

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

# **ВЕСТНИК**

Санкт-Петербургского  
государственного университета  
технологии и дизайна



**Серия 1**

Естественные  
и технические науки

**№ 4/2022**

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ

УДК 681.51: 621.18–5

DOI 10.46418/2079-8199\_2022\_4\_23

Д. А. Ковалев<sup>1</sup>, В. А. Шаряков<sup>1</sup>, О. Л. Шарякова<sup>2</sup>, В. А. Лебедева<sup>3</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна  
191186 РФ, Санкт-Петербург, Большая Морская, 18<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
190005 РФ, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, 4<sup>3</sup> ООО «Научно-производственное предприятие «ЭПРО»»  
195253 РФ, Санкт-Петербург, Салтыковская дорога, 18, Литера М

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ В КАСКАДНОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

© Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, В. А. Лебедева, 2022

При синтезе систем автоматического регулирования возникает проблема со сложным определением параметров регулятора, причем основным критерием становится достижение устойчивой работы, а качество переходного процесса отходит на второй план. Такие проблемы могут возникнуть при наличии в исходной системе двух и более вложенных контуров. Корректный синтез подобных систем возможен при использовании структуры подчиненного регулирования, позволяющей заменить внутренний контур эквивалентным апериодическим звеном первого порядка. В работе на примере системы автоматического регулирования температуры перегретого пара показан принцип построения структуры подчиненного регулирования и синтез такой системы.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, объект управления, источник тепловой энергии, повышение эффективности эксплуатации, система автоматического управления уровнем воды, каскадная схема регулирования.

Повышение эффективности эксплуатации источника тепловой энергии, как реального объекта управления, является одной из актуальных задач [1]–[12]. Одним из ключевых регулируемых параметров является температура перегретого пара.

Работа системы автоматического регулирования температуры перегретого пара (рис. 1) заключается в регулировании подачи количества топлива в топку для обеспечения заданной температуры перед пароперегревателем — внутренний контур и после пароперегревателем — внешний контур. Регулирование подачи осуществляется регулирующим органом, управляемым исполнительным механизмом по сигналам от регулятора температуры пара [11], [12].

На рис. 1 показаны следующие контуры регулирования:

1. Контур «2»: датчик температуры пара перед пароперегревателем ( $ДТ_1$ ) — сумматор — регулятор температуры пара ( $Р\Theta_{П1}$ ) — исполнительный механизм — регулирующий орган ( $РQ_1$ ) подачи топлива — объект управления 1 ( $OU_1$ ), включающий в себя топку, котел паронагреватель (ПН).

2. Контур «3»: датчик температуры перегретого пара ( $ДТ_2$ ) — сумматор — регулятор температуры перегретого пара ( $Р\Theta_{ПП}$ ) — сумматор — регулятор температуры пара ( $Р\Theta_{П1}$ ) — исполнительный механизм ( $ИМ_1$ ) — регулирующий орган ( $РQ_1$ ) подачи топлива — объект управления 1 ( $OU_1$ ), включающий

в себя топку, котел паронагреватель — парохладитель (ПО) — пароперегреватель (ПП), объект управления 2 ( $OU_2$ ).

3. Вспомогательный контур: датчик температуры пара перед пароперегревателем ( $ДТ_1$ ) — сумматор — регулятор температуры пара ( $Р\Theta_{П2}$ ) — исполнительный механизм ( $ИМ_2$ ) — регулирующий орган ( $РQ_2$ ) количества питательной воды, пропускаемой через парохладитель — парохладитель.

Контур «1» исполнительный механизм, включающий в себя датчик положения штока — сумматор — регулятор положения штока (РПШ) — электрический двигатель ( $\mathcal{E}Д_1$ ) — редуктор ( $P_1$ ) на рис. 1 не раскрыт.

Каскадная схема регулирования температуры перегретого пара, показана на рис. 2.

На схеме введены следующие обозначения:  $g_{31}(t)$  — заданная температура перегретого пара;  $ЗУП_1$  — задатчик температуры перегретого пара;  $I_{31}(t)$  — ток задания, соответствующий заданной температуре перегретого пара;  $e_3(t)$  — ошибка регулирования температуры перегретого пара;  $I_{Y3}(t)$  — выходной ток  $Р\Theta_{ПП}$ ;  $e_2(t)$  — ошибка регулирования температуры пара перед пароперегревателем;  $I_{Y2}(t)$  — выходной ток  $Р\Theta_{П1}$ ;  $e_1(t)$  — ошибка регулирования положения штока  $ИМ_1$ ;  $I_{Y1}(t)$  — выходной ток РПШ;  $\mathcal{E}Д_1$  — электродвигатель  $ИМ_1$ ;  $\omega_1(t)$  — частота вращения вала  $\mathcal{E}Д_1$ ;  $P_1$  — редуктор  $ИМ_1$ ;  $l_1(t)$  — положение штока вала  $ИМ_1$ ;  $G_T(t)$  —

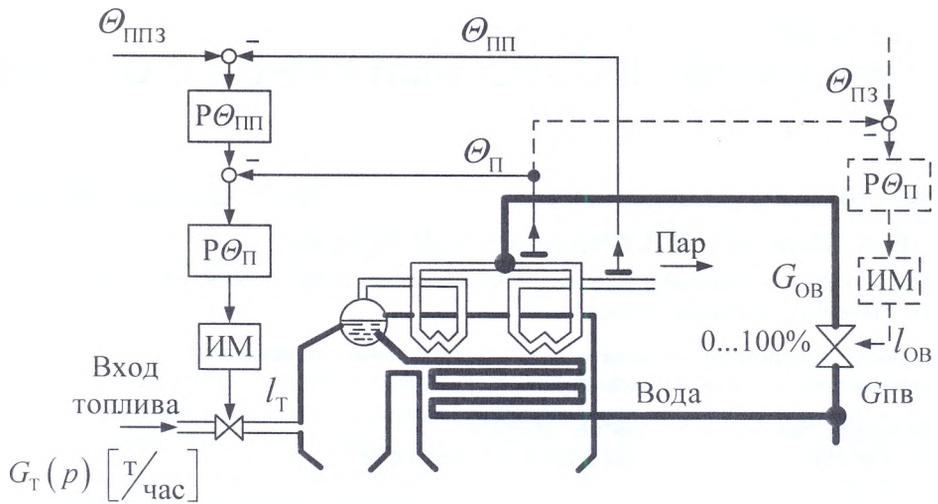


Рис. 1. Функциональная схема системы регулирования температуры перегретого пара

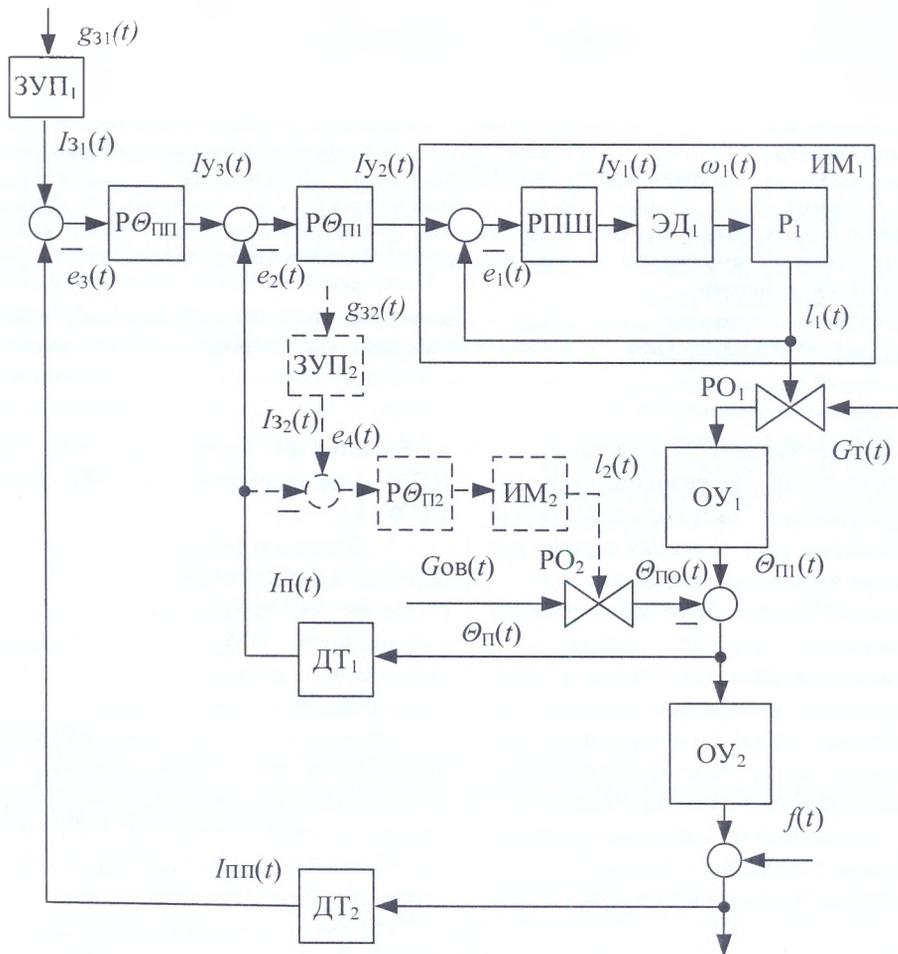


Рис. 2. Структурно-аналитическая схема системы регулирования температуры перегретого пара

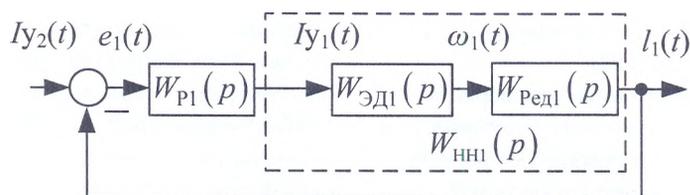


Рис. 3. Алгоритмическая структурная схема автоматической системы регулирования положения штока (контур «1»)

количество подачи топлива;  $\Theta_{\text{ПП}}$  — температура перед пароохладителем;  $\Theta_{\text{П}}$  — температура пара после пароохладителя;  $\Theta_{\text{ПО}}$  — температура парохладителя;  $\Theta_{\text{ППП}}$  — температура пара после пароперегревателя;  $f(t)$  — возмущающее воздействие влияющее на температуру перегретого пара, например расход пара;  $I_{\text{П}}(t)$  — выходной ток ДТ<sub>1</sub>;  $I_{\text{ПП}}(t)$  — выходной ток ДТ<sub>2</sub>;  $g_{32}(t)$  — заданная температура пара; ЗУП<sub>2</sub> — задатчик температуры пара;  $I_{32}(t)$  — ток задания, соответствующий заданной температуре пара;  $e_4(t)$  — ошибка регулирования температуры пара;  $I_{Y3}(t)$  — выходной ток Р $\Theta_{\text{П2}}$ ;  $l_2(t)$  — положение штока вала ИМ<sub>2</sub>;  $G_{\text{ОВ}}(t)$  — количества подачи питательной воды.

Проведем синтез каскадной системы. Синтез таких систем начинается «изнутри», т. е. с самого внутреннего контура [2], [13], [14]. В нашем случае это контур «1».

Построим алгоритмическую структурную схему автоматической системы регулирования положения штока ИМ<sub>1</sub> (контур «1»).

Запишем передаточную функцию, разомкнутого контура «1» (рис. 3) [2]

$$W_{\text{РАЗ1}}(p) = W_{\text{Р1}}(p) \cdot W_{\text{НН1}}(p) \quad (1)$$

где  $W_{\text{Р1}}(p)$  — передаточная функция РПШ;  $W_{\text{НН1}}(p)$  — передаточная функция неизменяемой части контура «1».

Передаточные функции элементов контура «1»:

- Неизменяемой части контура «1»:

$$W_{\text{НН1}}(p) = W_{\text{ЭД1}}(p) \cdot W_{\text{Ред1}}(p) \quad (2)$$

где  $W_{\text{ЭД1}}(p)$  — передаточная функция ЭД<sub>1</sub>;  $W_{\text{Ред1}}(p)$  — передаточная функция редуктора.

- Передаточная функция электрического двигателя

$$W_{\text{ЭД1}}(p) = \frac{\omega_1(p)}{I_{Y1}(p)} = \frac{K_{\text{ЭД1}}}{T_{\text{ЭД1}} \cdot p + 1} \quad (3)$$

где  $K_{\text{ЭД1}}$  — коэффициент передачи электродвигателя;  $T_{\text{ЭД1}}$  — постоянная времени электродвигателя.

- Передаточная функция редуктора

$$W_{\text{Ред1}}(p) = \frac{l_1(p)}{\omega_1(p)} = \frac{K_{\text{Ред1}}}{T_{\text{ИМ1}} \cdot p} \quad (4)$$

где  $K_{\text{Ред1}}$  — коэффициент передачи редуктора;  $T_{\text{ИМ1}}$  — время полного хода выходного вала ИМ;  $l_1(p)$  — положение штока, управляющего Р $\Theta_1$ .

С учетом (3) и (4) передаточная функция неизменяемой части контура «1» может быть записана:

$$W_{\text{НН1}}(p) = \frac{K_{\text{ЭД1}} \cdot K_{\text{Ред1}}}{T_{\text{ИМ1}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД1}} \cdot p + 1)} \quad (5)$$

Для неизменяемой части, имеющей в составе интегрирующее звено, достаточно использовать П-регулятор, настроенный на ОМ [4]:

$$W_{\text{Р}}(p) = \beta_{\text{Р}} \quad (6)$$

Настройка регулятора должна быть следующей:

$$\beta_{\text{Р}} = \frac{T_{\text{О}}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot \prod_{v=1}^n K_{\text{V}}} \quad (7)$$

где  $T_{\text{О}} = T_{\text{ИМ}}$  — большая постоянная времени  $i$ -го контура;  $T_{\mu} = \sum_{v=1}^n T_{\text{V}} = T_{\text{ЭД}}$  — сумма малых постоянных времени, входящих в  $i$ -й контур;  $\prod_{v=1}^n K_{\text{V}}$  — произведение коэффициентов усиления звеньев, входящих в  $i$ -й контур.

$$\beta_{\text{Р}} = \frac{T_{\text{ИМ1}}}{2 \cdot T_{\text{ЭД1}} \cdot K_{\text{ЭД1}} \cdot K_{\text{Ред1}}} \quad (8)$$

С учетом (6)–(8) выражение (1) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} W_{\text{РАЗ1}}(p) &= W_{\text{Р1}}(p) \cdot W_{\text{НН1}}(p) = \\ &= \frac{T_{\text{ИМ1}}}{2 \cdot T_{\text{ЭД1}} \cdot K_{\text{ЭД1}} \cdot K_{\text{Ред1}}} \cdot \frac{K_{\text{ЭД1}} \cdot K_{\text{Ред1}}}{T_{\text{ИМ1}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД1}} \cdot p + 1)} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot T_{\text{ЭД1}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД1}} \cdot p + 1)} \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение для замкнутого контура «1» будет:

$$\begin{aligned} W_{\text{ЗАМ1}}(p) &= \frac{W_{\text{РАЗ1}}(p)}{1 + W_{\text{РАЗ1}}(p) \cdot K_{\text{ДТ1}}} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot T_{\text{ЭД1}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД1}} \cdot p + 1)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2 \cdot T_{\text{ЭД1}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД1}} \cdot p + 1)} \cdot K_{\text{ДТ1}}} \\ &= \frac{1/K_{\text{ДТ1}}}{2 \cdot T_{\text{ЭД1}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\text{ЭД1}} \cdot p + 1} \approx \frac{1/K_{\text{ДТ1}}}{2 \cdot T_{\text{ЭД1}} \cdot p + 1} \end{aligned} \quad (10)$$

Для синтеза внешнего контура регулирования в выражении пренебрегаем произведением малых постоянных времени и получаем эквивалентную передаточную функцию аperiodического звена первого порядка.

$$W_{\text{ЗАМ1}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\text{ЭД1}} \cdot p + 1} = \frac{1}{T_{\text{Э1}} \cdot p + 1} \quad (11)$$

где  $T_{\text{Э1}} = 2 \cdot T_{\text{ЭД1}}$  — эквивалентная постоянная времени внутреннего контура.

Построим алгоритмическую структурную схему автоматической системы регулирования температуры пара перед пароперегревателем (контур «2») рис. 4.

Запишем передаточную функцию контура «2» (рис. 4) [15]

$$W_{\text{РАЗ2}}(p) = W_{\text{Р2}}(p) \cdot W_{\text{НН2}}(p) \quad (12)$$

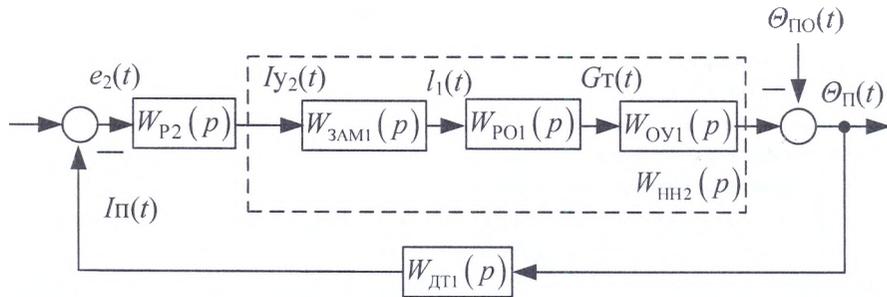


Рис. 4. Алгоритмическая структурная схема автоматической системы температуры пара перед пароперегревателем (контур «2»)

где  $W_{P2}(p)$  — передаточная функция РӨ<sub>П</sub>;  $W_{НН2}(p)$  — передаточная функция неизменяемой части контура «2».

Передаточные функции элементов контура «2»:

- Неизменяемой части контура «2»:

$$W_{НН2}(p) = W_{3AM1}(p) \cdot W_{PO1}(p) \cdot W_{OH1}(p) \quad (13)$$

где  $W_{OH1}(p)$  — передаточная функция ОУ<sub>1</sub>;  $W_{PO1}(p)$  — передаточная функция РО<sub>1</sub>.

- Передаточная функция регулирующего органа

$$W_{PO1}(p) = \frac{G_T(p)}{I_1(p)} = K_{PO1} \quad (14)$$

где  $G_T(p)$  — выходная величина РО<sub>1</sub> — подача топлива, определяется максимальным допустимым значением, соответствующему технологическому процессу.

- Объекта управления ОУ<sub>1</sub>

Учитывая характер переходного процесса, передаточная функция объекта управления, включающего в себя топку, котел паронагреватель, может быть представлена апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием.

$$W_{OH1}(p) = \frac{K_{OH1} \cdot e^{-\tau_{OH1} \cdot p}}{T_{OH1} \cdot p + 1} \quad (15)$$

где  $K_{OH1}(p)$  — коэффициент усиления ОУ<sub>1</sub>;  $T_{OH1}(p)$  — постоянная времени ОУ<sub>1</sub>;  $\tau_{OH1}(p)$  — запаздывание ОУ<sub>1</sub>.

- Датчика температуры пара ДТ<sub>1</sub>

$$W_{DT1}(p) = \frac{I_{П}(p)}{\Theta_{П}(p)} = K_{DT1} \quad (16)$$

Запишем выражение неизменяемой части контура «2», учитывая выражения (14) и (15):

$$W_{НН1}(p) = \frac{1}{T_{Э1} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{PO1} \cdot K_{OH1} \cdot e^{-\tau_{OH1} \cdot p}}{T_{OH1} \cdot p + 1} \quad (17)$$

Как видно из (17) неизменяемая часть контура «2» состоит из двух апериодических звеньев с разными

постоянными времени, время запаздывания можно считать одной из постоянных времени системы.

Отметим, что постоянная времени объекта управления больше суммы остальных постоянных времени

$$(T_{Э1} + \tau_{OH1}) < T_{OH1} \quad (18)$$

В системе, состоящей из апериодических звеньев, включенных последовательно, причем постоянная времени одного из звеньев больше суммы постоянных времени оставшихся звеньев, предлагается применить ПИ-регулятор с настройками на ОМ

$$W_P = \beta \cdot \frac{\tau_P \cdot p + 1}{\tau_P \cdot p} \quad (19)$$

Настройки ПИ-регулятора должны компенсировать большую постоянную времени и коэффициенты усиления звеньев неизменяемой части контура, и параметры датчика обратной связи [13]:

$$\beta_P = \frac{T_O}{2 \cdot T_{\mu} \cdot \prod_{v=1}^n K_v}; \quad \tau_P = T_O \quad (20)$$

Настройки регулятора контура «2» в соответствии с (17) и (20) будут:

$$\beta_P = \frac{T_{OH1}}{2 \cdot (T_{Э1} + \tau_{OH1}) \cdot K_{PO1} \cdot K_{OH1} \cdot K_{DT1}}; \quad (21)$$

$$\tau = T_{OH1}$$

Запишем передаточную функцию разомкнутого контура (12) с учетом (19) и (21)

$$\begin{aligned} W_{РА32}(p) &= W_{P2}(p) \cdot W_{НН2}(p) = \\ &= \beta \cdot \frac{\tau_P \cdot p + 1}{\tau_P \cdot p} \cdot W_{3AM1}(p) \cdot W_{PO1}(p) \cdot W_{OH1}(p) = \\ &= \frac{T_{OH1}}{2 \cdot (T_{Э1} + \tau_{OH1}) \cdot K_{PO1} \cdot K_{OH1} \cdot K_{DT1}} \cdot \frac{T_{OH1} \cdot p + 1}{T_{OH1} \cdot p} \times \\ &\quad \times \frac{1}{T_{Э1} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{PO1} \cdot K_{OH1} \cdot e^{-\tau_{OH1} \cdot p}}{T_{OH1} \cdot p + 1} = \\ &= \frac{e^{-\tau_{OH1} \cdot p}}{2 \cdot (T_{Э1} + \tau_{OH1}) \cdot K_{DT1} \cdot p \cdot (T_{Э1} \cdot p + 1)} \quad (22) \end{aligned}$$

Выражение для замкнутого контура «2» будет:

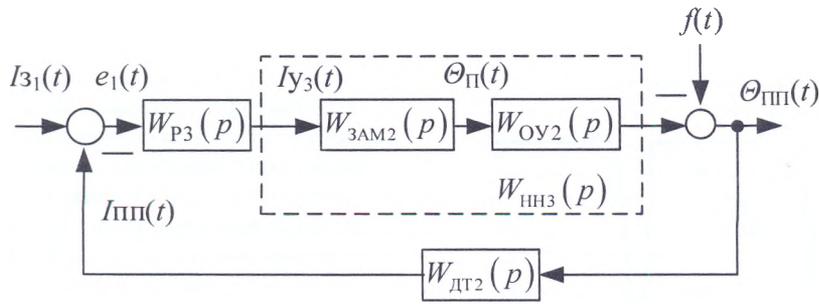


Рис. 5. Алгоритмическая структурная схема автоматической системы температуры пара после пароперегревателя (контур «3»)

$$\begin{aligned}
 W_{3AM2}(p) &= \frac{W_{PA32}(p)}{1 + W_{PA32}(p) \cdot K_{DT1}} = \\
 &= \frac{2 \cdot (T_{Э1} + \tau_{OY1}) \cdot K_{DT1} \cdot p \cdot (T_{Э1} \cdot p + 1)}{e^{-\tau_{OY1} \cdot p} \cdot (1 + 2 \cdot (T_{Э1} + \tau_{OY1}) \cdot K_{DT1} \cdot p \cdot (T_{Э1} \cdot p + 1))} = \\
 &= \frac{1}{K_{DT1} \cdot \underbrace{2 \cdot T_{Э1} \cdot (T_{Э1} + \tau_{OY1}) \cdot p^2 + 2 \cdot T_{Э1} \cdot p + e^{-\tau_{OY1} \cdot p}}_0} \cdot e^{-\tau_{OY1} \cdot p} \quad (23)
 \end{aligned}$$

Для синтеза внешнего контура регулирования в выражении (23) пренебрегаем произведением малых постоянных времени и получаем эквивалентную передаточную функцию апериодического звена первого порядка.

$$W_{3AM2}(p) = \frac{1/K_{DT1}}{2 \cdot T_{Э1} \cdot p + 1} = \frac{1/K_{DT1}}{T_{Э2} \cdot p + 1} \quad (24)$$

где  $T_{Э2} = 2 \cdot T_{Э1}$  — эквивалентная постоянная времени внутреннего контура.

Алгоритмическая структурная схема автоматической системы регулирования температуры пара после пароперегревателя (контур «3») показана на рис. 5.

Запишем передаточную функцию контура «3» (рис. 5) [15]

$$W_{PA33}(p) = W_{P3}(p) \cdot W_{NN3}(p) \quad (25)$$

где  $W_{P3}(p)$  — передаточная функция  $P_{OП2}$ ;  $W_{NN3}(p)$  — передаточная функция неизменяемой части контура «3».

Передаточные функции элементов контура «3»:

- Неизменяемой части контура «3»:

$$W_{NN3}(p) = W_{3AM2}(p) \cdot W_{OY2}(p) \quad (26)$$

где  $W_{OY2}(p)$  — передаточная функция  $OY_2$ .

- Объекта управления  $OY_2$

Учитывая характер переходного процесса, передаточная функция объекта управления, включающего

в себя пароперегреватель может быть представлена апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием.

$$W_{OY2}(p) = \frac{K_{OY2} \cdot e^{-\tau_{OY2} \cdot p}}{T_{OY2} \cdot p + 1} \quad (27)$$

где  $K_{OY2}(p)$  — коэффициент усиления  $OY_2$ ;  $T_{OY2}(p)$  — постоянная времени  $OY_2$ ;  $\tau_{OY2}(p)$  — запаздывание  $OY_2$ .

- Датчика температуры пара  $DT_2$

$$W_{DT2}(p) = \frac{I_{ПП}(p)}{\Theta_{ПП}(p)} = K_{DT2} \quad (28)$$

Запишем выражение неизменяемой части контура «3» (26), учитывая выражения (27):

$$W_{NN1}(p) = \frac{1/K_{DT1}}{T_{Э2} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{OY2} \cdot e^{-\tau_{OY2} \cdot p}}{T_{OY2} \cdot p + 1} \quad (29)$$

Выражение также состоит из двух апериодических звеньев с разными постоянными времени и для синтеза контура «3» соответственно справедливы выводы сделанные при синтезе контура «2».

Настройки регулятора контура «3» в соответствии с и будут:

$$\begin{aligned}
 \beta_P &= \frac{T_{OY2}}{2 \cdot (T_{Э2} + \tau_{OY2}) \cdot \frac{1}{K_{DT1}} \cdot K_{OY2} \cdot K_{DT2}}; \\
 \tau &= T_{OY2} \quad (30)
 \end{aligned}$$

Запишем передаточную функцию разомкнутого контура (25) с учетом (19) и (30)

$$\begin{aligned}
 W_{PA33}(p) &= W_{P3}(p) \cdot W_{NN3}(p) = \\
 &= \beta \cdot \frac{\tau_P \cdot p + 1}{\tau_P \cdot p} \cdot W_{3AM2}(p) \cdot W_{OY2}(p) = \\
 &= \frac{T_{OY2}}{2 \cdot (T_{Э2} + \tau_{OY2}) \cdot \frac{1}{K_{DT1}} \cdot K_{OY2} \cdot K_{DT2}} \cdot \frac{T_{OY2} \cdot p + 1}{T_{OY2} \cdot p} \times \\
 &\quad \times \frac{1}{K_{DT1}} \cdot \frac{K_{OY2} \cdot e^{-\tau_{OY2} \cdot p}}{T_{Э2} \cdot p + 1} = \\
 &= \frac{e^{-\tau_{OY1} \cdot p}}{2 \cdot (T_{Э2} + \tau_{OY2}) \cdot K_{DT2} \cdot p \cdot (T_{Э2} \cdot p + 1)} \quad (31)
 \end{aligned}$$

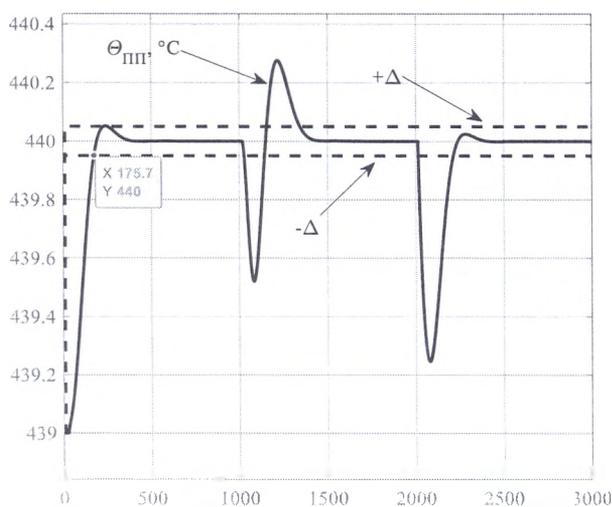


Рис. 6. Результат моделирования трехконтурной системы регулирования температуры перегретого пара

Выражение для замкнутого контура «3» будет:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{ЗАМ3}}(p) &= \frac{W_{\text{РА33}}(p)}{1 + W_{\text{РА33}}(p)} = \\
 &= \frac{e^{-\tau_{\text{ОУ1}} p}}{1 + \frac{2 \cdot (T_{\text{Э2}} + \tau_{\text{ОУ2}}) \cdot K_{\text{ДТ2}} \cdot p \cdot (T_{\text{Э2}} \cdot p + 1)}{e^{-\tau_{\text{ОУ1}} p} \cdot K_{\text{ДТ2}}}} = \\
 &= \frac{1/K_{\text{ДТ2}}}{2 \cdot T_{\text{Э2}} \cdot (T_{\text{Э2}} + \tau_{\text{ОУ2}}) \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\text{Э2}} \cdot p + 1} \quad (32)
 \end{aligned}$$

Выполним имитационное моделирование [16]–[24] трехконтурной системы регулирования температуры перегретого пара (рис. 6). Настройка регуляторов была выполнена согласно предложенной методики.

Из графика видно, что переходный процесс практически не имеет перерегулирования (меньше 5%) и длится 175 секунд.

### Выводы

В ходе работы показан пример синтеза многоконтурной системы, состоящей из тех контуров.

Продемонстрирован пример настройки такой структуры, обоснован выбор регуляторов.

### Список литературы

1. Ковалев Д. А., Шаряков В. А., Шарякова О. Л. Моделирование системы автоматического управления мощностью энергоблока при изменении общей нагрузки энергосистемы // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2022. № 1. С. 122–129. — DOI 10.46418/2079-8199\_2022\_1\_19. EDN RGFHOC.
2. Ковалев Д. А., Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Лебедева В. А. Синтез двухконтурной систем автоматического управления уровнем воды парового котла // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и техни-

ческие науки. 2022. № 3. С. 136–142. DOI 10.46418/2079-8199\_2022\_3\_24.

3. Ковалев Д. А. Повышение эффективности системы автоматического регулирования парового котла ДКВР 10/13 // Перспективы развития науки в современном мире: Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, Прага, Чехия, 24 марта 2018 года / под общей редакцией А. И. Вострецова. Прага, Чехия: Научно-издательский центр «Мир науки», 2018. С. 68–71.
4. Бобух А. А., Ковалев Д. А. Повышение энергосбережения закрытого централизованного теплоснабжения города при реконструкции центрального и модернизации индивидуального тепловых пунктов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 3 (121). С. 12–18.
5. Компьютерные энергосберегающие технологии управления системами жизнеобеспечения зданий / А. А. Бобух, Д. А. Ковалев, А. А. Климов, А. М. Дзевочко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 6. № 2 (72). С. 48–53. DOI 10.15587/1729-4061.2014.30503.
6. Ковалев Д. А., Бобух А. А. Повышение энергоэффективности получения и использования геотепловой энергии за счет автоматизации технологических процессов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2013. № 10 (116). С. 18–23.
7. Ковалев Д. А., Бобух А. А. Автоматизация технологических процессов систем солнечных коллекторов и кондиционирования воздуха // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2013. № 7 (113). С. 2–6.
8. Бобух А. А., Ковалев Д. А. Компьютерно-интегрированная система автоматизации технологических объектов управления централизованным теплоснабжением: монография / под ред. А. А. Бобуха. Х.: ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2013. 226 с.
9. Ковалев Д. А., Бобух А. А. Исследование объектов управления закрытой системы централизованного теплоснабжения на их физических моделях // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2012. № 10 (104). С. 35–40.
10. Ковалев Д. А. Повышение эффективности эксплуатации источника тепловой энергии // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2010. № 11 (81). С. 48–54.
11. Ротач В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 296 с.
12. Плетнев Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для студентов вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2016.
13. Фрер Ф., Ортенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования / пер. с нем. В. П. Цишевского. М.: Энергия, 1973. 190 с.
14. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982. 392 с.
15. Ковалев Д. А., Шаряков В. А., Шарякова О. Л. Теория автоматического управления: учеб. пособие. СПб.: СПбГУПТД, 2020. 79 с.
16. Modeling a Production Well Flow Control System Using the Example of the Verkhneberezhovskaya Area / A. A. Makarova, I. V. Kaliberda, I. M. Pershin, D. A. Kovalev // Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022, St. Petersburg, 25–28 января 2022 года. St. Petersburg, 2022. pp. 760–764. DOI 10.1109/ElConRus54750.2022.9755852. EDN PGANVB.
17. Об автоматической стабилизации напряжения контактной сети электрического подвижного состава / Т. П. Сацуки др. // Электротехника. 2021. № 4. С. 36–40.

18. The Modeling of Mineral Water Fields Data Structure / A. A. Makarova, I. V. Mantorova, D. A. Kovalev, I. N. Kutovoy // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. Moscow, 2021. pp. 517–521. DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396250.
19. Automatic Voltage Stabilization of an Electric Rolling Stock Catenary System / T. P. Satsuk et al. // Russian Electrical Engineering, 2021. Vol. 92. No 4. pp. 213–216. DOI 10.3103/S1068371221300015.
20. Ilyushin A. N., Kovalev D. A., Afanasev P. M. Development of Information Measuring Complex of Distributed Pulse Control System // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Vladivostok, 01–04 октября 2019 года. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8934173. DOI 10.1109/FarEastCon. 2019.8934173.
21. Потанов А. П., Вагизов М. Р. Технологии машинного обучения и обработки таксационных данных для визуализации геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 1) // Информация и космос. 2022. № 3. С. 125–129.
22. Вагизов М. Р. Разработка технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 3) // Геоинформатика. 2022. № 2. С. 34–41. DOI 10.47148/1609-364X-2022-2-34-41.
23. Kovalev D. A., Rusinov L. A. Increase in environmental safety of recovery boiler // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 4, Virtual, Online, 24–26 ноября 2021 года. Virtual, Online, 2022. P. 012068. DOI 10.1088/1755-1315/990/1/012068. EDN AOGERP.
24. Erratum to: automatic voltage stabilization of an electric rolling stock catenary system / T. P. Satsuk et al. // Russian Electrical Engineering. 2021. Vol. 92. No 6. p. 349. DOI 10.3103/S1068371221040052.

**D. A. Kovalev<sup>1</sup>, V. A. Sharyakov<sup>1</sup>, O. L. Sharyakova<sup>2</sup>, V. A. Lebedeva<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> St. Petersburg State University of Technologies and Design  
191186 Russia, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 18

<sup>2</sup> St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
190005 Russia, Saint-Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya str., 4

<sup>3</sup> LLC «Scientific and Production Enterprise “EPRO”»  
195253 Russia, Saint-Petersburg, Saltykovskaya road, 18, Litera M

## ANALYTICAL ADJUSTMENT OF REGULATORS IN A CASCADE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

When synthesizing automatic control systems, there is a problem with complex definition of controller parameters, and the main criterion becomes the achievement of stable operation, and the quality of the transient becomes of secondary importance. Such problems may arise in the presence of two or more nested loops in the initial system. The correct synthesis of such systems is possible by using a slave control structure that allows us to replace the inner loop with an equivalent aperiodic link of the first order. By the example of an automatic temperature control system for superheated steam, the principle of building a slave control structure and the synthesis of such a system are shown in the paper.

**Keywords:** simulation modeling system, control object, heat source, increase of operation efficiency, automatic control system water level, cascade control scheme.

## References

1. Kovalev D. A., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L. Modeling of the automatic power control system of a power unit when the total load of the power system changes // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences. 2022. No. 1. pp. 122–129. DOI 10.46418/2079-8199\_2022\_1\_19. EDN RGFHOC. (in Rus.).
2. Kovalev D. A., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Lebedeva V. A. Synthesis of two-circuit systems for automatic control of steam boiler water level // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences. 2022. No. 3. pp. 136–142. DOI 10.46418/2079-8199\_2022\_3\_24 (in Rus.).
3. Kovalev D. A. Improving the efficiency of the automatic control system of the steam boiler DKVR 10/13 // Prospects for the development of science in the modern world: Materials of the International (correspondence) scientific and practical conference, Prague, Czech Republic, March 24, 2018 / ed. A. I. Vostretsov. Prague, Czech Republic: Mir Nauki Scientific Publishing Center, 2018. pp. 68–71.
4. Bobukh A. A., Kovalev D. A. Increasing energy saving of the closed centralized heat supply of the city during the re-construction of the central and modernization of individual heating points // Energy saving. Energy. Energy audit. 2014. No. 3 (121). pp. 12–18. (in Rus.).
5. Computer energy-saving technologies for managing life support systems of buildings / A. A. Bobukh, D. A. Kovalev, A. A. Klimov, A. M. Dzevochko // Eastern European Journal of Advanced Technologies. 2014. Vol. 6. No. 2 (72). pp. 48–53. DOI 10.15587/1729-4061.2014.30503.
6. Kovalev D. A., Bobukh A. A. Improving the energy efficiency of obtaining and using geothermal energy through automation of technological processes // Energy saving. Energy. Energy audit. 2013. No. 10 (116). pp. 18–23. (in Rus.).
7. Kovalev D. A., Bobukh A. A. Automation of technological processes of solar collector systems and air conditioning // Energy saving. Energy. Energy audit. 2013. No. 7 (113). pp. 2–6. (in Rus.).
8. Bobukh A. A., Kovalev D. A. Computer-integrated automation system of technological objects of centralized heat supply management: monograph / ed. A. A. Bobukh. Kh.: A. N. Beketov KHNUGH, 2013. 226 p. (in Rus.).
9. Kovalev D. A., Bobukh A. A. Investigation of control objects of a closed district heating system on their physical models //

- Energy saving. Energy. Energy audit. 2012. No. 10 (104). pp. 35–40. (in Rus.).
10. Kovalev D. A. Improving the efficiency of operation of a thermal energy source // Energy saving. Energy. Energy audit. 2010. No. 11 (81). pp. 48–54. (in Rus.).
  11. Rotach V. Ya. Theory of automatic control of thermal power processes: textbook. for universities. M.: Energoatomizdat, 1985. 296 p. (in Rus.).
  12. Pletnev G. P. Automation of technological processes and production in thermal power engineering: textbook for university students. M.: Publishing House of the Moscow Institute of Energy, 2016. (in Rus.).
  13. Frere F., Orttenger F. Introduction to electronic control technology / trans. from German V. P. Tsishevsky. M.: Energiya, 1973. 190 p. (in Rus.).
  14. Basharin A. V., Novikov V. A., Sokolovsky G. G. Control of electric drives. L.: Energoizdat, 1982. 392 p. (in Rus.).
  15. Kovalev D. A., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L. Theory of automatic control: teaching aid. St. Petersburg: SPbGUPTD, 2020. 79 p. (in Rus.).
  16. Modeling of the flow control system of an operational well on the example of Verkhneberezovskaya Square / A. A. Makarova, I. V. Kaliberda, I. M. Pershin, D. A. Kovalev // Materials of the Conference of Young researchers of Russia in the field of electrical engineering and electronics 2022, ElConRus 2022, St. Petersburg, June 25–28, 2022. Saint Petersburg, 2022. pp. 760–764. DOI 10.1109/ElConRus54750.2022.9755852. EDN PGAHVB.
  17. On automatic voltage stabilization of the contact network of electric rolling stock / T. P. Satsuk et al. // Electrical Engineering. 2021. No. 4. pp. 36–40. (in Rus.).
  18. Modeling of the structure of mineral water deposits / A. A. Makarova, I. V. Mantorova, D. A. Kovalev, I. N. Kutovoy // Proceedings of the Conference of Young Researchers of Russia in the field of electrical engineering and electronics IEEE 2021, ElConRus 2021, Moscow, June 26–28, 2021. Moscow, 2021. pp. 517–521. DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396250.
  19. Automatic voltage stabilization of the contact network of electric rolling stock / T. P. Satsuk et al. // Russian electrical engineering. 2021. Volume 92. No. 4. pp. 213–216. DOI 10.3103/S1068371221300015. (in Rus.).
  20. Ilyushin A. N., Kovalev D. A., Afanasyev P. M. Development of an information and measurement complex of a distributed pulse control system // International Multi-conference on Industrial Engineering and Modern Technologies 2019, FarEastCon 2019, Vladivostok, October 01–04, 2019. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. pp. 8934173. DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934173.
  21. Potapov A. P., Vagizov M. R. Technologies of machine learning and tax data processing for visualization of geoinformation modeling of forest ecosystems (part 1) // Information and Cosmos. 2022. No. 3. pp. 125–129. (in Rus.).
  22. Vagizov M. R. Development of technology of geoinformation modeling of forest ecosystems (part 3) // Geoinformatics. 2022. No. 2. pp. 34–41. DOI 10.47148/1609-364X-2022-2-34-41. (in Rus.).
  23. Kovalev D. A., Rusinov L. A. Improving the environmental safety of the heat recovery boiler // IOP Conference Series: Earth and Environment Science: 4, Virtual, Online, November 24–26, 2021. Virtual, Online, 2022. P. 012068. DOI 10.1088/1755-1315/990/1/012068. EDN AOGERP.
  24. Erratum to: automatic voltage stabilization of the contact network of electric rolling stock / T. P. Satsuk et al. // Russian electrical engineering. 2021. Volume 92. No. 6. p. 349. DOI 10.3103/S1068371221040052.