

В. П. СЕВЕРИН, канд. техн. наук,
В. А. КЛИМЧУК, студент НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Розглянуті питання оптимізації електрогідравлічних систем автоматичного регулювання парової турбіни К-1000-60/1500. Наведені математичні моделі системи регулювання частоти обертання. Означені динамічні показники якості системи регулювання та запропоновано схему оптимізації цих показників з використанням методів векторної оптимізації.

Рассмотрены вопросы оптимизации электрогидравлических систем регулирования паровой турбины К-1000-60/1500. Приведены модели системы регулирования частоты вращения. Определены динамические показатели качества системы регулирования и предложена схема оптимизации этих показателей с использованием методов векторной оптимизации.

In the article there have been reviewed questions of optimization electro hydraulic control system of steam turbine К-1000-60/1500. There have been proposed mathematical models of rotation frequency control system, have been specified dynamic quality indexes and proposed a plan of optimization these indexes using vector optimization methods.

Введение. С ростом сложности задач, возникающих в процессе производства электроэнергии, к эффективности систем автоматического регулирования (САР) паровых турбин АЭС предъявляются повышенные требования. Так, степень нечувствительности регулирования турбин по частоте вращения не должна превышать 0,06%, а величина динамического заброса частоты вращения при полных сбросах нагрузки — 10% от номинальной частоты [1].

В этой работе рассматривается паровая турбина К-1000-60/1500 [2], используемая в атомных энергоблоках ВВЭР-1000. Турбина оснащена собственной электрогидравлической системой регулирования (ЭГСР). Целью статьи является рассмотрение вопросов, связанных с оптимизацией САР паровой турбины по ее динамическим критериям качества. Рассматривается способ синтеза САР путем решения задач оптимизации ее прямых показателей качества с применением методов векторной оптимизации (ВО).

Модели систем. На рис. 1 представлена структурная схема ЭГСР паровой турбины для режима регулирования частоты вращения турбогенератора [1], которая включает электрогидравлический следящий привод (ЭГСР), паровой тракт турбины (ПТ), ротор турбины (РТ), регулятор частоты (РЧ). На схеме обозначены возмущение $v = 1(t)$, регулируемая относительная частота φ , задание частоты $\varphi_0 = 0$, ошибка e , управляющий сигнал РЧ u .

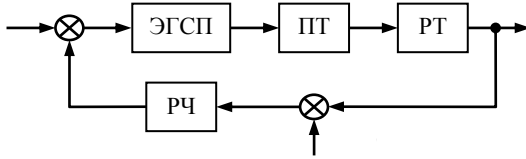


Рис. 1. Структурная схема ЭГСП

Структурная схема ЭГСП на рис. 2 включает электрогидравлический преобразователь (ЭГП), золотник сервомотора высокого давления (ЗСВД), сервомотор высокого давления (СВД), датчики (Д), коэффициенты обратных связей с найденными ранее оптимальными значениями $k_1 = 0,39$, $k_2 = 0,28$, входной и выходной сигналы w и y .

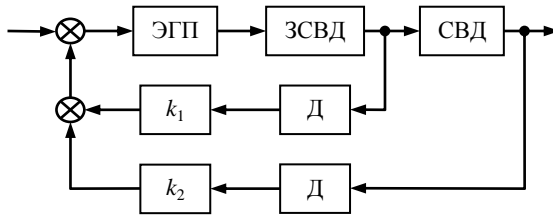


Рис. 2. Структурная схема ЭГСП

Для решения задач оптимизации получены математические модели ЭГСП и ее составных частей.

Математическая модель ЭГСП и ее звеньев, представленная в виде дифференциальных уравнений:

$$dX/dt = A \cdot X + B \cdot u, \quad y = C \cdot X$$

с матрицами ЭГП, ЗСВД, СВД, Д, ПТ и РТ [3]:

$$A_s = \begin{pmatrix} -667 & -667 & 0 & 0 & 0 \\ 200 & -9,8 & -338 & 70 & 138 \\ 0 & 83 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 337 & -337 & -337 \\ 0 & 0 & 0 & 114 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_s = \begin{pmatrix} 667 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_s = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}^T,$$

$$A_d = \begin{pmatrix} -349 & 0 \\ 43 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_d = \begin{pmatrix} 349 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_d = (0 \ 1), \quad A_c = 0, \quad B_c = 9,3, \quad C_c = 1,$$

$$A_{\text{д}} = \begin{pmatrix} -1333 & -1333 \\ 500 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_{\text{д}} = \begin{pmatrix} 1333 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_{\text{д}} = (0 \ 1),$$

$$A_{II} = \begin{pmatrix} -3,4 & 0,687 & 0 & 0 \\ 0,079 & -9,41 & 9,2 & 0 \\ 0 & 38,24 & -39,18 & 0,526 \\ 0 & 0 & 0,839 & -2,74 \end{pmatrix}, \quad B_{II} = \begin{pmatrix} 2,96 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_{II} = \begin{pmatrix} 0,372 \\ -0,074 \\ 1,378 \\ 7,747 \end{pmatrix}^T,$$

$$A_p = -0,139, \quad B_p = 0,0694, \quad C_p = 1.$$

Для той же ЭГСР и ее звеньев существуют математические модели в виде передаточных функций:

$$W(s) = \frac{\beta(s)}{\alpha(s)}, \quad \alpha(s) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot s^{n-i}, \quad \beta(s) = \sum_{i=0}^m \beta_i \cdot s^{m-i}, \quad (1)$$

где s — переменная Лапласа. Обозначим векторы коэффициентов знаменателя и числителя ПФ через $\alpha = (\alpha_0, \dots, \alpha_n)$ и $\beta = (\beta_0, \dots, \beta_m)$. Значения этих векторов для звеньев ЭГСР получены в результате идентификации их параметров по экспериментальным характеристикам [4].

ПФ ЭГП 5-го порядка вида (1) с коэффициентами $\alpha = (1, 1054, 4,66 \cdot 105, 1,09 \cdot 108, 1,23 \cdot 1010, 4,76 \cdot 1011)$, $\beta = 4,76 \cdot 1011$. ПФ золотника — $\alpha = (1, 43,3, 1,51 \cdot 104)$, $\beta = 1,51 \cdot 104$. ПФ сервомотора — $\alpha = (1, 0)$, $\beta = 9,30$. ПФ датчика — $\alpha = (1, 1333, 6,67 \cdot 105)$, $\beta = 6,67 \cdot 105$. ПФ ЭГСП имеет векторы коэффициентов $\alpha = (1, 4069, 7,68 \cdot 106, 8,63 \cdot 109, 6,31 \cdot 1012, 3,09 \cdot 1015, 1,02 \cdot 1018, 2,25 \cdot 1020, 3,14 \cdot 1022, 2,42 \cdot 1024, 7,62 \cdot 1025, 1,24 \cdot 1027, 8,32 \cdot 1027)$, $\beta = (1,87 \cdot 1016, 4,99 \cdot 1019, 5,82 \cdot 1022, 3,33 \cdot 1025, 8,32 \cdot 1027)$. ПФ ПТ: $\alpha = (1, 54,83 \cdot 325,3 \cdot 106, 552,6 \cdot 109, 142)$, $\beta = (1,132, 57,95, 181,8, 142)$. ПФ РТ: $\alpha = (1, 0,139)$, $\beta = 0,0694$.

Полная модель ЭГСР зависит от того, какой закон регулирования реализует регулятор частоты вращения.

Для анализа и оптимизации САР паровой турбины К-1000-60/1500 следует разработать математические модели ЭГСР с разными типами регуляторов, реализующими разные законы управления. Предпочтение следует отдать моделям в пространстве состояния, так как они менее требовательны к вычислительным ресурсам и менее подвержены ошибкам по сравнению с моделями в виде ПФ.

При оптимизации САР варьируемыми параметрами модели будут являться параметры регуляторов. Изменяя значения этих параметров, следует найти такие их значения, которым соответствовало бы наилучшее качество работы рассматриваемой САР.

Будем рассматривать различные регуляторы, составленные из пропорционального (П), интегрального (И) и дифференциального (Д) регуляторов. П регулятор формирует пропорциональный закон управления: $u_p = K_p \cdot \varepsilon$. И и Д регуляторы формируют интегральный и

дифференциальный законы: $u_I = \frac{1}{T_I} \int \varepsilon dt$, $u_D = \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt}$. Здесь K_p , T_I и τ_D —

параметры регуляторов. Данным П, И и реализуемому Д законам управления соответствуют передаточные функции регуляторов:

$$W_P = K_P, W_I(s) = \frac{1}{T_I \cdot s}, W_D(s) = \frac{K_D T_D s}{T_D s + 1}.$$

Последняя передаточная функция при $K_D > 1$ приближенно формирует дифференциальный закон с параметром $\tau_D = K_D T_D$. Обозначая $\lambda_I = 1/T_I$,

$$\tau_D = K_D T_D, \text{ запишем дифференциальное уравнение И регулятора } \frac{du_I}{dt} = \lambda_I \varepsilon$$

и уравнения Д регулятора $\frac{dv_D}{dt} = -\lambda_D (v_D + K_D \varepsilon), u_D = v_D + K_D \varepsilon$. Таким образом, варьируемыми параметрами будут являться K_P, λ_I и λ_D .

Для ЭГСР паровой турбины требуют своего дальнейшего развития вопросы, связанные с динамическими критериями качества работы САР, с более широким использованием прямых показателей качества. Прямыми показателями качества САР являются перерегулирование, колебательность и время регулирования выходной координаты $y(t)$ при ступенчатом входном воздействии $u(t) = 1(t)$ [5]. Также для САР паровой турбины важнейшим показателем является максимальное отклонение от установившегося значения $y(\infty)$ — перерегулирование σ , которое не должно превышать σ_m от установившегося значения. Показатель колебательности ζ определяется по амплитудам колебаний $y(t)$ относительно установившегося значения $y(\infty) = 0$ как отношение третьей амплитуды к первой, в противном случае — как отношение второй амплитуды к первой. Этот показатель не должен превышать значения ζ_m . Третий показатель — время регулирования τ , которое определяется моментом попадания $y(t)$ в заданный интервал $[y(\infty)(1 - \delta_y), y(\infty)(1 + \delta_y)]$.

Задачи оптимизации. Если считать, что прямые показатели качества САР являются функциями вектора x варьируемых параметров ее модели, то задача оптимизации САР — это задача нелинейного программирования (НП):

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

Учитывая высокий порядок моделей САР, предлагается для решения этой задачи применять методы векторной оптимизации по указанным критериям качества, а для сокращения времени, которое требуется для работы алгоритмов численного интегрирования, можно также применить также

косвенный показатель качества — интегральную квадратичную оценку (ИКО) [5]:

$$J(x) = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt, e(t) = z + \sum_{i=1}^l w_i \cdot z^{(i)}.$$

Удобство ИКО в том, что она дает единый критерий качества, характеризующий быстроту затухания и перерегулирование переходного процесса в совокупности, без определения того и другого в отдельности. При этом задача сводится к минимизации ИКО

$$a_i \leq x_i \leq b_i, J(x) \rightarrow \min.$$

Таким образом, с привлечением современных методов интегрирования и оптимизации возможно решить математические задачи синтеза ЭГСР по прямым показателям качества и ИКО, если свести эти задачи к моделям ВО.

Пусть $x = (x_1, x_2, \dots, x_p) \in R^p$ — вектор варьируемых параметров. Постановка задачи НП с ограниченной областью определения целевой функции имеет вид:

$$\min_{x \in D} f(x), D = \{x \mid g_k(x) \leq 0, k = \overline{1, m}\} \subset R^p.$$

Здесь $f(x)$ — целевая функция, D — область определения функции, $g_k(x)$ — функции ограничений. Функция ВО для этой задачи имеет вид:

$$F(x) = \begin{cases} (i-1, g_i(x)), & \exists i = \min \{k \mid g_k(x) > 0, k = \overline{1, m}\}, \\ (m, f(x)), & g_k(x) \leq 0, k = \overline{1, m}. \end{cases} \quad (2)$$

Эта двумерная вектор-функция определена для любой точки пространства параметров. Для сравнения ее произвольных значений p и q сопоставим ей бинарную операцию «лучше» \prec :

$$p \prec q = \begin{cases} 1, & p_1 > q_1 \vee p_1 = q_1 \wedge p_2 < q_2, \\ 0, & p_1 < q_1 \vee p_1 = q_1 \wedge p_2 \geq q_2. \end{cases}$$

Рассмотрим общую задачу ВО с векторной функцией $f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$ при убывании приоритета в области, заданной ограничением $g(x) \leq 0$. На первые $m-1$ критериев наложим ограничения $f_k(x) \leq C_k, k = \overline{1, m-1}$. Постановка задачи ВО имеет вид:

$$\min_{x \in D} f_m(x), D = \{x \mid g(x) \leq 0, f_k(x) \leq C_k, k = \overline{1, m-1}\} \subset R^p. \quad (3)$$

Функция ВО этой задачи имеет вид:

$$F(x) = \begin{pmatrix} \max\{g(x), 0\} \\ \max\{f_1(x) - C_1, 0\} \\ \dots \\ \max\{f_{m-1}(x) - C_{m-1}, 0\} \\ f_m(x) \end{pmatrix}.$$

Здесь первые m проекций — это штрафные функции типа срезки. Для сравнения двух значений p и q этой функции ВО сопоставим ей бинарную

$$\text{операцию } \prec: p \prec q = \begin{cases} 1, & p_j < q_j \\ 0, & p_j \geq q_j \end{cases}, \quad j = \begin{cases} i, & \exists i = \min\{k \mid p_k \neq q_k, k = \overline{1, m}\} \\ m, & p_k = q_k, k = \overline{1, m}. \end{cases}$$

Задаче ВО (3) можно также сопоставить двумерную функцию ВО (2), если положить: $g_1(x) = g(x)$, $g_k(x) = f_{k-1}(x) - C_{k-1}$, $k = \overline{2, m}$, $f(x) = f_m(x)$.

В зависимости от постановок задач оптимизации возможны и другие функции ВО.

Заключение. Таким образом, проанализировав задачи оптимизации ЭГСР паровой турбины К-1000-60/1500, можно сделать вывод, что для этих целей можно успешно использовать векторные модели сведения задач оптимизации САР паровой турбины к задачам оптимизации ее прямых показателей качества с использованием методов векторной оптимизации. При этом предполагается использовать приведенные выше модели ЭГСР в пространстве состояний, решив предварительно круг задач, связанных с созданием новых моделей с различными типами регуляторов, реализующий разные законы управления.

Предложенная методика векторной оптимизации может применяться и для других сложных технических систем.

Список литературы: 1. Веллер В. Н. Автоматическое регулирование паровых турбин. — М.: Энергия, 1977. — 406 с. 2. Рохленко В.Ю., Гладкий П. М., Бабеев И. Н. Исследование динамических свойств контура управления паровой турбины с электрогидравлической системой управления // Промышленная энергетика. 1998. № 1. — С. 11-15 3. Северин В. П. Многокритериальный синтез технических систем методами векторной оптимизации // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ «ХП». — Харків: НТУ «ХП». — 2002. — Вип. 1 (5). — С. 351–355. 4. Северин В. П., Головня М.Н., Петрашев С.Н. Моделирование, идентификация и оптимизация электрогидравлического следящего привода // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: — Харьков: ХГПУ, 1994. С. 31-33. 5. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с. 6. Северин В. П. Векторная оптимизация динамических показателей качества системы управления энергоблоком АЭС // Техн. электродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». — 2002. — Ч. 1. — С. 111–116

Поступила в редколлегию 28.03.07