

В. П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
К. Б. ГОДЛЕВСКАЯ, аспирантка НТУ «ХПИ»

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ АЭС

Побудована нелінійна математична модель слідуючого приводу парової турбіни енергоблоку АЕС. Розроблені моделі систем автоматичного керування частотою обертання ротора парової турбіни в просторі станів з різними регуляторами. Представлені результати багатокритеріального параметричного синтезу нелінійних систем стабілізації частоти.

Построена нелинейная математическая модель следящего привода паровой турбины энергоблока АЭС. Разработаны модели систем автоматического управления частотой вращения ротора паровой турбины в пространстве состояний с различными регуляторами. Представлены результаты многокритериального параметрического синтеза нелинейных систем стабилизации частоты.

The nonlinear mathematical model for watching drive of steam turbine of atomic power plant is built. The nonlinear models of automatic control systems for rotation frequency of turbine rotor are developed in state space with the different regulators. Results of multicriterion parametric synthesis for the nonlinear stabilizing systems of frequency are presented.

Введение. Многокритериальный параметрический синтез систем автоматического управления (САУ) паровыми турбинами является одним из основных инженерных заданий при модернизации энергоблоков АЭС. Эта задача решена для линейных моделей систем автоматического управления турбиной К-1000-60/1500 [1, 2]. Повышение точности расчета оптимальных САУ возможно при использовании нелинейных моделей систем, которые полнее учитывают особенности протекания реальных процессов управления. Влияние различных нелинейностей проявляется как в самой паровой турбине, так и в управляющем следящем приводе турбины.

Целью статьи является представление нелинейных моделей систем стабилизации частоты вращения паровой турбины К-1000-60/1500 в пространстве состояний с использованием стандартных и нечеткого регуляторов, а также результатов многокритериального параметрического синтеза систем стабилизации частоты векторными методами оптимизации.

Нелинейная модель следящего привода турбины. Исполнительным звеном САУ частотой вращения паровых турбин является электрогидравлический следящий привод. Принципиальная схема следящего привода на рис. 1 включает электрогидравлический преобразователь (ЭГП), отсечной золотник (ОЗ), сервомотор (СМ), датчики положения (ДП), электронную часть (ЭЧ), p_n и p_c – давление насоса и слива жидкости.

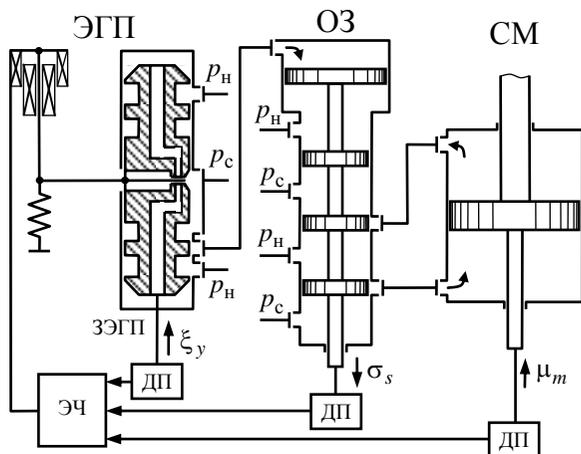


Рис. 1 – Принципиальная схема следящего привода

Построены линейные модели схем привода с различным числом датчиков и выполнена оптимизация параметров линейных моделей [1]. Наилучшие показатели качества получены для модели привода с тремя датчиками – золотника ЭГП (ЗЭГП), ОЗ и СМ. По этой модели разработана нелинейная модель привода в виде системы дифференциальных уравнений (СДУ):

$$dX_D/dt = f_D(X_D, u), \quad \mu_m = C_D X_D, \quad (1)$$

где X_D – вектор относительных переменных состояния привода, f_D – векторная функция, u – управляющее воздействие регулятора частоты, μ_m – переменная положения сервомотора. Эта модель учитывает упоры относительных переменных положения – ЗЭГП ξ_y , ОЗ σ_s и СМ μ_m (см. рис. 1):

$$-1 \leq \xi_y \leq 1, \quad -1 \leq \sigma_s \leq 1, \quad -1 \leq \mu_m \leq 0.$$

Порядок СДУ (1) $n = 14$. Номинальному режиму работы турбины соответствуют нулевые значения всех относительных переменных состояния привода.

Нелинейная модель турбины. Принципиальная схема паровой турбины К-1000-60/1500 представлена на рис. 2 и включает клапан регулирования турбины (КРТ), цилиндр высокого давления (ЦВД), объем перед ЦВД, объем в сепараторе-перегревателе (СП), клапан сепаратора-перегревателя (КСП), объем за КСП, цилиндр среднего давления (ЦСД), цилиндр низкого давления (ЦНД), объем перед ЦНД, конденсатор (К). Пар под давлением p_0 поступает

в КРТ. Следящий привод через систему рычагов воздействует на КРТ, изменяя подачу пара в ЦВД.

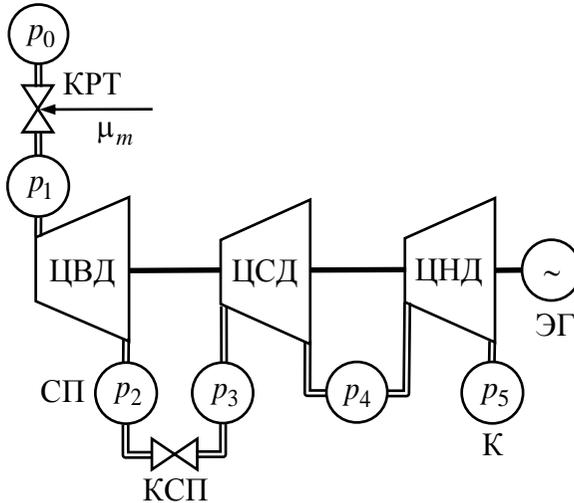


Рис. 2 – Принципиальная схема паровой турбины К-1000-60/1500

Пар аккумулируется в четырех основных объемах под давлением p_1, p_2, p_3, p_4 . Энергия пара превращается в механическую энергию вращения ротора турбины и электрического генератора (ЭГ) с круговой частотой ω .

Перейдем к относительным переменным: давления $\pi_k = p_k/p_0, k = \overline{1, 5}$, частоты вращения ротора $\varphi = (\omega - \omega_0)/\omega_0$ и мощности $v = (N - N_0)/N_0$, где ω_0 и N_0 – круговая частота и мощность в номинальном режиме. Нелинейная модель парового тракта и движения ротора турбины получена преобразованием уравнений материального баланса и динамики ротора в виде СДУ

$$\begin{cases} d\pi_1/dt = K_{11}(1 + \mu_m) - K_{12}\sqrt{\pi_1^2 - \pi_2^2}, \\ d\pi_2/dt = K_{21}\sqrt{\pi_1^2 - \pi_2^2} - K_{22}\sqrt{\pi_2^2 - K_\beta(\pi_3 - \Pi\pi_2)^2}, \\ d\pi_3/dt = K_{31}\sqrt{\pi_2^2 - K_\beta(\pi_3 - \Pi\pi_2)^2} - K_{32}\sqrt{\pi_3^2 - \pi_4^2}, \\ d\pi_4/dt = K_{41}\sqrt{\pi_3^2 - \pi_4^2} - K_{42}\sqrt{\pi_4^2 - \pi_5^2}, \\ d\varphi/dt = b_a(v - v_s)/(1 + \varphi), \end{cases} \quad (2)$$

где использована переменная относительной мощности турбины

$$v = k_1 \sqrt{\pi_1^2 - \pi_2^2} + k_2 \sqrt{\pi_3^2 - \pi_4^2} + k_3 \sqrt{\pi_4^2 - \pi_5^2} - v_4(1 + \varphi)^2 - v_5(1 + \varphi)^3 - 1$$

и возмущающее воздействие мощности электрического генератора v_s .

Вычисленные по конструктивным и технологическим данным турбины значения параметров модели приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры модели турбины

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
K_{11}	3,2569	K_{42}	2,4881	v_4	0,0047
K_{12}	3,3257	K_B	4,8516	v_5	0,0119
K_{21}	0,0777	Π	0,5460	π_{10}	0,9100
K_{22}	1,2841	b_a	0,0694	π_{20}	0,1842
K_{31}	5,2077	k_1	0,3704	π_{30}	0,1805
K_{32}	1,6345	k_2	1,3275	π_{40}	0,0552
K_{41}	0,7986	k_3	8,3090	φ_0	0

Модель (2) представим в векторном виде:

$$dX_t/dt = f_t(X_t, \mu_m, v_s), \quad \varphi = C_t X_t, \quad (3)$$

где $X_t = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \varphi)^T$ – вектор состояния, f_t – векторная функция, соответствующая правым частям СДУ (2), $C_t = (0,0,0,0,1)$. Вектор начальных условий $X_{t_0} = (\pi_{10}, \pi_{20}, \pi_{30}, \pi_{40}, \varphi_0)^T$ отвечает номинальному режиму работы турбины. Значения проекций этого вектора приведены в табл. 1. По моделям (1) и (3) получена нелинейная модель турбины как объекта управления:

$$dX_T/dt = f_T(X_T, u, v_s), \quad \varphi = C_T X_T, \quad (4)$$

$$X_T = \begin{pmatrix} X_D \\ X_I \end{pmatrix}, \quad X_{T0} = \begin{pmatrix} 0 \\ X_{t_0} \end{pmatrix}, \quad f_T(X_T, u, v_s) = \begin{pmatrix} f_D(X_D, u) \\ f_I(X_I, \mu_m, v_s) \end{pmatrix}, \quad C_T = (0 \quad C_t).$$

Порядок этой модели $n = 19$. Входной сигнал – управляющее воздействие u , выходная переменная – относительное отклонение частоты φ .

Нелинейные модели систем управления турбинами. Система автоматического управления частотой (САУЧ) паровой турбины предназначена для стабилизации частоты вращения ротора турбины. Самым тяжелым испытанием САУЧ является сброс нагрузки турбины. На основании нелинейной модели (4) турбины К-1000-60/1500 построим нелинейные модели САУЧ для частичного сброса нагрузки с различными законами управления.

Структурная схема САУЧ на рис. 3 включает сумматор, регулятор частоты (РЧ), модель паровой турбины (ПТ) и отрицательную обратную связь.

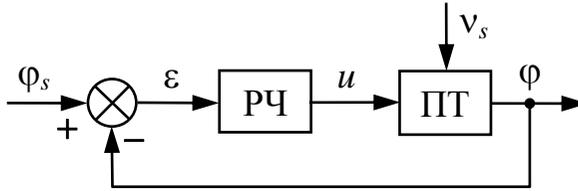


Рис. 3 – Структурная схема САУЧ

Сигнал ошибки $\varepsilon = \varphi_s - \varphi$ полученный по уставке частоты φ_s , подается на вход РЧ, формирующего управляющее воздействие u . Это воздействие и возмущающий сигнал v_s поступают в модель ПТ и изменяют вектор ее состояния X_T . Координата частоты φ отрицательной обратной связью подается на сумматор. Поскольку в номинальном режиме $\varphi_s = 0$, то $\varepsilon = -\varphi$. Входным возмущающим воздействием САУЧ является сигнал изменения мощности v_s , выходной переменной – частота φ .

На основании модели ПТ (4) построены нелинейные математические модели ее САУЧ с различными регуляторами вида:

$$dX/dt = f(x, X, v_s), \quad y(x, t) = 100CX,$$

где X – вектор состояния системы, f – векторная функция, x – вектор переменных параметров регулятора, $y = 100\varphi$ – отклонение частоты от ее номинального значения в процентах, C – вектор наблюдения.

Для пропорционального П регулятора с переменным коэффициентом K_p и управляющим воздействием $u = K_p \varepsilon$

$$X = X_T, \quad x = K_p, \quad f(x, X, v_s) = f_T(X_T, -K_p \varphi, v_s), \quad C = C_T.$$

Порядок такой модели $n = 19$.

Для пропорционально-интегрального ПИ регулятора с переменными коэффициентами K_p и λ_I получим:

$$X = \begin{pmatrix} X_T \\ u_I \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} K_p \\ \lambda_I \end{pmatrix}, \quad f(x, X, v_s) = \begin{pmatrix} f_T(X_T, -K_p \varphi + u_I, v_s) \\ -\lambda_I \varphi \end{pmatrix}, \quad C = (C_T \quad 0),$$

где u_I – переменная состояния интегральной части регулятора, $n = 20$.

Для пропорционально-дифференциального ПД регулятора с переменными коэффициентами K_p , λ_D и постоянным параметром $K_D = 10$ имеем:

$$X = \begin{pmatrix} X_T \\ v_D \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} K_p \\ \lambda_D \end{pmatrix}, \quad f(x, X, v_s) = \begin{pmatrix} f_T(X_T, u, v_s) \\ -\lambda_D(v_D - K_D\phi) \end{pmatrix}, \quad C = (C_T \quad 0),$$

где $u = -(K_p + K_D)\phi + v_D$, v_D – переменная состояния дифференциальной части регулятора, $n = 20$.

Для модели с ПИД регулятором

$$X = \begin{pmatrix} X_T \\ u_I \\ v_D \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} K_p \\ \lambda_I \\ \lambda_D \end{pmatrix}, \quad f(x, X, v_s) = \begin{pmatrix} f_T(X_T, u, v_s) \\ -\lambda_I\phi \\ -\lambda_D(v_D - K_D\phi) \end{pmatrix}, \quad C = (C_T \quad 0 \quad 0),$$

где $u = -(K_p + K_D)\phi + u_I + v_D$, $n = 21$.

Для нечеткого ПИ регулятора с вектором $x = (K_p, \lambda_I, K_u, \xi_p, \eta_p)^T$ имеем:

$$X = \begin{pmatrix} X_T \\ u_I \end{pmatrix}, \quad f(x, X, v_s) = \begin{pmatrix} f_T(X_T, u, v_s) \\ -\lambda_I\phi \end{pmatrix}, \quad C = (C_T \quad 0),$$

где $u = -f_F(x, -K_p\phi)K_u + u_I$, f_F – нелинейная функция системы нечеткого вывода [2]. Порядок модели $n = 20$.

Задача синтеза систем управления. Для оптимизации параметров САУЧ сформируем вектор $x \in R^p$ из p переменных параметров РЧ. Наложим на значения переменных параметров ограничения

$$a_i \leq x_i \leq b_i, \quad a_i = 0, \quad b_i = 100, \quad i = \overline{1, p} \quad (5)$$

и сформируем штрафную функцию

$$P(x) = \sum_{i=1}^p [\max\{0, a_i - x_i\} + \max\{0, x_i - b_i\}]. \quad (6)$$

В задаче многокритериального параметрического синтеза также учитываются условия качества процесса изменения частоты:

$$\sigma(x) \leq \sigma_m, \quad \zeta(x) \leq \zeta_m, \quad \min t_c(x), \quad (7)$$

где $\sigma(x)$ и σ_m – максимальное отклонение частоты и его предельно допустимое значение, $\zeta(x)$ и ζ_m – максимальный размах колебаний частоты и его предельно допустимое значение, $t_c(x)$ – время установления процесса.

Задачу синтеза САУЧ поставим в виде задачи условной оптимизации (5), (7), которую будем решать методами векторной оптимизации [1-3]. На основании перечисленных условий сформируем области в пространстве переменных параметров R^p путем пересечения и вычитания множеств:

$$G_1 = \{x \mid a_i \leq x_i \leq b_i, i = \overline{1, p}\}, G_2 = \{x \mid \sigma(x) \leq \sigma_m\}, G_3 = \{x \mid \zeta(x) \leq \zeta_m\}; \quad (8)$$

$$D_1 = G_1, \quad D_2 = D_1 \cap G_2, \quad D_3 = D_2 \cap G_3; \quad (9)$$

$$H_0 = R^p \setminus D_1, \quad H_1 = D_1 \setminus D_2, \quad H_2 = D_2 \setminus D_3, \quad H_3 = D_3. \quad (10)$$

По выражениям (6)-(10) сформируем векторную целевую функцию

$$F(x) = \begin{cases} (0; P(x)), & x \in H_0; \\ (1; \sigma(x) - \sigma_m), & x \in H_1; \\ (2; \zeta(x) - \zeta_m), & x \in H_2; \\ (3; \tau(x)), & x \in H_3; \end{cases} \quad (11)$$

где $\tau(x) = t_c(x)/T_f$ – относительное значение времени установления процесса, T_f – время наблюдения. Функцию (11) будем оптимизировать векторным методом Нелдера-Мида и модифицированным генетическим алгоритмом [3].

Синтез параметров регуляторов. Выполнена оптимизация параметров регуляторов частоты. Для задачи синтеза САУЧ заданы значения параметров: $\sigma_m = 2$, $\zeta_m = 0,5$, параметр зоны установившегося значения переменной y $\delta_y = 0,1$, время наблюдения $T_f = 8$ с, число шагов интегрирования $L = 800$. Для интегрирования СДУ применялся системный метод первой степени [3]. В табл. 2 и 3 для П (P), ПД (PD), ПИ (PI), ПИД (PID) и нечеткого ПИ (FPI) РЧ приведены оптимальные значения параметров и показателей качества переходных процессов. Значения остальных оптимальных параметров нечеткого регулятора: $K_u^* = 11,513$, $\xi_p^* = 0,494$, $\eta_p^* = 0,428$.

На рис. 4 представлены процессы изменения частоты, выраженной в процентах от номинального значения частоты, в оптимальных системах. Эти результаты позволяют сделать вывод, что ПИД регулятор и нечеткий ПИ регулятор с оптимальными значениями параметров обеспечивают наиболее быстрые переходные процессы с наименьшим отклонением частоты и нулевой статической ошибкой. По сравнению с результатами синтеза

линейных систем управления турбиной [1, 2] в нелинейных системах показатель размаха колебаний ζ^* снизился, а время процесса t_c^* увеличилось.

Таблица 2 – Оптимальные значения параметров и показателей качества

РЧ	K_p^*	λ_I^*, c^{-1}	λ_D^*, c^{-1}	σ^*	ζ^*	t_c^*, c
P	100,000	–	–	1,577	0,254	3,950
PD	100,000	–	1,170	1,532	0,172	3,658
PI	100,000	14,984	–	1,567	0,442	4,257
PID	100,000	13,349	1,124	1,525	0,275	3,828
FPI	9,614	20,027	–	1,294	0,378	3,452

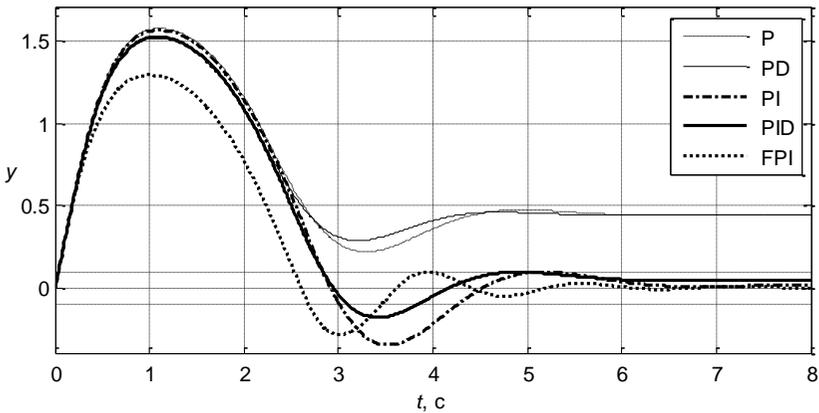


Рис. 4 – Изменение частоты при различных регуляторах

На рис. 5 представлен процесс оптимизации векторной функции (11) от параметров ПИД регулятора, полученный векторным методом Нелдера-Мида с начальным шагом $h=1$ при $x_2 = K_p$, $x_1 = \lambda_I$, $x_3 = \lambda_D$. Отображены лучшие точки поиска, начальная точка $x^{(0)} = (1; 1)$ отмечена кругом, конечная – ромбом. На рис. 6 представлен процесс оптимизации параметров ПИД регулятора для второй проекции $F_2(x)$ векторной функции (11), полученный методом Нелдера-Мида при $K_p = 100$, $x_1 = \lambda_I$, $x_2 = \lambda_D$ из начальной точки $x^{(0)} = (10; 1)$. При этом первая проекция функции (11) $F_1(x) = 3$, что соответствует выполнению всех ограничений задачи оптимизации. Это означает, что на рис. 6 представлен график относительного времени $\tau(x)$, который позволяет проанализировать зависимость совместного влияния параметров λ_I и λ_D на $\tau(x)$ в окрестности оптимальной точки.

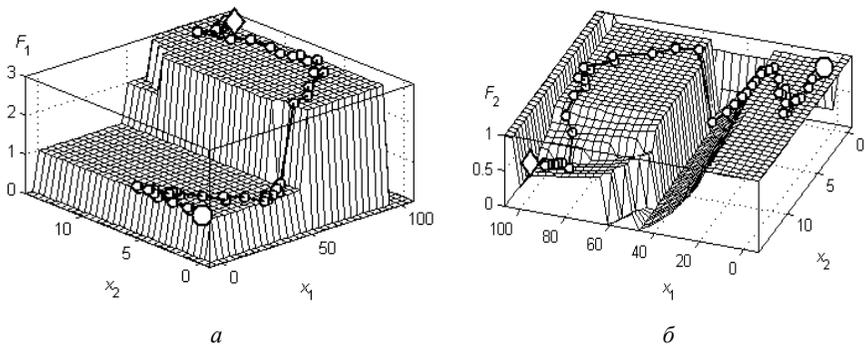


Рис. 5 – Оптимизация параметров ПИД регулятора при $\lambda_D = \lambda_D^*$: а – $F_1(x)$; б – $F_2(x)$

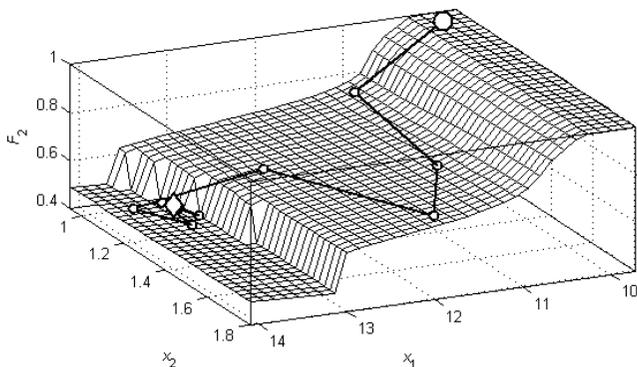


Рис. 6 – Оптимизация параметров ПИД регулятора при $K_p = 100$

На рис. 7 представлены процессы изменения переменных состояния оптимальной САУЧ с ПИД регулятором, полученные при входном возмущающем воздействии $v_s = -0,4$. Переменная ЗЭП ξ_y после небольших колебаний устанавливается в нулевое значение. Переменная ОЗ $\sigma_s(t)$ уменьшается, затем увеличивается и также устанавливается в нулевое значение. Переменная сервомотора $\mu_m(t)$, быстро уменьшаясь, достигает нижнего граничного значения, а затем увеличивается и после колебаний переходит к установившемуся значению $-0,4$. Переменные давления пара в емкостях турбины π_1, π_2, π_3 и π_4 положительны. Переменная мощности турбины $v(t)$ после быстро затухающих колебаний стремится к значению $-0,4$. Переменная частоты $y(t)$ после затухающих колебаний возвращается в

нулевое значение. Сигнал ПИД регулятора $u(t)$ уменьшается, а затем после колебаний устанавливается на значении $-0,4$.

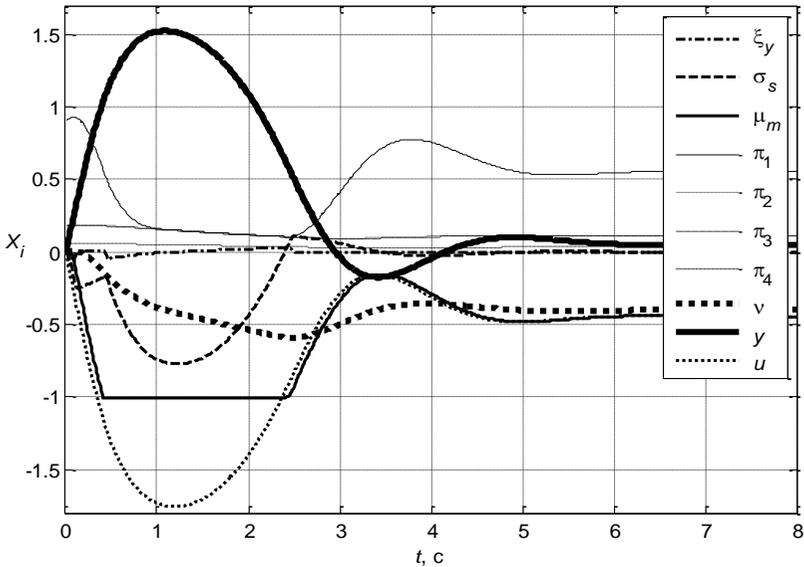


Рис. 7 – Процессы в оптимальной системе с ПИД регулятором

Выводы. Построена нелинейная модель следящего привода турбины, учитывающая упоры подвижных элементов. Разработаны нелинейные модели для систем стабилизации частоты вращения ротора паровой турбины в пространстве состояний с различными стандартными и нечетким регуляторами частоты. Результаты параметрического синтеза систем стабилизации частоты показали, что самыми эффективными являются ПИД регулятор и нечеткий ПИ регулятор, которые обеспечивают наиболее быстрые переходные процессы с наименьшим отклонением частоты.

Список литературы: 1. Федянина К. Б. Оптимизация следящего привода и систем управления паровой турбиной с использованием генетических алгоритмов / К. Б. Федянина, Е. А. Кучер, В. П. Северин // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2009. – Ч. 5. – С. 86–91. 2. Северин В. П. Синтез систем автоматического управления энергоблока АЭС с нечеткими регуляторами генетическими алгоритмами / В. П. Северин, Х. С. М. Джафари, В. Ф. Чернай // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2010. – Ч. 1. – С. 147–152. 3. Северин В. П. Векторная оптимизация систем автоматического управления генетическими алгоритмами / В. П. Северин // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2009. – Ч. 5. – С. 80–85.

Надійшла до редколегії 15.05.2012