

УДК 62-5: 620.9

В. П. Северин, Е. Н. Никулина, В. Ф. Чернай, К. Б. Годлевская

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

г. Харьков, Украина, e-mail: severinv@mail.ru

МНОГОЦЕЛЕВОЙ СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ АЭС ПО ПРЯМЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА

Построены нелинейные математические модели систем автоматического управления паровой турбиной АЭС К-1000-60/1500 в пространстве состояний с различными регуляторами. Предложена векторная целевая функция для многоцелевой оптимизации систем управления паровой турбиной. Представлены результаты многоцелевого параметрического синтеза нелинейных систем стабилизации частоты. Библ. 2, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: паровая турбина, системы автоматического управления, нелинейные модели, регуляторы, оптимизация

Побудовані нелінійні математичні моделі систем автоматичного керування паровою турбіною К-1000-60/1500 в просторі станів з різними регуляторами. Запропонована векторна цільова функція для багатоцільової оптимізації систем керування паровою турбіною. Представлені результати багатоцільового параметричного синтезу нелінійних систем стабілізації частоти. Бібл. 2, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: парова турбіна, системи автоматичного керування, нелінійні моделі, регулятори, оптимізація

Введение

Основной задачей системы автоматического управления (САУ) паровой турбиной К-1000-60/1500 энергоблока атомной электростанции (АЭС) является стабилизация частоты вращения ротора турбины при различных возмущающих воздействиях [1]. Сигнал управления паровой турбиной формируется регулятором частоты (РЧ), который обычно является ПИД регулятором [2]. Показатели качества системы автоматического управления частотой (САУЧ) вращения ротора турбины во многом определяют качество электрической энергии, вырабатываемой энергоблоком АЭС.

Постановка задачи и цель работы

Цель данной работы состоит в многоцелевом синтезе систем управления паровой турбиной К-1000-1500/60 при различных законах управления.

Обозначим набор переменных параметров задачи параметрического синтеза САУ вектором $x = (x_1, x_2, \dots, x_p) \in R^p$. Прямые показатели качества (ППК) САУ определим по математическим моделям систем, которые представлены в виде систем дифференциальных уравнений (СДУ):

$$dX/dt = f(x, X, u), \quad X(0) = X_0, \quad y = C(x)X, \quad (1)$$

где X – вектор состояния;

u – входное воздействие;

y – управляемая переменная;

$f(x, X, u)$ – векторная функция формирования модели нелинейной САУ; X_0 – вектор начальных условий.

Частные ППК – максимальное отклонение от установившегося значения $\sigma(x)$, размах колебаний $\zeta(x)$, время регулирования $t_c(x)$ и его относительное значение $\tau(x) = t_c(x)/T_f$ вычислим интегрированием СДУ (1) матричными методами. Здесь $[0; T_f]$ – интервал интегрирования. Задачу многоцелевого параметрического синтеза нелинейных САУ сформулируем как задачу условной оптимизации:

$$a_i \leq x_i \leq b_i, \quad i = \overline{1, p}; \quad \sigma(x) \leq \sigma_m, \quad \zeta(x) \leq \zeta_m; \quad \tau(x) \rightarrow \min.$$

Для учета приоритета ограничений сформируем области:

$$G_1 = \{x \mid a_i \leq x_i \leq b_i, i = \overline{1, p}\}, \quad G_2 = \{x \mid \sigma(x) \leq \sigma_m\}, \quad G_3 = \{x \mid \zeta(x) \leq \zeta_m\}; \quad D_1 = G_1, \\ D_2 = D_1 \cap G_2, \quad D_3 = D_2 \cap G_3; \quad H_0 = R^p \setminus D_1, \quad H_1 = D_1 \setminus D_2, \quad H_2 = D_2 \setminus D_3, \quad H_3 = D_3.$$

С использованием операции срезки $v_+ = \max\{v, 0\}$ введем скалярную штрафную функцию

$$P(x) = \sum_{i=1}^p [(a_i - x_i)_+ + (x_i - b_i)_+].$$

Определим векторную целевую функцию

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

Эта функция разрывная и многоэкстремальная, поэтому для повышения надежности синтеза САУ использованы методы прямого поиска и генетические алгоритмы (ГА). Оптимизация функции (2) выполняется на основе сравнения ее значений $U = (U_1; U_2)$ и $V = (V_1; V_2)$ операцией «лучше»:

$$U < V = \begin{cases} 1, & U_1 > V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 < V_2; \\ 0, & U_1 < V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 \geq V_2. \end{cases} \quad (3)$$

Для оптимизации векторной целевой функции (2) разработаны векторные методы адаптации шага поиска, Хука-Дживса, Нелдера-Мида, модифицированный бинарный ГА и комбинированный ГА с методом Нелдера-Мида. В ГА используется ранговая селекция с принципом рулетки: популяция сортируется сравнением значений векторной функции операцией (3).

Модели паровой турбины и регуляторов. Линейная и нелинейная модели паровой турбины как объекта управления при сбросе нагрузки имеют вид [1, 2]:

$$dX_T/dt = A_T X_T + B_{Tu} u + B_{Tv} v_s, \quad dX_T/dt = f_T(X_T, u, v_s), \quad X_T(0) = X_{T0}, \\ v = f_v(X_T), \quad \varphi = C_T X_T, \quad (4)$$

где X_T – вектор состояния турбины;

A_T, B_{Tu}, B_{Tv}, C_T – матрицы постоянных параметров; u – сигнал регулятора; v_s – возмущение нагрузки;

$f_T(X_T, u, v_s)$ – векторная функция формирования нелинейной модели; X_{T0} – вектор начальных условий;

v – переменная мощности турбины;

$f_v(X_T)$ – функция для вычисления мощности турбины;

φ – переменная частоты вращения ротора.

Линейные ПИД регуляторы включают пропорциональный (П), интегральный (И), дифференциальный (Д) регуляторы и по ошибке $\varepsilon(t)$ формируют управление $u = u(t)$ путем сложения u_P, u_I, u_D , которые определяются уравнениями при нулевых начальных условиях:

$$u_P(t) = K_P \varepsilon(t); \quad du_I/dt = \lambda_I \varepsilon; \quad dv_D/dt = -\lambda_D (v_D + K_D \varepsilon), \quad u_D = v_D + K_D \varepsilon,$$

где $K_P, \lambda_I = 1/T_I, \lambda_D = 1/T_D, K_D = 10$ – параметры регуляторов,

T_I и $\tau_D = K_D T_D$ – постоянные времени И и идеального Д регуляторов, $K_P, \lambda_I, \lambda_D \in [0; 100]$.

ПИ и ПИД регуляторам отвечают векторы параметров $x = (K_P, \lambda_I)$ и $x = (K_P, \lambda_I, \lambda_D)$.

Нечеткий П регулятор (рис. 1) использует систему нечеткого вывода (СНВ), которая включает базу правил и блоки фазификации, нечеткого вывода и дефазификации.



Рис. 1

Функции принадлежности входной ξ и выходной η переменных СНВ представлены на рис. 2, где $\xi_n = -\xi_p$, $\eta_n = -\eta_p$. Вектор переменных параметров $x = (K_P, K_u, \xi_p, \eta_p)$; $K_P, K_u \in [0; 100]$; $\xi_p, \eta_p \in [0; 1]$.

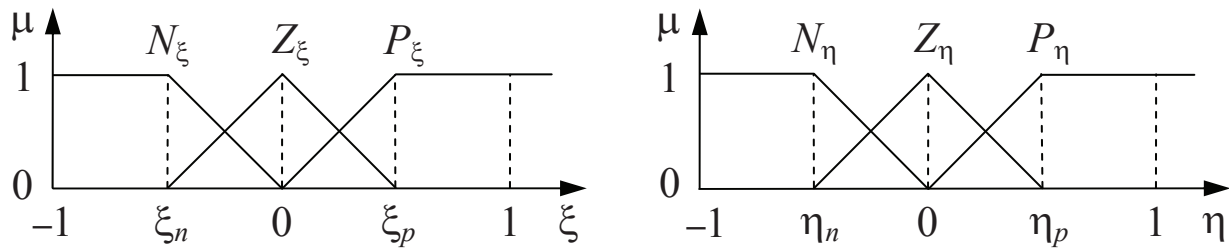


Рис. 2

Простейшая база правил имеет вид: 1) если $\xi = N_\xi$, то $\eta = N_\eta$; 2) если $\xi = Z_\xi$, то $\eta = Z_\eta$; 3) если $\xi = P_\xi$, то $\eta = P_\eta$. Нечеткий П регулятор формирует управление $u_{FP} = f_F(\xi_p, \eta_p, K_P \varepsilon) K_u$.

Моделирование систем управления турбиной. На основании нелинейной модели паровой турбины как объекта управления (4) построим нелинейные модели САУЧ при задающем номинальном значении частоты $\varphi_s = 0$ и ошибке $\varepsilon = \varphi_s - \varphi$ с разными РЧ:

$$dX_C/dt = f_C(X_C, v_s), \quad \varphi = C_C X_C,$$

где индекс C отвечает типу регулятора частоты.

Модель САУЧ с П регулятором определим на основании нелинейной СДУ паровой турбины как объекта управления при управляющем сигнале $u = u_P$:

$$dX_T/dt = f_T(X_T, K_P(\varphi_s - \varphi), v_s), \quad \varphi = C_T X_T.$$

Отсюда для пропорционального регулятора имеем:

$$X_P = X_T, \quad f_P(X_P, K_P(\varphi_s - \varphi), v_s) = f_T(X_T, K_P(\varphi_s - \varphi), v_s), \quad C_P = C_T.$$

Моделирование САУЧ с ПИ регулятором выполним при $u = u_P + u_I$:

$$\begin{cases} dX_T/dt = f_T(X_T, K_P(\varphi_s - \varphi) + u_I, v_s), \\ du_I/dt = \lambda_I(\varphi_s - \varphi). \end{cases}$$

Объединяя переменные состояния, имеем:

$$X_{PI} = \begin{pmatrix} X_T \\ u_I \end{pmatrix}, \quad f_{PI}(X_{PI}, v_s) = \begin{pmatrix} f_T(X_T, K_P(\varphi_s - \varphi) + u_I, v_s) \\ \lambda_I(\varphi_s - \varphi) \end{pmatrix}, \quad C_{PI} = (C_T \quad 0).$$

Модель САУЧ с ПД регулятором определим при $u = u_P + u_D$:

$$\begin{cases} dX_T/dt = f_T(X_T, (K_P + K_D)(\varphi_s - \varphi) + v_D, v_s), \\ dv_D/dt = -\lambda_D[v_D + K_D(\varphi_s - \varphi)]. \end{cases}$$

Объединение переменных состояния дает:

$$X_{PD} = \begin{pmatrix} X_T \\ v_D \end{pmatrix}, \quad f_{PD}(X_{PD}, v_s) = \begin{pmatrix} f_T(X_T, (K_P + K_D)(\varphi_s - \varphi) + v_D, v_s) \\ -\lambda_D[v_D + K_D(\varphi_s - \varphi)] \end{pmatrix}, \quad C_{PD} = (C_T \quad 0).$$

Модель САУЧ с ПИД регулятором построим при $u = u_P + u_I + u_D$:

$$\begin{cases} dX_T/dt = f_T(X_T, (K_P + K_D)(\varphi_s - \varphi) + u_I + v_D, v_s), \\ du_I/dt = \lambda_I(\varphi_s - \varphi), \\ dv_D/dt = -\lambda_D[v_D + K_D(\varphi_s - \varphi)]. \end{cases}$$

Объединение переменных состояния приводит к матрицам:

$$X_{PID} = \begin{pmatrix} X_T \\ u_I \\ v_D \end{pmatrix}, \quad f_{PID}(X_C, v_s) = \begin{pmatrix} f_T(X_T, (K_P + K_D)(\varphi_s - \varphi) + u_I + v_D, v_s) \\ \lambda_I(\varphi_s - \varphi) \\ -\lambda_D[v_D + K_D(\varphi_s - \varphi)] \end{pmatrix}, \quad C_{PID} = (C_T \quad 0 \quad 0).$$

Модель САУЧ с нечетким ПИ регулятором построим по линейной модели турбины (4) при сигнале управления в виде суммы $u = u_{FP} + u_I$:

$$dX_{PI}/dt = f_{FPI}(X_{PI}, v_s), \quad \varphi = C_{PI}X_{PI},$$

$$f_{FPI}(X_{PI}, v_s) = \begin{pmatrix} A_T X_T + B_{Tu}(f_F(\xi_p, \eta_p, (\varphi_s - \varphi))K_u + u_I) + B_{Tv}v_s \\ \lambda_I(\varphi_s - \varphi) \end{pmatrix}.$$

Вектор переменных параметров такого регулятора $x = (K_P, \lambda_I, K_u, \xi_p, \eta_p)$.

Модель САУЧ с нечетким ПИД регулятором построим при сигнале управления в виде суммы сигнала нечеткого П регулятора, линейных И и Д регуляторов $u = u_{FPI} + u_I + u_D$:

$$dX_{PID}/dt = f_{FPID}(X_{PID}, v_s), \quad \varphi = C_{PID}X_{PID},$$

$$f_{FPID}(X_{PID}, v_s) = \begin{pmatrix} A_T X_T + B_{Tu}(f_F(\xi_p, \eta_p, (\varphi_s - \varphi))K_u + u_I) + B_{Tv}v_s \\ \lambda_I(\varphi_s - \varphi) \\ -\lambda_D[v_D + K_D(\varphi_s - \varphi)] \end{pmatrix}.$$

Вектор переменных параметров регулятора $x = (K_P, \lambda_I, \lambda_D, K_u, \xi_p, \eta_p)$.

Модель САУЧ с нелинейной моделью турбины и нечетким ПИ регулятором имеет вид:

$$dX_{PI}/dt = f_{FPI}(X_{PI}, v_s), \quad \varphi = C_F X_F,$$

$$f_{FPI}(X_{PI}, v_s) = \begin{pmatrix} f_T(X_T, f_F(\xi_p, \eta_p, (\varphi_s - \varphi))K_u + u_I, v_s) \\ \lambda_I(\varphi_s - \varphi) \end{pmatrix}.$$

Аналогично получена модель САУЧ вращения ротора турбины с нечетким ПИД регулятором:

$$dX_{PID}/dt = f_{FPID}(X_{PID}, v_s), \quad \varphi = C_{PID}X_{PID},$$

$$f_{FPID}(X_{PID}, v_s) = \begin{pmatrix} f_T(X_T, f_F(\xi_p, \eta_p, (\varphi_s - \varphi))K_u + u_I, v_s) \\ \lambda_I(\varphi_s - \varphi) \\ -\lambda_D[v_D + K_D(\varphi_s - \varphi)] \end{pmatrix}.$$

Синтез систем управления турбиной. Для оптимизации параметров САУЧ на основе линейной модели паровой турбины сформируем вектор $x \in R^p$ из переменных параметров нечетких РЧ. Зададим входное возмущающее воздействие $v_s = -1(t)$. Выходной координатой моделей является отклонение частоты вращения ротора турбины от номинального значения в процентах $y = 100\varphi$. Для синтеза нечетких САУЧ путем оптимизации векторной целевой функции (2) заданы значения параметров: ограничения ППК $\sigma_m = 4$ и $\zeta_m = 1$, параметр зоны установившегося значения частоты $\delta_y = 0,1$, время интегрирования СДУ $T_f = 8$ с, число шагов интегрирования $L = 200$. В связи с многоэкстремальностью целевых функций в задачах оптимизации нечетких САУЧ для синтеза таких систем применим векторный комбинированный ГА. Результаты синтеза нечетких САУЧ на основе линейной модели турбины представлены в табл. 1 и на рис. 3. В табл. 1 для нечетких ПИ (FPI) и ПИД (FPID) регуляторов даны оптимальные значения переменных параметров нечетких регуляторов K_P^* , λ_I^* , λ_D^* , K_u^* , ξ_p^* , η_p^* и соответствующие им значения ППК – максимального отклонения σ^* , размаха колебаний ζ^* и времени регулирования t_c^* .

Таблица 1

РЧ	K_P^*	λ_I^*, c^{-1}	λ_D^*, c^{-1}	K_u^*	ξ_p^*	η_p^*	σ^*	ζ^*	t_c^*, c
FPI	8,602	48,011	—	37,116	0,695	0,708	2,546	0,902	3,178
FPID	15,886	49,600	7,678	14,189	0,634	0,611	2,477	0,814	3,040

Эти результаты показывают, что для поставленных задач оптимизации САУЧ удовлетворены все ограничения. Максимальное отклонение частоты составило 2,546 % для системы управления с нечетким ПИ регулятором, а минимальное – 2,477 % для системы с нечетким ПИД регулятором, что существенно ниже, чем в системах с линейными регуляторами [1, 2].

Соответствующие табл. 1 переходные процессы отклонения частоты вращения ротора турбины от номинального значения представлены на рис. 3. Нечеткий ПИД регулятор эффективнее нечеткого ПИ регулятора, но их отличие не такое значительное, как для линейных ПИД и ПИ регуляторов [1, 2].

Вычислим значения параметров линейных регуляторов для систем управления частотой вращения ротора паровой турбины путем многоцелевого синтеза показателей качества на основании нелинейной модели турбины. Это позволит сравнить использование линейной и нелинейной моделей турбины для решения задач синтеза регуляторов.

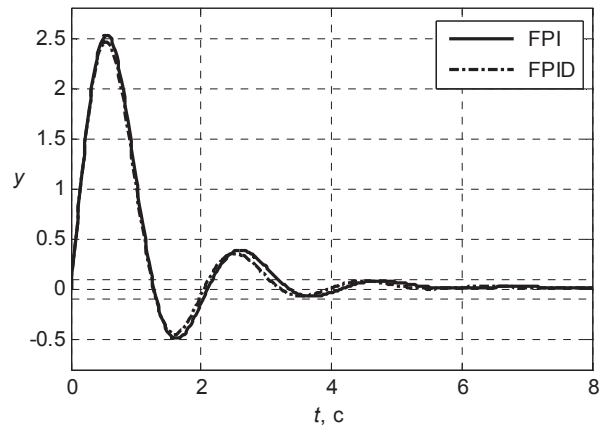


Рис. 3

Анализ переходных процессов, проведенный для линейных и нелинейных моделей САУ, показал, что для нелинейных моделей характер процессов такой же, как и для линейных моделей [1, 2].

Для задач синтеза нелинейных САУЧ с линейными регуляторами 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 $L = 800$, входное возмущающее воздействие $v_s = -0,4$. Для интегрирования СДУ применялся системный метод первой степени.

В табл. 2 и на рис. 4 для П (P), ПД (PD), ПИ (PI), ПИД (PID) РЧ приведены оптимальные значения параметров и показателей качества переходных процессов.

Таблица 2

РЧ	K_p^*	λ_I^*, c^{-1}	λ_D^*, c^{-1}	σ^*	ζ^*	t_c^*, c
P	100,00	—	—	1,577	0,254	3,950
PD	100,00	—	1,170	1,532	0,172	3,658
PI	100,00	14,984	—	1,567	0,442	4,257
PID	100,00	13,349	1,124	1,525	0,275	3,828

Сравнивая эти результаты с результатами синтеза линейных систем [1, 2], можно сделать вывод, что оптимальное значение коэффициента пропорциональной составляющей ошибки K_p^* также достигло значения верхнего ограничения этого параметра $b_1 = 100$. Оптимальные значения других параметров λ_I^* и λ_D^* находятся внутри заданной для них допустимой области изменения параметров, причем оптимальные значения параметра λ_D^* , полученные путем синтеза на основании линейной и нелинейной моделей, близки, а значения параметра λ_I^* для нелинейной модели гораздо ниже.

По сравнению с результатами синтеза линейных систем управления турбиной в нелинейных системах показатель размаха колебаний ζ^* снизился, а время процесса t_c^* увеличилось.

Результаты решения задач оптимизации систем управления частотой, полученные на основании нелинейной модели турбины, показали, что, как и при линейных моделях, самым эффективным является ПИД регулятор, который обеспечивает наиболее быстрый

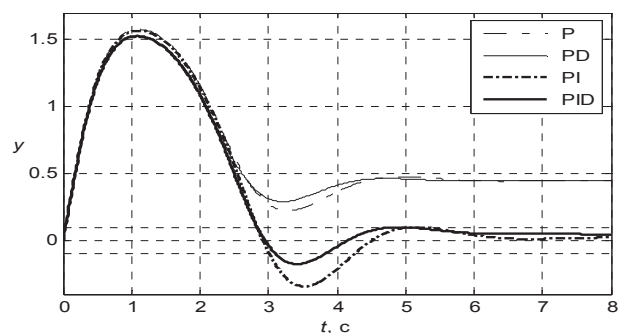


Рис. 4

переходный процесс с наименьшим отклонением частоты.

Для задачи синтеза САУЧ с нечеткими регуляторами на основании нелинейной модели паровой турбины 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 $L = 800$, входное возмущающее воздействие $v_s = -0,4$. В табл. 3 и на рис. 5 представлены результаты синтеза нечетких систем управления частотой на основе нелинейной модели турбины.

Таблица 3

РЧ	K_P^*	λ_I^*, c^{-1}	λ_D^*, c^{-1}	K_u^*	ξ_p^*	η_p^*	σ^*	ζ^*	t_c^*, c
FPI	9,614	20,027	—	11,513	0,494	0,428	1,294	0,378	3,452
FPID	14,314	24,542	1,404	14,101	0,320	0,632	1,204	0,359	3,282

В табл. 3 для нечетких ПИ (FPI) и ПИД (FPID) регуляторов приведены оптимальные значения переменных параметров нечетких регуляторов и соответствующие им значения ППК. Максимальное отклонение частоты составило 1,294 % для системы управления с нечетким ПИ регулятором, а минимальное – 1,204 % для системы с нечетким ПИД регулятором. Сравнивая эти результаты с результатами синтеза нечетких САУЧ на основании линейной модели турбины, представленные в табл. 1, можно заметить, что оптимальные значения параметров регуляторов частоты существенно уменьшились. Существенно снизились и показатели колебательности процессов. По сравнению с результатами синтеза линейных регуляторов, полученных на основании нелинейной модели турбины с тем же возмущающим воздействием $v_s = -0,4$ и представленных в табл. 2, все показатели качества нечетких регуляторов оказались гораздо лучше показателей линейных регуляторов.

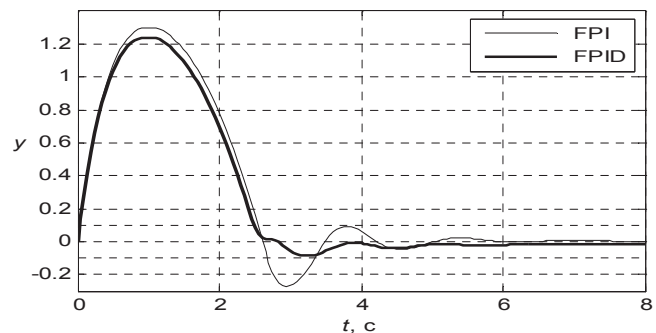


Рис. 5

На основании проведенного анализа прямых показателей качества и переходных процессов отклонения частоты можно заключить, что при сбросе нагрузки нечеткие регуляторы частоты с оптимальными значениями параметров обеспечивают большее быстродействие САУЧ с существенно меньшим максимальным отклонением частоты от номинального значения.

Выводы

Проведен многоцелевой синтез систем управления турбиной К-1000-60/1500 с линейными и нечеткими регуляторами на основании линейной и нелинейной моделей паровой турбины. Результаты синтеза нечетких систем управления частотой показывают, что все показатели качества нечетких регуляторов лучше показателей линейных регуляторов. На основании вычислительных экспериментов с различными моделями паровой турбины АЭС и различными регуляторами можно утверждать, что нечеткие регуляторы, обеспечивающие нелинейный закон управления, эффективнее линейных регуляторов.

Список литературы

- Северин В. П., Годлевская К. Б., Чернай В. Ф. Оптимизация нелинейных систем автоматического управления паровой турбиной АЭС // Технічна електродинаміка. – 2012. – Ч. 1. – С. 144–149.
- Северин В. П., Никулина Е. Н., Годлевская К. Б. Многоцелевая оптимизация систем управления паровой турбиной К-1000-60/1500 на основе векторной целевой функции // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ», 2013. – № 13(987). – С. 24–29.

**MULTI-OBJECTIVE SYNTHESIS OF NONLINEAR CONTROL
SYSTEMS OF STEAM TURBINE OF ATOMIC PLANT ON DIRECT
QUALITY INDEXES**

V. P. Severin, Ye. N. Nikulina, V. F. Chernai, K. B. Godlevskaia
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
e-mail: severinv@mail.ru

Nonlinear mathematical models of automatic control systems of steam turbine of atomic plant K-1000-60/1500 are built in the space of states with different regulators. Vector objective function is proposed for multi-objective optimization of control systems of steam turbine. The results of multi-objective parametric synthesis of nonlinear systems of frequency stabilization are presented. References 2, tables 3, figures 5.

Key words: *steam turbine, automatic control systems, nonlinear models, controllers, optimization*

1. Severin V. P., Godlevskaia K. B., Chernai V. F. Optimization nonlinear automatic control systems of steam turbine of atomic plant // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – P. 1. – P. 144–149. (Rus.)

2. Severin V. P., Nikulina Ye. N., Godlevskaia K. B. Multi-objective optimization of control systems of steam turbine K-1000-60/1500 on the base of vector objective function // Visnyk Natsionalnogo Universytetu «Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. – № 13(987). – С. 24–29. (Rus.)