

**В. П. СЕВЕРИН**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
**К. Б. ФЕДЯНИНА**, аспирант НТУ «ХПИ»

### ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Побудована математична модель системи автоматичного керування частотою обертання ротора парової турбіни енергоблоку АЕС з нечітким ПІ регулятором. Представлені результати параметричного синтезу регуляторів, що отримані комбінованим генетичним алгоритмом.

Построена математическая модель системы автоматического управления частотой вращения ротора паровой турбины энергоблока АЭС с нечетким ПИ регулятором. Представлены результаты параметрического синтеза регуляторов комбинированным генетическим алгоритмом.

Mathematical model of automatic control system for rotation frequency rotor of steam turbine of atomic power plant with fuzzy PI controller is built. Results of parametric synthesis of controllers by combined genetic algorithm are presented.

**Введение.** Для систем автоматического управления (САУ) паровыми турбинами АЭС актуальна задача синтеза оптимального регулятора, обеспечивающего наилучшие прямые показатели качества САУ [1, 2]. Среди стандартных линейных регуляторов частоты вращения ротора турбины наилучшим является ПИД регулятор [3]. Для повышения качества систем управления паровыми турбинами перспективно использование регуляторов, построенных на основании нечеткой логики [2, 4]. В задачах параметрического синтеза оптимальных САУ с нечеткими регуляторами характерно наличие множества локальных экстремумов, что приводит к необходимости использования методов глобального поиска, в частности – генетических алгоритмов [4–6]. Особенности задач параметрического синтеза систем управления приводят к необходимости модификации генетических алгоритмов [7, 8].

Цель статьи состоит в представлении методов, моделей и результатов параметрического синтеза нечеткого регулятора в системе управления паровой турбиной АЭС К-1000-60/1500 с использованием модификации генетического алгоритма и сравнении нечеткого регулятора с ПИД регуляторами.

**Постановка задачи синтеза оптимальной САУ.** Для задачи параметрического синтеза системы автоматического управления на основании ограничений вектора переменных параметров  $x \in R^p$  введем области [8]:

$$G_1 = \{x \mid a \leq x \leq b\}; \quad G_2 = \{x \mid \alpha_i(x) > 0, i = \overline{0, n}\}; \quad G_k = \{x \mid \rho_{k-1}(x) > 0\}, \quad k = \overline{3, n};$$

$$D_1 = G_1; \quad D_k = D_{k-1} \cap G_k, \quad k = \overline{2, n}; \quad H_0 = R^p \setminus D_1; \quad H_k = D_k \setminus D_{k+1}, \quad k = \overline{1, n-1};$$

где  $a$  и  $b$  – векторы нижних и верхних ограничений для вектора  $x$ ;  $\alpha_i(x)$  – коэффициенты характеристического многочлена линеаризованной САУ;  $n$  – порядок САУ;  $\rho_k(x)$  – элементы первого столбца таблицы Рауса. Таким образом, в области  $D_n$  выполняются условия технической реализуемости и устойчивости САУ, которым соответствуют скалярные штрафные функции:

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

Для удержания процесса синтеза в допустимой области использована векторная штрафная функция, первая проекция которой  $F_1(x)$  соответствует количеству выполненных ограничений, а вторая проекция  $F_2(x)$  представляет штраф нарушенного ограничения:

$$F_S(x) = \begin{cases} (0; P(x)), & x \in H_0, \\ (1; S(x)), & x \in H_1, \\ (k; -\rho_k(x)), & x \in H_k, \quad k = \overline{2, n-1}. \end{cases} \quad (1)$$

Переход в допустимую область системы управления сведен к оптимизации векторной функции (1) на основании сравнения двух ее произвольных значений  $U = (U_1; U_2)$  и  $V = (V_1; V_2)$  операцией «лучше»:

$$U < V = \begin{cases} 1, & (U_1 > V_1) \vee [(U_1 = V_1) \wedge (U_2 < V_2)], \\ 0, & (U_1 < V_1) \vee [(U_1 = V_1) \wedge (U_2 \geq V_2)]. \end{cases} \quad (2)$$

Для оценки качества САУ применим прямые показатели качества (ППК) [9]: перерегулирование  $\sigma(x)$ , размах колебаний  $\zeta(x)$ , время регулирования  $t_c(x)$  и его относительное значение  $\tau(x) = t_c(x)/T_f$ , где  $T_f$  – время наблюдения переходного процесса. Задачу синтеза системы управления по ППК сформулируем как задачу условной оптимизации:

$$x \in D_n, \quad \sigma(x) \leq \sigma_m, \quad \zeta(x) \leq \zeta_m, \quad \min \tau(x),$$

где  $\sigma_m$  и  $\zeta_m$  – заданные предельно допустимые значения ППК.

Для учета приоритета прямых показателей качества определим области:

$$G_{n+1} = \{x \mid \sigma(x) \leq \sigma_m\}, \quad G_{n+2} = \{x \mid \zeta(x) \leq \zeta_m\};$$

$$D_k = D_{k-1} \cap G_k, \quad k = \overline{n+1, n+2};$$

$$H_k = D_k \setminus D_{k+1}, \quad k = \overline{n, n+1}; \quad H_{n+2} = D_{n+2}.$$

Для синтеза системы управления по прямым показателям качества на основании функции (1) сформируем векторную целевую функцию

$$F(x) = \begin{cases} F_S(x), & x \notin D_n; \\ (n; \sigma(x) - \sigma_m), & x \in H_n; \\ (n+1; \zeta(x) - \zeta_m), & x \in H_{n+1}; \\ (n+2; \tau(x)), & x \in H_{n+2}. \end{cases} \quad (3)$$

**Синтез оптимальных регуляторов.** Пропорциональный (П), интегральный (И) и реализуемый дифференциальный (Д) регуляторы формируют управляющие действия  $u_p$ ,  $u_I$  и  $u_D$  на объект управления по ошибке  $\varepsilon$  согласно выражениям [8]:

$$u_p = K_p \varepsilon; \quad du_I/dt = \lambda_I \varepsilon; \quad dv_D/dt = -\lambda_D(v_D + K_D \varepsilon), \quad u_D = v_D + K_D \varepsilon, \quad (4)$$

где  $K_p$ ,  $\lambda_I$ ,  $\lambda_D$  и  $K_D$  – параметры регуляторов. По техническим условиям переменные в задаче синтеза параметры  $K_p$ ,  $\lambda_I$ ,  $\lambda_D \in [0; 100]$ ,  $K_D = 10$ .

Рис. 1 изображает схему нечеткого ПИ регулятора с системой нечеткого вывода (СНВ), которая показана на рис. 2 и включает базу правил, блоки фаззификации, нечеткого вывода и дефаззификации.

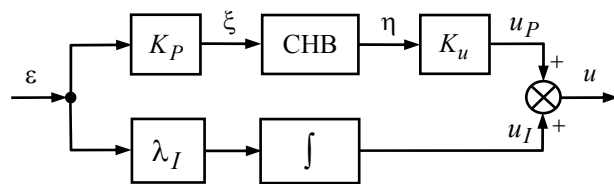


Рис. 1 – Схема нечеткого ПИ регулятора



Рис. 2 – Система нечеткого вывода

На рис. 3 показаны симметричные треугольные и трапециевидальные функции принадлежности входной  $\xi$  и выходной  $\eta$  переменных СНВ:  $\xi_n = -\xi_p$ ,  $\eta_n = -\eta_p$ .

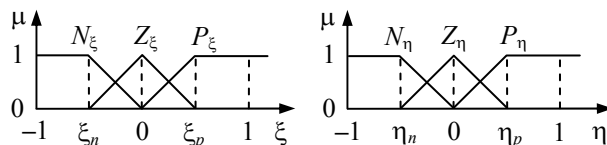


Рис. 3 – Функции принадлежности

Простейшая база правил СНВ содержит три правила:

$$1) \xi = N_\xi \Rightarrow \eta = N_\eta, \quad 2) \xi = Z_\xi \Rightarrow \eta = Z_\eta, \quad 3) \xi = P_\xi \Rightarrow \eta = P_\eta.$$

Управляющее действие  $u$  нечеткого ПИ регулятора формируется с помощью нелинейной функции СНВ  $f_F$  по выражениям (см. рис. 1):

$$u = u_p + u_I, \quad u_p = f_F(K_p \varepsilon, \xi_p, \eta_p) K_u, \quad du_I/dt = \lambda_I \varepsilon. \quad (5)$$

Вектор переменных параметров нечеткого ПИ регулятора включает пять параметров, которые могут принимать значения из заданных интервалов:

$$x = (K_p, \lambda_I, K_u, \xi_p, \eta_p); \quad K_p, \lambda_I, K_u \in [0; 100]; \quad \xi_p, \eta_p \in [0; 1].$$

Таким образом, модель системы с нечетким ПИ регулятором является нелинейной моделью. Для синтеза такой САУ целесообразно оптимизировать целевую функцию модифицированными генетическими алгоритмами.

**Модификация генетических алгоритмов.** Векторная целевая функция (3) является разрывной и многоэкстремальной, поэтому для повышения надежности синтеза САУ применим генетические алгоритмы [4–8].

Модификация генетических алгоритмов (ГА) выполнена по основным принципам этих алгоритмов [4–6]. Каждая особь популяции представлена хромосомой  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p)$  длины  $M = mp$ , состоящей из бинарных генов  $\xi_i = (\xi_{i1}, \xi_{i2}, \dots, \xi_{im})$  длины  $m = 32$ ,  $i = \overline{1, p}$ ,  $\xi_{ij} \in \{0; 1\}$  и определяющей вектор переменных  $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ .

Хромосомы  $\Pi = (\xi^{(1)}, \xi^{(2)}, \dots, \xi^{(N)})$ , точки  $P = (x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(N)})$ , значения векторной целевой функции  $\Phi = (F^{(1)}, F^{(2)}, \dots, F^{(N)})$  образуют популяцию размера  $N$ .

Хромосомы начальной популяции  $\Pi^{(0)}$  формируются случайно, для следующих популяций применяются генетические операторы: селекция, кроссовер, мутация. На  $k$ -той итерации формируется популяция особей, которой соответствуют массивы хромосом  $\Pi^{(k)}$ , точек  $P^{(k)}$  и значений целевой функции  $\Phi^{(k)}$ . Применяется ранговая селекция с принципом рулетки (*Roulette*): популяция сортируется сравнением значений векторной целевой функции (*Sort*); родительской особи сопоставляется сектор колеса рулетки, пропорциональный ее рангу; по принципу рулетки выбираются родители для скрещивания. Одноточечным кроссовером (*Crossover*) с последующей мутацией (*Mutate*) формируется новая популяция. Разработан модифицированный бинарный генетический алгоритм.

**Модифицированный бинарный ГА.** Входные параметры:  $a$  и  $b$  – векторы ограничений,  $N$  – размер популяции,  $m$  – длина гена,  $r_p$  – доля

родительских пар в популяции,  $r_m$  – доля мутации,  $N_k$  – предельное число итераций. Выходные параметры:  $x$  и  $F_x$  – лучшая точка и значение в ней векторной целевой функции. **1.** Положить  $k=1$ ,  $p = \dim(a)$ ,  $l = b - a$ ,  $M = m \cdot p$ . **2.** Вычислить  $N_p = [r_p \cdot N]$ ,  $n_p = [0,5 \cdot (N - N_p)]$ ,  $n_m = [(N - 1) \cdot r_m \cdot M]$ . **3.** Вычислить  $\Pi = \text{Round}(\text{Rand}(N, M))$ . **4.** Вычислить  $P = \text{Decod}(\Pi, a, l, m)$ . **5.** Для  $j = \overline{1, N}$  вычислить  $\Phi_j = F(P_j)$ . **6.** Положить  $(\Phi, J) = \text{Sort}(\Phi)$ ,  $\Pi = \Pi(J)$ ,  $P = P(J)$ ,  $\Pi_p = \Pi(1 : N_p)$ . **7.** Вычислить  $(N_1, N_2) = \text{Roulette}(N_p, n_p)$ . **8.** Вычислить  $(\pi_1, \pi_2) = \text{Crossover}(\Pi_p, N_1, N_2)$ . **9.** Положить  $\Pi = (\Pi_p, \pi_1, \pi_2)$ ,  $\Pi = \text{Mutate}(\Pi, n_m)$ . **10.** Вычислить  $P = \text{Decod}(\Pi, a, l, m)$ . **11.** Для  $j = \overline{1, N}$  вычислить  $\Phi_j = F(P_j)$ . **12.** Положить  $(\Phi, J) = \text{Sort}(\Phi)$ ,  $\Pi = \Pi(J)$ ,  $P = P(J)$ ,  $\Pi_p = \Pi(1 : N_p)$ . **13.** Положить  $x = P_1$ ,  $F_x = \Phi_1$ . **14.** Если  $k < N_k$ , положить  $k = k + 1$  и перейти к п. 7. **15.** Выход.

Основное отличие этого алгоритма от генетических алгоритмов для оптимизации скалярных целевых функций состоит в использовании значений векторной целевой функции для точек популяции и в сортировке этих значений на шагах 6 и 12 с применением операции сравнения векторов (2).

Генетические алгоритмы как методы глобальной оптимизации позволяют находить глобальный минимум целевой функции с небольшой точностью. Для повышения точности поиска разработан комбинированный генетический алгоритм, представляющий объединение бинарного генетического алгоритма и метода Нелдера-Мида [8].

**Моделирование САУ паровой турбиной для задачи синтеза.** Модель паровой турбины К-1000-60/1500 как объекта управления имеет вид [3]:

$$dX_T/dt = A_T X_T + B_{Tu} u + B_{Tv} v, \quad \varphi = C_T X_T, \quad (6)$$

где  $X_T$  – вектор состояния турбины;  $A_T$ ,  $B_{Tu}$ ,  $B_{Tv}$  и  $C_T$  – матрицы со значениями постоянных параметров турбины;  $u$  – входное управляющее воздействие регулятора частоты (РЧ);  $v$  – возмущающее воздействие по нагрузке турбины;  $\varphi$  – выходная переменная относительного отклонения частоты вращения ротора турбины от номинального значения; порядок модели  $n = 19$ .

Объединением модели (6) и выражений (4) при  $\varepsilon = -\varphi$  определены линейные модели САУ частотой (САУЧ) с ПИ и ПИД регуляторами для возмущающего воздействия  $v = -1(t)$ , соответствующему сбросу нагрузки турбины в номинальном режиме и переходу в режим холостого хода [3]:

$$dX/dt = A(x)X + Bv, \quad y = 100CX, \quad (7)$$

где  $y = 100\varphi$  – выходная переменная отклонения частоты в процентах.

Для системы автоматического управления частотой с ПИ регулятором

$$X = \begin{pmatrix} X_T \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A(x) = \begin{pmatrix} A_T - B_{Tu} K_P C_T & B_{Tu} \\ -\lambda_I C_T & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_{Tv} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = (C_T \quad 0),$$

где  $x = (K_P, \lambda_I)$  – вектор переменных параметров; порядок модели  $n = 20$ .

Для САУЧ с ПИД регулятором матрицы в модели (7) имеют вид:

$$X = \begin{pmatrix} X_T \\ u_I \\ v_D \end{pmatrix}, \quad A(x) = \begin{pmatrix} A_T - B_{Tu}(K_P + K_D)C_T & B_{Tu} & B_{Tu} \\ -\lambda_I C_T & 0 & 0 \\ \lambda_D K_D C_T & 0 & -\lambda_D \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_{Tv} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$C = (C_T \quad 0 \quad 0).$$

Порядок этой модели  $n = 21$ , вектор переменных  $x = (K_P, \lambda_I, \lambda_D)$ .

Модель с нечетким ПИ регулятором получена объединением модели (6) и выражений (5) при  $\varepsilon = -\varphi$

$$\frac{dX_F}{dt} = \begin{pmatrix} A_T X_T + B_{Tu}(f_F(-K_P \varphi, \xi_p, \eta_p) K_u + u_I) + B_{Tv} v_s \\ -\lambda_I \varphi \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Вектор переменных  $x = (K_P, \lambda_I, K_u, \xi_p, \eta_p)$ , порядок модели  $n = 20$ .

**Синтез регуляторов систем управления паровой турбиной.** Для синтеза САУЧ путем оптимизации целевой функции (3) заданы значения параметров: ограничения ППК  $\sigma_m = 4$  и  $\zeta_m = 1$ , параметр зоны установившегося значения частоты  $\delta_y = 0,1$ , время интегрирования систем дифференциальных уравнений (7) и (8)  $T_f = 20$  с, число шагов интегрирования  $L = 400$ .

В таблице для трех РЧ – ПИ (PI), ПИД (PID) и нечеткого ПИ (FPI) регуляторов приведены полученные комбинированным генетическим алгоритмом оптимальные значения параметров  $K_P^*$ ,  $\lambda_I^*$ ,  $\lambda_D^*$ ,  $K_u^*$ ,  $\xi_p^*$ ,  $\eta_p^*$  и соответствующие им значения ППК САУЧ  $\sigma^*$ ,  $\zeta^*$ ,  $t_c^*$ .

Результаты синтеза параметров регуляторов частоты

РЧ	$K_P^*$	$\lambda_I^*$	$\lambda_D^*$	$K_u^*$	$\xi_p^*$	$\eta_p^*$	$\sigma^*$	$\zeta^*$	$t_c^*$ , с
PI	100,0	26,5	—	—	—	—	3,47	1,00	5,19
PID	98,13	33,5	1,69	—	—	—	3,36	0,91	4,20
FPI	1,498	45,0	—	49,65	0,56	0,31	2,56	0,87	3,13

На рис. 4 представлены переходные процессы изменения переменной  $y$  для частоты вращения ротора паровой турбины в оптимальных системах, соответствующих приведенной таблице. Эти результаты позволяют сделать вывод, что нечеткий ПИ регулятор (FPI) с оптимальными значениями параметров обеспечивает наиболее быстрый переходный процесс с наименьшими значениями максимального отклонения частоты  $\sigma^*$  и размаха колебаний  $\zeta^*$ .

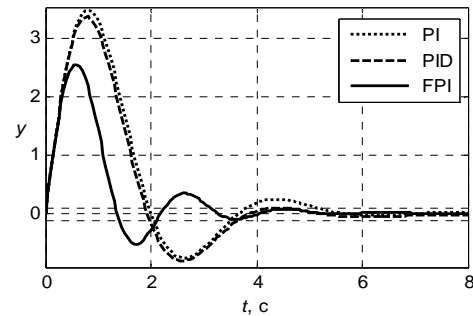


Рис. 4 – Переходные процессы с различными видами регуляторов

**Выводы.** Синтез параметров оптимальных регуляторов с учетом приоритета прямых показателей качества систем автоматического управления сведен к оптимизации векторной целевой функции, для чего модифицирован генетический алгоритм. Приведена математическая модель системы управления паровой турбиной с нечетким регулятором. Результаты синтеза параметров регуляторов частоты вращения ротора турбины показывают, что нечеткий ПИ регулятор обеспечивает переходный процесс с наименьшими максимальным отклонением частоты, размахом колебаний и временем регулирования.

**Список литературы:** 1. Северин В. П. Методы анализа и синтеза систем автоматического управления энергоблоков атомных электростанций / В. П. Северин // Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС. Одесса : Астропринт, – 2010. – С. 137-152. 2. Северин В. П. Синтез систем автоматического управления энергоблока АЭС с нечеткими регуляторами генетическими алгоритмами / В. П. Северин, Сейед Моджтаба Джафари Хенджани, В. Ф. Чернай // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. Ч. 1. – С. 147–152. 3. Федянина К. Б. Оптимизация следящего привода и систем управления паровой турбиной с использованием генетических алгоритмов / К. Б. Федянина, Е. А. Кучер, В. П. Северин // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2009. Ч. 5. – С. 86–91. 4. Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В. И. Гостев. – К. : Радиоаматор, 2005. – 708 с. 5. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы. Учебное пособие / Т. В. Панченко. – Астрахань : Изд. дом «Астраханский университет», 2007. – 88 с. 6. Alireza M. Genetic algorithms / M. Alireza. – Tehran : Naghoos, 2008. – 144 p. 7. Severin V. P. Application of Genetic Algorithms to Vector Optimization of the Automatic Control Systems / V. P. Severin // Intelligent Information and Engineering Systems. Information Science and Computing. Information Technologies and Knowledge. – 2009. N. 13. Vol. 3. – P. 90–97. 8. Джафари Хенджани Сейед Моджтаба Многокритериальный синтез нечетких систем автоматического управления генетическими алгоритмами / Сейед Моджтаба Джафари Хенджани, В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. Ч. 2. – С. 149–154. 9. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб. : Профессия, 2004. – 752 с.