

АДАПТИВНЫЕ И РОБАСТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ЗАПАЗДЫВАНИЯ

Фуртат Игорь Борисович

Специальность **05.11.16** – «Информационно-измерительные и управляющие системы»
диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

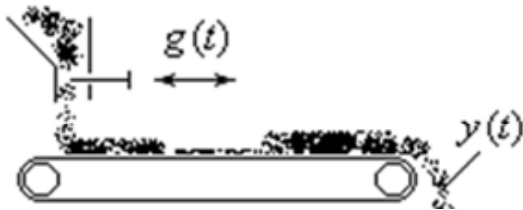
Научные консультанты:

д.т.н., проф. **Цыкунов Александр Михайлович** (АГТУ, Астрахань).

д.т.н., проф. **Фрадков Александр Львович** (ИПМаш РАН, Санкт-Петербург)

Актуальность проблемы

Системы с запаздыванием по управлению



Системы с запаздыванием по состоянию Системы с нестационарными параметрами



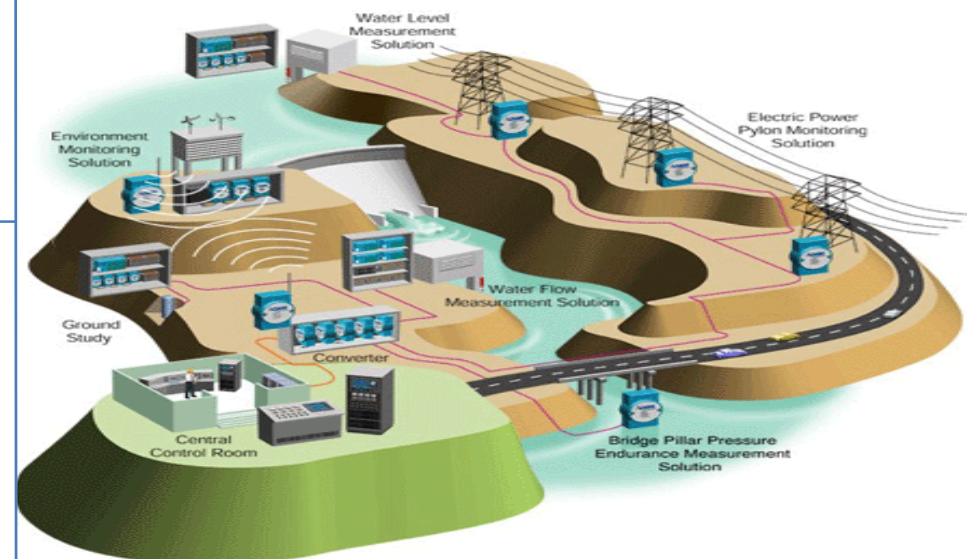
Структурно-неопределенные системы

1. Вывод модели объекта управления
2. Динамический порядок модели изменяется в результате отказа элементов

Многосвязные объекты



Динамические сети



Цель работы

Целью работы является разработка новых простых, как в технической реализации, так и в аналитическом расчете, адаптивных, робастных и робастно-субоптимальных систем управления односвязными, многосвязными и сетевыми линейными и нелинейными объектами по выходу в условиях параметрической, сигнальной, функциональной, структурной неопределенностей и запаздывания.

Задачи исследований

1. Получение способов адаптивного управления по выходу априорно и структурно неопределенными линейными и нелинейными объектами с запаздыванием по состоянию и управлению с использованием модифицированного алгоритма адаптации высокого порядка.
2. Разработка новых подходов робастного и робастно-субоптимального управления по выходу параметрически, сигнально, функционально и структурно неопределенными линейными и нелинейными объектами как с запаздыванием по состоянию, так и без него.
3. Получение методов адаптивного, робастного и робастно-субоптимального управления многосвязными и сетевыми объектами, подсистемы которых представлены линейными и нелинейными параметрически, сигнально, структурно неопределенными объектами, в условиях влияния внутренних и внешних неконтролируемых возмущений и запаздывания.

План выступления

1. Системы адаптивного управления

- *Объекты с запаздыванием по управлению*
 - *Управление с предиктором*
 - *Управление без предиктора*
- *Объекты с запаздыванием по состоянию*
- *Объекты с запаздыванием по управлению и состоянию*
- *Структурно-неопределенные объекты*

2. Системы робастного управления

3. Системы робастно-субоптимального управления

4. Системы управления многосвязными объектами

5. Системы управления сетевыми объектами

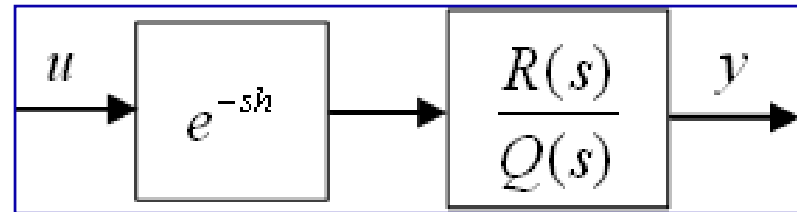
6. Управление в химическом машиностроении

7. Управление в энергетических сетях

8. Результаты работы

1. Постановка задачи

Объекты с запаздыванием по управлению



Объект управления

$$Q(p, \vartheta)y(t) = k(\vartheta)R(p, \vartheta)u(t-h) \quad p^i y(0) = y_{i0}, \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (1.1)$$

$p = d/dt$ - оператор дифференцирования

Эталонная модель

$$Q_m(p)y_m(t) = k_m R_m(p)r(t), \quad (1.2)$$

Предположения ПА

1. $\vartheta \in \Xi$, Ξ – известное множество
2. Объект минимально-фазовый
3. $Q_m(s)$ и $R_m(s)$ – гурвицевы, где s – комплексная переменная
4. Доступен измерению только сигнал $y(t)$

Предположения П1

5. Известны: $h > 0$, $\deg Q(p) = n$, $\deg R(p) = m$, $\gamma = n - m > 1$
6. $Q(s)$ – гурвицевы, где s – комплексная переменная

Цель управления

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |y(t) - y_m(t-h)| < \delta, \quad (1.3)$$

$\delta > 0$ – число, которое можно уменьшить за счет выбора параметров в СУ

1. Метод решения

Объекты с запаздыванием по управлению Управление с предиктором

Предиктор

$$Q_0(p)y_v(t) = R_0(p)(u(t) - u(t-h)) + G(p)v_1(t+h), \quad (1.4)$$

$G(s)/Q(s)$ – СПВ функция

Сигналы для управления процессами прогноза $v_1(t)$ и слежения $u(t)$:

$$v_1(t+h) = c_1^T(t+h)w_1(t), \quad u(t) = T(p)\bar{v}_2(t), \quad v_2(t) = c_2^T(t)w_2(t), \quad (1.5)$$

$$w_1 = [y_v, V_{y_v}^T, \pi^T]^T, \quad w_2 = [V_v^T, V_z^T, z, V_r^T]^T$$

Фильтры состояния:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{y_v}(t) &= F_p V_{y_v}(t) + b_0 y_v(t), & \dot{V}_v(t) &= F_v V_v(t) + b_0 \bar{v}_2(t), \\ \dot{V}_{u_h}(t) &= F_p V_{u_h}(t) + b_0 (u(t) - u(t-h)), & \dot{V}_z(t) &= F_z V_z(t) + b_0 z(t), \\ \pi(t) &= K V_{u_h}(t), & \dot{V}_r(t) &= F_r V_r(t) + b_0 r(t), \end{aligned} \quad (1.6)$$

F_p , F_v , F_z и F_r – матрицы в форме Фробениуса с характеристическими полиномами $G(s)$,

$R_m(s)$, $T(s)R_m(s)$ и $T(s)$, $T(s)$ – гурвицевый, $\deg T(s) = \gamma - 1$;

Наблюдатель Халила

$$\dot{\xi}(t) = G_0 \xi(t) + D_0 (\bar{v}(t) - v_2(t)), \quad \bar{v}(t) = L \xi(t), \quad \xi(t) \in \mathbb{R}^{\gamma-1} \quad (1.7)$$

$$G_0 = \begin{bmatrix} 0 & I_{\gamma-2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_0 = \left[-\frac{d_1}{\mu}, -\frac{d_2}{\mu^2}, \dots, -\frac{d_{\gamma-1}}{\mu^{\gamma-1}} \right]^T, \quad d_1, \dots, d_{\gamma-1} \Rightarrow G = G_0 - DL_1 \quad -$$

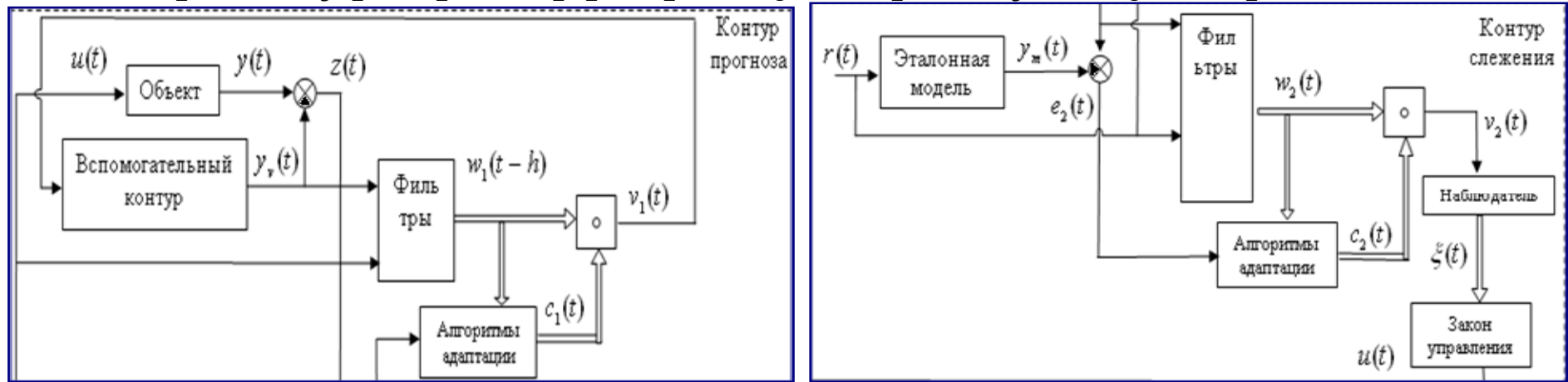
гурвицева, $D = [d_1, d_2, \dots, d_{\gamma-1}]$, $\mu > 0$ – малое число

1. Метод решения

Объекты с запаздыванием по управлению Управление с предиктором

Алгоритмы адаптации

$$\begin{aligned}\dot{c}_1(t) &= -\alpha_1 e_1(t) w_1(t-h) - \alpha_2 e_2(t) w_2(t) - \beta_1 e_1^2(t) c_1(t), \quad c_1(t+h) = c_1(t) - e_2(t) w_1(t), \\ \dot{c}_2(t) &= -\alpha_3 e_2(t) w_2(t) - \beta_2 e_2^2(t) c_2(t), \quad \alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \alpha_3 > 0, \beta_1 > 0, \beta_2 > 0\end{aligned}\quad (1.8)$$



- Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектами с запаздыванием по выходу // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2005. – № 7. – С. 15-19.
- Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивный предиктор и его применение в системах запаздыванием // Тезисы докладов 6-й Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления». Таганрогский государственный радиотехнический университет. – Таганрог. – 2002. – С. 139-140.
- Furtat I.B. Adaptive control for system with time delays using an output signal // 10th International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad). Saint-Petersburg. 2004. Preprints. P. 27-31.
- Фуртат И.Б. Адаптивное управление для объектов с запаздывающим управлением // Труды IV Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления». Москва. – 2005. – С. 1369-1375.
- Фуртат И.Б. Адаптивное управление по выходу для систем с запаздыванием по управлению на основе модифицированного алгоритма адаптации высокого порядка // Труды VI Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления». Москва. – 2007. – С. 595-606.

1. Метод решения

Объекты с запаздыванием по управлению Управление без предиктора

Фильтры

$$\dot{V}_1(t) = FV_1(t) + b_0 u(t),$$

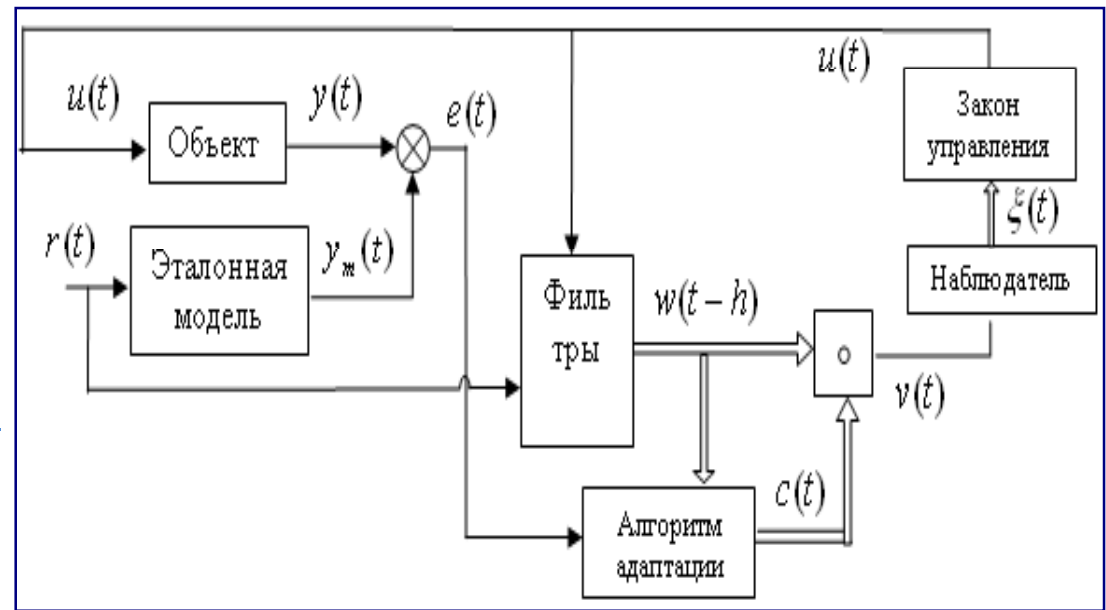
$$V_2 = \frac{1}{R_m(p)} [V_1^T, pV_1^T, \dots, p^{m-1}V_1^T]^T$$

F – в форме Фробениуса с характеристическим полиномом $Q_m(s)$

Закон управления

$$u(t) = T(p)v(t), \quad v(t) = c^T(t)\bar{w}(t)$$

$$w = [V_1^T, V_2^T, r]^T, \quad T(p)\bar{w}(t) = w(t)$$



Наблюдатель

$$\dot{\xi}(t) = G_0 \xi(t) + D_0 (\bar{v}(t) - v(t)), \quad \bar{v}(t) = L \xi(t), \quad \xi(t) \in \mathbb{R}^{r-1}$$

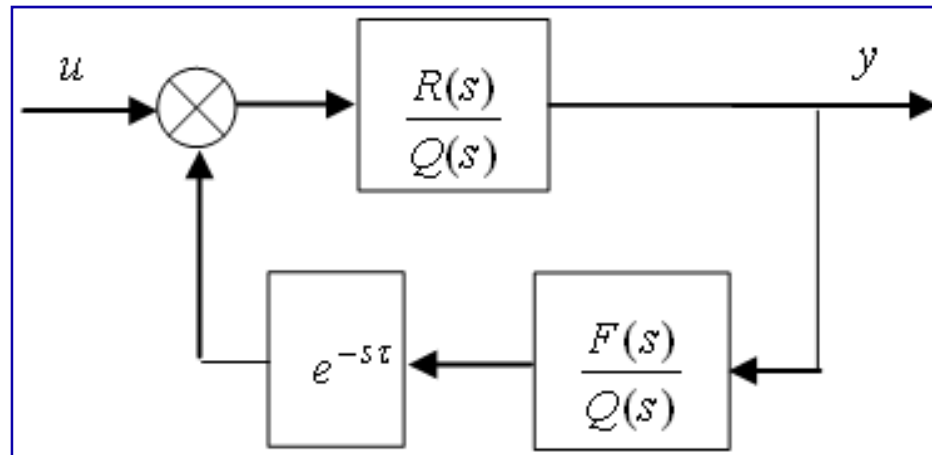
Алгоритма адаптации

$$\dot{c}(t) = -\rho e(t)\bar{w}(t-h), \quad \rho > 0$$

- Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Синтез адаптивного управления по выходу для систем с запаздыванием на основе модифицированного алгоритма высокого порядка // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 8. – С. 15-17.
- Furtat I.B., Thykunov A.M. Output adaptive control for plants using time delay in output signal based on the modified algorithm of adaptation of the high order // 9th IFAC Workshop “Adaptation and Learning in Control and Signal Processing”. Saint-Petersburg. – 2007. Preprints.
- Furtat I.B., Thykunov A.M. Output adaptive control for plants using time delay in output signal based on the modified algorithm of adaptation of the high order // IPACS Electronic Library. 9th IFAC Workshop “Adaptation and Learning in Control and Signal Processing” (ALCOSP ‘07). 2007. <http://lib.physcon.ru/getfile.html?item=1528>.

1. Постановка задачи

Объекты с запаздыванием по состоянию



Объект

$$\begin{aligned} Q(p, \mathcal{G})y(t) + F(p, \mathcal{G})y(t - \tau) &= k(\mathcal{G})R(p, \mathcal{G})u(t), \\ p^i y(\lambda) &= \theta_i(\lambda), \quad \lambda \in [-\tau, 0], \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (1.9)$$

Предположения П2

1. ПА

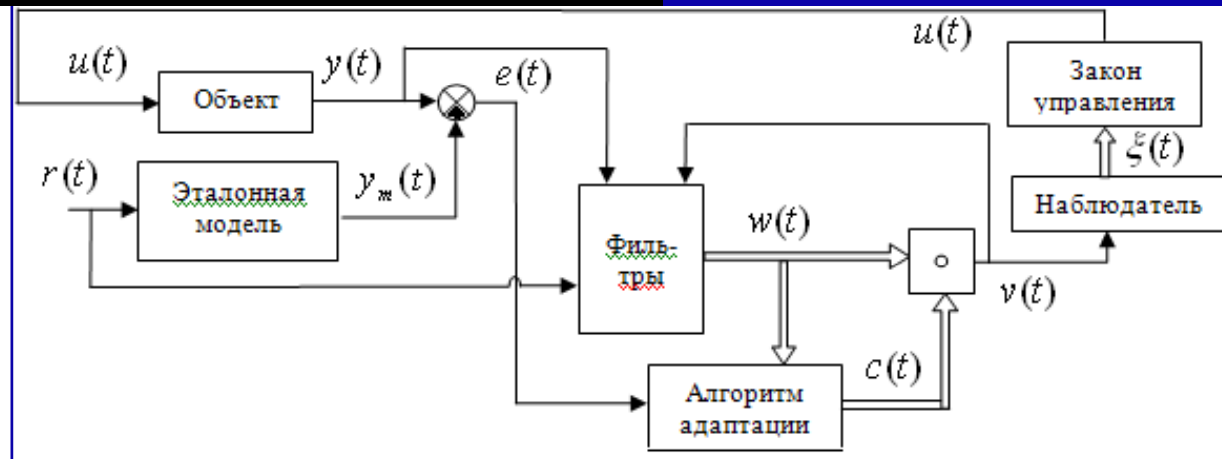
2. Известны $\tau > 0$, $\deg Q(p) = n$, $\deg R(p) = m$, $\gamma = n - m > 1$

Цель управления

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |y(t) - y_m(t)| < \delta. \quad (1.10)$$

1. Метод решения

Объекты с запаздыванием по состоянию



Фильтры:

$$\dot{V}_1(t) = F_1 V_1(t) + b_0 v(t), \quad \dot{V}_2(t) = F_2 V_2(t) + b_0 y(t), \quad (1.11)$$

$$V_3(t) = V_1(t - \tau), \quad \dot{V}_4(t) = F_3 V_4(t) + b_0 r(t), \quad g(t) = L V_4(t)$$

F_1, F_2, F_3 – в форме Фробениуса с характеристическими многочленами $R_m(s)$,

$$T(s)R_m(s) \text{ и } T(s), \quad w = [V_1^T, V_2^T, y, V_3^T, y(t - \tau), g]^T$$

Закон управления

$$u(t) = T(p)\bar{v}(t), \quad v(t) = c^T(t)w(t) \quad (1.12)$$

Наблюдатель:

$$\dot{\xi}(t) = G_0 \xi(t) + D_0(\bar{v}(t) - v(t)), \quad \bar{v}(t) = L \xi(t), \quad \xi(t) \in \mathbb{R}^{r-1} \quad (1.13)$$

Алгоритм адаптации

$$\dot{c}(t) = -\alpha e(t)w(t) - \beta e^2(t)c(t), \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0 \quad (1.14)$$

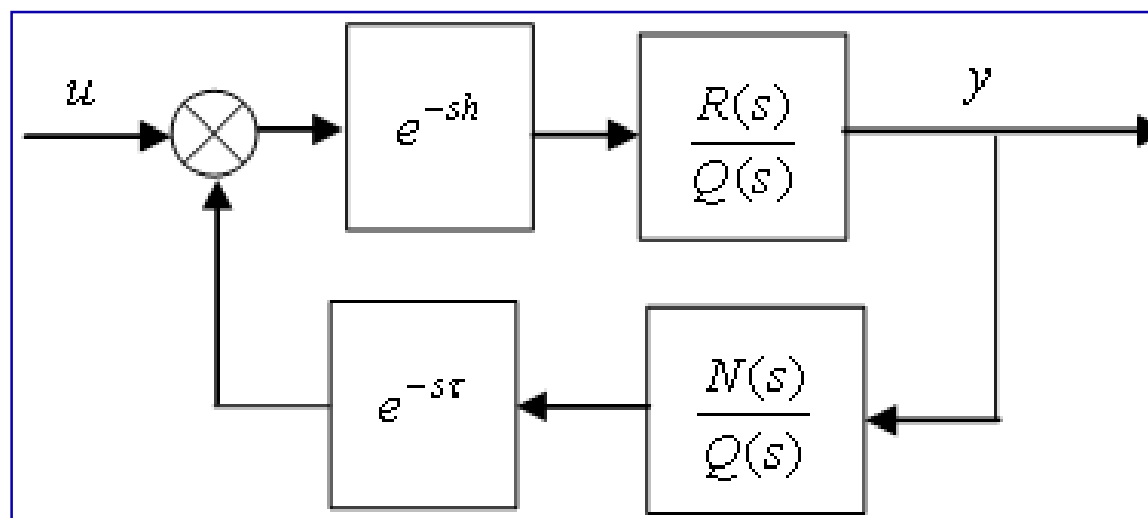
• Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Синтез систем адаптивного управления объектами нейтрального типа с запаздыванием // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2005. №1. С. 7-13.

• Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Модифицированный алгоритм адаптации высокого порядка для систем с запаздыванием по состоянию // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2006. №1. С. 24-33.

• Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Алгоритм адаптивного управления по выходу на основе модифицированной параметризации уравнения объекта // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 8. С. 2-7.

1. Постановка задачи

Объекты с запаздыванием по состоянию и управлению



Объект с запаздыванием по состоянию и управлению

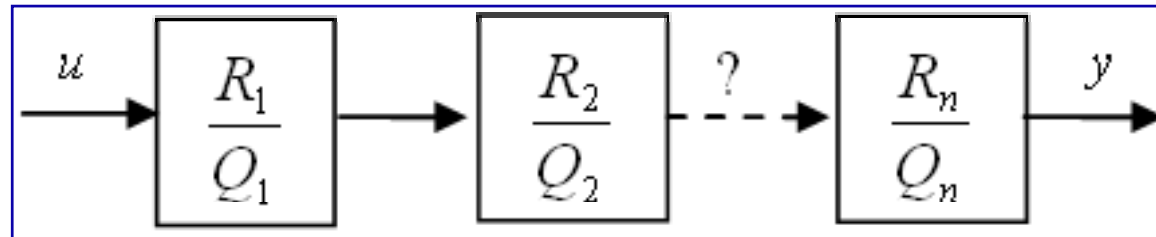
$$Q(p, \mathcal{D})y(t) + N(p, \mathcal{D})y(t - \tau) = k(\mathcal{D})R(p, \mathcal{D})u(t - h) \quad (1.15)$$

$$p^i y(0) = y_{i0}, i = 0, \dots, n - 1$$

Выполнены предположения ПА, П1 и известно τ

1. Постановка задачи

Структурно неопределенные объекты



Объект $Q(p, \mathcal{G})y(t) = k(\mathcal{G})R(p, \mathcal{G})(\sigma(y)u(t) + \Psi(y, y(t-\tau))\zeta(\mathcal{G})) \quad (1.16)$

Предположения ПЗ

1. ПА

2. Известны $\bar{n} \geq \deg Q(p)$, $\bar{\gamma} \geq \gamma$; $\deg Q_m(p) = \bar{n}$, $\deg R_m(p) = \bar{n} - \bar{\gamma}$

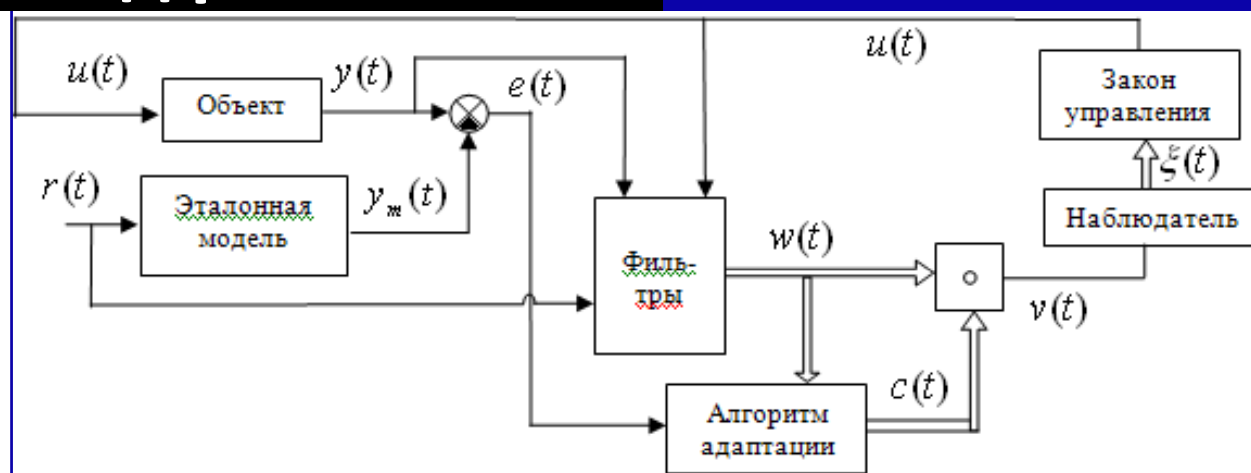
3. ζ — неизвестный. Элементы $\Psi(y, y(t-\tau))\zeta \in \mathfrak{R}$ известны, удовлетворяют глобальному условию Липшица и являются гладкими функциями. $\sigma(y) > 0$ - известна $\forall y(t) \in \mathfrak{R}$

Целью управления

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |y(t) - y_m(t)| < \delta$$

1. Метод решения

Структурно неопределенные объекты



Фильтры

$$\dot{V}_y = F_1 V_y + b y, \quad \dot{V}_u = F_1 V_u + b u, \quad (1.17)$$

$$\dot{V}_\Psi = F_1 V_\Psi + b \Psi, \quad \dot{V}_r = F_2 V_r + b r, \quad v_r = L V_r.$$

F_1, F_2 – матрицы в форме Фробениуса с характеристическими многочленами $R_m(s)T(s)$ и $T(s)$, $\deg T(p) = \bar{\gamma}$, полином $T(s)$ – гурвицев.

Закон управления	$u(t) = T(p)\bar{v}(t), \quad v(t) = c^T(t)w(t)$	(1.18)
-------------------------	--	--------

Наблюдатель	$\dot{\xi}(t) = G_0 \xi(t) + D_0 (\bar{v}(t) - v(t)), \quad \bar{v}(t) = L \xi(t), \quad \xi(t) \in \mathbb{R}^{\bar{\gamma}}$	(1.19)
--------------------	--	--------

Алгоритма адаптации	$\dot{c}(t) = -\frac{\alpha}{1 + w^T(t)w(t)} w(t)e(t), \quad \alpha > 0$	(1.20)
----------------------------	--	--------

- Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектами с неопределенностью знака коэффициента передачи // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2009. – № 5. – С. 21-26.
- Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектами с неизвестной относительной степенью // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 109-118.

План выступления

1. Системы адаптивного управления

2. Системы робастного управления

- *Модифицированный обратный обход интегратора*
- *Метод вспомогательного контура*
- *Упрощенная система управления*
- *Пример*

3. Системы робастно-субоптимального управления

4. Системы управления многосвязными объектами

5. Системы управления сетевыми объектами

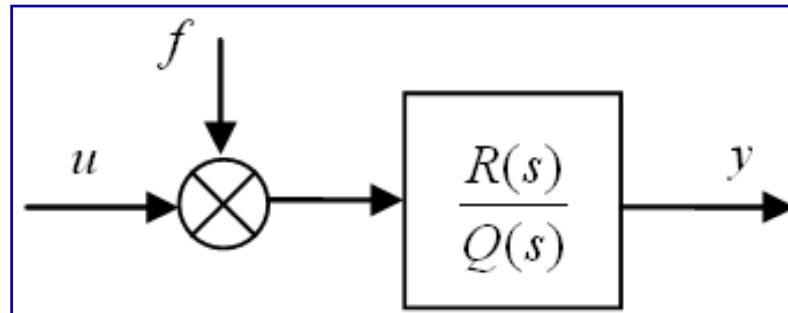
6. Управление в химическом машиностроении

7. Управление в энергетических сетях

8. Результаты работы

2. Постановка задачи

Модифицированный обратный обход интегратора



Объект

$$\begin{aligned} Q(p)y(t) &= R(p)[u(t) + f(t)], \\ p^i y(0) &= y_{0i}, i = 0, 1, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Предположения ПР

1. ПА

2. $f(t)$ - неконтролируемое внешнее ограниченное возмущение

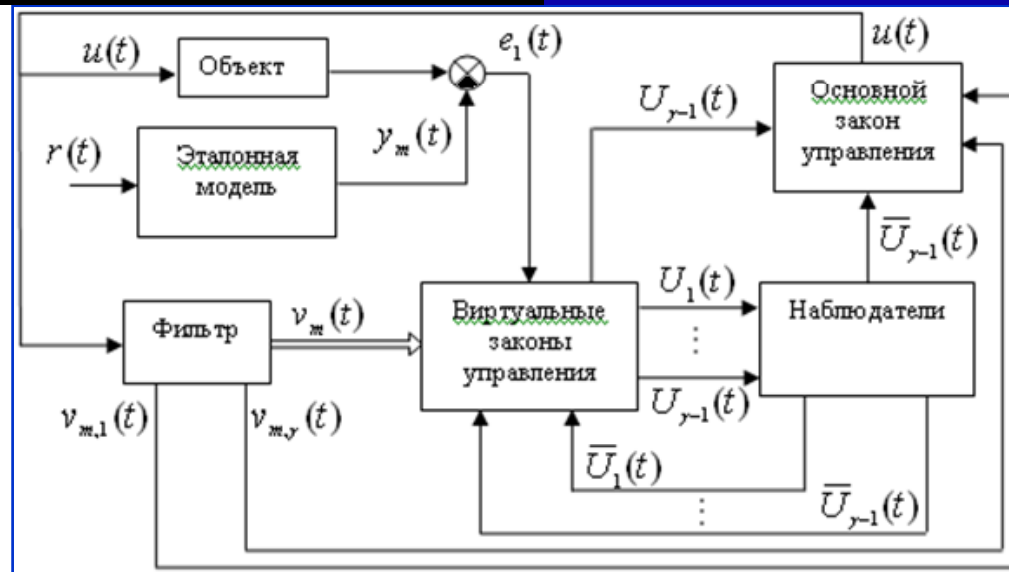
Предположение П4

3. Известны $\deg Q(p) = n$, $\deg R(p) = m$, $\gamma = n - m > 1$

Цель управления $|y(t) - y_m(t)| < \delta$ при $t > T$ (2.2)

2. Метод решения

Модифицированный обратный обход интегратора



Фильтр

$$\dot{v}_m(t) = A_0 v_m(t) + e_{n-m} u(t) \quad (2.3)$$

A_0 – гурвицева, $e_{n-m} = [0, \dots, 0, 1]^T$

Виртуальные законы управления $U_i(t)$

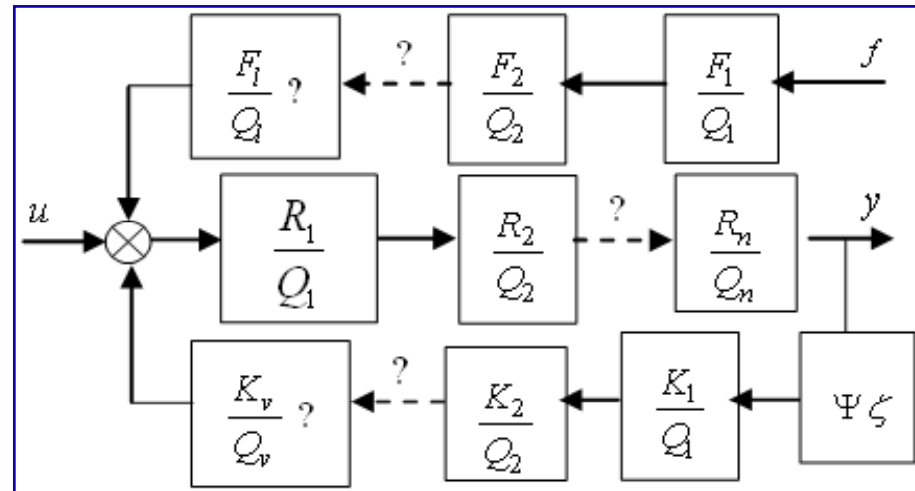
$$U_1(t) = -c_1 \mu^{-1} e_1(t) + k_1 v_{m,1}, \quad U_i(t) = -c_i e_i(t) + k_i v_{m,i} + \bar{U}_{i-1}(t), \quad i = 2, 3, \dots, \gamma \quad (2.4)$$

$e_1 = y - y_m$, $e_i = v_{m,i} - U_{i-1}$, $v_{m,i}$ – i -я компонента вектора v_m , $\mu > 0$ и $c_i > 0$

Основной закон управления
$$u(t) = -c_\gamma e_\gamma(t) + k_\gamma v_{m,\gamma} + \bar{U}_{\gamma-1}(t), \quad i = 2, 3, \dots, \gamma \quad (2.5)$$

Наблюдатели
$$\dot{\bar{U}}_{i-1}(t) = -\mu^{-1} \bar{U}_{i-1}(t) + \mu^{-1} \dot{U}_{i-1}(t) \quad (2.6)$$

- Фуртат И.Б. Модифицированный алгоритм обратного обхода интегратора // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 10. – С. 2–7.
- Паршева Е.А., Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное и робастное управление. Децентрализованные системы. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 328 с.



Объект

$$Q(p, t, \vartheta)y(t) = R(p, t, \vartheta)\sigma(y, t)u(t) + F(p, t, \vartheta)f(t) + K(p, t, \vartheta)\Psi(y, y(t - \tau(t)), t, \vartheta)\zeta(t, \vartheta), \quad p^i y(0) = y_i, \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (2.7)$$

Предположения П5

1. ПР

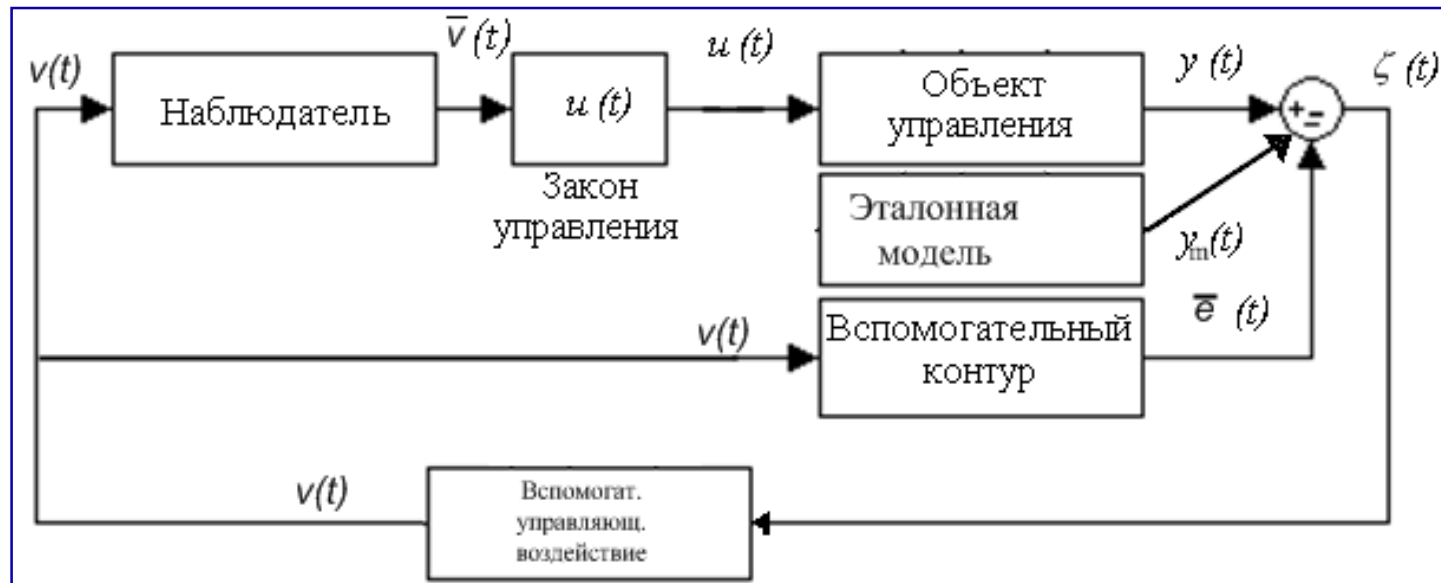
1. Порядки операторов **могут изменяться произвольным образом**

2. Известна $\bar{\gamma} \geq \gamma$

3. $\sigma(y, t) > 0$ – известна, $\Psi(y, y(t - \tau(t)), t)$ – неизвестная функция, элементы которой удовлетворяют глобальному условию Липшица по $y(t)$, $y(t - \tau(t))$ и ограниченными по t , $\tau(t) > 0$ – неизвестно, $p\tau(t) < 1$, $\zeta(t)$ – неизвестный вектор

2. Метод решения

Метод вспомогательного контура



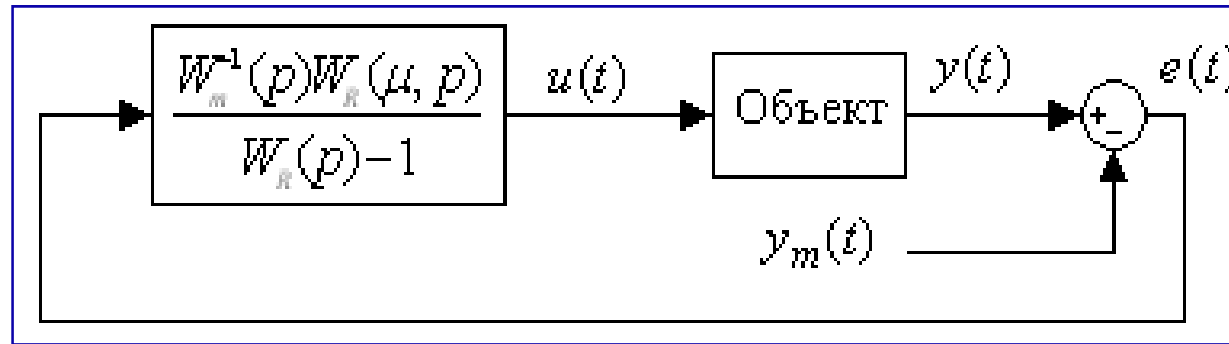
Вспомогательный контур $Q_m(p)\bar{e}(t) = \beta T(p)v(t)$ (2.8)

$\beta > 0$, $\deg T(p) = \bar{\gamma}$, $T(s)$ – гурвицев

Управление $u(t) = \alpha T(p)\bar{v}(t)$, $v(t) = -\beta^{-1}Q_m(p)T^{-1}(p)\zeta(t)$ (2.9)

$\zeta(t) = e(t) - \bar{e}(t)$, $\alpha > 0$

Наблюдатель $\dot{\xi}(t) = G_0\xi(t) + D_0(\bar{v}(t) - v(t))$, $\bar{v}(t) = L\xi(t)$, $\xi(t) \in \mathbb{R}^{\bar{\gamma}}$ (2.10)



Закон управления $(Q_R(\mu, p) - 1)u(t) = -Q_m(p)e(t), \quad (2.11)$

$Q_R(\mu, s)$ – гурвицев оператор порядка $\bar{\gamma}$, $\lim_{\mu \rightarrow 0} Q_R(\mu, p) = 1$.

- Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Робастное управление нестационарными нелинейными структурно неопределенными объектами // Проблемы управления. – 2008. – № 5. – С. 2-7.
- Фуртат И. Б., Цыкунов А. М. Робастное управление нестационарными объектами с неизвестной переменной относительной степенью // Управление большими системами. Выпуск 33. – 2011. – С.91-112.
- Фуртат И.Б. Алгоритм субинвариантного управления по выходу линейным структурно неопределенным динамическим объектом // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2011. – № 9. – С. 22-27.
- Фуртат И.Б. Робастное управление нелинейными структурно неопределенными объектами с запаздыванием по состоянию // Материалы 5-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление». – СПб, – 2008. – С. 121-124.

2. Постановка задачи

Безредукторный прецизионный электропривод оси оптического телескопа



Модель БПЭООТ

$$p(p + q_1)(p + q_2)\alpha(t) = b_0(u_y(t) + f(t)) \quad (2.12)$$

$\alpha(t)$ – угол поворота ротора (и закрепленной на нем механической нагрузки)

$u_y(t)$ – безразмерная величина, соответствующая отношению напряжения, приложенного к объекту, к напряжению источника

$f(t)$ – отражает влияние момента сопротивления вращению ротора с механической нагрузкой

Класс неопределенности Ξ $q_1 \in [-0,8; -5]$, $q_2 \in [-150; -1000]$, $b_0 \in [5250; 10^6]$.

Эталонный сигнал

$$\alpha_m(t) = \begin{cases} at^2, & t < 1, \\ at, & t \geq 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

Целевое условие

$$|\alpha(t) - \alpha_m(t)| < \delta \text{ при } t > T \quad (2.14)$$

2. Метод решения

Безредукторный прецизионный электропривод оси оптического телескопа

Вспомогательный контур

$$(p + 1000)(p + 10)^2 \bar{e}(t) = 551250 u_y(t) \quad (2.15)$$

Наблюдатель

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1(t) &= -\xi_2(t) - 15 \cdot 110 (\xi_1(t) - \zeta(t)), \\ \dot{\xi}_2(t) &= -\xi_3(t) - 75 \cdot 110^2 (\xi_1(t) - \zeta(t)), \\ \dot{\xi}_3(t) &= -125 \cdot 110^3 (\xi_1(t) - \zeta(t)) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Закон управления

$$u_y(t) = 551250^{-1} \cdot \left[\dot{\xi}_3(t) + 1020 \xi_3(t) + 20100 \xi_2(t) + 100000 \xi_1(t) \right] \quad (2.17)$$

Ограничения на сигнал управления

$$|u_y(t)| \leq 1 \quad (2.18)$$

- Арановский С. В., Фуртат И.Б. Робастное управление безредукторным прецизионным электроприводом оси оптического телескопа с компенсацией возмущений // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 9. – С. 8-13.

Результаты моделирования

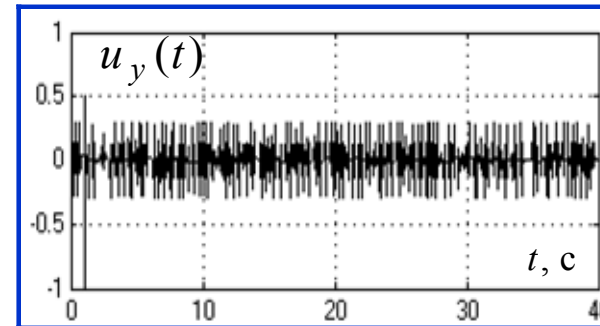
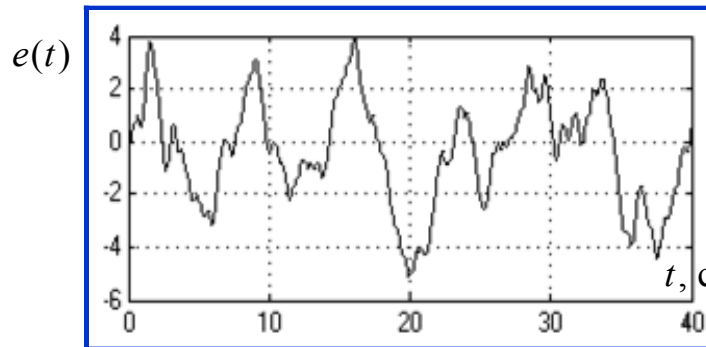
$$p(p + 490)(p + 0,8)\alpha(t) = 47040(u_y(t) + f(t))$$

$$f(t) = \begin{cases} f_{wn}(t) + 0,1 \sin t + P(t), & \text{если } |f(t)| < 0,15, \\ 0,15, & \text{если } |f(t)| \geq 0,15, \end{cases}$$

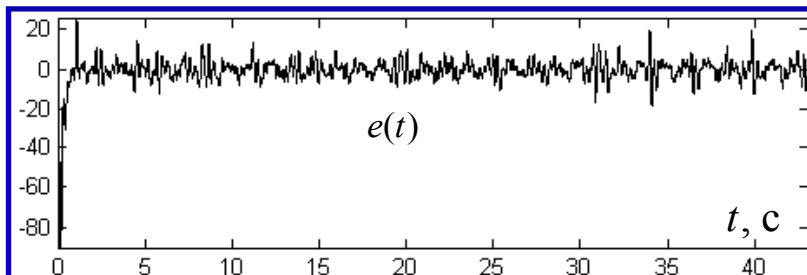
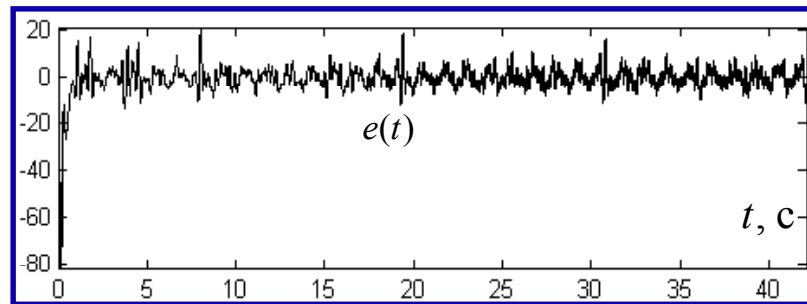
$f_{wn}(t)$ – белый шум, $P(t)$ – генератор

импульсов с амплитудой 0,1, периодом 1 с и длительностью импульса 0,5 с.

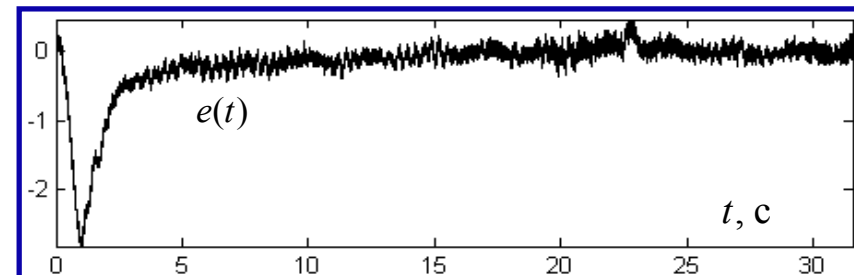
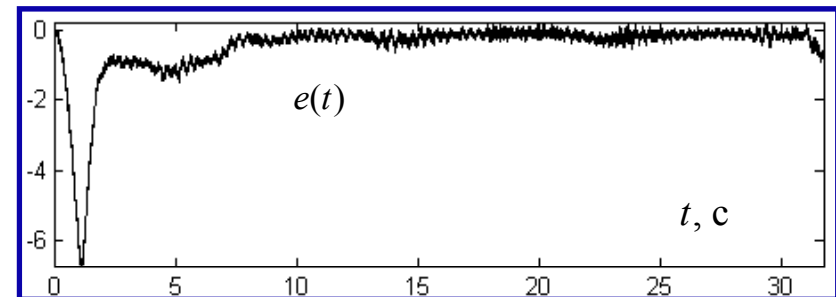
угловые секунды



Результаты эксперимента

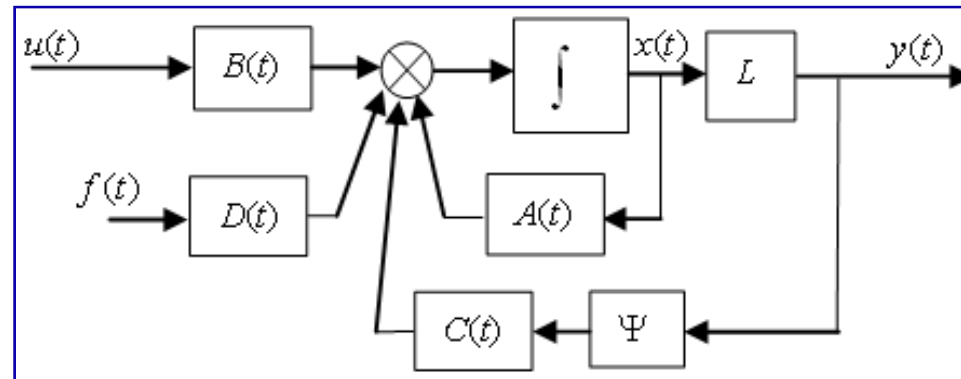


угловые секунды



План выступления

1. Системы адаптивного управления
2. Системы робастного управления
- 3. Системы робастно-субоптимального управления**
 - **робастно-субоптимальная стабилизация**
 - **робастно-субоптимальное слежение**
4. Системы управления многосвязными объектами
5. Системы управления сетевыми объектами
6. Управление в химическом машиностроении
7. Управление в энергетических сетях
8. Результаты работы



Объект

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t, \mathcal{G})x(t) + C(t, \mathcal{G})\Psi(y, y(t - \tau(t)), \mathcal{G}) + B(t, \mathcal{G})u(t) + D(t, \mathcal{G})f(t), \\ y(t) &= Lx(t), \quad x(0) = x_0, \end{aligned} \quad (3.1)$$

Предположения ПРС

1. ПР

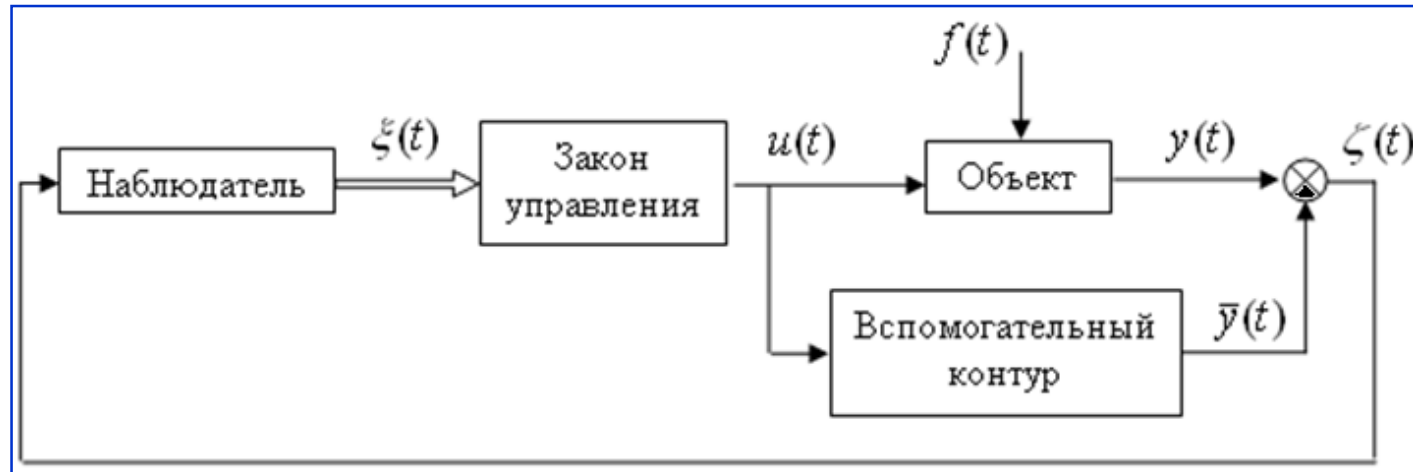
2. $A(t) = A_N + B_N c^T(t)$, $B(t) = B_N + B_N \pi(t)$, $C(t) = B_N \theta(t)$, $D(t) = B_N k(t)$, где $A_N \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_N \in \mathbb{R}^n$ – известные номинальные матрицы, $c(t) \in \mathbb{R}^n$, $\pi(t) \in \mathbb{R}$, $\theta(t) \in \mathbb{R}$, $k(t) \in \mathbb{R}$ – неизвестны.

3. Известны размерности матриц объекта (3.1)

Цель управления – переход (3.1) из $y(0)$ в $y(t_f)$ и субминимизация интегрального

функционала качества

$$J = \int_0^{t_f} (\tilde{q}y^2(t) + \tilde{r}u_0^2(t))dt \quad (3.2)$$



Вспомогательный контур

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) = & A_0(t)\bar{x}(t) + B_N \tilde{r}^{-1} B_N^T \left(z_{21}(t) + z_{22}(t) z_{12}^{-1}(t) z_{11}(t) \right) \bar{x}(t_f) + \\ & + \beta B_N u(t), \quad \bar{y}(t) = L \bar{x}(t), \quad \bar{x}(0) = x_0, \end{aligned} \quad (3.3)$$

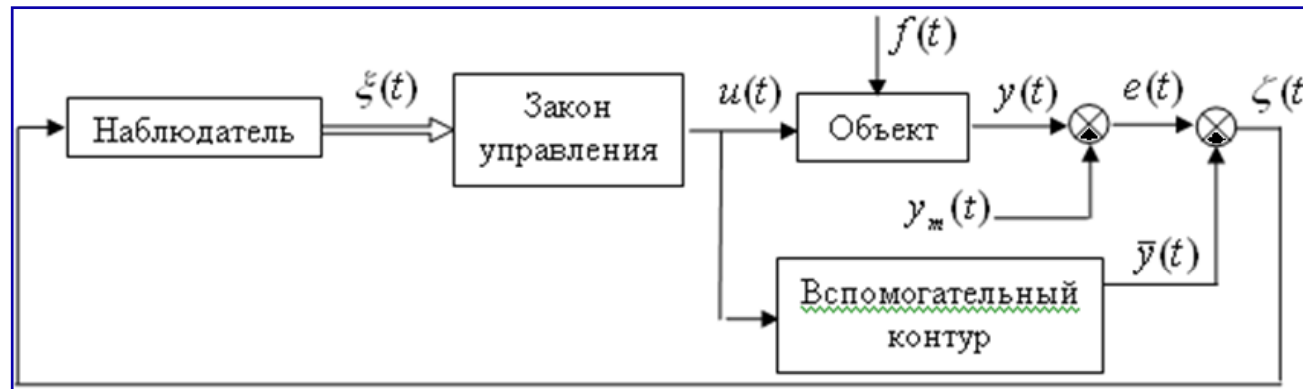
$$\begin{aligned} \beta > 0, \quad A_0 = & A_N + \tilde{r}^{-1} B_N B_N^T z_{22} z_{12}^{-1}, \quad z = \begin{bmatrix} x^T, \psi^T \end{bmatrix}^T, \quad \dot{\psi} = \tilde{Q}x - A_N^T \psi, \quad \dot{z} = Dz, \\ D = & \begin{bmatrix} A_N & \tilde{r}^{-1} B_N B_N^T \\ \tilde{Q} & -A_N^T \end{bmatrix}, \quad \tilde{Q} = \tilde{q} \text{diag}\{1, 0, \dots, 0\}, \quad z(t) = Z(\tau)z(t_f), \quad Z(\tau) = e^{D\tau} = (z_{ij}(\tau)), \\ & i, j = 1, 2, \quad \tau = t - t_f. \end{aligned}$$

Закон управления

$$u(t) = -\beta^{-1} R_m^{-1}(p) Q_0(p, t) \bar{\zeta}(t), \quad \zeta(t) = y(t) - \bar{y}(t) \quad (3.4)$$

Наблюдатель

$$\dot{\xi}(t) = G_0 \xi(t) + D_0 (\bar{\zeta}(t) - \zeta(t)), \quad \bar{\zeta}(t) = L \xi(t), \quad \xi(t) \in \mathbb{R}^n \quad (3.5)$$



Цель управления – переход из $y(0) - y_m(0)$ в $y(t_f) - y_m(t_f)$ и субминимизация функционала

$$J = \int_0^{t_f} (\tilde{q}[y(t) - y_m(t)]^2 + \tilde{r}u_0^2(t)) dt \quad (3.6)$$

Вспомогательный контур

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\zeta}}(t) &= A_0(t)\bar{\zeta}(t) + B_N \tilde{r}^{-1} B_N^T (z_{21}(t) + z_{22}(t)z_{12}^{-1}(t)z_{11}(t))\bar{\zeta}(t_f) + \\ &+ \beta B_N u(t), \quad \bar{e}(t) = L\bar{\zeta}(t), \quad \bar{\zeta}(0) = x_0 - L^T y_m(0), \\ \zeta(t) &= x(t) - L^T y_m(t) \end{aligned} \quad (3.8)$$

- Галяув Е.Р., Фуртат И.Б. Робастное субоптимальное управление линейными объектами // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – №1. – С. 130-136.
- Фуртат И.Б. Робастное субоптимальное управление линейными нестационарными объектами по выходу // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 7. – С. 7-12.
- Галяув Е.Р., Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Робастно-оптимальное управление параметрически и функционально неопределенными линейными объектами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 2. – С. 22-25.
- Галяув Е.Р., Фуртат И.Б. Робастное субоптимальное управление линейными объектами по выходу // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010. – № 8. – С. 24-31.
- Галяув Е.Р., Фуртат И.Б. Робастное субоптимальное управление линейными объектами по выходу с запаздыванием по состоянию // Проблемы управления, передачи и обработки информации – АТМ – ТКИ – 50: сб. трудов Международной научной конференции. Саратов. – 2009. – С. 35-39.

План выступления

1. Системы адаптивного управления
2. Системы робастного управления
3. Системы робастно-субоптимального управления
- 4. *Системы управления многосвязными объектами***
 - *Адаптивное управление*
 - *Робастное управление*
 - *Робастно-субоптимальное управление*
5. Системы управления сетевыми объектами
6. Управление в химическом машиностроении
7. Управление в энергетических сетях
8. Результаты работы

4. Системы управления многосвязными объектами

Адаптивное управление
Робастное управление
Робастно-субоптимальное управление

- Паршева Е.А., Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное и робастное управление. Децентрализованные системы. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 328 с.
- Фуртат И.Б. Децентрализованное субоптимальное управление по быстродействию нелинейными многосвязными объектами // Актуальные вопросы современной науки и образования: Материалы Общероссийской электронной научной конференции. Сентябрь, 2010. Красноярск: Научно-инновационный центр. – 494 С. – С. 341-348.
- Фуртат И.Б. Фуртат Е.А. Децентрализованное управление многосвязными объектами на базе модифицированного алгоритма обратного обхода интегратора // Актуальные вопросы современной науки и образования: Материалы Общероссийской электронной научной конференции. Сентябрь, 2010. Красноярск: Научно-инновационный центр. – 494 С. – С. 348-356.
- Фуртат И.Б. Субоптимальное децентрализованное управление сетевыми и многосвязными объектами // Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление» – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроника», – 2010. – С. 416-419.
- Фуртат И.Б. Квазиоптимальное децентрализованное управление многосвязными объектами с запаздыванием по состоянию // Гироскопия и навигация, № 62 (69), – 2010. – С. 90.
- Фуртат И.Б. Квазиоптимальное децентрализованное управление многосвязными объектами с запаздыванием по состоянию // Материалы докладов 12 конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», – 2010. – С. 275-282.
-//-//-//-/-
- РФФИ № 09-08-00237-а «Адаптивное и робастное децентрализованное управление по выходу многосвязными объектами», 2009-2011.

План выступления

1. Системы адаптивного управления
2. Системы робастного управления
3. Системы робастно-субоптимального управления
4. Системы управления многосвязными объектами
- 5. Системы управления сетевыми объектами**
 - *Адаптивное управление*
 - *Робастное управление*
 - *Робастно-субоптимальное управление*
6. Управление в химических технологиях
7. Управление в энергетических сетях
8. Результаты работы

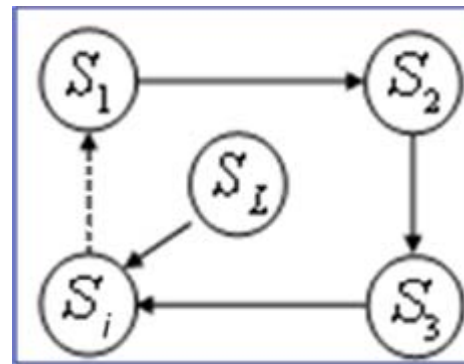
5. Постановка задачи

Адаптивное управление

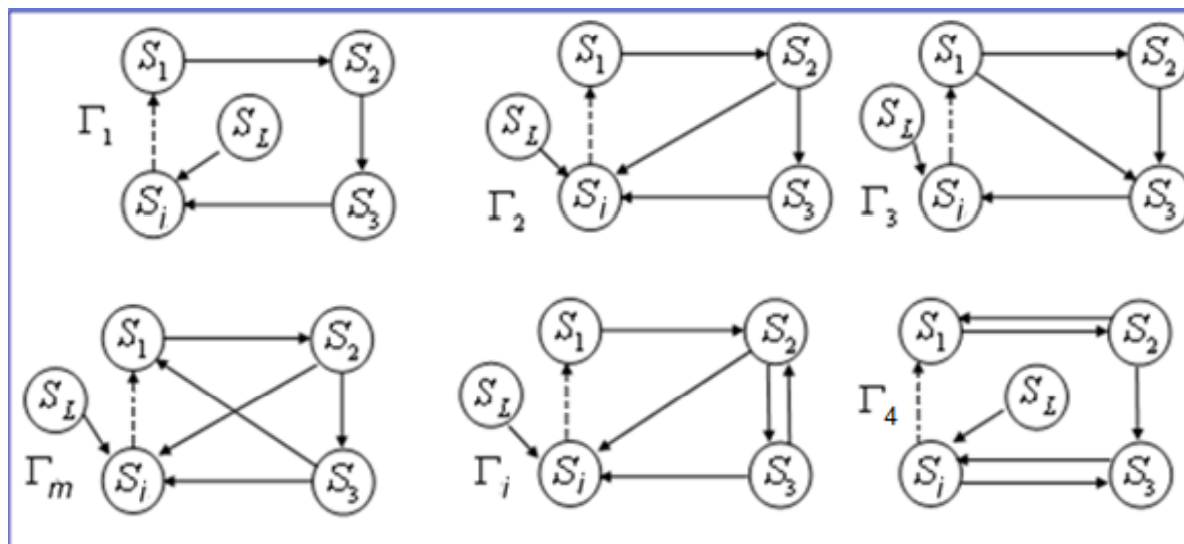
Робастное управление

Робастно-субоптимальное управление

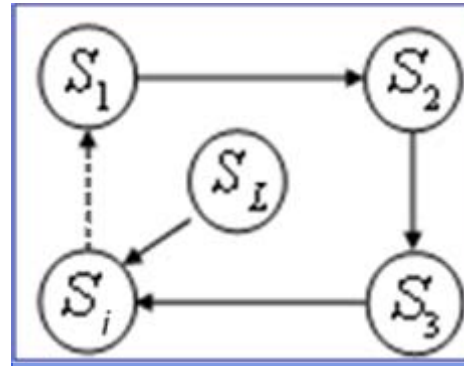
1. Орграф с постоянной структурой



2. Орграф с переменной структурой



Орграф(ы) Γ (Γ_l) содержит(ат) *ориентированное остовное дерево*, в корне которого находится ведущая подсистема S_L .



Подсистема S_i (i -я вершина Γ)

$$Q_i(p, \mathcal{G})y_i(t) = k_i(\mathcal{G})R_i(p, \mathcal{G})u_i(t) + K_i(p, \mathcal{G})\Psi_i(y_i(t), y_i(t - \tau_i)), \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (5.1)$$

Ведущая подсистема S_L (L -я вершина Γ)

$$Q_L(p)y_L(t) = k_L r(t). \quad (5.2)$$

Предположения П6

1. ПА для каждой локальной подсистемы

2. Известны $\bar{n} \geq \max_{i=1, \dots, k} \{n_i\}$ и $\bar{\gamma} \geq \max_{i=1, \dots, k} \{n_i - m_i\}$, $\deg Q_i(p) = n$, $\deg R_i(p) = m$,

$$\gamma_i = n_i - m_i \geq 1$$

Цель управления

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |y_i(t) - y_L(t)| < \varepsilon, \quad (5.3)$$

5. Метод решения. Основной результат

Адаптивное управление

Закон управления
$$u_i(t) = (c_{ij} + s_{iL})^{-1} T(p) \bar{v}_i(t), \quad v_i(t) = c_i^T(t) w_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (5.4)$$
$$\deg T(p) = \bar{\gamma}, \quad T(s) - \text{гурвицев},$$

$$w_i(t) = \left[(c_{ij} + s_{iL}) V_{ui}^T(t), (c_{ij} + s_{iL}) V_{yi}^T(t), c_{ij} y_i(t), c_{ij} \frac{Q_L(p)}{T(p)} y_j(t), s_{iL} \frac{1}{T(p)} r(t), (c_{ij} + s_{iL}) V_{\Psi i}^T(t) \right]^T$$

Фильтры
$$\dot{V}_{vi}(t) = F_1 V_{vi}(t) + b v_i(t), \quad \dot{V}_{yi}(t) = F_2 V_{yi}(t) + b y_i(t), \quad (5.5)$$
$$\dot{V}_{\Psi i}(t) = F V_{\Psi i}(t) + b \Psi_i(y_i(t), y_i(t - \tau_i))$$

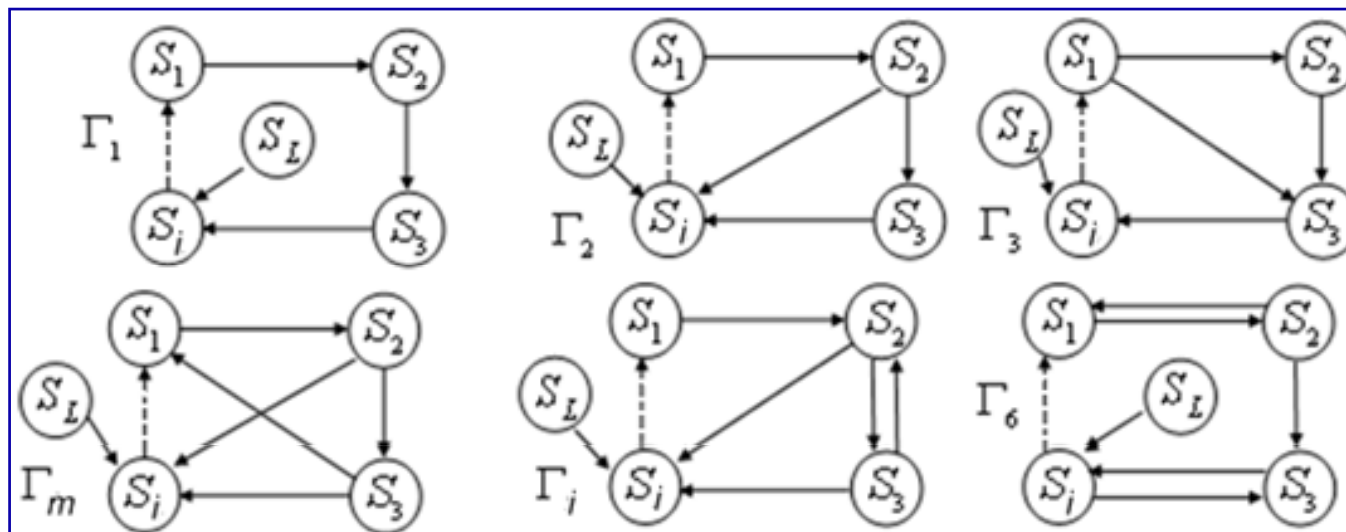
F_1, F_2, F_3 – в форме Фробениуса с характеристическими полиномами $R_m(s)$, $T(s)R_m(s)$ и $T(s)$

Наблюдатель
$$\dot{\xi}_i(t) = G_0 \xi_i(t) + D_0 (\bar{v}_i(t) - v_i(t)), \quad \bar{v}_i(t) = L \xi_i(t), \quad \xi_i(t) \in \mathbb{R}^{\bar{\gamma}}; \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (5.6)$$

Алгоритмы адаптации
$$\dot{c}_i(t) = - \frac{\alpha_i}{1 + w_i^T(t) w_i(t)} w_i(t) e_i(t), \quad \alpha_i > 0, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (5.7)$$

Утверждение. Пусть выполнены условия предположений П5. Тогда при $\mu \leq \mu_0$ система управления, состоящая из закона управления, фильтров, наблюдателя и алгоритмов адаптации обеспечивает выполнение целевого условия и ограниченность всех сигналов в замкнутой системе.

- Паршева Е.А., Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное и робастное управление. Децентрализованные системы. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 328 с.
-//-/-/-/-/-/-
- Контракт «Разработка новых методов управления неопределенными динамическими сетями с постоянной и переключающейся структурой»
- Грант РФФИ «Научная работа Фуртата Игоря Борисовича из Астраханского технического университета, г. Астрахань, в Институте проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург».
- Контракт «Разработка алгоритмов управления динамическими сетями с учетом постоянного запаздывания»



Подсистема S_i (i -я вершина Γ_l)

$$Q_i(p, t)y_i(t) = k_i R_i(p, t)u_i(t) + D_i(p, t)f_i(t) + K_i(p, t)\Psi_i(y_i(t), y_i(t - \tau_i(t)), t)h_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (5.8)$$

Предположения П5

1. Предположения ПР для каждой локальной подсистемы
2. Известна $\bar{\gamma} \geq \max_{i=1, \dots, k} \{n_i - m_i\}$

Цель управления

$$|y_i(t) - y_L(t)| < \varepsilon \quad \text{при } t > T \quad (5.9)$$

5. Метод решения. Основной результат

Робастное управление

$$\text{Вспомогательный контур} \quad Q_L(p)\bar{e}_i(t) = \alpha u_i(t) \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} \text{Закон управления} \quad u_i(t) &= -\alpha^{-1} Q_L(p) \bar{\zeta}_i(t), \\ \zeta_i &= e - \bar{e}, \quad e = \sum_{j \in N_{jL}} c_{ij} (y_i - y_j) + s_{iL} (y_i - y_L); \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\text{Наблюдатель} \quad \dot{\xi}_i(t) = G_0 \xi_i(t) + D_0 (\bar{\zeta}_i(t) - \zeta_i(t)), \quad \bar{\zeta}_i(t) = L \xi_i(t), \quad \xi_i(t) \in R^r, \quad (5.12)$$

Утверждение. Пусть выполнены условия предположений П5. Тогда при

$$\mu_0 \leq \min \left\{ \gamma^{-1} \sqrt{\frac{\min_{l=1, \dots, m} \lambda_2(L(\Gamma_l)) \|Q_1\|}{8(k-1) \|P_1 \bar{b} g^T\|^2}}, \frac{\|Q_2\|}{\|P_2 b\|^2} \right\}, \quad A^T P_1 + P_1 A = -Q_1, \quad G^T P_2 + P_2 G = -Q_2,$$

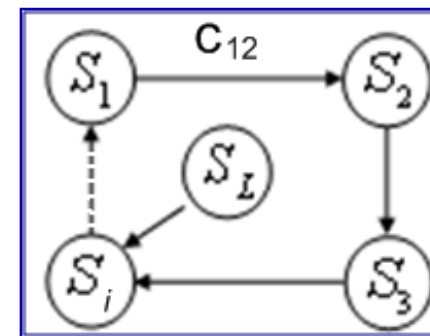
$$Q_i = Q_i^T > 0, \quad P_i = P_i^T > 0$$

система управления, состоящая из вспомогательного контура, закона управления и наблюдателя обеспечивает выполнение целевого условия и ограниченность всех сигналов в замкнутой системе.

- Паршева Е.А., Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное и робастное управление. Децентрализованные системы. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 328 с.
- Фуртат И.Б. Консенсусное управление линейной динамической сетью по выходу с компенсацией возмущений // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 4. – С. 12-18.
- Фуртат И.Б. Робастная синхронизация динамической сети с переключающейся структурой // Информационно-управляющие системы. – 2011. – № 5. – С. 23-30.
- Фуртат И.Б. Робастная синхронизация динамической сети с компенсацией возмущений // Автоматика и телемеханика. – 2011. – №12. – С.104-114.
- Контракт «Разработка новых методов управления неопределенными динамическими сетями с постоянной и переключающейся структурой» (РГУ нефти и газа им. М.А. Губкина).
- Грант РФФИ «Научная работа Фуртата Игоря Борисовича из Астраханского технического университета, г. Астрахань, в Институте проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург».
- Контракт «Разработка алгоритмов управления динамическими сетями с учетом постоянного запаздывания» (ИПМаш РАН).

5. Постановка задачи

Робастно-субоптимальное управление



Подсистема S_i (i -я вершина орграфа Γ)

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) = & A_i(t, \mathcal{G})x_i(t) + B_i(t, \mathcal{G})u_i(t) + D_i(t, \mathcal{G})f_i(t) + \\ & + F_i(t, \mathcal{G})\Psi(y_i(t), y_i(t - \tau_i(t)), t, \mathcal{G}), \quad x_i(0) = x_{0i}, \quad i = \overline{1, k}, \end{aligned} \quad (5.13)$$

Предположения Пб

Предположения ПРС

Ведущая подсистема S_L (L -я вершина орграфа Γ)

$$\dot{x}_L(t) = A_L x_L(t) + B_L r(t), \quad y_L(t) = L x_L(t), \quad x_L(0) = x_{0L}, \quad (5.14)$$

Цель управления – переход из $\tilde{y}_i(0)$ в $\tilde{y}_i(t_f)$ и субминимизацию критерия качества

$$\begin{aligned} J = & \int_0^{t_f} \left(\tilde{q} \tilde{y}_i^2(t) + \tilde{r} u_{0i}^2(t) \right) dt, \\ \tilde{x}_i = & \sum_{j \in N_i} \left[c_{ij} (x_i - x_j) + s_{iL} (x_i - x_L) \right], \quad \tilde{y}_i = L \tilde{x}_i. \end{aligned} \quad (5.15)$$

5. Метод решения. Основной результат

Робастно-субоптимальное управление

Вспомогательный контур

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_i(t) = & A_{0i}(t)\bar{x}_i(t) + B_L \tilde{r}^{-1} B_L^T \left(z_{21,i}(t) + z_{22,i}(t) z_{12,i}^{-1}(t) z_{11,i}(t) \right) \tilde{x}_i(t_f) + \\ & + \alpha B_L u_i(t), \quad \bar{y}_i(t) = L \bar{x}_i(t), \quad \bar{x}_i(0) = 0, \quad i = 1, \dots, k \end{aligned} \quad (5.16)$$

Закон управления

$$u_i(t) = -\alpha_i^{-1} \left[\frac{1}{R_L(p)} \left[\bar{Q}_{0i}(p, t) \right] \zeta_i(t) + g_i^T(t) \theta_i(t) \right], \quad i = 1, \dots, k \quad (5.17)$$

Наблюдатель $\dot{\xi}_i(t) = G_0 \xi_i(t) + D_0 (\bar{\zeta}_i(t) - \zeta_i(t))$, $\bar{\zeta}_i(t) = L \xi_i(t)$, $i = 1, \dots, k$, $\xi_i(t) \in \mathbb{R}^n$ (5.18)

Утверждение. Пусть выполнены условия предположений Пб. Тогда при

$$\mu_0 \leq \min \left\{ \gamma^{-1} \sqrt{\frac{\lambda_2(L(\Gamma)) \|Q_1\|}{8(k-1) \|P_1 \bar{b} g^T\|^2}}, \frac{\|Q_2\|}{\|P_2 b\|^2} \right\}, \quad A^T P_1 + P_1 A = -Q_1, \quad G^T P_2 + P_2 G = -Q_2, \quad Q_i = Q_i^T > 0, \\ P_i = P_i^T > 0$$

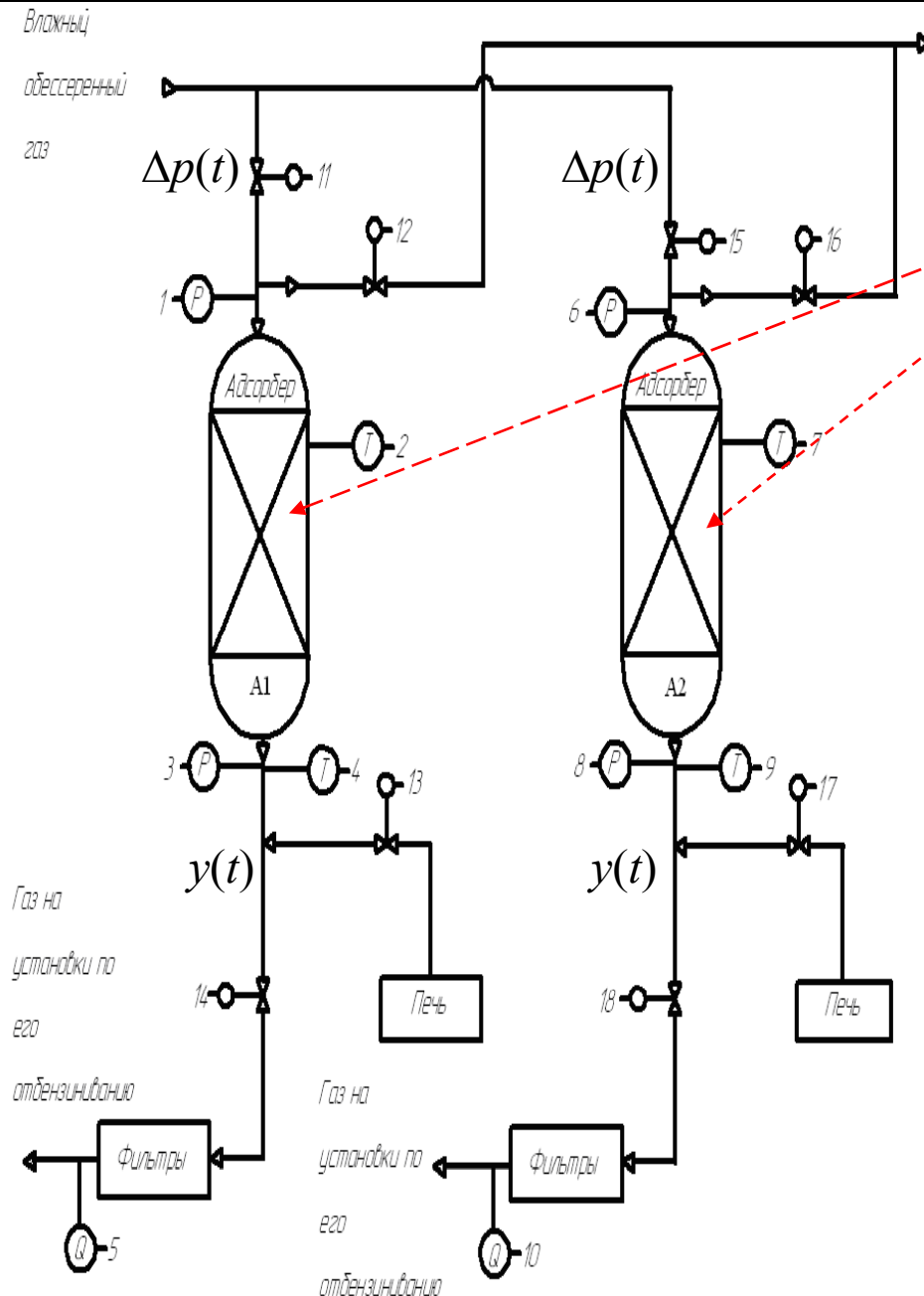
система управления, состоящая из вспомогательного контура, закона управления и наблюдателя обеспечивает выполнение целевого условия и ограниченность всех сигналов в замкнутой системе.

- Паршева Е.А., Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное и робастное управление. Децентрализованные системы. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 328 с.
- Фуртат И.Б. Консенсусное управление линейной динамической сетью по выходу с компенсацией возмущений // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 4. – С. 12-18.
-//-/-/-/-/-/-/-
- Контракт «Разработка новых методов управления неопределенными динамическими сетями с постоянной и переключающейся структурой» (РГУ нефти и газа им. М.А. Губкина)
- Грант РФФИ «Научная работа Фуртата Игоря Борисовича из Астраханского технического университета, г. Астрахань, в Институте проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург».
- Контракт «Разработка алгоритмов управления динамическими сетями с учетом постоянного запаздывания»

План выступления

1. Системы адаптивного управления
2. Системы робастного управления
3. Системы робастно-субоптимального управления
4. Системы управления многосвязными объектами
5. Системы управления сетевыми объектами
- 6. *Управление в химическом машиностроении***
 - *Адаптивное управление адсорбером*
 - *Робастное управление ректификационной колонной*
 - *Робастно-субоптимальное управление ректификационной колонной*
7. Управление в энергетических сетях
8. Результаты работы

6. Постановка задачи



Адаптивное управление адсорбером

Модель адсорбера

$$Q(p)y(t) = k\sqrt{|\Delta p(t - 300)|}$$

$y(t)$ – концентрация жидкости в газе на выходе из адсорбера [ppm (относительное содержание влаги в газе)]

$\Delta p(t)$ — давление на входе в адсорбер [KPa / cm^2]

$$Q(p) = q_3 p^3 + q_2 p^2 + q_1 p + q_0$$

Множество возможных значений Ξ

$$380439872 \leq q_3 \leq 620258112$$

$$1573228 \leq q_7 \leq 1602640$$

$$1963 \leq q_1 \leq 2081, \quad 0,5 \leq q_0 \leq 10$$

$$0,04 \leq k \leq 0,2$$

■ *Фуртат И.Б.* Математическая модель процесса адсорбции // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2008. – №1. – С. 24-30.

6. Метод решения

Адаптивное управление адсорбером

Эталонная модель $(p + 0,0008)^2(p + 0,001)y_m(t) = 0,17r(t)$ (7.1)

Фильтр $\dot{V}(t) = \begin{pmatrix} 0 & I_2 \\ -6,4 \cdot 10^{-10} & -2,24 \cdot 10^{-6} & -2,24 \cdot 10^{-6} \end{pmatrix} V(t) + [0, 0, 1]^T u(t - 300)$ (7.2)

Наблюдатель $\dot{\xi}_1(t) = \xi_2(t) - 2 \cdot 10(\xi_1(t) - v(t)), \quad \dot{\xi}_2(t) = -100(\xi_1(t) - v(t))$ (7.3)

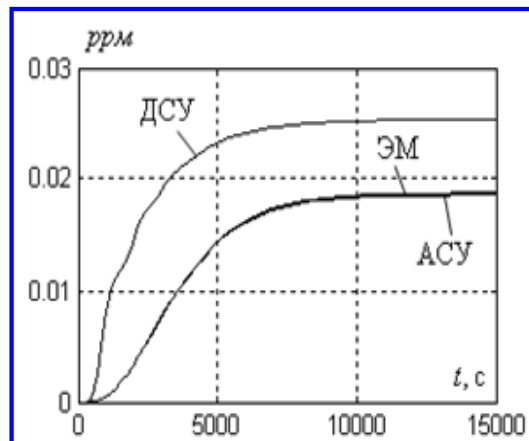
Закон управления $\Delta p(t) = u^2(t) = (\xi_2(t) + 2\xi_2(t) + \xi_1(t))^2, \quad v(t) = c^T(t)\bar{w}(t)$ (7.4)
 $(p + 1)^2 \bar{w}(t) = w(t), \quad w = [V^T, 2,5 \cdot 10^{10} V^T, 0,3]^T$

Алгоритм настройки параметров $\dot{c}(t) = -0,3[y(t) - y_m(t)]\bar{w}(t - 300)$ (7.5)

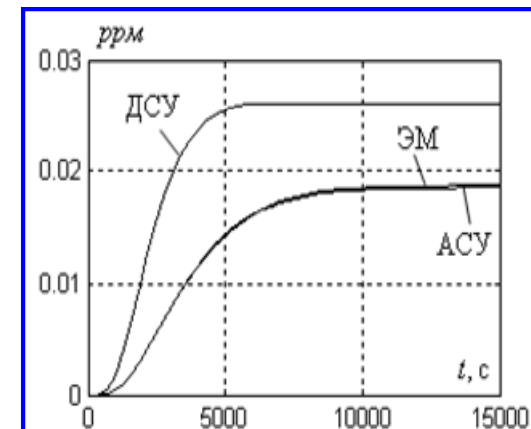
Модель 1. $(619008000p^3 + 1571468,75p^2 + 1955,26p + 1)y(t) = 0,0848\sqrt{|\Delta p(t - 300)|}$

Модель 2. $(380439872p^3 + 1602639,75p^2 + 2080,09p + 1)y(t) = 0,087\sqrt{|\Delta p(t - 300)|}$

Модель 1



Модель 2



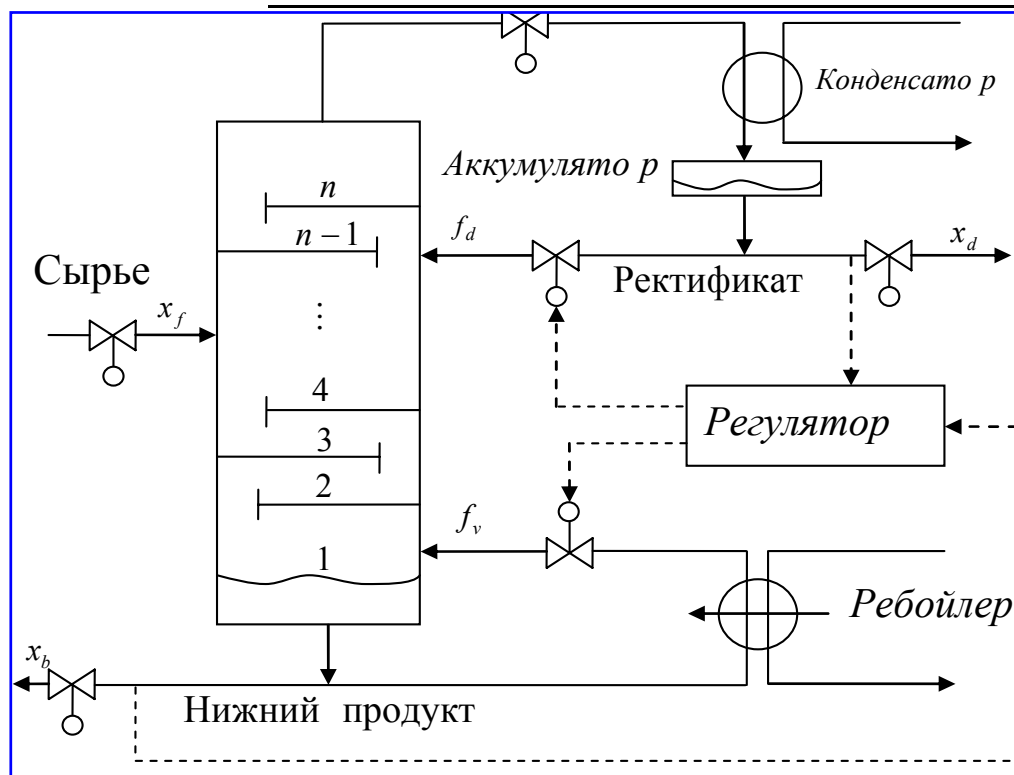
-//-/-/-/-/-/-

- Контракт «Исследование и управление процессом адсорбции» (РГУ нефти и газа им. М.А. Губкина)
- Контракт «Адаптивное управление процессом адсорбции на Астраханском газоперерабатывающем заводе» (РГУ нефти и газа им. М.А. Губкина).

6. Постановка задачи

Робастное управление ректификационной колонной

$$\begin{bmatrix} x_d(t) \\ x_b(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{4500p+1} \begin{pmatrix} 0,878 & -0,864 \\ 1,082 & -1,096 \end{pmatrix} (I + w_I(p)\Delta_I) \begin{bmatrix} f_d(t) \\ f_v(t) \end{bmatrix} + G_d(p)x_f(t)$$



$x_d(t)$ – расход ректификата (моль/с)

$x_b(t)$ – расход нижнего продукта (моль/с)

$f_d(t)$ – обратный расход ректификата (моль/с)

$f_v(t)$ – обратный расход нижнего продукта (моль/с)

$x_f(t)$ – поток исходного сырья (моль/с)

$G(s)$ – номинальная ПФ

$G_d(s)$ – ПФ по подачи исходного сырья

$w_I(s)$ – структурная неопределенность

Δ_I – параметрическую неопределенность

Цель управления $\left| [x_d(t), x_b(t)]^T - [0,99, 0,01]^T \right| < \delta \text{ при } t > T . \quad (7.6)$

•Skogestad S., Morari M., Doyle J. Robust control of ill-conditioned plants: high-purity distillation // IEEE Transaction on Automatic Control. 1988. Vol. 33. No. 12. P. 1092-1105.

•Diggelen R.C., Kiss A.A., Heemink W. Comparison of control strategies for dividing-wall columns // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2010. Vol. 49. No. 1. P. 288-307.

6. Метод решения

Робастное управление ректификационной колонной

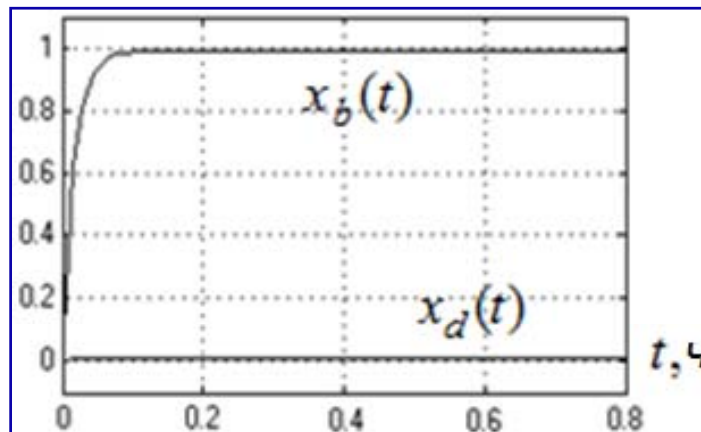
Вспомогательный контур
$$\bar{e}(t) = \frac{1}{4500p+1} \begin{pmatrix} 0,878 & -0,864 \\ 1,082 & -1,096 \end{pmatrix} u(t) \quad (7.7)$$

Наблюдатель
$$\dot{\xi}_{i1}(t) = -\xi_{i2}(t) - 2 \cdot 100(\xi_{i1}(t) - \zeta_i(t)), \quad \dot{\xi}_{i2}(t) = -100^2(\xi_{i1}(t) - \zeta_i(t)), i=1,2 \quad (7.8)$$

Закон управления
$$u(t) = - \begin{bmatrix} 39,942 & -31,487 \\ 39,432 & -31,997 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4500\xi_{12}(t) + \xi_{11}(t) \\ 4500\xi_{22}(t) + \xi_{21}(t) \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

Модель ректификационной колонны

$$y(t) = \frac{1}{4500p+1} \begin{pmatrix} -0,878 & 0,014 \\ -1,082 & -0,014 \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + 0,2 \frac{5p+1}{0,5p+1} \begin{pmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{pmatrix} \right) u(t) + \begin{pmatrix} \frac{0,7}{14,4p+1} \\ \frac{1,3}{12p+1} \end{pmatrix} (2 + \sin(t-1))$$



- Гуцин П.А., Винокуров В.А., Фуртат И.Б. Робастное управление ректификационной колонной с компенсацией возмущений // Технологии нефти и газа. Научно-технологический журнал. – 2011. – № 3. – С. 36-40.
-//-/-/-/-/-/-
- Контракт «Получение и исследование модели процесса ректификации. Разработка новых простых методов оптимального управления для снижения энергопотребления и улучшения качества продуктов в ректификационных колоннах» (РГУ нефти и газа им. М.А. Губкина).

6. Постановка задачи

Робастно-субоптимальное управление ректификационной колонной

Модель **ректификационной колонны** $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Df(t), \quad y(t) = Cx(t) \quad (7.10)$

$A = A_m + B_m \text{ones}_{1 \times 11}$ – неустойчивая, $\lambda_{\max}(A) = 0,8$, $B = 3B_m$, $F = 2D_m$,

$$x(0) = [1 \ 0,8983 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0,4878 \ 1 \ 1]^T,$$

$$f(t) = 0,14[1 + 2 \sin t, 0,2 + 2 \sin 1,5t, 1 + 2 \sin 2t, 1 + 2 \sin 3t, 1 + 2 \sin 0,5t]^T$$

$x(t) = [x_d(t), x_6(t), \dots, x_f(t), \dots, x_1(t), x_b(t), P_c(t), V_s(t)]^T$, $C = [0, 1, 0, \dots, 0]$, $x_d(t)$ – концентрация легкой фракции в верхнем продукте, $x_6(t)$ – концентрация легкой фракции в холодильнике, $x_2(t), \dots, x_5(t)$ – концентрации легкой фракции в камерах № 2, ..., № 6, $x_1(t)$ – концентрация легкой фракции в нагревателе, $x_f(t)$ – концентрация легкой фракции в той части колонны, куда поступает исходная смесь (сырье), $x_b(t)$ – концентрация легкой фракции в нижнем продукте, $P_c(t)$ – давление в верхней камере колонны, $V_s(t)$ – обратный расход нижнего продукта, $u(t) = L_r(t)$ – расход орошения в верхней части колонны, $f(t) = [P_f(t), F(t), z_f(t), P_{ss}(t), X_v(t)]^T$ – вектор неконтролируемых возмущений, $P_f(t)$, $F(t)$ и $z_f(t)$ – давление, расход и концентрация легкой фракции в исходной смеси (сырье), $P_{ss}(t)$, $X_v(t)$ – давление и содержание легких фракций в обратном потоке нижнего продукта

Эталонная модель $\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m u_m(t) + D_m f_m(t), \quad y_m(t) = C x_m(t). \quad (7.11)$

$$u_m(t) = 0,1404, \quad f_m(t) = 0,14[1 \ 0,2 \ 1 \ 1 \ 1]^T, \quad x(0) = [1 \ 0,8983 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0,4878 \ 1 \ 1]^T$$

- **Буяхияуи К., Григорьев Л., Лаауад, Ф.** Оптимальное нечеткое управление для снижения энергопотребления в дистилляционных колоннах // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 2. – С. 36-45.

6. Метод решения

Робастно-субоптимальное управление ректификационной колонной

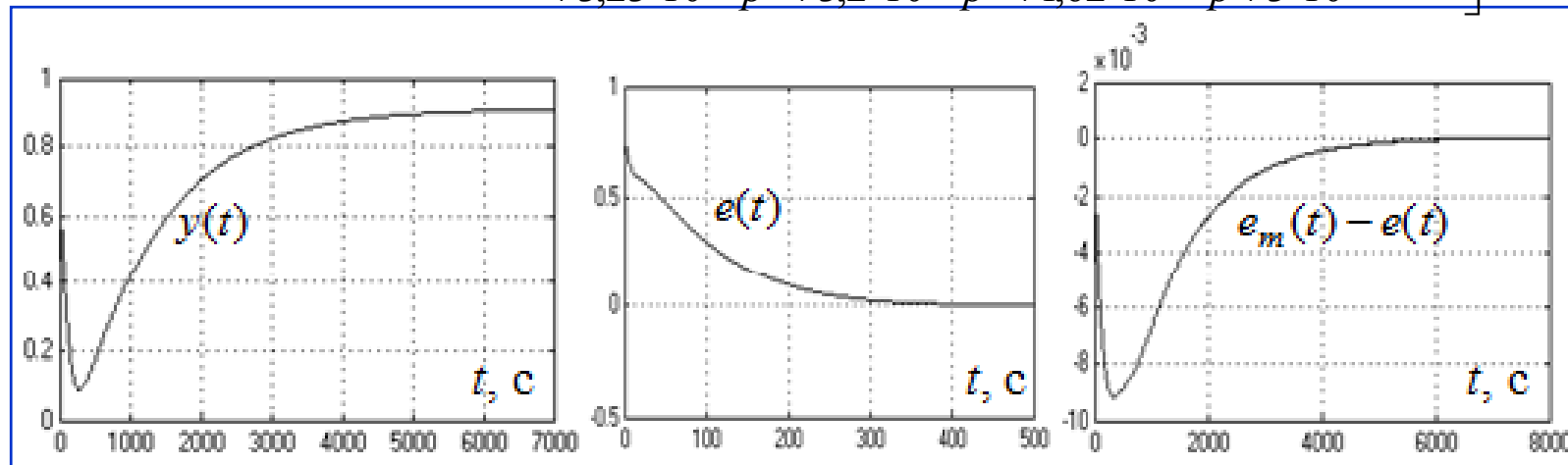
$$J = \int_0^{\infty} (0,008e_m^2(t) + 0,2u_0^2(t))dt$$

Вспомогательный контур $\dot{\bar{e}}(t) = A_0\bar{e}(t) + 0,04B_mu(t), \quad \bar{e}(t) = L\bar{e}(t), \quad \bar{e}(0) = 0.$

Наблюдатель $\dot{\xi}_1(t) = -\xi_2(t) - 2 \cdot 50(\xi_1(t) - \zeta(t)), \quad \dot{\xi}_2(t) = -1 \cdot 50^2(\xi_1(t) - \zeta(t)), \quad \xi(0) = 0$
 $u(t) = -100[18,762\xi_2(t) + 0,405\xi_1(t) -$

Закон управления
$$-\frac{5,75 \cdot 10^{-4} p^9 + 3,53 \cdot 10^{-3} p^8 + 1,91 \cdot 10^{-3} p^7 + 4,27 \cdot 10^{-4} p^6 + 4,86 \cdot 10^{-5} p^5 + 3 \cdot 10^{-6} p^4 +}{p^{11} + 6,18 p^{10} + 3,76 p^9 + 0,984 p^8 + 0,14 p^7 + 0,012 p^6 + 5,96 \cdot 10^{-4} p^5 + 1,81 \cdot 10^{-5} p^4 +}$$

$$\left. \frac{+ 9,97 \cdot 10^{-8} p^3 + 1,68 \cdot 10^{-9} p^2 + 1,27 \cdot 10^{-11} p + 3 \cdot 10^{-14}}{+ 3,23 \cdot 10^{-7} p^3 + 3,2 \cdot 10^{-9} p^2 + 1,62 \cdot 10^{-11} p + 3 \cdot 10^{-14}} e(t) \right].$$



- Контракт «Получение и исследование модели процесса ректификации. Разработка новых простых методов оптимального управления для снижения энергопотребления и улучшения качества продуктов в ректификационных колоннах» (РГУ нефти и газа им. М.А. Губкина).

План выступления

1. Системы адаптивного управления
2. Системы робастного управления
3. Системы робастно-субоптимального управления
4. Системы управления многосвязными объектами
5. Системы управления сетевыми объектами
6. Управление в химических технологиях
- 7. *Управление в энергетических сетях***
 - *Управление одним электрическим генератором*
 - *Управление электроэнергетической сетью*
8. Результаты работы

7. Постановка задачи

Робастное управление одним электрическим генератором

Механические уравнения $\dot{\delta}(t) = w(t), \quad \dot{w}(t) = -\frac{D}{2H} w(t) - \frac{w_0}{2H} (P_e(t) - P_m)$

Электрическая динамика генератора $\dot{E}'_q(t) = \frac{1}{T_{d0}} (E_f(t) - E_q(t))$

Электрические уравнения $E_q(t) = \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} E'_q(t) - \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} V_s \cos \delta(t), \quad E_f(t) = k_c u_f(t),$

$$P_e(t) = \frac{V_s E_q(t)}{x_{ds}} \sin \delta(t), \quad Q_e(t) = \frac{V_s}{x_{ds}} E_q(t) \cos \delta(t) - \frac{V_s^2}{x_{ds}}, \quad I_q(t) = \frac{V_s}{x_{ds}} \sin \delta(t) = \frac{P_e(t)}{x_{ad} I_f(t)}, \quad E_q(t) = x_{ad} I_f(t)$$
$$V_t(t) = \frac{1}{x_{ds}} \sqrt{x_s^2 E_q^2(t) + V_s^2 x_d^2 + 2x_s x_d x_{ds} P_e(t) \operatorname{ctg} \delta(t)}.$$

Предположения

1. В рабочем режиме генератора $\delta(t) \in (0; 180^\circ)$ для $\forall t \geq 0$ и $\forall \vartheta \in \Xi$.
2. Кратковременные аварии (внезапное изменение реактивного сопротивления x_L линии передачи).

Цель управления

$$\lim_{t \rightarrow T} \delta(t) = \text{const}, \quad |w(t)| < \varepsilon_1 \quad \text{и} \quad |\Delta P_e(t)| < \varepsilon_2 \quad \text{при} \quad t > T$$

- Bergan A.R. Power Systems Analysis. – New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
- Pai M.A. Power system stability. – New York: North Holland, 1981.
- Anderson P.M., Fouad A.A. Power system control and stability. – Iowa: Iowa State University Press, 1977.
- Wang Y., Xie L., Hill D.J., Middleton R.H. Robust nonlinear controller design for transient stability enhancement of power systems. – Proc. of the 31st Conference on Decision and Control, Arizona, 1992.
- Guo Y., Hill D.J., Wang Y. Global transient stability and voltage regulation for power systems. IEEE Trans. on Power Systems, 2001, vol.16, №.4.

7. Метод решения

Робастное управление одним электрическим генератором

Вспомогательный контур $(p^2 + 1,1414p + 0,3227)\overline{w}(t) = -20,277 \cdot 2u_f(t).$

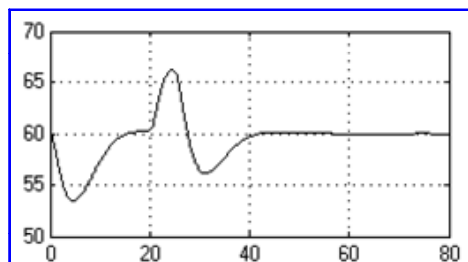
Наблюдатель $\dot{\xi}_1(t) = -\xi_2(t) - 4\mu^{-1}(\xi_1(t) - v(t)), \quad \dot{\xi}_2(t) = -4\mu^{-2}(\xi_1(t) - v(t)).$

Закон управления $u(t) = (20,277 \cdot 2)^{-1}(\dot{\xi}_2 + 1,1414\xi_2 + 0,3227), \quad -3 \leq u_f(t) \leq 6 \text{ о.е.}$

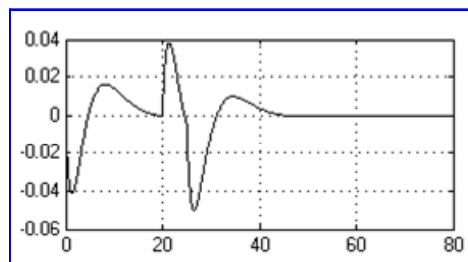
Аварийная ситуация: $x_L = 0,4853$ о.е. (до $t = 30$ с); в $t = 20$ с $x_L = 100$ о.е.;
при $t = 30$ с $x_L = 1$ о.е.

Параметры в модели генератора: $w_0 = 314,159$ рад/с, $D = 5$ о.е., $H = 4$ с,
 $T_{d0} = 6,9$ с, $x_d = 1,863$ о.е., $x'_d = 0,257$ о.е., $x_T = 0,127$ о.е., $P_{m0} = 0,9$ о.е.,
 $V_{t0} = 1$ о.е., $\delta(0) = \pi/3$ рад, $w(0) = 0$ рад/с, $\Delta P_e(0) = 0$ о.е.,
 $1/T'_{d0} = 0,51635 + 0,2582 \sin t$ 1/с, $T'_{d0}(Q_e(t) + V_s^2 / x_{ds}) = 0,2347 \sin 1,5t$ о.е.

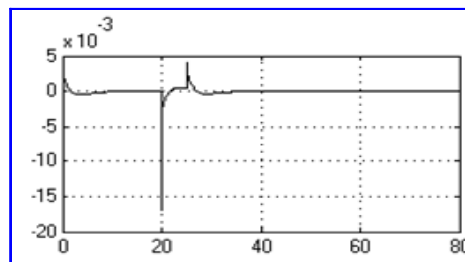
Результаты моделирования



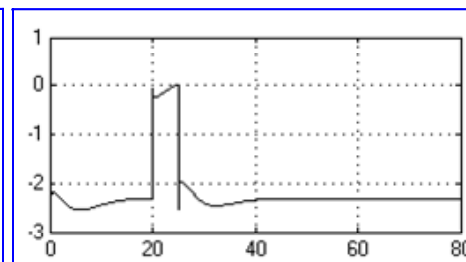
$\delta(t)$, t , с
град



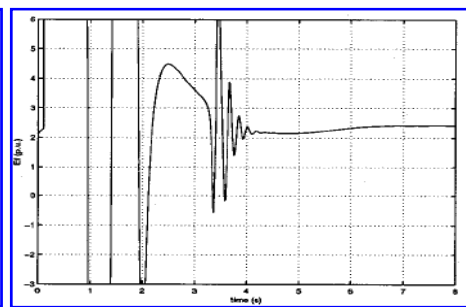
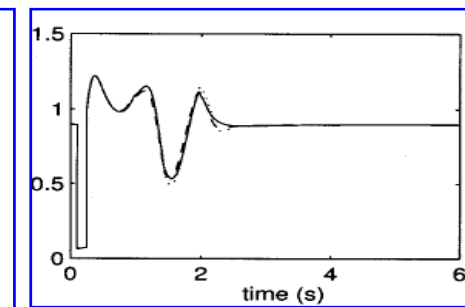
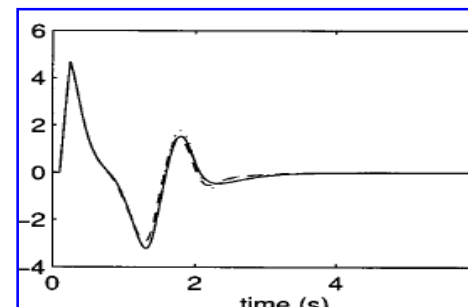
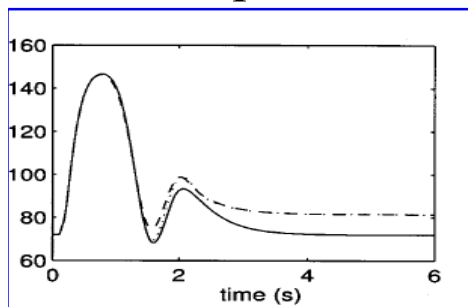
$w(t)$, t , с
рад/с



$\Delta P_e(t)$, t , с
отн. ед.



$u_f(t)$, t , с
отн. ед.



- **Wang Y., Xie L., Hill D.J., Middleton R.H.** Robust nonlinear controller design for transient stability enhancement of power systems // Proc. of the 31st Conference on Decision and Control. Arizona. 1992. P. 1117-1122.
- **Guo Y., Hill D.J., Wang Y.** Global transient stability and voltage regulation for power systems // IEEE Trans. on Power Systems. 2001. V. 16. №. 4. P. 678-688.

- **Фуртат И.Б.** Робастное управление электрическим генератором с компенсацией возмущений // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 5. – С. 102-108.
- **Фуртат И.Б.** Робастное управление сетью электрических генераторов // Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление» – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электродприбор», – 2010. – С. 416-419.

-//--//--//--//--

- **Программа 02 ОЭММПУ РАН «Проблемы управления безопасности энергетики и технических систем» (ИПМаш РАН).**
- **Договор «Материалы в концепцию развития интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС)» ОАО «ФСК ЕЭС» и ОАО «НТЦ электроэнергетики» (Концепция утверждена).**

7. Постановка задачи

Робастное управление электроэнергетической сетью

Сеть электрических генераторов S , $l = 1, \dots, m$.

– уравнения движения ротора i -го генератора: $\dot{\delta}_i(t) = \omega_i(t)$, $\dot{\omega}_i(t) = -\frac{D_i}{2H_i}\omega_i(t) - \frac{\omega_0}{2H_i}\Delta P_{ei}(t)$;

– электрическая динамика i -го генератора: $\dot{E}'_{qi}(t) = \frac{1}{T'_{d0i}}(E_{fi}(t) - E_{qi}(t))$;

– электрические уравнения: $E_{qi}(t) = x_{adi}I_{fi}(t) = E'_{qi}(t) - (x_{di} - x'_{di})I_{di}(t)$, $E_{fi}(t) = k_{ci}u_{fi}(t)$,

$$I_{di}(t) = - \sum_{j \in N_i} E'_{qj}(t) M_{ij} \cos(\delta_i(t) - \delta_j(t))$$

$$P_{ei}(t) = \sum_{j \in N_i} E'_{qi}(t) E'_{qj}(t) M_{ij} \sin(\delta_i(t) - \delta_j(t)), Q_{ei}(t) = - \sum_{j \in N_i} E'_{qi}(t) E'_{qj}(t) M_{ij} \cos(\delta_i(t) - \delta_j(t))$$

$$I_{qi}(t) = \sum_{j \in N_i} E'_{qj}(t) M_{ij} \sin(\delta_i(t) - \delta_j(t)), V_{ti}(t) = \frac{1}{x_{dsi}} \sqrt{(E'_{qi}(t) - x'_{di}I_{di}(t))^2 + (x'_{di}I_{qi}(t))^2},$$

Предположения

1. В рабочем режиме генератора $\delta_i(t) \in (0; 180^\circ)$ для $\forall t \geq 0$ и $\forall \mathcal{G} \in \Xi$, $i = 1, \dots, k$.
2. Доступен измерению знак тока $I_{qi}(t)$, $i = 1, \dots, k$.
3. Могут произойти кратковременные аварийные ситуации, связанные с внезапным изменением сопротивления линии передачи.
4. Измерению доступна только относительная угловая скорость $\omega_i(t)$, $i = 1, \dots, k$.

Цель управления $\lim_{t \rightarrow T} \delta_i(t) = const$, $|\omega_i(t)| < \varepsilon_1$, $|\Delta P_{ei}(t)| < \varepsilon_2$, $|\omega_i(t) - \omega_j(t)| < \varepsilon_3$ при $t > T$.

•Guo G., Hill D.J., Wang Y. Nonlinear output stabilization control for multimachine power systems // IEEE Trans. On Circuits and Systems, part 1. 2000. V. 47.№ 1. P. 46–53.

7. Метод решения

Робастное управление электроэнергетической сетью

Авария) до $t = 10$ с.
 $M_{31} = 0,95$ о.е., при $t = 10$ с.
 происходит обрыв линии 2-4

Класс неопределенностей Ξ $i = 1, 2, 3, 4$ [*]:

$$6 \leq T'_{d0i} \leq 8, \quad 3 \leq D_i \leq 5, \quad 4 \leq H_i \leq 5,5, \\ 1 \leq k_{ci} \leq 3, \quad 1,8 \leq x_{di} \leq 2,4, \quad 0,2 \leq x'_{di} \leq 0,4, \\ 0,3 \leq M_{ij} \leq 3, \quad i, j = 1, 2, 3, 4.$$

Вспомогательный контур:

$$(p^2 + 4p + 4)\bar{e}_i(t) = -u_{fi}(t), \quad i = 1, 2, 3.$$

Наблюдатель:

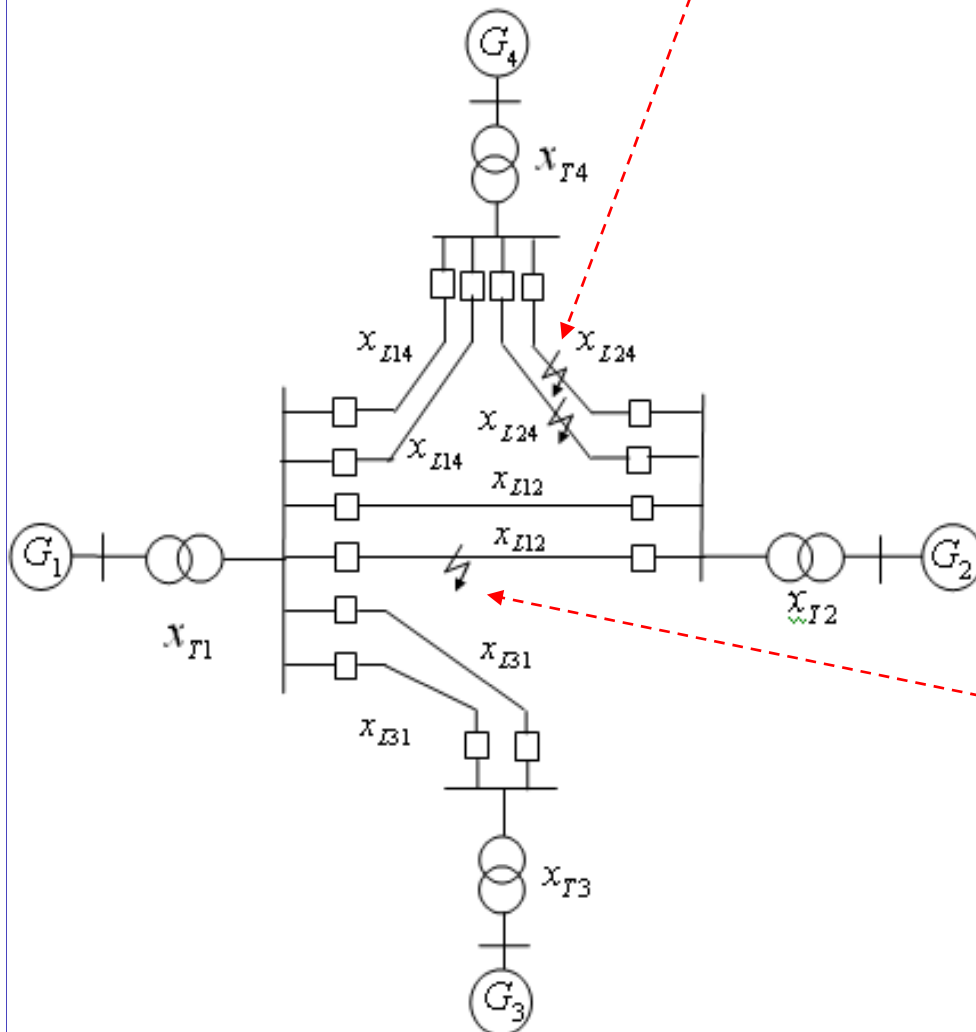
$$\dot{\xi}_{1i}(t) = -\xi_{2i}(t) - 4 \cdot 100(\xi_{1i}(t) - \zeta_i(t)), \\ \dot{\xi}_{2i}(t) = -4 \cdot 100^2(\xi_{1i}(t) - \zeta_i(t)), \quad i = 1, 2, 3.$$

Закон управления:

$$u_{fi}(t) = \dot{\xi}_{2i}(t) + 4\xi_{2i}(t) + 4\xi_{1i}(t) \\ -3 \leq E_{fi}(t) \leq 6.$$

Авария[*]) до $t = 1$ с.,
 $M_{12} = M_{21} = 0,4853$ о.е., при $t = 1$
 с., $M_{12} = M_{21} = 3$, при $t = 1,5$ с
 $M_{12} = M_{21} = 0,4853$ о.е.

[*]Zhang G.H., Wang Y., Hill D.J. Global control of multi-machine power systems for transient stability enhancement // 16th IEEE Int. Conf. on Control Applications. Singapore. 2007. P. 934-939.

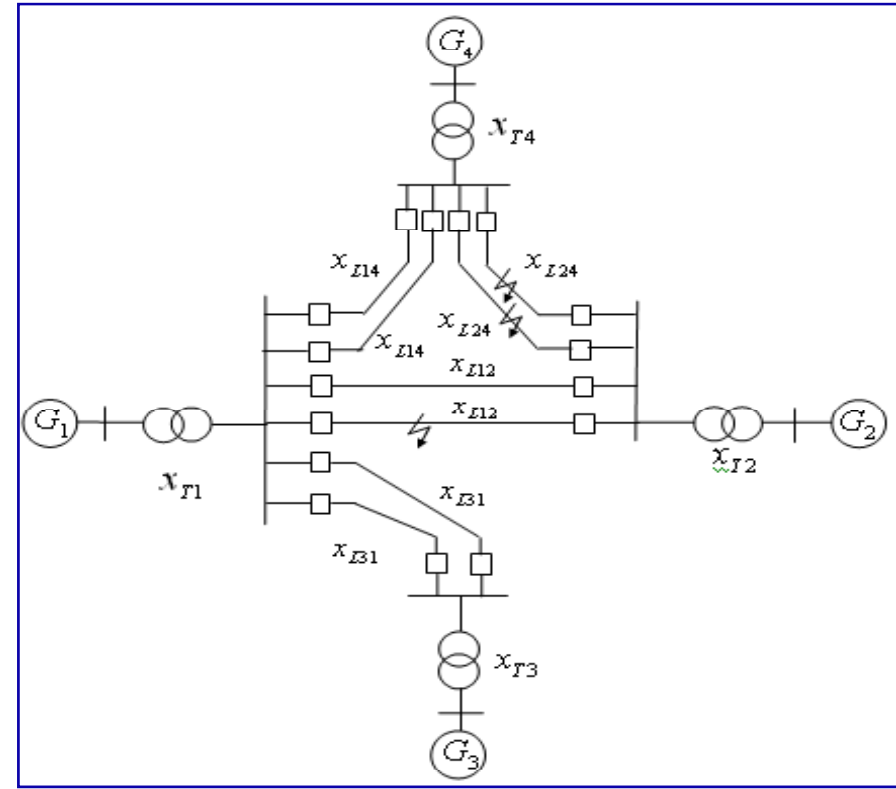


7. Параметры в сети

Робастное управление электроэнергетической сетью

Параметры генераторов

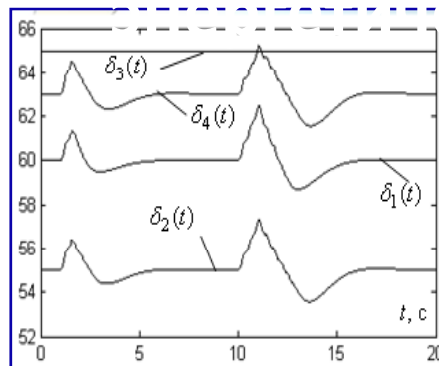
[*]Zhang G.H., Wang Y., Hill D.J. Global control of multi-machine power systems for transient stability enhancement // 16th IEEE Int. Conf. on Control Applications. Singapore. 2007. P. 934-939.



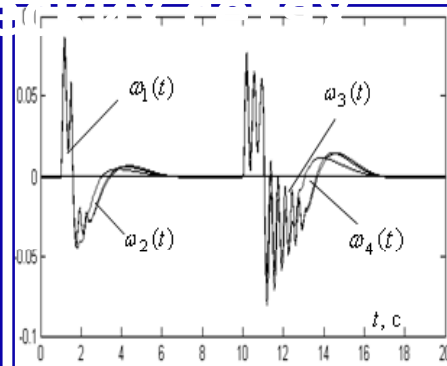
Для G_i , $i = 1, 2, 3, 4$ сети S [*]: $\omega_0 = 314,159$ рад/с, $\omega_i(0) = 0$ рад/с и $\Delta P_{ei}(0) = 0$ о.е.

Генератор	D_i , о.е.	H_i , с.	T'_{d0i} , с.	x_{di} , о.е.	x'_{di} , о.е.	P_{m0i} , о.е.	V_{t0i} , о.е.	k_{ci} , о.е.	$\delta_i(0)$, рад.
G_1	5	4	1,7	1,863	0,257	0,9	1	1	$\pi / 3$
G_2	4	5	2	2,17	0,32	0,8	0,9	1	$11\pi / 36$
G_3	4	5	2	2,01	0,28	1	1,1	1	$13\pi / 3$
G_4	4,5	5,2	2,1	2,07	0,35	0,85	0,87	1	$7\pi / 20$

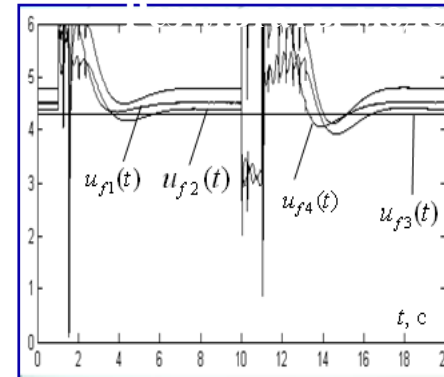
Результаты моделирования



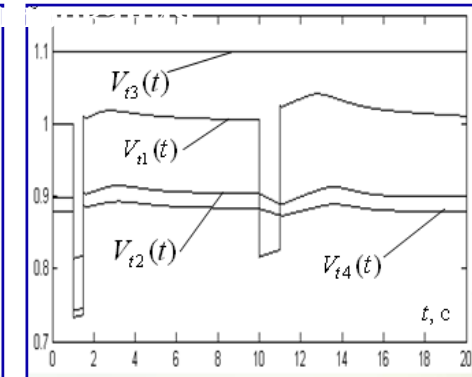
$\delta_i(t)$, град



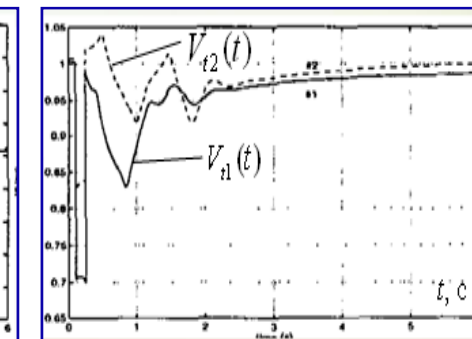
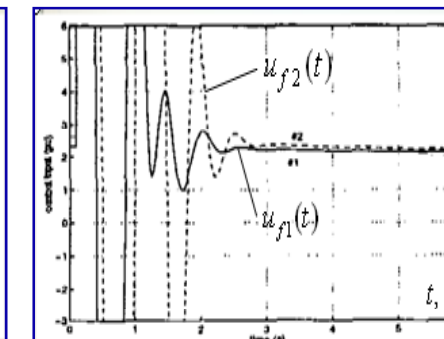
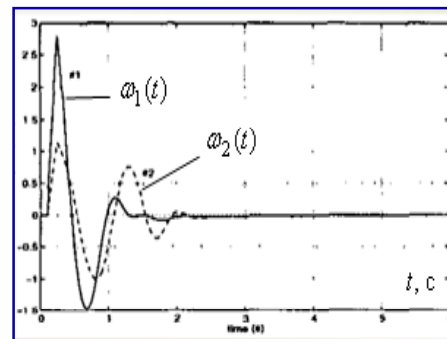
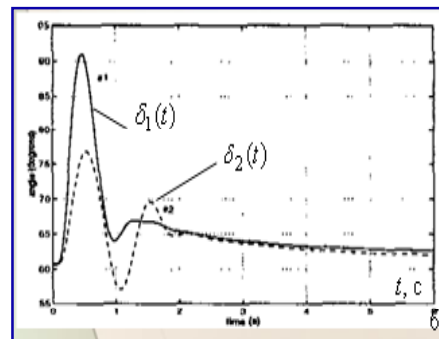
$\omega_i(t)$, рад/с



$u_{fi}(t)$, отн. ед.



$V_{ti}(t)$, отн. ед.



- **Zhang G.H., Wang Y., Hill D.J.** Global control of multi-machine power systems for transient stability enhancement // 16th IEEE Int. Conf. on Control Applications. Singapore. 2007. P. 934-939.

- *Фуртат И.Б.* Робастное управление сетью электрических генераторов // Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление» – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электродприбор», – 2010. – С. 416-419.

-//--//--//--//--

- Программа 02 ОЭММПУ РАН «Проблемы управления безопасности энергетики и технических систем» (ИПМаш РАН).
- Договор «Материалы в концепцию развития интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС)» в рамках основного договора между ОАО «ФСК ЕЭС» и ОАО «НТЦ электроэнергетики» (Концепция утверждена).

План выступления

1. Системы адаптивного управления
2. Системы робастного управления
3. Системы робастно-субоптимального управления
4. Системы управления многосвязными объектами
5. Системы управления сетевыми объектами
6. Управление в химических технологиях
7. Управление в машиностроении
- 8. Результаты работы***

8. Результаты работы

1. На базе модифицированного алгоритма адаптации высокого порядка предложены подходы адаптивного управления с эталонной моделью по выходу:
 - неопределенными объектами с запаздыванием по управлению и/или по состоянию, как с использованием адаптивного предиктора, так и без него;
 - параметрически и структурно-неопределенными объектами как с запаздыванием по состоянию, так и без него.
2. Предложен новый метод модифицированного робастного обратного обхода интегратора. На базе данного метода предложен новый подход к управлению с эталонной моделью параметрически и сигнально-неопределенными динамическими системами.
3. Получен способ робастного управления с компенсацией возмущений по выходу структурно-неопределенными линейными и нелинейными, нестационарными с запаздыванием по состоянию объектами в условиях действия внутренних и внешних неконтролируемых возмущений.
4. Предложен метод построения робастных субоптимальных систем управления линейными объектами. С использованием данного метода предложены способы управления нелинейными параметрически и сигнально неопределенными объектами в условиях запаздывания с компенсацией неконтролируемых внутренних и внешних возмущений.

8. Результаты работы

5. Синтезированы алгоритмы адаптивного, робастного и робастно-субоптимального управления линейными и нелинейными параметрически, сигнально, структурно-неопределенными многосвязными объектами, как с запаздыванием по состоянию, так и без него.
6. Получены способы проектирования адаптивного, робастного и робастно-субоптимального управления динамическими сетями, математические модели подсистем которых представлены линейными и нелинейными параметрически, сигнально, структурно-неопределенными дифференциальными уравнениями, подверженными действию внутренних и внешних неконтролируемых воздействий.
7. Решены задачи адаптивного управления процессом адсорбции установки «Осушка и отбензинивание обессеренного газа». Синтезированы законы робастного и робастного субоптимального управления процессом ректификации.
8. Спроектированы робастные системы управления:
 - безредукторным прецизионным электроприводом оси оптического телескопа;
 - одним электрическим генератором и сетью электрических генераторов в условиях нормальной работы и аварийных ситуациях, связанных с изменением сопротивления линий передач и возможным их обрывом.