

УДК 621:518.5

В.П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук; проф. НТУ «ХПИ»;
Е.Н. НИКУЛИНА, канд. техн. наук; ст. преп. НТУ «ХПИ»;
К.Б. ГОДЛЕВСКАЯ, аспирантка НТУ «ХПИ»

МНОГОЦЕЛЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ К-1000-60/1500 НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОЙ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ

Построены нелинейные математические модели систем автоматического управления паровой турбиной 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.

Ключевые слова: паровая турбина, система управления, математическая модель, многоцелевая оптимизация, векторная целевая функция.

Введение. Системы автоматического управления (САУ) паровыми турбинами постоянно совершенствуются [1, 2]. Основными целями синтеза САУ турбинами являются: выполнение условий технической реализуемости, обеспечение устойчивости САУ, ограничение максимального отклонения частоты вращения ротора, ограничение показателя колебаний частоты, максимальное быстродействие САУ [3]. Процесс многоцелевого синтеза целесообразно автоматизировать и объединить достижение всех намеченных целей в одном вычислительном процессе. Эта задача решена на основе векторных целевых функций для линейных моделей систем автоматического управления турбиной К-1000-60/1500 [3, 4]. Повышение точности расчета оптимальных САУ возможно при использовании нелинейных моделей систем, которые полнее учитывают особенности протекания реальных процессов управления [5].

Целью статьи является представление нелинейных моделей систем стабилизации частоты вращения ротора паровой турбины К-1000-60/1500 в пространстве состояний, а также результатов многоцелевого параметрического синтеза систем стабилизации частоты на основе векторной целевой функции.

Модель турбины как объекта управления. Принципиальная схема паровой турбины К-1000-60/1500

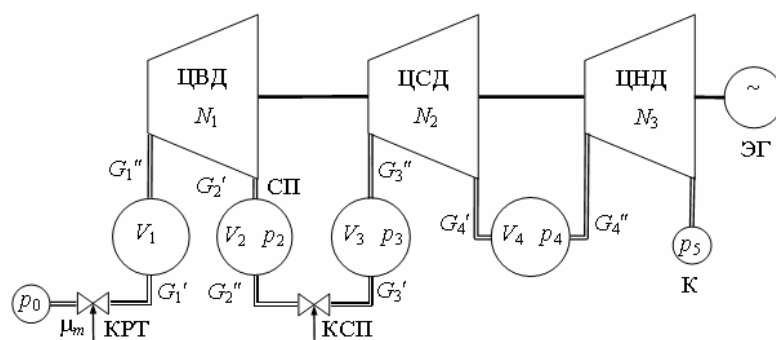


Рис. 1 – Принципиальная схема паровой турбины К-1000-60/1500

представлена на рис. 1 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. Пар аккумулируется в четырех основных объемах под давлением p_1, p_2, p_3, p_4 .

Пар под давлением p_0 поступает в КРТ. Следящий привод через систему рычагов воздействует на КРТ, изменяя подачу пара в ЦВД. Пар аккумулируется в четырех основных объемах под давлением p_1, p_2, p_3, p_4 .

© В.П. Северин, Е.Н. Никулина, К.Б. Годлевская, 2013

Энергия пара превращается в механическую энергию вращения ротора турбины и электрического генератора (ЭГ) с круговой частотой ω .

Перейдем от исходных к относительным переменным состояния: давления $\pi_k = p_k/p_0$, $k = 1, 5$, 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 паровой турбины получена в виде системы дифференциальных уравнений (СДУ) [5]:

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

где использованы переменная положения сервомотора μ_m , возмущающее воздействие мощности электрического генератора v_s и относительная мощность турбины

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

Значения параметров модели (1) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели турбины К-1000-60/1500

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
K_{11}	3,2569	K_{42}	2,4881	v_4	0,0047
K_{12}	3,3257	K_β	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 (1) представим в векторном виде:

$$dX_t/dt = f_t(X_t, \mu_m, v_s), \quad \varphi = C_t X_t, \quad (2)$$

где $X_t = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \varphi)^T$ – вектор состояния, f_t – векторная функция, $C_t = (0,0,0,0,1)$. Вектор начальных условий $X_{t_0} = (\pi_{10}, \pi_{20}, \pi_{30}, \pi_{40}, \varphi_0)^T$ отвечает номинальному режиму работы турбины, значения его проекций приведены в табл. 1.

Принципиальная схема следящего привода паровых турбин на рис. 2 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. Построены линейные модели схем привода с различным числом датчиков и выполнена оптимизация параметров линейных моделей [3]. Наилучшие показатели качества получены для модели с тремя датчиками – золотника ЭГП (ЗЭГП), ОЗ и СМ. Разработана нелинейная модель привода в виде СДУ:

$dX_D/dt = f_D(X_D, u)$, $\mu_m = C_D X_D$, (3)
 где X_D – вектор относительных переменных состояния привода, f_D – векторная функция, u – управляющее воздействие регулятора частоты. Эта модель учитывает упоры относительных переменных положения – ЗЭП ξ_y , ОЗ σ_s и СМ μ_m (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} -1 \leq \xi_y \leq 1, \quad -1 \leq \sigma_s \leq 1, \\ -1 \leq \mu_m \leq 0. \end{aligned}$$

По моделям (2) и (3) получена нелинейная модель турбины К-1000-60/1500 как объекта управления при изменении нагрузки:

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

$$X_T = \begin{pmatrix} X_D \\ X_t \end{pmatrix}, \quad X_{T0} = \begin{pmatrix} 0 \\ X_{t0} \end{pmatrix}, \quad f_T(X_T, u, v_s) = \begin{pmatrix} f_D(X_D, u) \\ f_t(X_t, \mu_m, v_s) \end{pmatrix}, \quad C_T = (0 \quad C_t).$$

Модели систем управления турбиной. На основании нелинейной модели турбины (4) построены нелинейные модели САУ частотой (САУЧ) для частичного сброса нагрузки с различными законами управления. Структурная схема САУЧ на рис. 3 включает регулятор частоты (РЧ) и модель паровой турбины (ПТ).

Управляющее воздействие u формируется по сигналу ошибки $\varepsilon = \varphi_s - \varphi$, где φ_s – заданное значение частоты. Поскольку в номинальном режиме $\varphi_s = 0$, то $\varepsilon = -\varphi$.

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

$$dX/dt = f(x, X, v_s), \quad y(x, t) = 100CX, \quad (5)$$

где X – вектор состояния системы, f – векторная функция, x – вектор из p переменных параметров регулятора, $y = 100\varphi$ – отклонение частоты от ее номинального значения в процентах, C – вектор наблюдения. Для модели с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регулятором и переменными коэффициентами K_P , λ_I и λ_D получим:

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

где $u = -(K_P + K_D)\varphi + u_I + v_D$.

Задача оптимизация систем управления. Цели технической реализуемости, ограничения максимального отклонения частоты, ограничения показателя колебаний частоты и обеспечения максимального быстродействия САУ учтем условиями:

$$a_i \leq x_i \leq b_i, \quad i = \overline{1, p}, \quad \sigma(x) \leq \sigma_m, \quad \zeta(x) \leq \zeta_m, \quad \min t_c(x), \quad (6)$$

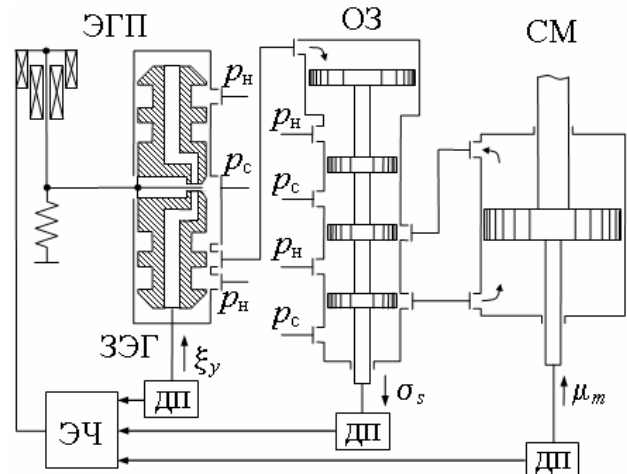


Рис. 2 – Принципиальная схема следящего привода

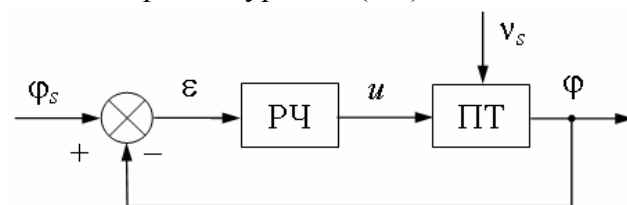


Рис. 3 – Структурная схема САУЧ

где a_i и b_i – ограничения переменных параметров; $\sigma(x)$ и σ_m – максимальное отклонение частоты и его допустимое значение; $\zeta(x)$ и ζ_m – максимальный размах колебаний частоты и его допустимое значение; $t_c(x)$ – время установления переходного процесса. Функции $\sigma(x)$, $\zeta(x)$ и $t_c(x)$ получим в результате численного интегрирования нелинейной СДУ (5).

На основании неравенств из условий (6) сформируем штрафные функции:

$$g_1(x) = \sum_{i=1}^p [\max\{0, a_i - x_i\} + \max\{0, x_i - b_i\}], \quad g_2(x) = \sigma(x) - \sigma_m, \quad g_3(x) = \zeta(x) - \zeta_m. \quad (7)$$

Задачу синтеза САУЧ поставим в виде задачи условной оптимизации (6), которую будем решать методами векторной оптимизации [3, 4]. На основании условий (6) сформируем области в пространстве переменных параметров R^p путем пересечения и вычитания множеств:

$$G_k = \{x \mid g_k(x) \leq 0\}, \quad k = \overline{1, 3}; \quad (8)$$

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

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

Обозначая относительное значение времени установления процесса $\tau(x) = t_c(x)/T_f$, где T_f – время наблюдения, и вводя $g_4(x) = \tau(x)$ по выражениям (7)–(10) сформируем векторную целевую функцию (ВЦФ)

$$F(x) = \{(k, g_{k+1}(x)) \mid x \in H_k\}, \quad k = \overline{0, 3}. \quad (11)$$

Оптимизация ВЦФ (11) проводится на основании сравнения двух ее произвольных значений $U = (U_1; U_2)$ и $V = (V_1; V_2)$ операцией «лучше»

$$U < V = \begin{cases} 1, & (U_1 > V_1) \vee [(U_1 = V_1) \wedge (U_2 < V_2)], \\ 0, & (U_1 < V_1) \vee [(U_1 = V_1) \wedge (U_2 \geq V_2)]. \end{cases} \quad (12)$$

Для изучения, исследования и применения методов оптимизации создана лаборатория *OPTLAB* в системе *MATLAB*, которая включает базы данных методов и задач, подпрограммы методов оптимизации, общие утилиты методов, подпрограммы табличного и графического представления процесса оптимизации [6].

Результаты оптимизации 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 $L = 800$, входное возмущающее воздействие $v_s = -0,4$. Для интегрирования СДУ применялся системный

метод первой степени [4]. В табл. 2 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

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

оптимальных параметров нечеткого регулятора: $K_u^* = 11,513$, $\xi_p^* = 0,494$, $\eta_p^* = 0,428$.

На рис. 4 представлены процессы выраженного в процентах отклонения частоты от номинального ее значения 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 [3] в нелинейных системах показатель размаха колебаний ζ^* снизился, а время процесса t_c^* увеличилось.

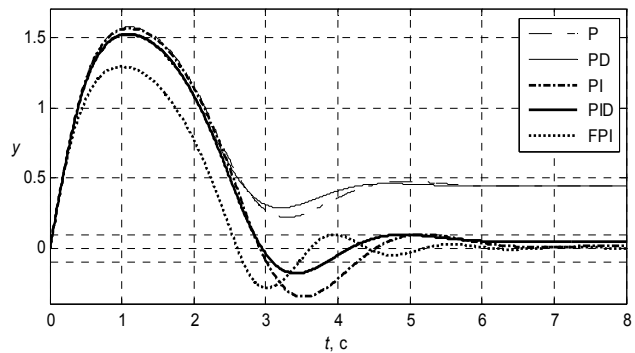


Рис. 4 – Изменение частоты при различных регуляторах

На рис. 5 представлен процесс оптимизации векторной функции (11).

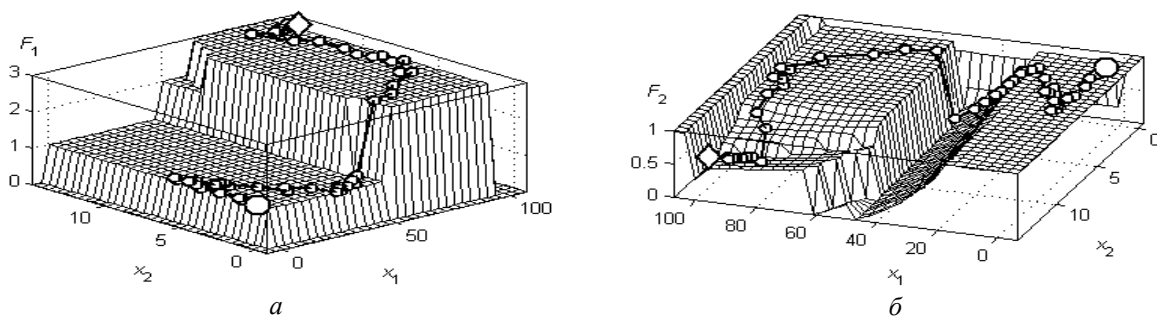


Рис. 5 – Оптимизация параметров ПИД регулятора с $\lambda_D = \lambda_D^*$: а – $F_1(x)$; б – $F_2(x)$

Поиск оптимальных значений параметров ПИД регулятора проведен векторным методом Нелдера-Мида с использованием операции сравнения (12) и начальным шагом $h=1$ при $x_1 = K_p$, $x_2 = \lambda_I$, $\lambda_D = \lambda_D^*$. Отображены лучшие точки поиска, начальная точка $x^{(0)} = (1; 1)$ отмечена кругом, конечная – ромбом.

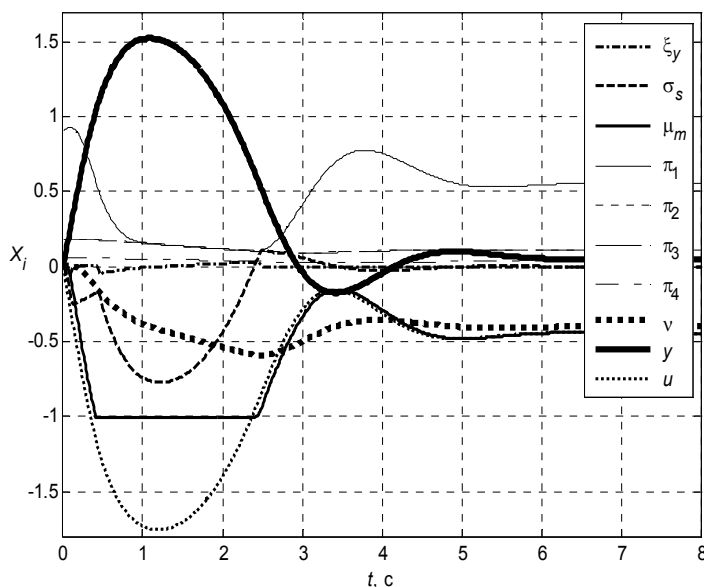


Рис. 6 – Процессы в оптимальной системе с ПИД регулятором

методом Нелдера-Мида с использованием операции сравнения (12) и начальным шагом $h=1$ при $x_1 = K_p$, $x_2 = \lambda_I$, $\lambda_D = \lambda_D^*$. Отображены лучшие точки поиска, начальная точка $x^{(0)} = (1; 1)$ отмечена кругом, конечная – ромбом.

Для оптимальной САУЧ с ПИД регулятором на рис. 6 представлены процессы изменения переменных состояния: положения золотника ЭГП ξ_y , ОЗ σ_s ,

сервомотора μ_m ; давления пара в емкостях турбины π_1 , π_2 , π_3 и π_4 ; мощности турбины ν ; частоты y ; сигнал регулятора u .

Выводы. Приведены нелинейные математические модели для отечественной паровой турбины К-1000-60/1500 и ее систем управления. Предложена векторная целевая функция для многоцелевой оптимизации систем управления паровой турбины. Результаты оптимизации систем управления частотой показали, что самыми эффективными являются ПИД регулятор и нечеткий ПИ регулятор, которые обеспечивают наиболее быстрые переходные процессы с наименьшим отклонением частоты.

Список литературы: 1. *Швецов, В.Л.* Результаты анализа динамических характеристик турбины К-1100-60/1500-2М при импульсных разгрузках по командам противоаварийной автоматики электрических сетей [Текст] / В.Л. Швецов, И.Н. Бабаев // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХП»: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХП», 2012. – № 8. – С. 50-58. – ISSN 2078-774X. 2. *Шехтер, М.В.* Современная электрогидравлическая система регулирования и защиты паровых турбин ЗАО «Уральский турбинный завод» [Текст] / М.В. Шехтер, И.Ю. Кляйнрок // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХП»: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХП», 2012. – № 8. – С. 105-112. – ISSN 2078-774X. 3. *Федянина, К.Б.* Оптимизация следящего привода и систем управления паровой турбиной с использованием генетических алгоритмов [Текст] / К.Б. Федянина, Е.А. Кучер, В.П. Северин // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2009. – Ч. 5. – С. 86–91. – ISSN 2004-3599. 4. *Северин, В.П.* Векторная оптимизация систем автоматического управления генетическими алгоритмами [Текст] / В.П. Северин // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2009. – Ч. 5. – С. 80–85. – ISSN 2004-3599. 5. *Северин, В.П.* Нелинейные модели систем автоматического управления паровой турбиной К-1000-60/1500 [Текст] / В.П. Северин, К.Б. Годлевская // Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Вісник НТУ «ХП»: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХП», 2012. – № 30. – С. 115-120. – ISSN 2079-0023. 6. *Северин, В.П.* Структура лаборатории методов оптимизации OPTLAB в системе MATLAB [Текст] / В.П. Северин // Труды IV Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». – Астрахань: Астраханский университет. – 2009. – С. 235–267. – ISBN 978-5-9926-0193-0.

Поступила в редколлегию 15.01.13

УДК 621:518.5

Многоцелевая оптимизация систем управления паровой турбиной К-1000-60/1500 на основе векторной целевой функции [Текст] / В.П. Северин, Е.Н. Никулина, К.Б. Годлевская // Вісник НТУ «ХП». Серія: Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 13(987). – С. 24-29. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X.

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.

Ключові слова: парова турбіна, система керування, математична модель, багатоцільова оптимізація, векторна цільова функція.

Nonlinear mathematical models of automatic control systems of steam turbine К-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.

Keywords: steam turbine, control system, mathematical model, multi-objective optimization, vector objective function.