

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.1

СИНТЕЗ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Ю.П. Корнюшин, Д.В. Мельников, Н.Д. Егупов, П.Ю. Корнюшин

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация
e-mail: theroland@yandex.ru; melnikov-dv@yandex.ru; kornyushin.petr@gmail.com

Рассмотрены вопросы введения в контур регулирования частоты вращения роторов паровых энергетических турбин дополнительного регулятора при работе турбогенератора на автономной нагрузке. Приведены результаты работы штатной системы регулирования для изолированно работающих энергосистем. Вводимый дополнительный регулятор обеспечивает режим слежения выходных координат управляемого объекта (турбины) за требуемой траекторией их изменения. Желаемая траектория стабилизации выбрана исходя из безопасности функционирования элементов турбины. Предложен алгоритм синтеза дополнительного регулятора, использующий линеаризацию Ньютона – Канторовича, методы оптимального управления и аппарат матричных операторов, алгоритм функционирования регулятора, обеспечивающего режим слежения фазовых координат объекта за заданным сигналом. Рассмотрена возможность управления объектом в режиме реального времени. Определен вид эталонных сигналов, задающих желаемую траекторию стабилизации. Приведены результаты совместной работы двух регуляторов.

Ключевые слова: модель, турбина, система регулирования, регулятор, спектральные характеристики, функция Лагранжа.

SYNTHESIS OF AN ADDITIONAL CONTROLLER FOR STABILIZATION OF ANGULAR VELOCITY OF THE STEAM TURBINE ROTOR

Yu.P. Kornushin, D.V. Melnikov, N.D. Egupov, P.Yu. Kornushin

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch,
Kaluga, Russian Federation
e-mail: theroland@yandex.ru; melnikov-dv@yandex.ru; kornyushin.petr@gmail.com

The article considers the problems of an additional regulator insertion into the rotor speed control loop in the steam power turbines, when the turbine generator works under an autonomous load. The results of the standard control system operation for the isolated power systems are presented. An additional controller ensures the mode in which the output coordinates the controlled object (turbine) track along a desired trajectory of their change. The desired stabilization trajectory is selected based on the safe turbine element operation. The algorithm of the additional controller synthesis is proposed, the linearization Newton – Kantorovich methods of an optimal control and the matrix operator tool are used. The algorithm of a regulator operation ensuring the mode of the object phase coordinates, which track the specified signal, is also proposed. The possibility of a real-time object control is considered. The reference signal type defining a desired stabilization trajectory is determined. The results of the joint operation of two regulators are presented.

Keywords: model, turbine, regulation system, controller, spectral characteristics, Lagrange function.

Введение. Классическими, разработанные в 1950–1970 гг. и используемые в настоящее время, стали методы регулирования частоты вращения роторов паровых энергетических турбин, которые основаны на простых и надежных алгоритмах, реализующих П- и ПД-принципы регулирования. Подобные принципы используются, например, в турбинах малой мощности, выпускаемых ОАО “Калужский турбинный завод” (КТЗ) [1]. Указанные турбины просты в эксплуатации и ремонте гидромеханических регуляторов турбин, а также обеспечивают требования стандарта [2, 3]. Если необходимые требования по частоте вращения ротора турбогенератора по каким-либо причинам не выполняются, то это не является критичным, поскольку турбогенераторы, как правило, работают на некоторую сеть и частота вращения турбины определяется частотой сети, так как турбогенераторы представляют собой синхронные машины.

Для изолированно работающих энергосистем, где турбогенератор работает на автономную нагрузку, требования по точности поддержания необходимой частоты вращения ротора турбины становятся достаточно жесткими, поскольку турбина может эксплуатироваться в широком диапазоне значений параметров острого пара и электрической нагрузки.

В качестве примера рассмотрим структурную схему системы регулирования частоты вращения ротора паровой энергетической турбины ПТ-25/30-90/10М (рис. 1), выпускаемой КТЗ.

Относительные изменения понимаются в формате $(x_{\text{текущее}} - x_{\text{ном}})/x_{\text{ном}}$. Нелинейная характеристика имеет вид

$$F(z) = \begin{cases} 0,5 \frac{z^2}{\Delta z_0} \text{sign} z & \text{при } |z| \leq \Delta z_0; \\ z - 0,5 \Delta z_0 \text{sign} z & \text{при } || > \Delta z_0, \end{cases}$$

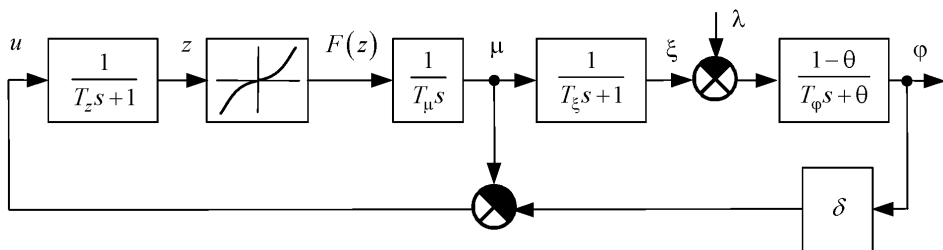


Рис. 1. Структурная схема системы регулирования частоты вращения ротора турбины:

$\varphi, \xi, \mu, z, \lambda$ — относительные изменения частоты вращения ротора турбины, расхода пара в турбине, отклонение поршня сервомотора, отклонение поршня золотника и отклонение электрической нагрузки генератора; $T_z, T_\mu, T_\xi, T_\varphi$ — постоянные времени соответствующих элементов; δ — степень неравномерности системы регулирования; θ — эквивалентный коэффициент самовыравнивания турбины

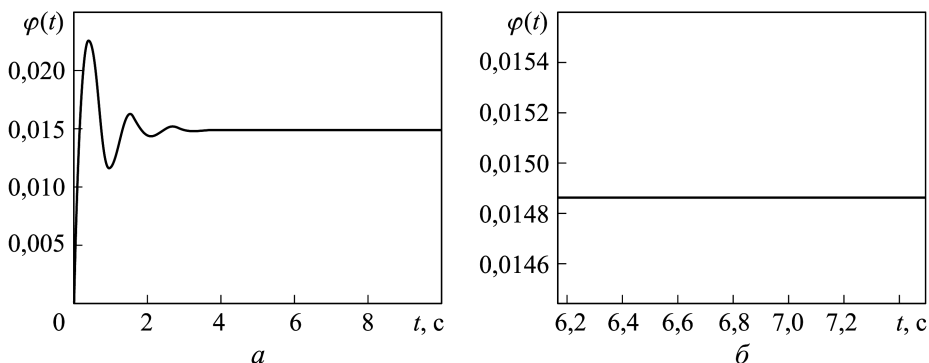


Рис. 2. Зависимость относительного изменения частоты вращения ротора от времени $\varphi(t)$ (а) и ее фрагмент (б)

который обусловлен особенностями конструкции золотника, устраняющими его “дребезг” при номинальной частоте вращения ротора турбины [1].

Установившееся значение относительного изменения частоты вращения ротора для приведенной системы регулирования составляет величину, близкую к $\lambda\delta$. При малых значениях λ система обеспечивает необходимое качество регулирования. Например, для параметров системы $T_z = 0,03$, $T_\mu = 0,1$ с, $T_\xi = 0,12$ с, $T_\varphi = 6$ с, $\delta = 0,03$, $\theta = 0,05$, $\Delta z_0 = 0,3$ и $\lambda = -0,5$, что соответствует сбросу нагрузки 50%. Зависимость частоты вращения ротора турбины при работе на автономную нагрузку от времени имеет вид, представленный на рис. 2.

Относительное отклонение частоты вращения ротора составляет значение, близкое к 0,015 в относительных единицах, что в абсолютных единицах частоты электрического тока соответствует 50,75 Гц. Для работы турбоагрегата в большой сети это нормально, идет процесс самосинхронизации.

В то же время стандарт организации предписывает следующее: частота электрического тока в нормальном режиме работы должна быть номинальной 50 Гц с отклонениями не более $\pm 0,05$ Гц (нормально допустимые) и кратковременно не более $\pm 0,2$ Гц (максимально допустимые). При этом восстановление отклонений частоты до нормально допустимых должно обеспечиваться за время не более 15 мин [2].

При использовании турбогенераторов, работающих на автономную нагрузку, необходима дополнительная система стабилизации частоты вращения ротора турбины.

Предложено стабилизировать частоту вращения ротора турбины после сброса или набора нагрузки турбогенератором с использованием дополнительного специального регулятора, который включается при превышении значения электрической нагрузки генератора ($|\lambda| > 0,034$) и способен решить поставленную задачу. Причем до

момента включения дополнительного регулятора штатный регулятор осуществляет процесс регулирования частоты.

Применительно к такому объекту управления, как турбина, целесообразно использовать регулятор, работающий не в режиме стабилизации, который не всегда является управляемым по отношению к времени перевода объекта в заданное состояние, а регулятор, обеспечивающий режим слежения выходных координат управляемого объекта (турбины) за требуемой траекторией их изменения. Желаемая траектория выхода объекта в режим стабилизации (желаемое быстродействие системы) выбирается и задается, прежде всего, исходя из безопасности функционирования элементов турбины и ее системы регулирования.

Рассмотрим задачу синтеза дополнительного регулятора для стабилизации угловой скорости паровой турбины в условиях внешних возмущений — изменений электрической нагрузки генератора.

Постановка задачи. Задан объект управления — турбина и исполнительная часть ее системы регулирования частоты вращения ротора. Математическая модель объекта описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} T_\varphi d\varphi/dt &= (1 - \theta) (\xi - \lambda) - \theta\varphi, \\ T_\xi d\xi/dt &= \mu - \xi, \\ T_\mu d\mu/dt &= \begin{cases} 0,5 \frac{z^2}{\Delta z_0} \operatorname{sign} z & \text{при } |z| \leq \Delta z_0; \\ z - 0,5\Delta z_0 \operatorname{sign} z & \text{при } |z| > \Delta z_0, \end{cases} \\ T_z \frac{dz}{dt} &= -z + u. \end{aligned} \quad (1)$$

Отметим, что все переменные в (1) являются измеряемыми. Требуется синтезировать регулятор (найти управление) $u(t) = u(\mathbf{X}, \mathbf{X}_3(t), t)$, переводящий объект из текущего фазового состояния $\mathbf{X}(t)$ в конечное состояние, определяемое отслеживаемым (эталонным) сигналом $\mathbf{X}_3(t)$, и минимизирующий функционал качества

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T [(\mathbf{X}^T(t) - \mathbf{X}_3^T(t)) \mathbf{Q}_1(t) (\mathbf{X}(t) - \mathbf{X}_3(t)) + u^T(t) r_1(t) u(t)] dt, \quad (2)$$

где $\mathbf{X}(t) = [\varphi \ \xi \ \mu \ z]$ — вектор фазовых координат объекта; $\mathbf{Q}_1(t)$ и $r_1(t)$ — симметрические положительно определенные матрицы.

Решение задачи. Подход к решению подобного типа задач, а именно использование аппарата матричных операторов и сведение задачи

минимизации функционала (2) к задаче минимизации функции Лагранжа, предложен в работе [4]. Коротко остановимся на основных положениях подхода.

Пусть математическая модель объекта управления задана в виде

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{X}(t), t) + \mathbf{B}(t)u(t). \quad (3)$$

В рассматриваемом случае

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}(t), t) = \begin{cases} ((1 - \theta)(\xi - \lambda) - \theta\varphi) / T_\varphi, \\ (\mu - \xi) / T_\xi, \\ \left(\begin{cases} 0,5z + 0,25 \frac{z^2}{\Delta z_0} \operatorname{sign} z & \text{при } |z| \leq \Delta z_0 \\ z - 0,25\Delta z_0 \operatorname{sign} z & \text{при } |z| > \Delta z_0 \end{cases} \right) / T_\mu, \\ -z / T_z, \end{cases}$$

$$\mathbf{B}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/T_z \end{bmatrix}.$$

1. Выполняется линеаризация математической модели с использованием метода Ньютона–Канторовича [5]. В результате получается последовательность линеаризованных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{k+1}(t) + \mathbf{A}^k(t) \mathbf{X}_{k+1}(t) &= \mathbf{B}(t)u(t) + \mathbf{Z}^k(t), \\ \mathbf{X}_{k+1}(t_0) &= \mathbf{X}_0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{A}^k(t) = -\mathbf{F}'_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}_k(t), t)$; $\mathbf{Z}^k(t) = \mathbf{A}^k(t) \mathbf{X}_k(t) + \mathbf{F}(\mathbf{X}_k(t), t)$;

$$\mathbf{F}'_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}_k(t), t) = \left\{ \frac{\partial f_i}{\partial x_j^k} \right\}_{i,j=1}^m.$$

2. Выполняется параметризация линеаризованной математической модели объекта управления и функционала качества с использованием матричных операторов [6, 7]. Задача минимизации функционала (2) для объекта (4) заменяется задачей минимизации функции Лагранжа, построенной на основе параметризованного функционала и математической модели объекта управления. Функция Лагранжа имеет вид

$$\begin{aligned} \text{Lag}(\hat{\mathbf{C}}^X, \hat{\mathbf{C}}^u, \Lambda) &= \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{C}}^X - \hat{\mathbf{C}}^{X_0})^T \mathbf{Q} (\hat{\mathbf{C}}^X - \hat{\mathbf{C}}^{X_0}) + \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{C}}^u)^T \mathbf{R} \hat{\mathbf{C}}^u + \\ &+ \Lambda^T (\hat{\mathbf{C}}^X - \mathbf{A} \hat{\mathbf{C}}^u - \mathbf{A}_0 \hat{\mathbf{C}}^{X_0} - \mathbf{A}_0 \hat{\mathbf{C}}^Z). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\hat{\mathbf{C}}^X$, $\hat{\mathbf{C}}^u$, $\hat{\mathbf{C}}^{X_0}$, $\hat{\mathbf{C}}^{X_3}$ – спектральные характеристики фазового состояния объекта и управляющего воздействия; начального состояния объекта и управления, эталонного сигнала; \mathbf{A} , \mathbf{A}_0 – спектральные характеристики объекта управления; Λ – вектор множителей Лагранжа.

3. Минимизация целевой функции относительно характеристик $\hat{\mathbf{C}}^X$, $\hat{\mathbf{C}}^u$ и вектора Λ дает следующее выражение для характеристик управления:

$$\hat{\mathbf{C}}^u = \mathbf{S} \hat{\mathbf{C}}^{X_3} - \mathbf{W} \left(\hat{\mathbf{C}}^{X_0} + \hat{\mathbf{C}}^Z \right), \quad (6)$$

где $\mathbf{S} = (\mathbf{R} + \mathbf{A}^T \mathbf{Q} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}$; $\mathbf{W} = \mathbf{S} \mathbf{A}_0$.

Переходя во временную область, можно получить аналитическое выражение для управления

$$u_{k+1}(t) = \int_{t_0}^T \mathbf{S}(t, \tau) \mathbf{X}_3(\tau) d\tau - \int_{t_0}^T \mathbf{W}(t, \tau) \mathbf{Z}^k(\tau) d\tau - \int_{t_0}^T \mathbf{W}(t, \tau) d\tau \mathbf{X}(t_0), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

Выражение (7) определяет оптимальное программное управление, осуществляющее перевод объекта управления (3) из начального фазового состояния $\mathbf{X}(t_0)$ в конечное состояние, определяемое отслеживаемым сигналом $\mathbf{X}_3(t)$.

4. Выполняется “размораживание” начальных условий, предложенное Н.Н. Красовским, для получения алгоритма функционирования регулятора, обеспечивающего режим слежения фазовых координат объекта за заданным сигналом [8]. Оно осуществляется следующим образом. Поскольку отслеживаемый сигнал $\mathbf{X}_3(\tau)$ находится под знаком интеграла, несколько изменим процедуру “размораживания”, состоящую в том, что сразу строится цифровой регулятор для непрерывного объекта, осуществляющий управление им согласно алгоритму, приведенному ниже.

4.1. Выбор некоторого интервала времени $[t_0, t_0 + \Delta T]$, где $\Delta T = N_1 h$ (h – шаг дискретизации; N_1 – натуральное число).

4.2. Расчет функций $\mathbf{S}(t, \tau)$ и $\mathbf{W}(t, \tau)$, определенных на области $[t_0, t_0 + \Delta T] \times [t_0, t_0 + \Delta T]$.

4.3. Задание отслеживаемого сигнала $\mathbf{X}_3(t)$ своими дискретными отсчетами как вектора

$$\mathbf{X}_3(t) = [\mathbf{X}_3(t_0 - N_1 h) \dots \mathbf{X}_3(t_0 - 2h) \mathbf{X}_3(t_0 - h) \mathbf{X}_3(t_0)].$$

4.4. Вычисление управления по формуле

$$\begin{aligned}
u_{k+1}(t_0) &= \\
&= \int_{t_0}^{t_0+\Delta T} \mathbf{S}(t_0, \tau) \mathbf{X}_3(\tau - \Delta T) d\tau - \int_{t_0}^{t_0+\Delta T} \mathbf{W}(t_0, \tau) \mathbf{Z}^k(\tau - \Delta T) d\tau - \\
&\quad - \int_{t_0}^{t_0+\Delta T} \mathbf{W}(t_0, \tau) d\tau \mathbf{X}(t_0), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (8)
\end{aligned}$$

На каждом шаге итерационной процедуры определяется управление $u_{k+1}(t_0)$ путем изменения сигнала $\mathbf{X}_k(t)$ и соответствующего ему управления.

4.5. Перевод объекта управления (1) из фазового состояния $\mathbf{X}(t_0)$ в фазовое состояние $\mathbf{X}(t_0 + h)$ с использованием управления, определяемого по (8).

4.6. Смещение границ интервала $[t_0, t_0 + \Delta T]$ на шаг дискретизации h , т.е. за t_0 принимаем $t_0 + h$, за $t_0 + \Delta T$ — шаг $t_0 + \Delta T + h$. Повторяем пункты 4.2–4.6 алгоритма.

В качестве пояснения пункта 3 алгоритма отметим, что при первом его выполнении полагаем $\mathbf{X}_3(t) = [0 \dots 0 \ 0 \ \mathbf{X}_3(t_0)]$, при втором — $\mathbf{X}_3(t) = [0 \dots 0 \ \mathbf{X}_3(t_0 - h) \ \mathbf{X}_3(t_0)]$ и т.д.

Временная задержка отслеживания сигнала $\mathbf{X}_3(t)$ будет определяться величиной $\Delta T - h$. Таким образом, предлагаемый алгоритм синтеза регулятора формирует не программное управление, а управление по цепи обратной связи.

Особенностью предложенного алгоритма является то, что функционал качества (2) позволяет накладывать ограничения не только на управление $u(t)$, но и на близость фазовых координат $\mathbf{X}(t)$ к отслеживаемому сигналу $\mathbf{X}_3(t)$ за счет выбора матрицы $\mathbf{Q}_1(t)$ и переменной $r_1(t)$ в функционале. При этом значение величины N_1 заранее не известно. Величина N_1 может быть выбрана достаточно малой и это не повлияет на обусловленности матриц \mathbf{A}_0 и \mathbf{S} .

При соответствующем выборе ортонормированного базиса можно выполнять расчеты с $N_1 = 1$. В качестве ортонормированного базиса целесообразно выбрать систему функций Уолша, упорядоченных по Адамару, и $N_1 = 1$. При этом значительно сокращается время вычислений и появляется возможность управлять объектом в *режиме реального времени*. Двумерные преобразования Уолша–Адамара сводятся к комбинациям операций сложения и вычитания четырех чисел.

При малой величине h нелинейные свойства рассматриваемого объекта практически не проявляются и необходимость в использовании линеаризации Ньютона–Канторовича отпадает. Эта линеаризация была необходима как промежуточная процедура перехода от

нелинейных уравнений к линейным, поскольку аппарат матричных операторов ориентирован на соответствующие операции с линейными уравнениями.

Выбор начальных условий, эталонных сигналов стабилизации и параметров критерия оптимальности (2). Начальные условия, с которыми начинает формироваться управление регулятором, определяются из текущего состояния фазовых координат в момент его включения.

Отслеживаемые сигналы формируются последовательно, начиная с сигнала $\varphi_3(t)$. Для $\varphi(t)$ выбираем эталон вида $\varphi_3(t) = ate^{-\alpha t}$, что обусловлено следующими условиями. Сигнал начинается с нуля и вначале является возрастающей функцией, а затем асимптотически стремится к нулю, что и необходимо при стабилизации. Для любой системы такой тип сигнала достаточно “мягкий”. С помощью показателя экспоненты α можно регулировать процесс стабилизации. Коэффициент a определяет “всплеск” отслеживаемого сигнала и согласуется со значением относительного отклонения электрической нагрузки λ генератора, а его знак — со знаком величины λ .

Отслеживаемые сигналы $\xi_3(t)$, $\mu_3(t)$ находятся из системы уравнений (1). Для выбранного сигнала $\varphi_3(t)$ и приведенных выше параметров системы имеем

$$\xi_3(t) = a(6,3158(1 - \alpha t) + 0,05263t)e^{-\alpha t} + \lambda;$$

$$\mu_3(t) = a(6,3221(1 - \alpha t) - 1,5158\alpha + 0,7579\alpha^2 t + 0,05263t)e^{-\alpha t} + \lambda.$$

Ввиду высокого быстродействия золотника полагаем $z_3(t) = 0$. Сигналы $\xi_3(t)$, $\mu_3(t)$ учитывают нагрузку λ .

Выбор параметров $\mathbf{Q}_1(t)$ и $r_1(t)$ критерия (2) осуществляется исходя из принадлежности фазовых координат и управления “эксплуатационной” области [9]. В работе [10] предложено назначать элементы матрицы $[\mathbf{Q}_1(t) \ r_1(t)]$ постоянными и диагональными, а также определять их методом равного взвешивания. В рассматриваемом случае управление является скалярным, поэтому $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_1(t)$,

$r = r_1(t)$, соответственно $\mathbf{Q} = \text{diag}\{q_{11} \ q_{22} \ q_{33} \ q_{44}\}$, $q_{11} = \frac{m}{n} r \frac{u_{\max}^2}{x_{1 \max}^2}$,
 $m = 1$, $n = 4$, $q_{ii} = q_{11} \frac{x_{1 \max}^2}{x_{i \max}^2}$, $i = \overline{2, 4}$. Максимальные значения $x_{i \max}$, $i = \overline{1, 4}$, и u_{\max} можно оценить, используя данные о работе “штатной” системы регулирования частоты вращения ротора турбины: $x_{1 \max} = 0,0227$; $|x_{2 \max}| = 0,7$; $|x_{3 \max}| = 0,75$;

$|x_{4 \max}| = 0,24$; $|u_{\max}| = 0,25$. Полагая $r = 1,0$, находим элементы

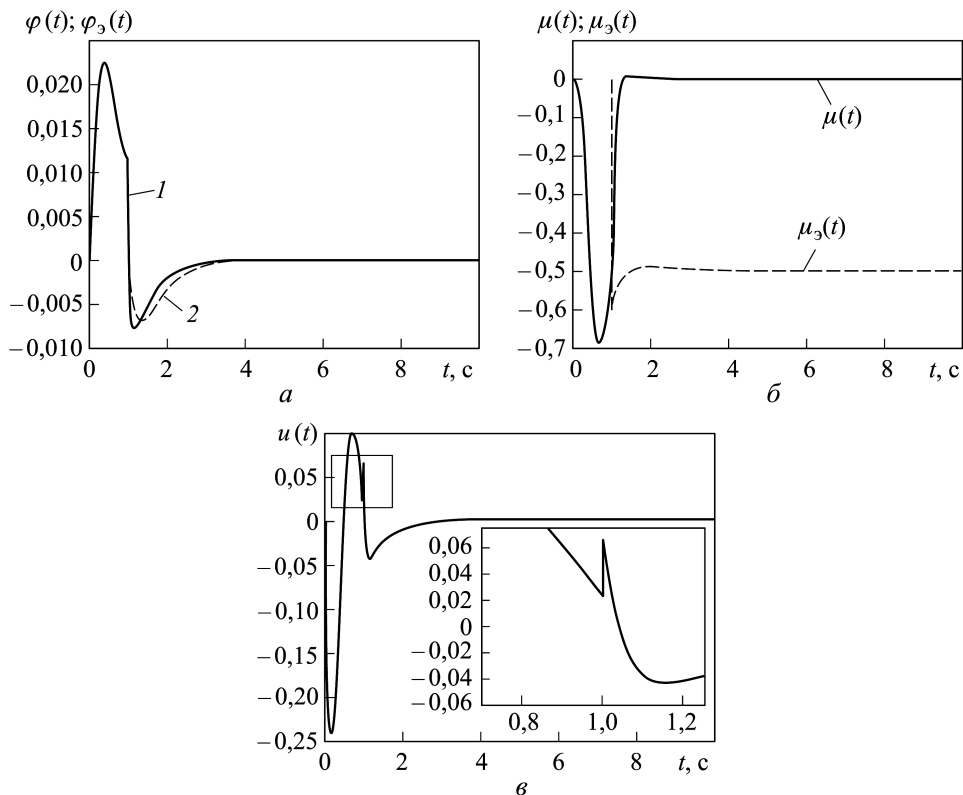


Рис. 3. Зависимости фазовых координат $\varphi(t)$ (а), $\mu(t)$ (б) и управления $u(t)$ (в) от времени, иллюстрирующие работу дополнительного регулятора

матрицы $\mathbf{Q} = \text{diag} \{30,323 \ 0,032 \ 0,028 \ 0,271\}$ (выбор значения r и последующих значений матрицы \mathbf{Q} влияет лишь на значение критерия оптимальности, но не на получаемые результаты).

Результаты. Зависимости фазовых координат $\varphi(t)$, $\mu(t)$ и управления $u(t)$ от времени, иллюстрирующие работу дополнительного регулятора, приведены на рис. 3.

Первый регулятор включился спустя одну секунду после сброса нагрузки на 50% ($\lambda = -0,5$). Выбраны следующие значения параметров эталонных сигналов $a = -0,015$, $\alpha = 0,8$. На приведенных зависимостях видна характерная точка, соответствующая моменту времени $t = 1$ с, когда включился второй регулятор. Стабилизация двух основных координат относительного изменения частоты вращения ротора турбины $\varphi(t)$ и относительного отклонения поршня сервомотора $\mu(t)$ происходит по траекториям, близким к эталонным. На зависимости $u(t)$ виден “всплеск” сигнала, что объясняется особенностью гидравлической системы регулирования рассматриваемой турбины. Ее главный элемент — трансформатор давления системы, к которому поступает прямой импульс по частоте вращения от насоса-регулятора (датчика частоты вращения ротора турбины). Трансформатор давления

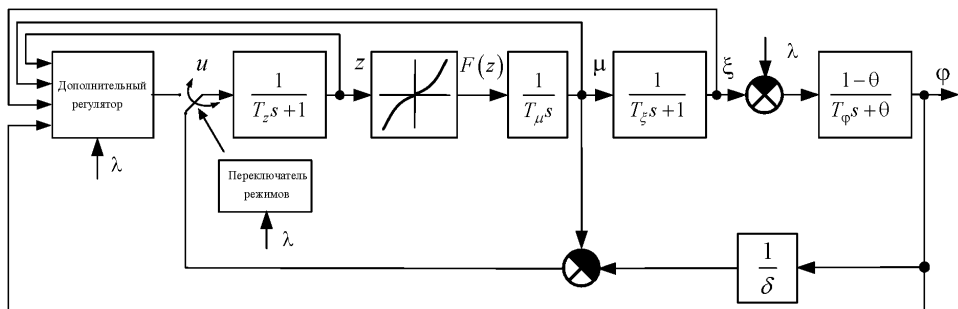


Рис. 4. Структурная схема системы регулирования частоты вращения ротора турбины с дополнительным регулятором

в силу конструктивных особенностей [1] обладает высокой чувствительностью и “мгновенно” реагирует на малейшие изменения частоты вращения ротора турбины, поэтому в модели этот элемент учитывался как безынерционное звено.

Включение в контур управления дополнительного регулятора осуществляется по структурной схеме, представленной на рис. 4.

Как правило, системы регулирования современных турбин являются электрогидравлическими. К гидравлической части относятся все сервомоторы, некоторые промежуточные усилители, датчик частоты вращения, система противоразгонной защиты. В рассматриваемой системе с дополнительным регулятором гидравлическая часть остается без изменений. Дополнительный регулятор относится к электрической части системы регулирования, поскольку определена не его физическая реализация, а алгоритм его функционирования, он может быть реализован только с использованием средств вычислительной техники. Переключатель режимов работы включает дополнительный регулятор при превышении электрической нагрузки генератора более $|\lambda| > 0,034$ (относительное значение).

Переключение режимов работы может осуществляться так же, как и защита гидравлической части системы регулирования турбин ЛМЗ [11].

Вывод. Полученные результаты свидетельствуют о том, что введенный дополнительный регулятор, предназначенный для решения задач слежения, обеспечил стабилизацию угловой скорости паровой турбины.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калужской области (гранты № 14-41-03071, № 14-48-03013).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирюхин В.И., Тараненко Н.М., Огурцова Е.П. Паровые турбины малой мощности КТЗ. М.: Энергоатомиздат, 1987, 216 с.

2. *Нормы участия энергоблоков ТЭС в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулировании частоты.* ОАО “Системный оператор — Центральное диспетчерское управление Единой энергетической системы”. М., 2005.
3. *Нормы участия энергоблоков тепловых электростанций в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности.* Стандарт организации. ОАО “Системный оператор единой энергетической системы”. Издание официальное. М., 2013. URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_002-2013_freq_regulation.pdf (дата обращения: 26.11.2014).
4. *Корнюшин Ю.П., Никифоров В.М., Егунов Н.Д., Корнюшин П.Ю.* Синтез оптимальных регуляторов в задаче слежения для нелинейных объектов с ограничением на управление с использованием сеточно-проеекционного метода // Труды ФГУП “НПЦ АП” Системы и приборы управления. 2010. № 4. С. 29–37.
5. *Гайский В.А., Егунов Н.Д., Корнюшин Ю.П.* Применение функций Уолша в системах автоматизации научных исследований. Киев: Наукова думка, 1993. 212 с.
6. *Пупков К.А., Егунов Н.Д.* Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. Ч. II. Вычислительно-аналитический эксперимент: аппарат матричных операторов и вычислительные технологии. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 416 с.
7. *Корнюшин Ю.П., Егунов Н.Д., Корнюшин П.Ю.* Идентификация нелинейных объектов и систем управления с использованием аппарата матричных операторов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. Вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/1315.html> (дата обращения: 01.04.2015).
8. *Красовский Н.Н.* Теория управления движением. Линейные системы. М.: Наука, 1968, 476 с.
9. *Справочник по теории автоматического управления;* под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
10. *Брайсон А., Хо Ю-Ши.* Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972. 544 с.
11. *Фрагин М.С.* Регулирование и маслоснабжение паровых турбин: настоящее и ближайшая перспектива. Сер. Проблемы энергетики. Вып. 6. СПб.: Энерготех, 2005. 248 с.

REFERENCES

- [1] Kirukhin V.I., Taranenko N.M., Ogurtsova E.P. Parovye turbiny maloy moshchnosti KTZ [Steam turbines are low-power KTR]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 216 p.
- [2] The rules of participation of power units in the initial normalized and automatically in the secondary regulation of frequency. ОАО “System Operator — Central Dispatch Administration of the Unified Energy System”, Moscow, 2005.
- [3] The rules of participation units of thermal power plants in the initial normalized frequency control and automatic secondary regulation of frequency and active power flows. Standard organization. ОАО “System Operator of the Unified Energy System”. Official publication. Moscow, 2013. URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_002-2013_freq_regulation.pdf (accessed 11.26.2014).
- [4] Korniyushin Yu.P., Nikiforov V.M., Egupov N.D., Korniyushin P.Yu. Synthesis of optimal controls in the problem of tracking for nonlinear objects control constraint using grid-projection method. *Proceedings of the FSUE “NPC AP” systems and control devices.*, 2010, no. 4, pp. 29–37 (in Russ.).
- [5] Gaisky V.A., Egupov N.D., Korniyushin Yu.P. Primenenie funktsiy Uolsha v sistemakh avtomatizatsii nauchnykh issledovaniy [Application of Walsh functions in automation systems research]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1993. 212 p.

- [6] Pupkov K.A., Egupov N.D., ed. *Metody inzhenernogo sinteza slozhnykh sistem upravleniya: analiticheskiy apparat, algoritmy prilozheniya v tekhnike. Ch. II. Vychislitel'no-analiticheskiy eksperiment: apparat matrichnykh operatorov i vychislitel'nye tekhnologii* [Methods for the synthesis of complex engineering systems management: an analytical apparatus, algorithms, applications in engineering. Part II. Computational and analytical experiment: The unit matrix operators and the computational technology]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2012. 416 p.
- [7] Kornushin Yu.P., Egupov N.D., Kornushin P.Yu. Identification of non-linear processes and control systems with the use of the device matrix operators. *Jelekt. Nauchno-Tehn. Izd. "Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii"* [El. Sc.-Techn. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation", 2014, no. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/1315.html> (accessed 01.04.2015).
- [8] Krasovskiy N.N. *Teoriya upravleniya dvizheniem. Lineynye sistemy* [The theory of motion control. Linear systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 476 p.
- [9] Krasovskiy A.A., ed. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook of automatic control theory]. Moscow, Nauka Publ. 1987. 712 p.
- [10] Bryson A., Ho Yu-Shi. Russ. ed.: *Prikladnaya teoriya optimal'nogo upravleniya* [Applied optimal control]. Moscow, Mir Publ., 1972. 544 p.
- [11] Fragin M.S. *Regulirovanie i maslosnabzhenie parovykh turbin: nastoyashchee i blizhayshaya perspektiva. Ser. Problemy energetiki. Vyp. 6* [Regulation and oil supply steam turbines: the present and the near future. Ser. Energy Problems, iss. 6]. St.Petersburg, Energotech Publ., 2005. 248 p.

Статья поступила в редакцию 02.12.2014

Корнюшин Юрий Петрович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Системы автоматического управления” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 248600, Калуга, ул. Баженова, д. 2.

Kornushin Yu.P. — D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch. Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, ul. Bazhenova 2, Kaluga, 248600 Russian Federation.

Мельников Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой “Электротехника” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 248600, Калуга, ул. Баженова, д. 2.

Melnikov D.V. — Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch. Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, ul. Bazhenova 2, Kaluga, 248600 Russian Federation.

Егупов Николай Дмитриевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Системы автоматического управления” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 248600, Калуга, ул. Баженова, д. 2.

Egupov N.D. — D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch. Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, ul. Bazhenova 2, Kaluga, 248600 Russian Federation.

Корнюшин Петр Юрьевич — аспирант кафедры “Системы автоматического управления” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 248600, Калуга, ул. Баженова, д. 2.

Kornushin P.Yu. — Ph.D. student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch.

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, ul. Bazhenova 2, Kaluga, 248600 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Корнюшин Ю.П., Мельников Д.В., Егупов Н.Д., Корнюшин П.Ю. Синтез дополнительного регулятора для стабилизации угловой скорости ротора паровой турбины // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2015. № 5. С. 100–112.

Please cite this article in English as:

Kornushin Yu.P., Melnikov D.V., Egupov N.D., Kornushin P.Yu. Synthesis of an additional controller for stabilization of angular velocity of the steam turbine rotor. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2015, no. 5, pp. 100–112.