

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК

Санкт-Петербургского
государственного университета
технологии и дизайна



Серия 1

Естественные
и технические науки

№ 3/2022

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.51: 621.18–5

DOI 10.46418/2079-8199_2022_3_24

Ковалёв Д. А.¹, Шаряков В. А.¹, Шарякова О. Л.², Лебедева В. А.³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна 191186 РФ, Санкт-Петербург, Большая Морская, 18

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ) 190000 РФ, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, 4

³ ООО «Научно-производственное предприятие «ЭПРО». 195253 РФ, Санкт-Петербург, Салтыковская дор., 18, Литера М

СИНТЕЗ ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ ПАРОВОГО КОТЛА

© Д. А. Ковалёв, 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 интегрирующих звеньев, у которых постоянные времени практически одинаковые или одного порядка. Корректный синтез подобных систем возможен при использовании структуры подчиненного регулирования, позволяющей заменить контур с интегрирующим звеном эквивалентным апериодическим звеном первого порядка. В работе на примере системы автоматического регулирования уровня воды 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.

Для источника тепловой энергии как реального объекта управления одной из актуальных задач является повышение эффективности его эксплуатации [1]–[10]. Выполним синтез двухконтурной системы автоматического управления уровнем воды в барабане парового котла.

Работа системы автоматического регулирования уровня (рис. 1) заключается в регулировании подачи воды $G_{ГВ}(p)$ таким образом, что при рабочем расходе воды уровень не изменялся. Регулирование подачи осуществляется регулирующим органом, управляемым

исполнительным механизмом по сигналам от регулятора уровня [11], [12].

Такой контур регулирования уровня воды в себя включает (рис. 2):

- Объект управления (ОУ);
- Датчик уровня воды (ИП);
- Регулятор (РН);
- Исполнительный механизм (ИМ);
- Регулирующий орган (РО).

Запишем передаточную функцию разомкнутой системы (рис. 2) [13]

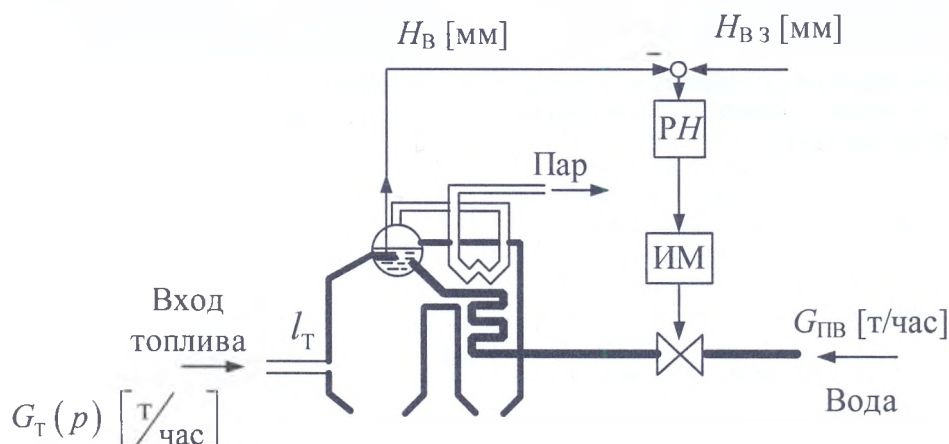


Рис. 1. Функциональная схема системы регулирования уровня воды

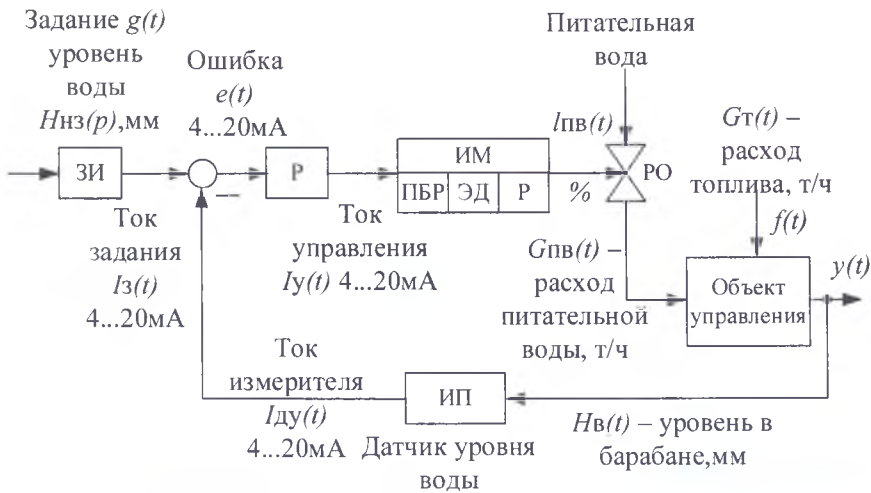


Рис. 2. Структурно-аналитическая схема системы регулирования уровня воды

$$W_{\text{РАЗ}}(p) = W_{\text{ИМ}}(p) \cdot W_{\text{РО}}(p) \cdot W_{\text{ОУ|У}}(p) \quad (1)$$

где $W_{\text{ИМ}}(p)$ — передаточная функция ИМ; $W_{\text{РО}}(p)$ — передаточная функция РО; $W_{\text{ОУ|У}}(p)$ — передаточная функция ОУ;

Передаточные функции элементов системы:
· датчика уровня воды

$$W_{\text{ДУ}}(p) = \frac{I_{\text{ДУ}}(p)}{H_{\text{В}}(p)} = K_{\text{ДУ}} \quad (2)$$

где $I_{\text{ДУ}}(p)$ — выходной ток датчика уровня воды; $H_{\text{В}}(p)$ — регулируемая величина — уровня воды.

· задатчика управляемого параметра (задатчик интенсивности — ЗИ)

$$W_{\text{ЗИ}}(p) = \frac{I_{\text{З}}(p)}{H_{\text{ВЗ}}(p)} = K_{\text{ЗИ}} \quad (3)$$

где $I_{\text{З}}(p)$ — выходной ток ЗИ; $g(p) = H_{\text{ВЗ}}(p)$ — заданная величина — уровня воды.

· исполнительного механизма

$$W_{\text{ИМ}}(p) = \frac{I_{\text{ПВ}}(p)}{I_{\text{У}}(p)} = W_{\text{ЭД}}(p) \cdot W_{\text{Ред}}(p) = \frac{K_{\text{ЭД}}}{T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{\text{Ред}}}{T_{\text{ИМ}} \cdot p} = \frac{K_{\text{ЭД}} \cdot K_{\text{Ред}}}{T_{\text{ИМ}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1)} \quad (4)$$

где $K_{\text{ЭД}}$ — коэффициент передачи электродвигателя; $T_{\text{ЭД}}$ — постоянная времени электродвигателя; $K_{\text{Ред}}$ — коэффициент передачи редуктора; $T_{\text{ИМ}}$ — время полного хода выходного вала ИМ; $I_{\text{ПВ}}(p)$ — положение штока, управляющего РО, является выходной величиной ИМ.

· регулирующего органа

$$W_{\text{РО}}(p) = \frac{G_{\text{ПВ}}(p)}{I_{\text{ПВ}}(p)} = K_{\text{РО}} \quad (5)$$

где $G_{\text{ПВ}}(p)$ — выходная величина РО — подача воды, определяется максимальным допустимым значением, соответствующему технологическому процессу.

Особенность системы регулирования уровня воды заключается в том, что объект управления описывается интегрирующим звеном. На рис. 3 и рис. 4 показаны

разгонные характеристики объекта при изменении управляющего и возмущающих воздействий [14].

$$\begin{cases} W_{\text{ОУ|У}}(p) = \frac{H_{\text{В}}(p)}{G_{\text{ПВ}}(p)} = \frac{e^{-\tau_{\text{ОУ|У}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|У}} \cdot p} = \frac{K_{\text{ОУ|У}} \cdot e^{-\tau_{\text{ОУ|У}} \cdot p}}{p} \\ W_{\text{ОУ|В}}(p) = \frac{H_{\text{В}}(p)}{G_{\text{Т}}(p)} = \frac{e^{-\tau_{\text{ОУ|В}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|В}} \cdot p} = \frac{K_{\text{ОУ|В}} \cdot e^{-\tau_{\text{ОУ|В}} \cdot p}}{p} \end{cases} \quad (6)$$

С учетом — выражение запишем следующим образом:

$$W_{\text{РАЗ}}(p) = W_{\text{ИМ}}(p) \cdot W_{\text{РО}}(p) \cdot W_{\text{ОУ|У}}(p) = \frac{K_{\text{ЭД}} \cdot K_{\text{Ред}}}{\frac{T_{\text{ИМ}}}{T_1} \cdot p \cdot \left(\frac{T_{\text{ЭД}}}{T_2} \cdot p + 1 \right)} \cdot K_{\text{РО}} \cdot \frac{K_{\text{ОУ|У}} \cdot e^{-\tau_{\text{ОУ|У}} \cdot p}}{T_3 \cdot p} \quad (7)$$

Из анализа выражения следует, что передаточная функция разомкнутой системы имеет четыре постоянные времени, причем T_1, T_3, T_4 могут превышать десятки секунд и быть соизмеримыми, при этом T_1, T_4 — постоянные времени двух интегрирующих звеньев. Синтез такой системы затруднен, а в некоторых случаях невозможен.

Для реализации синтеза таких систем обычно понижают порядок [15] за счет построения подчиненной (каскадной) системы регулирования (рис. 5), состоящей из двух контуров:

- а) Внутренний контур регулирования — положением штока исполнительного механизма.
- б) Внешний контур регулирования — непосредственно контур регулирования уровня воды.

Запишем передаточную функцию неизменяемой части внутреннего контура:

$$W_{\text{РАЗ|ВНУТР}}(p) = \frac{K_{\text{ЭД}} \cdot K_{\text{Ред}}}{T_{\text{ИМ}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1)} \quad (8)$$

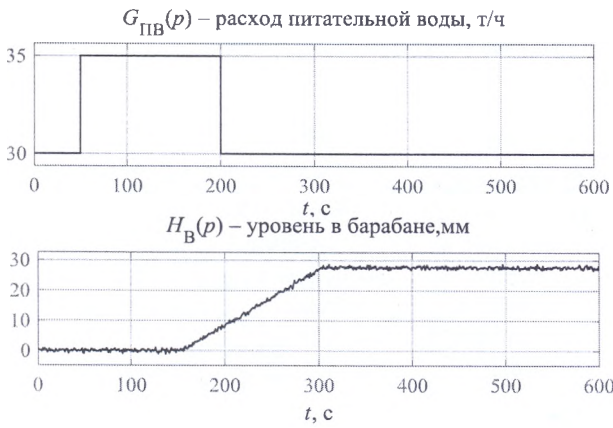


Рис. 3. Экспериментальная кривая регулирования уровня воды

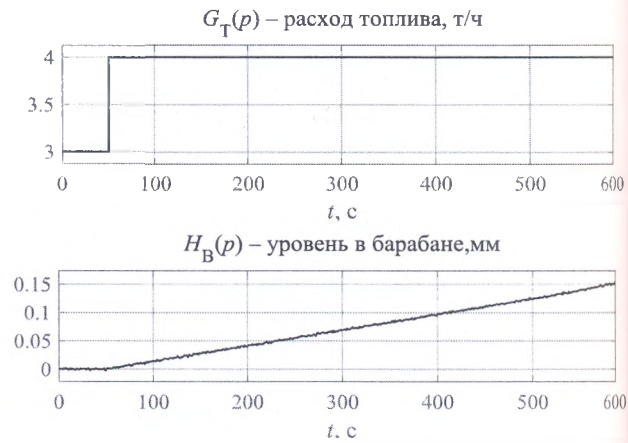


Рис. 4. Экспериментальная кривая уровня воды в зависимости от расхода топлива

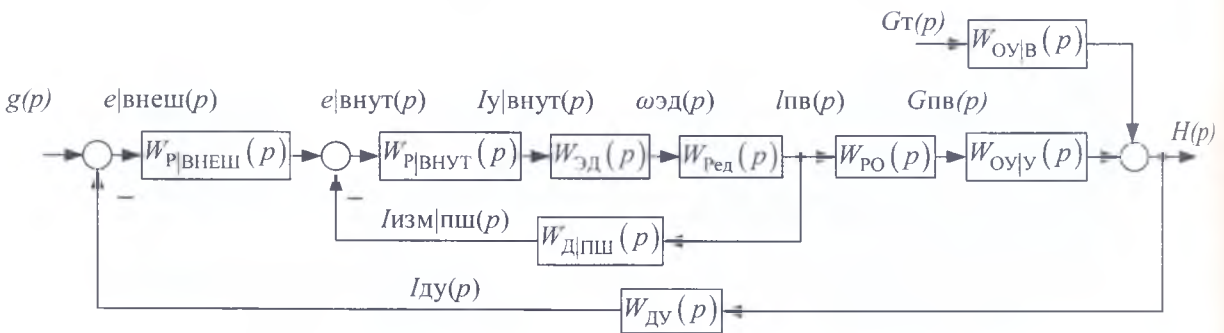


Рис. 5. Структурно-аналитическая схема подчиненной системы регулирования уровнем воды

Для неизменяемой части, имеющей в составе интегрирующее звено, достаточно использовать П-регулятор, настроенный на ОМ [3]:

$$W_{Р|внут}(p) = \beta_P \quad (9)$$

Настройка регулятора должна быть следующей:

$$\beta_{P|внут} = \frac{T_{Q|внут}}{2 \cdot T_{\mu|внут} \cdot \prod_{v=1}^n K_{v|внут}} \quad (10)$$

где $T_{Q|внут} = T_{ИМ}$ — большая постоянная времени;

$T_{\mu|внут} = \sum_{v=1}^n T_{v|внут} = T_{Эд}$ — сумма малых постоянных

времени, входящих во внутренний контур; $K_{v|внут}$ — произведение коэффициентов усиления звеньев, входящих во внутренний контур.

$$\beta_P = \frac{T_{ИМ}}{2 \cdot T_{Эд} \cdot K_{Эд} \cdot K_{Ред} \cdot K_{Д|пш}} \quad (11)$$

где $K_{Д|пш}$ — коэффициент передачи датчика положения штока.

С учетом — выражение запишем следующем образом:

$$\begin{aligned} W_{РАЗ|ВНУТР|КОР}(p) &= W_{Р|ВНУТ}(p) \cdot W_{ИМ}(p) = \\ &= \frac{T_{ИМ}}{2 \cdot T_{Эд} \cdot K_{Эд} \cdot K_{Ред} \cdot K_{Д|пш}} \cdot \frac{K_{Эд} \cdot K_{Ред}}{T_{ИМ} \cdot p \cdot (T_{Эд} \cdot p + 1)} = \\ &= \frac{1/K_{Д|пш}}{2 \cdot T_{Эд} \cdot p \cdot (T_{Эд} \cdot p + 1)} \end{aligned} \quad (12)$$

Выражение для замкнутого внутреннего контура будет:

$$\begin{aligned} W_{ЗАМ|ВНУТР}(p) &= \frac{W_{РАЗ|ВНУТР|КОР}(p)}{1 + W_{РАЗ|ВНУТР|КОР}(p) \cdot W_{Д|пш}(p)} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot T_{Эд} \cdot K_{Д|пш} \cdot p \cdot (T_{Эд} \cdot p + 1)} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{1}{2 \cdot T_{Эд} \cdot K_{Д|пш} \cdot p \cdot (T_{Эд} \cdot p + 1)} \cdot K_{Д|пш}} = \\ &= \frac{1}{K_{Д|пш} \cdot (2 \cdot T_{Эд} \cdot T_{Эд} \cdot p^2 + 2 \cdot T_{Эд} \cdot p + 1)} \end{aligned} \quad (13)$$

где $W_{Д|пш}(p) = \frac{I_{ИЗМ|пш}(p)}{I_{ПВ}(p)} = K_{Д|пш}$ — передаточная

функция датчика положения штока.

Для синтеза внешнего контура регулирования в выражении пренебрегаем произведением малых постоянных времени и получаем эквивалентную пере-

даточную функцию апериодического звена первого порядка.

$$W_{ЗАМ1}(p) = \frac{1/K_{X1}}{T_{Э1} \cdot p + 1} = \frac{1/K_{Д|ПШ}}{2 \cdot T_{ЭД} \cdot p + 1} \quad (14)$$

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

Запишем выражение неизменяемой части для разомкнутого внешнего контура:

$$W_{РАЗ|ВНЕШ}(p) = W_{ЗАМ1}(p) \cdot W_{РО}(p) \cdot W_{ОУ|У}(p) = \frac{1/K_{Д|ПШ}}{T_{Э1} \cdot p + 1} \cdot K_{РО} \cdot \frac{K_{ОУ|У} \cdot e^{-\frac{T_3}{T_1} p}}{T_{ОУ} \cdot p} \quad (15)$$

Обычно постоянные времени распределяются следующим образом:

$$T_1 \ll (T_2 \approx T_3) \quad (16)$$

Учитывая наличие интегрирующего звена с большой постоянной времени, достаточно использовать П-регулятор, настроенный на ОМ и компенсирующий постоянную времени интегрирующего звена [16].

$$W_{Р|ВНЕШ}(p) = \beta_P \quad (17)$$

Настройки регулятора должны быть следующими:

$$\beta_P = \frac{T_{ОУ|ВНЕШ}}{2 \cdot T_{\mu|ВНЕШ} \cdot \prod_{v=1}^n K_{v|ВНЕШ}} \quad (18)$$

где $T_{ОУ|ВНЕШ} = T_{ОУ}$ — большая постоянная времени; $T_{\mu|ВНЕШ} = \sum_{v=1}^n T_v = T_{Э1} + \tau_{1y}$ — сумма малых постоянных

времени, входящих во внешний контур; $K_{v|ВНЕШ}$ — произведение коэффициентов усиления звеньев, входящих во внешний контур.

$$\beta_{Р|ВНЕШ} = \frac{T_{ОУ}}{2 \cdot (T_{Э1} + \tau_{1y}) \cdot \frac{1}{K_{Д|ПШ}} \cdot K_{РО} \cdot K_{ОУ|У} \cdot K_{ДУ}} \quad (19)$$

С учетом передаточную функцию разомкнутого внешнего контура запишем следующим образом

$$W_{РАЗ|ВНЕШ}(p) = W_{Р|ВНЕШ}(p) \cdot W_{ЗАМ1}(p) \cdot W_{РО}(p) \cdot W_{ОУ|У}(p) = \frac{T_{ОУ}}{2 \cdot (T_{Э1} + \tau_{1y}) \cdot \frac{1}{K_{Д|ПШ}} \cdot K_{РО} \cdot K_{ОУ|У} \cdot K_{ДУ}} \cdot \frac{1/K_{Д|ПШ}}{T_{Э1} \cdot p + 1} \cdot K_{РО} \cdot \frac{K_{ОУ|У} \cdot e^{-\tau_{1y} p}}{T_{ОУ} \cdot p} = \frac{e^{-\tau_{1y} p}}{2 \cdot (T_{Э1} + \tau_{1y}) \cdot K_{ДУ} \cdot p \cdot (T_{Э1} \cdot p + 1)} \quad (20)$$

Выполним имитационное моделирование [17]–[21] системы регулирования уровня воды в барабане

котла. Результаты моделирования работы внутреннего контура при ступенчатом управляющем воздействии (10% → 50%) показаны на рис. 6 а.

Из графика видно, что переходный процесс практически не имеет перерегулирования (меньше 5%) и длится 57 секунд.

График моделирования переходного процесса всей системы при изменении управляющего воздействия (20мм → 30мм) показан на рис. 6 б, из которого видно, что перерегулирование составило менее 5% (характерно для настроек на ОМ), время переходного процесса — около 340 секунд.

График моделирования переходного процесса всей системы при ступенчатом возмущающем воздействии (0 → 1 т/ч) показан на рис. 6 в. Отклонение не превысило 0,5%, однако имеется статическая ошибка 0,4%. Наличие статической ошибки обусловлено интегрирующим звеном в передаточной функции объекта управления $W_{ОУ|У}(p)$ по возмущающему воздействию, что привело к линейно-растущему виду входного сигнала в контуре системы.

Для получения переходного процесса по возмущающему воздействию без статической ошибки воспользуемся ПИ-регулятором с настройкой на СО [16].

$$W_{Р|ВНЕШ}(p) = \beta_{Р|ВНЕШ} \cdot \frac{\tau_{Р|ВНЕШ} \cdot p + 1}{\tau_{Р|ВНЕШ} \cdot p} \quad (21)$$

$$\beta_{Р|ВНЕШ} = \frac{T_{ОУ|ВНЕШ}}{2 \cdot T_{\mu|ВНЕШ} \cdot \prod_{v=1}^n K_{v|ВНЕШ}} = \frac{T_{ОУ}}{2 \cdot (T_1 + T_3) \cdot \frac{1}{K_{Д|ПШ}} \cdot K_{РО} \cdot K_{ОУ|У} \cdot K_{ДУ} \cdot \tau_P = 4 \cdot T_{\mu} = 4 \cdot (2 \cdot T_{ЭД} + \tau_{ОУ})} \quad (22)$$

Результаты моделирования работы всей системы при использовании ПИ-регулятора с настройками на СО показаны на рис. 6 г, д.

График переходного процесса по управляющему воздействию имеет перерегулирование 16%, время переходного процесса увеличилось до 980 секунды.

График переходного процесса по возмущающему воздействию имеет примерно одинаковое отклонение с настройкой на ОМ 0,5%, но при этом отсутствует статическая ошибка.

Выводы

В ходе работы показан пример синтеза системы, имеющей в своем составе два интегрирующих звена.

При синтезе системы автоматического регулирования был понижен порядок исходной системы путем применения подчиненной (каскадной) структуры регулирования. Продемонстрирован пример настройки такой структуры, обоснован выбор регуляторов.

Отмечено, что для системы регулирования уровня воды необходим астатизм второго порядка по возмущающему воздействию, в противном случае будет наблюдаться статическая ошибка.

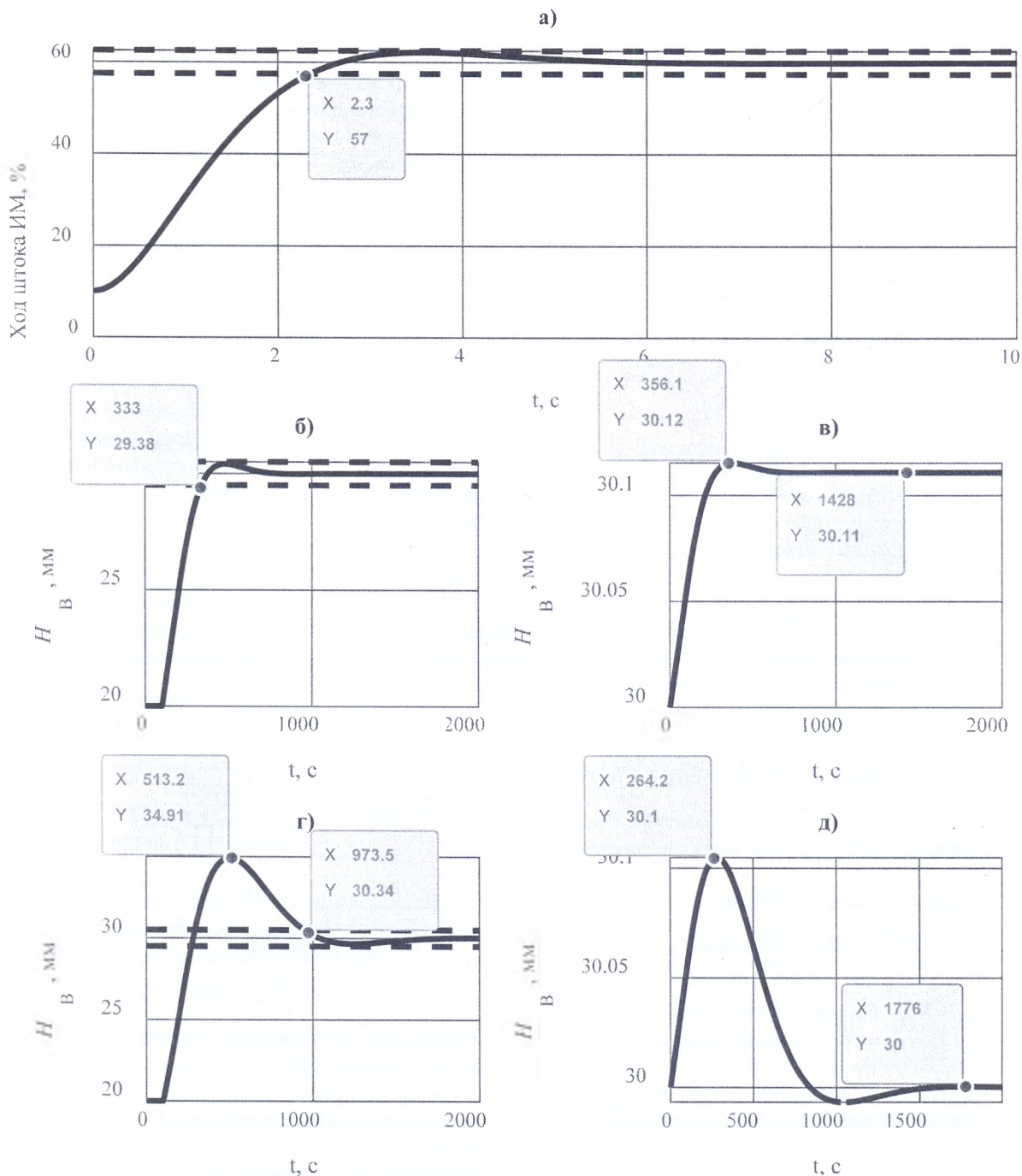


Рис. 6. Результат моделирования двухконтурной системы регулирования уровня воды

Список литературы

- Суриков В. Н., Горобченко С. Л., Ковалев Д. А. Повышение эффективности применения регуливающей арматуры в современных системах управления технологическими процессами // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2020. № 4. С. 105–111. DOI 10.46418/2079-8199_2020_4_18.
- Ковалёв Д. А., Суриков В. Н., Меркурьева К. В. Управление параметрами теплоносителя центрального теплового пункта для повышения эффективности его работы: материалы ежегодной III Международной научно-практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика, экология и бизнес». В 3-х

- частях, Санкт-Петербург, 31 мая 2019 года / Под общ. ред. Т. Ю. Коротковой. Санкт-Петербург: Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, 2019. С. 15–17.
- 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 ред. А. И. Вострецова. Прага, Чехия: Научно-издательский центр «Мир науки», 2018. С. 68–71.
- Бобух А. А., Ковалёв Д. А. Повышение энергосбережения закрытого централизованного теплоснабжения города при реконструкции центрального и модернизации ин-

- дивидуального 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. 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. Ковалёв 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: учеб. для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2016.
 13. Ковалёв Д. А., Шаряков В. А., Шарякова О. Л. Теория автоматического управления: учеб. пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019. 80 с.
 14. Суриков В. Н., Буйлов Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию/ ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017. 116 с.
 15. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 392 с.
 16. Фрер Ф., Ортенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования / Пер. с нем. М.: Энергия, 1973. 192 с.
 17. Об автоматической стабилизации напряжения контактной сети электрического подвижного состава / Т. П. Сацук, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова [и 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, EIConRus 2021. Moscow, 26–28 января 2021 года. М., 2021. pp. 517–521. DOI 10.1109/EIConRus51938.2021.9396250.
 19. Automatic Voltage Stabilization of an Electric Rolling Stock Catenary System / T. P. Satsuk, V. A. Sharyakov, A. A. Vorob'ev [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. Erratum to: automatic voltage stabilization of an electric rolling stock catenary system // Russian electrical engineering. 2021. 92, 4. pp. 213–216. DOI 10.3103/s1068371221040052; T. P. Satsyuk, V. A. Sharyakov, A. A. Vorob'ev [et al.] // Russian Electrical Engineering. 2021. Vol. 92. No 6. p. 349. DOI 10.3103/S1068371221040052.

D. A. Kovalev¹, V. A. Sharyakov¹, O. L. Sharyakova², V. A. Lebedeva³

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

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

³ LLC «Scientific and Production Enterprise «EPRO»
195253 Russia, Saint-Petersburg, Saltykovskaya road, 18, Litera M

SYNTHESIS OF A TWO-CIRCUIT AUTOMATIC WATER LEVEL CONTROL SYSTEM FOR A STEAM BOILER

When synthesizing automatic control systems, there is a problem with complex determination of the regulator parameters, and the main criterion becomes the achievement of stable operation, and the quality of the transient becomes of secondary importance. Such problems can arise in the presence of two or more integrating links in the initial system whose time constants are almost the same or of the same order. The correct synthesis of such systems is possible by using the structure of slave control that enables to replace the loop with an integrating link by an equivalent aperiodic link of the first order. The paper demonstrates the principle of building a slave control structure and the synthesis of such a system by the example of an automatic water level control system.

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

References

1. Surikov V. N., Gorobchenko S. L., Kovalev D. A. Improving the efficiency of the use of control valves in modern process control systems // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical sciences. 2020. No. 4. pp. 105–111. DOI 10.46418/2079-8199_2020_4_18 (in Rus.).
2. Kovalev D. A., Surikov N. N., Merkur'yeva K. V. Control of the parameters of the coolant of the central heating point to increase the efficiency of its work: materials for the III annual scientific and practical International Conference of students and teachers «Energy, ecology and business». In 3 parts, St. Petersburg, May 31, 2019 / Under the general editorship of T. Y. Korotkova. Saint Petersburg: Higher School of Technology and Energy of SPbGUPTD, 2019. pp. 15–17 (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 (in Rus.).
4. Bobukh A. A., Kovalev D. A. Increasing energy saving of the closed centralized heat supply of the city during the reconstruction 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 (in Rus.).
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. 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 productions in heat power engineering: textbook. for universities. M.: Publishing House of MEI, 2016 (in Rus.).
13. Kovalev D. A., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L. Theory of automatic control: manual / HSE SPbGUPTD. (in Rus.). SPb., 2019. 80 p. (in Rus.).
14. Surikov V. N., Buylov G. P. Automation of technological processes and productions: an educational and methodical manual on course design/ HSE SPbGUPTD. SPb., 2017. 116 p. (in Rus.).
15. Basharin A. V., Novikov V. A., Sokolovsky G. G. Electric drive control: textbook. manual for universities. L.: Energoizdat. Leningr. otd-nie, 1982. 392 p. (in Rus.).
16. Frere F., Orthenburger F. Introduction to electronic control technology / Trans. from German M.: Energiya, 1973. 192 p. (in Rus.).
17. On automatic voltage stabilization of the contact network of electric rolling stock / T. P. Satsuk, V. A. Sharyakov, O. L. Sharyakova [et al.] // Electrical Engineering. 2021. No. 4. pp. 36–40 (in Rus.).
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, EIConRus 2021. Moscow, 26–28 Jan. 2021 года. M., 2021. pp. 517–521. DOI 10.1109/EIConRus51938.2021.9396250 (in Rus.).
19. Automatic Voltage Stabilization of an Electric Rolling Stock Catenary System / T. P. Satsuk, V. A. Sharyakov, A. A. Vorob'ev [et al.] // Russian Electrical Engineering. 2021. Vol. 92. No 4. pp. 213–216. DOI 10.3103/S1068371221300015 (in Rus.).
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 (in Rus.).
21. Erratum to: automatic voltage stabilization of an electric rolling stock catenary system // Russian electrical engineering. 2021. 92, 4. pp. 213–216. DOI 10.3103/s1068371221040052; T. P. Satsyuk, V. A. Sharyakov, A. A. Vorob'ev [et al.] // Russian Electrical Engineering. 2021. Vol. 92. No 6. p. 349. DOI 10.3103/S1068371221040052 (in Rus.).