

4. АДАПТИВНОЕ И РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

4.1. Пример управления объектом первого порядка

4.1.1. Постановка задачи

Знакомство с методами адаптивного и робастного управления начнем с простого примера. Рассмотрим скалярный объект

$$\dot{x} = qx + u, \quad (4.1)$$

где x – регулируемая переменная, u – сигнал управления, q – постоянный параметр. Пусть качество слежения за задающим воздействием $g(t)$ (представленным ограниченной кусочно-непрерывной функцией времени) определяется *эталонной моделью*

$$\dot{x}_M = -\lambda x_M + \lambda g, \quad (4.2)$$

где сигнал x_M носит название *эталонного выхода*, а положительная постоянная λ определяет желаемые динамические свойства замкнутой системы. Очевидно, что модель (5.2) можно переписать в виде

$$x_M = \frac{1}{Tp + 1} g,$$

где $T = 1/\lambda$ – постоянная времени апериодического звена первого порядка. Введение эталонной модели позволяет формализовать постановку задачи, потребовав выполнения целевого условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_M(t)) = 0 \quad (4.3)$$

для любых задающих воздействий $g(t)$. Другими словами, необходимо синтезировать управление u , обеспечивающее нулевое установившееся значение *ошибки слежения за эталонной моделью*

$$\varepsilon = x - x_M. \quad (4.4)$$

Рассмотрим три возможных решения поставленной задачи, основанные на использовании классической теории управления, а также методов адаптивного и робастного управления.

4.1.2. Неадаптивное управление

Используем регулятор комбинированного управления

$$u = -\lambda x - q_0 x + \lambda g, \quad (4.5)$$

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Удалено:

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0 см

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)

Удалено:

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0 см

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)

Удалено:

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, русский (Россия)

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0 см

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)

Удалено:

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено: ¶

Отформатировано: По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано ... [1]

Отформатировано ... [2]

Отформатировано ... [3]

Отформатировано ... [4]

Удалено:

Отформатировано ... [5]

Отформатировано ... [6]

Отформатировано ... [7]

Отформатировано ... [8]

где q_0 – номинальное значение (оценка) параметра q . Отметим, что регулятор (4.4) содержит стабилизирующую обратную связь λx , компенсирующую обратную связь $q_0 x$ и прямую связь по задающему воздействию λg (см. рис. 4.1, а). Наличие в структуре регулятора прямых и обратных связей объясняет его название – регулятор *комбинированного* управления. Так как коэффициенты регулятора λ и q_0 полагаются фиксированными (ненастраиваемыми), то регулятор (4.5) будем также называть *неадаптивным*.

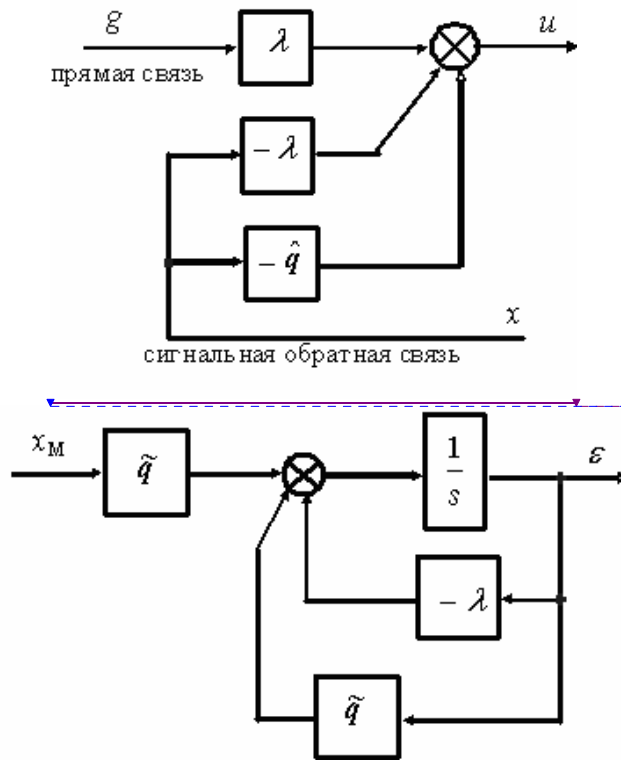


Рис. 4.1. Неадаптивное управление: а) структура регулятора; б) эквивалентная модель ошибки

Найдем модель ошибки замкнутой системы. Сначала, подставляя (4.5) в (4.1), получим модель замкнутого объекта управления

$$\dot{x} = -\lambda x + q_0 x + \lambda g \quad (4.6)$$

где $\vartheta = \theta - q_0$ – параметрическая ошибка. Вычитая далее (4.2) из (4.6), получаем искомую модель ошибки замкнутой системы

$$\dot{\varepsilon} = -\lambda \varepsilon + \vartheta \varepsilon$$

С учетом равенства (4.4) окончательно имеем (см. рис. 4.1, б)

- Удалено: <sp><sp><sp><sp>
- Удалено: \hat{q}
- Удалено: θ
- Отформатировано ... [9]
- Удалено: $\hat{\theta}$
- Отформатировано ... [10]
- Отформатировано ... [11]
- Удалено: $\hat{\theta}$
- Удалено: \hat{q}
- Удалено: ¶ ... [12]
- Отформатировано ... [13]
- Отформатировано ... [14]
- Удалено: Найдем мод ... [15]
- Отформатировано ... [16]
- Удалено:
- Удалено:
- Удалено:
- Отформатировано ... [17]
- Отформатировано ... [18]
- Отформатировано ... [19]
- Отформатировано ... [20]
- Отформатировано ... [21]
- Отформатировано ... [22]
- Отформатировано ... [23]
- Отформатировано ... [24]
- Отформатировано ... [25]
- Отформатировано ... [26]
- Отформатировано ... [27]
- Отформатировано ... [28]
- Отформатировано ... [29]
- Отформатировано ... [30]
- Отформатировано ... [31]
- Отформатировано ... [32]
- Отформатировано ... [33]
- Отформатировано ... [34]
- Отформатировано ... [35]
- Отформатировано ... [36]
- Отформатировано ... [37]
- Отформатировано ... [38]

$$\dot{\varepsilon} = -(\lambda - \vartheta)\varepsilon + \vartheta x_M. \quad (4.7)$$

На основе анализа модели (4.7) можно сделать следующие выводы о свойствах неадаптивного регулятора (4.5).

Если $q = q_0$, то модель ошибки замкнутой системы принимает вид

$$\dot{\varepsilon} = -\lambda\varepsilon,$$

откуда следует стремление $\varepsilon \rightarrow 0$. Другими словами, при равенстве номинального значения параметра истинному замкнутая система является асимптотически (экспоненциально) устойчивой, а установившаяся ошибка слежения за эталонной моделью равна нулю.

Если $q \neq q_0$, но $|\vartheta| < \lambda$, то из уравнения (4.7) следует асимптотическая устойчивость замкнутой системы (т.к. $(\lambda - \vartheta) > 0$) и возможность появления ненулевой установившейся ошибки слежения за счет слагаемого ϑx_M . Другими словами, малые параметрические возмущения не нарушают устойчивости замкнутой системы, но могут ухудшить ее точностные свойства.

Если $q \neq q_0$ и $|\vartheta| > \lambda$, то замкнутая система может потерять устойчивость в случае отрицательного значения величины $(\lambda - \vartheta)$.

Как обеспечить устойчивость системы и высокое качество слежения за эталонной моделью в том случае, если параметр q является неизвестным или известен с высокой степенью приближенности?

4.1.3. Адаптивное управление

Алгоритм адаптивного управления удобно представить в виде двух блоков:

– *настраиваемого регулятора*

$$u = -\lambda x - \hat{q}x + \lambda g; \quad (4.8)$$

– *алгоритма адаптации*

$$\dot{\hat{q}} = \tau(\varepsilon, x). \quad (4.9)$$

Структура алгоритма адаптации $\tau(\varepsilon, x)$ будет определена позже. В уравнениях (4.8), (4.9) \hat{q} – настраиваемый параметр регулятора, генерируемый алгоритмом адаптации из условия минимизации ошибки слежения ε . Особо отметим, что порядок замкнутой системы повысился за счет включения в ее структуру динамического блока – алгоритма адаптации (4.9). Поэтому при исследовании устойчивости замкнутой системы необходимо расширить вектор состояния, добавив новую координату – *параметрическую ошибку* φ .

- Удалено: .
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Удалено: .
- Удалено: .
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено: .
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Удалено: .
- Удалено: .
- Удалено: .
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см
- Удалено: θ
- Отформатировано: Шрифт: курсив
- Отформатировано: По центру
- Отформатировано: По центру, Отступ: Первая строка: 1 см
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Удалено: .
- Удалено: .
- Отформатировано ... [39]
- Отформатировано ... [40]
- Отформатировано ... [41]
- Отформатировано ... [42]
- Отформатировано ... [43]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [44]
- Отформатировано ... [45]
- Отформатировано ... [46]
- Отформатировано ... [47]
- Отформатировано ... [48]
- Отформатировано ... [49]

Подставляя (4.8) в (4.1), вычитая из полученного уравнения (4.2) и принимая во внимание условие, что $\dot{q} = \dot{q} - \dot{q} = -\dot{q}$, получим следующую модель замкнутой системы в координатах ε и \dot{q} (т.е. модель ошибки – см. рис. 4.2, б):

$$\dot{\varepsilon} = -\lambda\varepsilon + \dot{q}, \quad (4.10)$$

$$\dot{q} = -\tau(\varepsilon, x). \quad (4.11)$$

Для выбора структуры алгоритма адаптации $\tau(\varepsilon, x)$ применим функцию Ляпунова вида

$$V(\varepsilon, \dot{q}) = \frac{1}{2}\varepsilon^2 + \frac{1}{2\gamma}\dot{q}^2, \quad (4.12)$$

где γ – произвольный положительный коэффициент (его назначение будет пояснено позже). Тогда производная функции (4.12) в силу уравнений (4.10) и (4.11) после элементарных преобразований принимает вид

$$\dot{V}(\varepsilon, \dot{q}) = -\lambda\varepsilon^2 + \dot{q}\varepsilon - \frac{1}{\gamma}\dot{q}^2(\varepsilon, x). \quad (4.13)$$

Очевидно, что при выборе $\tau(\varepsilon, x) = \gamma\varepsilon$ после сокращения одинаковых слагаемых получаем

$$\dot{V}(\varepsilon, \dot{q}) = -\lambda\varepsilon^2 \leq 0. \quad (4.14)$$

Из последнего неравенства следует устойчивость по Ляпунову состояния равновесия $(\varepsilon, \dot{q}) = (0, 0)$ (в силу теоремы П2.1 из приложения 2) и выполнение равенства

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

(в силу теоремы П2.4 из приложения 2), что означает выполнение левого условия (4.3).

Другими словами, алгоритм адаптивного управления (рис. 4.2, а)

$$u = -\lambda x - \dot{q}x + \lambda g, \quad (4.15)$$

$$\dot{q} = \gamma\varepsilon \quad (4.16)$$

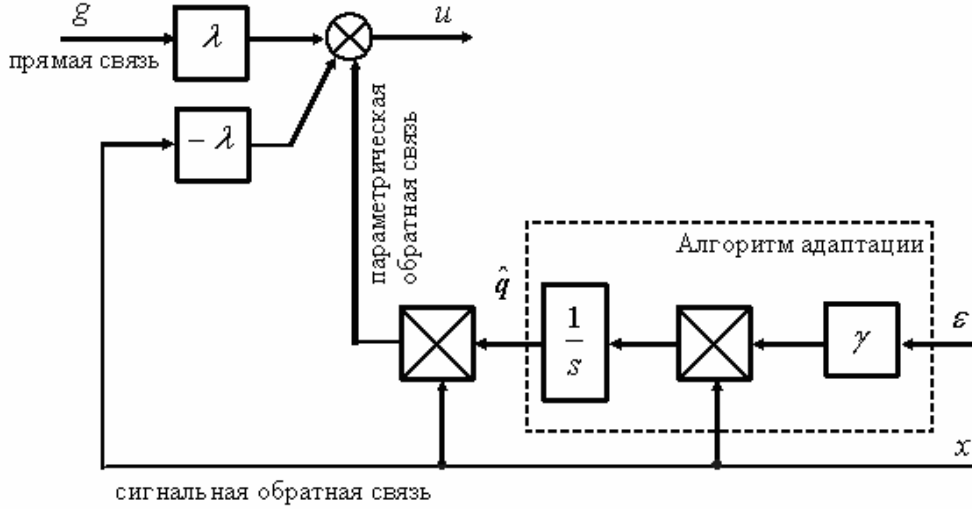
обеспечивает асимптотическое слежение за эталонной моделью для параметрически неопределенного объекта (4.1). При этом коэффициент γ определяет скорость настройки параметра q_0 и носит название коэффициента адаптации. В структуре алгоритма адаптации выделяют

Удалено: .
 Отформатировано ... [50]
 Удалено: $\tilde{\theta}$
 Отформатировано ... [51]
 Отформатировано ... [52]
 Отформатировано ... [53]
 Удалено:
 Отформатировано ... [54]
 Отформатировано ... [55]
 Удалено:
 Отформатировано ... [56]
 Отформатировано ... [57]
 Удалено:
 Отформатировано ... [58]
 Отформатировано ... [59]
 Удалено: . . .
 Отформатировано ... [60]
 Отформатировано ... [61]
 Отформатировано ... [62]
 Удалено: .
 Отформатировано ... [63]
 Удалено:
 Отформатировано ... [64]
 Отформатировано ... [65]
 Отформатировано ... [66]
 Отформатировано ... [67]
 Отформатировано ... [68]
 Отформатировано ... [69]
 Отформатировано ... [70]
 Отформатировано ... [71]
 Отформатировано ... [72]
 Отформатировано ... [73]
 Отформатировано ... [74]
 Отформатировано ... [75]
 Отформатировано ... [76]
 Отформатировано ... [77]
 Отформатировано ... [78]
 Отформатировано ... [79]
 Отформатировано ... [80]
 Код поля изменен ... [81]
 Отформатировано ... [82]
 Код поля изменен ... [83]
 Отформатировано ... [84]
 Отформатировано ... [85]
 Отформатировано ... [86]
 Код поля изменен ... [87]
 Отформатировано ... [88]
 Удалено: \hat{q}
 Отформатировано ... [89]
 Отформатировано ... [90]
 Отформатировано ... [91]
 Отформатировано ... [92]

также сигнал ошибки слежения $\varepsilon(t)$ и регрессор $x(t)$. Особо отметим, что в общем случае выполнение целевого условия (4.3) не гарантирует сходимости по параметрам, т.е. выполнение равенства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\theta}(t) = 0$$

а)



б)

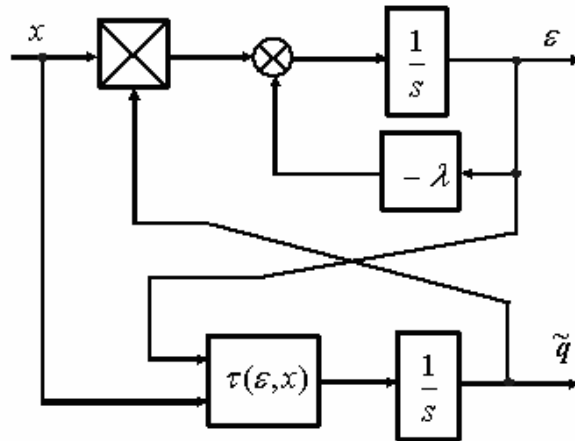


Рис. 4.2. Адаптивное управление: а) структура регулятора; б) эквивалентная модель ошибки

Действительно, как было показано выше, состояние равновесия $(\varepsilon, \hat{\theta}) = (0, 0)$ замкнутой адаптивной системы является только устойчивым по Ляпунову (но не асимптотически устойчивым). Для обеспече-

Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт

Код поля изменен

Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт

Код поля изменен

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)

Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт

Отформатировано: По центру, интервал Перед: 0

Отформатировано: английский (США)

Удалено: ¶

¶

Отформатировано: По центру, интервал Перед: 0

а)

g
прямая связь

СИГН

б)

Удалено:

Удалено: <sp>

Отформатировано ... [93]

Удалено: Очевидно, что при выборе $\tau(\varepsilon, x) = \gamma \varepsilon x$... [94]

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Удалено: Особо отметим, что в общем случае выполнение ... [95]

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

ния сходимости по параметрам необходимо выполнение дополнительного условия, накладываемого на свойства регрессора (в данном случае на свойства переменной $x(t)$) и получившего название *условия исчезающего возбуждения*. Говорят, что регрессор $x(t)$ является *исчезающим* (или удовлетворяет условию исчезающего возбуждения), если существуют такие положительные числа T и α , что для всех $t > 0$ справедливо неравенство

$$\frac{1}{T} \int_t^{t+T} x^2(\tau) d\tau > \alpha.$$

Приведенное неравенство означает, что на любом интервале времени $[t, t+T]$ сигнал $x(t)$ *интегрально отделен от нуля*, т. е. значение соответствующего интеграла больше некоторой положительной константы α .

Условие исчезающего возбуждения допускает следующее объяснение. Если регрессор с течением времени стремится к нулю, то скорость настройки параметра \hat{q} может уменьшаться быстрее, чем скорость уменьшения ошибки слежения ε (из формулы (4.16) видно, что скорость настройки параметра \hat{q} пропорциональна произведению x на ε). Поэтому настраиваемый параметр \hat{q} может «не успеть» сойтись к истинному значению q до «обнуления» ошибки ε .

Отметим, что в рассматриваемой задаче слежения характер поведения регрессора $x(t)$ определяется характером задающего воздействия $g(t)$. Поэтому условие исчезающего возбуждения в задачах адаптивного слежения может быть переформулировано в терминах задающего воздействия.

Основной недостаток адаптивного регулятора становится очевидным из выражения (4.14), если вспомнить, что свойство устойчивости по Ляпунову не является грубым. На практике это проявляется в высокой чувствительности адаптивных систем к структурным и сигнальным возмущениям.

Рассмотрим объект, подверженный воздействию внешнего возмущения $\delta(t)$:

$$\dot{x} = qx + u + \delta(t). \quad (4.17)$$

Пусть возмущение $\delta(t)$ является ограниченным, т. е. $|\delta(t)| < \bar{\delta}$ для всех $t > 0$ и некоторой положительной константы $\bar{\delta}$. Используем для управления объектом (4.17) адаптивный регулятор (4.15), (4.16). Тогда модель ошибки замкнутой системы примет вид

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено:

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено: $\hat{\theta}$

Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт

Удалено: $\hat{\theta}$

Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт

Удалено: $\hat{\theta}$

Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт

Удалено: θ

Отформатировано: Шрифт: курсив

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Удалено:

Удалено:

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено:

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)

Удалено:

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

$$\dot{\varepsilon} = -\lambda\varepsilon + q\hat{x} + \delta, \quad (4.18)$$

$$\dot{\hat{q}} = -\gamma x \varepsilon. \quad (4.19)$$

Вычисляя производную функции Ляпунова (4.13) в силу уравнений (4.18), (4.19), получим

$$V(\varepsilon, \hat{q}) = -\lambda\varepsilon^2 + \varepsilon\delta \leq -\lambda\varepsilon^2 + \bar{\delta}|\varepsilon|. \quad (4.20)$$

Так как $V < 0$ при $|\varepsilon| > \bar{\delta}/\lambda$, то из (4.20) следует ограниченность ошибки слежения ε . Однако параметрическая ошибка \hat{q} может неограниченно расти при малых значениях ε , когда $V > 0$. Поэтому при наличии внешних возмущений, несмотря на ограниченность ошибки слежения ε , может наблюдаться *неограниченный параметрический дрейф* (состоящий в неограниченном росте значения настраиваемого параметра \hat{q}). Естественно, что с практической точки зрения такая ситуация является неприемлемой. Поэтому проблема управления параметрически неопределенным объектом в условиях внешних возмущений требует применения других, специальных методов.

4.1.4. Нелинейное робастное управление

Алгоритм нелинейного робастного управления объектом (4.17) имеет вид (см. рис. 4.3, а)

$$u = -\lambda x - \gamma x^2 \varepsilon + \lambda g. \quad (4.21)$$

В этом случае модель ошибки замкнутой системы описывается уравнением (см. рис. 4.3, б)

$$\dot{\varepsilon} = -\lambda\varepsilon + qx - \gamma x^2 \varepsilon + \delta. \quad (4.22)$$

Вычисляя производную функции Ляпунова

$$V(\varepsilon) = \frac{1}{2}\varepsilon^2 \quad (4.23)$$

в силу уравнения (4.22), получим

$$V(\dot{\varepsilon}) = -\lambda\varepsilon^2 + qx\varepsilon - \gamma x^2 \varepsilon^2 + \delta\varepsilon \leq -\lambda\varepsilon^2 + qx\varepsilon - \gamma x^2 \varepsilon^2 + \bar{\delta}|\varepsilon|.$$

Выделим в последнем уравнении полные квадраты разности, добавив и вычтя слагаемые $q^2/(4\gamma)$ и $\bar{\delta}^2/(2\lambda)$:

- Удалено: ...
- Отформатировано: русский (Россия)
- Удалено: ...
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Удалено: ...
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено: $\tilde{\theta}$
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт
- Удалено: φ
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано ... [96]
- Отформатировано ... [97]
- Отформатировано ... [98]
- Удалено: ...
- Отформатировано ... [99]
- Отформатировано ... [100]
- Отформатировано ... [101]
- Удалено: ...
- Отформатировано ... [102]
- Отформатировано ... [103]
- Отформатировано ... [104]
- Отформатировано ... [105]
- Удалено: ...
- Отформатировано ... [106]
- Отформатировано ... [107]
- Отформатировано ... [108]
- Отформатировано ... [109]
- Удалено: ... [110]
- Отформатировано ... [111]
- Отформатировано ... [112]
- Отформатировано ... [113]
- Отформатировано ... [114]
- Отформатировано ... [115]
- Отформатировано ... [116]
- Отформатировано ... [117]

$$I\{\varepsilon\} = -\frac{\lambda}{2}\varepsilon^2 - \left(\gamma x^2 \varepsilon^2 - qx\varepsilon + \frac{q^2}{4\gamma} \right) + \frac{q^2}{4\gamma} - \left(\frac{\lambda}{2}\varepsilon^2 - |\varepsilon|\bar{\delta} + \frac{1}{2\lambda}\bar{\delta}^2 \right) + \frac{1}{2\lambda}\bar{\delta}^2 =$$

$$= -\frac{\lambda}{2}\varepsilon^2 - \left(\sqrt{\gamma}x\varepsilon - \frac{q}{2\sqrt{\gamma}} \right)^2 + \frac{q^2}{4\gamma} - \left(\sqrt{\frac{\lambda}{2}}|\varepsilon| - \sqrt{\frac{1}{2\lambda}}\bar{\delta} \right)^2 + \frac{\bar{\delta}^2}{2\lambda}.$$

Пренебрегая в последнем выражении квадратными слагаемыми, получим

$$I\{\varepsilon\} \leq -\frac{\lambda}{2}\varepsilon^2 + \frac{q^2}{4\gamma} + \frac{\bar{\delta}^2}{2\lambda}.$$

Учитывая далее равенство $\lambda\varepsilon^2/2 = \lambda V$ и рассматривая переменную V в качестве функции времени, можно записать

$$I\{\varepsilon(t)\} \leq -\lambda V(t) + \frac{q^2}{4\gamma} + \frac{\bar{\delta}^2}{2\lambda}. \quad (4.24)$$

Решая дифференциальное уравнение (4.24), получим

$$V(t) \leq \exp(-\lambda t)V(0) + \frac{q^2}{4\gamma\lambda} + \frac{\bar{\delta}^2}{2\lambda^2}.$$

Учитывая далее зависимость (4.23) и переходя в последнем выражении к норме ошибки слежения ε , окончательно получаем

$$|\varepsilon(t)| \leq \exp\left(-\frac{\lambda}{2}t\right)|\varepsilon(0)| + \Delta, \quad (4.25)$$

где $\Delta = \frac{|q|}{\sqrt{2\gamma\lambda}} + \frac{\bar{\delta}}{\lambda}$. Неравенство (4.25) задает экспоненциальную мажоранту переходного процесса по норме ошибки слежения $\varepsilon(t)$ (см. рис. 4.4).

Основные свойства робастного регулятора (4.21) могут быть сформулированы следующим образом. Для произвольного положительного коэффициента нелинейной обратной связи γ регулятор (4.21) обеспечивает ограниченность всех сигналов и экспоненциальную сходимость ошибки слежения к предельному установившемуся значению Δ . При отсутствии внешних возмущений (т. е. при $\delta(t) \equiv 0$) величина предельного установившегося значения может быть сделана произвольно малой за счет увеличения коэффициента нелинейной обратной связи γ . Во многих практических случаях такие свойства замкнутой системы являются вполне приемлемыми.

- Удалено: ¶
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 16 пт
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 3 пт
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано ... [118]
- Отформатировано ... [119]
- Отформатировано ... [120]
- Отформатировано ... [121]
- Отформатировано ... [122]
- Отформатировано ... [123]
- Отформатировано ... [124]
- Отформатировано ... [125]
- Отформатировано ... [126]
- Отформатировано ... [127]
- Отформатировано ... [128]
- Отформатировано ... [129]
- Отформатировано ... [130]
- Отформатировано ... [131]
- Отформатировано ... [132]
- Отформатировано ... [133]
- Отформатировано ... [134]
- Отформатировано ... [135]
- Отформатировано ... [136]
- Отформатировано ... [137]
- Отформатировано ... [138]
- Отформатировано ... [139]
- Отформатировано ... [140]
- Отформатировано ... [141]
- Отформатировано ... [142]
- Отформатировано ... [143]
- Отформатировано ... [144]
- Отформатировано ... [145]
- Отформатировано ... [146]
- Отформатировано ... [147]
- Отформатировано ... [148]

В завершение параграфа отметим, что сравнение структурных схем алгоритма адаптивного управления (рис. 4.2, а) и нелинейного робастного управления (рис. 4.3, а) позволяет определить простое правило получения нелинейного робастного управления из адаптивного. Для этого достаточно исключить из структуры алгоритма адаптации интегратор, заменив интегральную обратную связь на статическую нелинейную.

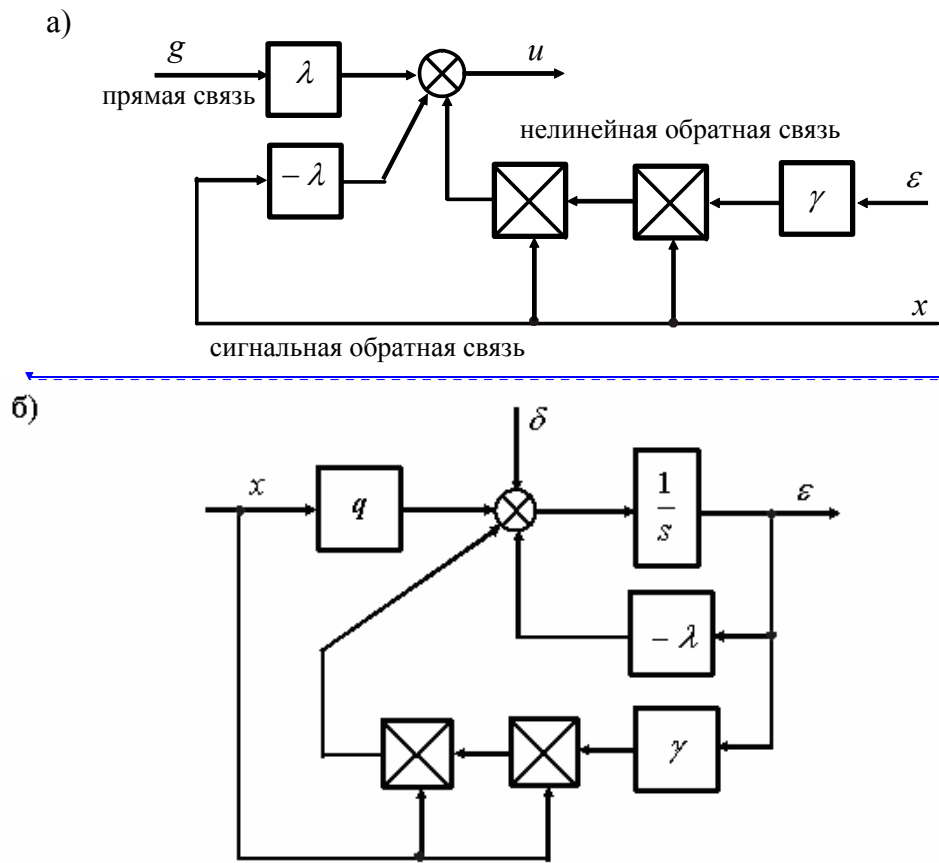


Рис. 4.3. Нелинейное робастное управление:
а) структура регулятора; б) эквивалентная модель ошибки

Отформатировано: интервал Перед: 0 пт

Удалено: ¶

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Удалено: <sp>

Отформатировано: интервал Перед: 0 пт

б)

Удалено:

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

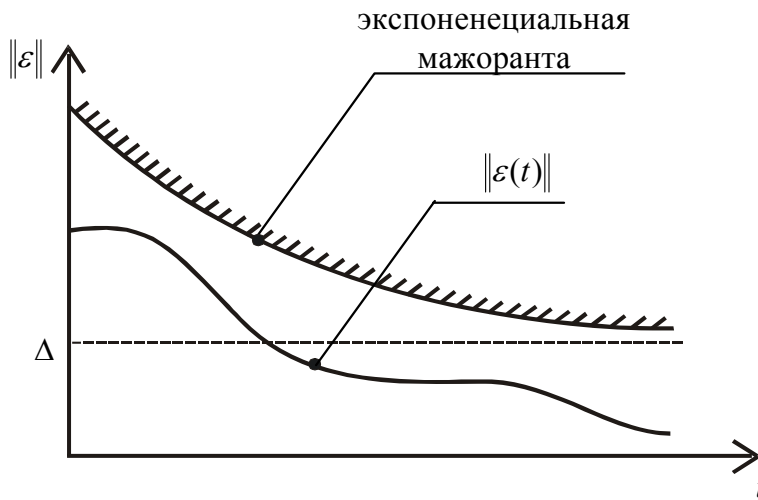


Рис. 4.4. Мажоранта переходного процесса по норме ошибки слежения $\varepsilon(t)$

4.2. Принципы построения систем адаптивного управления

4.2.1. Этапы синтеза адаптивных систем

Рассмотрим последовательность синтеза системы адаптивного управления параметрически неопределенным объектом общего вида

$$\dot{x} = f(x, u, q), \quad (4.26)$$

где x – вектор состояния, u – сигнал управления, q – вектор неизвестных параметров. Пусть цель управления состоит в обеспечении асимптотического слежения вектора состояния $x(t)$ за эталонным состоянием $x_M(t)$, т.е. в обеспечении целевого условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \quad (4.27)$$

где $e = x - x_M$ – ошибка слежения (или сигнальная ошибка).

Этап 1: синтез ненастраиваемого регулятора. В предположении, что параметры q являются известными, синтезируется регулятор

$$u = U(x, x_M, q), \quad (4.28)$$

обеспечивающий выполнение целевого условия (4.27). Регулятор может быть синтезирован любым методом современной теории автоматического управления.

Этап 2: формирование адаптивного регулятора. Неизвестные параметры q заменяются в регуляторе (4.28) настраиваемыми параметрами

- Удалено: ¶
- Отформатировано ... [149]
- Удалено: Пренебрега ... [150]
- Отформатировано ... [151]
- Отформатировано ... [152]
- Отформатировано ... [153]
- Удалено: Основные ¶ ... [154]
- Отформатировано ... [155]
- Удалено: В заверше ... [156]
- Удалено: ¶
- Отформатировано ... [157]
- Отформатировано ... [158]
- Отформатировано ... [159]
- Отформатировано ... [160]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [161]
- Отформатировано ... [162]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [163]
- Отформатировано ... [164]
- Удалено: θ
- Отформатировано ... [165]
- Отформатировано ... [166]
- Отформатировано ... [167]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [168]
- Отформатировано ... [169]
- Удалено: -
- Отформатировано ... [170]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [171]
- Отформатировано ... [172]
- Удалено: θ
- Отформатировано ... [173]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [174]
- Отформатировано ... [175]
- Отформатировано ... [176]
- Удалено: .
- Удалено: .
- Отформатировано ... [177]
- Удалено: θ
- Отформатировано ... [178]
- Отформатировано ... [179]
- Отформатировано ... [180]

ми \hat{q} . Структура алгоритма адаптации, генерирующего настраиваемые параметры, будет определена на следующем этапе. Таким образом, получаем выражения для адаптивного регулятора

$$u = U(x, x_M, \hat{q}), \quad (4.29)$$

$$\dot{\hat{q}} = \Theta(x, e), \quad (4.30)$$

где структура алгоритма адаптации $\Theta(x, e)$ подлежит определению. Метод формирования настраиваемого регулятора (4.29), основанный на непосредственной замене q на \hat{q} , получил название *метода непосредственной компенсации*. Им не исчерпываются все возможные способы формирования настраиваемых регуляторов. Другие методы (включающие итеративные процедуры синтеза) можно найти в литературе.

Этап 3: получение модели ошибки. Подставляя (4.29) в (4.26) и дифференцируя выражения для сигнальной $e(t) = x(t) - x_M(t)$ и параметрической $\varphi(t) = q - \hat{q}(t)$ ошибок, получаем *модель ошибки замкнутой системы*

$$\dot{e} = \Psi(e, \tilde{q}, t), \quad (4.31)$$

$$\dot{\tilde{q}} = -\Theta(e, t). \quad (4.32)$$

Этап 4: синтез алгоритма адаптации. Выбирается функция Ляпунова $V(e, \tilde{q})$ и вычисляется ее производная в силу уравнений (4.31), (4.32). Далее на основе анализа выражения для $\dot{V}(e, \tilde{q})$ выбирается структура алгоритма адаптации $\Theta(e, t)$, обеспечивающая достижение заданных свойств устойчивости замкнутой системы. Данный этап является во многом творческим, так как не существует универсальных методов выбора "подходящих" функций Ляпунова.

4.2.2. Базовые структуры алгоритмов адаптации

Среди рассмотренных выше этапов синтеза адаптивных систем принципиально новым (с точки зрения классической теории управления) является этап синтеза алгоритма адаптации. Для его упрощения желательно получить некоторые базовые (стандартные) структуры алгоритмов, являющиеся применимыми для возможно более широких классов задач управления параметрически неопределенными объектами. Такие базовые структуры алгоритмов адаптации синтезируют на основе *канонических моделей ошибки*. К ним относятся: статическая модель ошибки, динамическая модель с измеряемым состоянием и динамическая модель с измеряемым выходом.

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)

Удалено: .

Отформатировано: русский (Россия)

Удалено: .

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено: θ

Удалено: $\hat{\theta}$

Отформатировано: Шрифт: курсив

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт

Удалено: .

Отформатировано: русский (Россия)

Удалено: .

Удалено: $\dot{e} = \Phi(e, \varphi)$

Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт

Отформатировано: русский (Россия)

Удалено:

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Удалено: .

Отформатировано: По центру, интервал Перед: 0

Удалено: ¶

Удалено: 4

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано ... [181]

Отформатировано ... [182]

Статическая модель ошибки описывается уравнением (рис. 4.5.а)

$$\varepsilon = \omega^T \vartheta, \quad (4.33)$$

где ε – сигнальная ошибка, $\omega(t)$ – вектор известных функций времени (регрессор), $\vartheta = q - \hat{q}$ – вектор параметрических ошибок, q – вектор неизвестных параметров, \hat{q} – вектор настраиваемых параметров. Рассматриваемая задача состоит в выборе такого правила настройки параметров \hat{q} , чтобы все сигналы в замкнутой системе были ограниченными, и дополнительно

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = 0. \quad (4.34)$$

Статическая модель ошибки канонического вида (4.33) появляется в задачах идентификации линейных моделей и в задачах адаптивного управления по выходной переменной. В теории идентификации она получила название *линейной регрессионной модели*.

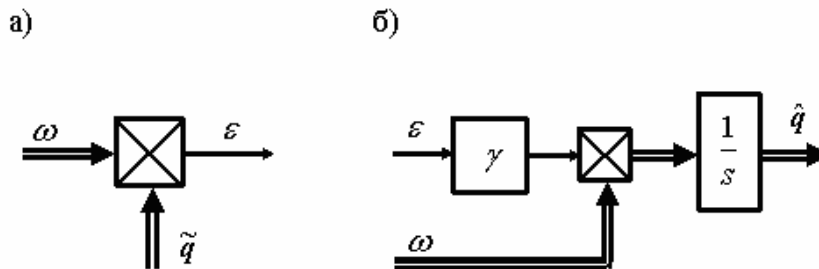


Рис. 4.5. Статическая модель ошибки (а) и соответствующий ей базовый алгоритм адаптации (б)

Базовый (стандартный) алгоритм адаптации модели (5.33) имеет вид (рис. 4.5.б)

$$\dot{\hat{q}} = \gamma \omega \varepsilon, \quad (4.35)$$

где $\gamma > 0$ – коэффициент адаптации.

Для доказательства свойств устойчивости замкнутой модели (4.33), (4.35) используем функцию Ляпунова $V(\vartheta) = \frac{1}{2\gamma} \vartheta^T \vartheta$. Вычисляя ее производную по времени в силу уравнений (4.33) и (4.35), получим

$$\dot{V}(\vartheta) = \frac{1}{\gamma} \vartheta^T \dot{\vartheta} = -\frac{1}{\gamma} \vartheta^T \omega \varepsilon = -\varepsilon^2 \leq 0,$$

- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено:
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено: θ
- Отформатировано: Шрифт: курсив
- Удалено: $\hat{\theta}$
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено:
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено:
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см
- Удалено: [6,41]
- Отформатировано: По центру, Отступ: Первая строка: 0 см
- Удалено: <sp>
- Отформатировано ... [183]
- Отформатировано ... [184]
- Отформатировано ... [185]
- Отформатировано ... [186]
- Удалено:
- Отформатировано ... [187]
- Отформатировано ... [188]
- Отформатировано ... [189]
- Удалено:
- Отформатировано ... [190]
- Удалено:
- Отформатировано ... [191]
- Отформатировано ... [192]
- Отформатировано ... [193]
- Отформатировано ... [194]
- Отформатировано ... [195]

откуда следует устойчивость по Ляпунову состояния равновесия $\varphi=0$ и выполнение целевого условия (4.34).

Динамическая модель ошибки с измеряемым состоянием имеет вид (рис. 4.6, а)

$$\dot{e} = Ae + b\omega^T \varphi, \quad (4.36)$$

где e – вектор ошибки слежения (вектор состояния модели ошибки), A – гурвицаева матрица, а b – вектор постоянных коэффициентов (матрица A и вектор b полагаются известными). Как и раньше, рассматриваемая проблема состоит в выборе такого правила настройки параметров \hat{q} , чтобы все сигналы в замкнутой системе были ограниченными и дополнительно выполнялось целевое условие (4.34).

Динамическая модель ошибки канонического вида (4.36) появляется в задачах адаптивного управления по состоянию (см. также п. 4.3. настоящей книги).

Базовый (стандартный) алгоритм адаптации модели (4.36) имеет вид (рис. 4.6, б)

$$\dot{\varphi} = \gamma \omega b^T P e, \quad (4.37)$$

где симметрическая положительно определенная матрица P является решением уравнения

$$A^T P + PA = -Q \quad (4.38)$$

с произвольной симметрической положительно определенной матрицей Q . Для доказательства свойств устойчивости замкнутой модели (4.36)–(4.38) используем функцию Ляпунова

$$V(e, \varphi) = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2\gamma} \varphi^T \varphi$$

- Удалено: .
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено: .
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено: бы
- Удалено: .
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Отформатировано: По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано ... [196]
- Отформатировано ... [197]
- Отформатировано ... [198]
- Отформатировано ... [199]
- Отформатировано ... [200]
- Отформатировано ... [201]
- Отформатировано ... [202]
- Отформатировано ... [203]
- Отформатировано ... [204]
- Отформатировано ... [205]
- Отформатировано ... [206]

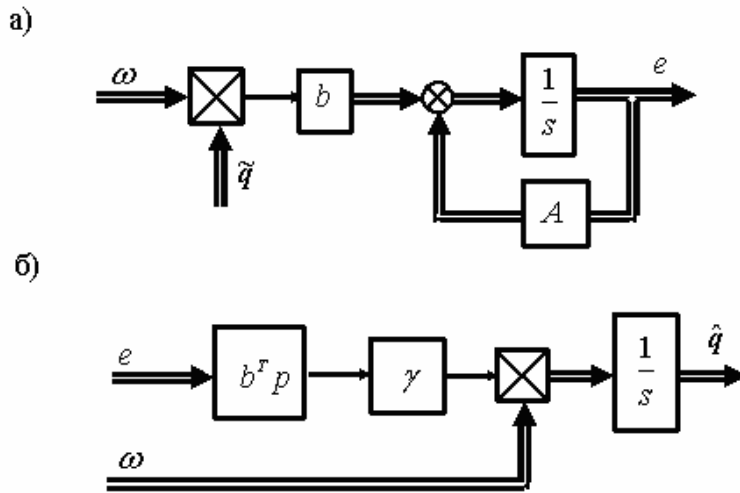


Рис. 4.6. Динамическая модель ошибки с измеряемым состоянием (а) и соответствующий ей базовый алгоритм адаптации (б)

Вычисляя ее производную по времени в силу уравнений (4.36)–(4.38), получим

$$\dot{\mathcal{L}}(e, \hat{q}) = \frac{1}{2} e^T (A^T P + PA) e + \hat{q}^T \omega b^T P e - \frac{1}{\gamma} \hat{q}^T \dot{\hat{q}} = -\frac{1}{2} e^T Q e \leq 0,$$

откуда следует устойчивость по Ляпунову состояния равновесия $(e, \hat{q}) = (0, 0)$ и выполнение целевого условия (4.34).

Динамическая модель ошибки с измеряемым выходом имеет вид

$$\dot{\varepsilon} = A\varepsilon + b\omega^T \hat{q}, \quad (4.39)$$

$$\varepsilon = c^T e, \quad (4.40)$$

где e – недоступный прямым измерениям вектор состояния модели ошибки, ε – измеряемая ошибка слежения, A , b и c – гурвицева матрица и векторы известных постоянных коэффициентов. Рассматриваемая задача состоит в выборе такого правила настройки параметров \hat{q} , чтобы все сигналы в замкнутой системе были ограниченными, и дополнительно выполнялось целевое условие (4.34).

Динамическая модель ошибки канонического вида (4.39), (4.40) появляется в задачах адаптивного управления по выходной переменной. Очевидно, что модель (4.39), (4.40) может быть переписана в виде (рис. 4.7, а)

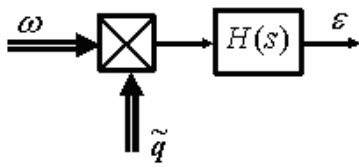
$$\varepsilon = H(s)\omega^T \hat{q}, \quad (4.41)$$

где передаточная функция $H(s)$ определяется выражением

- Отформатировано: По центру
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт
- Удалено: <sp>
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт
- Удалено:
- Удалено: Базовый (стандартный) алгоритм адаптации модели (4.36) имеет вид (рис. 4.6.б)¶
- $\hat{q} = \gamma \omega b^T P e, \dots \dots (4.37)¶$
- где симметрическая положительно определенная матрица P является решением (... [207])
- Отформатировано (... [208])
- Удалено:
- Удалено: ¶
- Отформатировано (... [209])
- Удалено:
- Отформатировано (... [210])
- Отформатировано (... [211])
- Отформатировано (... [212])
- Отформатировано (... [213])
- Удалено:
- Отформатировано (... [214])
- Удалено:
- Отформатировано (... [215])
- Удалено: бы
- Удалено:
- Отформатировано (... [216])
- Удалено: [6,48]
- Отформатировано (... [217])
- Удалено:
- Отформатировано (... [218])
- Отформатировано (... [219])
- Отформатировано (... [220])
- Отформатировано (... [221])
- Отформатировано (... [222])
- Отформатировано (... [223])
- Отформатировано (... [224])
- Отформатировано (... [225])

$$H(s) = c^T (sI - A)^{-1} b. \quad (4.42)$$

а)



б)

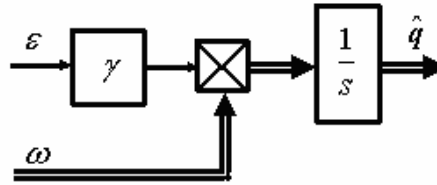


Рис. 4.7. Динамическая модель ошибки с измеряемым выходом (а) и алгоритм адаптации (б), применимый для СПВ-функций $H(s)$

Исследуем сначала условия применимости стандартного алгоритма адаптации (4.37). Очевидно, что данный алгоритм в общем случае является неприменимым, так как вектор состояния модели ошибки e недоступен прямым измерениям. Однако, если удалось бы выбрать матрицу P таким образом, что

$$b^T P = c^T, \quad (4.43)$$

то алгоритм адаптации (4.37) принял бы вид (см. рис. 4.7, б)

$$\dot{\hat{q}} = \gamma \omega \varepsilon. \quad (4.44)$$

Алгоритм (4.44) является физически реализуемым, так как в нем используются только измеряемые сигналы.

Таким образом, условием применимости базового алгоритма адаптации вида (4.44) является существование симметрической положительно определенной матрицы P , удовлетворяющей одновременно двум уравнениям (4.38) и (4.43). В свою очередь, такая матрица может быть найдена не для всех моделей ошибки (4.39), (4.40), а только для моделей со строго положительно вещественной передаточной функцией.

Утверждение 4.1.¹ Симметрическая положительно определенная матрица P , являющаяся решением одновременно двух уравнений (4.38) и (4.43), существует только в том случае, если передаточная функция модели ошибки (4.42) является строго положительно вещественной.

Определение строгой положительной вещественности дано в приложении 3. Из него видно, что СПВ-функции² являются асимптотически устойчивыми, а вносимый ими фазовый сдвиг не превышает 90° . Насколько ограничительным является требование строгой положи-

¹ в литературе по теории автоматического управления данное утверждение известно под названием *лемма Якубовича-Калмана*.

² т.е. строго положительно вещественные передаточные функции

Удалено: 5

Отформатировано: По центру, интервал Перед: 0 пт

Удалено: <sp>

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: курсив

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: курсив

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено: . . .

Отформатировано: По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено: . .

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Удалено: [48]

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

тельной вещественности? Для ответа на этот вопрос учтем, что СПВ передаточная функция не может иметь относительную степень выше единицы (что определяется требованием предельного фазового сдвига в 90°). Очевидно, что класс динамических систем с единичной относительной степенью является достаточно узким, и в него не попадают математические модели большинства реальных технических устройств. Таким образом, базовый алгоритм адаптации (4.44) может быть использован только в частных случаях, и необходимо получение универсальных алгоритмов адаптации, применимых ко всему классу моделей ошибки вида (4.39), (4.40).

В настоящее время предложено несколько различных решений задачи синтеза универсальных алгоритмов адаптации для динамической модели ошибки с измеряемым выходом. Мы остановимся только на методе *расширенной ошибки*. В соответствии с данным методом формируется дополнительный сигнал коррекции

$$\zeta = H(s)\omega^T(t)\hat{q}(t) - \hat{q}^T(t)H(s)\omega(t), \quad (4.45)$$

и сигнал *расширенной ошибки*

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon + \zeta, \quad (4.46)$$

где $H(s)$ – передаточная функция модели ошибки (4.42). Структура схемы расширения приведена на рис. 4.8, а.

Каковы свойства расширенной ошибки? Подставляя выражения для ε и ζ из (4.41) и (4.45) в (4.46), получим

$$\hat{\varepsilon} = H(s)\omega^T(t)(\theta - \hat{q}(t)) + H(s)\omega^T(t)\hat{q}(t) - \hat{q}^T(t)H(s)\omega(t).$$

Учтем, что в силу свойств линейных систем и стационарности вектора \underline{a} он может быть вынесен за символ передаточной функции $H(s)$:

$$\hat{\varepsilon} = \theta^T H(s)\omega(t) - H(s)\omega^T(t)\hat{q}(t) + H(s)\omega^T(t)\hat{q}(t) - \hat{q}^T(t)H(s)\omega(t).$$

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено:

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Отформатировано: интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено:

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Отформатировано: интервал Перед: 0 пт

Удалено:

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено:

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Удалено: θ

Отформатировано: Шрифт: курсив

Удалено:

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

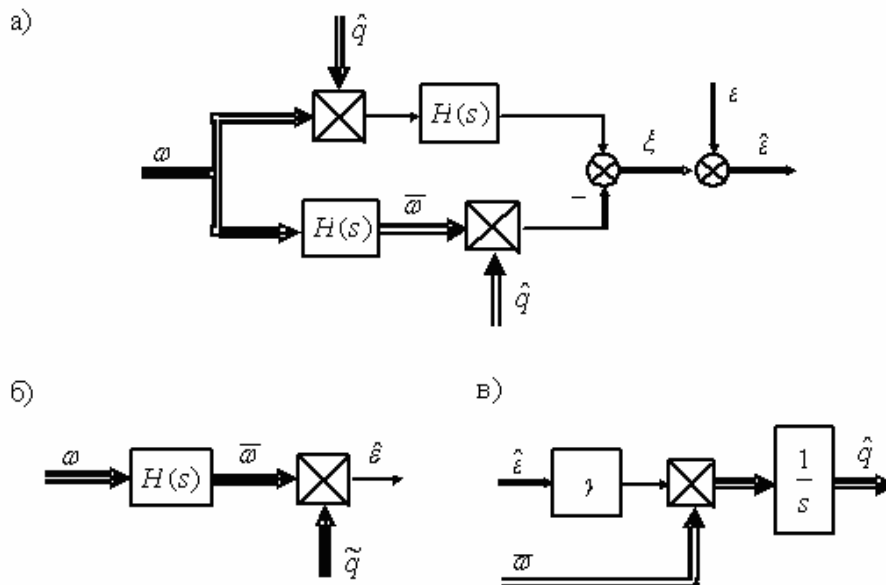


Рис. 4.8. Схема расширения сигнала ошибки (а), эквивалентная модель ошибки (б) и соответствующий ей базовый алгоритм адаптации (в)

После элементарных преобразований окончательно получаем (см. рис. 4.8, б)

$$\hat{\varepsilon} = \bar{\omega}^T \hat{q}, \quad (4.48)$$

где $\bar{\omega}(t) = H(s)\omega(t)$ – отфильтрованный регрессор. Таким образом, для расширенной ошибки слежения $\hat{\varepsilon}$ получили статическую модель ошибки стандартного вида (4.33) (с точностью до замены ε на $\hat{\varepsilon}$ и ω на $\bar{\omega}$). Поэтому для адаптивной настройки модели (4.48) можно использовать стандартный алгоритм (4.35), который в данном случае принимает вид (см. рис. 4.8, в)

$$\hat{q} = \gamma \bar{\omega} \hat{\varepsilon}. \quad (4.49)$$

Таким образом, полностью алгоритм адаптации модели (4.39), (4.40) будет описываться уравнениями (4.45), (4.46) и (4.49).

В следующих параграфах будет показано, как базовые структуры алгоритмов адаптации могут быть использованы при решении конкретных задач управления неопределенными объектами.

Отформатировано: По центру, интервал Перед: 0 пт

Удалено: <sp>
Отформатировано: интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено:
Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено:
Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено:

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Удалено:

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

4.3. Адаптивное управление многомерным объектом

4.3.1. Постановка задачи

Рассмотрим параметрически неопределенный объект управления

$$\dot{x} = Ax + bu, \quad (4.50)$$

$$y = c^T x, \quad (4.51)$$

где x – n -мерный вектор состояния, доступный прямым измерениям, u – сигнал управления, y – регулируемая переменная, и

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 \\ & & & O & \\ 0 & 0 & 0 & K & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & K & -a_{n-1} \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ M \\ b_0 \end{pmatrix}, \quad c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ M \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4.52)$$

Можно показать, что передаточная функция объекта (4.50), (4.51) с матрицами (4.52) имеет вид

$$H(s) = \frac{b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0}.$$

Параметры a_i и $b_0 > 0$ объекта управления считаются неизвестными.

Пусть желаемый характер поведения регулируемой переменной y определяется эталонной моделью

$$\dot{x}_M = A_M x_M + b_M g, \quad (4.53)$$

$$y_M = c^T x_M, \quad (4.54)$$

где x_M – n -мерный вектор состояния эталонной модели, y_M – эталонный выход, g – сигнал задания, и

$$A_M = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 \\ & & & O & \\ 0 & 0 & 0 & K & 1 \\ -a_0^M & -a_1^M & -a_2^M & K & -a_{n-1}^M \end{pmatrix}, \quad b_M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ M \\ b_0^M \end{pmatrix}.$$

При этом коэффициенты эталонной модели a_i^M могут быть выбраны методом стандартных характеристических полиномов на основе

Удалено: ¶

Отформатировано: По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: По центру, интервал Перед: 0

Отформатировано: По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Удалено: .

Отформатировано (... [226])

Отформатировано (... [227])

Отформатировано (... [228])

Удалено: .

Отформатировано (... [229])

Удалено: .

Отформатировано (... [230])

Отформатировано (... [231])

Отформатировано (... [232])

Отформатировано (... [233])

Отформатировано (... [234])

Удалено: .

Отформатировано (... [235])

Отформатировано (... [236])

Отформатировано (... [237])

Удалено: .

Отформатировано (... [238])

Отформатировано (... [239])

Отформатировано (... [240])

Отформатировано (... [241])

Удалено: .

Отформатировано (... [242])

Удалено: .

Отформатировано (... [243])

Отформатировано (... [244])

Отформатировано (... [245])

Отформатировано (... [246])

Отформатировано (... [247])

Удалено: .

Отформатировано (... [248])

Отформатировано (... [249])

Отформатировано (... [250])

Отформатировано (... [251])

Отформатировано (... [252])

заданных показателей качества замкнутой системы – времени переходного процесса t_{II} и перерегулирования σ . Коэффициент b_0^M выбирается из условия обеспечения заданного коэффициента усиления замкнутой системы.

Рассматриваемая задача состоит в синтезе управления, обеспечивающего в замкнутой системе ограниченность всех сигналов и выполнение целевого условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - y_M(t)) = 0. \quad (4.55)$$

Так как параметры объекта управления являются неизвестными, то решение будем искать в классе адаптивных алгоритмов управления. При этом особо отметим, что динамические показатели качества, задаваемые эталонной моделью, будут обеспечены в замкнутой системе только после завершения переходных процессов настройки адаптивного регулятора.

4.3.2. Синтез регулятора

В соответствии с методикой синтеза адаптивных систем, изложенной в п. 4.2.1, построим сначала неадаптивное управление в предположении, что параметры объекта точно известны. Для этого выведем модель ошибки слежения по состоянию

$$e = x - x_M. \quad (4.56)$$

Дифференцируя (4.56) по времени с учетом (4.50) и (4.53), имеем

$$\dot{e} = Ax - A_M x_M + bu - b_M g.$$

Учтем, что

$$Ax - A_M x_M = Ax - A_M x_M \pm A_M x = A_M e + h \Delta^T x,$$

$$bu - b_M g = b_0 h \left(u - \frac{b_0^M}{b_0} g \right),$$

где $h^T = [0 \ 0 \ 1]$, $\Delta^T = [a_0^M - a_0 \ a_1^M - a_1 \ \dots \ a_{n-1}^M - a_{n-1}]$. Вводя обозначение для вектора неизвестных параметров q и регрессора ω

$$q^T = \left[-\frac{1}{b_0} \Delta^T \quad -\frac{b_0^M}{b_0} \right], \quad \omega^T(t) = [x^T(t) \ g(t)],$$

окончательно получаем

$$\dot{e} = A_M e + b_0 h (u + \omega^T q). \quad (4.57)$$

- Удалено: [48].
- Удалено: .
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено: .
- Отформатировано: По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано ... [253]
- Отформатировано ... [254]
- Удалено: .
- Удалено: 5
- Отформатировано ... [255]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [256]
- Отформатировано ... [257]
- Отформатировано ... [258]
- Отформатировано ... [259]
- Отформатировано ... [260]
- Отформатировано ... [261]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [262]
- Отформатировано ... [263]
- Отформатировано ... [264]
- Отформатировано ... [265]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [266]
- Удалено: θ
- Отформатировано ... [267]
- Отформатировано ... [268]
- Отформатировано ... [269]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [270]
- Отформатировано ... [271]
- Отформатировано ... [272]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [273]
- Отформатировано ... [274]
- Отформатировано ... [275]

Анализ модели (4.57) позволяет выбрать структуру ненастраиваемого регулятора в виде

$$u = -\omega^T q. \quad (4.58)$$

Действительно, при подстановке (4.58) в (4.57) получаем

$$\dot{e} = A_M e,$$

откуда (в силу гурвицевости матрицы A_M) следует асимптотическая устойчивость замкнутой системы и выполнение целевого условия (4.55).

Однако управление (4.58) является физически нереализуемым, так как вектор параметров q неизвестен. Поэтому заменим в регуляторе вектор неизвестных постоянных параметров q вектором настраиваемых параметров \hat{q} . Получим выражение для настраиваемого регулятора вида

$$u = -\omega^T \hat{q}. \quad (4.59)$$

Подставляя (4.59) в (4.57), выводим модель ошибки слежения для адаптивной системы (4.50). (4.54) и (4.59)

$$\dot{e} = A_M e + \beta h \omega^T \vartheta, \quad (4.60)$$

где $\vartheta = q - \hat{q}$.

Модель (4.60) является типовой динамической моделью ошибки с измеряемым состоянием (см. выражение (4.36)). Для нее ранее уже был получен базовый алгоритм адаптации (4.37), (4.38). С учетом принятых в настоящем параграфе обозначений данный алгоритм принимает вид

$$\dot{\hat{q}} = \gamma \omega h^T P e, \quad (4.61)$$

где $\gamma > 0$ – коэффициент адаптации (произвольная положительная константа), а симметрическая положительно определенная матрица P является решением уравнения

$$A_M^T P + P A_M = -Q, \quad Q = Q^T > 0. \quad (4.62)$$

4.3.3. Свойства замкнутой системы

Адаптивный регулятор (4.59), (4.61) обеспечивает следующие свойства замкнутой системы, содержащей объект (4.50), (4.51) и эталонную модель (4.53), (4.54) (доказательство этих свойств приведено в приложении 4):

- Отформатировано ... [276]
- Отформатировано ... [277]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [278]
- Отформатировано ... [279]
- Отформатировано ... [280]
- Отформатировано ... [281]
- Отформатировано ... [282]
- Отформатировано ... [283]
- Отформатировано ... [284]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [285]
- Отформатировано ... [286]
- Отформатировано ... [287]
- Удалено: .
- Удалено: θ
- Отформатировано ... [288]
- Удалено: θ
- Отформатировано ... [289]
- Отформатировано ... [290]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [291]
- Отформатировано ... [292]
- Отформатировано ... [293]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [294]
- Отформатировано ... [295]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [296]
- Отформатировано ... [297]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [298]
- Отформатировано ... [299]
- Отформатировано ... [300]
- Отформатировано ... [301]
- Отформатировано ... [302]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [303]
- Отформатировано ... [304]
- Отформатировано ... [305]
- Отформатировано ... [306]
- Удалено: .
- Отформатировано ... [307]
- Отформатировано ... [308]
- Отформатировано ... [309]

1) нулевое состояние равновесия $(e, \vartheta) = (0, 0)$ является устойчивым по Ляпунову, а, следовательно, все сигналы в замкнутой системе являются ограниченными;

2) для любых начальных условий и любых ограниченных сигналов задания $g(t)$ справедливо равенство

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \quad (4.63)$$

а, следовательно, выполняется целевое условие (4.55);

3) если входное воздействие $g(t)$ является «частотно богатым», чтобы обеспечить условие неистощающего возбуждения, то

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \vartheta(t) = 0; \quad (4.64)$$

в частности, равенство (4.64) выполняется, если $g(t)$ представляет собой сумму $(n+1)/2$ гармоник с различными частотами (отметим, что здесь $(n+1)$ – число неизвестных параметров в векторе q).

Таким образом, несмотря на наличие неизвестных параметров в модели объекта управления, синтезированный регулятор обеспечил устойчивость замкнутой системы и выполнение целевого условия (4.55).

Пример 4.1. Рассмотрим задачу адаптивного управления объектом второго порядка

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -a_0 x_1 - a_1 x_2 + b_0 u, \\ y &= x_1. \end{aligned} \quad (4.65)$$

Пусть заданы желаемые динамические показатели качества замкнутой системы – время переходного процесса $t_{II} = 2$ с и перерегулирование $\sigma = 0\%$. Методом стандартных характеристических полиномов выбираем характеристический полином эталонной модели

$$D_M(p) = p^2 + a_1^M p + a_0^M = p^2 + 5p + 6.25$$

и строим саму эталонную модель

$$\begin{aligned} \dot{x}_{M1} &= x_{M2}, \\ \dot{x}_{M2} &= -6.25x_{M1} - 5x_{M2} + 6.25g, \\ y_M &= x_{M1}. \end{aligned} \quad (4.66)$$

При этом коэффициент b_0^M выбран равным a_0^M для обеспечения единичного коэффициента передачи эталонной модели. Отметим также, что в рассматриваемом случае

Удалено: .

Удалено: .

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Удалено: .

Отформатировано: По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано ... [310]

Отформатировано ... [311]

Удалено: .

Отформатировано ... [312]

Отформатировано ... [313]

Отформатировано ... [314]

Удалено:

Отформатировано ... [315]

Отформатировано ... [316]

Отформатировано ... [317]

Отформатировано ... [318]

Удалено: θ

Отформатировано ... [319]

Удалено: .

Отформатировано ... [320]

Удалено: .

Отформатировано ... [321]

Отформатировано ... [322]

Отформатировано ... [323]

Удалено:

Отформатировано ... [324]

Отформатировано ... [325]

Отформатировано ... [326]

Отформатировано ... [327]

Отформатировано ... [328]

Удалено:

Отформатировано ... [329]

Отформатировано ... [330]

Отформатировано ... [331]

Отформатировано ... [332]

Удалено:

Отформатировано ... [333]

Отформатировано ... [334]

Отформатировано ... [335]

Отформатировано ... [336]

Отформатировано ... [337]

Отформатировано ... [338]

Отформатировано ... [339]

$$A_M = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6.25 & -5 \end{bmatrix}.$$

Легко убедиться, что управление (4.59) в этом случае принимает вид

$$u = -\hat{q}_1 x_1 - \hat{q}_2 x_2 - \hat{q}_3 g = -\omega^T \hat{q}, \quad (4.67)$$

где

$$\hat{q} = [\hat{q}_1 \ \hat{q}_2 \ \hat{q}_3], \quad \omega^T = [x_1 \ x_2 \ g].$$

Для расчета матрицы P зададимся симметрической положительно определенной матрицей Q вида

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

Решая матричное уравнение (4.62) (например, с использованием команды `lyap(a,c)` библиотеки Control System Toolbox пакета MatLab получим

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 56.25 & 8 \\ 8 & 2.6 \end{bmatrix}.$$

Тогда, с учетом того факта, что $h^T = [0 \ 1]$, алгоритм адаптации (4.61) принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{\hat{q}}_1 &= \gamma x_1 v, \\ \dot{\hat{q}}_2 &= \gamma x_2 v, \\ \dot{\hat{q}}_3 &= \gamma g v, \end{aligned} \quad (4.68)$$

где общий для всех трех цепей настройки сигнал обратной связи v рассчитывается по формуле

$$v = h^T P e = p_{21} e_1 + p_{22} e_2 = 8(x_1 - x_{M1}) + 2.6(x_2 - x_{M2}).$$

Таким образом, адаптивный регулятор, обеспечивающий слежение параметрически неопределенного объекта (4.65) за эталонной моделью (4.66), описывается уравнениями (4.67) и (4.68).

Результаты моделирования переходных процессов в замкнутой системе при различных типах входных воздействий приведены на рис. 4.9 и 4.10. При моделировании были использованы следующие значения параметров: $a_0 = 3$, $a_1 = -1$, $\beta = 2$, $\gamma = 1$. Начальные значения настраиваемых параметров \hat{q} были выбраны нулевыми.

- Удалено:
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Удалено:
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Удалено:
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Отформатировано: интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Удалено:
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Удалено:
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено:
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)
- Удалено:
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано ... [340]
- Отформатировано ... [341]
- Удалено:
- Отформатировано ... [342]
- Удалено: ... [343]
- Отформатировано ... [344]
- Отформатировано ... [345]
- Удалено: Как видно ... [346]
- Отформатировано ... [347]
- Отформатировано ... [348]
- Отформатировано ... [349]
- Отформатировано ... [350]

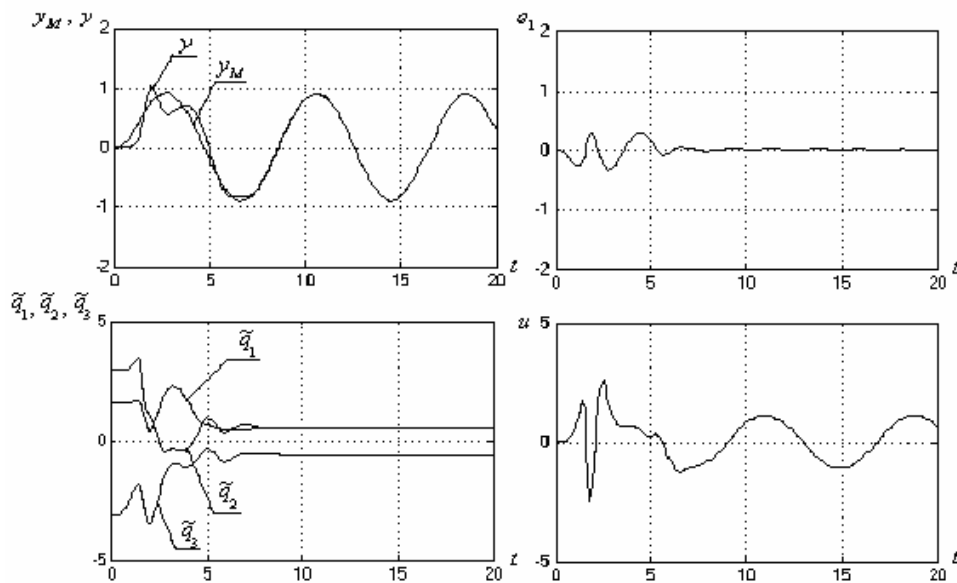


Рис. 4.9. Переходные процессы в адаптивной системе при $g = \sin 0.8t$

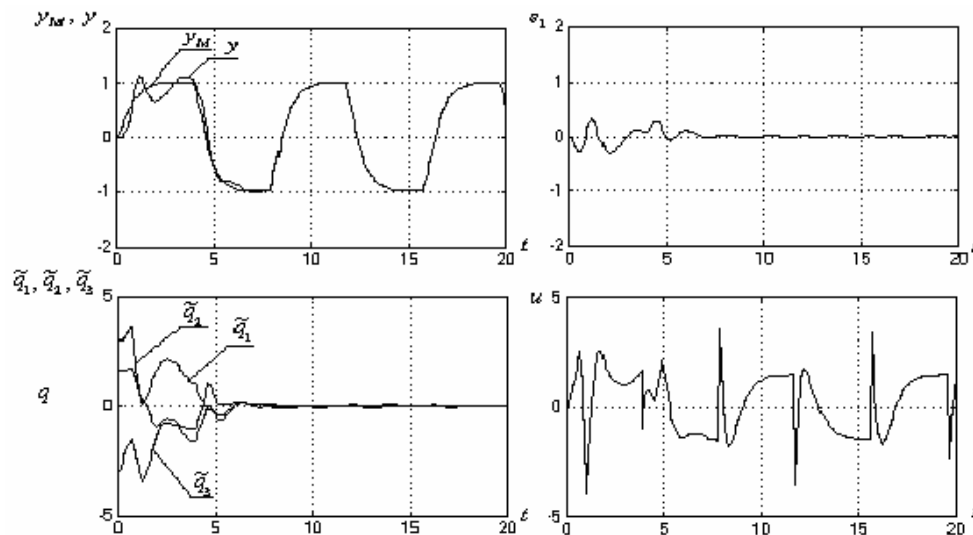


Рис. 4.10. Переходные процессы в адаптивной системе при $g = \text{sign}(\sin 0.8t)$

Как видно из приведенных графиков, асимптотическое слежение за эталонной моделью достигается для сигнала задания $g(t)$ любого вида. Однако для обеспечения сходимости по настраиваемым параметрам необходимо, чтобы сигнал задания $g(t)$ был достаточно богатым. На рис. 4.9 $g(t) = \sin 0.8t$, что не обеспечивает параметрической сходимости, так как число гармоник входного сигнала недостаточно для

Отформатировано: По центру

Отформатировано: По центру, Уровень 1, Отступ: Слева: 0 см, Первая строка: 0 см

Удалено: ¶

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

настройки трех параметров (сигнал $g(t)$ содержит только одну гармонику). На рис. 4.10 сигнал задания является прямоугольной волной (а именно, $g(t) = \text{sgn}(\sin 0.8t)$) и, следовательно, он может обеспечить параметрическую сходимость для неограниченного числа настраиваемых параметров.

4.4. Нелинейное робастное управление многомерным объектом

4.4.1. Постановка задачи

Рассмотрим параметрически неопределенный объект управления, подверженный воздействию внешних возмущений

$$\dot{x} = Ax + b(u + \delta), \quad (4.69)$$

$$y = c^T x, \quad (4.70)$$

где x – n -мерный вектор состояния, доступный прямым измерениям, u – сигнал управления, y – регулируемая переменная, δ – неизмеряемое внешнее возмущение, матрица A и векторы b , c имеют вид (4.52). Параметры a_i и $b_0 > 0$ объекта управления считаются неизвестными, а возмущение $\delta(t)$ – ограниченным.

Пусть желаемый характер поведения регулируемой переменной y определяется эталонной моделью (4.53), (4.54).

Рассматриваемая задача состоит в синтезе управления, обеспечивающего в замкнутой системе ограниченность всех сигналов и экспоненциальное стремление ошибки слежения (4.56) к установившемуся значению. При этом желательно иметь возможность обеспечения произвольно малого значения установившейся ошибки слежения (хотя бы при некоторых определенных условиях).

4.4.2. Синтез регулятора

Как было отмечено выше (см. п. 4.1.4), стандартный прием получения нелинейного робастного управления из адаптивного – это исключение интегратора из обратной связи. В рассматриваемом случае алгоритм адаптации для объекта (4.50) (без учета возмущения δ) имеет вид (4.61). Исключим из алгоритма (4.61) операцию интегрирования:

$$\dot{\hat{q}} = \gamma \omega h^T P e. \quad (4.71)$$

Подставляя (4.71) в (4.59), получаем выражение для нелинейного робастного алгоритма управления

Отформатировано: русский (Россия)

Удалено: ¶
Разрыв страницы

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Удалено: <sp><sp>5.4. Нелинейное робастное управление многомерным объектом¶

Отформатировано: По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: По центру, интервал Перед: 0

Отформатировано: По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено:

Отформатировано: русский (Россия)

Удалено:

Отформатировано: По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Удалено:

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Отформатировано: По центру, Уровень 1, Отступ: Первая строка: 0 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано ... [351]

Отформатировано ... [352]

Удалено:

Отформатировано ... [353]

Отформатировано ... [354]

Отформатировано ... [355]

Отформатировано ... [356]

Отформатировано ... [357]

Отформатировано ... [358]

$$u = -\gamma \|\omega\|^2 h^T P e, \quad (4.72)$$

где положительный коэффициент γ носит название *коэффициента нелинейной обратной связи*, а симметрическая положительно определенная матрица P является решением уравнения (4.62).

4.4.3. Свойства замкнутой системы

Нелинейный робастный регулятор (4.72) обеспечивает следующие свойства замкнутой системы, содержащей объект (4.69), (4.70) и эталонную модель (4.53), (4.54) (доказательство этих свойств приведено в приложении 4):

1) для любых начальных условий, любых ограниченных сигналов задания $g(t)$ и любых ограниченных возмущений $\delta(t)$ – ограниченность всех сигналов и экспоненциальную сходимость ошибки слежения $e = x - x_M$ к предельному установившемуся значению

$$\|e\|^2 \leq \frac{\beta}{2\gamma\lambda_Q} \|q\|^2 + \frac{1}{\lambda_Q^2} \|Ph\|^2 \bar{\delta}^2; \quad (4.73)$$

2) если возмущение отсутствует (т.е. $\delta(t) \equiv 0$), то, дополнительно к пункту (1), предельное установившееся значение ошибки слежения может быть сделано произвольно малым за счет увеличения коэффициента нелинейной обратной связи γ .

Таким образом, нелинейный робастный регулятор (4.72) обеспечивает работоспособность замкнутой системы (в смысле ограниченности всех сигналов) и приемлемые точностные характеристики для параметрически неопределенного объекта, подверженного внешним возмущениям.

Пример 4.2. Рассмотрим задачу робастного управления объектом (4.65) с неизвестными параметрами a_0 , a_1 и $b_0 > 0$. Пусть цель управления состоит в обеспечении ограниченности всех сигналов и экспоненциальной сходимости ошибки слежения регулируемой переменной y за выходом эталонной модели y_M (4.66).

Для синтеза нелинейного робастного регулятора применим формальный прием – исключение интеграторов из цепей обратных связей адаптивного регулятора. Тогда из регулятора (4.67), (4.68) получим

$$u = -\gamma(x_1^2 + x_2^2 + g^2)(8(x_1 - x_{M1}) + 2.6(x_2 - x_{M2})). \quad (4.74)$$

Таким образом, нелинейный робастный регулятор, обеспечивающий слежение параметрически неопределенного объекта (4.65) за эталонной моделью (4.66), описывается уравнением (4.74).

Удалено:

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Удалено:

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, русский (Россия)

Удалено:

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено:

Удалено:

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Удалено:

Отформатировано: Шрифт: полужирный

Отформатировано: Шрифт: полужирный, не курсив

Удалено:

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)

Удалено:

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

Результаты моделирования переходных процессов в замкнутой системе при различных значениях коэффициента обратной связи γ и $g(t) = \text{sgn}(\sin 0.8t)$ приведены на рис. 4.11. При моделировании были использованы следующие значения параметров: $a_0 = 3$, $a_1 = -1$, $\beta = 2$.

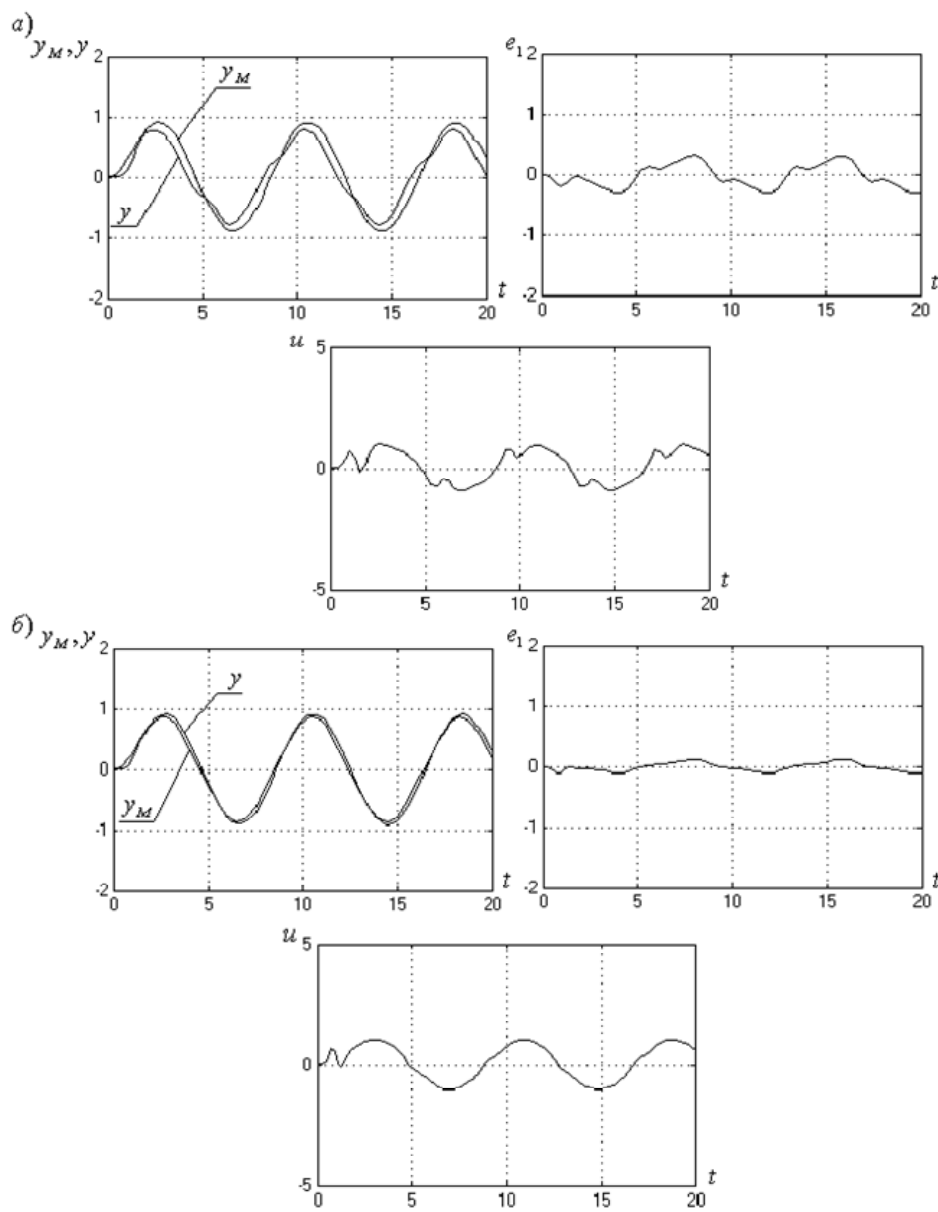


Рис.4.11. Переходные процессы в нелинейной робастной системе:

а) $\gamma = 0.5$; б) $\gamma = 1.5$

Как видно из приведенных графиков, регулятор (4.74) обеспечивает слежение параметрически неопределенного объекта за эталонной

- Отформатировано: Уровень 1, Отступ: Первая строка: 0 см
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 5 пт
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 5 пт
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см
- Удалено: <sp>
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт
- Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

моделью с малой установившейся ошибкой, величина которой может быть уменьшена за счет увеличения коэффициента обратной связи γ .

4.5. Адаптивная компенсация возмущений

4.5.1. Постановка задачи

Рассмотрим объект управления

$$\dot{x} = Ax + b(u + \delta), \quad (4.75)$$

где x – n -мерный вектор состояния, доступный прямым измерениям, u – сигнал управления, δ – внешнее ограниченное возмущение. Пусть известная матрица A и известный вектор b образуют полностью управляемую пару (A, b) .

Будем считать, что возмущение δ может быть представлено в виде выхода линейного генератора

$$\dot{w} = \Gamma w, \quad (4.76)$$

$$\delta = d^T w, \quad (4.77)$$

где w – ν -мерный вектор состояния генератора, Γ – $\nu \times \nu$ постоянная матрица, d – $\nu \times 1$ вектор постоянных коэффициентов. Ни само возмущение δ , ни вектор состояния генератора w не являются доступными для измерений.

Рассматриваемая задача управления состоит в асимптотической стабилизации нулевого значения вектора состояния x в условиях действия внешнего возмущения δ .

В классической теории управления данная задача решается в предположении, что параметры генератора (4.76), (4.77) известны (т.е. известны матрица Γ и вектор d). При этом все множество возможных реализаций возмущения $\delta(t)$ определяется только различными начальными условиями $w(0)$. Однако на практике, как правило, приходится сталкиваться с ситуацией, когда заранее известен только достаточно широкий класс возможных возмущений $\delta(t)$, а не их точный вид. С математической точки зрения такая ситуация означает, что генератор (4.76), (4.77) является параметрически неопределенным. Это мотивирует использование методов адаптивного управления для компенсации внешнего неточно известного возмущения.

При синтезе управления будем считать выполненными следующие условия:

– параметры матрицы Γ и вектора d являются неизвестными, а размерность генератора q известна;

– пара (d^T, Γ) является полностью наблюдаемой;

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: По центру, интервал Перед: 0

Отформатировано: По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Удалено: .

Отформатировано: Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 6 пт, английский (США)

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Удалено: .

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено: .

Отформатировано: русский (Россия)

Удалено: .

Отформатировано ... [359]

Отформатировано ... [360]

Отформатировано ... [361]

Отформатировано ... [362]

Удалено: .

Удалено: .

Удалено: .

Отформатировано ... [363]

Удалено: .

Удалено: .

Отформатировано ... [364]

Отформатировано ... [365]

Отформатировано ... [366]

– собственные значения матрицы Γ являются различными и лежат на мнимой оси.

Последнее условие гарантирует ограниченность возмущения δ и, как следствие, является необходимым для обеспечения ограниченности сигнала управления u .

4.5.2. Синтез регулятора

В соответствии с методикой синтеза адаптивных систем, изложенной в п. 4.2.1, построим сначала неадаптивное управление в предположении, что параметры генератора (4.76) и (4.77) точно известны. Для этого приведем модель (4.76), (4.77) к некоторой удобной форме.

Выберем произвольную $q \times q$ гурвицеву матрицу G , $q \times 1$ -вектор l , образующий с матрицей G полностью управляемую пару, и введем в рассмотрение линейное преобразование координат

$$\chi = Mw, \tag{4.78}$$

где $q \times q$ матрица M является решением уравнения

$$M\Gamma - GM = ld^T. \tag{4.79}$$

Тогда генератор (4.76), (4.77) в координатах χ принимает вид

$$\dot{\chi} = G\chi + l\delta, \tag{4.80}$$

$$\delta = q^T \chi, \tag{4.81}$$

где q – вектор постоянных коэффициентов.

Действительно, так как спектры матриц Γ и G не пересекаются, пара (d^T, Γ) является полностью наблюдаемой, а пара (G, l) является полностью управляемой, то уравнение (4.79) имеет единственное невырожденное решение. Продифференцируем (4.78) в силу уравнения (4.76):

$$\dot{\chi} = M\dot{w}.$$

С учетом (4.79) можно записать

$$\dot{\chi} = M\dot{w} = GMw + ld^T w = G\chi + l\delta,$$

откуда следует справедливость (4.80). Далее из (4.77) и (4.78) имеем

$$\delta = d^T w = d^T M^{-1} \chi = q^T \chi,$$

где $q^T = d^T M^{-1}$.

Таким образом, доказана справедливость представления (4.80), (4.81). Особо отметим, что в рамках рассматриваемой задачи матрица Γ

Удалено: ...

Отформатировано ... [367]

Отформатировано ... [368]

Отформатировано ... [369]

Удалено: ...

Удалено: 5

Удалено: ...

Отформатировано ... [370]

Отформатировано ... [371]

Отформатировано ... [372]

Отформатировано ... [373]

Отформатировано ... [374]

Отформатировано ... [375]

Удалено: ...

Отформатировано ... [376]

Отформатировано ... [377]

Отформатировано ... [378]

Удалено: ...

Отформатировано ... [379]

Отформатировано ... [380]

Удалено: ...

Отформатировано ... [381]

Удалено: ...

Отформатировано ... [382]

Отформатировано ... [383]

Отформатировано ... [384]

Отформатировано ... [385]

Удалено: θ

Удалено: ...

Отформатировано ... [386]

Отформатировано ... [387]

Удалено: ...

Отформатировано ... [388]

Удалено: ...

Отформатировано ... [389]

Отформатировано ... [390]

Отформатировано ... [391]

Отформатировано ... [392]

Отформатировано ... [393]

Отформатировано ... [394]

Удалено: ...

Отформатировано ... [395]

Отформатировано ... [396]

Отформатировано ... [397]

Отформатировано ... [398]

Удалено: ...

Отформатировано ... [399]

Отформатировано ... [400]

Отформатировано ... [401]

Отформатировано ... [402]

Отформатировано ... [403]

и вектор d являются неизвестными, поэтому матрица преобразования координат M и вектор g также являются неизвестными. Другими словами, в модели (4.80), (4.81) неопределенность внешнего возмущения δ сведена к неопределенности вектора постоянных параметров g .

Представление (4.80), (4.81) позволяет построить наблюдатель вектора состояния генератора χ . Сформируем оценку в виде

$$\hat{\chi} = \eta + Nx, \quad (4.82)$$

где $q \times n$ -матрица N удовлетворяет равенству

$$Nb = I, \quad (4.83)$$

а q -мерный вектор η является состоянием динамической модели вида

$$\dot{\eta} = G\eta + (GN - NA)x - lu. \quad (4.84)$$

Тогда для любых начальных условий $\chi(0)$, $\hat{\chi}(0)$ и $x(0)$ справедливо равенство

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\chi(t) - \hat{\chi}(t)) = 0. \quad (4.85)$$

Действительно, введем в рассмотрение вектор ошибки оценки состояния генератора

$$\sigma = \chi - \hat{\chi} = \chi - \eta - Nx.$$

Продифференцируем последнее выражение в силу уравнений (4.75), (4.80) и (4.84). Получим

$$\dot{\sigma} = G\chi + I\delta - G\eta - GNx + NAx + lu - NAx - Nbu - Nb\delta = G\chi - G\eta - GNx,$$

или окончательно

$$\dot{\sigma} = G\sigma.$$

Так как матрица G является гурвицевой, то последнее уравнение означает, что с течением времени ошибка σ стремится к нулевому значению. В свою очередь, это доказывает справедливость равенства (4.85).

Таким образом, с учетом полученных результатов модель объекта управления (4.75) может быть переписана в виде

$$\dot{x} = Ax + b(u + q^T \hat{\chi}), \quad (4.86)$$

где оценка $\hat{\chi}$ формируется наблюдателем (4.82), (4.84).

Анализ выражения (4.86) мотивирует следующий выбор алгоритма адаптивного управления:

$$u = -k^T x - \hat{q}^T \hat{\chi}, \quad (4.87)$$

- Отформатировано ... [404]
- Удалено: θ
- Отформатировано ... [405]
- Удалено: θ
- Отформатировано ... [406]
- Отформатировано ... [407]
- Удалено:
- Отформатировано ... [408]
- Отформатировано ... [409]
- Отформатировано ... [410]
- Отформатировано ... [411]
- Удалено:
- Отформатировано ... [412]
- Отформатировано ... [413]
- Отформатировано ... [414]
- Отформатировано ... [415]
- Отформатировано ... [416]
- Отформатировано ... [417]
- Удалено:
- Отформатировано ... [418]
- Отформатировано ... [419]
- Удалено:
- Отформатировано ... [420]
- Отформатировано ... [421]
- Удалено:
- Отформатировано ... [422]
- Удалено:
- Отформатировано ... [423]
- Отформатировано ... [424]
- Удалено:
- Отформатировано ... [425]
- Удалено:
- Отформатировано ... [426]
- Отформатировано ... [427]
- Отформатировано ... [428]
- Отформатировано ... [429]
- Отформатировано ... [430]
- Отформатировано ... [431]
- Удалено:
- Отформатировано ... [432]
- Отформатировано ... [433]
- Отформатировано ... [434]
- Отформатировано ... [435]
- Удалено:
- Отформатировано ... [436]
- Отформатировано ... [437]
- Удалено:
- Отформатировано ... [438]
- Отформатировано ... [439]
- Отформатировано ... [440]
- Удалено:
- Отформатировано ... [441]
- Отформатировано ... [442]
- Отформатировано ... [443]
- Отформатировано ... [444]
- Отформатировано ... [445]

где n -мерный вектор постоянных коэффициентов k выбран таким образом, что матрица замкнутой системы $F = A - bk^T$ является гурвицевой, а ν -мерный вектор настраиваемых параметров \hat{q} формируется алгоритмом адаптации, который будет синтезирован позже.

Расчет вектора коэффициентов обратных связей k может быть осуществлен, например, методом модального регулятора. Для синтеза алгоритма адаптации получим модель ошибки замкнутой системы, подставив (4.87) в (4.86):

$$\dot{x} = Fx + b\hat{\chi}^T \hat{q}. \quad (4.88)$$

Легко видеть, что модель (4.88) с точностью до обозначений является стандартной динамической моделью ошибки с измеряемым состоянием (см. формулу (4.36)). Поэтому для настройки параметров \hat{q} может быть использован базовый алгоритм адаптации (4.37), который в данном случае принимает вид

$$\dot{\hat{q}} = \gamma \hat{\chi} b^T P x, \quad (4.89)$$

где симметрическая положительно определенная матрица P является решением уравнения

$$F^T P + PF = -Q \quad (4.90)$$

с произвольной симметрической положительно определенной матрицей Q .

Таким образом, регулятор, обеспечивающий адаптивную компенсацию внешнего заранее неизвестного возмущения δ , действующего на объект (4.75), содержит в своей структуре следующие блоки (рис. 4.12): наблюдатель возмущения (4.82) и (4.84), собственно настраиваемый регулятор (4.87) и алгоритм адаптации (4.89).

Свойства замкнутой системы могут быть сформулированы следующим образом. Для любых начальных условий $x(0)$, $w(0)$ и $\eta(0)$ и произвольного положительного коэффициента γ адаптивный регулятор (4.82), (4.84), (4.87) и (4.89) обеспечивает асимптотическую стабилизацию нулевого значения вектора состояния x объекта управления (4.75), подверженного воздействию внешнего заранее неизвестного возмущения δ , генерируемого моделью (4.76), (4.77).

Пример 4.3. Рассмотрим задачу стабилизации нулевого значения вектора состояния объекта управления

$$\dot{x} = -x_1 + 5x_2, \quad (4.91)$$

$$\dot{x} = 2x_1 + 3x_2 + u + \delta, \quad (4.92)$$

- Удалено: .
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см
- Удалено: .
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено:
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено: .
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено: .
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: интервал Перед: 0 пт
- Удалено: .
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 3 пт
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Шрифт: полужирный, не курсив
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт
- Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

где возмущение δ представляет собой гармоническую функцию с заранее неизвестной амплитудой, частотой и фазой. Очевидно, что в рассматриваемом случае порядок генератора (4.76), (4.77) равен двум (т. е. $q = 2$), а матрица A и вектор b модели (4.75) имеют вид

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 5 \\ 2 & 3 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

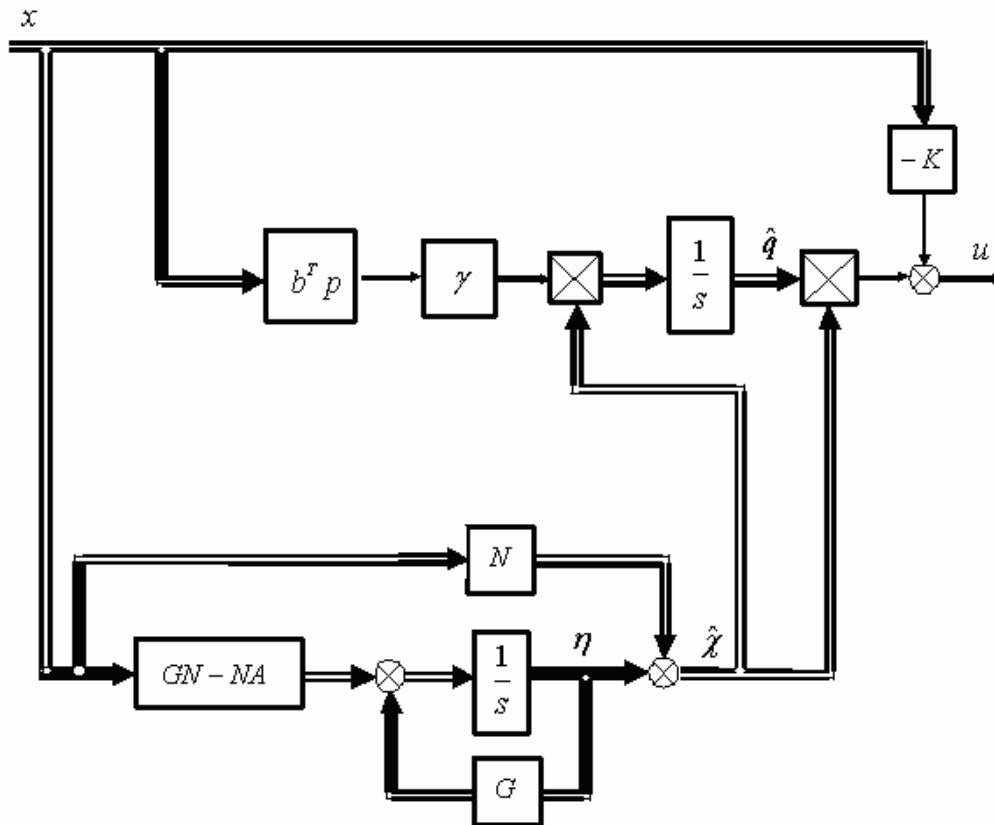


Рис. 4.12. Адаптивный регулятор компенсации возмущений

Выберем желаемые корни замкнутой системы $\lambda_1 = -3$, $\lambda_2 = -4$ и с помощью команды `place(A,B,P)` библиотеки Control System Toolbox пакета MatLab рассчитаем вектор коэффициентов обратных связей

$$k^T = [3.2 \quad 9].$$

Тогда модальный регулятор

$$u = -k^T x = -3.2x_1 - 9x_2 \quad (4.93)$$

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0 см

Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 3 пт

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено: <sp>

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: русский (Россия)

Отформатировано: Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Удалено: Свойства замкнутой системы могут быть сформулированы следующим образом. Для любых начальных условий $x(0)$, $w(0)$ и $\eta(0)$ и произвольного положительного коэффициента γ адаптивный регулятор (4.82), (4.84), (4.87) и (4.89) обеспечивает асимптотическую стабилизацию нулевого значения вектора состояния X объекта управления (4. [446]

Отформатировано

Отформатировано

Отформатировано

Отформатировано

Отформатировано

Отформатировано

Отформатировано

Отформатировано

Отформатировано

Отформатировано (... [447]

Удалено:

Отформатировано (... [448]

Отформатировано (... [449]

Удалено:

Отформатировано (... [450]

Отформатировано (... [451]

Отформатировано (... [452]

Удалено:

Отформатировано (... [453]

Отформатировано (... [454]

Отформатировано (... [455]

Отформатировано (... [456]

Отформатировано (... [457]

Отформатировано (... [458]

при отсутствии внешних возмущений (т.е. при $\delta(t) \equiv 0$) будет обеспечивать асимптотическую стабилизацию нулевого значения вектора состояния (рис. 4.13, а). Однако воздействие внешнего возмущения вызывает появление ненулевой установившейся ошибки (рис.4.13, б).

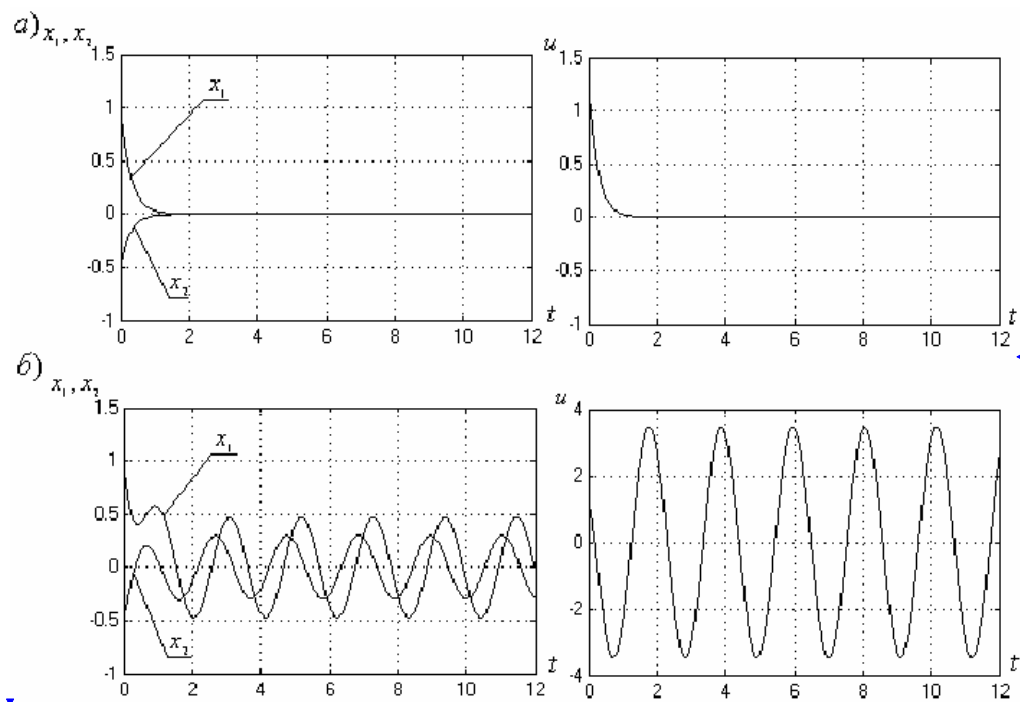


Рис. 4.13. Процессы стабилизации в системе, замкнутой модальным регулятором (5.33): а) $\delta(t) = 0$; б) $\delta(t) = 2 \sin 3t$

Для синтеза регулятора с адаптивной компенсацией внешнего возмущения выберем

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -25 & -10 \end{bmatrix}, \quad l = \begin{bmatrix} 0 \\ 25 \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 25 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

Решая матричное уравнение (4.90), получим

$$P = \begin{bmatrix} 28.7 & 17.8 \\ 17.8 & 15.7 \end{bmatrix}.$$

Тогда алгоритм адаптивного управления (4.82), (4.84), (4.87) и (4.89) принимает вид

$$\hat{\chi}_1 = \eta_1, \quad \hat{\chi}_2 = \eta_2 + 25x_2, \quad (4.94)$$

$$\hat{\varphi}_1 = \eta_2 + 25x_2, \quad \hat{\varphi}_2 = -25\eta_1 - 10\eta_2 - 50x_1 - 325x_2 - 25u, \quad (4.95)$$

- Удалено: <sp>
- Отформатировано: интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: русский (Россия)
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Удалено: .
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено:
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено: .
- Отформатировано: Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт
- Удалено:
- Отформатировано: Шрифт: 6 пт
- Удалено:
- Удалено:
- Отформатировано: Шрифт: 14 пт
- Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля
- Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

$$u = -3.2x_1 - 9x_2 - \hat{q}_1\hat{\chi}_1 - \hat{q}_2\hat{\chi}_2, \quad (4.96)$$

$$\dot{\hat{q}}_1 = \gamma\hat{\chi}_1(17.8x_1 + 15.7x_2), \quad \dot{\hat{q}}_2 = \gamma\hat{\chi}_2(17.8x_1 + 15.7x_2). \quad (4.97)$$

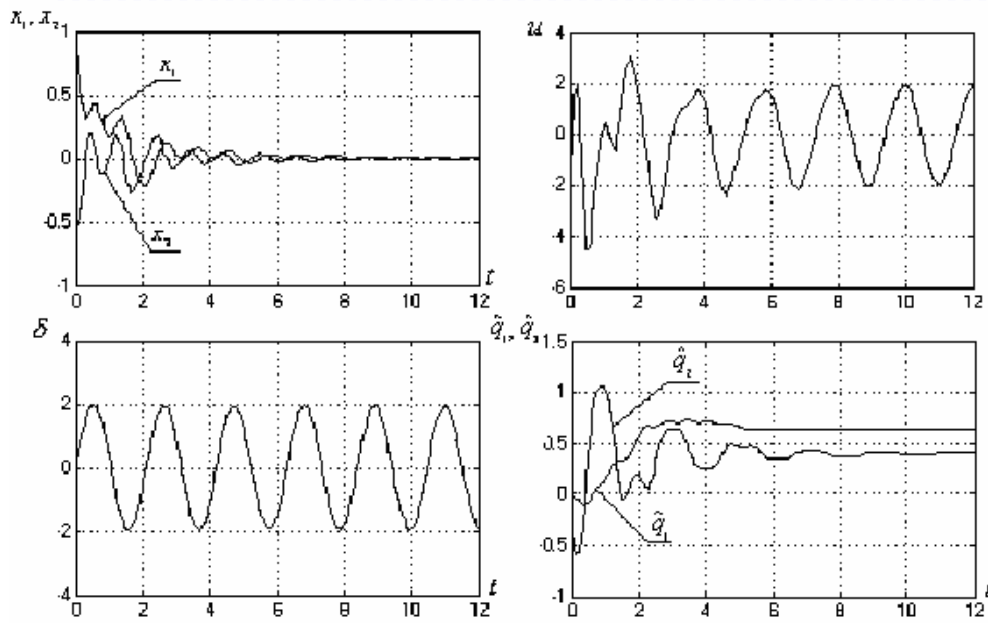


Рис. 4.14. Процессы стабилизации в системе, замкнутой адаптивным регулятором (4.94)–(4.97), при $\delta(t) = 2 \sin 3t$, $\gamma = 0.1$

$$\eta_1(0) = \eta_2(0) = \hat{\theta}_1(0) = \hat{\theta}_2(0) = 0$$

Результаты моделирования переходных процессов в адаптивной системе приведены на рис. 4.14 и демонстрируют обеспечение асимптотической стабилизации нулевого значения вектора состояния в условиях воздействия внешнего заранее неизвестного возмущения δ .

Особо отметим, что синтезированный адаптивный регулятор (4.94)–(4.97) будет обеспечивать асимптотическую стабилизацию объекта (4.95) для всех возмущений выделенного класса – т.е. для любых гармонических функций с заранее неизвестной амплитудой, частотой и фазой. Это положение иллюстрируется рис. 4.15, где приведены результаты моделирования замкнутой адаптивной системы, подверженной воздействию различных возмущений выделенного класса:

$$\delta(t) = 2 \quad \text{при} \quad 0 \leq t < 15,$$

$$\delta(t) = 1.5 \sin 4t \quad \text{при} \quad 15 \leq t < 35,$$

$$\delta(t) = 2 \sin 2t \quad \text{при} \quad 35 \leq t < 50.$$

Как видно из графиков, каждый раз при изменении вида возмущающего воздействия и после завершения переходного процесса (по-

Удалено:

Удалено:

Удалено: Результаты моделирования переходных процессов в адаптивной системе приведены на рис. 4.14 и демонстрируют обеспечение асимптотической стабилизации нулевого значения вектора состояния в условиях воздействия внешнего заранее неизвестного возмущения δ .

Отформатировано: По правому краю, интервал Перед: 0 пт

Удалено: <sp>

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см

Отформатировано: Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт

Отформатировано: интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Удалено:

Удалено:

Удалено: <sp>

Отформатировано: Шрифт: 6 пт

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

сле подстройки адаптивного регулятора) в системе устанавливается нулевое значение вектора состояния x .

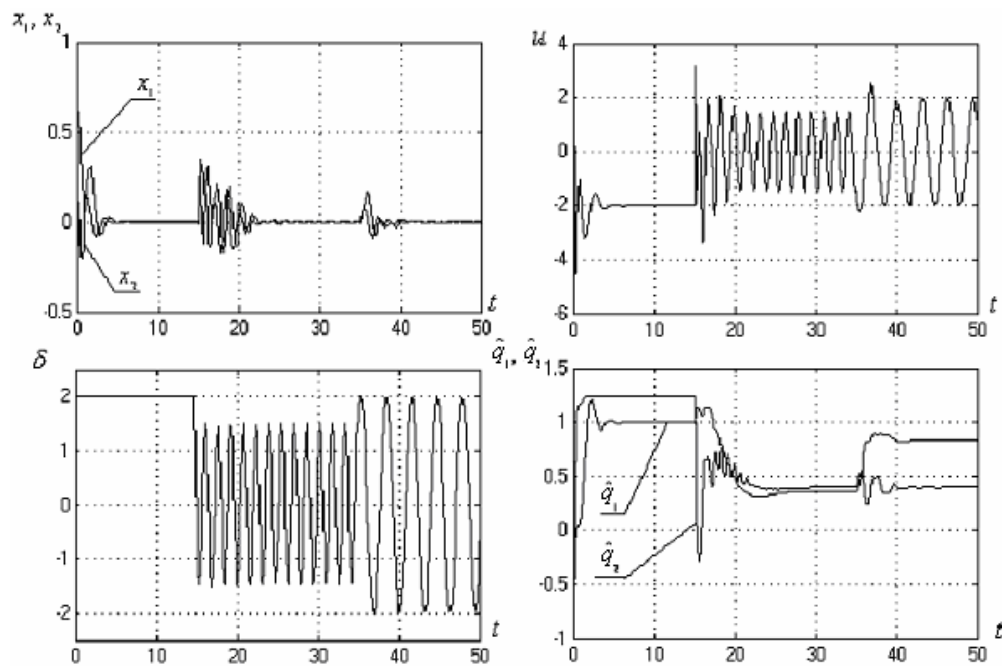


Рис. 4.15. Процессы стабилизации в системе, замкнутой адаптивным регулятором (4.94)–(4.97), при воздействии изменяющегося внешнего возмущения

Отформатировано: По центру, интервал Перед: 0

Отформатировано: По центру, Отступ: Первая строка: 0 см, интервал Перед: 0 пт

Удалено: Как видно из графиков, каждый раз при изменении вида возмущающего воздействия и после завершения переходного процесса (после подстройки адаптивного регулятора) в системе устанавливается нулевое значение вектора состояния X .

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Отформатировано: Шрифт: 14 пт

Отформатировано: Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Отформатировано: Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

Стр. 147: [1] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 147: [2] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 147: [3] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:13:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 147: [4] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 147: [5] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:14:00
русский (Россия)		
Стр. 147: [6] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [7] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [8] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 148: [9] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: курсив		
Стр. 148: [9] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия), подстрочные		
Стр. 148: [10] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:14:00
русский (Россия)		
Стр. 148: [11] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:14:00
Шрифт: курсив		
Стр. 148: [11] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:14:00
русский (Россия)		
Стр. 148: [11] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:14:00
русский (Россия)		
Стр. 148: [12] Удалено	NF	13.11.2009 14:13:00
Стр. 148: [13] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:13:00
русский (Россия)		
Стр. 148: [14] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 148: [15] Удалено	NF	13.11.2009 14:16:00
<p>Найдем модель ошибки замкнутой системы. Сначала, подставляя (4.5) в (4.1), получим <i>модель замкнутого объекта управления</i></p> $\varepsilon = -\lambda x + \tilde{\theta}x + \lambda g, \quad (4.6)$ <p>где $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ – <i>параметрическая ошибка</i>. Вычитая далее (4.2) из (4.6), получаем искомую <i>модель ошибки замкнутой системы</i></p> $\varepsilon = -\lambda \varepsilon + \tilde{\theta}x.$		
Стр. 148: [16] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По центру, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 148: [17] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:12:00
английский (США)		
Стр. 148: [18] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:15:00
По центру		
Стр. 148: [19] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:14:00

русский (Россия)

Стр. 148: [19] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:14:00
русский (Россия)		
Стр. 148: [19] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:14:00
русский (Россия)		
Стр. 148: [20] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 148: [21] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:15:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 148: [22] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 148: [23] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 148: [24] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:09:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 148: [24] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:15:00
русский (Россия)		
Стр. 148: [24] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:15:00
русский (Россия)		
Стр. 148: [25] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:15:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 148: [26] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 148: [27] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:15:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 148: [28] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:15:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 148: [29] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:17:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 148: [30] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 148: [31] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:16:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 148: [31] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:16:00
русский (Россия)		
Стр. 148: [32] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:17:00
Шрифт: 6 пт, русский (Россия)		
Стр. 148: [33] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 148: [34] Отформатировано	natfed	19.11.2009 22:33:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 148: [35] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 147: [36] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [37] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [38] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 149: [39] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:20:00
русский (Россия)		

Стр. 149: [40] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:21:00
русский (Россия)		
Стр. 149: [41] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:21:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 149: [42] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 149: [43] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:21:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 149: [44] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 149: [45] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 149: [46] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 147: [47] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [48] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [49] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 150: [50] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:23:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 150: [51] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:24:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [52] Отформатировано	natfed	17.11.2009 21:54:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [53] Отформатировано	natfed	17.11.2009 21:54:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 150: [54] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:24:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [55] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [56] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [56] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [57] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 150: [58] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [59] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 150: [60] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:24:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [61] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [61] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [62] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 150: [63] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:25:00

Шрифт: 6 пт, английский (США)

Стр. 150: [64] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [64] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [65] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 150: [66] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 150: [67] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:25:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 150: [68] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [69] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 150: [70] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 150: [71] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:25:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 150: [71] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:25:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [72] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:25:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 150: [73] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 150: [74] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:26:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 150: [75] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [76] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 150: [77] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:26:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 150: [78] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:26:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 150: [79] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:26:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 150: [80] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:21:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 150: [81] Изменение	Unknown	
Код поля изменен		
Стр. 150: [82] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:21:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 150: [82] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:21:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [83] Изменение	Unknown	
Код поля изменен		
Стр. 150: [84] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:21:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 150: [84] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:21:00
русский (Россия)		

Стр. 150: [84] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:21:00
русский (Россия)		
Стр. 150: [85] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:21:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 150: [86] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:27:00
Отступ: Первая строка: 0 см		
Стр. 150: [87] Изменение	Unknown	
Код поля изменен		
Стр. 150: [88] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:21:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 5 пт		
Стр. 150: [89] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:21:00
Шрифт: курсив		
Стр. 150: [89] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:21:00
подстрочные		
Стр. 147: [90] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [91] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [92] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 151: [93] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:18:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 151: [93] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:18:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 151: [93] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:18:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 151: [93] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:18:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 151: [93] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:18:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 151: [94] Удалено	NF	13.11.2009 14:18:00

Очевидно, что при выборе $\tau(\varepsilon, x) = \gamma \varepsilon x$ после сокращения одинаковых слагаемых получаем

$$V(\varepsilon, \tilde{\theta}) = -\lambda \varepsilon^2 \leq 0. \quad (4.14)$$

Из последнего неравенства следует устойчивость по Ляпунову состояния равновесия $(\varepsilon, \tilde{\theta}) = (0, 0)$ (в силу теоремы П2.1 из приложения 2) и выполнение равенства

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

(в силу теоремы П2.4 из приложения 2), что означает выполнение целевого условия (4.3).

Другими словами, алгоритм адаптивного управления (рис. 4.2.а)

$$u = -\lambda x - \hat{\theta}x + \lambda g, \quad (4.15)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma \varepsilon x, \quad (4.16)$$

обеспечивает асимптотическое слежение за эталонной моделью для параметрически неопределенного объекта (4.1). При этом коэффициент γ определяет скорость настройки параметра $\hat{\theta}$ и носит название *коэффициента*

адаптации. В структуре алгоритма адаптации выделяют также *сигнал ошибки слежения* $\varepsilon(t)$ и *регрессор* $x(t)$.

Стр. 151: [95] Удалено	NF	17.11.2009 15:26:00
-------------------------------	-----------	----------------------------

Особо отметим, что в общем случае выполнение целевого условия (4.3) не гарантирует *сходимости по параметрам*, т.е. выполнение равенства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta}(t) = 0.$$

Стр. 153: [96] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
---------------------------------------	-----------	----------------------------

По центру, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Стр. 153: [97] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
---------------------------------------	-----------	----------------------------

Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Стр. 153: [98] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:33:00
---------------------------------------	-----------	----------------------------

Шрифт: 6 пт

Стр. 153: [99] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:33:00
---------------------------------------	-----------	----------------------------

Шрифт: 6 пт

Стр. 153: [100] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
--	-----------	----------------------------

Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Стр. 153: [101] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:33:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 6 пт

Стр. 153: [102] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:33:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 6 пт, английский (США)

Стр. 153: [103] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
--	-----------	----------------------------

Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Стр. 153: [104] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:33:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 6 пт, английский (США)

Стр. 153: [105] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
--	-----------	----------------------------

Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Стр. 153: [106] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:33:00
--	-----------	----------------------------

русский (Россия)

Стр. 153: [107] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:33:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 6 пт, английский (США)

Стр. 153: [108] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:34:00
--	-----------	----------------------------

интервал Перед: 0 пт

Стр. 153: [109] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:34:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 6 пт

Стр. 153: [110] Удалено	NF	17.11.2009 15:34:00
--------------------------------	-----------	----------------------------

Стр. 153: [111] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
--	---------------	----------------------------

русский (Россия)

Стр. 153: [112] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
--	---------------	----------------------------

Шрифт: 6 пт

Стр. 153: [113] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
--	---------------	----------------------------

русский (Россия)

Стр. 153: [114] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
--	---------------	----------------------------

Шрифт: 6 пт

Стр. 147: [115] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 14 пт

Стр. 147: [116] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
--	-----------	----------------------------

Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Стр. 147: [117] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 154: [118] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:35:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 16 пт		
Стр. 154: [119] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 154: [120] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 154: [121] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 154: [122] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 154: [123] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 154: [124] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 154: [125] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 154: [126] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 154: [127] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 154: [128] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:36:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 16 пт		
Стр. 154: [129] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 154: [130] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 154: [131] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:36:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 3 пт		
Стр. 154: [132] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 154: [133] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 154: [134] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 154: [135] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:36:00
Шрифт: 14 пт, английский (США), ниже на 13 пт		
Стр. 154: [136] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 154: [137] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 154: [138] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 154: [139] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:37:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 154: [140] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:36:00
Шрифт: 14 пт, английский (США), ниже на 18 пт		
Стр. 154: [141] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:37:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 154: [142] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00

русский (Россия)

Стр. 154: [143] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:23:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 5 пт		
Стр. 154: [144] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:23:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 6 пт		
Стр. 154: [145] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:24:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 5 пт		
Стр. 147: [146] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [147] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [148] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 156: [149] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 156: [150] Удалено	NF	13.11.2009 14:31:00

Пренебрегая в последнем выражении квадратными слагаемыми, получим

$$I(\varepsilon) \leq -\frac{\lambda}{2} \varepsilon^2 + \frac{\theta^2}{4\gamma} + \frac{\bar{\delta}^2}{2\lambda}.$$

Учитывая далее равенство $\lambda \varepsilon^2 / 2 = \lambda V$ и рассматривая переменную V в качестве функции времени, можно записать

$$I(\varepsilon(t)) \leq -\lambda V(t) + \frac{\theta^2}{4\gamma} + \frac{\bar{\delta}^2}{2\lambda}. \quad (4.24)$$

Решая дифференциальное уравнение (4.24), получим

$$V(t) \leq \exp(-\lambda t) V(0) + \frac{\theta^2}{4\gamma\lambda} + \frac{\bar{\delta}^2}{2\lambda^2}.$$

Учитывая далее зависимость (4.23) и переходя в последнем выражении к норме ошибки слежения ε , окончательно получаем

$$|\varepsilon(t)| \leq \exp\left(-\frac{\lambda}{2} t\right) |\varepsilon(0)| + \Delta, \quad (4.25)$$

где $\Delta = \frac{|\theta|}{\sqrt{2\gamma\lambda}} + \frac{\bar{\delta}}{\lambda}$. Неравенство (4.25) задает экспоненциальную мажоранту

переходного процесса по норме ошибки слежения $\varepsilon(t)$ (см. рис. 4.4).

Стр. 156: [150] Удалено	NF	13.11.2009 14:31:00
Стр. 156: [150] Удалено	NF	13.11.2009 14:31:00

Стр. 156: [151] Отформатировано русский (Россия)	NF	17.11.2009 15:40:00
Стр. 156: [151] Отформатировано русский (Россия)	NF	17.11.2009 15:40:00
Стр. 156: [151] Отформатировано Шрифт: курсив	NF	17.11.2009 15:40:00

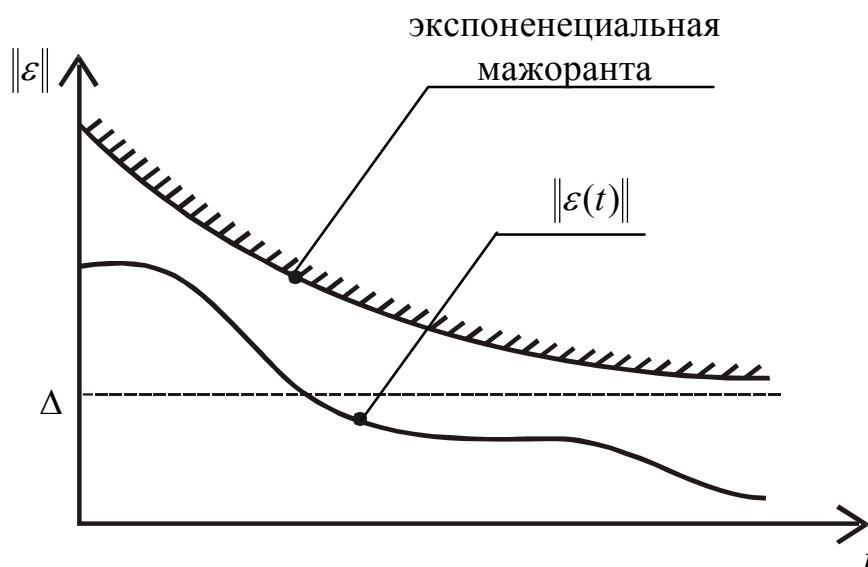


Рис. 5.4. Мажоранта переходного процесса по норме ошибки слежения $\varepsilon(t)$

Стр. 156: [151] Отформатировано русский (Россия)	NF	17.11.2009 15:40:00
Стр. 156: [152] Отформатировано По центру, интервал Перед: 0 пт	NF	17.11.2009 15:40:00
Стр. 156: [153] Отформатировано английский (США)	NF	17.11.2009 15:40:00
Стр. 156: [154] Удалено	NF	13.11.2009 14:32:00

Основные свойства робастного регулятора (4.21) могут быть сформулированы следующим образом. Для произвольного положительного *коэффициента нелинейной обратной связи* γ регулятор (4.21) обеспечивает ограниченность всех сигналов и экспоненциальную сходимость ошибки слежения к предельному установившемуся значению Δ . При отсутствии внешних возмущений (т. е. при $\delta(t) \equiv 0$) величина предельного установившегося значения может быть сделана произвольно малой за счет увеличения коэффициента нелинейной обратной связи γ . Во многих практических случаях такие свойства замкнутой системы являются вполне приемлемыми.

Стр. 156: [155] Отформатировано Отступ: Первая строка: 1 см	NF	17.11.2009 14:51:00
Стр. 156: [156] Удалено	NF	17.11.2009 15:40:00

В завершение параграфа отметим, что сравнение структурных схем алгоритма адаптивного управления (рис. 4.2.а) и нелинейного робастного

управления (рис. 4.3.а) позволяет определить простое правило получения нелинейного робастного управления из адаптивного. Для этого достаточно исключить из структуры алгоритма адаптации интегратор, заменив интегральную обратную связь на статическую нелинейную.

Стр. 156: [157] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По центру, Уровень 1, Отступ: Первая строка: 0 см		
Стр. 156: [158] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По центру, Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 156: [159] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 156: [160] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По центру, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 156: [161] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 156: [162] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:41:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 156: [163] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
русский (Россия)		
Стр. 156: [163] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
русский (Россия)		
Стр. 156: [164] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 156: [165] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:41:00
Шрифт: курсив		
Стр. 156: [165] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:41:00
русский (Россия)		
Стр. 156: [166] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 156: [167] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 156: [168] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
русский (Россия)		
Стр. 156: [168] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
русский (Россия)		
Стр. 156: [169] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 156: [170] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:41:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 156: [171] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 156: [172] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
Шрифт: курсив		
Стр. 156: [173] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 156: [174] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
русский (Россия)		
Стр. 156: [174] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
русский (Россия)		
Стр. 156: [175] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
Шрифт: 6 пт		

Стр. 156: [176] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 156: [177] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:42:00
Шрифт: курсив		
Стр. 147: [178] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [179] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [180] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 147: [181] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [182] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 158: [183] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:47:00
английский (США)		
Стр. 158: [184] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По центру, Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 158: [185] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 158: [186] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:48:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 158: [187] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:48:00
русский (Россия)		
Стр. 158: [188] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:48:00
русский (Россия)		
Стр. 158: [189] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:48:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 158: [190] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:50:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 158: [191] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 158: [192] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 147: [193] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [194] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [195] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 159: [196] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:52:00
русский (Россия)		
Стр. 159: [197] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:52:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 159: [198] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 159: [199] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:52:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 159: [200] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:52:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 159: [201] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00

Отступ: Первая строка: 1 см

Стр. 159: [202] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:52:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 14 пт, ниже на 16 пт

Стр. 159: [203] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:52:00
--	-----------	----------------------------

английский (США)

Стр. 147: [204] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 14 пт

Стр. 147: [205] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
--	-----------	----------------------------

Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля

Стр. 147: [206] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
--	-----------	----------------------------

Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

Стр. 160: [207] Удалено	NF	13.11.2009 14:34:00
--------------------------------	-----------	----------------------------

Базовый (стандартный) алгоритм адаптации модели (4.36) имеет вид (рис. 4.6.б)

$$\dot{\theta} = \gamma \omega b^T P e, \quad (4.37)$$

где симметрическая положительно определенная матрица P является решением уравнения

$$A^T P + P A = -Q \quad (4.38)$$

с произвольной симметрической положительно определенной матрицей Q . Для доказательства свойств устойчивости замкнутой модели (4.36)–(4.38) используем функцию Ляпунова

$$V(e, \tilde{\theta}) = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta}.$$

Стр. 160: [208] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
--	-----------	----------------------------

Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт

Стр. 160: [209] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:52:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 6 пт

Стр. 160: [210] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
--	---------------	----------------------------

русский (Россия)

Стр. 160: [211] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
--	---------------	----------------------------

Шрифт: 6 пт

Стр. 160: [212] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
--	-----------	----------------------------

Отступ: Первая строка: 1 см

Стр. 160: [213] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:53:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 6 пт

Стр. 160: [214] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:53:00
--	-----------	----------------------------

русский (Россия)

Стр. 160: [215] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:53:00
--	-----------	----------------------------

русский (Россия)

Стр. 160: [216] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
--	-----------	----------------------------

Отступ: Первая строка: 1 см

Стр. 160: [217] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:54:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 6 пт

Стр. 160: [218] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:54:00
--	-----------	----------------------------

русский (Россия)

Стр. 160: [219] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:54:00
--	-----------	----------------------------

русский (Россия)

Стр. 160: [220] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:54:00
--	-----------	----------------------------

Шрифт: 6 пт

Стр. 160: [221] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:54:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 160: [222] Отформатировано	NF	17.11.2009 15:54:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 147: [223] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [224] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [225] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 164: [226] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 164: [227] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:02:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 164: [228] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 164: [229] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 164: [230] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 164: [231] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:02:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 164: [232] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 164: [233] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:02:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 164: [234] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:02:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 164: [235] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 164: [236] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:02:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 164: [237] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:02:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 164: [238] Отформатировано	user	20.11.2009 2:44:00
Шрифт: 14 пт, ниже на 18 пт		
Стр. 164: [239] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:03:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 164: [240] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 164: [241] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:03:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 164: [242] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 164: [243] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 164: [244] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:03:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 164: [245] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		

Стр. 164: [246] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:03:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 164: [247] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:03:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 164: [248] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 164: [249] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:03:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 147: [250] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [251] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [252] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 165: [253] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:04:00
По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 165: [254] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 165: [255] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:04:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 165: [256] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 165: [257] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:04:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 165: [258] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 165: [259] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 165: [260] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:04:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 165: [261] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 165: [262] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:04:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 165: [263] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 165: [264] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:04:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 165: [265] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 165: [266] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:04:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 165: [267] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:04:00
Шрифт: курсив		
Стр. 165: [268] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 165: [269] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 165: [270] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:05:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 165: [271] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:05:00

интервал Перед: 0 пт

Стр. 165: [272] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:05:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 147: [273] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [274] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [275] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 166: [276] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 166: [277] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:05:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 166: [278] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
русский (Россия)		
Стр. 166: [279] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
русский (Россия)		
Стр. 166: [280] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 166: [281] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 166: [282] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
русский (Россия)		
Стр. 166: [283] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 166: [284] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 166: [285] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
русский (Россия)		
Стр. 166: [286] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 166: [287] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:06:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 166: [288] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:06:00
Шрифт: курсив		
Стр. 166: [289] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:06:00
Шрифт: курсив		
Стр. 166: [290] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:06:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 166: [291] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:06:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 166: [292] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 166: [293] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:07:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 166: [294] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:07:00
русский (Россия)		
Стр. 166: [295] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:07:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 166: [296] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		

Стр. 166: [297] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:07:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 166: [298] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:08:00
русский (Россия)		
Стр. 166: [299] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:08:00
русский (Россия)		
Стр. 166: [300] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:08:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 166: [301] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 166: [302] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 166: [303] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 166: [304] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 166: [305] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:08:00
По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 166: [306] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 147: [307] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [308] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [309] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 167: [310] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:09:00
русский (Россия)		
Стр. 167: [311] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:08:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 167: [312] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:08:00
русский (Россия)		
Стр. 167: [313] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 167: [314] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:09:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 167: [315] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:09:00
русский (Россия)		
Стр. 167: [316] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:09:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 167: [317] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:09:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 167: [318] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:09:00
русский (Россия)		
Стр. 167: [319] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:09:00
Шрифт: курсив		
Стр. 167: [320] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 167: [321] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:09:00
Шрифт: полужирный		
Стр. 167: [322] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:09:00

Шрифт: полужирный, не курсив

Стр. 167: [323] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:09:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 167: [324] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:10:00
русский (Россия)		
Стр. 167: [325] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:10:00
русский (Россия)		
Стр. 167: [326] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:10:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 167: [327] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 167: [328] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:10:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 167: [329] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 167: [330] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:10:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 167: [331] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 167: [332] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:10:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 167: [333] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 167: [334] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:10:00
русский (Россия)		
Стр. 167: [335] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:10:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 167: [336] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 147: [337] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [338] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [339] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 168: [340] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:12:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 168: [341] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:12:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 168: [342] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:12:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 168: [343] Удалено	NF	17.11.2009 16:12:00
Стр. 168: [344] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:12:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 168: [345] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 168: [346] Удалено	NF	17.11.2009 16:13:00

Как видно из приведенных графиков, асимптотическое слежение за эталонной моделью достигается для сигнала задания $g(t)$ любого вида. Однако для обеспечения сходимости по настраиваемым параметрам необходимо, чтобы сигнал задания $g(t)$ был достаточно богатым. На рис. 4.9 $g(t) = \sin 0.8t$, что не обеспечивает параметрической сходимости, так как число гармоник входного сигнала недостаточно для настройки трех параметров (сигнал $g(t)$ содержит только одну гармонику). На рис. 4.10 сигнал задания является прямоугольной волной (а именно $g(t) = \text{sgn}(\sin 0.8t)$) и, следовательно, он может обеспечить параметрическую сходимость для неограниченного числа настраиваемых параметров.

Стр. 168: [347] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:30:00
русский (Россия)		
Стр. 147: [348] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [349] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [350] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 170: [351] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 170: [352] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:15:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 170: [353] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:15:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 170: [354] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 170: [355] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:15:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 147: [356] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [357] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [358] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 173: [359] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:18:00
русский (Россия)		
Стр. 173: [360] Отформатировано	user	20.11.2009 13:57:00
русский (Россия)		
Стр. 173: [361] Отформатировано	user	20.11.2009 13:57:00
русский (Россия)		
Стр. 173: [362] Отформатировано	user	20.11.2009 13:57:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 173: [363] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 147: [364] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [365] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [366] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00

Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см

Стр. 174: [367] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:19:00
По центру, Уровень 1, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 174: [368] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:19:00
английский (США)		
Стр. 174: [369] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 174: [370] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 174: [371] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:19:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 174: [372] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:19:00
русский (Россия)		
Стр. 174: [372] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:19:00
русский (Россия)		
Стр. 174: [373] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:19:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 174: [374] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:19:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 174: [375] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:20:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 174: [376] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:19:00
Отступ: Слева: 0 см, Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 174: [377] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:20:00
русский (Россия)		
Стр. 174: [378] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:20:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 174: [379] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 174: [380] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 174: [381] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:20:00
русский (Россия)		
Стр. 174: [382] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:20:00
русский (Россия)		
Стр. 174: [382] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:20:00
русский (Россия)		
Стр. 174: [383] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:20:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 174: [384] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:20:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 174: [385] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:20:00
Шрифт: курсив		
Стр. 174: [386] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 174: [387] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:20:00
русский (Россия)		
Стр. 174: [388] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:21:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 174: [389] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
русский (Россия)		

Стр. 174: [390] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 174: [391] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 174: [392] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
русский (Россия)		
Стр. 174: [393] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 174: [394] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 174: [395] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
русский (Россия)		
Стр. 174: [396] Отформатировано	natfed	19.11.2009 17:17:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 174: [397] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:21:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 174: [398] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:21:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 174: [399] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:21:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 174: [400] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
уплотненный на 0,1 пт		
Стр. 147: [401] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [402] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [403] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 175: [404] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
уплотненный на 0,1 пт		
Стр. 175: [404] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
уплотненный на 0,1 пт		
Стр. 175: [405] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
Шрифт: курсив, уплотненный на 0,1 пт		
Стр. 175: [405] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
уплотненный на 0,1 пт		
Стр. 175: [405] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
уплотненный на 0,1 пт		
Стр. 175: [405] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
уплотненный на 0,1 пт		
Стр. 175: [405] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
уплотненный на 0,1 пт		
Стр. 175: [405] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
уплотненный на 0,1 пт		
Стр. 175: [405] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
русский (Россия), уплотненный на 0,1 пт		
Стр. 175: [406] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00

Шрифт: курсив, уплотненный на 0,1 пт

Стр. 175: [406] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
уплотненный на 0,1 пт		
Стр. 175: [407] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:22:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 175: [408] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:23:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [408] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:23:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [409] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:23:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 175: [410] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 175: [411] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:23:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 175: [412] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 175: [413] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:23:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [414] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:23:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 175: [415] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 175: [416] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:23:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [417] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:23:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 175: [418] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [418] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [419] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 175: [420] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [421] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 175: [422] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:24:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 175: [423] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 175: [424] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:24:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 175: [425] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:24:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 175: [426] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 175: [427] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:24:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 175: [428] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:24:00
Шрифт: 6 пт		

Стр. 175: [429] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 175: [430] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:24:00
интервал Перед: 0 пт		
Стр. 175: [431] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:24:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 175: [432] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [433] Отформатировано	natfed	19.11.2009 15:46:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 175: [434] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 175: [435] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:25:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 175: [436] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:25:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [436] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:25:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [437] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:25:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 175: [438] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см		
Стр. 175: [439] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:25:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [440] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:25:00
Шрифт: 6 пт, английский (США)		
Стр. 175: [441] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:26:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [441] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:26:00
русский (Россия)		
Стр. 175: [442] Отформатировано	NF	17.11.2009 16:26:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 147: [443] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [444] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [445] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		
Стр. 177: [446] Удалено	NF	17.11.2009 17:20:00

Свойства замкнутой системы могут быть сформулированы следующим образом. Для любых начальных условий $x(0)$, $w(0)$ и $\eta(0)$ и произвольного положительного коэффициента γ адаптивный регулятор (4.82), (4.84), (4.87) и (4.89) обеспечивает асимптотическую стабилизацию нулевого значения вектора состояния x объекта управления (4.75), подверженного воздействию внешнего заранее неизвестного возмущения δ , генерируемого моделью (4.76), (4.77).

Пример 4.3. Рассмотрим задачу стабилизации нулевого значения вектора состояния объекта управления

$$\dot{x} = -x_1 + 5x_2, \quad (4.91)$$

$$\dot{x}_2 = 2x_1 + 3x_2 + u + \delta, \quad (4.92)$$

где возмущение δ представляет собой гармоническую функцию с заранее неизвестной амплитудой, частотой и фазой. Очевидно, что в рассматриваемом случае порядок генератора (4.76), (4.77) равен двум (т. е. $q = 2$), а матрица A и вектор b модели (4.75) имеют вид

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 5 \\ 2 & 3 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Стр. 177: [447] Отформатировано	NF	17.11.2009 17:21:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 177: [448] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 177: [449] Отформатировано	NF	17.11.2009 17:21:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 177: [450] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Уровень 1, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 177: [451] Отформатировано	NF	17.11.2009 17:21:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 177: [452] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 177: [453] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
По правому краю, Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 177: [454] Отформатировано	NF	17.11.2009 17:21:00
Шрифт: 6 пт		
Стр. 177: [455] Отформатировано	NF	17.11.2009 14:51:00
Отступ: Первая строка: 1 см, интервал Перед: 0 пт		
Стр. 147: [456] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Шрифт: 14 пт		
Стр. 147: [457] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Положение: По горизонтали: вне, Относительно: поля		
Стр. 147: [458] Отформатировано	NF	13.11.2009 14:38:00
Отступ: Первая строка: 0,63 см, Справа: 0,63 см		