

УДК 621.1

ПРОЕКЦИОННО-МАТРИЧНЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Д.В. Мельников

Калужский филиал МГТУ им. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация
e-mail: melnikov-dv@yandex.ru

В настоящее время в практических приложениях теории автоматического управления широкое применение находят проекционно-матричные методы расчета и проектирования систем, поведение которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Рассмотрена возможность применения проекционно-матричных методов к решению задач, возникающих на этапе проектирования систем управления энергетическими объектами, в частности, задачи синтеза контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения проекционно-матричных методов для решения задач, выдвигаемых энергетикой.

Ключевые слова: математическая модель, паровая турбина, система регулирования, проекционно-матричный метод, синтез.

THE PROJECTION-MATRIX METHOD FOR SYNTHESIZING A LOOP OF THE ROTATION SPEED REGULATION OF A STEAM TURBINE ROTOR

D.V. Mel'nikov

Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation
e-mail: melnikov-dv@yandex.ru

Now the projection-matrix methods for calculating and designing the systems whose behavior is described by nonlinear differential equations find wide use in practical applications of the automatic control theory. The possibility of using the projection-matrix methods is considered for solving problems that arise at the stage of designing the systems to control power-generating objects, in particular, the problem of synthesis of a loop for regulation of the rotation speed of a steam turbine rotor. The obtained results are the evidence of effectiveness of application of the projection-matrix methods to solving problems posed by power engineering.

Keywords: mathematical model, steam turbine, control system, projection-matrix method, synthesis.

Усилиями многих крупных ученых и специалистов теория динамики регулирования турбин развита в настоящее время весьма глубоко. Она базируется главным образом на приложении методов теории автоматического управления к специфическим задачам турбостроения. По мере усложнения задач, выдвигаемых энергетикой, существенно усложняются законы управления турбоагрегатами, используются более сложные математические модели, все шире применяются оптимизационные и стохастические подходы [1]. Все это приводит к тому,

что на этапе проектирования системы регулирования турбины ее динамика описывается нелинейными дифференциальными уравнениями высокого порядка. На начальном этапе проектирования остро встает задача расчета параметров системы управления в соответствии с заданными критериями качества и условиями функционирования в классе нелинейных систем [1]. В последнее время в теории автоматического управления для решения задач синтеза широкое распространение получили матричные методы расчета и проектирования систем автоматического управления [2]. Аппарат матричных операторов хорошо зарекомендовал себя при решении задач управления для класса линейных стационарных и нестационарных систем, но до недавнего времени не находил должного применения в турбостроении, так как динамика регулирования турбины после процедуры линеаризации описывалась в классе линейных стационарных систем, для которых хорошо развит классический аппарат передаточных функций. Такой подход на современном этапе развития систем управления энергетических турбин уже неправомерен. В последнее время аппарат матричных операторов получил развитие для класса нелинейных систем автоматического управления [3], что позволяет более точно решать задачи турбостроения на начальном этапе проектирования. В настоящей работе приведен алгоритм расчета контура регулирования частоты вращения ротора (на примере паровой турбины К-800-130/3000), математическая модель которого представлена в работе [4], соответствующая структурная схема — на рис. 1.

На схеме обозначены следующие процессы (здесь и далее по тексту переменные модели являются относительными отклонениями от соответствующих номинальных значений): φ — относительное отклонение частоты вращения ротора ω от номинального значения ω_n , $\varphi = (\omega - \omega_n)/\omega_n$; ζ_r — относительное отклонение нагрузки генератора от номинального значения (возмущающее воздействие); $\gamma_{\text{ЦВД}}$, $\gamma_{\text{ЦНД1}}$, $\gamma_{\text{ЦНД2}}$, $\gamma_{\text{ЦНД3}}$, $\gamma_{\text{ПП}}$ — относительные отклонения расходов пара через цилиндр высокого давления (ЦВД), цилиндры низкого давления (ЦНД1, ЦНД2, ЦНД3), пароперегревателя (ПП) соответственно; $\mu_{\text{ЦВД}}$, $\mu_{\text{ЦНД1}}$, $\mu_{\text{ЦНД2}}$, $\mu_{\text{ЦНД3}}$ — относительные открытия регулирующих клапанов (РК) ЦВД и ЦНД (РК_{ЦВД}, РК_{ЦНД1}, РК_{ЦНД3}, РК_{ЦНД2}) соответственно; $\sigma_{\text{ЦВД}}$, $\sigma_{\text{ЦНД1}}$, $\sigma_{\text{ЦНД2}}$, $\sigma_{\text{ЦНД3}}$ — относительные отклонения золотников сервомоторов ЦВД, ЦНД1, ЦНД2, ЦНД3; $\pi_{\text{ПП}}$, π_0 — относительные отклонения давления в ПП и давления свежего пара; φ_y — сигнал, пропорциональный ускорению ротора турбины; φ_d — выходной сигнал дифференциатора; $\chi_{\text{эм.п}}$ — ход следящего золотника электромеханического преобразователя; $\chi_{\text{г.у}}$ — ход следящего золотника гидроусилителя; ζ — относительное приращение выходной координаты датчика частоты вращения ротора; φ_1 — ход следящего золотника механического регулятора скорости; ψ — сигнал от задатчика частоты вращения (МУТ — механизм управления турбины); η — ход промежуточного золотника; s — символ дифференцирования (переменная Лапласа).

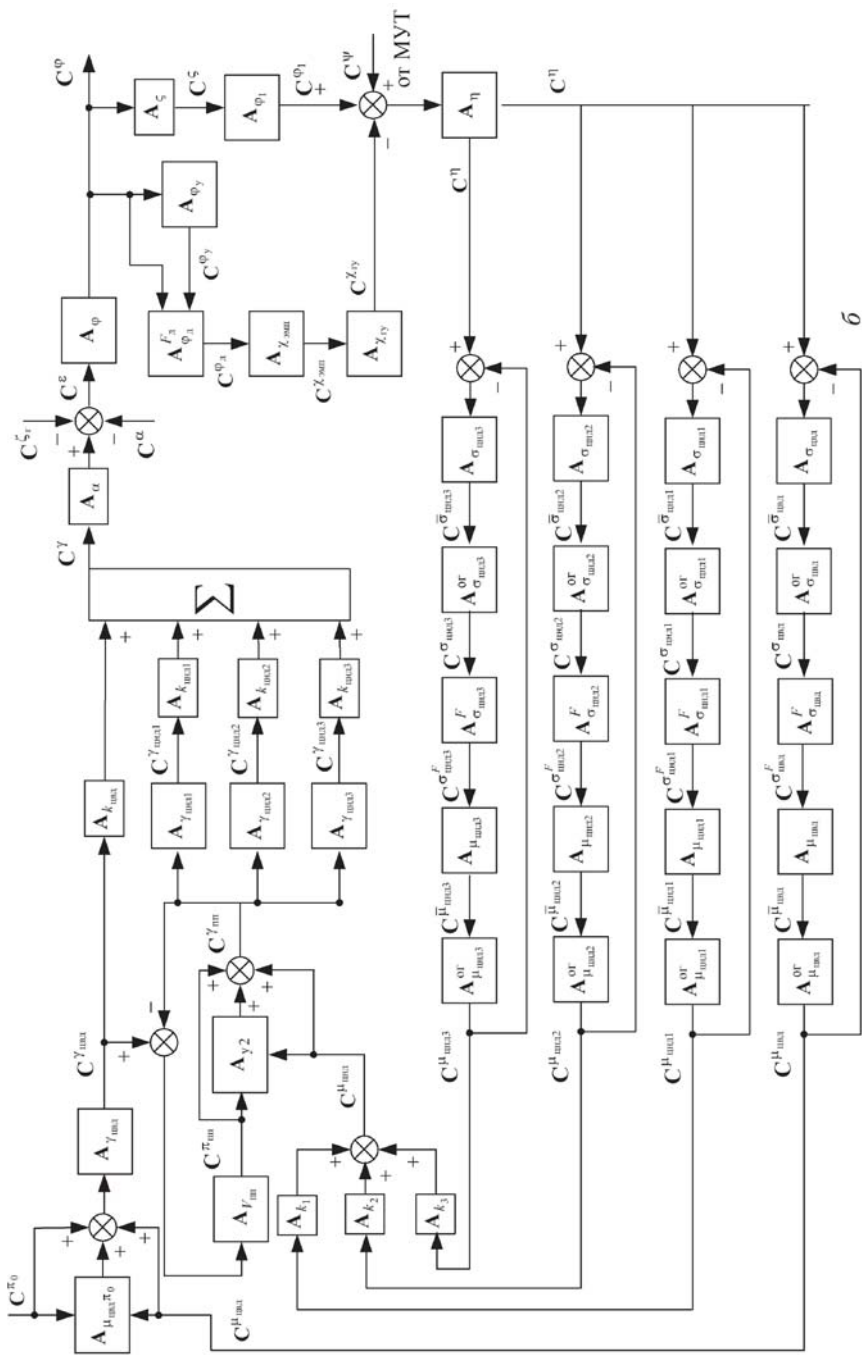


Рис. 1 (окончание)

Известны следующие параметры объекта регулирования и системы управления: $\alpha = 0,04$ – коэффициент самовыравнивания системы регулирования; $T_a = 5,1$ с – постоянная времени ротора; $T_{V_{\text{ЦВД}}} = 0,05$ с, $T_{V_{\text{ЦНД1}}} = T_{V_{\text{ЦНД2}}} = T_{V_{\text{ЦНД3}}} = 0,08$ с, $T_{V_{\text{ПП}}} = 7$ с – постоянные времена эквивалентного объема ЦВД, ЦНД1, ЦНД2, ЦНД3, ПП соответственно; $k_{\text{ЦВД}} = 0,32$; $k_{\text{ЦНД1}} = k_{\text{ЦНД2}} = k_{\text{ЦНД3}} = 0,2267$ – коэффициенты, учитывающие долю мощности соответствующего отсека турбины; $k_1 = k_2 = k_3 = 1/3$ – коэффициенты, показывающие доли распределения расхода пара между ЦНД; $\delta = 0,04$ – степень неравномерности регулирования; $T_d = 100$ с – константа дифференциатора.

Нелинейные элементы (см. рис. 1) определяются следующим образом:

$$\varphi_d = F_d(\varphi_y, \varphi) = F_{\text{н.д}}(\varphi_y) F_{\text{п}}(\varphi); \quad F_{\text{п}}(\varphi) = \begin{cases} 1 & \text{при } \varphi \geq \varphi_{\text{д}+}; \\ 0 & \text{при } \varphi < \varphi_{\text{д}+}; \end{cases}$$

$$F_{\text{н.д}}(\varphi_y) = \begin{cases} k_{1\text{д}}\varphi_y & \text{при } |\varphi_y| \leq \tilde{\varphi}_y; \\ k_{2\text{д}}\varphi_y + \text{sign}(\varphi_y)(k_{1\text{д}} - k_{2\text{д}})\tilde{\varphi}_y & \text{при } |\varphi_y| > \tilde{\varphi}_y, \end{cases}$$

где $F_{\text{н.д}}(\varphi_y)$ – нелинейное преобразование сигнала φ_y , определяющие настройку “крутизны” дифференциатора в широких пределах; $\varphi_{\text{д}+} = 0,03$ – значение порога срабатывания дифференциатора; $k_{1\text{д}} = 8$, $k_{2\text{д}} = 14,3$ – значения, определяющие настройку дифференциатора; $\tilde{\varphi}_y = 0,1$.

Уравнение движения отсечного золотника эквивалентного сервомотора ЦВД (для ЦНД индексы “ЦВД” заменить на “ЦНД”) с учетом ограничения на его ход имеет вид:

$$T_{\sigma_{\text{ЦВД}}} \frac{d\bar{\sigma}_{\text{ЦВД}}}{dt} + \bar{\sigma}_{\text{ЦВД}} = \eta - \mu_{\text{ЦВД}};$$

$$\sigma_{\text{ЦВД}} = F_{\text{ЦВД}}^{\text{ог}}(\bar{\sigma}_{\text{ЦВД}}) = \begin{cases} \sigma_{\text{ЦВД}}^+ & \text{при } \bar{\sigma}_{\text{ЦВД}} > \sigma_{\text{ЦВД}}^+; \\ \bar{\sigma}_{\text{ЦВД}} & \text{при } \sigma_{\text{ЦВД}}^- \leq \bar{\sigma}_{\text{ЦВД}} \leq \sigma_{\text{ЦВД}}^+; \\ \sigma_{\text{ЦВД}}^- & \text{при } \bar{\sigma}_{\text{ЦВД}} < \sigma_{\text{ЦВД}}^-; \end{cases}$$

где $T_{\sigma_{\text{ЦВД}}}$ – постоянная времени золотника сервомотора ЦВД; $\sigma_{\text{ЦВД}}^- = -1,1$, $\sigma_{\text{ЦВД}}^+ = 0,5$ ($\sigma_{\text{ЦНД}}^- = -0,6$, $\sigma_{\text{ЦНД}}^+ = 1,2$) – значения, ограничивающие смещение золотника (ограничения хода золотника) в целях предотвращения существенного падения давления в напорных магистралях системы.

Уравнение движения поршня эквивалентного сервомотора ЦВД (для ЦНД индексы “ЦВД” следует заменить на “ЦНД”) с учетом нечувствительности системы регулирования, ограничения скорости поршня сервомотора при малых значениях входного сигнала и с учетом ограничения на его ход имеет вид:

$$T_{\mu_{\text{ЦВД}}} \frac{d\bar{\mu}_{\text{ЦВД}}}{dt} = F_{\sigma_{\text{ЦВД}}}(\sigma_{\text{ЦВД}}) = \sigma_{\text{ЦВД}}^F =$$

$$= \begin{cases} 0 \text{ при } |\sigma_{\text{ЦВД}}| \leq \varepsilon_{\text{ЦВД}}; \\ 0,5z_{\text{ЦВД}} + 0,25 \frac{z_{\text{ЦВД}}^2}{\Delta z_{\text{ЦВД}}} \text{sign} z_{\text{ЦВД}} \text{ при } |z_{\text{ЦВД}}| \leq \Delta z_{\text{ЦВД}}; \\ z_{\text{ЦВД}} - 0,25\Delta z_{\text{ЦВД}} \text{sign} z_{\text{ЦВД}} \text{ при } |z_{\text{ЦВД}}| > \Delta z_{\text{ЦВД}}; \end{cases}$$

$$z_{\text{ЦВД}} = \sigma_{\text{ЦВД}} - \varepsilon_{\text{ЦВД}} \text{sign}(\sigma_{\text{ЦВД}});$$

$$\mu_{\text{ЦВД}} = F_{\text{ЦВД}}^{\text{ог}}(\bar{\mu}_{\text{ЦВД}}) = \begin{cases} \mu_{\text{ЦВД}}^+ \text{ при } \bar{\mu}_{\text{ЦВД}} > \mu_{\text{ЦВД}}^+; \\ \bar{\mu}_{\text{ЦВД}} \text{ при } \mu_{\text{ЦВД}}^- \leq \bar{\mu}_{\text{ЦВД}} \leq \mu_{\text{ЦВД}}^+; \\ \mu_{\text{ЦВД}}^- \text{ при } \bar{\mu}_{\text{ЦВД}} < \mu_{\text{ЦВД}}^-, \end{cases}$$

где $T_{\mu_{\text{ЦВД}}}$ — постоянная времени сервомотора ЦВД; $\mu_{\text{ЦВД}}^- = -1,15$, ($\mu_{\text{ЦВД}}^- = -1,2$), $\mu_{\text{ЦВД}}^+ = 1,275$ — ограничение хода поршня сервомотора ЦВД; $\Delta z_{\text{ЦВД}} = 0,3$ — относительная высота профиля кромок отсечного золотника сервомотора ЦВД; $\varepsilon_{\text{ЦВД}} = 0,0004$ — значение, характеризующее степень нечувствительности сервомотора ЦВД.

Постановка задачи. Для модели, приведенной на рис. 1, с известными параметрами объекта и некоторыми параметрами системы управления требуется определить следующие параметры системы регулирования: $T_{\text{з.р.с}}$, $T_{\text{п.з}}$, $T_{\text{эм.п}}$, $T_{\text{гу}}$, $T_{\sigma_{\text{ЦВД}}}$, $T_{\sigma_{\text{ЦВД}1}}$, $T_{\sigma_{\text{ЦВД}2}}$, $T_{\sigma_{\text{ЦВД}3}}$, $T_{\mu_{\text{ЦВД}}}$, $T_{\mu_{\text{ЦВД}1}}$, $T_{\mu_{\text{ЦВД}2}}$, $T_{\mu_{\text{ЦВД}3}}$, так чтобы динамика регулирования турбоагрегата отвечала нормам [5].

Согласно [5] зададим эталонный переходный процесс (желаемый закон изменения относительного значения частоты ротора турбины) системы регулирования турбины при резком сбросе нагрузки генератора ($\zeta_{\text{г}} = -1$, $\pi_0 = 0$, $\psi = 0$) в следующем виде:

$$\varphi_3(t) = 0,04 - 0,04e^{-\alpha t} \cos \beta t; \quad \alpha = 2,2, \quad \beta = 5. \quad (1)$$

Для решения задачи воспользуемся проекционно-матричным методом синтеза систем автоматического управления, который основан на представлении сигналов и функций в виде ряда и на весьма эффективном аппарате математического программирования. Для этого представим систему в операторной форме (рис. 1, б).

На схеме обозначено: S^x — спектральные характеристики соответствующего процесса; A_x — матричные операторы соответствующего звена структурной схемы (см. рис. 1, а); A_{y2} — матричный оператор умножения двух функций.

Спектральные характеристики воздействий и эталонного переходного процесса вычисляются по формуле

$$\mathbf{C}^x = [c_1^x \quad c_2^x \quad \dots \quad c_l^x]^T = \int_0^T x(t) \varphi_i(t) dt, \quad (2)$$

где $x(t)$ — соответствующий процесс, $\Phi^T(t) = [\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_l(t)]$ — ортонормированный базис (ОНБ); T — время исследования системы; τ — знак транспонирования.

Матричные операторы линейных звеньев вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_\varphi &= (T_a \mathbf{I} + \alpha \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; & \mathbf{A}_\alpha &= \alpha \mathbf{I}; & \mathbf{A}_{k_{цвд}} &= k_{цвд} \mathbf{I}; \\ \mathbf{A}_{k_{цнд1}} &= k_{цнд1} \mathbf{I}; & \mathbf{A}_{k_{цнд2}} &= k_{цнд2} \mathbf{I}; \\ \mathbf{A}_{k_{цнд3}} &= k_{цнд3} \mathbf{I}; & \mathbf{A}_{\gamma_{цвд}} &= (T_{V_{цвд}} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; \\ \mathbf{A}_{\gamma_{цнд1}} &= (T_{V_{цнд1}} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; \\ \mathbf{A}_{\gamma_{цнд2}} &= (T_{V_{цнд2}} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; & \mathbf{A}_{\gamma_{цнд3}} &= (T_{V_{цнд3}} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; \\ \mathbf{A}_{\pi_{ин}} &= \mathbf{A}_и / T_{V_{ин}}; \\ \mathbf{A}_{k1} &= k_1 \mathbf{I}; & \mathbf{A}_{k2} &= k_2 \mathbf{I}; & \mathbf{A}_{k3} &= k_3 \mathbf{I}; \\ \mathbf{A}_\zeta &= -\mathbf{I} / \delta; & \mathbf{A}_{\varphi1} &= (T_{зрс} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; \\ \mathbf{A}_\eta &= (T_{пз} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; & \mathbf{A}_{\varphi_y} &= (\mathbf{I} + T_d \mathbf{A}_и)^{-1} T_d; \\ \mathbf{A}_{\chi_{эмп}} &= (T_{эмп} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; \\ \mathbf{A}_{\chi_{гy}} &= (T_{гy} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; & \mathbf{A}_{\sigma_{цвд}} &= (T_{\sigma_{цвд}} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; \\ \mathbf{A}_{\sigma_{цнд1}} &= (T_{\sigma_{цнд1}} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; \\ \mathbf{A}_{\sigma_{цнд2}} &= (T_{\sigma_{цнд2}} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; & \mathbf{A}_{\sigma_{цнд3}} &= (T_{\sigma_{цнд3}} \mathbf{I} + \mathbf{A}_и)^{-1} \mathbf{A}_и; \\ \mathbf{A}_{\mu_{цвд}} &= \mathbf{A}_и / T_{\mu_{цвд}}; & \mathbf{A}_{\mu_{цнд1}} &= \mathbf{A}_и / T_{\mu_{цнд1}}; & \mathbf{A}_{\mu_{цнд2}} &= \mathbf{A}_и / T_{\mu_{цнд2}}; \\ \mathbf{A}_{\mu_{цнд3}} &= \mathbf{A}_и / T_{\mu_{цнд3}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{A}_и$ — матричный оператор интегрирования, \mathbf{I} — единичная матрица.

Матричные операторы нелинейных звеньев при конкретных входных воздействиях можно вычислить как матричный оператор умножения функции, определяемой отношением выходного сигнала к входному сигналу рассматриваемого нелинейного элемента:

$$\mathbf{A}^н = \{a_{ij}^н\} = \int_0^T \frac{F(\Phi^T(t) \mathbf{C}^x)}{\Phi^T(t) \mathbf{C}^x} \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt, \quad (4)$$

где F — нелинейное преобразование соответствующего процесса.

В качестве меры близости эталонного и реального переходных процессов воспользуемся критерием оптимальности, записанным в терминах матричных операторов:

$$J(\mathbf{p}) = \|\mathbf{C}^{\varphi}(\mathbf{p}) - \mathbf{C}^{\varphi_0}\| = \|\mathbf{E}(\mathbf{p})\| \rightarrow \min_{\mathbf{p}}, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{p} = \left[T_{зр.с}, T_{эм.п}, T_{пз}, T_{\sigma_{цвд}}, T_{\sigma_{цнд1}}, T_{\sigma_{цнд2}}, T_{\sigma_{цнд3}}, T_{\mu_{цвд}}, T_{\mu_{цнд1}}, T_{\mu_{цнд2}}, T_{\mu_{цнд3}} \right]^T$$

— вектор искомых параметров регулятора, \mathbf{C}^{φ_0} — спектральная характеристика эталонного переходного процесса, $\mathbf{C}^{\varphi}(\mathbf{p})$ — спектральная характеристика реального переходного процесса, зависящая от параметров регулятора.

Подробно алгоритм синтеза для класса нелинейных систем изложен в работе [3]. С использованием такого подхода задача синтеза сводится к задаче математического программирования — определение минимума функции нескольких переменных.

Алгоритм, определяющий процедуру решения задачи расчета параметров контура системы автоматического регулирования частоты вращения ротора паровой турбины К-800-130/3000, представлен на рис. 2. В рассматриваемом случае можно предложить и более простой алгоритм синтеза с точки зрения его вычислительной реализации, например, можно было бы обойтись всего одной итерационной процедурой (ИТП₁). Но этот алгоритм не гарантировал бы решение задачи с необходимой точностью. Поэтому предпочтительно разбить задачу синтеза на несколько подзадач, точность решения которых мы можем контролировать. Для этого и вводятся дополнительные итерационные процедуры — вычисление спектральных характеристик относительных отклонений положений поршней сервомоторов цилиндров высокого и низкого давлений (ИТП₂ — ИТП₅), относительного отклонения давления пара в пароперегревателе (ИТП₆). Точность решения подзадач и будет определять точность решения основной задачи — определение параметров системы регулирования. Следует отметить, что при реализации алгоритма, представленного на рис. 2, и вычислении спектральных характеристик выходных процессов подсистем, имеющих местные обратные связи (ИТП₂ — ИТП₆), необходимо на первой итерации задать их начальные приближения: $\mathbf{C}_0^{\mu_{цвд}}, \mathbf{C}_0^{\mu_{цнд1}}, \mathbf{C}_0^{\mu_{цнд2}}, \mathbf{C}_0^{\mu_{цнд3}}, \mathbf{C}_0^{\gamma_{ин}}$.

Результаты синтеза иллюстрируются графиками, представленными на рис. 3. Искомые параметры системы регулирования контура частоты вращения в результате расчета принимают следующие значения: $T_{зр.с} = 0,0223$, $T_{пз} = 0,0438$, $T_{эм.п} = 0,0103$, $T_{гв} = 0,0065$, $T_{\sigma_{цвд}} = 0,0248$, $T_{\sigma_{цнд1}} = 0,0204$, $T_{\sigma_{цнд2}} = 0,0195$, $T_{\sigma_{цнд3}} = 0,0201$, $T_{\mu_{цвд}} = 0,0483$, $T_{\mu_{цнд1}} = 0,0683$, $T_{\mu_{цнд2}} = 0,0685$, $T_{\mu_{цнд3}} = 0,0685$.

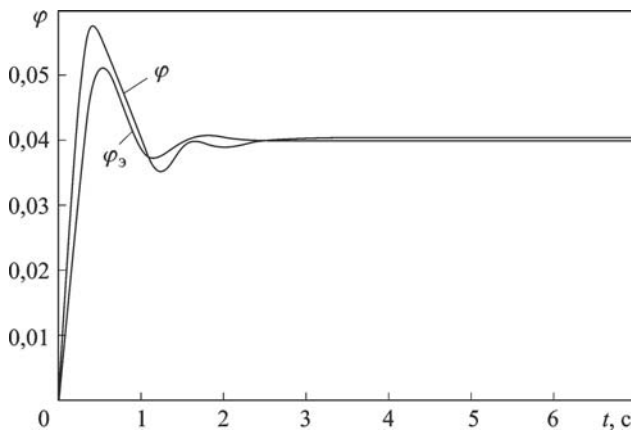


Рис. 3. Графики переходных процессов $\varphi(t)$, $\varphi_3(t)$ при $\zeta_r = -1$, $\pi_0 = 0$, $\psi = 0$

При вычислении параметров использовалась евклидова норма критерия оптимальности (5)

$$J(\mathbf{p}) = \|\mathbf{E}(\mathbf{p})\| = \sqrt{\sum_{k=1}^l e_k^2(\mathbf{p})} \rightarrow \min_{\mathbf{p}} = 0,0792, \quad (6)$$

где $e_k(\mathbf{p})$ — элементы вектора $\mathbf{E}(\mathbf{p})$. В качестве ОНБ использовались 256 функций Уолша, упорядоченных по Адамару. При поиске минимума целевой функции (6) использовался метод Гаусса–Ньютона, при этом понадобилось 8 итераций (начальные приближения параметров равнялись единице).

Следует отметить, что для успешного решения задачи параметрического синтеза необходимо изучить динамику поведения объекта без системы регулирования на начальном этапе ее функционирования и учесть ее при выборе эталонного переходного процесса. Это вызвано инерционностью не только самого объекта, но и, в первую очередь, гидравлической части системы регулирования. Поскольку метод использует аппарат математического программирования, то можно на искомые значения параметров регулирования наложить ограничения, связанные с их физической реализуемостью.

Анализ результатов показывает, что проекционно-матричный метод может успешно применяться при расчете систем регулирования энергетических турбин, динамика которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, что позволяет уже на этапе проектирования учитывать все более “тонкие” конструктивные особенности конкретного турбоагрегата без какого-либо упрощения.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (грант № 12-01-97520).

ЛИТЕРАТУРА

1. Калашиников А.А. Динамика регулирования турбин. М.: Энергоатомиздат, 1999. 328 с.

2. *Нестационарные системы автоматического управления: анализ, синтез и оптимизация* / под ред. К.А.Пупкова и Н.Д.Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. 632 с.
3. *Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров* / под ред. К.А.Пупкова и Н.Д.Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. 664 с.
4. Мельников Д.В., Фишер М.Р. Математическая модель контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины К-800-130/3000 / Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Спец. вып. Энергетическое и транспортное машиностроение. С. 197–215.
5. *Нормы участия энергоблоков ТЭС в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулировании частоты*. ОАО “Системный оператор – Центральное диспетчерское управление Единой энергетической системы”, Москва, 2005 г.

REFERENCES

- [1] Kalashnikov A.A. Dinamika regulirovaniya turbin [Dynamics of the turbine control]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1999. 328 p.
- [2] Pupkov K.A., Egupov N.D. Nestatsionarnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya: analiz, sintez i optimizatsiya [Time-dependent automatic control systems: analysis, synthesis, and optimization]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2007. 632 p.
- [3] Pupkov K.A., Egupov N.D. Matrichnye metody rascheta i proektirovaniya slozhnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya dlya inzhenerov [Matrix methods of analysis and design of complex automatic control systems for engineers]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2007. 664 p.
- [4] Mel'nikov D.V., Fisher M.R. Mathematical model of the rotor rotation control loop for K-800-130/3000 steam turbine. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost., Spetsvyv. "Energeticheskoe i transportnoe mashinostroenie"* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng., Spec. Issue “Power and transport engineering”], Moscow, 2011, pp. 197–215 (in Russ.).
- [5] Normy uchastiya energoblokov TES v normirovannom pervichnom i avtomaticheskom vtorichnom regulirovanii chastoty. Otkrytoe aktsionerное obshchestvo “Sistemnyy operator — Tsentral'noe dispetcherskoe upravlenie Edinoy energeticheskoy sistemy” [Participation rates of thermal power plant units in standardized primary and automatic secondary frequency control. Open JSC “System operator – Central supervisory control of the Unified Power System”]. Moscow, 2005.

Статья поступила в редакцию 24.12.2012

Дмитрий Владимирович Мельников — канд. техн. наук, заведующий кафедрой “Электротехника” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор 121 научной работы в области энергетики, моделирования и управления техническими системами.

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э.Баумана, Российская Федерация, 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2.

D.V. Mel'nikov — Cand. Sci. (Eng.), head of “Electrical Engineering” department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 121 publications in the field of power engineering, simulation and control of technical systems. Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, ul. Bazhenova, 2, Kaluga, 248000 Russia.