

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК

Санкт-Петербургского
государственного университета
технологии и дизайна



Серия 1

Естественные
и технические науки

№ 1/2022

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.51: 621.18–5

DOI 10.46418/2079-8199_2022_1_19

А. Д. Ковалёв¹, В. А. Шаряков¹, О. Л. Шарякова²¹ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
191186 РФ, Санкт-Петербург, Большая Морская, 18² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
190005 РФ, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЭНЕРГОБЛОКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОБЩЕЙ НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

© Д. А. Ковалёв, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, 2022

Рассмотрены вопросы применения системы имитационного моделирования для исследования системы автоматического управления мощностью энергоблока с неравномерностью при изменении общей нагрузки энергосистемы для управления мощностью энергоблока и давлением пара. Для разработанных имитационных моделей приведены результаты моделирования, анализ которых дает возможность продемонстрировать корректную работу системы управления мощностью энергоблока и давлением пара.

Ключевые слова: система имитационного моделирования, объект управления, источник тепловой энергии, повышение эффективности эксплуатации, система автоматического управления, мощность энергоблока, регулирование давления перегретого пара, каскадная схема регулирования.

Для реальных объектов управления одной из актуальных задач является повышение эффективности их эксплуатации [1]–[8]. Для решения указанной задачи применяются различные подходы и методы, в частности широкое применение получили системы имитационного моделирования [9]–[13].

В системе имитационного моделирования возможно провести разработку систем управления, осуществить выбор параметров настройки регуляторов, исследовать различные режимы работы объекта управления и оценить динамические характеристики рабочих процессов.

Рассмотрим применение системы имитационного моделирования для источника тепловой энергии [14]–[16] с реализацией системы автоматического управления мощностью энергоблока с неравномерностью при изменении общей нагрузки энергосистемы для управления мощностью энергоблока и давлением пара (рис. 1).

Подчиненная система (каскадная схема) регулирования давления перегретого пара состоит из главного регулятора (РД) давления, на вход которого подается разность заданного $P_{\text{ППЗ}}$ и действительного $P_{\text{ПП}}$ значений давления, вспомогательного регулятора (РТ) расхода топлива G_T . Она воздействует на клапан подачи топлива или другого топливоподающего устройства. Введение вспомогательной переменной состояния — регулируемой величины G_T — позволяет ликвидировать влияние на основную регулируемую величину $P_{\text{ПП}}$ возмущений, идущих со стороны подачи топлива (например, самопроизвольного изменения

расхода топлива вследствие нестабильной работы топливоподающих устройств f_T) [17].

На алгоритмической схеме (рис. 2) приведены следующие передаточные функции: $W_{\text{РД}}(p)$ — главного регулятора (РД) давления перегретого пара; $W_{\text{РТ}}(p)$ — вспомогательного регулятора (РТ) расхода топлива; $W_{\text{ИМ}}(p)$ — исполнительного механизма; $W_{\text{РО}}(p)$ — регулирующего органа; $W_{\text{ОУ}}(p)$ — объекта управления; $W_{\text{ИД}|P_{\text{ПП}}}(p)$ — измерителя давления перегретого пара; $W_{\text{ИТ}}(p)$ — измерителя расхода топлива; $W_{\text{ЗД}}(p)$ — задатчика интенсивности.

Для определения передаточных функций будем считать, что построена аналоговая система, в которой данные передаются токовым сигналом 4...20 мА, тогда:

Передаточная функция измерителя давления перегретого пара

$$W_{\text{ИД}|P_{\text{ПП}}}(p) = K_{\text{ИД}|P_{\text{ПП}}} = \frac{I_{\text{ИД}|P_{\text{ПП}}}(p)}{P_{\text{ПП}}(p)} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 4} = 4 \left[\frac{\text{мА}}{\text{МПа}} \right] \quad (1)$$

где $I_{\text{ИД}|P_{\text{ПП}}}(p)$ — выходная величина измерителя давления перегретого пара (диапазон изменения выходной величины 4...20 мА); $P_{\text{ПП}}(p)$ — входная величина измерителя давления (диапазон изменения входной величины 0...4 МПа).

Передаточная функция измерителя расхода топлива

$$W_{\text{ИТ}|G_T}(p) = K_{\text{ИТ}|G_T} = \frac{I_{\text{ИТ}|G_T}(p)}{G_T(p)} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 4} = 4 \left[\frac{\text{мА}}{\text{т/ч}} \right] \quad (2)$$

где $I_{\text{ИТ}|G_T}(p)$ — выходная величина измерителя расхода топлива (диапазон изменения выходной величины

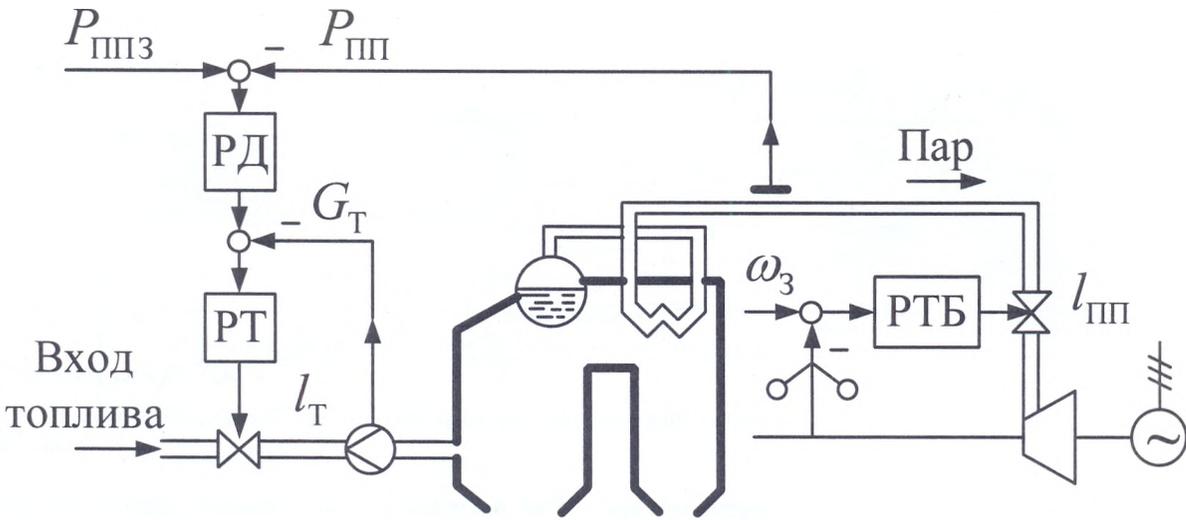


Рис. 1. Схема системы управления мощностью энергоблока и давлением пара

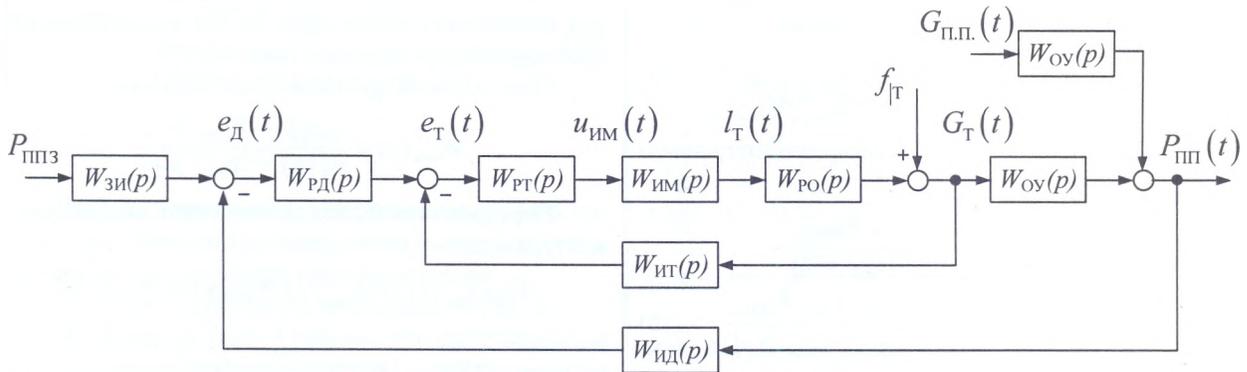


Рис. 2. Алгоритмическая схема подчиненной системы регулирования (каскадная схема регулирования) давления перегретого пара

4...20 мА); $G_T(p)$ — входная величина измерителя расхода топлива (диапазон изменения входной величины 0...4 т/ч).

Передаточная функция задатчика интенсивности

$$W_{ЗИ|P_{п.п.}}(p) = K_{ЗИ} = \frac{I_{3|P_{п.п.}}(p)}{P_{п.п.3}(p)} = \frac{4...20}{0...4} = 4 \left[\frac{\text{мА}}{\text{МПа}} \right] \quad (3)$$

где $I_{3|P_{п.п.}}(p)$ — заданная величина тока, пропорциональная заданному давлению перегретого пара (диапазон изменения заданной величины тока 4...20 мА); $P_{п.п.3}(p)$ — заданная величина давления перегретого пара (диапазон изменения заданной величины 0...4 МПа).

Передаточная функция регулирующего органа

$$W_{РО|G_T}(p) = K_{РО|G_T} = \frac{G_T(p)}{l_T(p)} = \frac{0...4}{0...100} = 0,04 \left[\frac{\text{т/ч}}{\%} \right] \quad (4)$$

где $l_T(p)$ — величина открытия регулирующего органа (диапазон изменения величины открытия «0%» (полностью закрыто) ... «100%» (полностью открыто)).

Передаточная функция исполнительного механизма

$$W_{ИМ}(p) = W_{ЭД}(p) \cdot W_{Ред}(p) = \frac{K_{ЭД}}{T_{ЭД} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{Ред}}{T_{ИМ} \cdot p} = \frac{K_{ЭД} \cdot K_{Ред}}{T_{ИМ} \cdot p \cdot (T_{ЭД} \cdot p + 1)} \quad (5)$$

где $K_{ЭД}$ — коэффициент передачи электродвигателя; $T_{ЭД}$ — постоянная времени электродвигателя; $K_{Ред}$ — коэффициент передачи редуктора; $T_{ИМ}$ — время полного хода выходного вала ИМ.

Передаточная функция разомкнутого внутреннего контура будет

$$W_{РАЗ|T}(p) = W_{РТ}(p) \cdot W_{ИМ}(p) \cdot W_{РО|G_T}(p) \cdot W_{И|G_T}(p) = W_{РТ}(p) \cdot \frac{K_{ЭД} \cdot K_{Ред} \cdot K_{РО|G_T} \cdot K_{И|G_T}}{T_{ИМ} \cdot p \cdot (T_{ЭД} \cdot p + 1)} \quad (6)$$

Внутренний контур, как правило, настраивают на максимальное быстродействие, которое обеспечивает настройка на ОМ [18], учитывая наличие в контуре интегрирующего звена достаточно будет использовать П-регулятор

$$W_P(p) = \beta \quad (7)$$

$$\beta_P = \frac{T_0}{2 \cdot T_{\mu} \cdot \prod_i K_i} \quad (8)$$

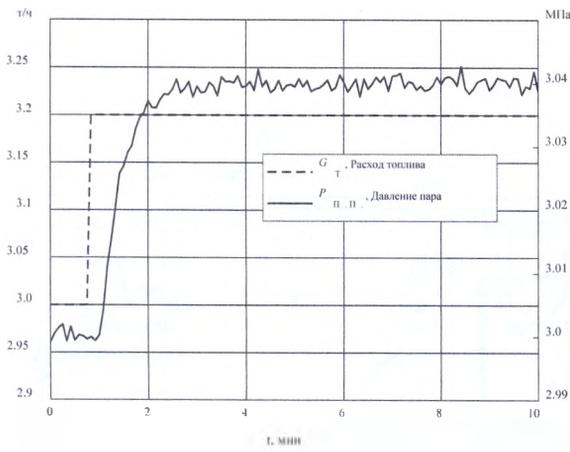


Рис. 3. График изменения давления перегретого пара при изменении подачи топлива

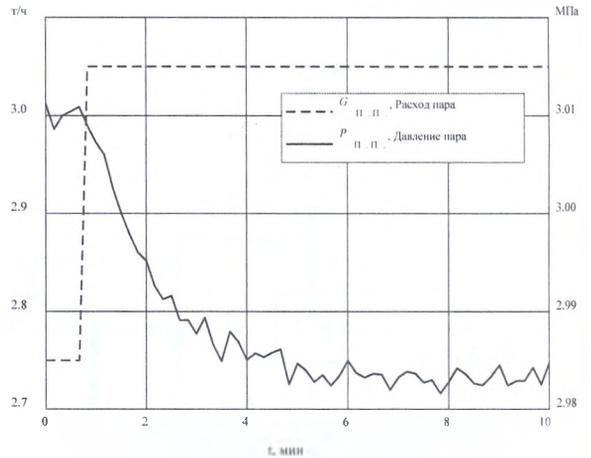


Рис. 4. График изменения давления перегретого пара при изменении расхода пара

где $T_{\mu} = T_{\text{Эд}}$ — минимальная постоянная времени; $T_0 = T_{\text{Им}}$ — большая постоянная времени.

$$\beta_{p|T} = \frac{T_{\text{Им}}}{2 \cdot T_{\text{Эд}} \cdot K_{\text{Эд}} \cdot K_{\text{Ред}} \cdot K_{\text{РО|G}_T} \cdot K_{\text{И|G}_T}} \quad (9)$$

С учетом выражение для разомкнутого внутреннего контура запишем

$$W_{\text{РАЗ|T}}(p) = W_{p|T}(p) \cdot \frac{K_{\text{Эд}} \cdot K_{\text{Ред}} \cdot K_{\text{РО|G}_T}}{T_{\text{Им}} \cdot p \cdot (T_{\text{Эд}} \cdot p + 1)} = \frac{T_{\text{Им}}}{2 \cdot T_{\text{Эд}} \cdot K_{\text{Эд}} \cdot K_{\text{Ред}} \cdot K_{\text{РО|G}_T} \cdot K_{\text{И|G}_T}} \cdot \frac{K_{\text{Эд}} \cdot K_{\text{Ред}} \cdot K_{\text{РО|G}_T}}{T_{\text{Им}} \cdot p \cdot (T_{\text{Эд}} \cdot p + 1)} = \frac{1}{2 \cdot T_{\text{Эд}} \cdot K_{\text{И|G}_T} \cdot p \cdot (T_{\text{Эд}} \cdot p + 1)} \quad (10)$$

Выражение для замкнутого внутреннего контура получим

$$W_{\text{ЗАМ|T}}(p) = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot T_{\text{Эд}} \cdot K_{\text{И|G}_T} \cdot p \cdot (T_{\text{Эд}} \cdot p + 1)}{2 \cdot T_{\text{Эд}} \cdot K_{\text{И|G}_T} \cdot p \cdot (T_{\text{Эд}} \cdot p + 1)} \cdot K_{\text{И|G}_T}} = \frac{1/K_{\text{И|G}_T}}{2 \cdot T_{\text{Эд}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\text{Эд}} \cdot p + 1} = \frac{1/K_{\text{И|G}_T}}{2 \cdot T_{\text{Эд}} \cdot p + 1} \quad (11)$$

Процесс образования пара заданного давления и включающий в себя процессы сгорания топлива и нагрева воды для превращения в пар при изменении величины подачи топлива имеет вид, показанный на рис. 3 [19].

По виду временной разгонной характеристики можно сказать, что переходная функция объекта управления обладает самовывравниванием и некоторым запаздыванием и имеет вид переходной функции апериодического звена первого порядка.

$$p_{\text{п.п.}}(t) = K_{\text{ОУ}} \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T_{\text{ОУ}}}} \right) \quad (12)$$

$$W_{\text{ОУ|Y}}(p) = \frac{p_{\text{п.п.}}(p)}{G_T(p)} = \frac{K_{\text{ОУ|Y}} \cdot e^{-\tau_{\text{Y}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|Y}} \cdot p + 1} \quad (13)$$

График изменения величины давления пара $p_{\text{п.п.}}(t)$ при изменении расхода пара $G_{\text{п.п.}}(t)$ также имеет вид апериодического процесса (рис. 4) [19].

Передаточная функция будет иметь вид

$$W_{\text{ОУ|Y}}(p) = \frac{p_{\text{п.п.}}(p)}{G_T(p)} = \frac{K_{\text{ОУ|Y}} \cdot e^{-\tau_{\text{Y}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|Y}} \cdot p + 1} \quad (14)$$

Передаточная функция внешнего разомкнутого контура будет:

$$W_{\text{РАЗ|P.п.}}(p) = W_{p|P.п.}(p) \cdot W_{\text{ЗАМ|T}}(p) \cdot W_{\text{ОУ|Y}}(p) = W_{p|P.п.}(p) \cdot \frac{1/K_{\text{И|G}_T}}{2 \cdot T_{\text{Эд}} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{\text{ОУ|Y}} \cdot e^{-\tau_{\text{Y}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|Y}} \cdot p + 1} \quad (15)$$

Для синтеза данной системы выбираем ПИ-регулятор с настройками на ОМ [18]

$$W_P(p) = \beta \cdot \frac{\tau_P \cdot p + 1}{\tau_P \cdot p} \quad (16)$$

$$\beta_P = \frac{T_0}{2 \cdot T_{\mu} \cdot \prod_i K_i}; \quad \tau_P = T_0 \quad (17)$$

где $T_{\mu} = T_{\text{Эд}} + \tau_{\text{Y}}$ — сумма минимальных постоянных времени; $T_0 = T_{\text{ОУ|Y}} \gg T_{\mu}$ — большая постоянная времени.

$$\beta_{p|P.п.} = \frac{T_{\text{ОУ|Y}}}{2 \cdot (T_{\text{Эд}} + \tau_{\text{Y}}) \cdot \frac{1/K_{\text{И|G}_T} \cdot K_{\text{ОУ|Y}} \cdot K_{\text{Ид|P.п.}}}{\tau_P = T_{\text{ОУ|Y}}}} \quad (18)$$

Тогда выражение можно записать как

$$W_{\text{РАЗ|P.п.}}(p) = W_{p|P.п.}(p) \cdot W_{\text{ЗАМ|T}}(p) \cdot W_{\text{ОУ|Y}}(p) = \frac{T_{\text{ОУ|Y}}}{2 \cdot (T_{\text{Эд}} + \tau_{\text{Y}}) \cdot \frac{1/K_{\text{И|G}_T} \cdot K_{\text{ОУ|Y}} \cdot K_{\text{Ид|P.п.}}}{T_{\text{ОУ|Y}} \cdot p}} \cdot \frac{1/K_{\text{И|G}_T} \cdot K_{\text{ОУ|Y}} \cdot e^{-\tau_{\text{Y}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|Y}} \cdot p + 1} = \frac{e^{-\tau_{\text{Y}} \cdot p}}{2 \cdot K_{\text{Ид|P.п.}} \cdot (T_{\text{Эд}} + \tau_{\text{Y}}) \cdot p \cdot (2 \cdot T_{\text{Эд}} \cdot p + 1)} \quad (19)$$

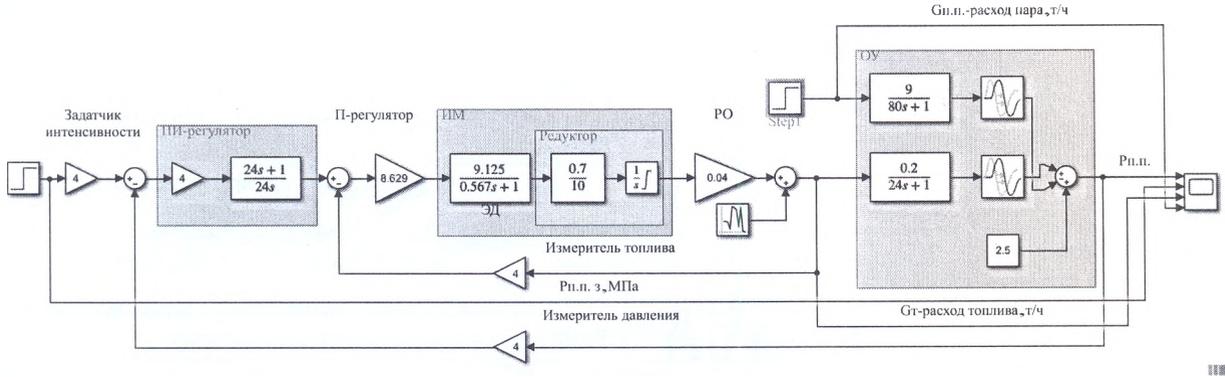


Рис. 5. Имитационная модель системы подчиненного регулирования (каскадная схема регулирования) давления перегретого пара

Выражение для замкнутого внешнего контура получим

$$W_{замп.рп.п.}(p) = \frac{e^{-\tau_{\gamma} \cdot p}}{1 + \frac{2 \cdot K_{ид} \rho_{п.п.} \cdot (T_{Эд} + \tau_{\gamma}) \cdot p \cdot (2 \cdot T_{Эд} \cdot p + 1)}{e^{-\tau_{\gamma} \cdot p}} \cdot K_{ид} \rho_{п.п.}} = \frac{K_{ид} \rho_{п.п.}}{e^{-\tau_{\gamma} \cdot p} + 2 \cdot p \cdot (T_{Эд} + \tau_{\gamma}) \cdot (2 \cdot T_{Эд} \cdot p + 1)}$$

На рис. 5 приведена имитационная модель системы подчиненного регулирования (каскадная схема регулирования) давления перегретого пара.

Результат моделирования показан на рис. 6.

Из графиков (рис. 6) видно, что регулирование происходит с перерегулированием, не превышающим 4%, что соответствует настройкам на ОМ. Изменения в подаче топлива и в расходе перегретого пара скампенсировано работой регуляторов и практически никак не отразилось на регулируемой величине.

Управление мощностью энергоблока в схеме (рис. 1) выполняет регулятор турбины РТБ. При номинальном значении частоты в энергосистеме он поддерживает постоянное, установленное с помощью синхронизатора положение клапана и, следовательно, постоянную мощность энергоблока. При отклонении частоты в энергосистеме от номинала происходит соответствующее перемещение $l_{пп}$, l_T клапанов, что приводит к изменению подвода пара к турбине, а следовательно, и к изменению ее мощности (рис. 7). Таким образом энергоблок участвует в регулировании частоты энергосистемы, но только при условии, что общее регулирование частоты всеми электростанциями си-

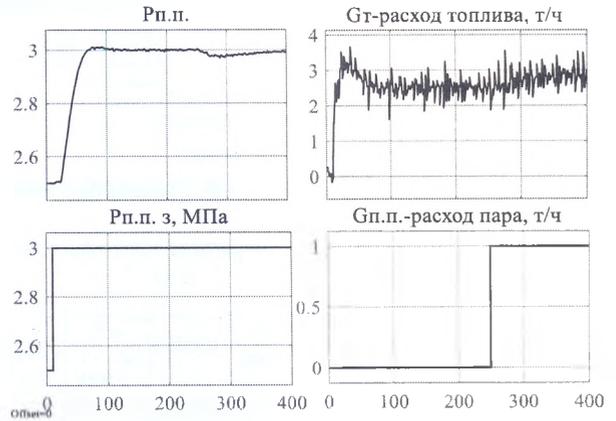


Рис. 6. Результат моделирования модели системы подчиненного регулирования (каскадная схема регулирования) давления перегретого пара

стемы происходит с неравномерностью (т. е. частота не поддерживается строго на постоянном уровне, а несколько меняется при изменении общей нагрузки энергосистемы). Если же частота возвратится к номинальному значению, к прежнему уровню возвратится и генерируемая энергоблоком мощность (хотя общая нагрузка энергосистемы может и измениться — необходимое в этом случае изменение генерируемой мощности должны взять на себя другие энергоблоки).

На алгоритмической схеме рис. 7 приведены передаточные функции:

- $W_{РТБ}(p)$ – регулятор (РТБ) частоты вращения ротора турбины;
- $W_{ИМ}(p)$ — исполнительного механизма;

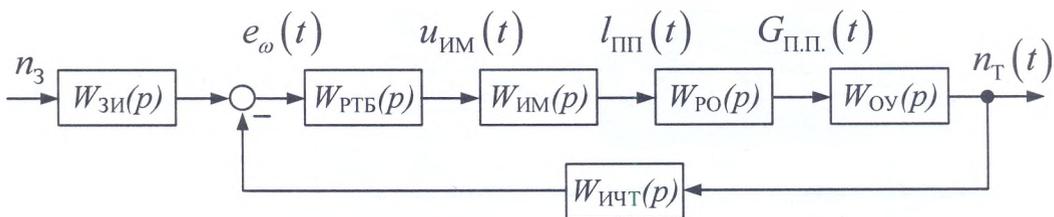


Рис. 7. Алгоритмическая схема управления мощностью энергоблока с неравномерностью при изменении общей нагрузки энергосистемы

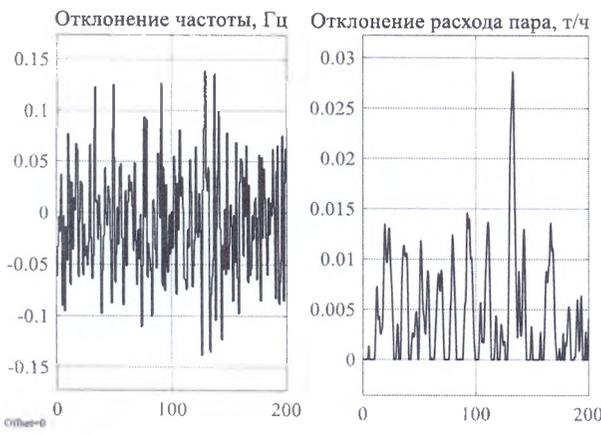


Рис. 8. Результат моделирования системы управления мощностью энергоблока с неравномерностью при изменении общей нагрузки энергосистемы

- $W_{PO}(p)$ — регулирующего органа;
- $W_{OY}(p)$ — объекта управления;
- $W_{ИЧТБ}(p)$ — измеритель частоты вращения ротора турбины.

Передаточная функция измерителя частоты вращения ротора турбины

$$W_{ИЧТБ}(p) = K_{ИЧТБ} = \frac{I_{ИЧТБ}(p)}{n_{ИЧТБ}(p)} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 3000} = 0,0053 \left[\frac{\text{мА}}{\text{об/мин}} \right] \quad (21)$$

где $I_{ИЧТБ}(p)$ — выходная величина измерителя частоты вращения ротора турбины (диапазон изменения выходной величины 4...20 мА); $n_{ИЧТБ}(p)$ — входная величина измерителя частоты вращения ротора турбины (диапазон изменения входной величины 0...3000 об/мин).

Передаточная функция задатчика интенсивности

$$W_{ИЧТБ}(p) = K_{ИЧТБ} = \frac{I_{эчтб}(p)}{n_{эчтб}(p)} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 3000} = 0,0053 \left[\frac{\text{мА}}{\text{об/мин}} \right] \quad (22)$$

где $I_{эчтб}(p)$ — заданная величина тока, пропорциональная заданной частоте вращения ротора турбины (диапазон изменения заданной величины тока 4...20 мА); $n_{эчтб}(p)$ — заданная величина частот вращения ротора турбины (диапазон изменения заданной величины 0...3000 об/мин).

Передаточная функция регулирующего органа

$$W_{PO}(p) = K_{PO} = \frac{G_{пп}(p)}{I_{пп}(p)} = \frac{0 \dots 75}{0 \dots 100} = 0,75 \left[\frac{\text{т/ч}}{\%} \right] \quad (23)$$

где $I_{пп}(p)$ — величина открытия регулирующего органа (диапазон изменения величины открытия 0 (полностью закрыто) ... 100% (полностью открыто)).

Передаточная функция исполнительного механизма

$$W_{ИМ}(p) = W_{ЭД}(p) \cdot W_{ред}(p) = \frac{K_{ЭД}}{T_{ЭД} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{ред}}{T_{ИМ} \cdot p} = \frac{K_{ЭД} \cdot K_{ред}}{T_{ИМ} \cdot p \cdot (T_{ЭД} \cdot p + 1)} \quad (24)$$

Паровая турбина может быть представлена аperiодическим звеном первого порядка

$$W_{ОУЧТБ}(p) = \frac{K_{ОУЧТБ}}{T_{ОУЧТБ} \cdot p + 1} \quad (25)$$

Передаточная функция разомкнутого контура будет

$$W_{РАЗЧТБ}(p) = W_{ред}(p) \cdot W_{ИМ}(p) \cdot W_{PO}(p) \cdot W_{ОУЧТБ}(p) \cdot W_{ИЧТБ}(p) = W_{ред}(p) \cdot \frac{K_{ред}}{T_{ИМ} \cdot p} \cdot \frac{K_{ЭД}}{T_{ЭД} \cdot p + 1} \cdot K_{PO} \cdot \frac{K_{ОУЧТБ}}{T_{ОУЧТБ} \cdot p + 1} \cdot K_{ИЧТБ} \quad (26)$$

Для обеспечения максимального быстродействия выберем настройки на ОМ, учитывая наличие в контуре интегрирующего звена достаточно будет использовать П-регулятор

$$W_p(p) = \beta \quad (27)$$

$$\beta_p = \frac{T_O}{2 \cdot T_{\Sigma \mu} \cdot \prod_i^n K_i} \quad (28)$$

где $T_{\Sigma \mu} = T_{ЭД} + T_{ОУЧТБ}$ суммарная, минимальная постоянная времени; $T_O = T_{ИМ}$ — большая постоянная времени.

$$\beta_{ред} = \frac{T_{ИМ}}{2 \cdot T_{\Sigma \mu} \cdot K_{ЭД} \cdot K_{ред} \cdot K_{PO} \cdot K_{ОУЧТБ} \cdot K_{ИЧТБ}} \quad (29)$$

С учетом выражение для разомкнутого контура запишем

$$W_{РАЗЧТБ}(p) = W_{ред}(p) \cdot \frac{K_{ред}}{T_{ИМ} \cdot p} \cdot \frac{K_{ЭД}}{T_{ЭД} \cdot p + 1} \cdot K_{PO} \cdot \frac{K_{ОУЧТБ}}{T_{ОУЧТБ} \cdot p + 1} = \frac{T_{ИМ}}{2 \cdot T_{\Sigma \mu} \cdot K_{ЭД} \cdot K_{ред} \cdot K_{PO} \cdot K_{ОУЧТБ} \cdot K_{ИЧТБ}} \cdot \frac{K_{ред}}{T_{ИМ} \cdot p} \cdot \frac{K_{ЭД}}{T_{ЭД} \cdot p + 1} \cdot K_{PO} \cdot \frac{K_{ОУЧТБ}}{T_{ОУЧТБ} \cdot p + 1} \cdot K_{ИЧТБ} = \frac{1}{2 \cdot T_{\Sigma \mu} \cdot K_{ИЧТБ} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{ЭД} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{T_{ОУЧТБ} \cdot p + 1} \quad (30)$$

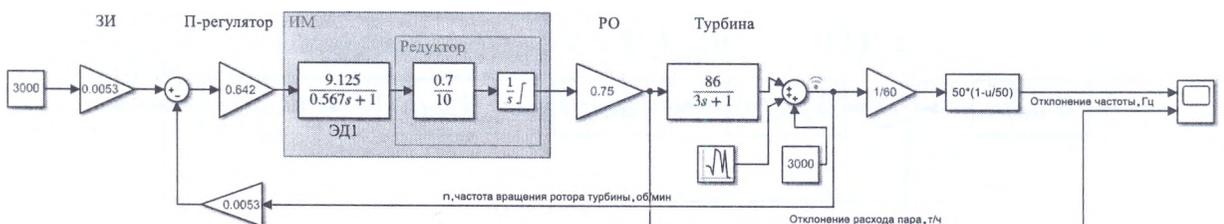


Рис. 9. Имитационная модель управления мощностью энергоблока с неравномерностью при изменении общей нагрузки энергосистемы

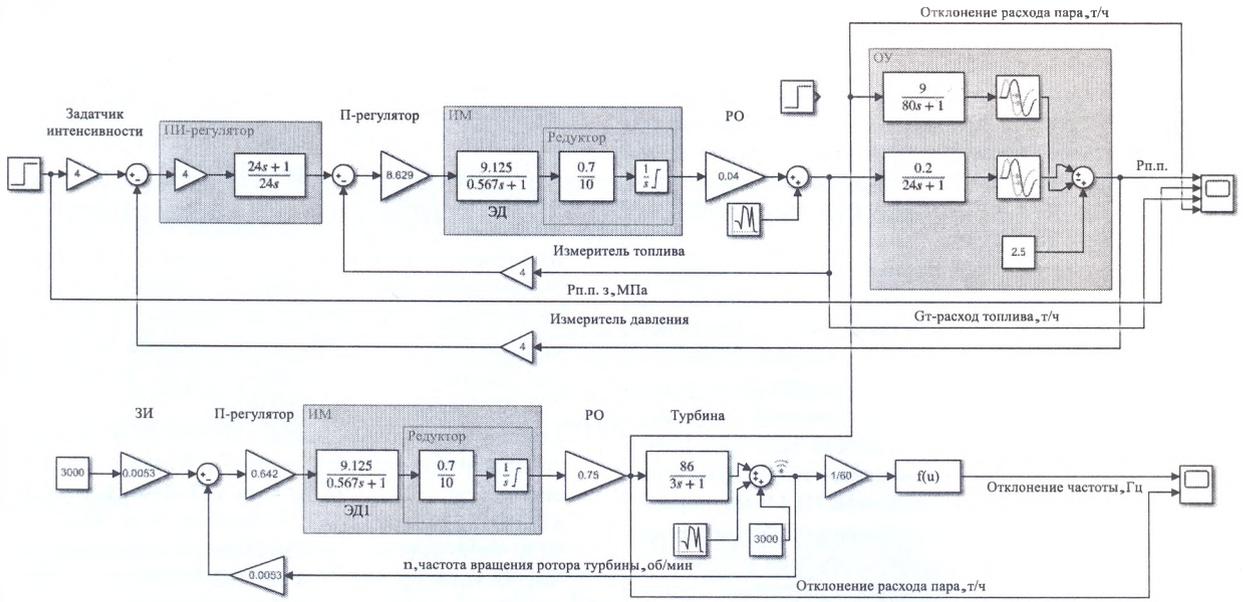


Рис. 10. Имитационная модель системы управления мощностью энергоблока и давлением пара

Выражение для замкнутого внутреннего контура получим

$$W_{\text{замп}}(p) = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot T_{\Sigma \mu} \cdot K_{\text{ИЧТБ}} \cdot p}{T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{T_{\text{ОУЧТБ}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{K_{\text{ИЧТБ}}}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\Sigma \mu} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{\text{ЭД}} \cdot T_{\text{ОУЧТБ}} \cdot p^2 + (T_{\text{ЭД}} + T_{\text{ОУЧТБ}}) \cdot p + 1} \quad (31)$$

Частота сети связана с частотой оборотов турбины следующим соотношением

$$f_c = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{n}{60} \quad (32)$$

Результат моделирования показан на рис. 8. На рис. 9 приведена имитационная модель системы подчиненного регулирования (каскадная схема регулирования) давления перегретого пара.

На рис. 10 приведена имитационная модель системы управления мощностью энергоблока и давлением пара. Результаты моделирования показаны на рис. 11.

Имитационная модель рис. 10 получена объединением моделей рис. 5 и рис. 9. Объединение выполнено по каналу отклонения расхода перегретого пара.

Отметим, что для тепловых электростанций снижение частоты ниже 49,00 Гц недопустимо по режиму работы котлов, имеющих питательные электронасосы. При длительном, более 1 мин, снижении частоты ниже 48,00 Гц возникает угроза срыва режимов питательных насосов и остановка энергоблоков от технологических защит. Работа на пониженной частоте может приводить к разрушению лопаточного аппарата паровых турбин.

В нормальных режимах ЕЭС частота нормируется в диапазонах [20]–[21]:

– 50,00±0,05 Гц — нормальное значение (для длительных отклонений);

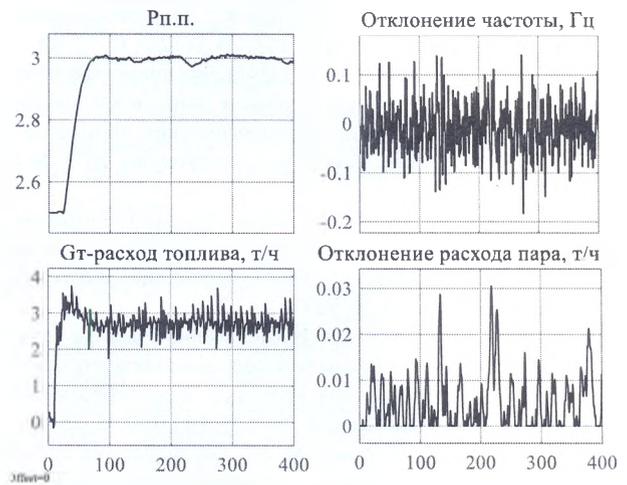


Рис. 11. Результаты моделирования системы управления мощностью энергоблока и давлением пара

– для отклонений длительностью не более 15 мин: 50,00±0,20 Гц.

– нормы отклонения частоты [20], которые составляют для двадцатисекундных средних значений:

- 0,20 Гц — нормально допустимое значение отклонения частоты;
- 0,40 Гц — предельно допустимое значение отклонения частоты, причем допустимое время работы энергосистемы с отклонением частоты в диапазоне от 0,20 до 0,40 Гц не должно превышать 72 мин в сутки.

Приведенные результаты моделирования продемонстрировали корректную работу системы управления мощностью энергоблока и давлением пара. Для разработанной имитационной модели представляется целесообразным реализовать различные режимы работы объекта управления.

Список литературы

1. Суриков В. Н., Горобченко С. Л., Ковалев Д. А. Повышение эффективности применения регулирующей 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.
2. 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.
3. 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/ Под общ. ред. Т. Ю. Коротковой. Санкт-Петербург: Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, 2019. С. 15–17.
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. 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.
6. Ковалев Д. А., Бобух А. А. Автоматизация технологических процессов систем солнечных коллекторов и кондиционирования воздуха // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2013. № 7 (113). С. 2–6.
7. 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.
8. Ковалев Д. А., Петряев М. Ю. Исследование систем управления Центрального теплового пункта // Решение. 2018. Т. 1. С. 148–149.
9. 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.
10. Makarova A. A., Mantorova I. V., Kovalev D. A., Kutovoy I. N. The Modeling of Mineral Water Fields Data Structure: Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering «ElConRus 2021». Moscow, 26–28.01.21. pp. 517–521. DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396250.
11. Automatic Voltage Stabilization of an Electric Rolling Stock Catenary System / Т. 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.
12. Ilyushin A. N., Kovalev D. A., Afanasev P. M. Development of Information Measuring Complex of Distributed Pulse Control System // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. «FarEastCon 2019». Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. pp. 8934173. DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934173.
13. Erratum to: automatic voltage stabilization of an electric rolling stock catenary system //Russian electrical engineering. 2021. V. 92. № 4. pp. 213–216. DOI 10.3103/s1068371221040052) / Т. P. Satsyuk, V. A. Sharyakov, A. A. Vorob'ev et al. // Russian Electrical Engineering. 2021. Vol. 92. No 6. pp. 349. DOI 10.3103/S1068371221040052.
14. Ковалёв Д. А. Повышение эффективности эксплуатации источника тепловой энергии // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2010. № 11 (81). С. 48–54.
15. 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.
16. Ковалев Д. А. Повышение эффективности системы автоматического регулирования парового котла ДКВР 10/13: Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции «Перспективы развития науки в современном мире». Прага, Чехия, 24 марта 2018 года / под общей редакцией А. И. Вострещова. Прага, Чехия: Научно-издательский центр «Мир науки», 2018. С. 68–71.
17. Ротач В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат. 1985. 296 с.
18. Ковалев Д. А., Шаряков В. А., Шарякова О. Л. Теория автоматического управления: учеб. пособие. Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. 79 с.
19. Суриков В. Н., Буйлов Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию/ ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017. 116 с.
20. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ № 4799 с изменениями от 13 февраля 2019 года
21. СТО 59012820.29.240.007–2008 Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем.

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

¹ St. Petersburg State University of Technologies and Design
198095 Russia, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 18

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

MODELING OF THE SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF POWER UNIT CAPACITY WITH NON-UNIFORMITY UNDER CHANGES IN THE TOTAL LOAD OF THE POWER SYSTEM

The questions of application of simulation modeling system for the study of automatic control system of power unit capacity with non-uniformity at change of general load of power system for control of power unit capacity and steam pressure are considered. For the developed simulation models the results of simulation are given, the analysis of which makes it possible to demonstrate the correct operation of the power unit capacity and steam pressure control system.

Keywords: simulation modeling system, control object, heat source, increase of operation efficiency, automatic control system, power unit capacity, superheated steam pressure control, 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. 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.).
3. Kovalev D. A., Surikov V. N., Merkuryeva K. V. Control of the parameters of the coolant of the Central heating point to increase the efficiency of its work: Materials of the annual III International scientific and practical conference of students and teachers «Energy, ecology and business». In 3 parts/ ed. T. Y. Korotkova. Saint Petersburg: Higher School of Technology and Energy of SPbGUPTD, 2019. pp. 15–17 (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. 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.).
6. 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.).
7. 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.).
8. Kovalev D. A., Petryaev M. Yu. Research of control systems of the Central heating point // *Decision.* 2018. Vol. 1. pp. 148–149 (in Rus.).
9. 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.).
10. Makarova A. A., Mantorova I. V., Kovalev D. A., Kutovoy I. N. The Modeling of Mineral Water Fields Data Structure: Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering «EIConRus 2021». Moscow, 26–28.01.21. pp. 517–521. DOI 10.1109/EIConRus51938.2021.9396250.
11. 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 (in Rus.).
12. Ilyushin A. N., Kovalev D. A., Afanasev P. M. Development of Information Measuring Complex of Distributed Pulse Control System // *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies «FarEastCon 2019».* Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. pp. 8934173. DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934173 (in Rus.).
13. Erratum to: automatic voltage stabilization of an electric rolling stock catenary system//*Russian electrical engineering.* 2021. V. 92. № 4. pp. 213–216. DOI 10.3103/s1068371221040052) / T. P. Satsuk, V. A. Sharyakov, A. A. Vorob'ev et al. // *Russian Electrical Engineering.* 2021. Vol. 92. No 6. pp. 349. DOI 10.3103/S1068371221040052 (in Rus.).
14. Kovalev D. A. Improving the efficiency of operation of a thermal energy source // *Energysaving. Energy. Energy audit.* 2010. No. 11 (81). pp. 48–54 (in Rus.).
15. 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.).
16. Kovalev D. A. Improving the efficiency of the automatic control system of the steam boiler DCVR 10/13: Materials of the International (correspondence) scientific and practical conference Prospects for the development of science in the modern world, Prague, Czech Republic, March 24, 2018 / ed. A. I. Vostretsov. Prague, Czech Republic: Scientific and Publishing Center «World of Science», 2018. pp. 68–71
17. Rotach V. Ya. Theory of automatic control of thermal power processes: textbook. for universities. M.: Energoatomizdat. 1985. 296 p. (in Rus.).
18. Kovalev D. A., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L. Theory of automatic control: textbook. SPb.: St. Petersburg Higher School of Technology and Energy of SPbGUTD, 2020. 79 p. (in Rus.).
19. 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.).
20. Rules of technical operation of power plants and networks of the Russian Federation No. 4799 as amended on February 13, 2019 (in Rus.).
21. STO 59012820.29.240.007–2008 Rules for preventing the development and elimination of violations of the normal mode of the electrical part of power systems (in Rus.).