

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ  
ПРОЦЕССОВ ТРЕХИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПИТАНИЯ  
ВОДОЙ ПАРОГЕНЕРАТОРА НА СБРОС НАГРУЗКИ**

Докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т.<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. КУЛАКОВ А. Т.<sup>1)</sup>, асп. КУХОРЕНКО А. Н.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Белорусский национальный технический университет,*

<sup>2)</sup> *Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь*

E-mail: ANK-17@yandex.ru

**MATHEMATICAL MODEL OF TRANSIENT PROCESSES  
PERTAINING TO THREE-IMPULSE SYSTEM  
FOR AUTOMATIC CONTROL OF STEAM GENERATOR  
WATER SUPPLY ON LOAD RELIEF**

**KULAKOV G. T.<sup>1)</sup>, KULAKOV A. T.<sup>1)</sup>, KUKHARENKO A. N.<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> *Belarusian National Technical University,*

<sup>2)</sup> *Command and Engineering Institute, Ministry for Emergency Situations  
of the Republic of Belarus*

Проанализирована работа типовой трехимпульсной системы автоматического регулирования (САР) питания водой парогенератора. Разработана математическая модель проверки ее работоспособности на сброс нагрузки, позволяющая устанавливать максимальные отклонения уровня воды без проведения натурных испытаний, без корректировки уставок срабатывания технологических защит по уровню воды в барабане. Определены причины статических ошибок регулирования при отработке внутренних и внешних возмущений по расходу перегретого пара в типовой САР. Обусловлена актуальность модернизации типовой САР питания водой парогенератора.

**Ключевые слова:** математическая модель, ошибка регулирования, питание водой.

Ил. 6. Библиогр.: 4 назв.

The paper analyzes an operation of the standard three-impulse automatic control system (ACS) for steam generator water supply. Mathematical model for checking its operational ability on load relief has been developed in the paper and this model makes it possible to determine maximum deviations of water level without execution of actual tests and any corrections in the plants for starting-up of technological protection systems in accordance with water level in the drum. The paper reveals reasons of static regulation errors while solving problems of internal and external distortions caused by expenditure of over-heated steam in the standard automatic control system. An actual significance of modernization pertaining to automatic control system for steam generator water supply has been substantiated in the paper.

**Keywords:** mathematical model, regulation error, water supply.

Fig. 6. Ref.: 4 titles.

В настоящее время трехимпульсная система автоматического регулирования питания водой парогенератора, а также всевозможные ее модификации получили наибольшее распространение на тепловых и атомных электростанциях [1–4]. «Классическая» трехимпульсная система автоматического регулирования питания водой парогенератора изображена на рис. 1.

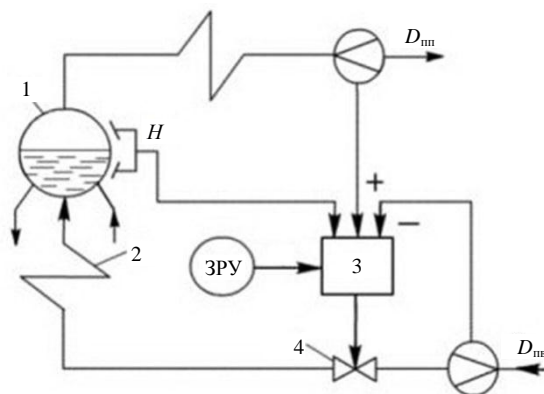


Рис. 1. Структурная схема классической трехимпульсной системы автоматического регулирования питания водой парогенератора: 1 – барабан парогенератора; 2 – водяной экономайзер; 3 – регулятор питания; 4 – регулирующий клапан питательной воды; ЗРУ – задатчик ручного управления

Регулятор питания получает сигналы от датчиков уровня воды в парогенераторе ( $H$ ), расхода перегретого пара ( $D_{пп}$ ), питательной воды ( $D_{пв}$ ) и через исполнительный механизм воздействует на регулирующий клапан (рис. 1). Таким образом, регулятор 3 перемещает клапан 4 при появлении сигнала небаланса между расходами питательной воды и перегретого пара. Кроме того, он воздействует на положение клапана при отклонениях уровня от заданного значения. Такая САР питания совмещает принципы регулирования по отклонению и возмущению. В ней различают внутренний, быстродействующий контур (регулятор питания – регулирующий клапан питательной воды – расход питательной воды – датчик расхода воды – регулятор) и внешний, инерционный (регулятор питания – регулирующий клапан питательной воды – датчик расхода питательной воды – датчик уровня воды в парогенераторе – регулятор).

Безопасность и надежность тепловых электростанций (ТЭС) и атомных электростанций (АЭС) в первую очередь определяются эффективностью работы САР питания водой парогенераторов. Максимально допустимое отклонение уровня воды в барабане парогенератора составляет  $\pm 100$  мм от среднего значения, которое устанавливается заводом-изготовителем [2]. Снижение уровня воды за пределы водомерного стекла, установленного на барабане парогенератора, считают «упуском» котловой воды, а превышение его верхней видимой части – «перепиткой». Расстояние между этими отметками не должно превышать 400 мм. Допустимое отклонение от среднего значения уровня воды в барабане парогенератора уточняют в процессе его эксплуатации. При этом снижение уровня воды менее допустимого может привести к нарушению питания водой парогенератора и охлаждения водой подъемных труб. В результате этого возможно нарушение прочности труб в местах стыковки с корпусом барабана, а в наиболее тяжелом случае – пережог экранных труб. Кроме того, чрезмерное повышение уровня воды приведет к снижению эффективности работы сепарационных устройств барабана и заносу солями пароперегревателей. Перепитка барабана и заброс воды в турбину вызывают гидравлический и тепловой удары, повреждая ротор и лопатки турбины.

Так как упуск уровня воды, или перепитка, относится к самым тяжелым авариям, каждый парогенератор оснащают системой автоматической защиты по уровню воды в барабане, которая срабатывает при наличии сигналов чрезмерного повышения или понижения уровня воды в барабане парогенератора. Понижение уровня воды на 160 мм меньше установленного предела вызывает останов котла. Защита от превышения первого установленного значения уровня воды (до 180 мм) воздействует на открытие запорных задвижек на линии аварийного слива воды из барабана. По достижении уровнем воды второй предельной отметки (до 200 мм) действие защит приводит к останову парогенератора.

Для уточнения уставок срабатывания технологических защит по уровню воды в барабане проводят натурные испытания САР питания водой на сброс нагрузки, которые обычно совмещают с периодом остановки парогенератора. Во время испытаний осуществляют сброс паровой нагрузки парогенератора от максимальной до минимальной с сохранением минимального расхода питательной воды. Однако в процессе проведения таких испытаний повышается вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Для снижения эксплуатационных затрат и повышения надежности работы парогенераторов авторами [4] было предложено использовать математическую модель для проверки работоспособности САР уровня воды в барабане парогенератора, которая позволяет определить максимальные отклонения уровня воды в барабане для уточнения пределов уставок срабатывания технологических защит без натурального сброса нагрузки на реальных парогенераторах. Однако алгоритм функционирования указанной модели в [4] не был приведен.

Упрощенная структурная схема моделирования типовой трехимпульсной САР питания водой парогенератора приведена на рис. 2.

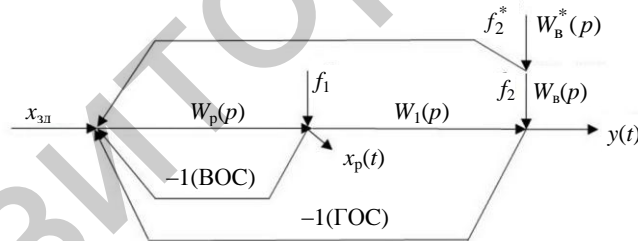


Рис. 2. Структурная схема моделирования типовой САР по уровню воды в барабане парогенератора:  $y(t)$  – основная регулируемая величина (уровень воды в барабане парогенератора);  $x_{зд}$  – заданное значение основной регулируемой величины;  $x_p(t)$  – регулирующее воздействие (расход питательной воды);

$f_1$  – внутреннее возмущение;  $f_2$  – внешнее (топочное) возмущение;  $f_2^*$  – внешнее возмущение (расходом перегретого пара);  $W_p(p)$  – передаточная функция регулятора;  $W_1(p)$  – передаточная функция по уровню при возмущении расходом питательной воды;  $W_b(p)$  – передаточная функция топочного возмущения;  $W_b^*(p)$  – передаточная функция внешнего возмущения расходом перегретого пара; ГОС – главная обратная связь; БОС – внутренняя обратная связь

Уровень воды в барабане парогенератора при возмущении расходом питательной воды относится к объектам регулирования без самовывравнивания, динамика которых описывается в виде передаточной функции идеального интегрирующего звена с запаздыванием

$$W_1(p) = \frac{e^{-\tau_1 p}}{T_1 p}, \quad (1)$$

где  $T_1$  – постоянная времени интегрирующего звена;  $\tau_1$  – время запаздывания по каналу регулирующего воздействия;  $p$  – оператор Лапласа, или в виде реального интегрирующего звена

$$W_1^*(p) = \frac{1}{T_1 p (\tau_1 p + 1)}. \quad (2)$$

В типовой САР питания водой барабанного парогенератора обычно применяют пропорциональный (П) или пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор с передаточной функцией

$$W_p(p) = \frac{k_p (T_i p + 1)}{T_i p}. \quad (3)$$

где  $k_p$  – коэффициент передачи;  $T_i$  – время интегрирования ПИ-регулятора.

ПИ-регулятор, охваченный внутренней отрицательной обратной связью (рис. 2), представляет собой интегро-дифференцирующее звено с передаточной функцией вида

$$W_{X_p, X_{zd}}(p) = W_p^*(p) = \frac{T_i p + 1}{T_i \left( \frac{1 + k_p}{k_p} \right) p + 1}. \quad (4)$$

Так как  $T_i \left( \frac{1 + k_p}{k_p} \right) > T_i$ , то регулятор представляет собой звено медленного реагирования (реальный пропорционально-дифференциальный регулятор).

Вместе с тем передаточная функция регулятора оптимальная для объектов без самовыравнивания с передаточной функцией (2) при заданной передаточной функции замкнутой САР по задающему воздействию

$$W_{zd}(p) = \frac{1}{(T_{zd} p + 1)^2} \quad (5)$$

имеет следующий вид:

$$W_p^{opt}(p) = \frac{T_1}{2T_{zd}} \frac{\tau_1 p + 1}{\frac{T_{zd}}{2} p + 1}, \quad (6)$$

где  $T_{zd}$  – заданная постоянная времени критерия оптимальности (5).

Следует отметить, что при выборе  $T_{zd} = 2\tau_1$  передаточная функция (6) примет вид идеального П-звена

$$W_p^{opt}(p) = \frac{T_1}{4\tau_1}. \quad (7)$$

Для повышения быстродействия системы регулирования при обработке задающего сигнала численное значение  $T_{зд}$  следует выбирать менее  $2\tau_1$ . При этом передаточная функция регулятора (6) принимает (например, при  $T_{зд} = \tau_1$ ) вид звена быстрого реагирования ( $\tau_1 > 0,5\tau_1$ )

$$W_p^{opt}(p) = \frac{T_1}{2\tau_1} \frac{\tau_1 p + 1}{0,5\tau_1 p + 1}. \quad (8)$$

Вместе с тем, если в типовой трехимпульсной САР питания водой парогенератора используется ПИ-регулятор, охваченный отрицательной обратной связью по расходу питательной водой, то фактически регулятор представляет собой звено медленного реагирования. Это негативно сказывается на качестве регулирования уровня воды, так как увеличивается время регулирования.

Графики переходных процессов типовой САР питания барабанного парогенератора БКЗ-210-140 с П-регулятором ( $k_p = 1,26$ ) и использованием пакета Simulink программного обеспечения MatLab для моделирования САР, представленной на рис. 2, при основных возмущениях приведены на рис. 3. При этом переходная характеристика по уровню при возмущении расходом питательной воды аппроксимирована реальным интегрирующим звеном с передаточной функцией (1), параметры которой:  $T_1 = 37$  с;  $\tau_1 = 21$  с [1].

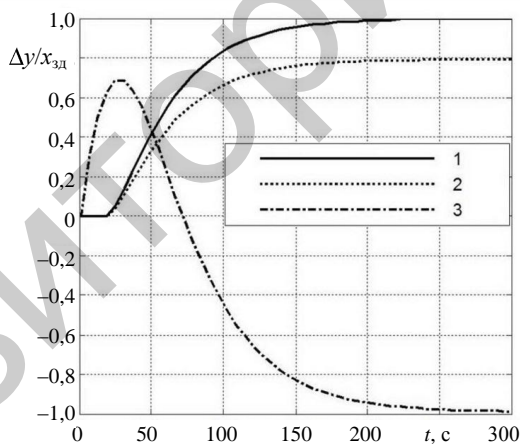


Рис. 3. Графики переходных процессов относительных отклонений уровня воды в барабане типовой САР питания водой парогенератора при обработке основных возмущений:  
 1 – кривая отработки задающего воздействия; 2 – кривая отработки внутреннего возмущения;  
 3 – кривая отработки внешнего возмущения расходом пара;  $t$  – время;  
 $x_{зд}$  – заданное значение уровня воды в барабане;  $\Delta y/x_{зд}$  – относительное отклонение уровня воды в барабане от заданного

При отработке скачка внутреннего возмущения появляется статическая ошибка регулирования в конце переходного процесса. Статическая ошибка регулирования возникает также при отработке внешнего возмущения расходом пара, которое характеризуется явлением «набухания уровня в барабане парогенератора» [1]. Следует отметить, что в типовой САР питания

водой барабанного парогенератора при топочном возмущении статическая ошибка регулирования отсутствует.

Структурная схема моделирования типовой САР питания водой парогенератора на сброс нагрузки и ее изменение с различной скоростью приведены на рис. 4, 5. Схема на рис. 4 отличается от схемы, представленной на рис. 2, тем, что здесь дополнительно введен блок изменения нагрузки парогенератора (БИНПГ) при испытаниях проверки работоспособности регулятора питания в различных режимах.

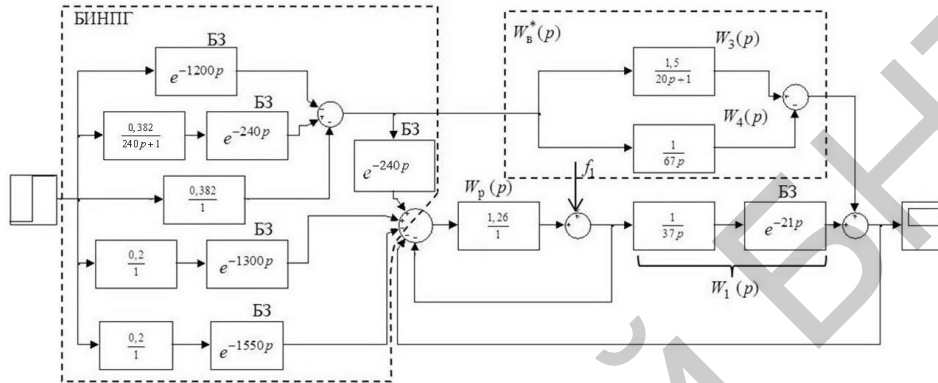


Рис. 4. Структурная схема моделирования типовой САР питания водой парогенератора на сброс нагрузки: БЗ – блоки запаздывания;

$$W_b^*(p) = W_3(p) - W_4(p) = \frac{k_3}{T_3p+1} - \frac{1}{T_4p} = \frac{1,5}{20p+1} - \frac{1}{67p} - \text{возмущение нагрузкой}$$

парогенератора;  $W_3(p)$  – передаточная функция инерционного звена;

$W_4(p)$  – передаточная функция идеального интегрирующего звена

БИНПГ реализует заданный график моделирования изменения оптимальной нагрузки парогенератора при испытаниях, приведенный на рис. 5.

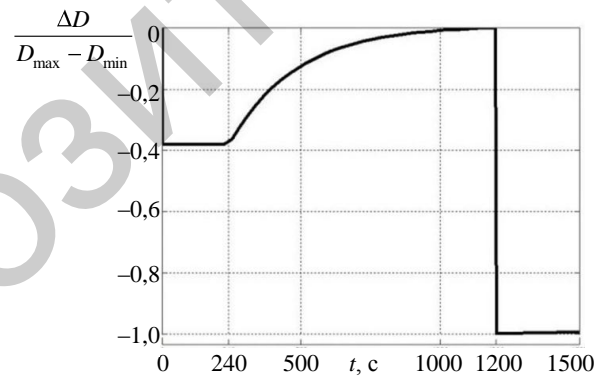


Рис. 5. Заданный график изменения относительной нагрузки парогенератора:

$$\frac{\Delta D}{D_{\max} - D_{\min}} - \text{относительное изменение нагрузки парогенератора; } t - \text{ время}$$

Диапазон изменения нагрузок парогенератора от максимальной до минимальной принимается за целое (единица). На первом этапе при  $t = 0$  осуществляется скачкообразный сброс нагрузки на величину 0,382 от мак-

симальной (согласно правилу золотого сечения). Через определенное время, например  $t = 240$  с от начала испытаний, начинается подъем нагрузки до максимальной (этап второй) с переменной скоростью изменения нагрузки (в момент времени  $t = 240$  с она максимальная), затем уменьшается до нуля в момент времени  $t = 1200$  с. В этот же период начинается третий этап испытаний, где осуществляют мгновенный сброс нагрузки на единицу. Для уменьшения статической ошибки регулирования по уровню при возмущении нагрузкой во время испытаний в момент времени  $t = 240$  с корректируют задание регулятору питания на величину плюс 0,382, в момент времени  $t = 1300$  с соответствующим образом корректируют задание основному регулятору на величину плюс 0,2, при которой статическая ошибка регулирования затухает и стремится к нулю, а на третьем этапе корректировка задания регулятору убирается в момент времени  $t = 1550$  с. Характерный график переходного процесса испытаний САР питания парогенератора на сброс нагрузки приведен на рис. 6.

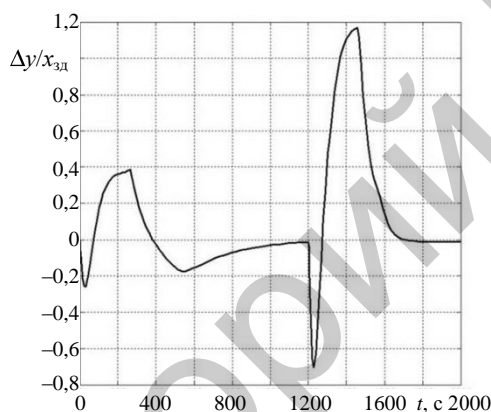


Рис. 6. Переходный процесс по относительному отклонению уровня воды в барабане САР питания парогенератора на сброс нагрузки

Из приведенного графика (рис. 6) следует, что на первом этапе испытаний при скачкообразном изменении расхода пара отклонение уровня воды в барабане парогенератора не превышает допустимых значений  $\pm 100$  мм, так как относительной единице отклонения уровня воды в барабане от номинального значения  $\Delta y/x_{зд}$  соответствует реальное отклонение 100 мм от заданного значения. На втором этапе за счет соответствующей корректировки задания удалось свести статическую ошибку регулирования до 0,18 мм. Проверка работоспособности САР на сброс нагрузки была проведена на примере парогенератора типа БКЗ-210-140, работающего на общую паровую магистраль: максимальная производительность – 210 т/ч, минимальная – 140 т/ч; уставка защиты по уровню: от понижения уровня – минус 125 мм, от повышения (первая ступень) – плюс 125 мм [1]. На третьем этапе моделирования испытаний максимальные отклонения уровня составили соответственно плюс 117,4 мм и минус 70,1 мм. Это свидетельствует о вполне удовлетворительном качестве математического моделирования, так как на натуральных испытаниях на сброс нагрузки максимальное отклонение уровня составляло соответственно плюс 120 мм и минус 70 мм [1].

При этом относительная ошибка регулирования не превышала 2,17 % и 0,14 % соответственно, поэтому в обоих случаях отклонения лежали в пределах уставок защит.

#### ВЫВОД

1. Разработана математическая модель проверки работоспособности типовой системы автоматического регулирования питания барабанного парогенератора на сброс нагрузки и ее изменение с различной скоростью, позволяющая устанавливать максимальные отклонения уровня воды без проведения натуральных испытаний.

2. Определены причины статических ошибок регулирования при отработке внутренних и внешних возмущений по расходу перегретого пара в типовой трехимпульсной системе автоматического регулирования питания водой барабанного парогенератора.

3. Обусловлена актуальность модернизации типовой системы автоматического регулирования питания водой парогенератора для устранения статических ошибок регулирования в широком диапазоне изменения нагрузок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К л ю е в, А. С. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов / А. С. Ключев, А. Т. Лебедев, С. И. Новиков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 280 с.
2. П л е т н е в, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учеб. для студентов вузов / Г. П. Плетнев. – 4-е изд., перераб. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с.
3. Д е м ч е н к о, В. А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС / В. А. Демченко. – Одесса: Астромпринт, 2001. – 308 с.
4. К у л а к о в, Г. Т. Структурно-параметрическая оптимизация регуляторов уровня барабанных парогенераторов ТЭС и АЭС / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Матер. II Междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении», Минск, 13–14 марта 2013 г.; ред. кол.: Б. М. Хрусталеv (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2013. – С. 21–22.

#### REFERENCES

1. К л ю ч е в, А. S. Setting of Automatic Control Systems for Drum-Type Steam Boilers / A. S. Klyuev, A. T. Lebedev, S. I. Novikov. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 280 p.
2. П л е т н е в, G. P. Automation of Technological Processes and Productions in Thermal Power Engineering: Manual for HEI students / G. P. Pletnev. – 4<sup>th</sup> edition, revised. – M.: Publishing House of Moscow Power Engineering Institute, 2007. – 352 p.
3. Д е м ч е н к о, V. A. Automation and Simulation of Technological Processes at Nuclear and Thermal Power Plants / V. A. Demchenko. – Odessa: Astromprint, 2001. – 308 p.
4. К у л а к о в, G. T. Structural and Parametric Optimization of Level Regulators in Drum-Type Steam Generators at Nuclear and Thermal Power Plants / G. T. Kulakov, A. T. Kulakov, A. N. Kukhorenko // Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Scientific and Practical Conference, Minsk, March 13–14, 2013: “Innovation Technologies, Automation and Mechatronics in Mechanical Engineering and Instrumentation”; Editorial Board: B. M. Khroustalev (Chief Editor) [et al.]. – Minsk: Biznesofset, 2013. – P. 21–22.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 30.07.2013