

В. Ю. Косицын, А. Н. Рыбалев, Д. А. Теличенко

Д-АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ

In this article the algorithms of D-adaptive control system with object of delay and relative order of transfer function $l=1$ are synthesized. Simplified access of construction of control circuit which provides wishful quality with satisfactory accuracy is used.

Введение

В настоящее время актуальной проблемой управления является разработка адаптивных систем классов объектов с известным запаздыванием по времени. Существует несколько схем компенсации запаздывания, – например, как в [2]. Одна из них заключается во введении дополнительного блока, так называемого блока упреждения. В совокупности с эталонной моделью он позволяет добиться в системе управления требуемого качества и точности, существенно не усложняя структуру системы.

В статье рассматривается Д-адаптивная система управления неустойчивым, априорно неопределенным объектом с запаздыванием по управлению и относительным порядком передаточной функции $l=1$. Синтез алгоритмов адаптации основан на критерии гиперустойчивости [3].

Математическое описание и постановка задачи синтеза системы

Математическое описание. Пусть объект управления описывается уравнениями в пространстве состояний

$$\frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + B \cdot u(t-h), \quad y(t) = L \cdot x(t), \quad (1)$$

$$x(0) = x_0, \quad u(\zeta) = \varphi(\zeta), \quad \zeta \in [-h, 0],$$

где $x(t) \in R^n$ – переменные состояния; $y(t) \in R$ – выход объекта; $u(t) \in R$ – управляющее воздействие; $h = const > 0$ – известное постоянное запаздывание; $\varphi(\zeta) \in C_h$ – начальная функция; C_h – пространство непрерывных ограниченных функций; A, B, L – матрица и векторы соответствующих размерностей; $B^r = [0 \dots 0 \ 1]$.

Передаточная функция объекта (1) может быть записана в виде

$$W_{об}(s) = L^r (s \cdot E - A)^{-1} B \cdot e^{-hs} = \frac{b(s)}{a(s)} e^{-hs}, \quad (2)$$

где E – единичная n -мерная матрица; $b(s)$ – гурвицев полином с положительными коэффициентами, порядка $\text{deg} b(s) = m$; $a(s)$ – полином с произвольным расположением корней, порядка $\text{deg} a(s) = n$; $l = n - m = 1$ – относительный порядок передаточной функции объекта.

Объект (1) функционирует в условиях априорной неопределенности

$$A = A(\xi), \quad L = L(\xi), \quad \xi \in \Xi, \quad (3)$$

где ξ – набор неизвестных параметров, принадлежащих известному множеству Ξ .

Для задания желаемой динамики процессов управления используется явно-неявная эталонная модель вида

$$\frac{d\tilde{x}_m(t)}{dt} = \tilde{A}_m \cdot \tilde{x}_m(t) + \tilde{B}_m \cdot r(t), \quad (4)$$

$$\tilde{y}_m(t) = \tilde{L}_m^r \cdot \tilde{x}_m(t),$$

$\tilde{x}_m(t) \in R$ – переменная состояния эталонной модели; $\tilde{y}_m(t) \in R$ – выход эталонной модели; $r(t)$ – задающее

воздействие; $\tilde{B}_m^r = 1, \tilde{L}_m^r = k_m, \tilde{A}_m = -a_{0,m}$ – параметры, задающие желаемое качество переходных процессов в системе.

Передаточную функцию эталонной модели (4) можно записать в виде

$$W_m(s) = \frac{\tilde{y}_m(s)}{r(s)} = \frac{k_m}{s + a_{0,m}}, \quad (5)$$

где $a_{0,m} = const > 0, k_m > 0$.

Если задать гурвицеву матрицу A_m , вектор B_m , исходя из выполнения

$$W_m(s) = \frac{k_m}{s + a_{0,m}} \cdot \frac{b(s)}{b(s)} = \frac{k_m}{s + a_{0,m}} \cdot \frac{L^r (s \cdot E_n - A)^+ B}{L^r (s \cdot E_n - A)^+ B} = \frac{L^r (s \cdot E_n - A_m)^+ B_m}{\det(s \cdot E_n - A_m)}, \quad (6)$$

где $b(s) = L^r (s \cdot E_n - A)^+ B$ – гурвицев полином степени m , то аналогично [1] от описания (4) – (6) можно перейти к описанию вида

$$\frac{dx_m(t)}{dt} = A_m \cdot x_m(t) + B_m \cdot r(t), \quad (7)$$

$$y_m(t) = L^r \cdot x_m(t) = \tilde{y}_m(t),$$

где $x_m(t) \in R^n$ – переменные состояния; $y_m(t) \in R$ – выход явной эталонной модели.

В систему введем адаптивный регулятор следующей структуры

$$u(t) = r(t) - \vartheta(t), \quad (8)$$

$$\vartheta(t) = \chi_1(t) \cdot y(t) + \chi_2(t) \cdot u(t-h),$$

где $\chi_1(t), \chi_2(t)$ – параметры адаптивного регулятора, алгоритмы настройки которого подлежат определению.

Постановка задачи. Для объекта управления (1), (2), функционирующего в условиях априорной неопределенности (3) совместно с эталонной моделью (4), (5) и адаптивным регулятором (8), требуется определить явный вид алгоритмов параметрической настройки коэффициентов $\chi_1(t)$ и $\chi_2(t)$ таким образом, чтобы при любых начальных условиях $x(0)$ и любом наборе $\xi \in \Xi$ обеспечивалось бы выполнение целевых условий

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_m(t) - y(t)| \leq \sigma_0, \quad \sigma_0 = const > 0, \quad (9)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \chi_1(t) \leq \chi_{10} = const, \quad (10)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \chi_2(t) \leq \chi_{20} = const,$$

где σ_0 – относительно небольшая величина.

Синтез системы управления

Синтез системы управления проведем с использованием блока упреждения [2].

Для компенсации запаздывания введем в систему явно-неявный блок упреждения

$$\frac{d\tilde{x}_k(t)}{dt} = \tilde{A}_k \cdot \tilde{x}_k(t) + \tilde{B}_k \cdot \psi(t), \quad (11)$$

$$\psi(t) = [u(t) - u(t-h)], \quad \tilde{y}_k(t) = \tilde{L}_k^r \cdot \tilde{x}_k(t),$$

где $\tilde{x}_k(t) \in R$ – переменная состояния блока упреждения; $\tilde{y}_k(t) \in R$ – выход блока упреждения; $\psi(t)$ – обобщенный вход блока упреждения.

Передаточную функцию блока упреждения (11) можно записать в виде

$$W_{\kappa}(s) = \frac{\tilde{y}_{\kappa}(s)}{\psi(s)} = \frac{k_{\kappa}}{s + a_{0\kappa}}. \quad (12)$$

Аналогично, как и выше (для эталонной модели), для явно-неявного блока упреждения (11), (12) можно записать уравнения в явном виде

$$\begin{aligned} \frac{dx_{\kappa}(t)}{dt} &= A_{\kappa} \cdot x_{\kappa}(t) + B_{\kappa} \cdot \psi(t), \\ y_{\kappa}(t) &= L^T \cdot x_{\kappa}(t) = \tilde{y}_{\kappa}(t), \end{aligned} \quad (13)$$

где $x_{\kappa}(t) \in R^n$ – переменные состояния; $y_{\kappa}(t) \in R$ – выход блока упреждения.

Предположим, что для объекта управления (1), эталонной модели (7) совместно с блоком упреждения (13) выполняются условия структурного согласования

$$A_{\kappa} - A = -B_{\kappa} \cdot \chi_{10} \cdot L^T, \quad B_{\kappa} = B_{\kappa} \cdot (I + \chi_{20}), \quad (14)$$

где χ_{10}, χ_{20} – неизвестные постоянные, значения которых определяются в процессе настройки.

1-й этап синтеза. Получим эквивалентное математическое описание исследуемой системы (1), (7), (8), (13).

Введем в рассмотрение сигнал рассогласования

$$e(t) = x_{\kappa}(t) - x(t) - x_{\kappa}(t). \quad (15)$$

Используя уравнения (1), (7), (13), а также применяя стандартный прием $[\pm A_{\kappa} \cdot x(t)]$, запишем выражение для производной ошибки рассогласования:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= A_{\kappa} \cdot x_{\kappa}(t) + B_{\kappa} \cdot r(t) - A \cdot x(t) - B \cdot u(t-h) - \\ &- A_{\kappa} \cdot x_{\kappa}(t) - B_{\kappa} \cdot [u(t) - u(t-h)] \pm A_{\kappa} \cdot x(t) = \\ &= A_{\kappa} \cdot [x_{\kappa}(t) - x(t) - x_{\kappa}(t)] + [A_{\kappa} - A] \cdot x(t) - \\ &- B \cdot u(t-h) - B_{\kappa} \cdot [u(t) - u(t-h) - r(t)]. \end{aligned} \quad (16)$$

С учетом условий структурного согласования (14) и управляющего воздействия (8), выражение (15) приобретает конечный вид:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= A_{\kappa} \cdot e(t) - B_{\kappa} \cdot \chi_{10} \cdot L^T \cdot x(t) - B_{\kappa} \cdot \chi_{20} \cdot u(t-h) + \\ &+ B_{\kappa} \cdot \chi_{10} \cdot y(t) + B_{\kappa} \cdot \chi_{20} \cdot u(t-h) = \\ &= A_{\kappa} \cdot e(t) + B_{\kappa} \cdot [(\chi_{10}(t) - \chi_{10}) \cdot y(t) + (\chi_{20}(t) - \chi_{20}) \cdot u(t-h)]. \end{aligned}$$

Выражение для обобщенного выхода сигнала ошибки принимает вид:

$$\begin{aligned} v(t) &= L^T \cdot [x_{\kappa}(t) - x(t) - x_{\kappa}(t)] = L^T \cdot e(t) = \\ &= y_{\kappa}(t) - y(t) - y_{\kappa}(t). \end{aligned} \quad (17)$$

Полученное в итоге эквивалентное математическое описание имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{de(t)}{dt} = A_{\kappa} \cdot e(t) + B_{\kappa} \cdot \mu(t), \\ \mu(t) = [(\chi_{10}(t) - \chi_{10}) \cdot y(t) + (\chi_{20}(t) - \chi_{20}) \cdot u(t-h)], \\ v(t) = L^T \cdot e(t), \end{cases} \quad (18)$$

где первое уравнение описывает линейную стационарную часть (ЛСЧ), а второе – нелинейную нестационарную часть (ННЧ) расширенной системы; $v(t) \in R$ – обобщенный выход сигнала ошибки.

2-й этап синтеза. Решим проблему вещественности и строгой положительности ЛСЧ-системы (18).

Передаточная функция ЛСЧ эквивалентной системы имеет вид

$$W_{\text{лсч}}(s) = \frac{L^T \cdot (s \cdot E - A_{\kappa})^+ \cdot B_{\kappa}}{\det(s \cdot E - A_{\kappa})}. \quad (19)$$

Очевидно, что, учитывая (5)–(7), уравнение (19) эквивалентно преобразуется к виду

$$\begin{aligned} W_{\text{лсч}}(s) &= \frac{L^T \cdot (s \cdot E - A_{\kappa})^+ \cdot B_{\kappa}}{\det(s \cdot E - A_{\kappa})} = \frac{k_{\kappa} \cdot b(s)}{(s + a_{0\kappa}) \cdot b(s)} = \\ &= \frac{k_{\kappa}}{s + a_{0\kappa}}, \end{aligned} \quad (20)$$

исходя из которого становится вполне очевидным выполнение неравенства вида

$$\operatorname{Re} W_{\text{лсч}}(j\omega) > 0, \quad \forall \omega \geq 0, \quad (21)$$

что и требовалось доказать.

3-й этап синтеза. Обеспечим выполнение интегрального неравенства В.М. Попова вида, составленного относительно ННЧ эквивалентно преобразованной системы (18)

$$\eta(0, t) = -\int_0^t \mu(s) \cdot v(s) ds \geq -\gamma_0^2 = \text{const}, \quad \forall t \geq 0. \quad (22)$$

Запишем левую часть (22), с учетом явного вида ННЧ, в виде:

$$\begin{aligned} \eta(0, t) &= -\int_0^t (\chi_{10}(\zeta) - \chi_{10}) \cdot v(\zeta) \cdot y(\zeta) d\zeta - \\ &- \int_0^t (\chi_{20}(\zeta) - \chi_{20}) \cdot v(\zeta) \cdot u(\zeta - h) d\zeta. \end{aligned} \quad (23)$$

Синтезируя алгоритмы настройки коэффициентов адаптивного регулятора (8) следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\chi_1(t)}{dt} &= -\alpha_1 \cdot v(t) \cdot y(t), \quad \alpha_1 = \text{const} > 0, \\ \frac{d\chi_2(t)}{dt} &= -\alpha_2 \cdot v(t) \cdot u(t-h), \quad \alpha_2 = \text{const} > 0, \end{aligned} \quad (24)$$

можно показать аналогично [3], что для $\eta(0, t)$ вида (23) будет иметь место оценка

$$\eta(0, t) \geq -\frac{1}{2} \alpha_1^{-1} (\chi_1(0) - \chi_{10})^2 - \frac{1}{2} \alpha_2^{-1} (\chi_2(0) - \chi_{20})^2, \quad (25)$$

эквивалентная условию (22).

4-й этап синтеза. Обеспечим достижимость целевых требований (9), (10) в синтезированной системе управления (1)–(8).

Система (1)–(8), (15), (24) является гиперустойчивой, и для нее справедливы соотношения вида

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \chi_1(t) = \chi_{10}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \chi_2(t) = \chi_{20}, \quad (26)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0. \quad (27)$$

Если в качестве задающего воздействия системы использовать кусочно-постоянные функции, то на каждом интервале постоянства $r(t)$ система будет работать в режиме стабилизации, и для нее будет выполняться

$$u(t-h) \rightarrow u(t) = u_* = \text{const}, \quad (28)$$

что с учетом уравнений (11)–(13) для блока упреждения приводит к выполнению условия

$$y_{\kappa}(t) = \tilde{y}_{\kappa}(t) \rightarrow 0. \quad (29)$$

Заметим, что если использовать вместо ошибки системы уравнение

$$\tilde{e}(t) = x_{\kappa}(t) - x(t), \quad (30)$$

то можно записать уравнения для обобщенного выхода эквивалентно преобразованной системы

$$\tilde{v}(t) = L^T \cdot \tilde{e}(t). \quad (31)$$

При этом очевидно, что выполнение для такой системы идеальных условий, аналогичных (26), (27) на всем интервале не может быть гарантировано в силу

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_{\kappa}(t) - x(t)\| = \|x_{\kappa}(t)\| \leq \sigma_0 = \text{const} > 0. \quad (32)$$

Для сохранения работоспособности синтезируемой системы аналогично случаю нарушения идеальных условий [2] алгоритмы адаптации (25) необходимо подвергнуть процедуре регуляризации, – например, путем введения в них зоны нечувствительности

$$\frac{d\chi_1(t)}{dt} = \begin{cases} 0, & \forall t \geq 0, |\tilde{v}(t)| \leq \delta, \\ -\alpha_1 \cdot y(t) \cdot (\tilde{v}(t) + \delta), & \forall t \geq 0, \tilde{v}(t) < -\delta \\ -\alpha_1 \cdot y(t) \cdot (\tilde{v}(t) - \delta), & \forall t \geq 0, \tilde{v}(t) > \delta, \end{cases}$$

$$\frac{d\chi_2(t)}{dt} = \begin{cases} 0, & \forall t \geq 0, |\tilde{v}(t)| \leq \delta, \\ -\alpha_2 \cdot u(t-h) \cdot (\tilde{v}(t) + \delta), & \forall t \geq 0, \tilde{v}(t) < -\delta, \\ -\alpha_2 \cdot u(t-h) \cdot (\tilde{v}(t) - \delta), & \forall t \geq 0, \tilde{v}(t) > \delta, \end{cases} \quad (33)$$

$$\tilde{v}(t) = L \cdot \tilde{e}(t) = y_m(t) - y(t),$$

где $\delta = const > 0$ – величина зоны нечувствительности. В этом случае будут иметь место сформулированные в постановке задачи целевые условия (9), (10), а полученная система управления будет Д-адаптивна (диссипативна) в заданном классе.

Иллюстрационный пример

Рассмотрим пример имитационного моделирования адаптивной системы управления объектом (1), (2), функционирующего в условиях априорной неопределенности вида (3). Значения параметров объекта управления заданы произвольным образом, – например:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ a_1 & a_2 & a_3 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$0.06 \leq a_1 \leq 0.14, \quad -12 \leq a_2 \leq -8, \quad -4.5 \leq a_3 \leq 3.5,$$

$$L = (6 \quad 5 \quad 1), \quad h = 0.7.$$

Задающее воздействие – кусочно-постоянная функция

$$r(t) = 0.143 \exp(-0.143 \cdot t) + H_1 + H_2 + H_3,$$

$$H_1 = \begin{cases} 0 & npu \ t \leq 0 \\ 1 & npu \ t > 0 \end{cases}, \quad H_2 = \begin{cases} 0 & npu \ t \leq 100 \\ -0.5 & npu \ t > 100 \end{cases},$$

$$H_3 = \begin{cases} 0 & npu \ t \leq 200 \\ 1 & npu \ t > 200 \end{cases}$$

Эталонную модель (5) зададим в виде

$$W_m(s) = \frac{1.1}{s + 1.1}.$$

Параметры настройки адаптивного регулятора зададим следующими

$$\chi_1 = 0.5, \chi_2 = 0.7.$$

Зону нечувствительности алгоритмов параметрической самонастройки примем равной

$$\delta = 0.1.$$

Структурная схема системы представлена на рис. 1-3 – Simulink-модели контуров настройки.

Динамика изменения выхода объекта управления и эталонной модели показана на рис 4. Ошибка системы приведена на рис. 5.

Исходя из представленных рисунков, можно сделать вывод о хорошем качестве работы предлагаемой системы. Различные сеансы имитационного моделирования также подтверждают работоспособность предлагаемых алгоритмов при изменении параметров объекта управления.

Заключение

В работе была синтезирована система Д-адаптивного управления неустойчивым, априорно неопределенным объектом с запаздыванием по управлению и относительным порядком передаточной функции $l=1$. Применение упрощенного подхода к построению контуров управления обеспечивает желаемое качество с достаточной точностью.

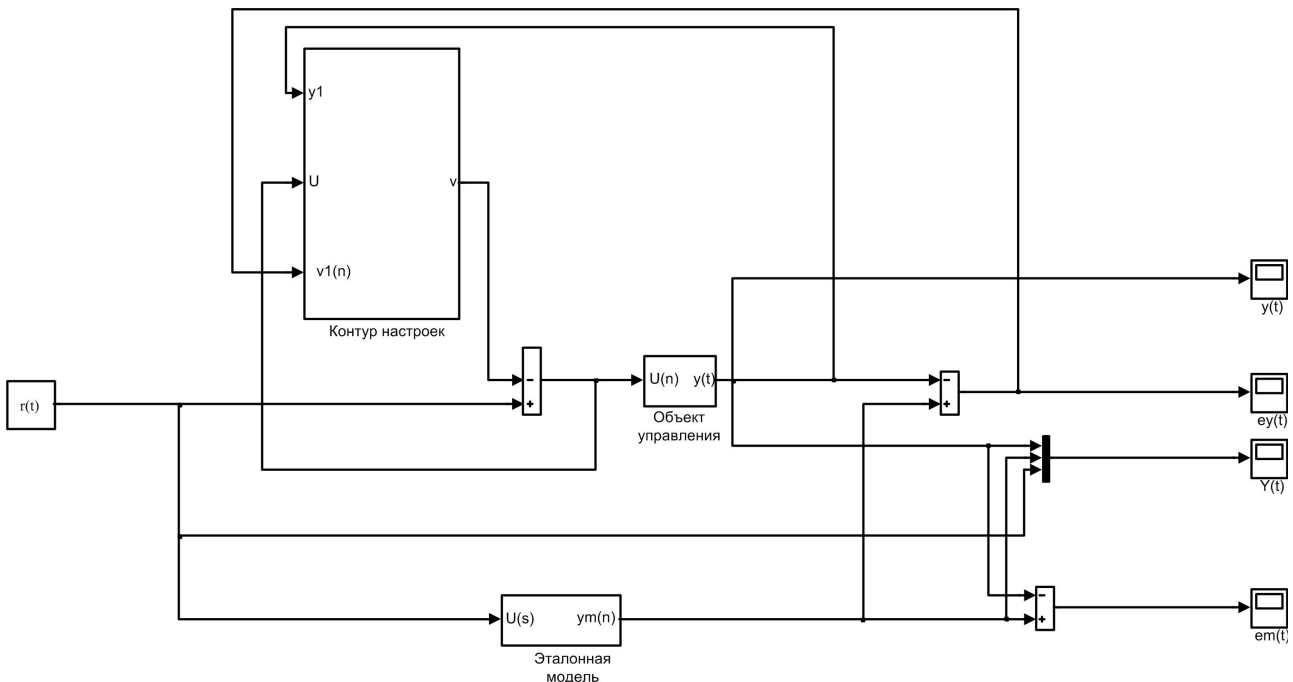


Рис. 1. Структурная схема системы.

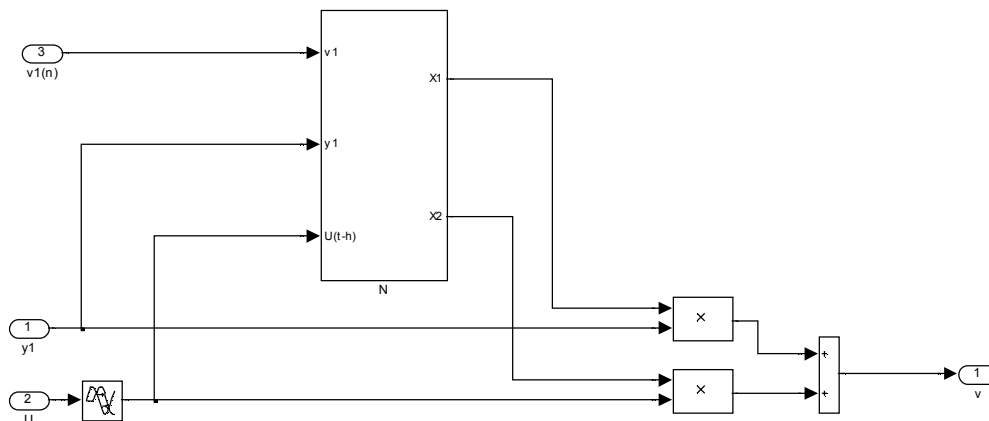


Рис. 2. Контур настройки.

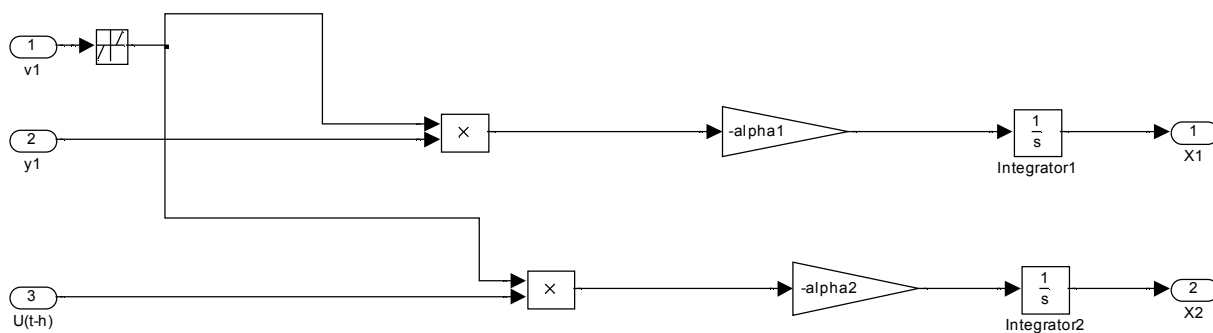


Рис. 3. Контур настройки.

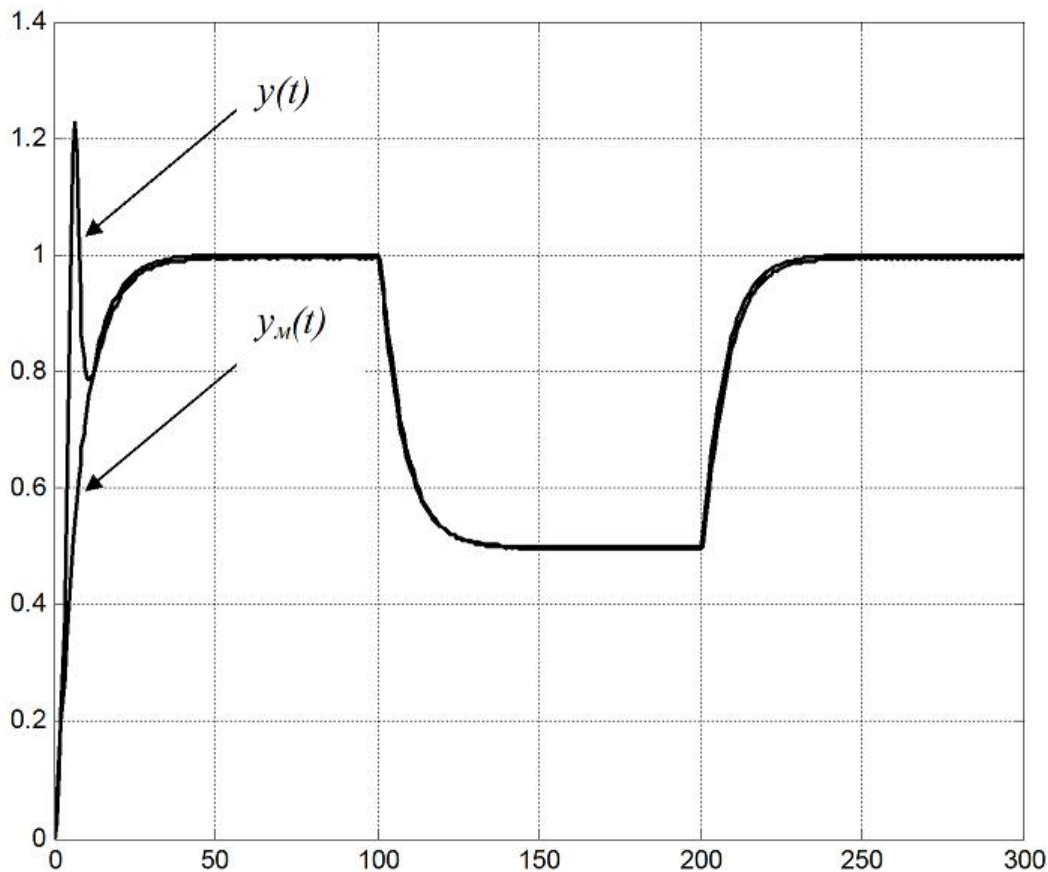


Рис. 4. Динамика изменения выхода объекта управления и эталонной модели.

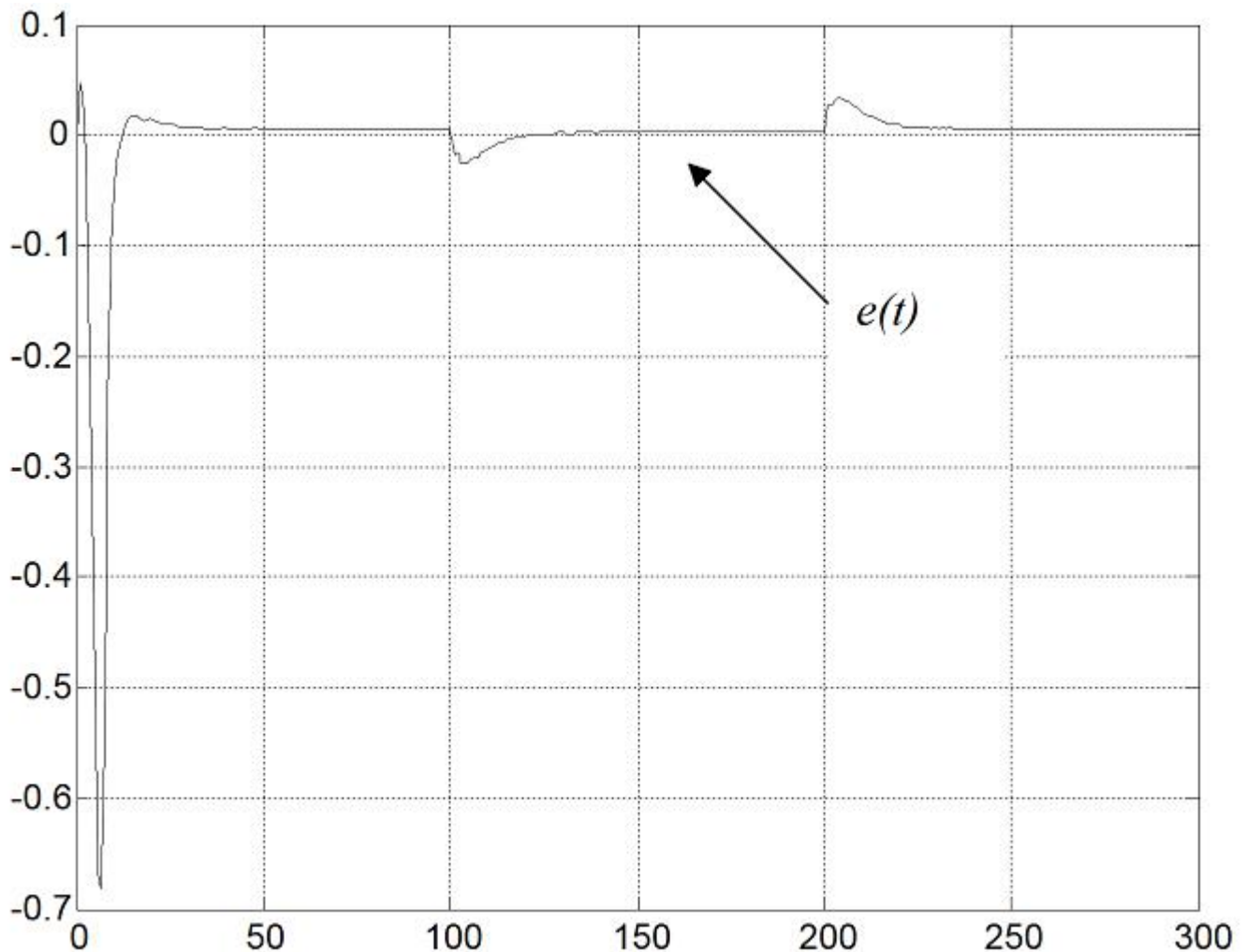


Рис. 5. Ошибка системы.

1. Еремин Е. Л., Теличенко Д.А. Адаптивная система управления с эталонным упредителем для объектов с запаздыванием по состоянию и управлению // Вестник АмГУ. – Благовещенск, 2005. – Вып. 31. – С. 36-40.

2. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Чепак Л.В. Синтез адаптивных систем для скалярных объектов с запаздыванием по управлению. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2006.

3. Еремин Е.Л., Цыкунов А.М. Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. – Бишкек: Илим, 1992.

Е.К.Мусина

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОТАРИФОВ НА УРОВЕНЬ ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ

A power industry is one of the main infrastructure's sector, creating required conditions for functioning of productive forces and live of the population.

В современном мире работа систем управления страной, промышленностью, транспортом, сельским хозяйством и обеспечение жизни населения невозможны без использования электричества – наиболее современного и универсального энергоносителя. Надежное и эффективное функционирование электроэнергетики, бесперебойное снабжение потребителей – основа поступательного развития экономики страны и неотъемлемый фактор обеспечения условий жизни всех ее граждан [1, с. 6].

Пройдя трудный период 90-х гг., который характеризовался серьезным падением производства, неплатежами и другими негативными проблемами, российская энергетика сейчас стремится выйти на новый уровень своего

развития, находится в стадии реструктуризации и роста производства энергии. Иными словами, в настоящее время в электроэнергетике России проводится ряд структурных реформ.

Реформирование электроэнергетики выражается прежде всего в отказе государства от контроля над тарифами на электроэнергию с целью допустить свободную конкуренцию, обеспечивающую снижение тарифов. В России основные положения реформирования определены федеральным законом от 26.03.03 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике», а перспективы развития энергетики – «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года» [10].

В результате реформы электроэнергетики на Дальнем Востоке с 1 января 2007 г. действует несколько крупных государственных энергохолдингов. Здесь работают филиал ОАО «Федеральная сетевая компания», дочерние компании ОАО «РусГидро» и энергохолдинг ОАО «РАО «Энергетические системы Востока», в который вошли в том числе компании объединенной энергосистемы: ОАО «Дальневосточная энергетическая компания» (далее – ОАО «ДЭК»), ОАО «Дальневосточная генерирующая ком-