



УДК 681.51

© 2001 г. **Е.Л. Еремин**, д-р техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

АДАПТИВНОЕ ШУНТИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ НЕМИНИМАЛЬНО-ФАЗОВЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Рассматривается метод построения системы управления для априорно неопределенного неминимально-фазового объекта с адаптивным шунт-компенсатором и типовым ПИ-регулятором.

Введение

Хорошо известно [1 – 9], что ряд способов управления неминимально-фазовыми объектами, в том числе и в условиях априорной неопределенности, опирается на использование стационарных динамических шунт-компенсаторов. Тем ни менее, при решении подобного рода задач возможно применение и адаптивного шунт-компенсатора, функциональное назначение которого может заключаться в обеспечении свойства строгой минимально-фазовости у расширенного объекта управления (РОУ), т.е. свойства, проявляющегося по завершении процесса адаптации у параллельного соединения – объект «плюс» шунт.

Постановка задачи

Рассматривается система управления, в которой основной контур состоит из РОУ и типового пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора. РОУ представляет собой специальное параллельное соединение неминимально-фазового объекта

$$a(p)y(t) = b(p)u(t),$$

$$a(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_1p + a_0, \quad (1)$$

$$b(p) = b_m p^m + b_{m-1}p^{m-1} + \dots + b_1p + b_0,$$

$$a_0, b_0 > 0$$

и шунт-компенсатора – реального дифференцирующего звена

$$(Tp + 1)z(t) = pu(t), \quad T = const > 0. \quad (2)$$

В уравнениях (1), (2) используются следующие обозначения: $y(t) \in R$ – выход объекта; $u(t) \in R$ – управление; p – оператор дифференцирования; $a(p)$ – гурвицев полином; $b(p)$ – полином с произвольным расположением корней; $k_0 > 1$, $k_0 = \deg a(p) - \deg b(p)$ – относительный порядок объекта.

Пусть выход РОУ – $x(t)$ сформирован следующим образом:

$$x(t) = y(t) + k(t)z(t), \quad k(t) > 0, \quad \forall t > 0, \quad (3)$$

где $z(t) \in R$ – выход шунта; $k(t) \in R$ – некоторый параметр самонастройки, поскольку функционирование объекта (1) протекает в условиях априорной неопределенности

$$a_i = a_i(\xi), \quad i = \overline{0, n}, \quad b_j = b_j(\xi), \quad j = \overline{0, m}, \quad \xi \in \Xi, \quad (4)$$

здесь ξ – набор неизвестных параметров, удовлетворяющих гипотезе квазистационарности и принадлежащих известному множеству Ξ . Отметим, что при формировании алгоритма адаптации

$$k(t) = F(e(t)) \quad (5)$$

явный вид функции $F(e(t))$ подлежит определению при решении соответствующей задачи синтеза.

Закон управления ПИ-регулятора описывается уравнением

$$u(t) = \left(K_{II} + \frac{1}{T_{II}p} \right) e(t), \quad e(t) = r(t) - x(t), \quad (6)$$

$$r(t) = r_* 1(t), \quad r_* = const, \quad (7)$$

где $e(t) \in R$ – ошибка регулирования РОУ; T_{II} и K_{II} – коэффициенты настройки регулятора; $r(t) \in R$ – задающее воздействие; r_* – значение уставки задания.

Предположим, что управление $u_*(t)$ обеспечивает существование в системе (1) – (3), (5) – (7) установившегося режима работы, в котором объект (1) будет описываться статической моделью

$$a_0 y_*(t) = u_*(t) = u_* = const, \quad (8)$$

а выход компенсатора (2) удовлетворять соотношению

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = 0. \quad (9)$$

Тогда, если в ходе процесса самонастройки параметра $k(t)$ будет выполняться требование

$$\lim_{t \rightarrow \infty} k(t) = k_* = const > 0, \quad (10)$$

то в силу уравнения (3) и существования предельных соотношений

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_* = y_*, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (11)$$

статическая модель РОУ также будет описываться уравнением (8).

Для системы управления (1) – (3), (5) – (7), со структурной схемой показанной на рис. 1 в виде Simulink-диаграммы, формулируется следующая задача:

требуется для системы управления (1) – (3), (5) – (7), функционирующей в условиях априорной неопределенности (4), синтезировать явный вид алгоритмов настройки параметра $k(t) > 0$, а также обеспечить выполнение целевых условий (10) и (11) при любых начальных условиях – $k(0), y(0)$.

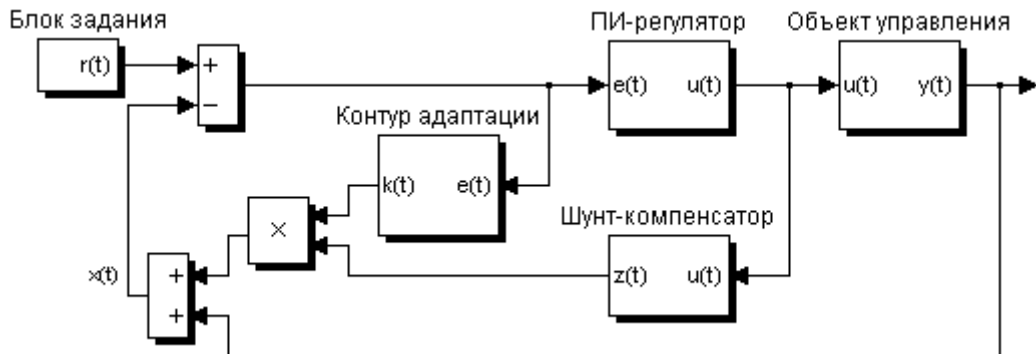


Рис. 1. Simulink-диаграмма модели системы управления (1) – (3), (5) – (7)

Синтез системы адаптации

При разработке системы управления будем следовать методике, основанной на использовании критерия гиперустойчивости [10].

Во-первых, объединяя уравнения (1) – (3), запишем выражение

$$(Tp + 1)a(p)e(t) = ((Tp + 1)b(p) + k(t)pa(p))u(t), \quad (12)$$

позволяющее, с учетом статической модели (8) и уравнений (5) – (7), получить эквивалентное описание исследуемой системы управления в виде:

$$\begin{cases} (Tp + 1)a(p)e(t) = ((Tp + 1)b(p) + k(t)pa(p))\mu(t), \\ e(t) = r(t) - y(t) - k(t)z(t), \quad \mu(t) = -(u(t) - u_*(t)). \end{cases} \quad (13)$$

Во-вторых, если для входа выхода системы (13) записать интегральное выражение

$$\eta(0,t) = -\int_0^t e(s)\mu(s)ds \quad (14)$$

и синтезировать следующий алгоритм настройки параметра $k(t)$

$$\frac{dk(t)}{dt} = \begin{cases} q_0|e(t)|^q, & \forall |e(t)| \geq \delta_0, \\ 0, & \forall |e(t)| < \delta_0, \end{cases} \quad q, q_0, \delta_0 = const > 0, \quad (15)$$

где $q, q_0, \delta_0 = const$, причем δ_0 – достаточно малая величина, задающая размер зоны нечувствительности алгоритма, то для правой части выражения (14), аналогично [10], с учетом явного вида функций $\mu(t)$ и $u(t)$, будет иметь место выполнение интегрального неравенства В.М. Попова

$$\begin{aligned} \eta(0,t) &= \int_0^t e(v)(u(v) - u_*)dv = \int_0^t e(v) \left(\int_0^v \omega(v-h)e(h)dh - u_* \right) dv \geq \\ &\geq -\gamma_0^2 = const, \quad \forall t > 0, \end{aligned} \quad (16)$$

поскольку передаточная функция импульсной переходной функции ПИ-регулятора – $\omega(v - h)$ удовлетворяет требованиям положительности и вещественности [10].

В-третьих, допуская, что в системе (13) имеет место выполнение целевого условия (10), для модели РОУ можно записать уравнение

$$(Tp + 1)a(p)e(t) = ((Tp + 1)b(p) + k_*pa(p))\mu(t) \quad (17)$$

или передаточную функцию вида

$$W(s) = \frac{(Ts + 1)b(s) + k_*sa(s)}{(Ts + 1)a(s)}, \quad s = j\omega. \quad (18)$$

Покажем, что существует такое достаточно большое положительное число $k_* = const$, что для передаточной функции (18) всегда имеет место частотное неравенство

$$\operatorname{Re}W(j\omega) > 0, \quad \forall \omega \geq 0. \quad (19)$$

Действительно, если выделить вещественную часть у передаточной функции (18), то в результате получим соотношение

$$\operatorname{Re}W(j\omega) = \operatorname{Re} \frac{b(j\omega)}{a(j\omega)} + k_* \operatorname{Re} \frac{j\omega}{1 + j\omega T}, \quad (20)$$

у которого первое слагаемое, учитывая явный вид полиномов (1) и гурвицевость полинома $a(s)$, всегда будет удовлетворять следующим ограничениям:

$$\begin{aligned} \frac{b(j0)}{a(j0)} = \frac{b_0}{a_0} = const > 0, \\ \operatorname{Re} \frac{b(j\omega_*)}{a(j\omega_*)} > 0, \quad \forall \omega \in [0, \omega_*], \end{aligned} \quad (21)$$

$$\max \left| \operatorname{Re} \frac{b(j\omega)}{a(j\omega)} \right| \leq \lambda_1, \quad \forall \omega \in [\omega_*, \infty], \quad \lambda_1 = const > 0,$$

где ω_* – некоторое фиксированное и отличное от нуля минимальное значение частоты, при котором еще сохраняется выполнение требования (19). Кроме того, если при частоте ω_* , но уже для второго слагаемого в выражении (20) также определить значение его реальной части

$$\operatorname{Re} \frac{j\omega_*}{1 + j\omega_* T} = \lambda_2 = const > 0, \quad (22)$$

то, учитывая очевидное свойство реального дифференцирующего звена вида

$$\operatorname{Re} \frac{j\omega}{1 + j\omega T} > \lambda_2, \quad \forall \omega > \omega_*, \quad (23)$$

можно понять, что всегда найдется такое достаточно большое положительное число k_* , при котором будет выполнено частотное неравенство

$$\left(\operatorname{Re} \frac{b(j\omega)}{a(j\omega)} + k_* \operatorname{Re} \frac{j\omega}{1 + j\omega T} \right) > 0, \quad \forall \omega \in [\omega_*, \infty]. \quad (24)$$

Объединяя соотношение (24) и второе неравенством из (21), получаем подтверждение справедливости выражения (19), что и требовалось показать.

B-четвертых, т.к. для системы управления (13), (15), при любых начальных условиях $k(0)$, $y(0)$, имеет место выполнение неравенств (16) и (19), то эту и ей эквивалентную системы следует считать, согласно критерию гиперустойчивости [10], асимптотически гиперустойчивыми. При этом, в силу асимптотической гиперустойчивости систем (13), (15) и (1) – (3), (6), (7), (15), будут выполнены предельные соотношения (11), а с учетом явного вида алгоритма (15) – и предельное условие (10).

Поскольку выполнение целевых требований (10), (11) имеет место в условиях априорной неопределенности (4), то для систем (13), (15) и (1) – (3), (6), (7), (15), из этого следует их адаптивность в заданном классе Ξ , что и является решением поставленной задачи управления.

Управление при кусочно-постоянном $r(t)$

Тип рассмотренных выше задач управления можно расширить, например, выполняя замену соотношений (7) на следующие:

$$r(t) = r_{\nu*} 1(t), \quad r_{\nu*} = \text{const}, \quad (25)$$

$$\forall t \in [t_{\nu H}, t_{\nu K}], \quad \nu = 1, 2, \dots, I, \quad t_{1H} = 0, \quad t_{IK} = t, \quad I = \text{const},$$

$r(t) \in R$ – кусочно-постоянное задающее воздействие; $r_{\nu*}$ – значение уставки задания на ν -м временном интервале; I – число временных интервалов постоянства функции $r(t)$; $t_{\nu H}$ и $t_{\nu K}$ – начало и конец ν -го интервала времени. Следует отметить, что далее рассматриваются только те системы, где каждый из временных отрезков $(t_{\nu K} - t_{\nu H})$ достаточно велик, причем настолько, что могут быть выполнены предельные соотношения вида

$$\lim_{t \rightarrow t_{\nu K}} |e_{\nu}(t)| \leq \delta_{\nu 0} = \text{const} > 0, \quad (26)$$

$$\forall t \in [t_{\nu H}, t_{\nu K}], \quad \nu = 1, 2, \dots, I, \quad I = \text{const},$$

с помощью которых обычно определяется такое свойство системы управления как диссипативность [9], в частности, при $t_{\nu K} < \infty$ означающее ограниченность всех траекторий системы предельным множеством или областью диссипации – S_{δ} . При этом величина $\delta_{\nu 0}$ может совпадать с зоной нечувствительности алгоритма (15), т.е. со значением – δ_0 .

Фактическая замена соотношений (7) на (26) приводит к тому, что вместо задачи об асимптотической гиперустойчивости и адаптивности системы управления (1) – (3), (6), (7), (15) теперь следует рассматривать задачу о гиперустойчивости и D -адаптивности системы (1) – (3), (6), (15), (25). Здесь термин D -адаптивность означает наличие в исследуемой системе

управления свойства диссипативности в условиях априорной неопределенности ее математического описания. Покажем, что система (1) – (3), (6), (15), (25) является гиперустойчивой и D -адаптивной. Поскольку для системы (1) – (3), (6), (15), (25) неравенства (16) и (19) по-прежнему выполнены, то на любом конечном временном ν -интервале исследуемая система будет гиперустойчивой, т.к. ее траектории, начиная с некоторого момента $t_\nu \in [t_{\nu H}, t_{\nu K}]$, будут ограничены некоторой достаточно малой величиной $e_\nu > 0$ в силу выполнения соотношений вида

$$|e(t)| \leq e_\nu, \forall t \geq t_\nu. \quad (27)$$

При этом если моментом времени t_ν считать момент, начиная с которого будет выполнено неравенство $\delta_{\nu 0} \geq e_\nu$, то, учитывая вид алгоритма (15), становится очевидным выполнение целевого условия (10), что свидетельствует о гиперустойчивости и D -адаптивности исследуемой системы.

Пример

С целью иллюстрации и оценки качества функционирования системы управления неминимально-фазовым объектом с ПИ-регулятором и адаптивным шунт-компенсатором рассмотрим такую систему со структурой, представленной на рис. 1, и блок-диаграммами ее элементов, показанными на рис. 2.

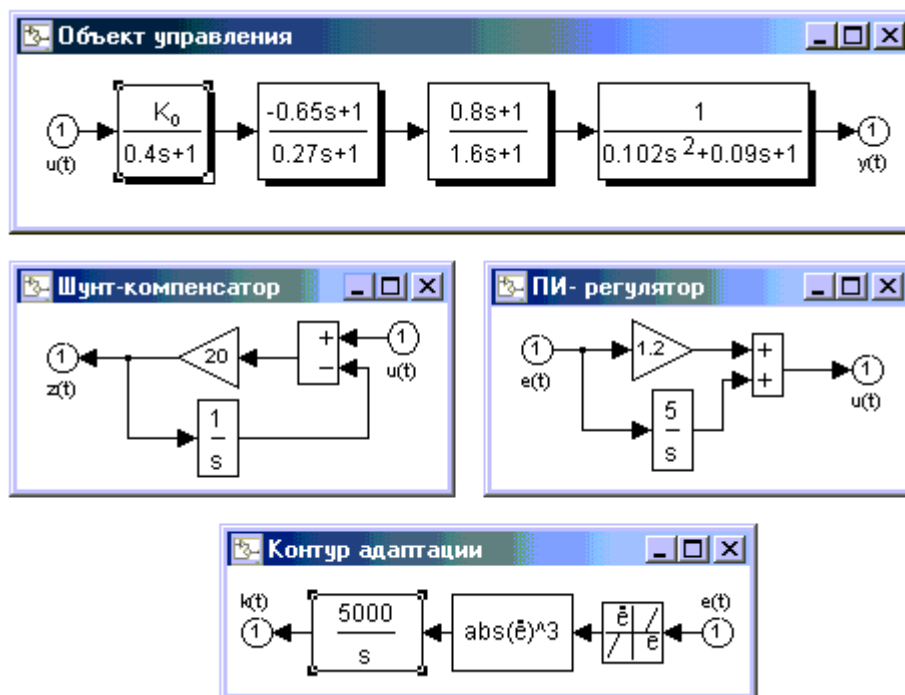


Рис. 2. Блок-диаграммы элементов системы управления (1) – (3), (6), (15), (25)

Большинство числовых значений параметров системы управления (1) – (3), (6), (15), (25) приведены на рис. 2, за исключением зоны нечувствительности алгоритма адаптации (15), величина которой была задана сле-

дующим образом: $\delta_{v0} = 0.0001$. Кроме того, уровень априорной неопределенности определялся коэффициентом передачи объекта управления

$$K_0 = 1, K_0 = 3. \quad (28)$$

Динамика процессов, протекающих в адаптивной системе управления (1) – (3), (6), (15) при $K_0 = 1$ и задающем воздействии

$$r(t) = \begin{cases} 1.5, & 0 \leq t < 30, \\ 0.5, & 30 \leq t < 70, \\ 2.0, & 70 \leq t \leq 100, \end{cases} \quad (29)$$

изображена на рис. 3, а вид процессов в этой же системе, но при $K_0 = 3$, показан на рис. 4

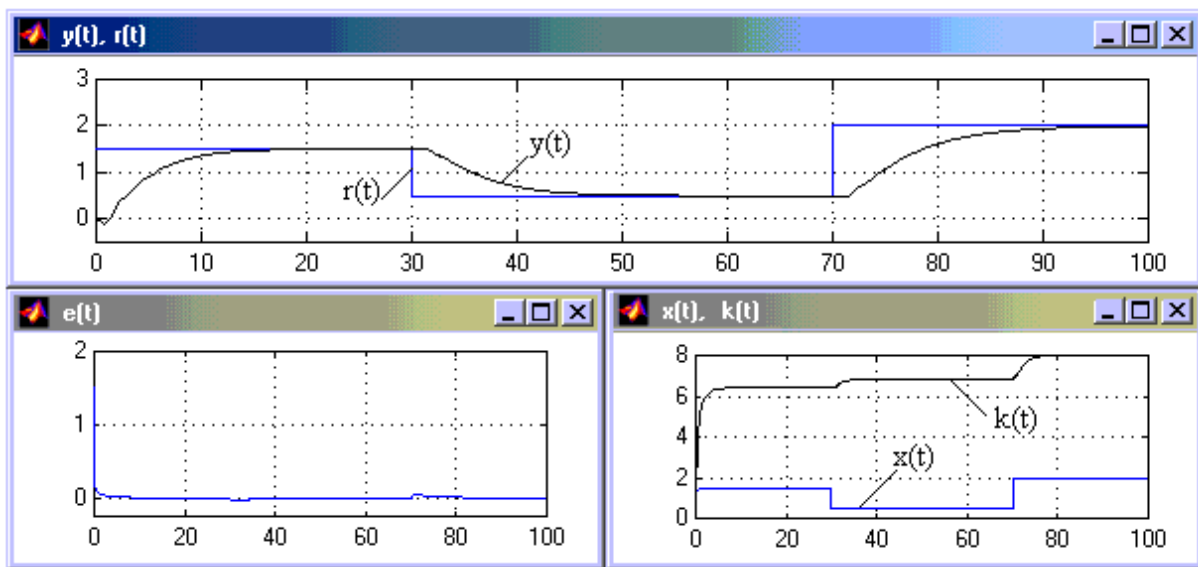


Рис. 3. Временные характеристики системы управления (1) – (3), (6), (15), (29) при $K_0 = 1$

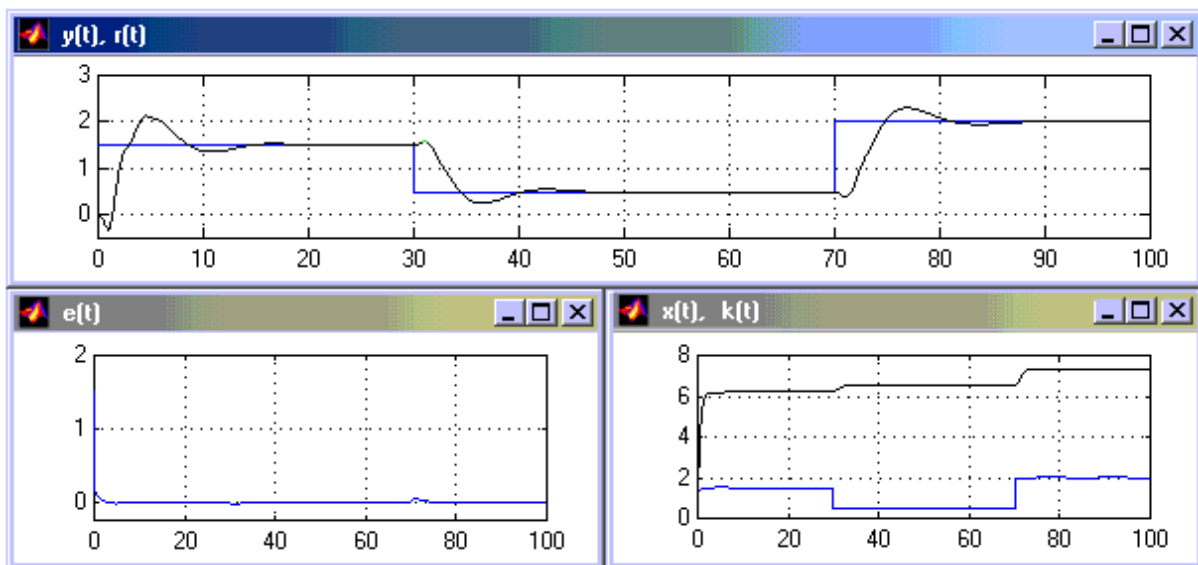


Рис. 4. Временные характеристики системы управления (1) – (3), (6), (15), (29) при $K_0 = 3$
Аналогичные процессы в системе управления (1), (2), (6), (25), но с

использованием стационарного шунт-компенсатора, когда уравнение выхода РОУ имеет вид

$$x(t) = y(t) + k_{ш}z(t), \quad k_{ш} = 2.2, \quad (30)$$

показаны на рис. 5. Здесь $k_{ш}$ – стационарный коэффициент усиления шунта, значение которого выбрано для случая, когда коэффициент передачи объекта управления $K_0 = 1$.

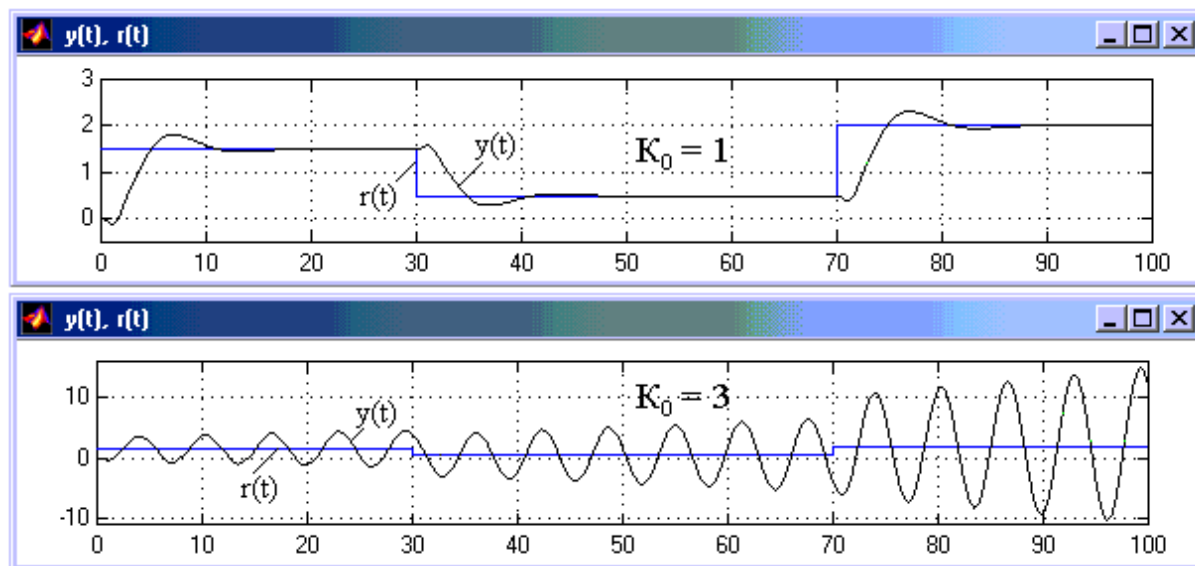


Рис. 5. Динамика входа и выхода системы управления (1), (2), (6), (25), (30) при $K_0 = 1$ и $K_0 = 3$

Заключение

Сопоставим динамические процессы, протекающие в условиях неопределенности (28) в системах с адаптивным шунт-компенсатором (1) – (3), (6), (15), (29) и со стационарным шунт-компенсатором (1), (2), (6), (25), (30). В последней из этих систем, что хорошо видно из графиков на рис. 5, при существенном изменении параметров объекта управления может произойти не только значительное ухудшение качества ее функционирования, но и потеря в системе управления устойчивости. Этого недостатка лишена система управления (1) – (3), (6), (15), (29); кроме того (см. рис. 3 и 4), при существенном изменении параметров объекта управления качество ее работы остается достаточно хорошим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еремин Е.Л. Гиперустойчивость систем управления нелинейным объектом с запаздыванием // Автоматизация технологических процессов. Фрунзе: Фрунз. политех. ин-т, 1987.
2. А.с. 1534428 (СССР). Система автоматического управления для объектов с запаздыванием / Е.Л. Еремин, Н.Н. Горбина, А.М. Цыкунов. Б.И. 1990. №1.



3. А.с. 1619229 (СССР). Система автоматического управления для объектов с запаздыванием /Е.Л. Еремин, Н.Н. Горбина. Б.И. 1991. №1.
4. А.с. 1631515 (СССР). Система автоматического управления для астатических объектов с запаздыванием /Е.Л. Еремин, Н.Н. Горбина, И.И. Кравченко. Б.И. 1991. №8.
5. А.с. 1667001 (СССР). Система автоматического управления для объектов с запаздыванием /Е.Л. Еремин, Н.Н. Горбина. Б.И. 1991. №28.
6. Еремин Е.Л., Горбина Н.Н. Локальные адаптивные системы управления уровнем воды в магистральных каналах //Совершенствование методов и средств автоматизации гидромелиоративных систем. Бишкек: Кыргыз. сельхоз. ин-т, 1994.
7. Фрадков А.Л. Адаптивная стабилизация минимально-фазовых объектов с векторным входом без измерения производных выхода //Докл. РАН. 1994. Т. 337. №5.
8. Andrievsky B.R., Fradkov A.L., Stotsky A.A. Shunt compensation for indirect sliding-mode adaptive control //Proc. of 13th Triennial World Congress IFAC. San Francisco. USA. 1996.
9. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 2000.
10. Еремин Е.Л., Цыкунов А.М. Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. Бишкек: Илим, 1992.

УДК 62_506.1

© 2001 г. **Е.Л. Еремин**, д-р техн. наук,
Л.В. Ильина

(Амурский государственный университет, Благовещенск)

АДАПТИВНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ БОЛЬШЕ ЕДИНИЦЫ

Излагается метод построения беспойсковой самонастраивающейся системы идентификации параметров априорно неопределенного динамического объекта с использованием фильтра переменных состояний и специального организованного генератора сигнала идентификации.

Введение

Известно, что в условиях априорной неопределенности синтез контура адаптивной параметрической идентификации устойчивых объектов возможен только тогда, когда доступны измерению его переменные состояния. В противном случае для решения этой проблемы необходимо применять некоторые дополнительные меры.