

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5.015.24

Анатолий Анатольевич Анисимов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры электроники и микропроцессорных систем, телефон (4932) 26-97-53, e-mail: anis@eims.ispu.ru

Сергей Вячеславович Тарарыкин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и микропроцессорных систем, телефон (4932) 26-96-96, e-mail: tsv@ispu.ru

Синтез робастных систем управления мехатронными объектами с цифровыми регуляторами и наблюдателями состояния¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время в системах автоматического управления мехатронными объектами применяются цифровые регуляторы с наблюдателями состояния, высокие потенциальные возможности которых обусловлены гибкостью структуры и развитыми методами синтеза. Вместе с тем при проектировании и практической реализации таких систем возникает проблема обеспечения робастности, связанная с параметрической неопределенностью типичных мехатронных объектов. Большинство методов синтеза робастных САУ основаны на применении непрерывных математических моделей и не учитывают специфики цифровой реализации регуляторов с наблюдателями состояния.

Материалы и методы. Используются методы пространства состояния, модального управления, цифрового проектирования систем, алгоритмы численной оптимизации, имитационного моделирования в среде MatLab.

Результаты. Предлагается методика синтеза робастных цифровых систем модального управления с наблюдателями состояния, основанная на формировании динамических характеристик в пределах областей параметрической грубости. При этом низкая чувствительность САУ к вариациям параметров объекта управления обеспечивается за счет минимально-фазового характера передаточной функции комплексного регулятора, а низкая чувствительность к вариациям собственных параметров регулятора – за счет исключения положительных обратных связей как в контуре управления, так и в контуре подстройки.

Выводы. Разработанные рекомендации по выбору быстродействия контуров регулятора с наблюдателем состояния в пределах областей робастности, а также по формированию рациональной струк-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части Государственного задания на 2020 г.

The project is carried out with financial support of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the basic part of Government Contract 2020.

туры наблюдателя позволяют синтезировать цифровую САУ с низкой чувствительностью к вариациям как параметров объекта управления, так и собственных параметров регулятора.

Ключевые слова: автоматическое управление, регулятор состояния, наблюдатель состояния, управляемость, наблюдаемость, обратная связь по состоянию, отрицательная обратная связь, робастность, линейная система, матрицы, полиномы

Anatoly Anatolyevich Anisimov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Science, Associate Professor of Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-53, e-mail: anis@eims.ispu.ru

Sergey Vyacheslavovich Tararykin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department of Electronics and Microprocessor Systems, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-96, e-mail: tsv@ispu.ru

Synthesizing robust control systems for mechatronic objects with digital state controllers and observers

Abstract

Background. Currently, digital controllers with state observers are widely applied in automatic control systems for mechatronic objects, which great potential abilities are caused by structural flexibility and developed methods of synthesis. However, during design and practical implementation of the systems there is problem of robustness, associated with parametrical uncertainty of typical mechatronic objects. Most methods for synthesis of robust control systems are based on application of continuous mathematical models and do not take into account specific of digital realization of controllers with state observers.

Materials and methods. Methods of state space, modal control, digital system design, numerical optimization algorithms and simulation in MatLab environment were used.

Results. We propose a method of synthesizing robust digital modal control systems with state observers based on generating dynamic system characteristics within the areas of parametric robustness. Further, low sensitivity of the system to changes in controlled object parameters is ensured by the minimal phase character of the complex controller transfer function, while low sensitivity to changing parameters of the controller itself is ensured by excluding positive feedback in both control and adjustment circuits.

Conclusions. Developed recommendations of choosing dynamic characteristics of state controller with observer loops within robustness areas and of forming rational state observer structure allow us to synthesize digital automatic control system with low sensitivity for variation of both control object parameters and inherent controller parameters.

Key words: automatic control, state regulator, state observer, controllability, observability, state feedback, negative feedback, robustness, linear systems, matrices, polynomials

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.039-047

Введение. В условиях возрастания требований к качеству управления мехатронными объектами при ограниченных вычислительных ресурсах микропроцессорных систем, применяемых в режиме реального времени, становится актуальным применение методов синтеза цифровых регуляторов с наблюдателями состояния (РНС) по дискретным моделям [1, 2].

Ключевую роль в современной теории и практике автоматического управления играет проблема обеспечения робастности, т. е. сохранения устойчивости и приемлемого качества управления в условиях неопределенности параметров САУ [3–10].

Как было показано ранее, значительные возможности синтеза робастных систем содержатся в классическом модальном управлении, реализуемом на базе регуляторов состояния различного типа [1, 6, 9].

Применительно к системам с РНС было показано, что снижение чувствительности к вариациям параметров объекта управления достигается формированием такого распределения полюсов характеристического полинома, при котором сохраняется минимально-фазовый характер передаточной функции управляющего устройства [1, 2, 9].

При этом низкая чувствительность системы к вариациям собственных параметров РНС достигается путем выбора структуры и формирования темпа подстройки, при котором исключается появление положительных обратных связей как в основном контуре управления, так и в контуре подстройки наблюдателя [1, 2].

Вместе с тем разработка и исследование методов синтеза робастных систем с регуляторами состояния выполнялись в основном для непрерывных моделей мехатронных объектов. Всестороннее исследование эффективности подобных методов при синтезе цифровых систем управления с РНС для мехатронных объектов не проводилось.

Одной из особенностей цифровых методов синтеза САУ является неоднозначность перехода от непрерывной модели объекта управления к дискретной (Z-преобразования). При этом, в зависимости от применяемого метода преобразования, могут меняться свойства моделей объектов, в том числе характеристики управляемости и наблюдаемости, а следовательно, и параметрическая грубость синтезируемой системы [11–13].

Ниже предлагается исследование эффективности методов синтеза робастных цифровых систем с РНС по дискретной модели мехатронного объекта управления, а также влияния методов дискретизации на робастные свойства полученных вариантов САУ.

Постановка задачи исследования.

Будем рассматривать варианты цифровой системы управления с РНС, структурная схема которой приведена на рис. 1, где приняты следующие обозначения: z – оператор дискретного преобразования; y_r , y и y_m – входной и выходные сигналы объекта и наблюдателя; U – управляющее воздействие на объект; x_m – вектор координат состояния наблюдателя; A_d , B_d и C_d – матрицы состояния, входа и выхода наблюдателя с размерностями $n \times n$, $1 \times n$ и $n \times 1$; K_d – матрица регулятора состояния; L_d – матрица подстройки наблюдателя.

Синтез цифровой системы с РНС будем проводить методом модального управления по методике, аналогичной предложенной ранее [1, 9] для непрерывных систем, на основе дискретной передаточной функции объекта:

$$H_o(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \dots + b_1 z + b_0}{z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0},$$

где $m = \deg B(z)$, $n = \deg A(z)$ – степени полиномов числителя и знаменателя. Предполагается, что наблюдатель состояний может быть представлен в произвольном координатном базисе, в том числе в канонических формах управляемости (КФУ) и наблюдаемости (КФН).

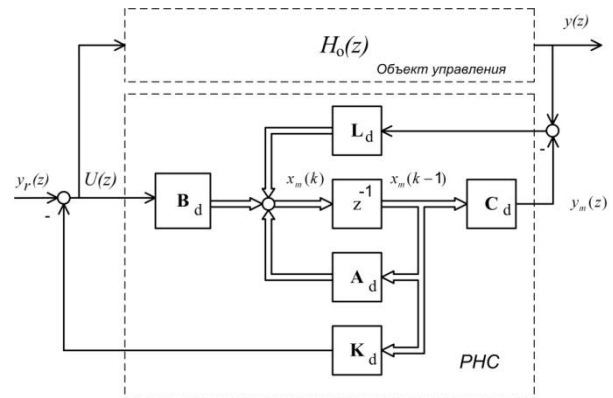


Рис. 1. Обобщенная структура цифровой системы управления с РНС

Вычисление параметров регулятора состояния (матрицы K_d) осуществляется на основе желаемого характеристического полинома замкнутой цифровой системы с РНС $D(z) = z^n + d_{n-1} z^{n-1} + \dots + d_1 z + d_0$ по формулам:

$$K_d = \bar{K}_d \cdot \bar{U}_d U_d^{-1};$$

$$\bar{K}_d = [d_0 - a_0, d_1 - a_1, \dots, d_{n-1} - a_{n-1}], \quad (1)$$

где $\bar{U}_d = [\bar{B}_d \ \bar{A}_d \bar{B}_d \ \bar{A}_d^2 \bar{B}_d \ \dots \ \bar{A}_d^{n-1} \bar{B}_d]$ и $U_d = [B_d \ A_d B_d \ A_d^2 B_d \ \dots \ A_d^{n-1} B_d]$ – матрицы управляемости наблюдателя в КФУ и в его собственных координатах соответственно; \bar{K}_d – матрица регулятора состояния для наблюдателя, представленного в КФУ.

Вычисление матрицы подстройки наблюдателя L_d осуществляется на основе желаемого характеристического полинома $D^*(z) = z^n + d_{n-1}^* z^{n-1} + \dots + d_1^* z + d_0^*$ по аналогичным (дуальным) формулам:

$$L_d = \tilde{L}_d \cdot \tilde{V}_d V_d^{-1};$$

$$\tilde{L}_d = [d_0^* - a_0, d_1^* - a_1, \dots, d_{n-1}^* - a_{n-1}], \quad (2)$$

где $\tilde{V}_d = [\tilde{C}_d^T \ \tilde{A}_d^T \tilde{C}_d^T \ \dots \ (\tilde{A}_d^T)^{n-1} \tilde{C}_d^T]$ и $V_d = [C_d^T \ A_d^T C_d^T \ \dots \ (A_d^T)^{n-1} C_d^T]$ – матрицы наблюдаемости в КФН и в собственных

координатах наблюдателя; $\tilde{\mathbf{L}}_d$ – матрица подстройки наблюдателя, представленного в КФН.

Значения среднегеометрических корней (СГК) полиномов контура управления $D(z)$ и контура подстройки $D^*(z)$, Ω_d и Ω_d^* соответственно, в цифровой системе управления можно определить по формулам [12, 13]:

$$\Omega_d = \exp(-\Omega_o T_o);$$

$$\Omega_d^* = \exp(-\Omega_n T_o),$$

где Ω_o и Ω_n – СГК полиномов аналогового прототипа РНС, рад/с (в соответствии с требованием разделения темпов движений величину Ω_n выбирают в 2–3 больше, чем Ω_o).

Требуется синтезировать робастную цифровую систему управления, сохраняющую устойчивость при вариациях параметров объекта управления в заданных интервалах: $a_i \pm \Delta a_i$, $b_j \pm \Delta b_j$, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$. Положим, что данный объект обладает свойством управляемости и является минимально-фазовым.

Метод синтеза робастных цифровых систем с РНС. Как было показано ранее [9, 12], цифровая система управления будет обладать робастными свойствами в отношении параметров объекта управления, если регулятор является минимально-фазовым дискретным звеном, то есть нули и полюсы его передаточной функции расположены в пределах окружности единичного радиуса. Рассмотрим особенности синтеза робастной цифровой системы с РНС на основе данного постулата и исследуем факторы, влияющие на конфигурацию областей параметрической грубости САУ.

Как показывает анализ структуры САУ, приведенной на рис. 1, регулятор с наблюдателем состояния представляет собой единое динамическое звено, т. е. является по сути управляющим устройством «входа–выхода», аналогичным полиномиальному регулятору. С учетом этого дискретная передаточная функция от входа к выходу РНС как единого динамического звена определяется матричной формулой:

$$H_{\text{РНС}}(z) = \frac{U(z)}{y(z)} = \frac{R(z)}{C(z)} = \mathbf{K}_d (\mathbf{I}z - \mathbf{A}_d + \mathbf{B}_d \mathbf{K}_d + \mathbf{L}_d^T \mathbf{C}_d)^{-1} \mathbf{L}_d^T, \quad (3)$$

где $y(z)$ и $U(z)$ – сигналы на входе и выходе РНС; \mathbf{I} – единичная матрица.

Важно отметить, что значения полиномов регулятора $R(z)$ и $C(z)$ не зависят от формы представления наблюдателя и определяются видом полиномов $D(z)$ и $D^*(z)$ и значениями их среднегеометрических корней Ω_d и Ω_d^* .

В целях обеспечения параметрической грубости цифровой системы управления с РНС рекомендуется выбирать значения среднегеометрических корней характеристических полиномов $D(z)$ и $D^*(z)$ в пределах зоны робастности, где передаточная функция регулятора (3) носит минимально-фазовый характер. Очевидно, границы этой зоны будут зависеть как от свойств самого объекта управления, т. е. расположения его нулей и полюсов, так и от применяемого метода Z-преобразования и значения периода квантования.

Для получения дискретных моделей мехатронных объектов, как правило, используются известные методы Z-преобразования [12, 13]: импульсной инвариантности (impulse); согласованного преобразования (matched); преобразования с экстраполяторами нулевого (zoh) и первого (foh) порядков; билинейного преобразования Тастина (tustin). Все указанные методы реализуются в среде MatLab при помощи функции $\text{sysd} = \text{c2d}(\text{sys}, 'zoh')$, где sys и sysd – наименования непрерывной и дискретной модели линейной системы, zoh – способ преобразования.

Для построения областей робастности цифровых систем управления в зависимости от применяемого метода Z-преобразования была разработана программа в среде MatLab, осуществляющая расчет параметров РНС по формулам (1) и (2), определяющая нули и полюсы передаточной функции с использованием формулы (3) и проверяющая условия параметрической грубости при вариации значений среднегеометрических корней Ω_d и Ω_d^* .

Синтез робастной системы управления мехатронным объектом с РНС. Рассмотрим синтез робастной цифровой системы с РНС на примере двухмассовой электромехатронной системы (ЭМС) с двигателем постоянного тока [4, 9], структура которой приведена на рис. 2, где M – электромагнитный момент; M_y – момент упругости; Ω_1 , Ω_2 – угловые скорости 1-й и

2-й масс. Принятые значения параметров: $C = 0,16$ Вб – конструктивный параметр двигателя; $T_a = 0,11$ с, $R_a = 3,15$ Ом – постоянная времени и сопротивление якорной цепи; $J_1 = 0,01$, $J_2 = 0,25$ кг·м² – моменты инерции 1-й и 2-й масс; $C_{12} = 0,65$ Н·м – коэффициент жесткости; $K_E = 0,075$ кг·м² /с – коэффициент трения; $K_{PC} = 1$ и $T_{PC} = 0,001$ с – коэффициент и постоянная времени силового преобразователя.

Пренебрегая малой постоянной времени силового преобразователя при синтезе робастной САУ, получим следующую передаточную функцию непрерывного объекта управления:

$$H_o(s) = \frac{\Omega_2(s)}{U(s)} = \frac{13,853s + 120,06}{s^4 + 16,891s^3 + 145,9s^2 + 616,76s + 19,209}$$

Преобразование модели объекта в дискретную форму при синтезе цифрового РНС осуществлялось средствами про-

граммного комплекса MatLab с использованием функции $sysd = c2d(sys, '...')$.

В целях исследования робастных свойств цифровой системы с РНС синтез контура управления проводился на основе желаемого полинома Ньютона, заданного в дискретной форме $D(z) = (z - \Omega_d)^4$ при вариации Ω_d , контура подстройки – на основе полинома $D^*(z) = (z - \Omega_d^*)^4$ при вариации Ω_d^* .

С использованием специально разработанной программы для цифровой системы управления с РНС, синтезированной по дискретной модели двухмассовой ЭМС, были вычислены интервалы значений СГК, в пределах которых соблюдаются условия робастности. Значения полученных интервалов робастности для различных методов дискретизации непрерывной модели объекта управления, реализуемых в среде MatLab, приведены в таблице.

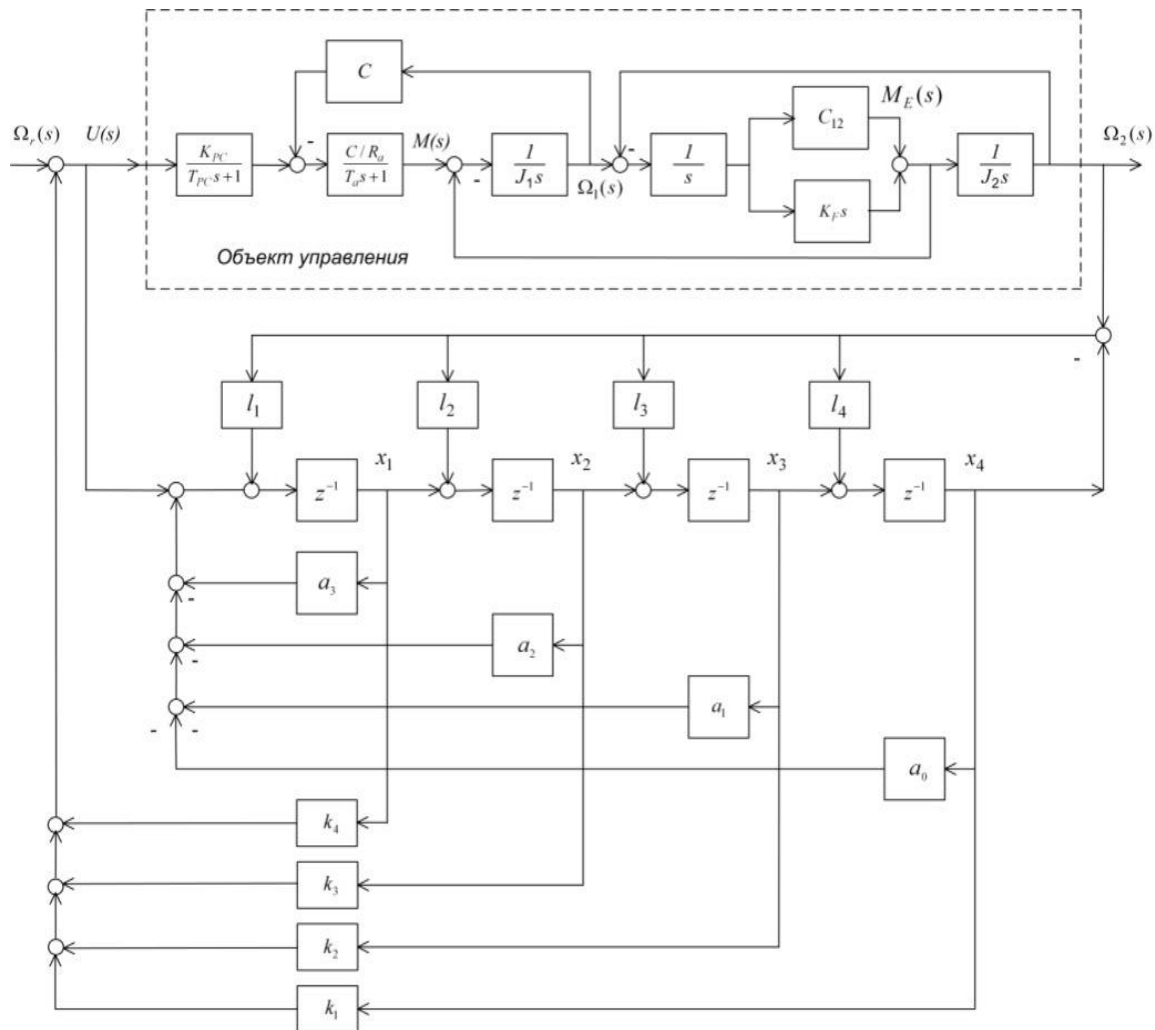


Рис. 2. Структура цифровой системы управления мехатронным объектом с наблюдателем в КФУ

Границы зон робастности цифровой системы управления с РНС

Метод Z-преобразования	Границы зоны робастности в зависимости от темпа подстройки РНС		
	$\Omega_H = 25 \text{ рад/с}, \Omega_O \in$	$\Omega_H = 35 \text{ рад/с}, \Omega_O \in$	$\Omega_H = 75 \text{ рад/с}, \Omega_O \in$
Аналоговый РНС	[5,2 ; 17,8]	[5,2 ; 15,3]	[5,2 ; 13,1]
'zoh'	[2,9 ; 3,8] U [6,2 ; 17,8]	[3,4 ; 4,1] U [5,9 ; 15,4]	[4,1 ; 4,3] U [5,7 ; 13,4]
'matched'	[2,9 ; 3,8] U [6,2 ; 17,8]	[3,4 ; 4,1] U [5,9 ; 15,4]	[4,1 ; 4,3] U [5,7 ; 13,4]
'impulse'	[2,8 ; 3,9] U [6,2 ; 17,6]	[3,3 ; 4,1] U [5,9 ; 15,3]	[4,0 ; 4,3] U [5,7 ; 13,3]
'foh'	[1,0 ; 2,5] U [5,1 ; 13,2]	[1,0 ; 2,5] U [4,6 ; 11,4]	[3,8 ; 9,4]
'tastin'	[5,9 ; 15,1]	[6,2 ; 12,7]	[6,3 ; 10,1]

Конфигурация полученных областей робастности существенно зависит от метода преобразования, причем наилучшие результаты дают точные методы Z-преобразования: импульсной инвариантности (impulse); согласованного преобразования (matched); преобразования с экстраполяторами нулевого (zoh) порядка. Для указанных методов границы зон робастности цифровой системы с РНС приближаются к соответствующим границам для аналогового регулятора, синтезированного по непрерывной модели объекта.

В частности, для дискретной модели объекта, преобразованной методом 'zoh' при $T_o = 0,01 \text{ с}$, в зоне робастности при $\Omega_o = 15 \text{ рад/с}$ и $\Omega_H = 75 \text{ рад/с}$ были получены следующие параметры РНС:

$$K_d = [0,295 \quad -0,970 \quad 1,062 \quad -0,388];$$

$$L_d = [1,488 \cdot 10^9 \quad 1,364 \cdot 10^9 \quad 1,251 \cdot 10^9 \quad 1,147 \cdot 10^9].$$

Вне зоны робастности при $\Omega_o = 30 \text{ рад/с}$ и $\Omega_H = 75 \text{ рад/с}$ были получены следующие параметры:

$$K_d = [0,543 \quad -1,894 \quad 2,214 \quad -0,868];$$

$$L_d = [1,488 \cdot 10^9 \quad 1,364 \cdot 10^9 \quad 1,251 \cdot 10^9 \quad 1,147 \cdot 10^9].$$

Графики переходных процессов в системе с РНС при соблюдении ($\Omega_o = 15 \text{ рад/с}$) и нарушении ($\Omega_o = 30 \text{ рад/с}$) условий робастности для $\Omega_H = 75 \text{ рад/с}$ приведены на рис. 3,а,б соответственно, где кривая 1 соответствует номинальным параметрам объекта управления, кривые 2 и 3 – вариации параметра $J_2 = 0,15 \pm 0,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Как показывает анализ полученных данных, при нарушении условий робастности параметрическая чувствительность цифровой системы управления мехатронным объектом с РНС существенно возрастает.

Чувствительность к вариациям собственных параметров РНС. Вопросы

чувствительности РНС к вариациям собственных параметров не теряют своей актуальности даже при цифровой реализации, поскольку ограниченная разрядная сетка вычислителя, квантование сигналов по уровню и по времени могут существенно затруднить практическую реализацию такого устройства и ухудшить качество управления при низком уровне его собственной параметрической грубости [1, 2].

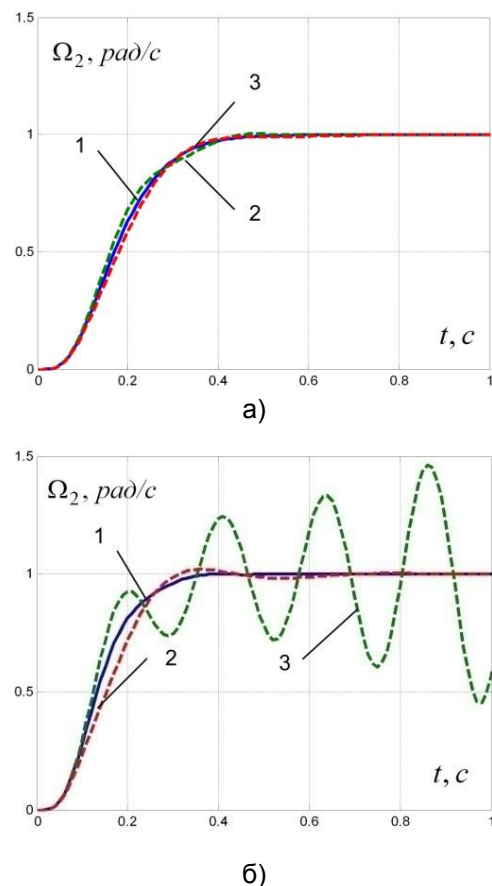


Рис. 3. Переходные характеристики системы с РНС в зоне робастности (а) и за ее пределами (б)

Структурная схема на рис. 1 наглядно показывает, что совокупность асимптотического наблюдателя и регулятора состояния представляет собой самостоятельную

динамическую систему с двумя комплексами обратных связей, образуемых элементами матрицы \mathbf{K}_d по координатам состояния НС и элементами матрицы \mathbf{L} – по его выходной координате.

Как было показано ранее [2] для аналоговых систем управления, РНС как единое динамическое звено обладает низкой чувствительностью к вариациям собственных параметров, если все обратные связи по координатам состояния (матрица \mathbf{K}_d) и по выходной координате объекта управления (матрица \mathbf{L}) являются отрицательными. При этом появление положительных обратных связей считается признаком высокой параметрической чувствительности РНС, поскольку приводит к снижению запаса устойчивости системы.

Указанные условия параметрической грубости аналоговых РНС обеспечиваются путем формирования темпа процесса управления путем выбора значения СГК полинома $D(z)$ и темпа процесса подстройки путем выбора значения СГК полинома $D^*(z)$ в пределах соответствующих зон робастности, исключающих появление положительных коэффициентов матриц обратных связей \mathbf{K}_d и \mathbf{L} .

В случае цифровой реализации наблюдателя состояния определить характер обратных связей оказывается затруднительно, поскольку даже для минимально-фазового звена коэффициенты дискретной передаточной функции могут принимать отрицательные значения. В связи с этим предлагается преобразовать матрицы цифрового наблюдателя состояния в непрерывную форму и определять зоны робастности для аналогового прототипа РНС.

Для построения областей робастности цифровых РНС была разработана программа в среде MatLab, осуществляющая преобразование наблюдателя в непрерывную форму с использованием функции $sys = d2c(sysd, 'zoh')$, расчет матриц контура управления \mathbf{K}_d и контура подстройки \mathbf{L} при вариации значений СГК характеристических полиномов и анализ характера обратных связей.

Важную роль в обеспечении параметрической грубости РНС играет выбор формы структурного представления наблюдателя, определяющий в основном конфигурацию областей робастности, в пределах которых гарантируется отсутствие положительных обратных связей.

В случае тенденции к вырождению передаточной функции объекта управления наблюдатель в КФУ будет терять наблюдаемость, что приведет к формированию положительных обратных связей в контуре подстройки, а наблюдатель в КФН будет терять управляемость, что приведет к формированию положительных обратных связей в контуре управления.

В этой ситуации более рациональным зачастую оказывается реализовать наблюдатель в форме объекта управления или в других формах, обладающих оптимальным (сбалансированным) сочетанием свойств управляемости и наблюдаемости [2, 15].

Рассмотрим влияние формы структурного представления наблюдателя состояний на чувствительность цифровой системы управления к вариациям собственных параметров РНС на примере двухмассовой МС с двигателем постоянного тока (рис. 2).

Синтезируем варианты цифровой системы с наблюдателями состояний различной структуры (КФУ, КФН и форма объекта) для значений СГК $\Omega_o = 12,5$ рад/с и $\Omega_n = 25$ рад/с, при которых аналоговый прототип системы обладает высокой чувствительностью к вариациям собственных параметров РНС.

При реализации РНС в координатах объекта управления для получения матриц \mathbf{A}_d , \mathbf{B}_d и \mathbf{C}_d в цифровой форме целесообразно использовать метод согласованного Z-преобразования (matched), поскольку в этом случае структура наблюдателя получается наименее сложной и в наибольшей степени соответствует структуре непрерывного объекта.

Переходные характеристики цифровой системы управления с РНС в формах КФУ, КФН и в форме объекта приведены на рис. 4,а,б,в соответственно, где кривая 1 соответствует номинальным параметрам РНС, кривая 2 – увеличению параметра k_1 на 0,1 %, кривая 3 – увеличению I_1 на 0,1 %.

Как показывает анализ полученных характеристик, цифровая система с наблюдателем состояний в канонических формах (КФУ и КФН), как и аналоговый прототип САУ, при заданном быстродействии обладает высокой чувствительностью к вариациям собственных параметров РНС. В то же время система с наблюдателем в координатах объекта управления имеет более широкую зону параметриче-

ской грубости, что обеспечивает значительно меньшую чувствительность к параметрическим возмущениям.

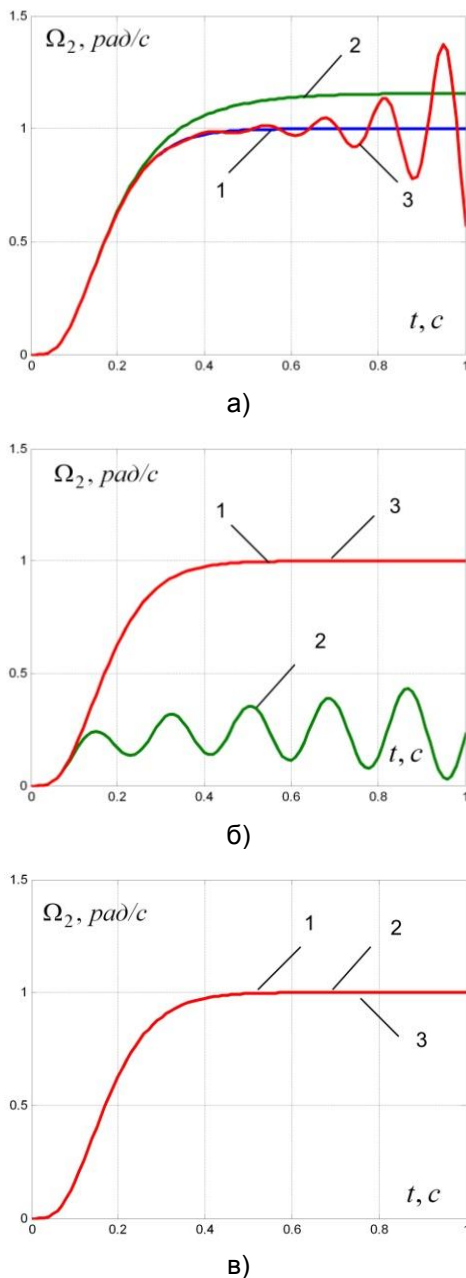


Рис. 4. Переходные характеристики цифровой системы с наблюдателем, реализованным в КФУ (а), в КФН (б) и в форме объекта (в)

Выводы. Таким образом, формирование характеристического полинома САУ в пределах области параметрической грубости, обеспечивающее минимально-фазовый характер передаточной функции РНС, позволяет синтезировать робастную цифровую систему управления. При этом конфигурация зоны параметрической грубости цифровой системы соответствует зоне аналогового прототипа, синтезированного по непрерывной модели объекта.

При тенденции объекта к вырождению передаточной функции в цифровой системе с РНС возрастает чувствительность к вариациям собственных параметров регулятора, что осложняет микропроцессорную реализацию управляющего устройства. В этой ситуации более рациональным оказывается реализовать наблюдатель в форме объекта управления или в других формах, обладающих оптимальным сочетанием свойств управляемости и наблюдаемости.

Список литературы

1. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. Структурно-параметрический синтез, оптимизация и настройка систем управления технологическими объектами. – Иваново, 2015. – 296 с.
2. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. Особенности синтеза параметрически грубых систем модального управления с наблюдателями состояния // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 5. – С. 3–14.
3. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. О проблеме неробастности спектра в задачах модального управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 10. – С. 8–13.
4. Джури Э.И. Робастность дискретных систем // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 3. – С. 3–28.
5. Гайдук А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.
6. Подчукаев В.А. Аналитические методы теории автоматического управления. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 256 с.
7. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
8. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Сложные задачи линейной теории управления. Некоторые подходы к решению // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 5. – С. 7–46.
9. Тютиков В.В., Тарарыкин С.В. Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново, 2006. – 256 с.
10. Волгин Л.Н. О грубых системах управления // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 4. – С. 186–187.
11. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
12. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.
13. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 1999. – 467 с.

14. Шенфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы: пер. с нем. / под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 464 с.

15. Ober R., McFarlane D. Balanced Canonical Forms for Minimal Systems: A Normalized Coprime Factor Approach // *Linear Algebra Appl.* – 1989. – Vol. 122–124. – P. 23–64.

References

1. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. *Strukturno-parametricheskiiy sintez, optimizatsiya i nastroyka sistem upravleniya tekhnologicheskimi ob"ektami* [Structural and Parametrical Synthesis, Optimization and Tuning of Control Systems for Industrial Plants]. Ivanovo, 2015. 296 p.

2. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. Osobennosti sinteza parametricheski grubyykh sistem modal'nogo upravleniya s nablyudatelyami sostoyaniya [Peculiarities of synthesis of parametrically robust modal control systems with state observers]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2012, no. 5, pp. 3–14.

3. Filimonov, A.B., Filimonov, N.B. O probleme nerobastnosti spektra v zadachakh modal'nogo upravleniya [The problem of spectre non-robustness in modal control tasks]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2011, no. 10, pp. 8–13.

4. Dzhuri, E.I. Robastnost' diskretnyykh sistem [Robustness of discrete systems]. *Izvestiya RAN. Avtomatika i telemekhanika*, 1999, no. 3, pp. 3–28.

5. Gaiduk, A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nyy podkhod)* [Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach)]. Moscow: FIZMATLIT, 2012. 360 p.

6. Podchukaev, V.A. *Analiticheskie metody teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Analytical

Methods of Automatic Control Theory]. Moscow: FIZMATLIT, 2002. 256 p.

7. Polyak, B.T., Shcherbakov, P.S. *Robastnaya ustoychivost' i upravlenie* [Robust Stability and Control]. Moscow: Nauka, 2002. 303 p.

8. Polyak, B.T., Shcherbakov, P.S. Slozhnye zadachi lineynoy teorii upravleniya. Nekotorye podkhody k resheniyu [Difficult tasks of linear control theory. Some approaches to their solution]. *Izvestiya RAN. Avtomatika i telemekhanika*, 2005, no. 5, pp. 7–46.

9. Tyutikov, V.V., Tararykin, S.V. *Robastnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob"ektami* [Robust Modal Control for Technological Objects]. Ivanovo, 2006. 256 p.

10. Volgin, L.N. O grubyykh sistemakh upravleniya [Robust control systems]. *Izvestiya RAN. Avtomatika i telemekhanika*, 1989, no. 4, pp. 186–187.

11. Gudvin, G.K., Grebe, S.F., Sal'gado, M.E. *Proektirovanie sistem upravleniya* [Control System Design]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2004. 911 p.

12. Kuo, B.C. *Teoriya i proektirovanie tsifrovyykh sistem upravleniya* [Theory and design of automatic control systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 488 p.

13. Andrievskiy, B.R., Fradkov, A.L. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazyke MATLAB* [Selected chapters of automatic control theory with examples in MATLAB language]. Saint-Petersburg: Nauka, 1999. 467 p.

14. Shenfel'd, R., Khabiger, E. *Avtomatizirovannyye elektroprivody* [Automatic electric drives]. Leningrad: Energoatomizdat, 1985. 464 p.

15. Ober, R., McFarlane, D. Balanced Canonical Forms for Minimal Systems: A Normalized Coprime Factor Approach. *Linear Algebra Appl.*, 1989, vol. 122–124, pp. 23–64.