

Синтез робастных систем с ПИ2Д-регулятором для нелинейных объектов с переменными параметрами

Г. А. Французова

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: В данной работе рассматривается модификация типового ПИД-регулятора путем добавления дополнительного канала дифференцирования. Это позволяет расширить область применения типовых регуляторов на класс нелинейных нестационарных объектов второго порядка. В результате получается линейный регулятор с двойным дифференцированием, который принято называть ПИ2Д-регулятором. В работе предложено переносить дифференциальные составляющие в канал обратной связи, что позволяет устранить δ -подобные броски по управлению в системах стабилизации с таким регулятором. Показано, что такое распределение отдельных составляющих ПИ2Д-регулятора приводит к появлению в замкнутой системе двух контуров управления, каждый из которых может быть рассчитан отдельно. Внутренний контур системы содержит нелинейный объект управления, пропорциональную и две дифференциальные составляющие регулятора. Во внешнем контуре управления остается его интегральная составляющая. Исходя из полученной структуры системы, предложена процедура расчёта коэффициентов ПИ2Д-регулятора для нелинейного объекта второго порядка в два этапа. Поскольку структура внутреннего контура соответствует системе на основе метода локализации, то на первом этапе для расчета коэффициента пропорциональной составляющей рекомендовано использовать известные соотношения этого подхода. Показано, что в этом случае поведение внутреннего контура подчиняется линейному уравнению, которое определяют дифференциальные составляющие регулятора. В результате весь внешний контур управления является тоже линейным. Это позволяет на втором этапе для расчета остальных параметров ПИ2Д-регулятора применять модальный подход и формировать заданное распределение корней в системе. Показано, что рассчитанный по данной процедуре ПИ2Д-регулятор является робастным. Он полностью решает задачу стабилизации нелинейных нестационарных объектов второго порядка, подверженных действию внешних неконтролируемых возмущений. Основные свойства системы иллюстрируют результаты численного моделирования в среде *MatLab*.

Ключевые слова: ПИ2Д-регулятор, нелинейный объект, метод локализации, робастная система.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, одними из первых промышленных регуляторов являются типовые PID-регуляторы, которые до сих пор широко используются в промышленности и не утратили свою актуальность в настоящее время [1–7]. Причинами такой популярности являются их простота, изученность свойств и принципа действия, возможность их применения для решения большинства практических задач и низкая стоимость.

Однако, несмотря на большее число рекомендаций по настройке [2, 3, 5, 6], расчету [1, 4, 8] и оптимизации параметров типовых регуляторов [9, 21–29], универсальной методики их синтеза пока не предложено. В результате после расчета ПИД-регулятора приходится уточнять его параметры и осуществлять их ручную подстройку. В ситуации, когда существенное влияние оказывают внешние факторы (изменение нагрузки, температуры окру-

жающей среды и т. п.) или с течением времени изменяются параметры самого объекта, типовые регуляторы не всегда обеспечивают требуемое качество работы автоматической системы.

Для нелинейных объектов первого порядка типовой ПИД-регулятор позволяет полностью решить задачу стабилизации [10, 11]. Их применение для объектов более высокого порядка влечет за собой вынужденное ослабление требований к качеству процессов в системе, особенно при наличии в ней нелинейных элементов.

С целью расширения области применения ПИД-регулятора предлагаются различные его модификации: П2ИД [10], ПИ2Д [12], регулятор дробного порядка [13], регулятор с весовыми коэффициентами по ошибке и др. [2, 6, 14]. В первую очередь, преобразование регулятора предполагает надделение его свойством робастности [11–15].

Эффективным подходом к синтезу регуляторов для класса нелинейных объектов, функциони-

рующих в условиях действия внешних возмущений, является метод локализации [16–18]. Полученный в результате регулятор обладает свойством робастности как по отношению к нелинейным характеристикам объекта, так и к действию внешних возмущающих факторов.

В данной работе представлен ПИ2Д-регулятор, полученный путём добавления к типовому ПИД-регулятору дополнительного канала двойного дифференцирования [12]. Причем предложено выделить отдельные составляющие и переносить дифференциальный канал в обратную связь, что приводит к появлению в системе двух контуров управления. Процедуру расчёта коэффициентов ПИ2Д-регулятора предложено проводить в два этапа. Структура внутреннего контура соответствует системе на основе метода локализации, поэтому для его расчета можно использовать соотношения этого подхода [17–19]. При синтезе линейного внешнего контура управления предлагается применять процедуру модального метода синтеза.

Цель настоящей работы – исследовать возможности системы с ПИ2Д-регулятором и предложить процедуру расчёта коэффициентов регулятора для класса нелинейных нестационарных объектов второго порядка на основе соотношений метода локализации

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу стабилизации для нелинейного нестационарного объекта второго порядка, модель которого имеет вид

$$\ddot{y} = f(t, \dot{y}, y) + b(t, \dot{y}, y)u, \quad (1)$$

где $y \in R^1$ – выходная переменная объекта; $u \in R^1$ – управляющее воздействие; функции $f(t, \dot{y}, y)$ и $b(t, \dot{y}, y)$ – непрерывные и дифференцируемые, имеют ограниченные производные; их значения могут изменяться в рабочем диапазоне: $|f(\cdot)| \leq f_{\max}$,

$0 < b_{\min} \leq |b(\cdot)| \leq b_{\max}$ в зависимости от условий работы системы. Также на объект могут действовать возмущения, что отражает зависимость функций от времени.

Необходимо рассчитать линейный робастный регулятор для обеспечения требований, заданных к качеству процесса в системе в виде оценок времени переходного процесса, перерегулирования и допустимой ошибки в статике.

2. ОПИСАНИЕ РЕГУЛЯТОРА

Будем рассматривать модифицированный типовой ПИД-регулятор, к которому добавим канал двойного дифференцирования. В результате получим ПИ2Д-регулятор [12] с передаточной функцией вида

$$W_{PI2D}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_{D1}s + k_{D2}s^2 \quad (2)$$

где k_p , k_i , k_{D1} и k_{D2} – коэффициенты пропорциональной, интегральной¹ и дифференциальных² составляющих соответственно.

Основной проблемой при реализации как ПИД-так и ПИ2Д-регулятора являются дифференциальные составляющие [6, 11], наличие которых приводит к усилению влияния шума измерений и уменьшению соотношения «полезный сигнал/шум». Кроме того, при отработке ступенчатого входного сигнала на выходе таких регуляторов возникают дельта-подобные импульсы большой амплитуды, что может привести к серьёзным последствиям. Для уменьшения подобных эффектов используют специальные низкочастотные фильтры и переносят дифференциальную составляющую регулятора в обратную связь [11, 12, 18].

Рассмотрим возможности ПИ2Д-регулятора, у которого выделим две составляющие: интегральную составляющую и пропорционально-дифференциальную часть. В результате его передаточную функцию (2) представим в виде

$$W_{PI2D}(s) = k_{D2} \left[\frac{c_0}{s} + (s^2 + c_2s + c_1) \right], \quad (3)$$

где введены следующие обозначения:

$$c_0 = \frac{k_i}{k_{D2}}, \quad c_1 = \frac{k_p}{k_{D2}}, \quad c_2 = \frac{k_{D1}}{k_{D2}}. \quad (4)$$

Для режимов отработки входа и слежения дифференциальную составляющую в системе с ПИ2Д-регулятором перенесём в канал обратной связи, как показано на Рис. 1.

¹ Редакция рекомендует пользоваться термином «интегрирующий», поскольку термин «интегральный» часто используется в технике в значении «объединяющий», «суммирующий» (ср.: «интегральная микросхема») (Прим. ред.).

² Редакция рекомендует пользоваться термином «дифференцирующий», поскольку термин «дифференциальный» часто используется в технике для обозначения операции вычитания (ср.: «дифференциальный усилитель») (Прим. ред.).

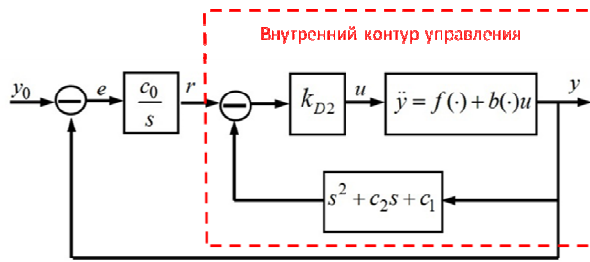


Рис. 1. Схема системы с преобразованным ПИ2Д-регулятором

Как видно, система содержит нелинейный объект управления и линейный регулятор. Она имеет два контура управления, поэтому предлагается рассчитывать регулятор в два этапа.

3. РАСЧЕТ ПИ2Д-РЕГУЛЯТОРА

При рассмотрении структуры системы (Рис. 1) видно, что внутренний контур полностью соответствует структуре системы, основанной на методе локализации [17, 19]. Поскольку этот метод ориентирован на класс нелинейных нестационарных объектов, предлагается сначала рассчитывать внутренний контур с учетом соотношений метода локализации.

В соответствии с представленной структурой системы запишем уравнение пропорционально-дифференциальной части регулятора (3) в виде

$$u = k_{D2} [r - c_1 y - c_2 \dot{y} - \ddot{y}]$$

или

$$u = k_{D2} [F(y, \dot{y}, r) - \ddot{y}], \quad (5)$$

где $F(y, \dot{y}, r) = r - c_1 y - c_2 \dot{y}$ можно рассматривать как функцию, отражающую желаемое поведение внутреннего контура системы.

Подставляя (5) в уравнение объекта (1), получим после преобразования описание контура в форме

$$\ddot{y} = \frac{1}{1 + b(\cdot)k_{D2}} f(t, \dot{y}, y) + \frac{1}{1 + b(\cdot)k_{D2}} F(y, \dot{y}, r)$$

Отсюда видно, что в пределе при $k_{D2} \rightarrow \infty$ поведение контура описывает желаемое уравнение

$$\ddot{y} = F(y, \dot{y}, r). \quad (6)$$

Для практических расчетов k_{D2} будем использовать рекомендации метода локализации [17], т. е. выбирать коэффициент в зависимости от требуемой точности в виде

$$b_{\min} k_{D2} \approx 20 \dots 100. \quad (7)$$

Подчинив динамику внутреннего контура линейному уравнению (6), его модель можно представить в виде передаточной функции

$$W_{\text{inner}}(s) = \frac{y}{r} = \frac{1}{s^2 + c_2 s + c_1}.$$

Переходим теперь к расчету внешнего контура (Рис. 2), который уже не зависит от нестационарности параметров и нелинейных характеристик объекта управления (1).

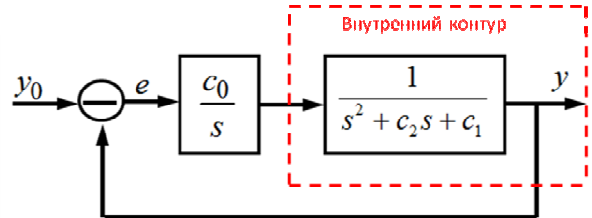


Рис. 2. Структурная схема внешнего контура

Для вычисления коэффициентов регулятора $c_i, i = \overline{0, 2}$ используем аппарат линейной теории управления, а именно: модальный подход [20]. В соответствии с ним определим характеристическое уравнение контура в виде

$$A(s) = s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0 = 0. \quad (8)$$

Теперь на основе заданных требований к процессам системы сформируем желаемое характеристическое уравнение

$$D(s) = s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0 = 0. \quad (9)$$

Как видно из сравнения (8) и (9), коэффициенты ПИ2Д-регулятора в форме (3) равны коэффициентам желаемого характеристического уравнения (9), т. е. $c_i = d_i, i = \overline{0, 2}$. Отсюда по соотношениям (4) и (7) вычисляются исходные параметры ПИ2Д-регулятора:

$$\begin{cases} k_I = d_0 \cdot k_{D2}, & k_P = d_1 \cdot k_{D2}, \\ k_{D1} = d_2 \cdot k_{D2}, & b_{\min} k_{D2} \approx 20 \dots 100. \end{cases} \quad (10)$$

4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ПИ2Д-РЕГУЛЯТОРА

Реализация ПИ2Д-регулятора предполагает применение для получения дифференциальных составляющих специальных устройств. С этой целью предлагается использовать при отсутствии шума измерений линейное звено (так называемый, дифференцирующий фильтр [16, 17, 20]) со следующей передаточной функцией:

$$W_f(s) = \frac{1}{\mu^2 s^2 + 2d\mu s + 1}, \quad (11)$$

где μ – постоянная времени устройства; d – коэффициент демпфирования. Выбор численного значения μ должен обеспечивать переходные процессы в фильтре на порядок быстрее, чем в системе. Коэффициент демпфирования выбирается из условия отсутствия колебаний, т. е., как правило, в диапазоне $d \approx (0,5 \dots 0,7)$.

При использовании устройства (11) пропорционально-дифференциальная часть регулятора в канале обратной связи описывается передаточной функцией

$$W_{DP}(s) = \frac{s^2 + c_2 s + c_1}{\mu^2 s^2 + 2d\mu s + 1},$$

реализация которой на вызывает затруднений. Структурная схема системы представлена на Рис. 3.

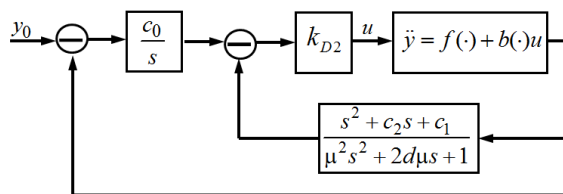


Рис. 3. Схема системы с учетом реального дифференцирования

Следует отметить, что при наличии шума измерений следует повышать порядок устройства (11) аналогично соответствующим рекомендациям метода локализации.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим свойства системы с PI2D-регулятором (3) и объектом, модель которого имеет вид

$$\ddot{y} = a_1(t)y\dot{y} - a_2(t)y^2 + b(t)u + M(t),$$

где параметры могут изменяться в диапазоне: $-2 \leq a_1 \leq 5$; $0 \leq a_2(t) \leq 2$; $4 \leq b \leq 6$; возмущение $M(t) = M_m(t - t_0)$; $M_m = 10$; $t_0 = 1c$.

Требования к переходным процессам системы следующие: $t_n \leq 4c$; $\sigma \leq 5\%$; статическая ошибка отсутствует. В соответствии с ними сформировано эталонное уравнение (9) в виде

$$D(s) = s^3 + 6s^2 + 16s + 16 = 0.$$

Таким образом, параметры регулятора в канале обратной связи следующие: $c_0 = 10$, $c_1 = 13$ и $c_2 = 6$. Общий коэффициент k_{D2} выбран из соотношения $b_{\min}k_{D2} = 50$, т.е. $k_{D2} = 12$. Дифференцирующий фильтр (10) имеет параметры $\mu = 0.01$ и $d = 0.5$.

Рассмотрим работоспособность системы, схема моделирования которой в среде MatLab (при отсутствии возмущений) показана на Рис. 4.

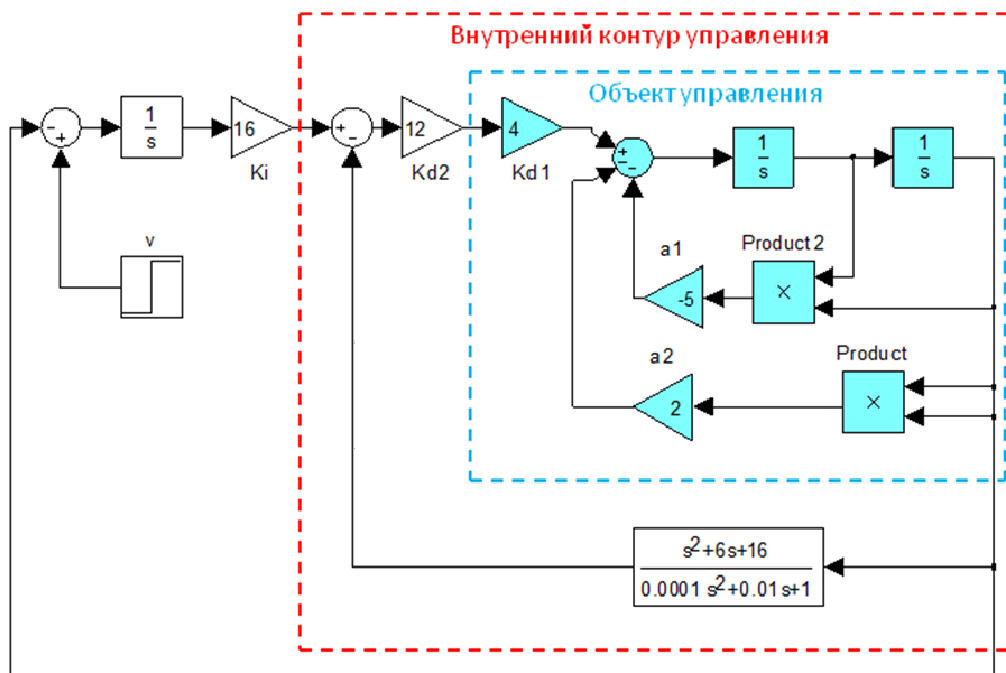


Рис. 4. Схема моделирования замкнутой системы

На Рис. 5 показана желаемая переходная характеристика системы, соответствующая эталонному уравнению (9).

На следующих графиках представлена переходная характеристика (Рис. 6) и управляющее воздействие в системе (Рис. 7 и Рис. 8) при постоянных значениях параметров и отсутствии внешних возмущений.

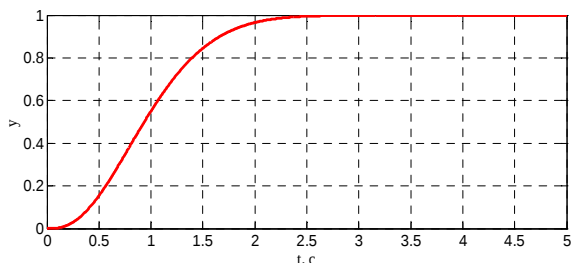


Рис. 5. Эталонная характеристика системы

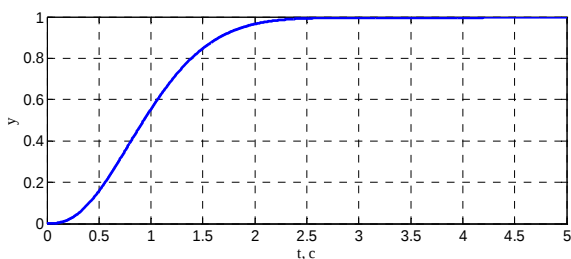


Рис. 6. Переходная характеристика замкнутой системы

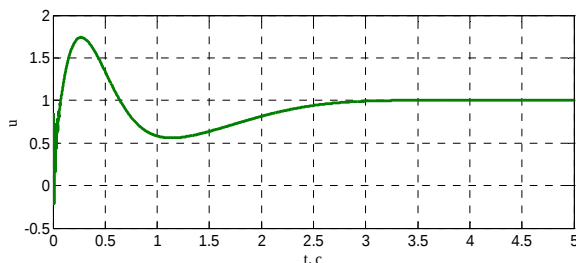


Рис. 7. Изменение управляющего воздействия в системе

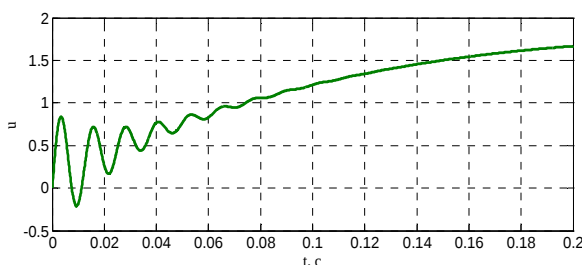


Рис. 8. Начальный участок управляющего воздействия

Как видно, данный регулятор обеспечивает качество процессов, соответствующее заданным требованиям, т.е. выход системы (Рис. 6) совпадает с заданной точностью с эталонным уравнением (Рис. 5). Колебания на начальном участке управления (Рис. 7 и Рис. 8) – это быстрые процессы, обусловленные наличием в системе

специального дифференцирующего устройства (10) с малой постоянной времени.

Графики, представленные на Рис. 9 и Рис. 10, иллюстрируют вид неконтролируемого возмущения $M(t)$ и изменение управления при его наличии соответственно. Вид изменения во времени параметра $a_1(t)$ представлен на Рис. 11, а соответствующий ему характер изменения управляющего воздействия показан на Рис. 12.

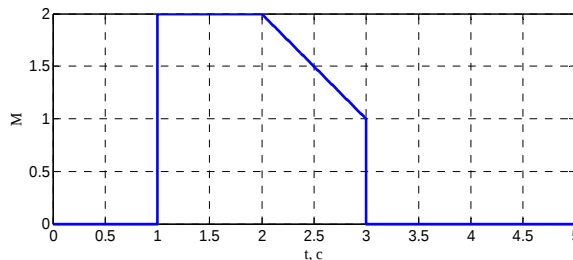


Рис. 9. График изменения возмущения $M(t)$

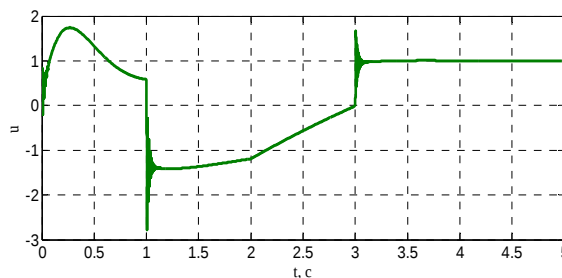


Рис. 10. Влияние возмущения на управление

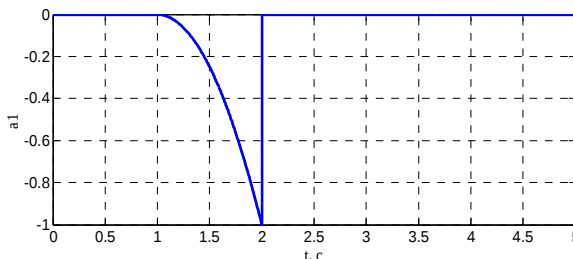


Рис. 11. График изменения параметра $a_1(t)$

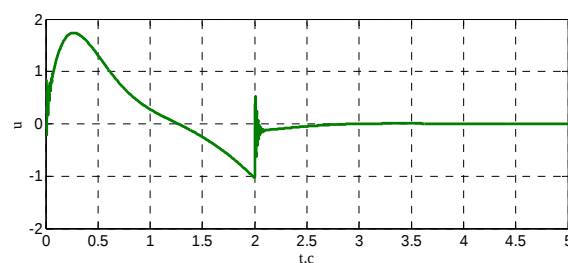


Рис. 12. Влияние нестационарного параметра $a_1(t)$ на управляющее воздействие

Важно отметить, что как наличие возмущения $M(t)$, так и нестационарность параметра $a_1(t)$ никак не отражается на выходной характеристике

системы; она и в этих случаях имеет вид, представленный на *Рис. 6*.

Этот факт обусловлен тем, что нестационарные параметры и внешнее возмущение быстро отрабатываются во внутреннем контуре системы, как хорошо заметно по *Рис. 10* и *Рис. 12*. При этом даже существенное изменение параметров нелинейного объекта никак не влияет на выходную переменную системы с регулятором. Процесс остается неизменным и соответствует с требуемой точностью *Рис. 5*.

Таким образом, рассчитанный ПИД-регулятор является робастным и обеспечивает инвариантность системы по отношению к изменению параметров объекта в широком диапазоне, а также к действию внешних возмущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена возможность применения соотношений метода локализации к расчету параметров ПИД-регулятора, который можно использовать для решения технической задачи стабилизации систем управления низкого порядка. Преимущество представленного подхода заключается в том, что коэффициенты рассчитанного регулятора не зависят от свойств объекта, что позволяет обеспечить требуемое динамическое качество процессов в системе в условиях нелинейных характеристик и нестационарных параметров объекта, а также действию внешних неконтролируемых возмущений.

Заметим также, что предложенный тип регуляторов может эффективно работать в режиме отработки ступенчатых входных воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Никулин Е.Ф. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем. СПб: БХВ-Петербург, 2004. 631 с.
- [2] Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. СТА, 2006. № 4. С. 66–74.
- [3] Шляйхер М. Техника автоматического регулирования для практиков. - Москва: ЛУМО, 2006. 273 с.
- [4] Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. Пер. с англ. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
- [5] Справочные материалы по ПИД-регулятору в среде Simulink. Mathworks Inc. 2015. URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.html>.
- [6] Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для ВУЗов – 5ое издание. перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
- [7] Земцов Н.С., Французова Г.А. Синтез ПИД регулятора для системы управления прямоточным котлом. Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т.16. № 9. С 631–636.
- [8] Ефимов С.В., Замятин С.В., Гайворонский С.А. Синтез ПИД-регулятора с учетом расположения нулей и полюсов системы автоматического регулирования. Известия Том. политех. ун-та. 2010. Т.317. № 5. С. 102–107.
- [9] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Taichenachev A.V., Semibalamut V.M. Calculation of PID-regulator for MISO system with the method of numerical optimization. Intern. Siberian conf. on control and communications (SIBCON), Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana. 2017. p. 670–676.
- [10] Востриков А.С. Проблема синтеза регуляторов для систем автоматизации: состояние и перспективы. Автометрия. 2010. Т.46. № 2(37). С. 3–19.
- [11] Востриков А.С., Французова Г.А. Синтез PID-регулятора для нелинейных нестационарных объектов. Автометрия. 2015. №5. С. 53–60.
- [12] Kotova E. P., Frantsuzova G. A. Application PI2D controller in automatic control systems. Intern. Siberian conf. on control and communications (SIBCON), Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana. 2017. p. 692–695.
- [13] Жмудь В.А., Загорин А.Н. Дробно-степенные ПИД-регуляторы и пути их упрощения с повышением эффективности управления. Автоматика и программная инженерия, 2013. № 1 (3). С. 30–36.
- [14] Сидорова А.А., Малышенко А.М. Анализ эффективности алгоритмов автоматической настройки адаптивных промышленных ПИД-регуляторов. Известия Томского политехнического университета. 2011. Т.318, №5, С. 110–115.
- [15] Французова Г.А., Земцов Н.С. Расчет параметров робастного ПИД-регулятора на основе метода локализации. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника, 2013. Т. 13, № 4. С. 134–138.
- [16] Востриков А.С., Уткин В.И., Французова Г.А. Системы с производной вектора состояния в управлении. Автоматика и телемеханика, 1982. № 3. С. 22–25.
- [17] Востриков А.С. Синтез систем регулирования методом локализации. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 252 с.
- [18] Французова Г.А., Толстоконева Е.П., Шилкова Н.Ю. Сравнительный анализ возможностей типовых регуляторов и регуляторов по методу локализации. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 29–34.
- [19] Французова Г.А. Синтез двухконтурной астатической системы экстремального регулирования на основе принципа локализации. Сибирский журнал промышленной математики. 2004. Т. VII. № 1. С. 145–150.
- [20] Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. М.: Юрайт, 2017.

- [21] Жмудь В.А., Ядрышников О. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29.
- [22] Воевода А.А., Жмудь В.А. Астатическое управление объектами с нестационарными матричными передаточными функциями методом приближенного обращения функциональных комплексных матриц. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 2. С. 3–8.
- [23] Васильев В.А., Воевода А.А., Жмудь В.А., Хассуонех В.А. Цифровые регуляторы: целевые функции настройки, выбор метода интегрирования, аппаратная реализация. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 4. С. 3–10.
- [24] Жмудь В.А., Французова Г.А., Востриков А.С. Динамика мехатронных систем. Учебное пособие. Новосибирск, 2014.
- [25] Востриков А.С., Воевода А.А., Жмудь В.А. Эффект понижения порядка системы при управлении по методу разделения движений. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2005. № 3. С. 3–13.
- [26] Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. Modern Key Technologies in Automatics: Structures and Numerical Optimization of Regulators. В сб.: Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012 2012. С. 6357804.
- [27] Жмудь В.А., Семибаламут В.М., Ишимцев Р.Ю. Регулятор доля системы с обратной связью. Патент на изобретение RUS 2368933 17.03.2008.
- [28] Жмудь В.А. О методах расчета ПИД-регуляторов. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 2 (4). С. 118–124.
- [29] Жмудь В.А., Семибаламут В.М. Регулятор доля систем с обратной связью. Патент на полезную модель RUS 76719 04.03.2008.



Галина Александровна Французова – д.т.н., профессор кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета.

630073, Новосибирск,
пр. Карла Маркса, 20

E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru.

Статья получена 10 марта 2018 г.

Robust Systems Synthesis with PI2D-controller for Nonlinear Objects with Variable Parameters

G.A.Frantsuzova

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Annotation: A PID-controller modification by means of an additional differentiation channel is considered in this paper. This modification allows us to extend the typical controller application to a class of the nonlinear second-order plants with time-variable parameters. As a result, we obtain a linear controller with double differentiation and it is usually called a PI2D controller. In this paper, we propose to transfer the differential components to the feedback channel. This allows us to eliminate the δ -similar control throws in the stabilization systems with such controller. It is shown that the PI2D-controller components distribution results in the appearance of the two control loops in the closed system, and each circuit can be calculated separately. The inner circuit contains the nonlinear control plant, proportional and two differential controller components. Only its integral component remains in the outer control loop. In accordance with the received system structure, the calculating controller procedure for a second-order nonlinear plant consists of the two stages. The inner loop corresponds to the system based on the localization method, therefore, at the first stage, it is recommended to use the known relationships of this approach for a calculating the proportional component coefficient. It is shown that in this case the inner loop behavior corresponds to a linear equation that determines the controller differential components. As a result, the outer control loop is also linear so we can apply the modal approach in the second step for the remaining controller parameters calculating and to form a given root distribution in the closed system. It is shown that the PI2D controller calculated according to this procedure is robust. As a result, this approach makes it possible to stabilize the second-order nonlinear non-stationary plant under the external uncontrolled disturbances action. The numerical simulation results in MatLab illustrate the main system properties.

Key words: PI2D-controller, non-linear object, localization method, robust system.

REFERENCES

- [1] Nikulin Ye.F. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Chastotnyye metody analiza i sinteza sistem. SPb: BKHV–Peterburg, 2004. 631 s.
- [2] Denisenko V.V. PID-regulyatory: printsipy postroyeniya i modifikatsii. STA, 2006. № 4. S. 66–74.
- [3] Shlyaykher M. Tekhnika avtomaticheskogo regulirovaniya dlya praktikov. - Moskva: JUMO, 2006. 273 s.

- [4] Dorf R., Bishop R. *Sovremennyye sistemy upravleniya*. Per. s angl. M.: Laboratoriya bazovykh znaniy, 2002. 832 c.
- [5] *Spravochnyye materialy po PID-regulyatoru v srede Simulink*. Mathworks Inc. 2015. URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.html>.
- [6] Rotach V.YA. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik dlya VUZov – 5oye izdaniye. pererab. i dop.* M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2008.
- [7] Zemtsov N.S., Frantsuzova G.A. *Sintez PID regulyatora dlya sistemy upravleniya pryamotokhnym kotlom. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye*. 2015. T.16. № 9. S 631–636.
- [8] Yefimov S.V., Zamyatin S.V., Gayvoronskiy S.A. *Sintez PID-regulyatora s uchetom raspolozheniya nuley i polyusov sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya*. *Izvestiya Tom. politekh. un-ta*. 2010. T.317. № 5. S. 102–107.
- [9] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Taichenachev A.V., Semibalamut V.M. Calculation of PID-regulator for MISO system with the method of numerical optimization. Intern. Siberian conf. on control and communications (SIBCON), Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana. 2017. p. 670–676.
- [10] Vostrikov A.S. Problema sinteza regulyatorov dlya sistem avtomatiki: sostoyaniye i perspektivy. *Avtometriya*. 2010. T.46. № 2(37). S. 3–19.
- [11] Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. *Sintez PID-regulyatora dlya nelineynykh nestatsionarnykh ob'yektov*. *Avtometriya*. 2015. №5. S. 53–60.
- [12] Kotova E. P., Frantsuzova G. A. Application PI2D controller in automatic control systems. Intern. Siberian conf. on control and communications (SIBCON), Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana. 2017. p. 692–695.
- [13] Zhmud' V.A., Zavorin A.N. Drobno-stepennyye PID-regulyatory i puti ikh uproshcheniya s povysheniyem effektivnosti upravleniya. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*, 2013. № 1 (3). S. 30–36.
- [14] Sidorova A.A., Malyshenko A.M. Analiz effektivnosti algoritmov avtomaticheskoy nastroyki adaptivnykh promyshlennykh PID-regulyatorov. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2011. T.318, №5, S. 110–115.
- [15] Frantsuzova G.A., Zemtsov N.S. Raschet parametrov robastnogo PID-regulyatora na osnove metoda lokalizatsii. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika*, 2013. T. 13, № 4. S. 134–138.
- [15] Vostrikov A.S., Utkin V.I., Frantsuzova G.A. *Sistemy s proizvodnoy vektora sostoyaniya v upravlenii*. *Avtomatika i telemekhanika*, 1982. № 3. S. 22–25.
- [16] Vostrikov A.S. *Sintez sistem regulirovaniya metodom lokalizatsii*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2007. 252 s.
- [17] Frantsuzova G.A., Tolstokoneva Ye.P., Shilkova N.YU. *Sravnitel'nyy analiz vozmozhnostey tipovykh regulyatorov i regulyatorov po metodu lokalizatsii*. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*. 2015. №1 (11). S. 29–34.
- [18] Frantsuzova G.A. *Sintez dvukhkonturnoy astaticheskoy sistemy ekstremalnogo regulirovaniya na osnove printsipa lokalizatsii*. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki*. 2004. T. VII. № 1. S. 145–150.
- [19] Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. *Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya*. M.: Yurayt, 2017.
- [20] Zhmud V.A., Yadryshnikov O. *Chislennaya optiizatsiya PID-regulyatorov s ispol'zovaniyem detektora pravil'nosti dvizheniya v tselevoy funktsii*. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*. 2013. № 1 (3). S. 24–29.
- [21] Voyevoda A.A., Zhmud V.A. *Astaticheskoye upravleniye ob'yektami s nestatsionarnymi matrichnymi peredatochnymi funktsiyami metodom priblizhennogo obrashcheniya funktsional'nykh kompleksnykh matrits*. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. № 2. S. 3–8.
- [22] Vasil'yev V.A., Voyevoda A.A., Zhmud V.A., Khassuonekh V.A. *Tsifrovyye regulyatory: tselevyye funktsii nastroyki, vybor metoda integrirovaniya, apparatnaya realizatsiya*. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. № 4. S. 3–10.
- [23] Zhmud V.A., Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S. *Dinamika mekhatronnykh sistem. Uchebnoye posobiye*. Novosibirsk, 2014.
- [24] Vostrikov A.S., Voyevoda A.A., Zhmud V.A. *Effekt ponizheniya poryadka sistemy pri upravlenii po metodu razdeleniya dvizheniy*. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2005. № 3. S. 3–13.
- [25] Zhmud V., Yadryshnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. *Modern Key Technologies in Automatics: Structures and Numerical Optimization of Regulators*. V sb.: *Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012* 2012. S. 6357804.
- [26] Zhmud V.A., Semibalamut V.M., Ishimtsev R.YU. *Regulyator dolya sistemy s obratnoy svyaz'yu*. Patent na izobreteniyе RUS 2368933 17.03.2008.
- [27] Zhmud V.A. *O metodakh rascheta PID-regulyatorov*. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*. 2013. № 2 (4). S. 118–124.
- [28] Zhmud V.A., Semibalamut V.M. *Regulyator dolya sistem s obratnoy svyaz'yu*. Patent na poleznuyu model' RUS 76719 04.03.2008.



Galina Alexandrovna Frantsuzova – Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences.
E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru.
 630073, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20

Paper was received 10 March 2018.