

Г. А. Рустамов, д-р техн. наук, проф., gazanfar.rustamov@gmail.com, **Р. Г. Рустамов**, докторант,
Азербайджанский технический университет, г. Баку, Азербайджан

Проблемы настройки робастных систем управления

Обсуждаются вопросы целесообразности использования средств адаптации в робастных системах управления. Констатируется, что чисто робастные системы без использования средств адаптации в принципе не могут обеспечивать высокую эффективность и универсальность при решении практических задач.

Постановка задачи синтеза управления в условиях неопределенности без элементов адаптации, образно говоря, подобна "поиску черной кошки в темной комнате, особенно, если ее там нет" (Конфуций).

Наиболее адекватным с точки зрения соответствия фундаментальным принципам теории автоматического управления является подход, основанный на увеличении коэффициента усиления разомкнутого контура. Тем не менее, и здесь возникает своя проблема — увеличение коэффициента усиления нарушает устойчивость замкнутой системы. Все известные исследования сконцентрированы вокруг решения этой проблемы.

Исследуются предельные робастные системы с большим коэффициентом усиления, синтезированные на основе метода функции Ляпунова. В целях экономии энергии управления предлагается не использовать экстремальное значение коэффициента усиления, соответствующего доминирующей неопределенности, а осуществить его самонастройку в реальном времени по мере изменения характеристик неопределенного объекта и внешней среды. Разработан интегральный алгоритм самонастройки коэффициента усиления и соответствующая схемотехническая и Simulink-схема реализации. Достоверность теоретических рассуждений проверена путем имитационного моделирования предельной робастной системы с самонастройкой и параметрически неопределенным объектом — пикового гироскопа (параметрического маятника). Компьютерные исследования позволили сделать ряд положительных выводов, имеющих важное прикладное значение.

Ключевые слова: адаптация, робастная система, неопределенность, коэффициент усиления, устойчивость, функция Ляпунова, самонастройка, энергия управления, функция Ляпунова, пиковый гироскоп

Введение

В настоящее время одним из интенсивно развивающихся направлений теории автоматического управления в условиях неопределенности является синтез робастных систем управления. Главенствующее направление в этой области — адаптивное управление — практически исчерпало свою актуальность. Вообще говоря, адаптация является медленным процессом. Условие квазистационарности и медленная сходимость при наличии помех замедляют процесс адаптации. Принцип адаптации базируется на структурно-параметрической перестройке регулятора в целях приспособления к изменениям неопределенных априори неизвестных динамических и статических характеристик объекта и внешних возмущений.

Несмотря на изменение характеристик объекта и внешней среды в робастных системах самонастройка регулятора не осуществляется. Синтезированный по одноразовой схеме "магический регулятор" должен выполнять функцию адаптивного регулятора и поддерживать показатели системы в требуемых пределах при широком изменении реквизитов объекта и внешней среды.

Невыполнимая на первый взгляд, эта проблема в настоящее время имеет множество

подходов и решений на основе методов [1—8]: LMI, LQ-оптимизации, интервального анализа, функций Ляпунова, управления на скользящих режимах и др.

Робастные системы управления изначально были задуманы как неадаптивные системы или как пассивные адаптивные системы. Ввиду возникающих проблем при решении практических задач начали появляться работы под названием "Адаптивно-робастные системы", "Комбинированные робастные системы" и др., частично использующие методы адаптации.

В этом направлении можно отметить использование принципа адаптации для синтеза наблюдателей неопределенности, синтезированных в рамках как нечеткой [9, 10], так и детерминированной постановок [11—13].

В большинстве задач синтеза робастного управления полученное решение является близким к экстремальному. Очевидно, что такое решение приводит к перерасходу энергозатрат на управление. Система должна "дежурить", дожидаясь появления доминирующей неопределенности, расходуя при этом не по надобности большое количество энергии для подавления более "слабых неопределенностей", близких к номинальному. По этой причине целесообразно создать комбинированную робаст-

ную систему, использующую, пусть и частично, средства адаптации.

При использовании различных показателей, таких как энергия выхода или просто интегральные критерии оптимизации, не имеющих явного физического смысла, преимущественно достигается робастность статического режима. Для практических приложений важно обеспечивать робастность и динамического (переходного) режима. В целях обеспечения робастности статического режима не следует использовать сложный математический аппарат. Так или иначе, устойчивая система в статике сама по себе является робастной.

Причина неполноты состоит в том, что большинство привлеченных и вновь разработанных для синтеза робастного управления методов чрезмерно математизированы и плохо согласуются с фундаментальными принципами построения систем автоматического регулирования.

Одним из наиболее адекватных подходов в этом направлении можно считать классический подход, основанный на увеличении коэффициента усиления разомкнутого контура. Начало данного направления заложено в классических работах М. В. Меерова [14, 15] и получила развитие в работах [16–20] и др.

Однако и здесь возникает своя проблема — увеличение коэффициента усиления приводит к нарушению устойчивости замкнутой системы. Все известные исследования в этом направлении концентрированы вокруг решения этой проблемы. Часто используются эвристические приемы для частных случаев: нелинейные, нестационарные объекты и различные виды неопределенностей.

Дальнейшее развитие данного направления изложено в работах [21–26]. В этих работах для синтеза робастных систем управления с большим коэффициентом усиления (так называемых предельных систем) использован метод функции Ляпунова, в частности, метод квадратичных форм. При этом обеспечивается устойчивость системы при беспредельном увеличении коэффициента усиления.

В настоящей работе для указанных предельных робастных систем предлагается методика настройки коэффициента усиления разомкнутого контура системы, обеспечивающего заданную точность слежения при изменении характеристик системы в широком диапазоне с экономией энергозатрат на управление.

Синтез предельной робастной системы с большим коэффициентом усиления

В работах [21–24] рассматривается одномерный по входу и выходу (SISO) неопределенный объект:

$$y^{(n)} = f(\mathbf{y}, t) + b(\mathbf{y}, t)u + v(t),$$

где $\mathbf{y} = (y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)})^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$ — доступный измерению или оценке вектор состояния; $y \in R$ — регулируемый выход; $u \in R$ — скалярное управление; $f(\mathbf{y}, t)$; $b(\mathbf{y}, t) > 0$ — неизвестные ограниченные функции (функциональные неопределенности); v — неконтролируемое ограниченное внешнее возмущение.

Рассматривается задача слежения, заключающаяся в выборе управления u , которое после завершения переходного процесса обеспечивает изменение выхода $y(t)$ объекта по эталонной траектории $y_d(t)$ с заданной точностью

$$|y_d(t) - y(t)| = |\varepsilon(t)| \leq \varepsilon_0, \quad t \geq t_s.$$

Здесь t_s — заданное время установления (*settling time*) переходной составляющей для $\varepsilon_0 = (1\dots 5)\%$ -ной ошибки слежения.

Для функции Ляпунова $V = 1/2s^2$ на основе достаточного условия устойчивости

$$dV/dt = s\dot{s} < 0$$

получено робастное управление:

$$u = Ks = K(c_1\varepsilon + c_2\dot{\varepsilon} + \dots + \varepsilon^{(n-1)}) = K\mathbf{c}^T \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

где $K > 0$ — коэффициент усиления регулятора (достаточно большое число); $\mathbf{c}^T = (c_1, c_2, \dots, 1)$; $\boldsymbol{\varepsilon}^T = (\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \dots, \varepsilon^{(n-1)})$. Здесь K , \mathbf{c}^T — параметры настройки робастного регулятора. После некоторого конечного значения коэффициента K достигается заданная точность. При стремлении коэффициента K в бесконечность в пределе система описывается уравнением гиперплоскости, характеризующим ее свободное движение:

$$s = c_1\varepsilon + c_2\dot{\varepsilon} + \dots + \varepsilon^{(n-1)} = 0, \quad s(0) = 0. \quad (2)$$

При этом ошибка регулирования стремится к нулю:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = 0.$$

Однако на практике нет необходимости достижения нулевой ошибки, поскольку допустимая ошибка задается на некотором интервале, и это условие выполняется при конечном значении K .

Разработка алгоритма настройки системы управления

В работе [22] изложена методика определения параметра c , обеспечивающего в пределе ($K \rightarrow \infty$) монотонность переходных процессов. Коэффициент усиления K , отвечающий за свойство робастности, задан с учетом доминирующей неопределенности и определен путем имитационного моделирования экспериментально.

В данной работе ставится задача определения такого коэффициента усиления K , который при изменении характеристик объекта обеспечивает попадание и поддержание траектории $\varepsilon(t)$ на интервале допустимой ошибки $\varepsilon \in [-\varepsilon_0, +\varepsilon_0]$. С этой целью алгоритм настрой-

ки коэффициента K принимаем в виде следующего интегрального закона:

$$K = k_0 \int_0^t \eta^2(\tau) d\tau \geq 0, \quad (3)$$

где $k_0 = \text{const} > 0$ — параметр настройки;

$$\eta(t) = \begin{cases} 0, & |\varepsilon| \leq \varepsilon_0, \\ \varepsilon(t), & |\varepsilon| > \varepsilon_0. \end{cases} \quad (4)$$

Кроме основного назначения использование интеграла позволяет сгладить высокочастотные колебания ошибки $\varepsilon(t)$.

На рис. 1 представлена статическая характеристика, соответствующая логическому алгоритму (4).

В соответствии с законом (3) K формируется следующим образом: внутри допустимого заданного интервала $\varepsilon \in [-\varepsilon_0, +\varepsilon_0]$ он остается постоянным, а вне интервала происходит его нарастание, и траектория $\varepsilon(t)$ возвращается в заданный интервал.

Системотехническая структура робастной системы управления с самонастройкой коэффициента усиления K состоит из четырех функциональных блоков (рис. 2):

- блок 1, формирующий операцию дифференцирования s ;
- блок 2, формирующий сигнал η ;
- блок 3, формирующий коэффициент усиления K ;
- блок 4, формирующий сигнал управления $u = Ks$

На рис. 3 для $n = 2$ показана схема реализации алгоритма настройки в среде Simulink. Здесь $\delta = |\varepsilon| - \varepsilon_0$.

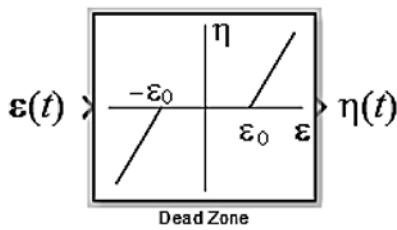


Рис. 1. Статическая характеристика алгоритма (4)
Fig. 1. Static characteristic of the algorithm (4)

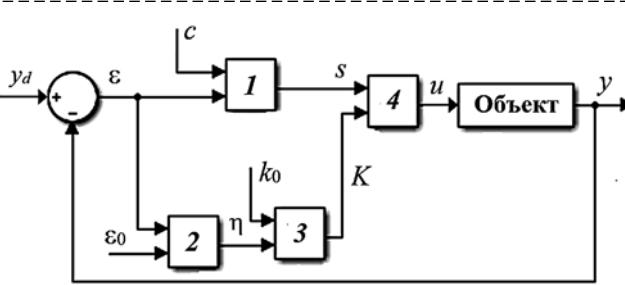


Рис. 2. Системотехническая структура робастной системы управления с самонастройкой K
Fig. 2. System-technical structure of a robust system with self-tuning control K

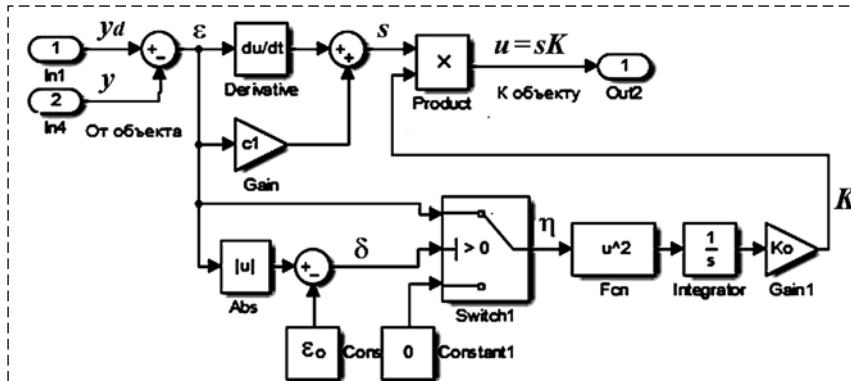


Рис. 3. Схема реализации алгоритма самонастройки на Simulink
Fig. 3. Scheme of implementation of self-tuning algorithm on Simulink

Результаты моделирования

Особенности методики самонастройки коэффициента усиления K будем демонстрировать на примере управления пиковым гироскопом (параметрическим маятником). Этот гироскоп используется для стабилизации угловых перемещений подвижных объектов. Одна из разновидностей подобного гироскопа с грузом m , двигающимся по гармоническому закону, был рассмотрен в работе [27]:

$$\ddot{y} = -a \frac{\dot{R}}{R} \dot{y} - g \frac{1}{R} \sin y + \frac{1}{mR^2} u. \quad (5)$$

Здесь y — угловое перемещение; u — сигнал управления; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $m = 1 \text{ кг}$; $a = 2$. Начальное состояние объекта $\mathbf{y}(0) = (0, 0)^T$.

Закон перемещения груза:

$$R(t) = 0,8 + 0,1\sin(8t) + 0,3\cos(4t). \quad (6)$$

Эталонную траекторию задаем в виде

$$y_d = 0,5\sin(0,5t) + 0,5\cos t.$$

Начальное условие $\mathbf{y}_d(0) = (0,5; 0,25)^T$. Соответствующее начальное условие по ошибке

$$\mathbf{\epsilon}(0) = \mathbf{y}_d(0) - \mathbf{y}(0)^T = (0,5; 0,25)^T.$$

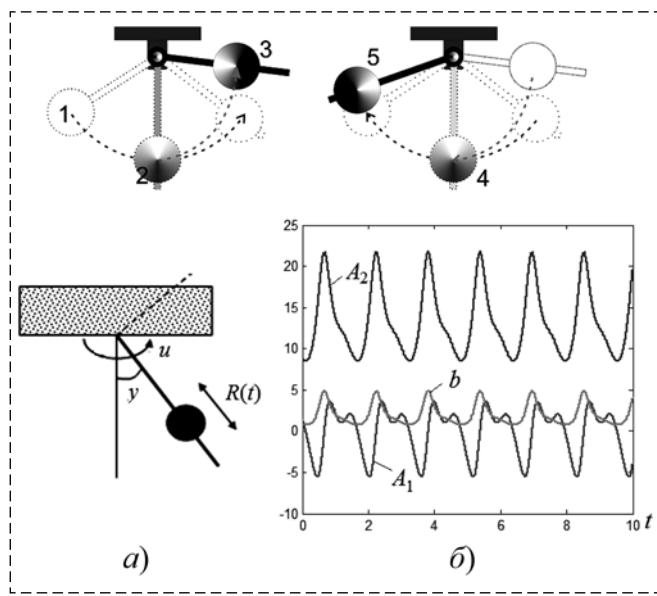


Рис. 4. Кинематическая схема маятника (а) и характер изменения коэффициентов модели (5) (б)

Fig. 4. The kinematic scheme of the pendulum (a) and the nature of the change of the model coefficients (5) (б)

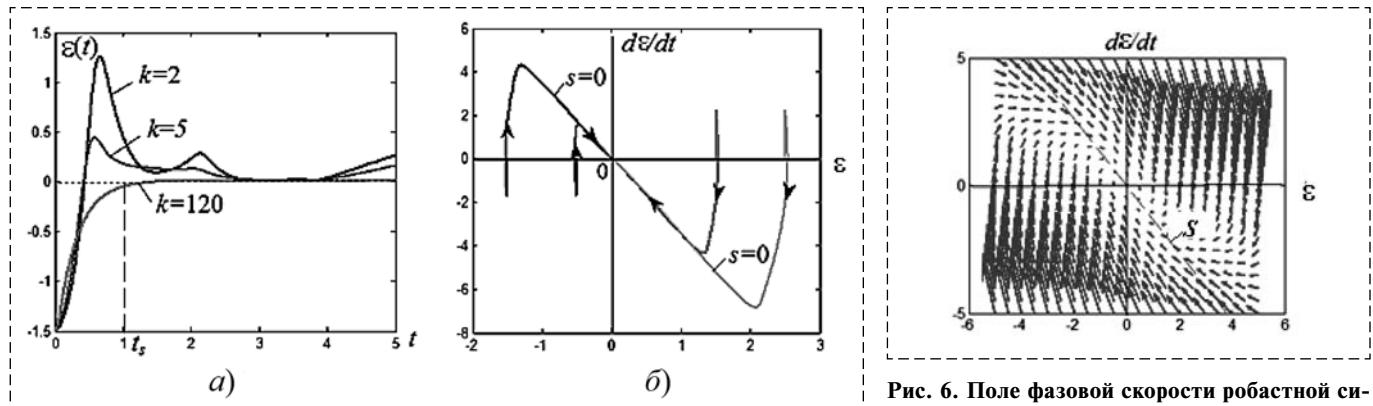


Рис. 5. Зависимость ошибки слежения от K и фазовый портрет системы

Fig. 5. Dependence of the tracking error on K and phase portrait of the system

На рис. 4, а и б показаны кинематическая схема маятника и характер изменения коэффициентов модели при номинальных параметров.

На рис. 4, б приняты обозначения: $A_1 = 2\dot{R}/R$, $A_2 = g/R$, $b = 1/mR^2$.

Пусть требуемые показатели: перерегулирование $\sigma = 0 \%$, допустимая ошибка $\delta = \pm 2 \%$, время установления переходного процесса $t_s = 1 \text{ с}$.

Поскольку порядок системы $n = 2$, то робастный регулятор имеет два параметра настройки: c_1 и $K \Rightarrow u = K(c_1\epsilon + \dot{\epsilon})$.

Согласно работе [22] вычисляем: $c_1 = 3,22$.

Для моделирования в среде Simulink уравнение (5) представляем в координатах состояния:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= -A_1 \sin x_1 - A_2 x_2 + Bu; \\ y &= x_1, \end{aligned} \quad (7)$$

где $A_1 = \frac{g}{R}$; $A_2 = 2\frac{\dot{R}}{R}$; $B = \frac{1}{mR^2}$; $a = 2$; $m = 1$.

Задача управления состоит в определении коэффициента усиления K , обеспечивающего изменение углового перемещения $y(t)$ по эталонной траектории $y_d(t)$ и выполнение при этом заданных показателей качества.

Управление при номинальных параметрах без самонастройки. На рис. 5, а показана зависимость ошибки слежения $\epsilon(t)$ от коэффициента K для номинальных значений параметров $a = 2$, $m = 1$. Даже при $K = 120$ выполняются требуемые качественные показатели $\sigma = 0 \%$, $\epsilon_0 = 0,02$; $t_s = 1 \text{ с}$.

На рис. 5, б при $K = 120$ и начальных условиях $y(0) = [2; 1; -1; -2]$, $\dot{y}(0) = [2; 2; -2; -2]$ представлен фазовый портрет системы. На рис. 6 показан характер движения фазового потока при $K = 120$.

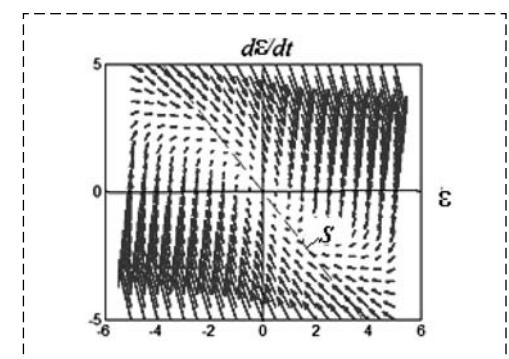


Рис. 6. Поле фазовой скорости робастной системы с большим коэффициентом усиления

Fig. 6. The phase velocity field of a robust system with high gain

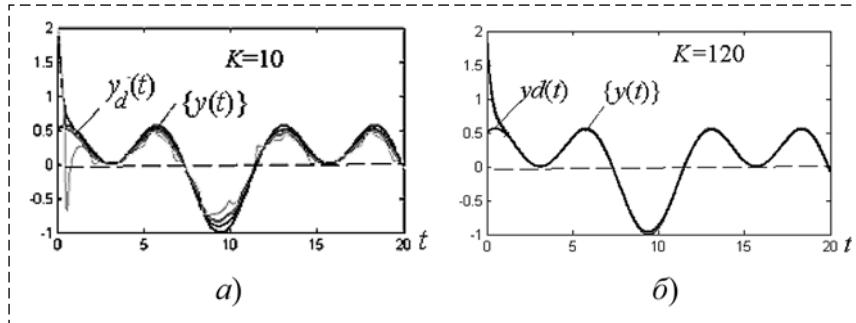


Рис. 7. Пучки переходных процессов, характеризующие робастные свойства системы
Fig. 7. Transient bundles characterizing robust properties of the system

Как видно, при $K = 120$ весь фазовый поток стягивается к линии $s = \dot{e} + 3,22\epsilon = 0$, и дальнейшее движение происходит по этой линии.

Управление при параметрической неопределенности без самонастройки. Допустим, что параметр a и масса груза m изменяются на интервале, значительно превышающем номинальные значения: $a = [1; 5]$; $m = [0,5; 10]$.

На рис. 7, а и б при начальном условии $y(0) = (2; 0)^T$, $a = [1; 5; 2]$, $m = [0,5; 10; 5]$ для $K = 10$ и $K = 120$ показаны пучки $\{y(t)\}$, состоящие из трех переходных характеристик. Видно, что при $K = 120$ плотность пучка довольно высокая и после $t_s = 1$ с происходит отслеживание эталонной траектории $y_d(t)$ с большой точностью без перерегулирования.

Очевидно, что для выполнения требуемых показателей значение коэффициента усиления следует поддерживать на высоком уровне. Однако такая стратегия при других комбинациях параметров a и m объекта без соответствующей коррекции K может привести к перерасходу энергозатрат на управление.

Энергию управления можно оценить по известному показателю:

$$J = \int_0^{20} u^2 dt. \quad (8)$$

В табл. 1 представлены значения $J(20)$ и $\epsilon(20)$ при $K = 10$ в момент завершения $T = 20$ с процесса управления для следующих трех комбинаций параметров a и m объекта: $(a, m) = (1; 0,5), (5; 10), (2; 5)$.

Как видно, при $K = 10$ максимальное значение $J_2(20) = 1,5 \cdot 10^{20}$ получено для второй комбинации $(a, m) = (5, 10)$. При этом ошибка достигает максимального значения $\epsilon_2(20) = 2,9 \cdot 10^8$. Следует отметить, что при симуляции на Simulink при векторном задании

параметров каждый цикл решения выполняется для комбинации элементов с одинаковым номером.

Для обеспечения заданной ошибки необходимо увеличивать коэффициент усиления, что достигается при $K = 120$.

В табл. 2 представлены аналогичные показатели при $K = 120$ также для трех комбинаций параметров a и m объекта: $(a, m) = (1; 0,5), (5; 10), (2; 5)$.

Из-за уменьшения ошибки ϵ энергозатраты на управление существенно уменьшаются.

Робастная система с самонастройкой коэффициента усиления K . Определение необходимого значения коэффициента K "вручную" путем численного моделирования является весьма затруднительным. В реальном масштабе времени эту задачу необходимо возложить на саму систему. При этом монотонность переходных характеристик и интервальная точность сохраняются, причем время установления t_s может отличаться от требуемого. Задача управления решена с использованием алгоритма настройки K (3). Параметр a и масса груза m относительно номинальных значений изменя-

Таблица 1
Table 1

Значения энергии управления и ошибки слежения в момент завершения процесса управления ($K = 10$)

Control energy values and tracking errors at the end of the control process ($K = 10$)

Параметр	(a, m)		
	$(1; 0,5)$	$(5; 10)$	$(2; 5)$
$J(20)$	127,7	$1,495 \cdot 10^{20}$	3438
$\epsilon(20)$	0,004862	$2,922 \cdot 10^8$	-0,01932

Таблица 2
Table 2

Значения энергии управления и ошибки слежения в момент завершения процесса управления ($K = 120$)

Control energy values and tracking errors at the end of the control process ($K = 120$)

Параметр	(a, m)		
	$(1; 0,5)$	$(5; 10)$	$(2; 5)$
$J(20)$	661,5	$8,797 \cdot 10^4$	$1,555 \cdot 10^4$
$\epsilon(20)$	0,000577	-0,00416	0,002447

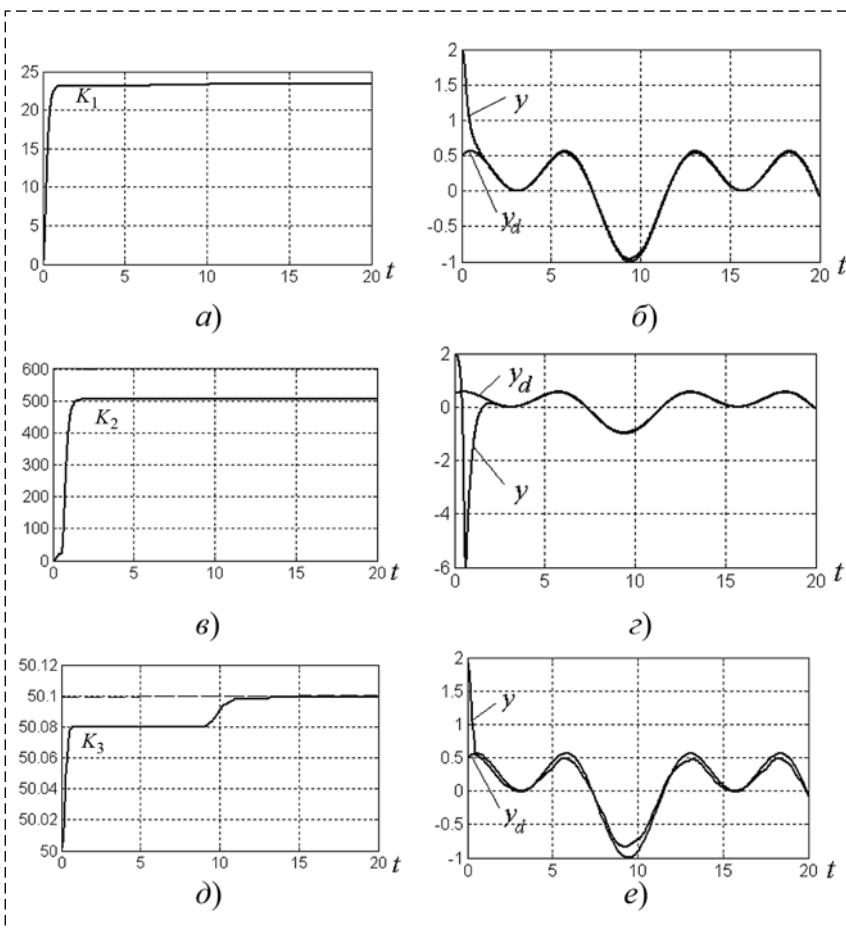


Рис. 8. Графики изменения коэффициента усиления и управляемой переменной при интервальной неопределенности

Fig. 8. Graphs of change in gain and controlled variable with interval uncertainty

няются неизвестным образом в широким диапазоне. Для простоты рассмотрены три точки: $a = [1; 5; 2]$; $m = [0,5; 10; 5]$. Задача состоит в том, чтобы путем самонастройки определить такой коэффициент усиления K , который при каждой комбинации параметров, взятых из интервала неопределенности a — $K_1(1; 0,5)$, ϑ — $K_2(5; 10)$, δ — $K_3(2; 5)$, не принимая максимальное значение, обеспечивает приведение неопределенной системы в заданный интервал

Таблица 3
Table 3

Значения ошибки слежения $\varepsilon(20)$
в момент завершения процесса управления
Tracking error values $\varepsilon(20)$
at the time of completion of the control process

Параметр	$(a; m)$		
	$(1; 0,5)$	$(5; 10)$	$(2; 5)$
$\varepsilon(20)$	0,0012	0,0025	0,0060

ошибки слежения и поддержание ее в этом интервале. Такая стратегия позволяет экономить энергозатраты на управление.

На рис. 8, a , ϑ , δ показаны графики изменения коэффициента усиления K для трех комбинаций. На Simulink для двух векторных параметров a и m симуляция выполняется параллельно. На рис. 8, b , g , e приведены изменения соответствующих управляемых переменных $y(t)$ относительно гармонической эталонной уставки $y_d(t)$. Установившиеся значения $K_1(\infty) = 23,4$; $K_2(\infty) = 500$; $K_3(\infty) = 50,1$. Как видно, каждой комбинации (неопределенности) параметров соответствует свой коэффициент усиления.

В начальном интервале происходит "побочный переходной процесс", что является характерным для алгоритмов адаптации.

При моделировании использованы: начальное значение интеграла $I_0 = 0$, $K_0 = 10$, $\varepsilon_0 = 0,02$. Для сглаживания высокочастотных сигналов ошибки и ослабления помех на входе логического блока 2 использован фильтр:

$$W_F = 1/(Ts + 1), \quad T = 0,2 \text{ с.}$$

В табл. 3 представлены значения ошибки слежения $\varepsilon(20)$ в момент завершения процесса управления (время симуляции) $T = 20$ с для тех же трех комбинаций параметров a и m объекта: $(a, m) = (1; 0,5), (5; 10), (2; 5)$. Как видно, все три значения входят в допустимый интервал ошибки $\varepsilon \in [-0,02; +0,02]$.

Заключение

Использование метода функции Ляпунова для синтеза робастного управления позволило беспрепятственно увеличивать коэффициент усиления без нарушения устойчивости замкнутой системы.

Показано, что улучшения практической эффективности и универсальности робастных систем управления можно добиться путем исполь-

зования средств адаптации. Для предельных робастных систем уменьшение энергопотребления достигнуто путем самонастройки коэффициента усиления при изменении параметров объекта и внешней среды. Получена удовлетворительная сходимость предложенного интегрального по ошибки слежения алгоритма самонастройки.

Разработана системотехническая и *Simulink*-схема алгоритма самонастройки. Достоверность теоретических результатов проверена путем моделирования системы на *Simulink* с объектом "пиковый гироскоп" с параметрической неопределенностью. Полученные значения затраченной энергии управления для различных комбинаций параметров позволяют провести сравнительный анализ, а также убедиться в надежности оценок.

Список литературы

1. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 303 с.
2. Поляк Б. Т., Хлебников М. В., Щербаков П. С. Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. М.: УРСС, 2014. 560 с.
3. Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B. A. State-space solution to standard H_2 and H_∞ control problem // IEEE Trans. Automat. Control. 1989. V. 34, N. 8. P. 831–846.
4. Позняк А. С. Основы робастного управления (H_∞ -теория). М.: МФТИ, 1991. 128 с.
5. Зацепилова Ж. В., Честнов В. Н. Синтез регуляторов многомерных систем заданной точности по среднеквадратичному критерию на основе процедур LQ-оптимизации // Автоматика и телемеханика. 2011. № 11. С. 70–85.
6. Баландин Д. В., Коган М. М. Алгоритмы синтеза робастного управления динамическими системами. Нижний Новгород: ННГУ, 2007. 88 с.
7. Utkin V. I. Sliding Modes in Optimization and Control Problems. New York: Springer Verlag, 1992.
8. Емельянов В. С., Коровин С. К. Новые типы обратных связей: Управление в условиях неопределенности. М.: Наука, 1997. 352 с.
9. Ho H. F., Wong Y. K., Rad A. B. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control Design: Lyapunov Approach // Proc. IEEE International Conference on Fuzzy System. 2001. P. 6–11.
10. Lee H., Tomizuka M. Adaptive Traction Control. University of California, Berkeley. Department of Mechanical Engineering. September. 1995. P. 95–32.
11. Потапенко Е. М. Синтез и сравнительный анализ робастных компенсаторов пониженного порядка // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1998. № 4. С. 65–74.
12. Казурова А. Е., Потапенко Е. М. Возможные варианты построения высокоточных систем управления упругой неопределенной электромеханической системой // Електротехніка та електроенергетика. 2009. № 2. С. 4–14.
13. Бобцов А. А., Пыркин А. А. Адаптивное и робастное управление с компенсацией неопределенностей: Учеб. пособ. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 135 с.
14. Мееров М. В. Система автоматического управления, устойчивые при бесконечно больших коэффициентах усиления // Автоматика и телемеханика. 1947. Т. 8, № 4. С. 225–243.
15. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического управления высокой точности. М.: Наука, 1967. 424 с.
16. Востриков А. С. Проблема синтеза регуляторов для систем автоматики: состояние и перспективы // Автоматизация. 2010. Т. 46, № 2. С. 3–19.
17. Востриков А. С., Французова А. Г. Синтез ПИД-регуляторов для нелинейных нестационарных объектов // Автометрия. 2015. Т. 51, № 5. С. 53–60.
18. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Метод больших коэффициентов усиления и эффект локализации движения в задачах синтеза систем автоматического управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 2. С. 2–10.
19. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Робастная коррекция в системах управления с большим коэффициентом усиления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 12. С. 3–10.
20. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Robust Correction of Dynamic Plants in Automatic Control Systems // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2015. Vol. 51, N. 5. P. 478–484.
21. Рустамов Г. А. Робастная система управления с повышенным потенциалом // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324, № 5. С. 13–20.
22. Рустамов Г. А. K_∞ -робастные системы управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 7. С. 435–442.
23. Рустамов Г. А. Анализ методов построения предельных робастных систем управления с большим коэффициентом усиления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 6. С. 363–373.
24. Рустамов Г. А., Фархадов В. Г., Рустамов Р. Г. Исследование K_∞ -робастных систем при ограниченном управлении // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 11. С. 699–706.
25. Рустамов Г. А., Намазов М. Б., Гасымов А. Ю., Рустамов Р. Г. Управление динамическими объектами в условиях неопределенности в точечном скользящем режиме // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 12. С. 714–722.
26. Рустамов Г. А. Некоторые проблемы реализуемости при точном решении задач управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 10. С. 555–565.
27. Levant A. Principles of 2-sliding mode design // Automatica. 2007. P. 1–11.

Problems of Setting Robust Control Systems

G. A. Rustamov, gazanfar.rustamov@gmail.com, R. G. Rustamov, Doctoral Student,
Azerbaijan Technical University, Baku, AZ1073, Azerbaijan

Corresponding autor: Rustamov Gazanfar A., Professor, Dr. Sci.Tech.,
Azerbaijan Technical University, Baku, AZ1073, Azerbaijan, e-mail: gazanfar.rustamov@gmail.com

Accepted on Mart 25, 2022

Abstract

The issues of expediency of using adaptation tools in robust control systems are discussed. It is stated that purely robust systems without the use of adaptation tools, in principle, cannot provide high efficiency and versatility in solving practical problems. Robust control systems were originally conceived as non-adaptive systems (passive adaptive systems). In view of the emerging problems in solving practical problems, then a mutation occurred and works appeared under the name "Adaptive-robust systems", "Combined robust systems", etc., partially using adaptation algorithms. Setting the problem of control synthesis under conditions of uncertainty without elements of adaptation is figuratively speaking similar to "search for a black cat in a dark room, especially if it is not there" (Confucius). The most adequate from the point of view of compliance with the fundamental principles of the theory of automatic control is an approach based on an increase in the gain of an open loop. Nevertheless, here too a problem arises — an increase in the gain violates the stability of a closed system. All known research is concentrated around the solution of this problem. An integrated gain self-tuning algorithm and the corresponding circuitry and Simulink implementation scheme have been developed. The reliability of theoretical reasoning was verified by simulating a limiting robust system with self-tuning and a parametrically indeterminate object — "peak gyroscope (parametric pendulum)". Computer studies have made it possible to draw a number of positive conclusions that are of great practical importance.

Keywords: robust system, uncertainty, gain, self-tuning, control energy, Lyapunov function, peak gyroscope

For citation:

Rustamov G. A., Rustamov R. G. Problems of Setting Robust Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 8, pp. 406–413.

DOI: 10.17587/mau.23.406-413

References

1. Polyak B. T., Sherbakov P. S. Robust stability and control, Moscow, Nauka, 2002, 303 p. (in Russian).
2. Poljak B. T., Hlebnikov M. V., Shcherbakov P. S. Control of linear systems under external perturbations: The technique of linear matrix inequalities, Moscow, USSR, 2014, 560 p. (in Russian).
3. Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B. A. State-space solution to standard H_2 and H_∞ control problem, *IEEE Trans. Automat. Control*, 1989, vol. 34, no. 8, pp. 831–846.
4. Poznjak A. S. Fundamentals of robust control (H_∞ theory), Moscow, MFTI, 1991, 128 p. (in Russian).
5. Zacepilova Zh. V., Chestnov V. N. Synthesis of regulators of multidimensional systems of specified accuracy based on root-mean-square criterion on LQ-optimization procedures, *Avtomatika i telemehanika*, 2011, no. 11, pp. 70–85 (in Russian).
6. Balandin D. V., Kogan M. M. Algorithms for synthesis of robust control of dynamic systems, Nizhnij Novgorod, NNGU, 2007, 88 p. (in Russian).
7. Utkin V. I. Sliding Modes in Optimization and Control Problems, New York, Springer Verlag, 1992, pp. 387.
8. Emeljanov V. S., Korovin S. K. New types of feedback: Control in uncertain conditions, Moscow, Nauka, 1997, 352 p. (in Russian).
9. Ho H. F., Wong Y. K., Rad A. B. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control Design: Lyapunov Approach, *Proc. IEEE International Conference on Fuzzy System*, 2001, pp. 6–11.
10. Lee H., Tomizuka M. Adaptive Traction Control. University of California, Berkeley, Department of Mechanical Engineering, September, 1995, pp. 95–32.
11. Potapenko E. M. Synthesis and comparative analysis of robust compensators of reduced order, *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravlenija*, 1998, no. 4, pp. 65–74 (in Russian).
12. Kazurova A. E., Potapenko E. M. Possible options of design of high-precision control systems for elastic uncertain electromechanical systems, *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2009, no. 2, pp. 4–14 (in Russian).
13. Bobtsov A. A., Pyrin A. A. Adaptive and robust control with uncertainty compensation, SPb., NIU ITMO, 2013, 135 p. (in Russian).
14. Meerov M. V. Automatic control system, stable at infinitely large gain factors, *Avtomatika i telemehanika*, 1947, vol. 8, no. 4, pp. 225–243 (in Russian).
15. Meerov M. V. Synthesis of structures of automatic control systems with high precision, Moscow, Nauka, 1967, 424 p. (in Russian).
16. Vostrikov A. S. The problem of the synthesis of regulators for automation systems: state and prospects, *Avtometrija*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 3–19 (in Russian).
17. Vostrikov A. S., Francuzova A. G. Synthesis of PID — regulators for nonlinear nonstationary objects, *Avtometrija*, 2015, no. 5, pp. 53–60 (in Russian).
18. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Method of Major Amplification Factors and the Effect of Localization of Movements in the Problems of Design of Automatic Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2009, no. 2, pp. 2–10 (in Russian).
19. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Robust Correction in Control Systems with High Gain, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 12, pp. 3–10 (in Russian).
20. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Robust Correction of Dynamic Plants in Automatic Control Systems, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 478–484.
21. Rustamov G. A. Robust control system with high potential, *Izvestija Tomskogo politehnickogo universiteta*, 2014, vol. 324, no. 5, pp. 13–20 (in Russian).
22. Rustamov G. A. $K\infty$ -robust control systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, no. 7, pp. 435–442 (in Russian).
23. Rustamov G. A. Analysis of methods of design of robust control systems with high gain coefficient, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 6, pp. 363–373 (in Russian).
24. Rustamov G. A., Farkhadov V. G., Rustamov R. G. Research of $K\infty$ -robust systems with limited control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 11, pp. 699–706.
25. Rustamov G. A., Namazov M. V., Gasimov A. Y., Rustamov R. G. Control of dynamic objects in the conditions of uncertainty in a point sliding mode, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 12, pp. 714–722 (in Russian).
26. Rustamov G. A. Some problems of realizability in the exact solution of control problems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 10, pp. 555–565.
27. Levant A. Principles of 2-sliding mode design, *Automatica*, 2007, pp. 1–11.