки: web-сайт. – URL: <http://mypractic.ru/> (дата обращения: 06.03.2021).
17. Гринкевич В.А. Идентификация устройства на основе элемента Пельтье методом наименьших квадратов // Доклады АН ВШ РФ. – 2020. – № 1–2 (46–47). – С. 17–27. – DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-17-27.

Гринкевич Владимир Анатольевич, научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агроботехнологий Российской академии наук. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления. Имеет 13 публикаций, в том числе 5 материалов конференций. 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 the automation control theory. He has 13 scientific publications including 5 conference proceedings. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-39-60

***Controller design by the motion separation method with applying stability criteria for non-linear objects with transport delays\****

V.A. GRINKEVICH

*Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies Russian Academy of Science, PO Box 463, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Novosibirsk District, 630501, Russian Federation*  
grinkevich-vova@mail.ru

**Abstract**

Controllers and feedback are applied for performing many technical tasks, for example, maintaining the desired temperature stabilization in the thermostat and speed electric motor stabilization. Different methods such as the time-scale separation method, the frequency-response design method, and the Ziegler–Nichols method are applied to design controllers. The Ziegler–Nichols method does not provide the required transient process quality. The Smith predictor is sometimes applied to control objects with a transport delay. However, it may be difficult to apply the Smith predictor when a mathematical model is not fully known. There is a paper where the application of the motion separation method with a delay is considered. However, the calculation method proposed in that work requires solving a system of four nonlinear equations for a second-order object. Therefore, in this paper, we investigate the possibility of a simpler method for calculating the controller, namely, the possibility of using the Mikhailov criterion in the synthesis of a controller by the motion separation method for nonlinear objects with a delay. Also, the application of the Nyquist stability criterion with a simpler than the proposed earlier calculation procedure is considered in the paper. The values of the regulator coefficients obtained using the Nyquist criterion and the Mikhailov criterion are compared. The Mikhailov criterion and the Nyquist criterion are applied to estimate the stability of the fast motions subsystem. The derivation of formulas to calculate the parameters of the controller designed by the motion separation method for first-order non-linear objects with transport delays and second-order non-linear objects with transport delays with the use of the Mikhailov criterion is also considered in the paper. Transient processes are studied by numerical simulation. Transient processes plots are also given. The parameters of the controller that are needed to improve the performance of transient processes in the presence of a delay are found. The Peltier element, an aircraft strength test stand, a thermostat, and equipment for metal rolling are non-linear control objects with a transport delay. The Mikhailov hodographs for objects with a transport delay are presented.

**Keywords:** object with transport delay, non-linear object, motion separation method, Mikhailov criterion, Mikhailov hodograph, Nyquist criterion, controller, Peltier element

---

\* Received 23 September 2020.

## REFERENCES

1. 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.
2. Alashkin V.M., Batrakov Yu.A., Tumanov B.I., Kukushkin A.N., Nikolenko P.I., Sevruk S.D., Udaltsov V.G. Opyt razrabotki i primeneniya istochnikov pitaniya dlya sistem avtonomnogo energosnabzheniya [Experience in the development and application of power supplies for autonomous power supply systems]. *Elektrokhimicheskaya energetika = Electrochemical Energetics*, 2006, vol. 6, no. 3, pp. 160–161.
3. Aksenov E.A., Yurkevich V.D. Sintez kaskadnoi sistemy upravleniya dlia preobrazovatelya Kuka [Design of cascaded control system for a Cuk converter]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (81), pp. 7–20. DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-7-20.
4. Shtein D.A., Klassen S.V., Klassen T.S., Konyakhin V.S. Multiport push-pull/S3R/S4R DC-DC converter for spacecraft power systems. *2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Chemal, Russia, 2020, pp. 400–406. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153547.
5. Grinkevich V.A. Sintez regulatora 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.
6. Parfenov A. Temperaturnyi profil' konveksionnoi paiki. Chto eto takoe? [Thermal profile of convection soldering. What is it?]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti = Technologies in Electronic Industry*, 2009, no. 2 (30), pp. 29–30.
7. 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.
8. Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A., Gavrillov E.B. *Osnovy teorii nepreryvnykh i diskretnykh sistem regulirovaniya* [The foundations of continuous and discrete control system theory]. 5th ed., revised and augmented. Novosibirsk, NSTU Publ., 2008. 476 p.
9. Besekerskii V.A., Popov E.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automation control theory]. 3rd ed. Moscow, Nauka Publ., 1975. 768 p.
10. Luskan' O.A. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov na osnove primeneniya impul'snykh konveierov s rolikovym nastilom [Mechanization and automation of production processes based on the use of impulse conveyors with roller decks]. *Mekhaniki XXI veku = Mechanical engineers to XXI century*, 2010, no. 9, pp. 59–63.
11. Grinkevich V.A. Sintez regulatora toka dlya termostolika na osnove elementa Pel'te [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.
12. Yurkevich V.D. Raschet tipovykh regulatorov dlya nelineinykh sistem s zapazdyvaniem metodom razdeleniya dvizhenii [PI and PID controller design for nonlinear systems with time delay via time-scale separation]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 1 (25), pp. 122–126.
13. Yurkevich V.D. Sintez nelineinykh 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 TUSUR University*, 2012, no. 1 (25), pp. 127–130.

14. Kolegov M.A., Yurkevich V.D. Raschet parametrov PI-regulyatora dlya neaffinnoi po upravleniyu sistemy [PI-controller design for nonaffine-in-control system]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 2 (64), pp. 13–18.

15. Zhmud' V.A. Chislennaya optimizatsiya zamknytykh sistem avtomaticheskogo upravleniya v programme VisSim: novye struktury i metody [Numerical optimization of locked system of automatic control in software VisSim: new structures and methods]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 259 p. ISBN 978-5-7782-3063-7.

16. *Oborudovanie. Tekhnologii. Razrabotki* [Equipment. Technologies. Developments]. Website. Available at: <http://mypractic.ru/> (accessed 06.03.2021).

17. Grinkevich V.A. Identifikatsiya ustroystva na osnove elementa Pel'te metodom naimen'shikh kvadratov [The identification of a device based on a Peltier element by the least squares method]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii* = *Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 17–27. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-17-27.

Для цитирования:

Гринкевич В.А. Синтез регулятора для нелинейных объектов с запаздыванием методом разделения движений с применением критериев устойчивости // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 39–60. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-39-60.

For citation:

Grinkevich V.A. Sintez regulyatora dlya nelineinykh ob"ektov s zapazdyvaniem metodom razdeleniya dvizhenii s primeneniem kriteriev ustoichivosti [Controller design by the motion separation method with applying stability criterions for non-linear objects with transport delays]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh* = *Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 39–60. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-39-60.