

РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНОЙ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ПРОТОЧНУЮ ЧАСТЬ ТУРБОУСТАНОВКИ

SOLUTION OF THE APPLIED PROBLEM OF AUTOMATIC CONTROL OF THE WORKING FLUID SUPPLY SYSTEM IN THE TURBINE UNIT FLOW PART

**F. Chubarov
A. Sizov
A. Nikitin
A. Golikov**

Summary. The article discusses the case of the development of an automatic control system model based on the synthesis of a system of linearized differential equations with the setting of initial parameters and the calculation of the final state for various variants of the control process.

An applied solution to this problem is a simulation of the operation of a steam inlet system for a low-power steam turbine.

The model described in the article allows to get the results that satisfy the requirements for the operation of these control systems, to determine the most important factors affecting the overall functionality of the system.

Keywords: control system, mathematic simulation, steam turbine.

Чубаров Федор Леонидович

К.т.н., ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева»

*Калужский филиал
fedor1966chub@yandex.ru*

Сизов Александр Николаевич

*К.т.н., ПАО Калужский турбинный завод
axelxd@yandex.ru*

Никитин Алексей Валерьевич

*К.п.н., Директор, ГАПОУ Калужской области
«Калужский технический колледж»
anikitin74@yandex.ru*

Голиков Андрей Сергеевич

*Старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калужский филиал
gas@bmstu.ru*

Аннотация. В статье рассматривается разработка модели системы автоматического управления на основе синтеза системы линеаризованных дифференциальных уравнений с заданием начальных параметров и расчетом конечного состояния при различных вариантах протекания процесса регулирования.

Прикладным решением данной задачи является моделирование работы системы паровпуска для паровой турбины малой мощности.

Описанная в статье модель позволяет получить результаты, удовлетворяющие требованиям к работе данных систем управления, определить наиболее важные факторы, влияющие на общую функциональность системы.

Ключевые слова: система управления, математическое моделирование, паровая турбина.

Введение

Одним из путей повышения эффективности работы паротурбинных установок является сокращение времени их ввода в эксплуатацию после ремонта или длительного простоя, сопряжённого со значительным изменением теплового состояния установки (охлаждением).

В соответствии с типовым руководством по эксплуатации при вводе турбины в действие после длитель-

ного простоя паропровод требует для себя плавного прогрева, иначе от быстрого контакта перегретого пара с холодными стенками в нём неизбежно будут возникать разрушительные гидроудары.

Прогрев, как правило, выполняется постепенным частичным ступенчатым пропуском свежего пара через главный паропровод, а скорость и интенсивность такого прогрева могут и должны регулироваться соответствующей системой автоматического регулирования, являющейся предметом рассмотрения ниже. В качестве

$$\begin{cases} T_1 \cdot \frac{d}{dt} \rho_n(t) + \rho_n(t) = A_1 \cdot \mu(t) + T_1 \cdot \frac{d}{dt} \tau_n(t); \\ T_2 \cdot \frac{d}{dt} \tau_n(t) + \tau_n(t) = A_2 \cdot \mu(t) + b_4 \cdot \tau_{cm}(t) + b_5 \cdot \rho_n(t) + T_3 \cdot \frac{d}{dt} \rho_n(t); \\ T_m \cdot \frac{d}{dt} \tau_{cm}(t) + \tau_{cm}(t) = b_6 \cdot \tau_n(t); \\ T_{\text{эн}} \cdot \frac{d^2}{dt^2} \mu(t) + \frac{d}{dt} \mu(t) = a_3 \cdot y(t); \\ T_\delta \cdot \frac{d}{dt} \Psi_1(t) + \Psi_1(t) = \rho_n(t). \end{cases} \quad (1)$$

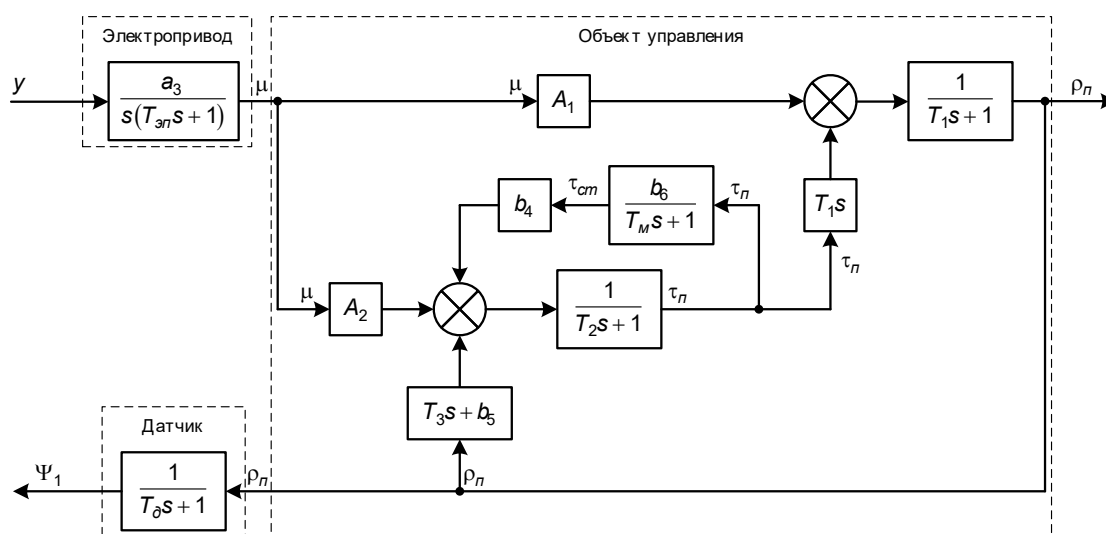


Рис. 1. Структурная схема объекта

объекта применения рассматривается тепловая сеть электростанции, рассчитанной на работу с турбиной конденсационного типа мощностью 6 МВт.

Постановка задачи

Рассмотрим объект управления — систему прогрева паропровода свежего пара, которая состоит из трёх основных элементов: электропривода с регулирующим клапаном, задачей которого является изменение подачи свежего пара в паропровод; датчика давления пара и самого паропровода.

Математическая модель объекта в отклонениях может быть представлена следующей системой дифференциальных уравнений (формула (1)).

Здесь $\rho_n(t)$ — изменение абсолютное давление пара в паропроводе; T_δ — постоянная времени, характеризующая инерционные свойства датчика давления; $\mu(t)$ —

величина относительного положения клапана (величина открытия клапана);

$$a_3 = \frac{1}{T_{nx}}, T_{nx} —$$

время полного перемещения клапана; $T_{\text{эн}}$ — постоянная времени разгона (выбега) выходного вала электропривода; $\tau_n(t)$ — относительное изменение температуры пара в паропроводе; $\tau_{cm}(t)$ — относительное изменение температуры самого паропровода.

Числовые значения параметров:

$$\begin{aligned} T_\delta &= 0,5 [c]; \quad T_{nx} = 24 [c]; \quad T_{\text{эн}} = 0,24 [c]; \quad A_1 = 3,064; \\ A_2 &= 2,426 \cdot 10^{-1}; \quad b_4 = 7,362 \cdot 10^{-1}; \quad b_5 = 4,025 \cdot 10^{-3}; \quad b_6 = 1; \\ T_1 &= 3,778 [c]; \quad T_2 = 8,823 \cdot 10^{-1} [c]; \quad T_3 = 1,342 \cdot 10^{-2} [c]; \\ T_m &= 4,858 \cdot 10^1 [c]. \end{aligned}$$

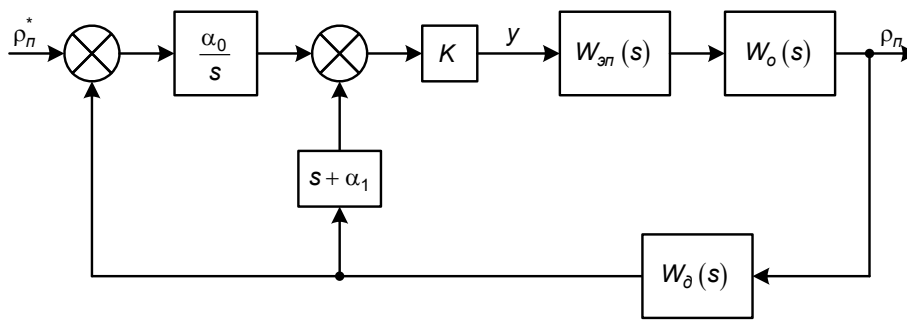


Рис. 2. Структурная схема замкнутой системы управления

Структурная схема системы прогрева, соответствующая системе уравнений, представлена на Рис. 1.

В дальнейшем математическую модель будем рассматривать в форме передаточных функций:

$$W_{\rho_i, y}(s) = \frac{\rho_i(s)}{y(s)} = \frac{b_2^o \cdot s^2 + b_1^o \cdot s + b_0^o}{a_3^o \cdot s^3 + a_2^o \cdot s^2 + a_1^o \cdot s + a_0^o} \cdot \frac{a_3}{s(T_{\dot{y}}s + 1)},$$

$$W_{\Psi_1, y}(s) = \frac{\Psi_1(s)}{y(s)} = \frac{1}{T_a s + 1} \cdot \frac{b_2^o \cdot s^2 + b_1^o \cdot s + b_0^o}{a_3^o \cdot s^3 + a_2^o \cdot s^2 + a_1^o \cdot s + a_0^o} \cdot \frac{a_3}{s(T_{\dot{y}}s + 1)},$$

где коэффициенты определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} b_0^o &= A_1 \cdot (1 - b_4 \cdot b_6); b_1^o = A_2 \cdot T_1 + A_1 \cdot (T_2 + T_i); \\ b_2^o &= T_i \cdot (A_1 \cdot T_2 + A_2 \cdot T_1); \\ a_0^o &= 1 - b_4 \cdot b_6; a_1^o = (1 - b_4 \cdot b_6 - b_5) \cdot T_1 + T_2 + T_i; \\ a_2^o &= ((1 - b_5) \cdot T_i + T_2 - T_3) \cdot T_1 + T_2 \cdot T_i; \\ a_3^o &= T_1 \cdot T_i \cdot (T_2 - T_3). \end{aligned} \tag{2}$$

Для системы требуется реализовать дискретный закон управления, обеспечивающий синтезируемой замкнутой системе управления апериодический переходный процесс с временем управления не более 35 секунд (исходя из требований экономичности).

Синтез закона управления

Особенность рассматриваемого объекта управления заключается в том, что прогрев паропровода свежего пара в нём обычно выполняется в четыре этапа, на ка-

ждом из которых числовые значения параметров изменяются, что затрудняет выбор и настройку регулятора, обеспечивающего требуемые показатели качества.

В ряде работ [1,2] предложен подход, позволяющий построить замкнутую систему управления со свойствами заданной эталонной модели, и продемонстрированы робастные свойства таких алгоритмов управления. Идея данного подхода заключается, как отмечено в [3], в построении управления из условия минимизации функционала, характеризующего минимум энергии ускорения по выражению

$$J(y) = \frac{1}{2} [\ddot{\rho}_y(t) - \ddot{\rho}(t, y)]^2, \tag{3}$$

где $\rho(t, y)$ — выходной сигнал проектируемой замкнутой системы; $\ddot{\rho}_y(t)$ — выходной сигнал эталонной системы, параметры которой определяются из условия обеспечения требуемых показателей качества к проектируемой системе.

Для нахождения управления $y(t)$ используется градиентная схема:

$$\frac{d}{dt} y(t) = \lambda \frac{d}{dy} J(y), \lambda = \text{const}. \tag{4}$$

Задав в качестве эталонной модели звено второго порядка, после соответствующих выкладок, которые

можно найти в [4], искомое управление $y(t)$ будет определяться выражением

$$y(t) = K \left\{ \alpha_0 \cdot \int_0^t [\rho_n^*(t) - \rho_n(t)] dt - \alpha_1 \cdot \rho_n(t) - \dot{\rho}_n(t) \right\}. \tag{5}$$

Здесь $\rho_n^*(t)$ — требуемое изменение давление пара в паропроводе.

В результате структурная схема замкнутой системы управления будет иметь вид, представленный на Рис. 2.

Остается определить параметры α_0 и α_1 эталонной модели, а также числовое значение коэффициента усиления в прямой цепи K .

Эталонная модель

Поскольку требуется обеспечить апериодический закон изменения выходной координаты и в тоже время модель эталонной модели должна быть представлена в виде звена второго порядка, то в качестве эталонной модели рассмотрим звено второго порядка с передаточной функцией

$$W_o(s) = \frac{1}{(T \cdot s + 1)^2} \quad (6)$$

переходной процесс которой будет иметь вид

$$h(t) = 1 - \left(1 + \frac{1}{T} \cdot t\right) \cdot e^{-\frac{1}{T}t}. \quad (7)$$

Зная время управления t_y , нетрудно найти значение постоянной времени T .

Поскольку передаточная функция должна быть задана в виде [5]

$$W(s) = \frac{\alpha_0}{s^2 + \alpha_1 \cdot s + \alpha_0}, \quad (8)$$

то, приравняв соответствующие коэффициенты передаточных функций и можно найти числовые значения интересующих нас параметров α_0 и α_1 .

Исследуем влияние значения коэффициента усиления в прямой цепи K на динамику полученной замкнутой системы управления. Имеем следующую систему уравнений в форме преобразования Лапласа:

$$\begin{cases} y(s) = K \cdot \left(\rho_n^*(s) - W_o(s) \cdot \rho_n(s) \right) \cdot \frac{\alpha_0}{s} - (s + \alpha_1) \cdot W_o(s) \cdot \rho_n(s); \\ \rho_n(s) = W_o(s) \cdot W_{zn}(s) \cdot y(s). \end{cases}$$

Из последней системы получим:

$$W_p(s) = \frac{\alpha_0 K W_o(s) W_{zn}(s)}{s + K(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0) W_o(s) W_{zn}(s)};$$

$$W_y(s) = \frac{\alpha_0 K}{s + K(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0) W_a(s) W_o(s) W_{y\dot{r}}(s)} \quad (9)$$

Если представить передаточные функции элементов рассматриваемого объекта в виде рациональных дробей:

$$W_{zn}(s) = \frac{B_{zn}(s)}{A_{zn}(s)}; W_o(s) = \frac{B_o(s)}{A_o(s)}; W_{\dot{r}}(s) = \frac{B_{\dot{r}}(s)}{A_{\dot{r}}(s)},$$

где $W_{zn}(s)$, $W_o(s)$ и $W_{\dot{r}}(s)$, соответственно, передаточные функции электропривода, датчика и паропровода, то выражения * MERGEFORMAT (9) можно переписать в виде:

$$W_p(s) = \frac{\alpha_0 K A_o(s) B_o(s) B_{zn}(s)}{s A_o(s) A_o(s) A_{zn}(s) + K(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0) B_o(s) B_o(s) B_{zn}(s)};$$

$$W_y(s) = \frac{\alpha_0 K A_o(s) A_o(s) A_{zn}(s)}{s A_o(s) A_o(s) A_{zn}(s) + K(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0) B_o(s) B_o(s) B_{zn}(s)}. \quad (10)$$

Очевидно, что при $K \rightarrow \infty$ передаточная функция примет вид

$$W_p(s) = \frac{\alpha_0 A_o(s)}{[s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0] B_o(s)}.$$

Однако в этом случае передаточная функция по управлению $W_y(s)$ примет вид

$$W_y(s) = \frac{\alpha_0 A_o(s) A_o(s) A_{zn}(s)}{(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0) B_o(s) B_o(s) B_{zn}(s)},$$

порядок числителя, которой будет выше порядка знаменателя, т.е. управление будет определяться производными, что может привести к неустойчивости замкнутой системы управления. Поэтому допустимые значения коэффициента K можно определить из условия обеспечения устойчивости замкнутой системы управления. На Рис. 3 и Рис. 4 представлены результаты моделирования полученной замкнутой системы управления при различных значениях коэффициента K .

Из анализа влияния значения коэффициента K на динамику системы и на управления можно сделать следующий вывод, что при увеличении значения K ошибка между реальным выходным сигналом и заданным эталонным уменьшается, но, в тоже время, увеличивается колебательность управляющего сигнала в переходном режиме.

Поэтому необходимо найти компромисс между требованием наилучшего совпадения выходного сигнала

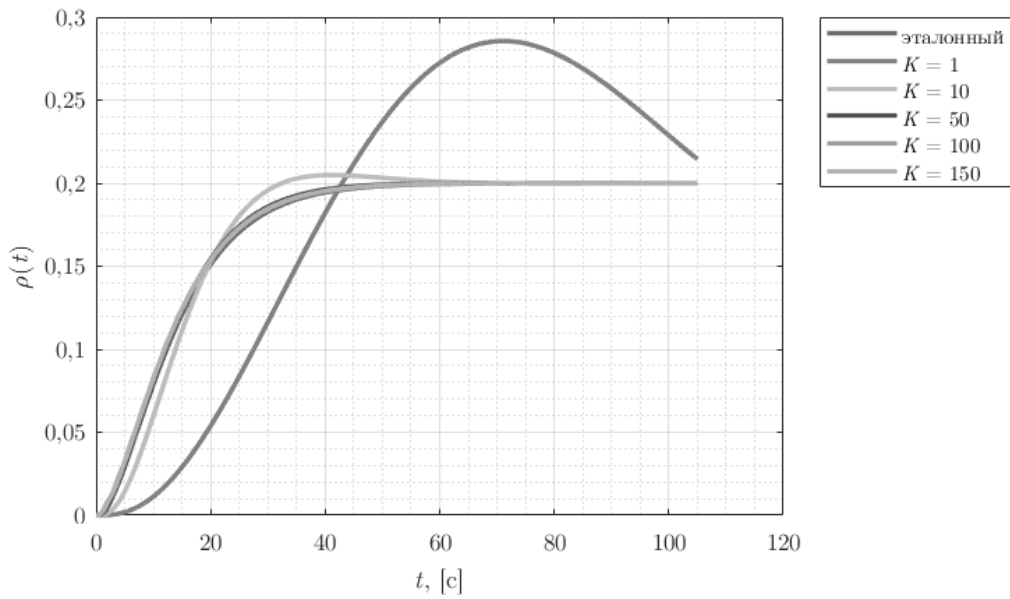


Рис. 3. График выходного сигнала в зависимости от значения коэффициента K

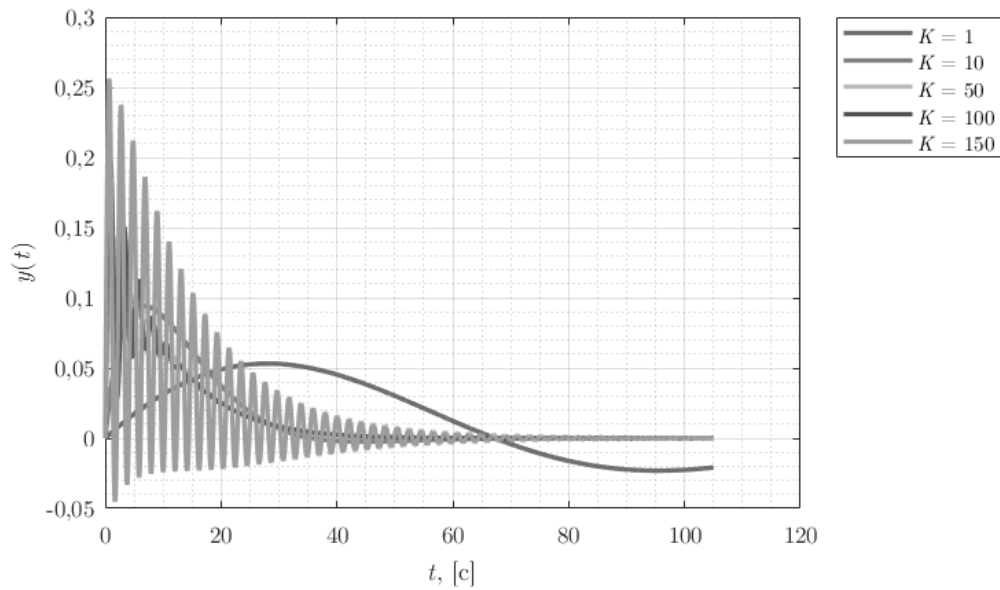


Рис. 4. График управления в зависимости от коэффициента K

с заданным эталонным и снижения колебаний управления в переходном режиме.

В качестве критерия можно рассмотреть следующий:

$$J(K) = \left[\int_0^T \left\{ k_p \cdot (\rho_3(t) - \rho(t, K))^2 + k_y \cdot y^2(t, K) \right\} dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

где k_p и k_y — весовые коэффициенты, а верхний предел интегрирования традиционно $T = 3t_n$.

График зависимости данного критерия от K при $k_p = k_y = 1$ приведён ниже.

Минимум данного критерия достигается при $K_{opt} = 31$

Для данного значения коэффициента K график выхода и управления соответственно представлены ниже

Прогрев паропровода свежего пара осуществляется в несколько этапов, на каждом из которых числовые

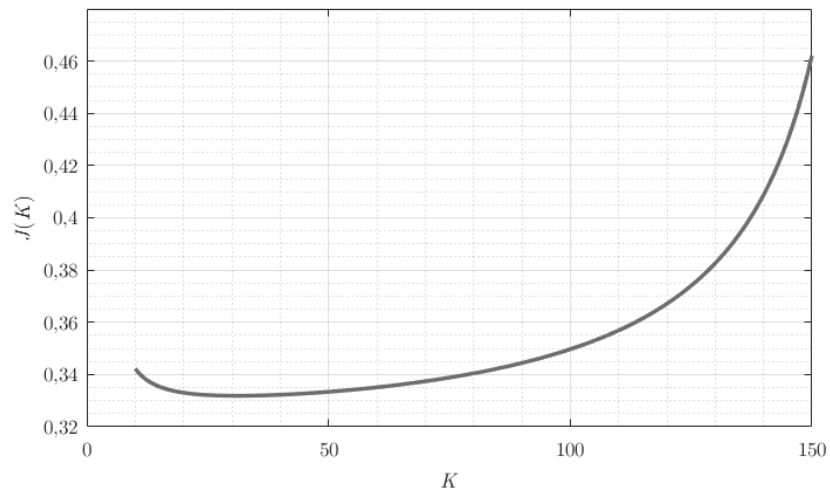


Рис. 5. График зависимости критерия от значений коэффициента K

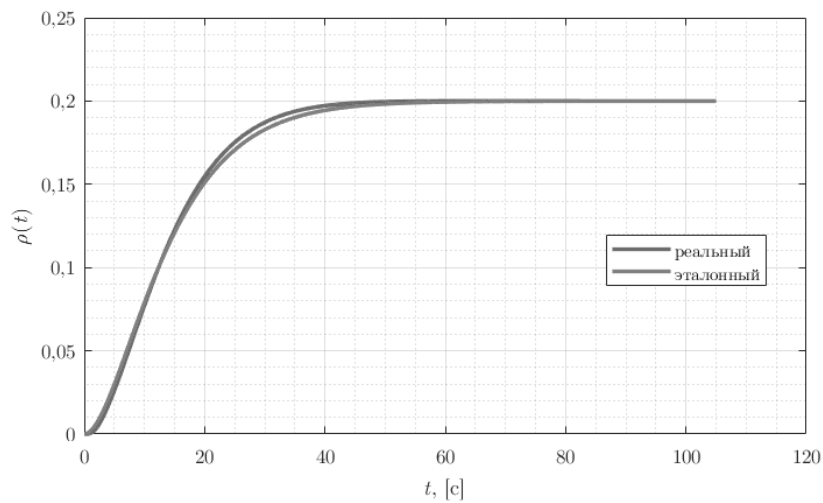


Рис. 6. График выходного сигнала при оптимальном значении K

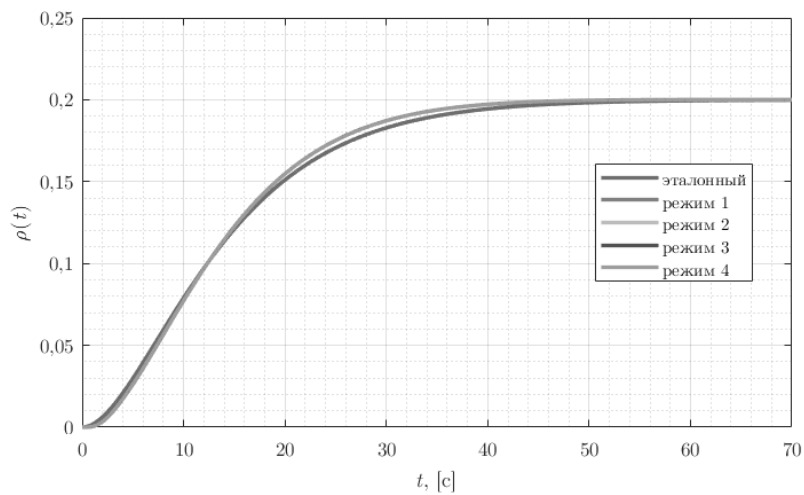
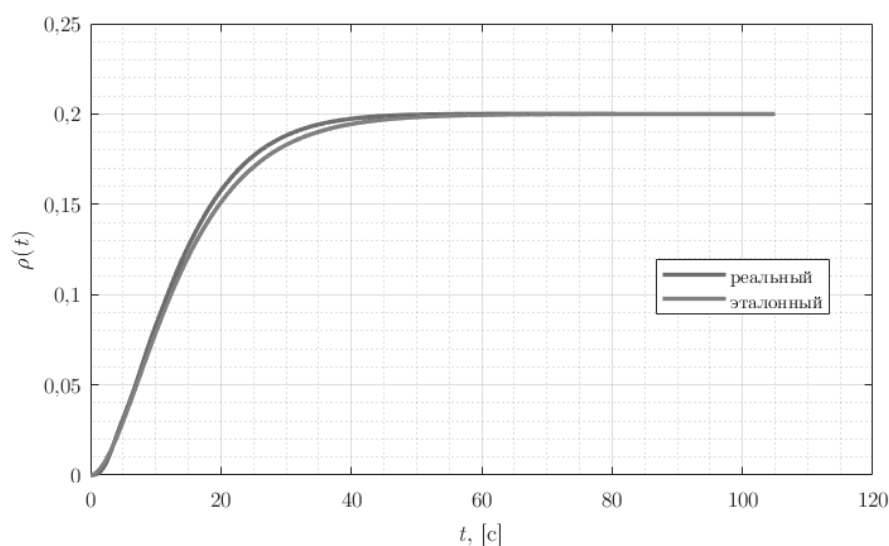
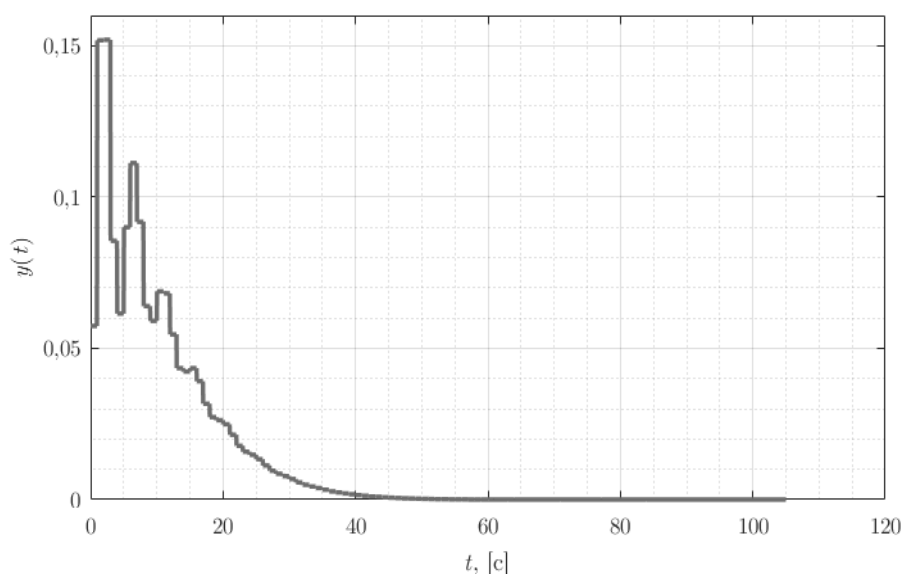


Рис. 7. Графики выходных сигналов на различных режимах



а) выходной сигнал



б) управление

Рис. 8. Графики выхода и управления полученной дискретно-непрерывной системы управления

значения параметров объекта управления различны. Поэтому проведены исследования динамики построенной системы управления на различных режимах работы, результаты которых представлены ниже.

Таким образом, построенный алгоритм управления позволяет обеспечить требуемые динамические показатели замкнутой системы управления на различных режимах работы.

Поскольку известен непрерывный алгоритм формирования управления (см. Рис. 3), то на его основе

можно получить технически более простой дискретный алгоритм управления, воспользовавшись, например, методом обратной разности, или подстановкой Тустена [6]. На Рис. 8 показан результат моделирования.

Таким образом, подход построения алгоритма управления, изложенный в [7], позволит синтезировать дискретный алгоритм формирования управления, обеспечивающий требуемые показатели качества замкнутой дискретно-непрерывной системы управления на всех режимах работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чубаров, Ф.Л. Прогрессивные способы контроля рабочих параметров как этап создания совместной системы диагностики / Ф.Л. Чубаров, А.С. Кувшинов, А.В. Никитин // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: Сборник научных статей международной научной конференции, Казань, 28 февраля 2019 года. — Казань: Общество с ограниченной ответственностью «КОНВЕРТ», 2019. — С. 87–89.
2. Чубаров, Ф.Л., Разработка математической модели клапана-захлопки для оптимизации его демпфирования при закрытии /Ф.Л. Чубаров, Д.А. Акименко, А.Н. Сизов, А.В. Никитин // Журнал Современные наукоемкие технологии — 2019 г. — № 6; С. 119.
3. Чубаров Ф.Л. Отработка модели высокоточного быстродействующего следящего электромеханического привода и её применение к системе регулирования паровой турбины / Ф.Л. Чубаров, А.Н. Сизов, А.И. Быков // Фундаментальные исследования. — 2016. — № 9–1. — С. 91–95.
4. Дунаев В.И., Федосовский М.Е., Кушбасов А.Н. Способ повышения точности измерения аналогового сигнала, устройство для измерения аналогового сигнала // Патент РФ RU2506697.
5. Жеваженко В.В., Смирнов И.И., Сизов А.Н., Кириухин А.А. Модернизация системы автоматического регулирования частоты вращения и давления пара паротурбинной установки. Материалы XIII молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее-2015». СПб — ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2015. — С. 104–106.
6. Сизов А.Н., Мусатов Е.А., Чубаров Ф.Л., Гусев И.В. Применение высокоточных быстродействующих следящих электромеханических приводов в электрогидравлических системах регулирования частоты вращения паровых турбин. Теоретические и прикладные аспекты современной науки: сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической конференции 30 ноября 2014 г.: в 6 ч. / Под общ. ред. М.Г. Петровой. — Белгород: ИП Петрова М.Г., 2014. — Часть III. — С. 133–139.
7. Сизов А.Н., Чубаров Ф.Л., Гусев И.В. Разработка модели высокоточного быстродействующего следящего электромеханического привода // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1–1.; <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19719>.

© Чубаров Федор Леонидович (fedor1966chub@yandex.ru), Сизов Александр Николаевич (axelxd@yandex.ru),
Никитин Алексей Валерьевич (anikitin74@yandex.ru), Голиков Андрей Сергеевич (gas@bmstu.ru).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева