

УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 681.5.015.23:658.264

А.А. Климчук, В.Ф. Ложечников, В.С. Михайленко, Н.В. Ложечникова

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В БАРАБАННОМ ПАРОГЕНЕРАТОРЕ КАК ОБЪЕКТЕ УПРАВЛЕНИЯ

Ключевые слова: барабанный парогенератор, энергетический барабанный котел, автоматическая система регулирования уровня пароводяной смеси, математическая модель, технологический участок питания парогенератора.

Введение

Промышленные барабанные парогенераторы, выполняющие преобразование химической энергии жидкого или газообразного топлива в форму, удобную для транспортировки и промышленного использования, т.е. в электрический ток, пар или горячую воду для обогрева жилых и производственных помещений, отличаются номинальной паровой мощностью и эксплуатационными режимами. Однако качественные свойства динамики уровня h пароводяной смеси разных барабанных парогенераторов одинаковы.

Управление уровнем пароводяной смеси в парогенераторе сводится к поддержанию материального баланса между отводом пара D и подачей питательной воды $G_{пр}$. Отклонение уровня Δh в парогенераторе от заданного значения связано с небалансом между притоком питательной воды и расходом пара вследствие изменения содержания пара в пароводяной смеси в результате колебаний давления перегретого пара в паропроводе P_m или изменения тепловосприятия испарительных поверхностей нагрева.

К стабилизации уровня предъявляются довольно жесткие требования, поскольку при отклонении уровня воды в парогенераторе от номинального значения предусмотрены технологические и аварийные защиты котла или всего энергоблока. Снижение уровня до точки присоединения опускных (dip pipes) труб циркуляционного контура промышленного парогенератора может привести к нарушению питания и охлаждению водой экранных (screen tubes) труб. Следствием этого может быть нарушение прочности труб в местах стыковки с корпусом барабана, а в наиболее тяжелом случае — пережог. Чрезмерное повышение уровня может привести к снижению эффективности работы сепарационных устройств внутри парогенератора и отложению солей жесткости в пароперегревателе (superheater). Попадание частиц воды из барабана в паропровод понижает температуру перегретого пара и может стать причиной тяжелых механических повреждений ротора и лопаток турбины. Изменение уровня воды внутри некоторых допустимых пределов практически не оказывает влияния на работу парогенератора. Вместе с тем механическая усталость (mechanical fatigue) металла барабана, а также потре-

© А.А. КЛИМЧУК, В.Ф. ЛОЖЕЧНИКОВ, В.С. МИХАЙЛЕНКО, Н.В. ЛОЖЕЧНИКОВА, 2019

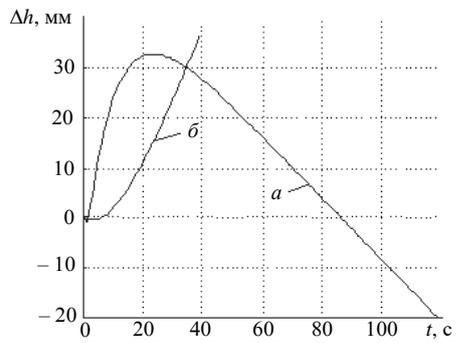
ние энергии насосами зависят от качества регулирования расхода питательной воды. Резкие колебания расхода способствуют усталостным явлениям в металле, снижают надежность и экономичность работы питательных насосов. Поэтому наряду с регулированием уровня желательно поддерживать баланс между производством пара и подачей питательной воды с минимальными колебаниями ее расхода.

Точность поддержания уровня для большинства барабанных парогенераторов, при которой обеспечивается достаточная эффективность отделения влаги от пара и требуемый запас воды на случай перерыва питания, практически одинакова и составляет ± 50 мм [1].

Возмущающее воздействие на отклонение уровня воды могут оказывать расход пара на турбину, изменение тепловыделения в топке барабанного котла Q , изменение давления и температуры питательной воды.

Характер кривых разгона по уровню при возмущении расходом пара и питательной воды одинаков как для парогенераторов АЭС, так и для барабанных котлов средней мощности. Выпуклая форма кривой изменения уровня (рис. 1, а) [1] при ступенчатом увеличении расхода пара объясняется тем, что в первый момент после возмущения уровень воды возрастает в результате резкого уменьшения давления пара в барабане P_b . Это в свою очередь приводит к увеличению в объеме пузырьков пара в кипящей пароводяной смеси парогенератора и росту уровня. После того как давление пара в барабане примет новое установившееся значение, соответствующее новому значению расхода пара, изменение уровня будет протекать в соответствии с уравнением материального баланса. Рассмотренное явление носит название «набухания» уровня.

Увеличение теплоподвода к экранным поверхностям нагрева котла также вызывает «набухание» (swelling) уровня за счет увеличения паросодержания пароводяной смеси. Однако величина отклонения уровня меньше, поскольку в результате увеличения генерации пара при неизменном положении регулирующих клапанов турбины или сетевых подогрева-



телей происходит повышение давления пара в барабане, что в свою очередь приводит к уменьшению пузырьков пара и замедлению «набухания». Снижению величины «набухания» также способствует инерционность изменения теплоподвода к пароводяной смеси через радиационные и конвективные поверхности нагрева барабанного котла. Увеличение расхода питательной воды приводит к кратковременному «проседанию» уровня за счет уменьшения паросодержания, когда температура питательной воды ниже температуры пароводяной смеси в парогенераторе (рис. 1, б).

Рассмотренные динамические свойства барабанных парогенераторов крайне неблагоприятны с точки зрения стабилизации уровня воды, поскольку для автоматического регулирования уровня непригодны обычные одноконтурные системы регулирования.

Задача математического моделирования уровня в барабанном парогенераторе

В решении проблемы регулирования уровня пароводяной смеси в барабанном парогенераторе можно выделить несколько основных направлений — повышение точности измерения уровня и основных возмущающих воздействий [2] и синтез новых алгоритмов управления [3].

В основе большинства решений по повышению качества регулирования и надежности систем управления лежит математическое моделирование как техно-

логического участка, так и проектируемой системы управления. Вскипание уровня при резком падении давления пара в парогенераторе является крайне неблагоприятным фактором для системы управления. Первоначальное отклонение уровня определяется энергетическим небалансом в системе. Поскольку работа регулятора уровня основана на поддержании материального баланса между притоком (расход питательной воды) и стоком (расход пара), это приводит к изменению регулятором уровня расхода питательной воды в противоположную сторону и увеличению материального небаланса. Решить указанную проблему позволяет трехимпульсная система регулирования уровня [4], в которой на вход регулятора, кроме сигнала по уровню в парогенераторе, поступают с противоположными знаками сигналы по расходу пара и питательной воды (рис. 2, а).

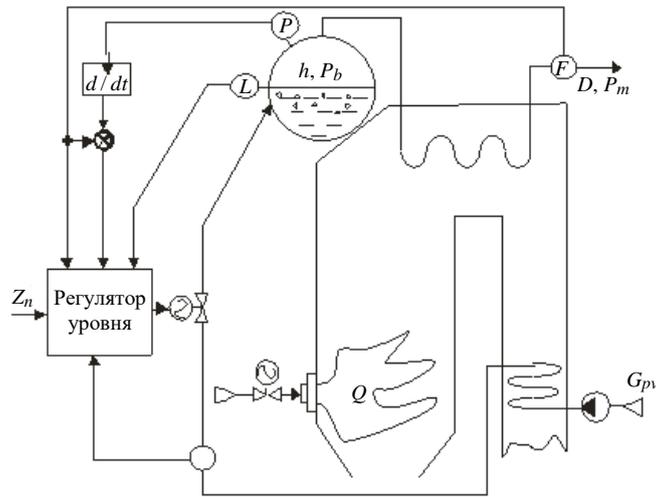


Рис. 2

Еще один подход связан с синтезом многорежимных систем управления питанием барабанных парогенераторов. Поскольку интенсивность вскипания уровня зависит от тепловой нагрузки парогенератора и режимов его работы (базовый или регулирующий), давление пара в барабане, процентное содержание насыщенного пара в барабане, ниже уровня жидкости, котловой воде и экранных трубах влияют на длительность переходного процесса, динамическое отклонение регулируемой величины и статическую ошибку. Задача по расширению диапазона работы систем управления питательной водой актуальна и для электростанций с комбинированным циклом для плавной интеграции возобновляемой энергии [5]. Диапазон работы таких



Рис. 3

установок включает состояния горячего и холодного пуска, в которых плотность пароводяной смеси может существенно изменяться. Нелинейная динамика уровня барабана котла в этом случае моделируется в терминах линейных моделей с параметрическими вариациями. Такой подход позволяет уменьшить ошибки управления на 77 % [6].

Однако при математическом моделировании системы управления питанием парогенератора основное возмущающее воздействие — расход пара — рассматривается как независимая переменная (рис. 3). Такое допущение справедливо при определении передаточной функции устройства связи по основному возмущающему воздействию в трехимпульсной системе управления питанием парогенератора. В действительности расход пара зависит от тепловыделения в топочной камере бара-

банного котла и гидравлического сопротивления паропровода между парогенератором и потребителем пара (электрическая турбина, сетевой подогреватель, технологическое производство и др.), т.е. $D = f(Q, \xi_{pp})$.

Включение в математическую модель динамики уровня жидкости в барабанном парогенераторе модели паропровода позволит проверить работоспособность АСУ на сброс нагрузки и установить максимальные отклонения уровня воды без проведения натуральных испытаний и срабатывания технологических защит по уровню воды в барабане.

Математическое описание объекта управления

Барабанный парогенератор, как объект регулирования уровня, представляет систему емкостей, состоящую из собственно барабана, опускной трубной системы и экранной трубной системы (подъемные трубы). Эти емкости заполнены двухфазной средой (вода и насыщенный пар (рис. 3)).

Питательная вода, подогретая в экономайзере, подается в барабан котла и влияет одновременно на материальный и энергетический баланс (регулирующее воздействие). Тепловая энергия дымовых газов передается экранным трубам, фестону (festination) и котельному пучку и влияет только на энергетический баланс (возмущающее воздействие). В математической модели эти параметры рассматриваются как независимые переменные.

Изменение уровня в такой схеме происходит из-за изменения регулирующим клапаном расхода питательной воды или отклонения давления перегретого пара со стороны потребителя P_p .

Динамические свойства уровня в барабанном парогенераторе описываются линейным дифференциальным уравнением

$$T_2 \Delta \ddot{h} + T_1 \Delta \dot{h} = k_1 \Delta \dot{G}_{pv} + k_2 \Delta G_{pv} + k_3 \Delta \dot{D} + k_4 \Delta D + k_5 \Delta \dot{Q} + k_6 \Delta Q, \quad (1)$$

предполагая, что температура воды в опускных трубах близка к температуре насыщения, а потоки массы и энергии с продувкой пренебрежимо малы по сравнению с остальными потоками; температура металлических поверхностей барабана и труб в динамике и статике равна температуре насыщения [7]. Коэффициенты уравнения (1) определяются алгебраическими зависимостями:

$$T_2 = a_6 b_7 (a_1 a_4 - a_2 a_3); \quad T_1 = \left(\frac{1}{b_4} - b_8 \right) (a_1 a_4 - a_2 a_3); \quad k_1 = a_5 b_7 (a_4 b_1 - a_2);$$

$$k_2 = a_1 - a_3 b_1 + a_4 b_1 b_6 - a_2 b_6; \quad k_3 = b_7 (a_1 a_4 - a_2 a_3 - a_5 a_4 b_3 + a_2 a_5);$$

$$k_4 = a_3 b_3 - a_4 b_3 b_6 - a_1 + a_2 b_6; \quad k_5 = a_4 a_5 b_7; \quad k_6 = a_4 b_6 - a_3, \quad a_2 = \bar{\rho}' \bar{i}' - \bar{\rho}'' \bar{i}'';$$

$$a_4 = \bar{\rho}' - \bar{\rho}'', \quad a_6 = F \bar{\rho}'', \quad b_4 = b_5 = \frac{1}{F}, \quad b_1 = \bar{i}_{pv}, \quad b_3 = \bar{i}'',$$

обыкновенными —

$$a_1 = \bar{V} \left[\frac{d(\rho'' i'')}{dP} \right]_0 + \bar{V}_W \left[\frac{d(\rho' i' - \rho'' i'')}{dP} \right]_0 + c_m m_m \left(\frac{d\theta}{dP} \right)_0,$$

$$a_3 = \bar{V} \left[\frac{d(\rho'')}{dP} \right]_0 + \bar{V}_W \left[\frac{d(\rho' - \rho'')}{dP} \right]_0, \quad a_5 = \bar{V}_{Db} \left(\frac{d\rho''}{dP} \right)_0$$

и частными производными

$$b_2 = \bar{G}_{pv} \left(\frac{\partial i_{pv}}{\partial \theta_{pv}} \right)_0, \quad b_6 = \left(\frac{\partial V_{DK}}{\partial P} \right)_0, \quad b_7 = \left(\frac{\partial V_{DK}}{\partial G_{Dh}} \right)_0, \quad b_8 = \left(\frac{\partial V_{DK}}{\partial h} \right)_0.$$

В этих соотношениях \bar{V} — суммарный объем барабана, опускных и экранных труб, \bar{V}_W — суммарный объем воды в барабане, опускных и экранных трубах, c_m — теплоемкость металла труб и барабана при температуре насыщения, m_m — масса металла труб и барабана, $\bar{\rho}'$, $\bar{\rho}''$, \bar{i}' , \bar{i}'' — плотность и энтальпия (enthalpy) воды при температуре насыщения и насыщенного пара; \bar{P} — давление пара в барабане, $\bar{\theta}'$ — температура насыщения, \bar{i}_{pv} , $\bar{\theta}_{pv}$ — энтальпия и температура питательной воды; \bar{V}_{Db} — объем насыщенного пара в барабане над зеркалом испарения, F — площадь зеркала испарения, \bar{V}_{DK} — объем паровых каналов в пароводяной смеси, \bar{h} — номинальный уровень воды в барабане. Численные значения коэффициентов рассчитываются по массогабаритным размерам и теплотехническим параметрам для любого барабанного парогенератора.

Изменение давления пара в барабане без учета влияния гидравлического сопротивления паропровода описывается дифференциальным уравнением

$$\Delta \dot{P}_b = k_7 \Delta G_{pv} + k_8 \Delta D + k_9 \Delta Q, \quad (2)$$

где $k_7 = \frac{a_2 - a_4 b_1}{a_2 a_3 - a_4 a_1}$, $k_8 = \frac{a_4 b_3 - a_2}{a_2 a_3 - a_4 a_1}$, $k_9 = -\frac{a_4}{a_2 a_3 - a_4 a_1}$. После нанесения любого

возмущения давление в барабане будет изменяться по интегральному закону, поскольку в уравнения (1) и (2) входит независимая переменная по расходу пара ΔD . Таким образом, если не учитывать в математической модели зависимость расхода пара от подвода тепла к пароводяной смеси и от площади проходного сечения регулирующего клапана по расходу пара S_{rk} , результаты моделирования динамики уровня не будут адекватны реальным переходным процессам. Иными словами, изменение уровня будет определяться только энергетическим небалансом и изменением объема пузырьков пара (рис. 1, а). Для решения данной проблемы необходимо дополнить уравнения (1) и (2) моделью паропровода, которая свяжет изменение давления в барабане ΔP_b с изменением расхода пара через паропровод ΔD .

Поскольку перегретый пар является сжимаемой средой, структурно паропровод, для упрощения аналитического вывода, можно представить из трех элементов — дросселя, емкости и переменного гидравлического сопротивления (рис. 4), которые описываются системой уравнений [8]

$$\begin{cases} \Delta P_b - \Delta P_m = a_L \Delta D_b; \\ T_{II} \frac{\bar{D}}{\bar{P}_M} \frac{d\Delta P_M}{dt} = \Delta D_b - \Delta D; \\ \Delta P_m - \Delta P_p = a_{rk} \Delta D - b_{rk} \Delta S_{rk}. \end{cases} \quad (3)$$

Дроссельный элемент учитывает потери давления на трение и стационарное ускорение в паропроводе, аккумулирующий элемент T — количество пара в паропроводе (D_b — расход пара из парогенератора в паропровод). Регулирующий орган учитывает изменение площади проходного сечения ΔS_{rk} на расход пара. Изменение давления пара на входе ΔP_b и выходе

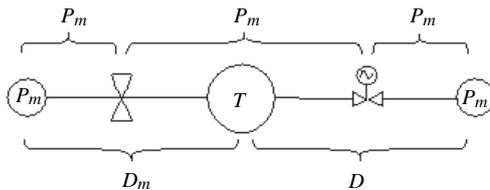


Рис. 4

ΔP_p паропровода также влияет на расход пара. Решение системы уравнений (3) относительно переменных ΔP_m и ΔD позволяет записать уравнения

$$T_3 \Delta \dot{D} + \Delta D = T_4 \Delta \dot{P}_p + k_{13} \Delta P_p + T_5 \Delta \dot{S}_{rk} + k_{14} \Delta S_{rk} + k_{15} \Delta P_b, \quad (4)$$

$$T_3 \Delta \dot{P}_m + \Delta P_m = k_{10} \Delta P_b + k_{11} \Delta P_p + k_{12} \Delta S_{rk}, \quad (5)$$

где $T_3 = \frac{a_{rk} a_L}{a_{rk} + a_L} T_p \frac{\bar{D}}{\bar{P}_m}$, $T_4 = -\frac{a_L}{a_{rk} + a_L} T_p \frac{\bar{D}}{\bar{P}_m}$, $T_5 = \frac{b_{rk} a_L}{a_{rk} + a_L} T_p \frac{\bar{D}}{\bar{P}_m}$, $k_{10} = \frac{a_{rk}}{a_{rk} + a_L}$, $k_{11} = \frac{a_L}{a_{rk} + a_L}$, $k_{12} = -\frac{a_L b_{rk}}{a_{rk} + a_L}$, $k_{13} = -\frac{1}{a_{rk} + a_L}$, $k_{14} = \frac{b_{rk}}{a_{rk} + a_L}$, $k_{15} = \frac{1}{a_{rk} + a_L}$, $T_p = \frac{m}{\bar{M}} \left(\frac{\chi + 1}{2\chi} \right)$, $a_L = \left(\frac{\lambda L}{D_{in}} + \sum_{i=1}^n \xi_i \right) \frac{\bar{M}}{\rho S_{pr}^2}$; $a_{rk} = \frac{\xi_{rk} \bar{M}}{\rho \bar{S}_{rk}^2}$; $b_{rk} = \frac{\xi_{rk} \bar{M}^2}{\rho \bar{S}_{rk}^3}$.

Анализ структурной схемы математической модели (рис. 5) показывает, что между барабанным парогенератором и паропроводом существует обратная взаимосвязь по расходу пара. Отрицательный характер этой связи объясняет самовыравнивание уровня, связанное с изменением положения регулирующего клапана расхода пара или тепловыделением в топочной камере.

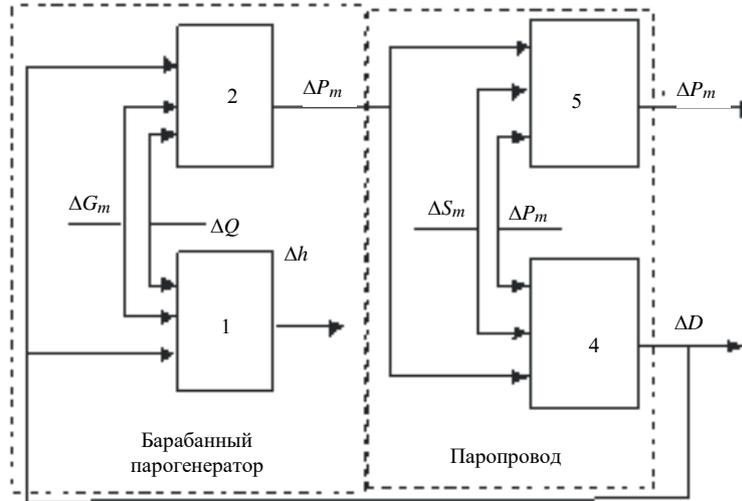


Рис. 5

Согласно полученным соотношениям инерционность процессов в паропроводе и коэффициент передачи по каналу «давление пара в барабане–расход пара к потребителю» зависят от длины паропровода L , его внутреннего диаметра D_{in} , площади внутреннего сечения S_{pr} , коэффициентов трения λ и местных сопротивлений ξ_i , а также массы пара в паропроводе m , расхода пара в установившемся режиме \bar{M} , показателя степени адиабаты χ , плотности пара ρ , коэффициента сопротивления ξ_{rk} и площади проходного сечения регулирующего клапана \bar{S}_{rk} в установившемся режиме.

Результаты математического моделирования

Совместное решение уравнений (1)–(4), применительно к газо-мазутному котлу ГМ-50, позволяет исследовать динамические свойства уровня в барабанном парогенераторе, когда расход пара зависит от тепловыделения в топочной камере и положения регулирующего органа по расходу пара (рис. 6, а, б). Расход пара потребителем, согласно (5), влияет на изменение давления перегретого пара в главной паровой магистрали ΔP_m . Давление перегретого пара определяет баланс между генерацией пара в парогенераторе и его расходом через паровую турбину на ТЭС или на сетевые подогреватели горячей воды. Поэтому изменение площади проходного сечения регулирующего клапана ΔS_{rk} , без изменения регулятором тепловой нагрузки тепловыделения в топочной камере, приводит к временному изменению расхода пара, которое обусловлено, в основном, аккумулярующей способностью паропровода. Это приводит к менее интенсивному вскипанию уровня (если проходное сечение регулирующего клапана ΔS_{rk} увеличивается) и его переходу к новому установившемуся значению (рис. 6, б). Стабилизация уровня происходит ниже исходного значения вследствие кратковременного нарушения баланса между подачей питательной воды в парогенератор и отбором пара. Если при математическом моделировании не учитывается принципиальная зависимость расхода пара от гидравлического сопротивления паропровода, который соединяет парогенератор с потребителем пара, то результаты моделирования не будут адекватно описывать свойства реального объекта (рис. 6, а).

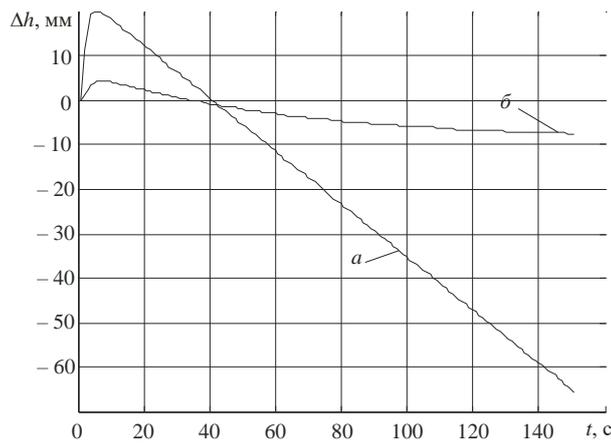


Рис. 6

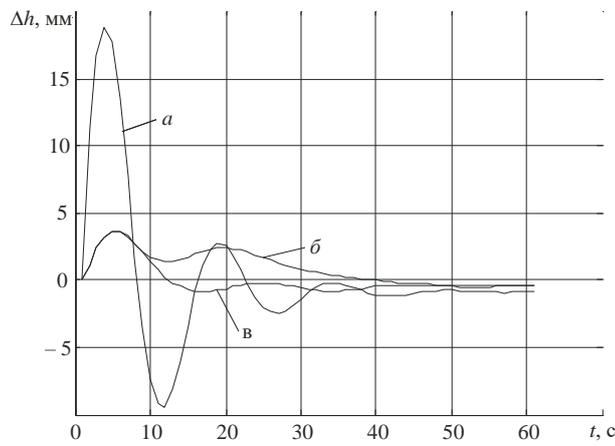


Рис. 7.

скового сопротивления паропровода, который соединяет парогенератор с потребителем пара, то результаты моделирования не будут адекватно описывать свойства реального объекта (рис. 6, а).

Оценка качества регулирования переходных процессов в трехимпульсной системе регулирования уровня без учета зависимости $D = f(Q, \xi_{pp})$ дает в четыре раза большее динамическое отклонение (рис. 7, а), что при скачкообразном увеличении на 30 % расхода пара потребителем приводит к срабатыванию сигнализации и аварийному останову котла.

Полученная математическая модель позволяет исследовать возможность использования дополнительного сигнала по изменению давления пара в барабане ΔP_b для улучшения качества переходных процессов.

Традиционно сигнал по тепловыделению в топочной камере $Q = C_p \frac{dP_b}{dt} + D$

(C_p — постоянный коэффициент, характеризующий массовую аккумулярующую способность пароводяной смеси, барабана и экранных труб котла) применяется в системе регулирования тепловой нагрузки, когда использование сигнала по расходу топлива неэффективно [9–11]. Исследование, проведенное на полученной математической модели, показало, что введение в классическую трехимпульсную систему управления уровнем (рис. 7, б) дополнительного сигнала по скорости изменения давления пара в парогенераторе с отрицательным коэффициентом позволяет сократить время регулирования более чем в два раза (рис. 7, в).

Заключение

В настоящей работе для парогенераторов барабанного типа получена математическая модель, позволяющая повысить точность моделирования переходных процессов в автоматических системах регулирования уровня пароводяной смеси. Показано, что учет в математической модели обратного влияния расхода пара через паропровод на его давление в самом парогенераторе приводит к самовыравниванию объекта управления по каналу «изменение площади проходного сечения регулирующего клапана ΔS_{rk} — уровень воды в парогенераторе Δh ». Таким образом, скачкообразные изменения расхода пара потребителем (до 50 % от номинального расхода) не приводят к аварийному превышению или понижению уровня. Использование сигнала по давлению пара в барабанном парогенераторе позволяет не только улучшить динамические показатели качества регулирования уровня, но и уменьшить статическую ошибку, поскольку в классической трехимпульсной системе регулирования плотность пара считается постоянной.

О.А. Климчук, В.Ф. Ложечников, В.С. Михайленко, Н.В. Ложечникова

УДОСКОНАЛЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ РІВНЯ РІДИНИ В БАРАБАННОМУ ПАРОГЕНЕРАТОРІ ЯК ОБ'ЄКТИ КЕРУВАННЯ

Розглянуто особливості математичного моделювання динамічних властивостей рівня пароводяної суміші у барабанному парогенераторі. Показано, що вкрай несприятливе для автоматичних систем керування закипання рівня пароводяної суміші у барабанному парогенераторі є наслідком як протікання складних теплофізичних процесів, так і конструктивних особливостей технологічної ділянки. Тому використання для моделювання динаміки рівня математичних моделей, в яких не враховується вплив акумулюючої і дроселюючої властивостей паропроводу на витрату насиченої пари з парогенератора, а головний вплив збурення (витрата пару) розглядається як незалежна змінна, є некоректним.

Запропоновано лінійну математичну модель ділянки живлення барабанного парогенератора, яка враховує динамічні властивості паропроводу, що з'єднує парогенератор із споживачем. Аналіз структурної схеми запропонованої математичної моделі показав, що між барабанним парогенератором і паропроводом існує зворотний взаємозв'язок витрати пари. Негатив-

ний характер зв'язку пояснює самовирівнювання рівня, пов'язане зі зміною положення регулюючого клапана витрати пари або виділенням тепла у котельній камері. Відповідно, зміна площі прохідного перетину регулюючого клапана турбіни, без зміни регулятором теплового навантаження тепловиділення в котельній камері або ядерному реакторі, призводить до тимчасової зміни витрати пари, тобто до менш інтенсивного закипання рівня і його переходу до нового сталого значення. Стабілізація рівня відбувається нижче вихідного значення внаслідок короткочасного порушення балансу між подачею живильної води в парогенератор і відбором пари.

Виявлені, в результаті рішення системи диференціальних рівнянь, особливості поведінки рівня пароводяної суміші дозволяють більш адекватно моделювати роботу існуючих та перспективних систем керування живленням барабанних парогенераторів.

Ключові слова: барабанний парогенератор, енергетичний барабанний котел, автоматична система регулювання рівня пароводяної суміші, математична модель, технологічна ділянка живлення парогенератора.

A.A. Klymchuk, V.F. Lozhechnikov, V.S. Mykhailenko, N.V. Lozhechnikova

IMPROVED MATHEMATICAL MODEL OF FLUID LEVEL'S DYNAMICS IN A DRUM-TYPE STEAM GENERATOR AS A CONTROLLED OBJECT

The features of mathematical modeling of the dynamic properties of the level of a steam-water mixture in a drum-type steam generator are considered. It is shown that the boiling up of the level of the steam-water mixture in the drum-type steam generator, which is extremely unfavorable for automatic control systems, is a consequence of the occurrence of complex thermophysical processes and the design features of the technological section. Therefore, the use of mathematical models for modeling the level dynamics, which do not take into account the effect of the accumulating and throttling properties of the steam line on the saturated vapor flow from the steam generator, and the main disturbing action (steam consumption) is considered as an independent variable, is not correct.

The article proposes a linear mathematical model of the power supply section of the drum steam generator, which takes into account the dynamic properties of the steam line connecting the steam generator with the consumer. Analysis of the structural scheme of the proposed mathematical model showed that between the drum-type steam generator and the steam line there is an inverse relationship with steam consumption. The negative nature of this connection explains the self-leveling associated with a change in the position of the steam flow control valve or heat generation in the combustion chamber. Accordingly, a change in the flow area of the turbine control valve, without changing the heat release by the heat load regulator in the combustion chamber or nuclear reactor, leads to a temporary change in steam consumption. This leads to less intense boiling up of the level and its transition to a new steady-state value. Stabilization of the level occurs below the initial value due to a brief disruption of the balance between the feedwater supply to the steam generator and the extraction of steam.

Identified, as a result of solving a system of differential equations, the peculiarities of the behavior of the steam-water mixture level make it possible to simulate more adequately the operation of existing and prospective power management systems for drum-type steam generators.

Keywords: drum steam generator, energy drum boiler, automatic system for regulating the level of steam-water mixture, mathematical model, technological feeding section of steam generator.

1. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование процессов АЭС и ТЭС. Одесса : «Астро-принт», 2001. 305 с.
2. Авраменко С.В., Тарасюк В.П. Математическая модель системы мониторинга уровня жидкости в барабане котла. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»* : сб. науч. тр. Темат. вып. : Электроэнергетика и преобразовательная техника. Харьков : НТУ «ХПИ». 2012. № 41. С. 100–110. <http://science.polytech.kharkiv.net/View/31119/>.
3. Ablay G. A robust estimator-based optimal algebraic approach to steam generator feedwater control system. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2016. **24**, P. 206–218. <https://doi.org/10.3906/elk-1307-46>.
4. Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Кухоренко А.Н. Математическое моделирование переходных процессов трехимпульсной системы автоматического регулирования питания водой парогенератора на сброс нагрузки. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2014. № 1. С. 57–64. <http://rep.bntu.by/handle/data/6834>.
5. Improving the operation modes efficiency in heat pump systems of hot water supply with the two-stage heat accumulation. A. Mazurenko, A. Denysova, G. Balasanian, A. Klymchuk, K. Borisenko. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2017. 1/8. P. 27–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.92495>.
6. Sunil P.U., Jayesh Barve, Natara P.S.V. A robust heat recovery steam generator drum level control for wide range operation flexibility considering renewable energy integration. *Energy*. 2018. **163**. P. 873–893. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.167>.
7. Ложечников В.Ф., Стопакевич А.А. Структура многомерной математической модели динамики барабанного котла средней мощности. *Оптимизация управления, информационные системы и компьютерные технологии: Труды Украинской академии экономической кибернетики (Южный научный центр)*. Киев-Одесса : ИСЦ, 1999. Вып.1. Ч. 2. С. 167–176.
8. Профос П. Регулирование паросиловых установок. М. : Энергия, 1967. 368 с.
9. Maksymov M., Lozhechnikov V., Maksymova O., Lysiuk O. Improvement of the control system over drum boilers for burning combustible artificial gases. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. **4**, 8 (88). P. 10–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107358>.
10. Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. Синтез нейромережевої системи автоматичного регулювання рівня води в барабані котла енергоблоку ТЕС. *Наукові вісти НТУУ «КПІ»*. 2012. № 5. С. 45–51. http://nbuv.gov.ua/UJRN/NVKPI_2012_5_8.
11. Mikhailenko V.S., Kharchenko R.Yu. Analysis of traditional and neuro_fuzzy adaptive system of controlling the primary steam temperature in the direct flow steam generators in thermal power stations. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2014. **48**, N 6. P. 334–344. <https://doi.org/10.3103/S0146411614060066>.

*Получено 02.01.2019
После доработки 21.03.2019*