

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ТУРБИНЫ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

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

*Рассмотрен возможный подход расчета параметров (параметрического синтеза) системы регулирования частоты вращения турбины на примере турбины К-800-130/3000. Предложен новый критерий оптимальности. Учтена параметрическая неопределенность исполнительных элементов системы регулирования и неопределенность входного воздействия. Представлены результаты расчетов. Установлено, что система регулирования турбины К-800-130/3000 имеет хорошие робастные свойства по отношению к отклонению давления свежего пара и пульсациям давления масла в исполнительной части системы регулирования (до 20% от номинального значения). Высокая надежность системы регулирования к парированию возмущающих воздействий подтверждена проведенными исследованиями.*

**Ключевые слова:** математическая модель, паровая турбина, система регулирования, робастность, дифференциатор.

## STUDYING AND CALCULATING PARAMETERS OF COMPONENTS OF THE ROTATION SPEED CONTROL SYSTEM OF A TURBINE ROTOR TAKING INTO ACCOUNT THE PARAMETRIC UNCERTAINTY OF THE MATHEMATICAL MODEL

Yu.P. Korniyushin, D.V. Mel'nikov, N.D. Egupov, P.Yu. Korniyushin

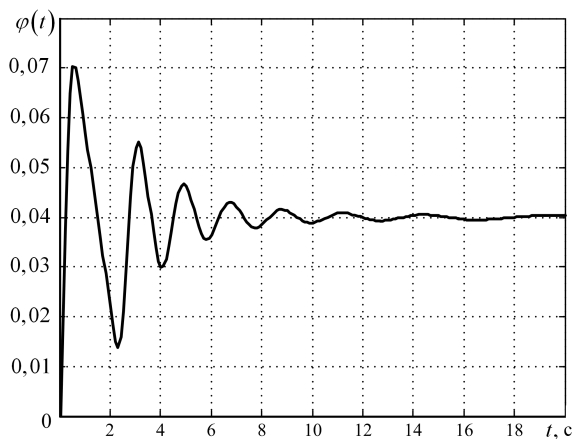
Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation  
e-mail: theroland@yandex.ru

*The possible approach is considered for calculating the parameters (parametric synthesis) of the system of the turbine rotation speed control by an example of the K-800-130/3000 turbine. A new criterion of optimality is proposed. The parametric uncertainty of control system actuators and the input action indeterminacy are taken into account. The calculation results are presented. It is found that the control system of the K-800-130/3000 turbine has good robust properties with respect to the fresh steam pressure deviation and the oil pressure pulsations in the actuator's part of the control system (up to 20% of the nominal value). A high reliability of the control system for parrying the perturbing actions is confirmed by the performed studies.*

**Keywords:** mathematical model, steam turbine, control system, robustness, differentiator.

**Введение. Неформальная постановка задачи.** В конце 1970-х — начале 1980-х годов была поставлена задача разработать новые способы повышения быстродействия системы регулирования турбоагрегатов путем введения в эту систему регуляторов скорости и ускорения.

**Рис. 1. Зависимость относительного отклонения частоты вращения ротора  $\varphi(t)$  от номинальных значений при сбросе нагрузки при регулировании только по положению изменения угловой скорости**



Это не только могло повысить чувствительность системы и поддержать регулируемый параметр (угловую скорость на заданном уровне), но и защитить агрегат от чрезмерного повышения угловой скорости при сбросе максимальной нагрузки, что не привело к ускоренному износу подвижных деталей турбины и не снизило экономичность ее работы. Зависимость относительного отклонения частоты вращения ротора  $\varphi(t)$  от номинальных значений при сбросе нагрузки при регулировании только по положению изменения угловой скорости приведена на рис. 1. Согласно этой зависимости, время регулирования достаточно большое, наблюдается высокая колебательность процесса. Условия эксплуатации турбины — жесткие.

Введение гибкой обратной связи (дифференцирующих звеньев) приводит к повышению демпфирования системы, т.е. к уменьшению колебаний выходного сигнала и времени регулирования.

Для повышения быстродействия гидравлический дифференциатор органически встраивался в гидравлическую систему регулирования. Однако при его использовании возникали проблемы. Ввиду косвенного и неточного измерения производной угловой скорости ротора происходили ложные срабатывания дифференциатора, что приводило к возникновению гидравлических ударов в маслопроводах системы регулирования — скорость переходных процессов была достаточно высокой. Таким образом, гидравлические дифференциаторы сложны в настройке и последующей эксплуатации.

В связи с изложенным, гидравлические системы дифференцирования угловой скорости ротора были заменены электрическими. Информация о частоте вращения ротора турбины поступает с электрического датчика, например, в системе регулирования частоты вращения ротора паровой турбины К-800-130/3000 [1].

В нормальных условиях работы турбоагрегата выходной сигнал дифференциатора, как правило, заблокирован, блокировка снимается

при повышении частоты вращения ротора турбоагрегата выше определенного значения для того, чтобы турбоагрегат вышел на нормальный режим функционирования за заданное время и с минимальным пере-регулированием.

Введение в управляющий сигнал информации о производной угловой скорости всегда осуществляется с некоторым коэффициентом передачи. Вопрос заключается в том, какое значение должен иметь этот коэффициент. Если известна передаточная функция объекта и задан некоторый эталонный переходной процесс, то для класса линейных систем управления данная задача решается однозначно. Математические модели турбин с системами регулирования относятся к классу нелинейных систем. Поэтому не всегда достаточно просто получить ответ на данный вопрос. Важен следующий вопрос: для всех ли значений производной угловой скорости необходимо одно и то же значение коэффициента передачи? В работе [1] показано, что коэффициент передачи для разных значений ускорения ротора принимает различные значения: при малых значениях ускорения ротора коэффициент передачи мал, а при больших значениях — существенно больше. При больших ускорениях ротора, которые наблюдаются при резком сбросе нагрузки или ее наборе, возможно появление большого перерегулирования и высокой колебательности процесса. Для быстрой стабилизации угловой скорости относительно ее номинального значения и демпфирования колебаний необходимо высокое значение коэффициента передачи по ускорению ротора. В случае небольших отклонений нагрузки от номинального значения угловая скорость ротора также незначительно отличается от номинального значения и для ее стабилизации значение коэффициента передачи может быть минимальным или нулевым.

Сформулируем предварительно задачу следующим образом. Необходимо определить значения параметров (коэффициентов передачи) цепи дифференцирования угловой скорости ротора турбины, исходя из норм участия энергоблоков тепловой электростанции (ТЭС) в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулировании частоты или возможные интервалы их изменений [2].

Параметры системы регулирования паровых турбин при проектировании рассчитываются исходя из некоторых эталонных значений рабочего тела турбины (давление и температура свежего пара; изменения расхода пара в производственном и теплофикационном отборах; давление масла в гидравлической части системы регулирования) при детерминированных значениях отклонений электрической нагрузки генератора от номинального значения. Однако значения указанных

параметров могут отличаться от номинальных [3]. Пульсации давления масла в исполнительной части системы регулирования существенно влияют на реальные постоянные времени сервомоторов и отсечных золотников. В результате снижается качество вырабатываемой энергии, усиливается нагруженное состояние и происходит ускоренный износ подвижных деталей турбины. Поэтому при проектировании системы регулирования необходимо учитывать как флуктуации параметров турбины, так и колебания внешних возмущений, например изменение давления свежего пара.

С учетом изложенного выше возникает задача расчета (синтеза) параметров элементов регулятора в условиях параметрической неопределенности объекта управления (под объектом понимается турбина и исполнительные элементы системы регулирования), проявляющейся в недоопределенных значениях постоянных времени сервомоторов и отсечных золотников, а также изменяющихся в определенных интервалах входных возмущений. Если не учитывать указанные особенности, то при практической реализации системы управления возникнут проблемы с обеспечением необходимого качества вырабатываемой энергии и работы турбоагрегата. В связи с изложенным выше, были рассмотрены отдельные аспекты современной истории развития рассматриваемых систем регулирования.

Под синтезом в настоящей работе понимается определение только параметров системы регулирования или интервалов их изменения, поскольку структура системы задана.

Параметрически неопределенный объект может рассматриваться как некое множество объектов, образующих семейство объектов заданного класса. В работе приведен алгоритм синтеза регуляторов, которые обеспечивают для всего семейства объектов заданного класса динамические свойства, близкие к требуемым. Использован вероятностный подход к робастности [4], с помощью которого также можно оценить вероятность того, что выбранная случайным образом система из исходного семейства и при случайно выбранных значениях входного возмущения будет удовлетворять заданному качеству. Если вероятность близка к единице, то с позиции практики регулятор будет обладать робастными свойствами по отношению к неопределенности математической модели объекта и возмущениям и поведение системы будет удовлетворительным [4].

**Постановка задачи.** Математическая модель контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины К-800-130/3000 описывается следующими системами уравнений [1].

Уравнения, описывающие турбину как объект регулирования,

$$\begin{aligned}
 T_a \frac{d\varphi}{dt} + \alpha\varphi &= (1 - \alpha) (k_{\text{ЦВД}}\gamma_{\text{ЦВД}} + k_{\text{ЦНД1}}\gamma_{\text{ЦНД1}} + \\
 &\quad + k_{\text{ЦНД2}}\gamma_{\text{ЦНД2}} + k_{\text{ЦНД3}}\gamma_{\text{ЦНД3}}) - \zeta_{\Gamma} - \alpha; \\
 T_{V_{\text{ЦВД}}} \frac{d\gamma_{\text{ЦВД}}}{dt} + \gamma_{\text{ЦВД}} &= \rho_1 + \pi_0 + \mu_{\text{ЦВД}}; \\
 \rho_1 &= F_{\pi_0\mu_{\text{ЦВД}}}(\pi_0, \mu_{\text{ЦВД}}); \\
 T_{V_{\text{III}}} \frac{dx_3}{dt} &= \gamma_{\text{ЦВД}} - \gamma_{\text{III}}; \\
 \gamma_{\text{III}} &= \rho_2 + \pi_{\text{III}} + \mu_{\text{ЦНД}}; \\
 \rho_2 &= F_{\pi_0\mu_{\text{ЦНД}}}(\pi_{\text{III}}, \mu_{\text{ЦНД}}); \\
 \mu_{\text{ЦНД}} &= k_1\mu_{\text{ЦНД1}} + k_2\mu_{\text{ЦНД2}} + k_3\mu_{\text{ЦНД3}}; \\
 T_{V_{\text{ЦНД1}}} \frac{d\gamma_{\text{ЦНД1}}}{dt} + \gamma_{\text{ЦНД1}} &= \gamma_{\text{III}}; \\
 T_{V_{\text{ЦНД2}}} \frac{d\gamma_{\text{ЦНД2}}}{dt} + \gamma_{\text{ЦНД2}} &= \gamma_{\text{III}}; \\
 T_{V_{\text{ЦНД3}}} \frac{d\gamma_{\text{ЦНД3}}}{dt} + \gamma_{\text{ЦНД3}} &= \gamma_{\text{III}},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\rho_1, \rho_2$ ; – нелинейные зависимости,

$$\begin{aligned}
 \rho_1 &= F_{\pi_0\mu_{\text{ЦВД}}}(\pi_0, \mu_{\text{ЦВД}}) = \pi_0\mu_{\text{ЦВД}}; \\
 \rho_2 &= F_{\pi_0\mu_{\text{ЦНД}}}(\pi_{\text{III}}, \mu_{\text{ЦНД}}) = \pi_{\text{III}}\mu_{\text{ЦНД}}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Уравнения, описывающие датчики и регулятор контура автоматического регулирования частоты вращения ротора турбоагрегата,

$$\begin{aligned}
 T_{\text{зрс}} \frac{d\varphi_1}{dt} + \varphi_1 &= -\frac{\varphi}{\delta}; \\
 T_{\text{пз}} \frac{d\eta}{dt} &= \varphi_1 + \psi - \chi_{\text{Гу}}; \\
 T_{\text{эмп}} \frac{d\chi_{\text{эмп}}}{dt} + \chi_{\text{эмп}} &= \varphi_{\text{д}}; \\
 T_{\text{гу}} \frac{d\chi_{\text{гу}}}{dt} + \chi_{\text{гу}} &= \chi_{\text{эмп}}; \\
 \varphi_{\text{д}} &= F_{\text{д}}(\varphi_y, \varphi) = F_{\text{НД}}(\varphi_y) F_{\text{п}}(\varphi); \\
 \frac{d\varphi_y}{dt} + T_{\text{д}}\varphi_y &= T_{\text{д}} \frac{d\varphi}{dt},
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $F_{\text{п}}(\varphi), F_{\text{НД}}(\varphi_y)$  – нелинейные зависимости,

$$\begin{aligned}
 F_{\text{п}}(\varphi) &= \frac{1}{2} \text{sign}(\varphi - \varphi_{\text{д+}}) + \frac{1}{2}; \\
 F_{\text{НД}}(\varphi_y) &= \begin{cases} k_{1\text{д}}\varphi_y, & |\varphi_y| \leq \tilde{\varphi}_y; \\ k_{2\text{д}}\varphi_y - (k_{2\text{д}} - k_{1\text{д}})\tilde{\varphi}_y, & \varphi_y > \tilde{\varphi}_y; \\ k_{2\text{д}}\varphi_y + (k_{2\text{д}} - k_{1\text{д}})\tilde{\varphi}_y, & \varphi_y < -\tilde{\varphi}_y. \end{cases} \tag{4}
 \end{aligned}$$

Уравнения, описывающие исполнительную часть регулятора,

$$\begin{aligned}
 T_{\sigma_{\text{ЦВД}}} \frac{d\bar{\sigma}_{\text{ЦВД}}}{dt} + \bar{\sigma}_{\text{ЦВД}} &= \eta - \mu_{\text{ЦВД}}; \\
 \sigma_{\text{ЦВД}} &= F_{\text{ЦВД}}(\bar{\sigma}_{\text{ЦВД}}); \\
 T_{\mu_{\text{ЦВД}}} \frac{d\bar{\mu}_{\text{ЦВД}}}{dt} &= \tilde{\sigma}_{\text{ЦВД}}; \\
 \tilde{\sigma}_{\text{ЦВД}} &= F_{\sigma_{\text{ЦВД}}}(\sigma_{\text{ЦВД}}); \\
 \mu_{\text{ЦВД}} &= F_{\text{ЦВД}}(\bar{\mu}_{\text{ЦВД}}); \\
 T_{\sigma_{\text{ЦНД}i}} \frac{d\bar{\sigma}_{\text{ЦНД}i}}{dt} + \bar{\sigma}_{\text{ЦНД}i} &= \eta - \mu_{\text{ЦНД}i}; \\
 \sigma_{\text{ЦНД}i} &= F_{\text{ЦНД}i}(\bar{\sigma}_{\text{ЦНД}i}); \\
 T_{\mu_{\text{ЦНД}i}} \frac{d\bar{\mu}_{\text{ЦНД}i}}{dt} &= \tilde{\sigma}_{\text{ЦНД}i}; \\
 \tilde{\sigma}_{\text{ЦНД}i} &= F_{\sigma_{\text{ЦНД}i}}(\sigma_{\text{ЦНД}i}); \\
 \mu_{\text{ЦНД}i} &= F_{\text{ЦНД}}(\bar{\mu}_{\text{ЦНД}i}), \quad i = 1, 3.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Нелинейные зависимости имеют вид

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

$$\begin{aligned}
 \tilde{\sigma}_{\text{ЦВД}} &= F_{\sigma_{\text{ЦВД}}}(\sigma_{\text{ЦВД}}) = \\
 &= \begin{cases} 0, & |\sigma_{\text{ЦВД}}| \leq \varepsilon_{\text{ЦВД}}; \\ 0,5z_{\text{ЦВД}} + 0,25 \frac{z_{\text{ЦВД}}^2}{\Delta z_{\text{ЦВД}}} \text{sign} z_{\text{ЦВД}}, & |z_{\text{ЦВД}}| \leq \Delta z_{\text{ЦВД}}; \\ z_{\text{ЦВД}} - 0,25\Delta z_{\text{ЦВД}} \text{sign} z_{\text{ЦВД}}, & |z_{\text{ЦВД}}| > \Delta z_{\text{ЦВД}}; \\ z_{\text{ЦВД}} = \sigma_{\text{ЦВД}} - \varepsilon_{\text{ЦВД}} \text{sign} \sigma_{\text{ЦВД}}, & \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$\mu_{\text{ЦВД}} = F_{\text{ЦВД}}(\bar{\mu}_{\text{ЦВД}}) = \begin{cases} \mu_{\text{ЦВД}}^+, & \bar{\mu} > \mu_{\text{ЦВД}}^+; \\ \bar{\mu}_{\text{ЦВД}}, & \mu_{\text{ЦВД}}^- \leq \bar{\mu}_{\text{ЦВД}} \leq \mu_{\text{ЦВД}}^+; \\ \mu_{\text{ЦВД}}^-, & \bar{\mu} < \mu_{\text{ЦВД}}^-, \end{cases} \tag{6}$$

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

$$\begin{aligned}
 \tilde{\sigma}_{\text{ЦНД}i} &= F_{\sigma_{\text{ЦНД}i}}(\sigma_{\text{ЦНД}i}) = \\
 &= \begin{cases} 0, & |\sigma_{\text{ЦНД}i}| \leq \varepsilon_{\text{ЦНД}i}; \\ 0,5z_{\text{ЦНД}i} + 0,25 \frac{z_{\text{ЦНД}i}^2}{\Delta z_{\text{ЦНД}i}} \text{sign} z_{\text{ЦНД}i}, & |z_{\text{ЦНД}i}| \leq \Delta z_{\text{ЦНД}i}; \\ z_{\text{ЦНД}i} - 0,25\Delta z_{\text{ЦНД}i} \text{sign} z_{\text{ЦНД}i}, & |z_{\text{ЦНД}i}| > \Delta z_{\text{ЦНД}i}; \\ z_{\text{ЦНД}i} = \sigma_{\text{ЦНД}i} - \varepsilon_{\text{ЦНД}i} \text{sign} \sigma_{\text{ЦНД}i}, & \end{cases}
 \end{aligned}$$

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

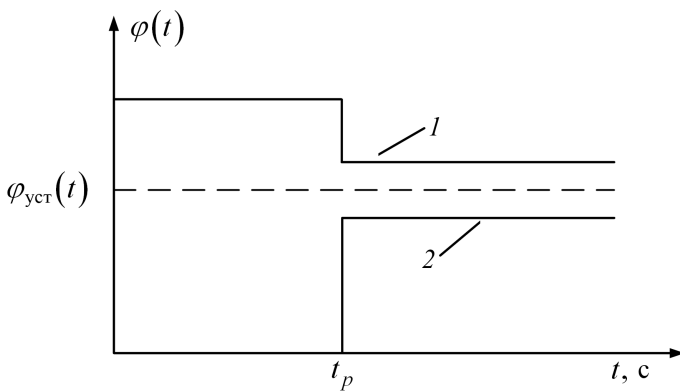
Перечислим основные переменные, используемые в приведенной выше математической модели:  $\varphi(t)$  — относительная частота вращения ротора турбины;  $\zeta_r$  — отклонение момента генератора;  $\mu_{\text{ЦВД}}$ ,  $\mu_{\text{ЦНД}i}$ ,  $i = \overline{1, 3}$  — относительные величины открытия регулирующих клапанов цилиндров высокого и низкого давления (ЦВД и ЦНД);  $\sigma_{\text{ЦВД}}$ ,  $\sigma_{\text{ЦНД}i}$ ,  $i = \overline{1, 3}$  — относительные отклонения (ход) золотников сервомоторов цилиндров высокого и низкого давления;  $\eta$  — ход промежуточного золотника, управляемого электрогидравлическим преобразователем-сумматором и электромагнитным выключателем золотника предварительной защиты;  $\varphi_d$  — выходной сигнал дифференциатора. Внешнее возмущение обусловлено изменениями давления свежего пара  $\pi_0$ .

Переменные в уравнениях (1)–(6) записаны в относительных отклонениях от соответствующих номинальных значений, поэтому начальные условия для дифференциальных уравнений — нулевые.

Объект — параметрически неопределенный, неопределенность является интервальной, т.е. часть параметров его математической модели (линейной части) находятся в некотором интервале  $\underline{d}_i \leq d_i \leq \bar{d}_i$  [4]. Это относится к постоянным времени  $T_{\sigma_{\text{ЦВД}}}$ ,  $T_{\sigma_{\text{ЦНД}i}}$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , золотника сервомотора ЦВД и золотников сервомоторов ЦНД, а также к постоянным времени  $T_{\mu_{\text{ЦВД}}}$ ,  $T_{\mu_{\text{ЦНД}i}}$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , сервомотора ЦВД и сервомоторов ЦНД.

Требуется определить параметры электрической части системы регулирования турбины, формирующей управляющие воздействия на электродвигатель механизма управления турбиной, электрогидравлический преобразователь-сумматор и электромагнитный выключатель золотника предварительной защиты. Это относится к величинам, определяющим настройку дифференциатора ( $k_{1д}$ ,  $k_{2д}$ ), так как их значения определяют быстродействие переходного процесса стабилизации частоты вращения ротора паровой турбины относительно ее номинального значения. При найденных значениях параметров дифференциатора для параметрически неопределенного объекта и интервально определенных входных возмущениях должна обеспечиваться близость закона изменения его выходного сигнала (частоты вращения ротора  $\varphi$ ) к наперед заданному эталону.

Поскольку математическая модель объекта управления задается с использованием интервальной неопределенности, эталонные свойства



**Рис. 2. Разрешенная область изменения эталонного процесса ( $\varphi_{уст}$  — установившаяся частота вращения ротора):**

1, 2 — верхняя и нижняя границы эталонных свойств

системы должны находиться в некотором интервале:  $\underline{\varphi}_э(t) \leq \varphi_э(t) \leq \overline{\varphi}_э(t)$ . Верхние и нижние границы эталонных свойств системы могут быть определены, например, по принципу построения “коробочки”, сформулированному В.В. Солодовниковым (рис. 2) [5].

В этой постановке задачу синтеза можно сформулировать как задачу двухэтапной оптимизации [6].

**Алгоритм исследования (синтеза).** На первом этапе определяем возможные границы изменения элементов вектора  $\mathbf{K} = [k_{1д} \ k_{2д}]$  оптимальных параметров регулятора (настройки дифференциатора) для всего семейства систем. Формируем массив векторов оптимальных параметров регулятора для каждой системы при случайно выбранных параметрах объекта, относящихся к группе неопределенных (используется равномерный закон распределения выбора параметров, определенный на интервале их изменения). Значение возмущения, действующего на систему, при котором вычисляется выходная координата (угловая скорость вращения вала ротора) также выбирается случайным, применяется равномерный закон распределения.

Оптимизация выполняется путем минимизации следующей целевой функции:

$$J = \int_0^T (\varphi_{вi}(t, \mathbf{K}_i, v_i) - \varphi_э(t))^2 dt \rightarrow \min_{\mathbf{K}_i}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (7)$$

где  $\varphi_{вi}(t, \mathbf{K}_i, v_i)$  — выход  $i$ -й системы;  $\mathbf{K}_i$  — оптимизируемые параметры регулятора для  $i$ -й системы;  $v_i$  — случайные значения параметров  $i$ -го объекта управления и случайные значения возмущения;  $\varphi_э(t)$  — единый для всего семейства систем эталонный выходной сигнал, входящий в “коробочку” Солодовникова;  $T$  — временной интервал работы



системы (интервал, заведомо больший интервала стабилизации частоты вращения ротора турбины относительно номинального значения);  $N$  — число случайно выбранных объектов управления.

Результатом реализации первого этапа являются разрешенные интервалы изменения параметров регулятора для всего семейства систем

$$\underline{k}_{1д} \leq k_{1д} \leq \bar{k}_{1д}; \quad \underline{k}_{2д} \leq k_{2д} \leq \bar{k}_{2д}. \quad (8)$$

Границы интервалов представляют собой ограничения при реализации второго этапа синтеза.

Второй этап заключается в максимизации целевой функции относительно искомых параметров регулятора для всего семейства систем. Целевая функция определяет принадлежность выходов всех систем допустимой эталонной области (см. рис. 2). Рассмотрим поэтапное получение критерия оптимальности.

1. Для  $j$ -го момента времени формируется характеристическая функция, описывающая принадлежность выхода  $i$ -й системы допустимой области изменения эталона,

$$\chi_i(t_j, \mathbf{K}, v_i) = \text{sign} \left( \varphi_{\text{Ви}}(t_j, \mathbf{K}, v_i) - \underline{\varphi}_j(t_j) \right) \text{sign}(\bar{\varphi}_j(t_j) - \varphi_{\text{Ви}}(t_j, \mathbf{K}, v_i)).$$

Согласно приведенному выражению, если  $\varphi_{\text{Ви}}(t_j, \mathbf{K}, v_i)$  принадлежит допустимой области, то  $\chi_i(t_j, \mathbf{K}, v_i) = 1$ , в противном случае  $\chi_i(t_j, \mathbf{K}, v_i) = -1$ . Характеристическая функция, определенная для  $j$ -го момента времени, является случайной и не может быть критерием, поскольку параметры объектов выбираются случайно. Свойства характеристической функции можно распространить на все семейство систем путем осреднения, т.е. нахождением оценки математического ожидания для функции  $\chi_i(t_j, \mathbf{K}, v_i)$ :

$$\chi(t_j, \mathbf{K}) = M \{ \chi_i(t_j, \mathbf{K}, v_i) \} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \chi_i(t_j, \mathbf{K}, v_i).$$

Учесть полное время работы всех систем, входящих в рассматриваемое семейство, можно путем осреднения оценки  $\chi(t_j, \mathbf{K})$  для всех моментов времени, т.е. интегрированием по переменной  $t$ . В результате получаем следующий критерий оптимальности для всего семейства систем:

$$J = \int_0^T \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \text{sign} \left( \varphi_{\text{Ви}}(t, \mathbf{K}, v_i) - \underline{\varphi}_j(t) \right) \times \right. \\ \left. \times \text{sign}(\bar{\varphi}_j(t) - \varphi_{\text{Ви}}(t, \mathbf{K}, v_i)) \right] dt \rightarrow \max_{\mathbf{K}}$$

или

$$J = \int_0^T \sum_{i=1}^N \left[ \text{sign} \left( \varphi_{\text{Bi}}(t, \mathbf{K}, v_i) - \underline{\varphi}_3(t) \right) \times \right. \\ \left. \times \text{sign} \left( \overline{\varphi}_3(t) - \varphi_{\text{Bi}}(t, \mathbf{K}, v_i) \right) \right] dt \rightarrow \max_{\mathbf{K}}. \quad (9)$$

Максимизация критерия (9) выполняется при учете ограничений (8). Данная задача является типичной задачей нелинейного программирования. Максимальное значение критерия обеспечивают оптимальные значения параметров регулятора  $\mathbf{K}^*$  для всего семейства систем.

Вероятность качественной работы регулятора для всего семейства систем можно оценить по формуле

$$P \left( \underline{\varphi}_3(t) \leq \varphi_{\text{Bi}}(t, \mathbf{K}^*, v_i) \leq \overline{\varphi}_3(t) \right) = \frac{M}{N}, \quad i = \overline{1, N},$$

где  $M$  – число случайно выбранных из всего семейства систем объектов (параметров объектов), для которых функция  $\varphi_{\text{Bi}}(t, \mathbf{K}^*, v_i)$  принадлежит заданной области изменения эталона.

Такой вариант расчета параметров возможен только в том случае, если выходы не всех систем принадлежат допустимой эталонной области (“коробочка” Солодовникова). Иначе (все выходы входят) использование критерия (9) теряет смысл, поскольку для всех выходных сигналов значение критерия одинаковое.

Если все выходные сигналы системы попали в допустимую область, то наиболее оптимальные их значения могут быть определены как наиболее вероятные, поскольку применяется вероятностный подход к робастности. Наиболее вероятные значения можно рассматривать как оценку их математического ожидания. В этом случае может быть использован критерий оптимальности следующего вида:

$$J = \sum_{i=1}^N \int_0^T (\varphi_{\text{Bi}}(t, \mathbf{K}, v_i) - \varphi_3(t))^2 dt \rightarrow \min_{\mathbf{K}}.$$

Результаты должны быть близкими.

**Реализация алгоритма.** Остановимся на первом варианте расчета параметров дифференциатора. Вычислять значения функции  $\varphi_{\text{Bi}}(t, \mathbf{K}_i, v_i)$  можно любым численным методом. Критерии оптимальности (7) и (9) для дискретных значений угловой скорости будут иметь вид

$$J = \sum_{l=0}^{L-1} (\varphi_{\text{Bi}}(t_l, \mathbf{K}_i, v_i) - \varphi_3(t_l))^2 \rightarrow \min_{\mathbf{K}_i}, \quad i = \overline{1, N};$$

$$J = \sum_{l=0}^{L-1} \left[ \sum_{i=1}^N \left[ \text{sign} \left( \varphi_{\text{Bi}}(t_l, \mathbf{K}, v_i) - \underline{\varphi}_3(t_l) \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \text{sign} \left( \overline{\varphi}_3(t_l) - \varphi_{\text{Bi}}(t_l, \mathbf{K}, v_i) \right) \right] \right] \rightarrow \max_{\mathbf{K}},$$

где  $L = T/h$  — число дискретных значений сеточных функций  $\varphi_{vi}(t_l, \mathbf{K}_i, v_i)$  и  $\varphi_{\vartheta}(t_l)$ ;  $h$  — шаг интегрирования.

Естественно система уравнений (1)–(6) должна быть приведена к нормальной форме Коши

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{X}(t), t) + \mathbf{B}(t) \mathbf{\Lambda}(t), \quad \mathbf{X}(t) \in R^{19}, \quad \mathbf{\Lambda}(t) \in R^1,$$

где  $\mathbf{X}(t)$  — вектор фазовых координат;  $\mathbf{\Lambda}(t)$  — вектор входных воздействий.

Необходимо также отметить следующее. Формально существует три входных воздействия на систему: изменение давления свежего пара  $\pi_0$ ; отклонение  $\zeta_r$  момента генератора; сигнал от задатчика механизма управления турбиной  $\psi$ . Рассмотрим ситуацию резкого сброса нагрузки:  $\zeta_r = -1$ . Для номинального значения частоты вращения ротора турбины  $3000 \text{ мин}^{-1}$  (50 Гц)  $\psi = 0$ . Поэтому размерность вектора входных воздействий — единица ( $\mathbf{\Lambda}(t) \in R^1$ ).

Параметры паровой турбины К-800-130/3000 и элементов ее системы регулирования имеют следующие значения:  $T_a = 5,1 \text{ с}$ ;  $\alpha = 0,04$ ;  $k_{\text{ЦВД}} = 0,32$ ;  $k_1 = k_2 = k_3 = 1/3$ ;  $k_{\text{ЦНД1}} = k_{\text{ЦНД2}} = k_{\text{ЦНД3}} = 0,2267$ ;  $T_{V_{\text{ЦВД}}} = 0,05 \text{ с}$ ;  $T_{V_{\text{ин}}}$  = 7 с;  $T_{V_{\text{ЦНД1}}} = 0,08 \text{ с}$ ;  $T_{V_{\text{ЦНД2}}} = 0,08 \text{ с}$ ;  $T_{V_{\text{ЦНД3}}} = 0,08 \text{ с}$ ;  $\delta = 0,02 \dots 0,08$ ;  $T_d = 100$ ;  $\varphi_{д+} = 0,03$ ;  $T_{\text{зрс}} = 0,02 \text{ с}$ ;  $T_{\text{эмп}} = 0,008 \text{ с}$ ;  $T_{\text{гу}} = 0,007 \text{ с}$ ;  $T_{\text{пз}} = 0,04 \text{ с}$ ;  $T_{\sigma_{\text{ЦВД}}} = 0,023 \text{ с}$ ;  $T_{\mu_{\text{ЦВД}}} = 0,05 \text{ с}$ ;  $T_{\sigma_{\text{ЦНД}i}} = 0,02 \text{ с}$ ;  $T_{\mu_{\text{ЦНД}i}} = 0,08 \text{ с}$ ;  $\tilde{\varphi}_y = 0,1$ ;  $\sigma_{\text{ЦВД}} = -1,1$ ;  $\sigma_{\text{ЦВД}}^+ = 0,5$ ;  $\mu_{\text{ЦВД}}^- = 1,15$ ;  $\mu_{\text{ЦВД}}^+ = 1,275$ ;  $\Delta z_{\text{ЦВД}} = 0,3$ ;  $\varepsilon_{\text{ЦВД}} \leq 0,0004$ ;  $\sigma_{\text{ЦНД}i}^- = -0,6$ ;  $\sigma_{\text{ЦНД}i}^+ = 1,2$ ;  $\mu_{\text{ЦНД}i}^- = 1,2$ ;  $\mu_{\text{ЦНД}i}^+ = 1,275$ ;  $\Delta z_{\text{ЦНД}i} = 0,3$ ;  $\varepsilon_{\text{ЦНД}i} \leq 0,0004$ .

Эталонные свойства системы определены нормами, которые устанавливают следующие значения переходного процесса стабилизации угловой скорости ротора турбины [2]: максимальная частота вращения ротора при сбросе номинальной нагрузки с отключением генератора от сети не должна превышать 108% номинального значения, в относительных единицах  $\varphi_{\text{max}} \leq 0,08$ , время регулирования  $t_{\text{рег}} \leq 5 \text{ с}$ ,  $\varphi_{\text{уст}} = 0,04$ , не более одного колебания за время регулирования. Исходя из перечисленных условий, принимаем  $\bar{\varphi}_{\vartheta}(t) = 0,07 \cdot 1(t) - 0,028 \times \times 1(t - t_{\text{рег}})$ ,  $\bar{\varphi}_{\vartheta}(t) = 0,038 \cdot 1(t - t_{\text{рег}})$ . В качестве эталонного выходного сигнала  $\varphi_{\vartheta}(t)$ , входящего в “коробочку” Солодовникова и имеющего такое же время регулирования, принимаем

$$\varphi_{\vartheta}(t) = 0,04 \left( 1 - \exp(-\alpha t) \left( \cos(\beta t) - \frac{\alpha}{\beta} \sin(\beta t) \right) \right),$$

$$\alpha = 1,93, \quad \beta = 4,79.$$

Экспериментальные данные, приведенные в работе [3], свидетельствуют о том, что пульсации давления масла в напорном коллекторе системы регулирования паровой турбины могут достигать

0,05...0,08 МПа. Это влечет за собой изменение постоянных времени золотников и сервомоторов системы регулирования в пределах 10...15%. Полагаем (для 10%) следующий диапазон значений изменения параметров  $0,027 \leq T_{\sigma_{ЦВД}} \leq 0,0253$ ;  $0,045 \leq T_{\mu_{ЦВД}} \leq 0,055$ ;  $0,018 \leq T_{\sigma_{ЦНД*i*}} \leq 0,022$ ,  $i = \overline{1,3}$ ;  $0,072 \leq T_{\mu_{ЦНД*i*}} \leq 0,088$ ,  $i = \overline{1,3}$ . Значение возмущения, действующего на систему, составляет  $\pi_0 \in [-0,1; +0,1]$ .

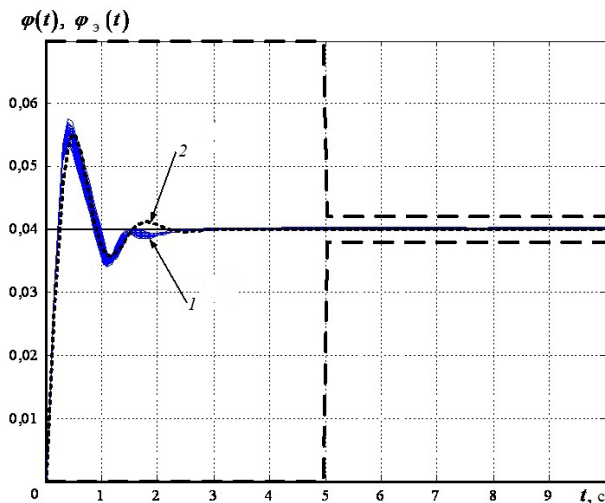
В настоящее время настраиваемые параметры в системе имеют значения  $k_{1д} = 8$ ,  $k_{2д} = 14,3$  [1].

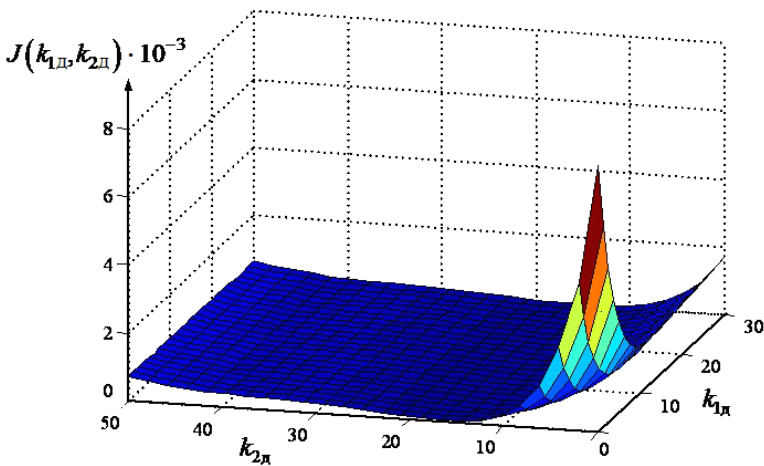
Для доверительной вероятности  $\rho = 0,7$  и относительного доверительного интервала  $\nu = 0,15$ , что соответствует 47 случайно выбранным объектам управления (рассматривалось 50 объектов), минимизация целевой функции (7) дает следующие границы изменения параметров дифференциатора:  $7,69 \leq k_{1д} \leq 14,90$ ;  $3,24 \leq k_{2д} \leq 304,96$ .

Кривые изменения (их количество 50) относительного отклонения частоты вращения ротора турбины по отношению к номинальному значению для различных, случайно выбранных значений постоянных времени золотников и сервомоторов системы регулирования (соответствует разным значениям параметров дифференциатора, полученным в результате оптимизации) приведены на рис. 3.

В соответствии с рисунком все кривые изменения относительного отклонения частоты вращения ротора  $\varphi(t)$  входят в “коробочку” Солодовникова и мало отличаются друг от друга для различных значений постоянных времени исполнительных частей регулятора и параметров настройки дифференциатора. Система регулирования обеспечивает необходимое качество работы по стабилизации частоты вращения ротора турбины.

**Рис. 3.** Кривые изменения относительных отклонений частоты вращения ротора турбины  $\varphi(t)$  (1) и  $\varphi_3(t)$  (2) для различных значений постоянных времени золотников и сервомоторов системы регулирования и параметров регулятора (параметров настройки дифференциатора)





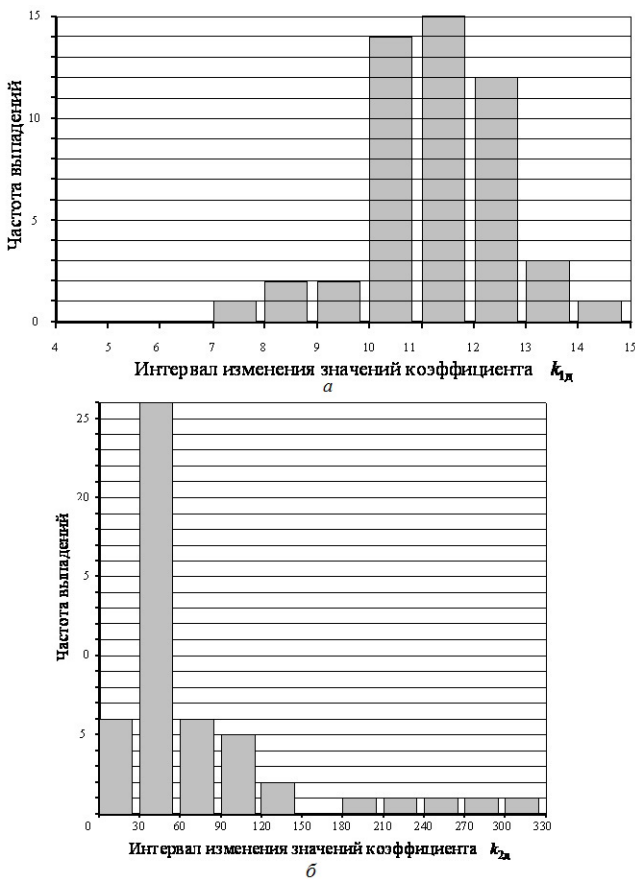
**Рис. 4.** Поверхность значений целевой функции (7) в координатах  $k_{1д}, k_{2д}$  для одной из систем семейства

Поверхность значений целевой функции (7) в координатах  $k_{1д}, k_{2д}$  для одной из систем семейства приведена на рис. 4. Для других систем семейства поверхности имеют примерно такой же вид. Согласно рисунку, для достаточно широкого диапазона значений изменения параметров дифференциатора  $k_{1д}, k_{2д}$  функция является достаточно плоской с мало выраженной точкой минимума, которая смещается для систем с различными параметрами.

Как было отмечено выше, процедура максимизации целевой функции (9) в данной конкретной ситуации по определению оптимальных параметров дифференциатора  $k_{1д}, k_{2д}$  теряет смысл, поскольку все кривые, показывающие относительное отклонение частоты вращения ротора  $\varphi(t)$ , входят в “коробочку” Солодовникова.

Оптимальные значения параметров  $k_{1д}, k_{2д}$  могут быть в рассматриваемом случае определены как среднеарифметические или как наиболее вероятные для заданных исходных интервалов, найденных выше. На рис. 5 представлены гистограммы, иллюстрирующие число выпадений значений соответствующего коэффициента дифференциатора, полученных в результате оптимизации в определенном интервале изменения его значений (число экспериментов  $N = 50$ ).

Наиболее чувствительным с позиции изменения параметров системы является коэффициент  $k_{2д}$ . Это связано с тем, что не для каждого набора значений случайно выбранных постоянных времени золотников и сервомоторов системы регулирования “на соответствующей ветке значений своих параметров” дифференциатор вступает в работу. Этим объясняются достаточно широкие границы изменений его значений. Большие значения параметра маловероятны. Дифференциатор обеспечивает высокое качество работы и при меньших значениях па-



**Рис. 5. Гистограммы частоты выпадений значения коэффициентов  $k_{1д}$  (а) и  $k_{2д}$  (б) в интервале изменения их значений**

раметра. В соответствии с гистограммами, наиболее вероятные значения параметров дифференциатора находятся в окрестности тех, которые используются в настоящее время. Возможен довольно широкий интервал изменения значений его коэффициентов  $k_{1д}$ ,  $k_{2д}$ .

Результат решения рассмотренной задачи стал ожидаем. Система регулирования турбины К-800-130/3000 обладает хорошими робастными свойствами по отношению к возмущениям: отклонению давления свежего пара и пульсациям давления масла в исполнительной части системы регулирования (до 20% от номинального значения). Исследование подтверждает высокую надежность системы регулирования к парированию возмущающих воздействий. Предложен один из возможных подходов к решению подобного рода задач и новый инструмент их решения.

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

1. 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. Спец. вып. Энергетическое и транспортное машиностроение. М., 2011. С. 197–215.
2. Нормы участия энергоблоков ТЭС в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулировании частоты. Открытое акционерное общество “Системный оператор – Центральное диспетчерское управление Единой энергетической системы”, М., 2005.
3. Калашников А.А. Динамика систем регулирования энергетических турбин при случайных возмущениях // Теплоэнергетика. 1985. № 7.
4. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 303 с.
5. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с.
6. Корнюшин Ю.П., Мельников Д.В., Парсегов С.Э. Синтез робастных регуляторов для нелинейных объектов управления с использованием матричных операторов. Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана. № 594. М., 2007. С. 157–168.

## REFERENCES

- [1] 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, Mashinostr., Spetsvyv. "Energeticheskoe i transportnoe mashinostroenie"* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng., Spec. Issue "Power and transport engineering"], 2011, pp. 197–215 (in Russ.).
- [2] Normy uchastiya energoblokov TES v normirovannom pervichnom i avtomaticheskom vtlichnom regulirovanii chastoty. Otkrytoe aktsionerное obshchestvo "Sistemnyy operator – Tsentral'noe dispetcherskoe upravlenie Edinoй 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.
- [3] Kalashnikov A.A. Control systems dynamics of power turbines at random disturbances. *Teploenergetika* [Heat-power engineering], 1985, no. 7, pp. 1–27 (in Russ.).
- [4] Polyak B.T., Shcherbakov P.S. Robastnaya ustoychivost' i upravlenie [Robust stability and handling]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 303 p.
- [5] Pupkov K.A., Egupov N.D. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 3. Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya [Classical and contemporary techniques of automatic control theory. Vol. 3. Regulators synthesis of automatic control systems]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2004. 616 p.
- [6] Korniyushin Yu.P., Mel'nikov D.V., Parsegov S.E. Robust controllers synthesis for nonlinear objects of control using matrix operators. *Trudy MGTU im. N.E. Bauman* [Proc. Bauman Moscow State Tech. Univ.], 2007, no. 594, pp. 157–168 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 17.12.2012

Юрий Петрович Корнюшин — д-р техн. наук, профессор кафедры “Системы автоматического управления” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 300 научных работ в области энергетики и электротехники, оптимальных систем, робастных систем, моделирования технических систем, фракталов и хаоса в детерминированных системах.

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

Yu.P. Korniyushin — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Automatic Control Systems” of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 300 publications in the field of power engineering and electrotechnology, optimal systems, robust systems, simulation of technical systems, fractals and chaos in deterministic systems.

Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, ul. Bazhenova 2, Kaluga, 248000 Russian Federation.

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

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

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

Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, ul. Bazhenova 2, Kaluga, 248000 Russian Federation.

Николай Дмитриевич Егупов — д-р техн. наук, заведующий кафедрой “Системы автоматического управления” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 400 научных работ в области теории матричных операторов, энергетики и электротехники, оптимальных и робастных систем.

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

N.D. Egupov — Dr. Sci. (Eng.), head of “Automatic Control Systems” of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 400 publications in the field of theory of matrix operators, power engineering and electrotechnology, optimal and robust systems.

Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, ul. Bazhenova 2, Kaluga, 248000 Russian Federation.

Петр Юрьевич Корнюшин — аспирант кафедры “Системы автоматического управления” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 22 научных работ в области энергетики и электротехники, моделирования технических систем, оптимальных и робастных систем, управления техническими системами.

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

P.Yu. Korniyushin — post-graduate of “Automatic Control Systems” of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 22 publications in the field of power engineering and electrotechnology, simulation of technical systems, optimal systems and robust systems, control of technical systems.

Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, ul. Bazhenova 2, Kaluga, 248000 Russian Federation.