

6  
А-2

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени В. М. МОЛОТОВА

---

Е. П. ФЕЛЬДМАН

На правах рукописи

**ДИНАМИКА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ  
В ПАРОВЫХ КОТЛАХ С ЕСТЕСТВЕННОЙ  
ЦИРКУЛЯЦИЕЙ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



В любой задаче автоматического регулирования, в том числе и в такой, как регулирование уровня воды в барабане парового котла с естественной циркуляцией, являющейся предметом настоящей диссертации, имеются две фундаментальные проблемы, а именно — проблема регулируемого объекта и проблема системы регулирования.

Что касается проблемы регулируемого объекта, т. е. динамики барабанного парового котла, то этому вопросу посвящено значительное количество работ.

Среди них особого внимания заслуживают работы, выполненные чл.-корр. АН СССР профессором И. Н. Вознесенским и его учениками.

Приведенные в литературе уравнения, описывающие переходные процессы в паровом котле, имеют ограниченный характер. Эти уравнения с достаточной степенью приближения отражают истинный характер явления только при некоторых вполне определенных условиях. Однако, в настоящей работе не ставилась задача уточнить или развить имеющиеся представления о динамике парового котла.

Задача диссертации состоит в том, чтобы теоретически и экспериментально обосновать области рационального использования различных типов регуляторов уровня, применительно к современным паровым котлам производительностью от 20 т/час. и выше. Специфика регулирования уровня воды в барабане парового котла обусловлена динамическими свойствами котельного агрегата.

До тех пор пока применялись котлы с большим удельным водосодержанием и относительно мало выраженным явлением «набухания» водяного объема, т. е. такие котлы, динамические характеристики которых были сходны с аналогичными характеристиками хорошо изученных в теории автоматического регулирования машин двигателей, выбор типа регулятора уровня мог базироваться на известных представлениях теории автоматического регулирования машин.

С применением котлов с малым удельным водосодержанием и резко выраженным явлением «набухания», динамические ха-

72432. 1



рактические характеристики которых существенно отличаются от аналогичных характеристик простейших регулируемых объектов, такой подход к оценке целесообразного типа регулятора уровня становится недостаточным.

Известно, что всякое регулирование предполагает установление равновесия в регулируемом объекте, т. е. поддержания в нем материального или энергетического баланса или того и другого одновременно.

В простейших объектах регулирования, которые могут быть описаны уравнением вида

$$T_a \frac{d\varphi}{dt} = \mu_1 - \lambda \quad (1)$$

где:  $T_a$  — время разгона регулируемого объекта;  
 $\varphi$  — относительное изменение регулируемого параметра;  
 $\mu_1$  — относительное изменение подачи регулируемой среды;  
 $\lambda$  — относительное изменение потребления, —

небаланс в системе  $\mu_1 - \lambda$  полностью характеризуется скоростью изменения регулируемого параметра  $\varphi$ . Временная характеристика объекта не зависит в данном случае от того, нарушен ли небаланс на стороне потребления за счет изменения  $\lambda$  или на стороне подачи за счет изменения  $\mu_1$ .

В объектах, где величина отклонения параметра однозначно определяет размер нарушения равновесия, достаточным показателем оценки качества систем регулирования может служить качество поддержания регулируемого параметра.

Современный паровой котел, с точки зрения регулирования уровня воды в барабане котла, является весьма сложным объектом.

Исходя из приведенных в литературе уравнений материального и энергетического баланса котла, в которых используется статическая зависимость объема пара под зеркалом испарения от расхода пара из котла и давления пара в барабане, а также полагая, что на котле установлен идеальный регулятор давления, уравнение динамики уровня воды в котле с естественной циркуляцией и некипящим экономайзером можно представить в таком виде:

$$T_1^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + T_2 \frac{d\varphi}{dt} = T_3 \frac{d\lambda}{dt} + T_4 \frac{d\mu_1}{dt} + k_1 (\mu_1 - \lambda). \quad (2)$$

Здесь:  $\varphi$  — относительное изменение уровня воды в барабане котла;

$\lambda$  — относительное изменение паровой нагрузки;  
 $\mu_1$  — относительное изменение подачи воды;  
 $T_1 \dots T_4$  — постоянные времени;  
 $k_1$  — коэффициент.

$$T_1 = R_3 (S_1 P_2 + S_2 P_1) + S_3 (R_2 P_1 - R_1 P_2)$$

$$T_2 = S_1 (R_2 - P_2) + S_2 (R_1 - P_1) + a_2 (P_2 R_1 - P_1 R_2)$$

$$T_3 = P_2 R_3 - (S_2 R_3 + S_3 R_2)$$

$$T_4 = P_2 (S_3 - R_3 a_1)$$

$$k_1 = R_2 - P_2$$

$$P_1 = \frac{(v_{an})_{p=p_0} \gamma_{20}}{D_{max}}$$

$$P_2 = \frac{(v_{an})_{p=p_0} \left( \frac{\partial \gamma_2}{\partial p} \right)_{p=p_0} P_0}{D_{max}}$$

$$R_1 = \frac{(v_{an})_{p=p_0} \gamma_{10}}{D_{max}}$$

$$R_2 = \frac{1}{D_{max}} \left[ -v_{10} \left( \frac{\partial \gamma_1}{\partial p} \right)_{p=p_0} - v_{20} \left( \frac{\partial \gamma_2}{\partial p} \right)_{p=p_0} + (\gamma_{10} - \gamma_{20}) \left( \frac{\partial v_2}{\partial p} \right)_{p=p_0} \right] P_0$$

$$R_3 = (\gamma_{10} - \gamma_{20}) \left( \frac{\partial v_2}{\partial G_3} \right)_{p=p_0}$$

$$S_1 = \frac{(v_{an})_{p=p_0} \gamma_{10} q_{10}}{D_{max} (i_0 - q_{ns})}$$

$$S_2 = \frac{1}{D_{max} (i_0 - q_{ns})} \left\{ v_{10} \left[ \left( \frac{\partial q_1}{\partial p} \right)_{p=p_0} \gamma_{10} + q_{10} \left( \frac{\partial \gamma_1}{\partial p} \right)_{p=p_0} \right] + v_{20} \left[ i_{20} \left( \frac{\partial \gamma_2}{\partial p} \right)_{p=p_0} + \gamma_{20} \left( \frac{\partial i_2}{\partial p} \right)_{p=p_0} \right] - (\gamma_{10} q_{10} - i_{20} \gamma_{20}) \left( \frac{\partial v_2}{\partial p} \right)_{p=p_0} \right\} P_0$$

$$S_3 = \frac{\gamma_{10} q_{10} - \gamma_{20} i_{20}}{i_0 - q_{ns}} \left( \frac{\partial v_2}{\partial G_3} \right)_{p=p_0}$$



$$a_2 = \frac{i_0}{i_0 - q_{ns}}$$

Здесь:  $D_{max}$  — паропроизводительность котла (кг/сек);  
 $v_{en}$  — объем водяного пространства котла (м<sup>3</sup>);  
 $P$  — давление в барабане котла (кг/см<sup>2</sup>);  
 $\gamma_1$  — удельный вес котловой воды (кг/м<sup>3</sup>);  
 $\gamma_2$  — удельный вес насыщенного пара (кг/м<sup>3</sup>);  
 $v_2$  — объем пара под зеркалом испарения (м<sup>3</sup>);  
 $v_1$  — объем воды под зеркалом испарения (м<sup>3</sup>);  
 $G_3$  — количество пара, выделившегося через зеркало испарения (кг/сек);  
 $q_1$  — теплосодержание котловой воды (ккал/кг);  
 $q_{ns}$  — теплосодержание питательной воды (ккал/кг);  
 $i_0$  — теплосодержание перегретого пара (ккал/кг);  
 $i_2$  — теплосодержание насыщенного пара (ккал/кг).

Из уравнения (2) могут быть определены временные характеристики котла по уровню,  $\varphi_\lambda(t)$  и  $\varphi_{\mu_1}(t)$  т. е. изменение уровня воды в барабане котла при возмущении по расходу пара (или расходу топлива) и изменение уровня воды в барабане котла при возмущении по расходу воды

$$\varphi_\lambda(t) = A\lambda(1 - e^{-at}) + B\lambda t \quad (3)$$

$$\varphi_{\mu_1}(t) = A_{1\mu_1}(1 - e^{-at}) + B_{\mu_1}t. \quad (4)$$

Здесь:

$$A = k_1 \frac{T_1^2}{T_2^2} + \frac{T_3}{T_2}; \quad A_1 = \frac{T_4}{T_2} - k_1 \frac{T_1^2}{T_2^2}$$

$$B = -\frac{k_1}{T_2}; \quad a = \frac{T_2}{T_1^2}$$

Как следует из уравнения временной характеристики  $\varphi_\lambda(t)$  изменение уровня воды в барабане современного парового котла не определяет однозначно, как это имеет место в простейшем объекте, небаланс в котле.

Поскольку в современных паровых котлах единственным средством для восстановления уровня воды в барабане котла служит изменение подачи питательной воды, то представляет интерес определение характера поведения уровня воды в барабане котла при одновременном возмущении по расходу пара и расходу воды, направленных в сторону восстановления уровня. Даже и в этом случае, т. е. когда одновременно с измене-

нием расхода пара, подача воды изменена в противоположную сторону на такую же величину, не удастся удержать уровень на заданном значении.

Величина максимального отклонения уровня воды в барабане котла (при определенной величине возмущения) может быть уменьшена только за счет ограничения скорости нанесения возмущения, т. е. скорости изменения паровой нагрузки (либо расхода топлива).

Если предположить, что возмущение наносится со стороны паровой нагрузки и что при переходе от одного установившегося значения к другому нагрузка изменяется с постоянной скоростью  $v$ , то уравнение, определяющее изменение уровня воды в этом случае может быть записано в таком виде

$$T_1^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + T_2 \frac{d\varphi}{dt} = T_3 v - k_1 v t. \quad (5)$$

Откуда

$$\varphi_\lambda(t) = v [B_1(1 - e^{-\tau}) + (B_2 - B_3\tau)\tau], \quad (6)$$

где:

$$B_1 = -\frac{T_1^2}{T_2} \left[ \frac{T_3}{T_2} + k_1 \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^2 \right] = -B_2.$$

$$B_3 = \frac{k_1}{2} \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^2 \frac{T_1^2}{T_2}$$

$$\tau = \frac{T_2}{T_1^2} t.$$

Результаты аналитического исследования сложных физико-технических процессов, к которым, в частности, относятся процессы в пароводяном тракте котла могут считаться достоверными, лишь тогда когда они подтверждаются опытом — практикой.

Поэтому в работе особое внимание уделяется экспериментальной проверке на действующих объектах выводов, полученных в результате аналитического исследования. В частности, для подтверждения правомерности уравнения (2) изменения уровня воды в барабане котла была проведена серия опытов на действующих котлах. Сопоставление результатов экспериментального и аналитического исследования указывает на достаточную их сходимость. Это позволило использовать в исследованиях регулируемой системы приведенное выше уравнение изменения уровня воды в барабане котла.



Сложность задачи автоматизации питания современного парового котла заключается в том, что на регуляторы уровня возлагаются две задачи, а именно поддержание регулируемого параметра—уровня воды в барабане котла в заданных пределах и обеспечение минимального отношения мгновенных значений расхода воды к расходу пара.

Несмотря на то, что регуляторы уровня воды в паровых котлах применяются уже более 150 лет, до настоящего времени отсутствуют теоретические, либо экспериментальные обоснования целесообразности применения того или иного типа регулятора уровня с учетом динамических особенностей паровых котлов.

В работе приводятся аналитические и экспериментальные исследования переходных процессов наиболее распространенных одноимпульсных, изодромных, двухимпульсных и трехимпульсных изодромных регуляторов уровня.

Уравнение системы регулирования с трехимпульсным изодромным регулятором уровня может быть записано в таком виде:

$$T_1^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + T_2 \frac{d\varphi}{dt} = T_3 \frac{d\lambda}{dt} + T_4 \frac{d\mu_1}{dt} + k_1(\mu_1 - \lambda) \dots \text{объект}$$

$$T_m \frac{d\psi}{dt} + \psi = \varphi \text{ — инерционный измеритель уровня}$$

$$\eta = -\frac{\psi_\varphi}{\delta_\varphi} + \frac{\lambda}{\delta_\lambda} - \frac{\mu_1}{\delta_{\mu_1}} \text{ — „Муфта“ регулятора} \quad (7)$$

$$\sigma = \eta - \xi \text{ — золотник}$$

$$T_u \frac{d\xi}{dt} + \xi = T_u \frac{d\bar{\mu}_1}{dt} \text{ изодром}$$

$$T_c \frac{d\bar{\mu}_1}{dt} = \pm 1 \text{ сервомотор}$$

$$\mu_1 = a\bar{\mu} + b\nu \text{ регулирующий орган (клапан)}$$

где:

$\psi_\varphi$  — относительное перемещение измерителя уровня

$T_m$  — время инерции измерителя уровня;

$\eta$  — относительное перемещение „муфты“ регулятора;

$\delta_\varphi; \delta_\lambda; \delta_{\mu_1}$  — коэффициенты внутренней неравномерности регулятора соответственно по уровню, расходу пара и расходу воды;

$\sigma$  — относительное перемещение золотника;

$\xi$  — относительное перемещение рычага изодрома;

$T_u$  — время изодрома;

$T_c$  — время сервомотора;

$\mu_1$  — относительное перемещение сервомотора;

$\nu$  — относительное изменение перепада давления на регулирующем клапане;

$a, b$  — коэффициенты.

Системы уравнений для одноимпульсного изодромного и двухимпульсного регуляторов уровня могут быть получены как частные случаи из приведенной выше системы (7).

При аналитических исследованиях предполагается, что регуляторы уровня работают в скользящем режиме, как это обычно и имеет место в эксплуатационных условиях.

Исследуя работу регуляторов при возмущениях по расходу пара, полагаем, что перепад давления на регулирующем клапане остается постоянным  $\nu=0$  и коэффициент  $a=1$ .

Тогда вместо (7) получим

$$T_1^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + T_2 \frac{d\varphi}{dt} = T_3 \frac{d\lambda}{dt} + T_4 \frac{d\mu_1}{dt} + k_1(\mu_1 - \lambda)$$

$$\frac{1}{\delta_\lambda} \left( T_u \frac{d\lambda}{dt} + \lambda \right) - \frac{1}{\delta_{\mu_1}} \left( T_u \frac{d\mu_1}{dt} + \mu_1 \right) -$$

$$- \frac{1}{\delta_\varphi} \left( T_m \frac{d\psi_\varphi}{dt} + \psi_\varphi \right) = T_u \frac{d\mu_1}{dt} \quad (8)$$

$$T_m \frac{d\psi_\varphi}{dt} + \psi_\varphi = \varphi.$$

Решая (8) относительно  $\varphi$  и записывая результат в операторной форме, получим:

$$(a_{03}P^4 + a_{13}P^3 + a_{23}P^2 + a_{33}P + a_{43})\varphi = (b_{03}P^3 + b_{13}P^2 + b_{23}P + b_{33})\lambda. \quad (9)$$

$$\text{Здесь: } a_{03} = T_1^2 T_m T_u (1 + \delta_{\mu_1})$$

$$a_{13} = T_1^2 (T_m + T_u + \delta_{\mu_1} T_u) + T_2 T_m T_u (1 + \delta_{\mu_1})$$

$$a_{23} = T_1^2 + T_2 (T_m + T_u + \delta_{\mu_1} T_u) + \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_\varphi} T_4 T_u$$



$$a_{33} = T_2 + \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\varphi}} (T_4 + k_1 T_u)$$

$$a_{48} = \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\varphi}} k_1$$

$$b_{03} = T_3 T_m T_u (1 + \delta_{\mu_1}) + \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\lambda}} T_4 T_u T_m$$

$$b_{13} = T_3 (T_m + T_u + \delta_{\mu_1} T_u) - k_1 T_m T_u (1 + \delta_{\mu_1}) + [T_4 T_u + T_m (T_4 + k_1 T_u)] \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\lambda}}$$

$$b_{23} = T_3 - k_1 (T_m + T_u + \delta_{\mu_1} T_u) + \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\lambda}} [k_1 T_m + (T_4 + k_1 T_u)]$$

$$b_{33} = k_1 \left( \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\lambda}} - 1 \right).$$

То же относительно  $\mu_1$ ,

$$(a_{03} P^4 + a_{13} P^3 + a_{23} P^2 + a_{33} P + a_{43}) \mu_1 = (C_{03} P^4 + C_{13} P^3 + C_{23} P^2 + C_{33} P + C_{43}) \lambda \quad (10)$$

Здесь:  $C_{03} = T_1^2 T_u T_m \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\lambda}}$

$$C_{13} = [T_1^2 T_m + T_u (T_1^2 + T_2 T_m)] \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\lambda}}$$

$$C_{23} = (T_u T_2 + T_1^2 + T_2 T_m) \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\lambda}} - T_u T_3 \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\varphi}}$$

$$C_{33} = T_3 \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\lambda}} - (T_3 - k_1 T_u) \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\varphi}}$$

$$C_{43} = k_1 \frac{\delta_{\mu_1}}{\delta_{\varphi}}$$

При исследованиях влияния на работу регуляторов возмущения по перепаду давления на регулирующем клапане полагаем  $\lambda = 0$ . Тогда вместо (7) получим:

$$T_1^2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + T_2 \frac{d\varphi}{dt} = T_4 \frac{d\mu_1}{dt} - k_1 \mu_1$$

$$- \frac{T_u}{\delta_{\mu_1}} \frac{d\mu_1}{dt} - \frac{\mu_1}{\delta_{\mu_1}} - \frac{T_u}{\delta_{\varphi}} \frac{d\psi_{\varphi}}{dt} - \frac{\psi_{\varphi}}{\delta_{\varphi}} = T_u \frac{d\bar{\mu}_1}{dt} \quad (11)$$

$$T_m \frac{d\varphi_{\varphi}}{dt} + \psi_{\varphi} = \varphi$$

$$\mu_1 = a\bar{\mu}_1 + b\nu.$$

Решая (11) относительно  $\varphi$  и записав решение в операторной форме, получим

$$a_{03} P^4 + a_{13} P^3 + a_{23} P^2 + a_{33} P + a_{43} \varphi = (b_{03} P^3 + b_{13} P^2 + b_{23} P) \nu \quad (12)$$

Здесь:

$$b_{03} = b T_u T_4 T_m \delta_{\mu_1}$$

$$b_{13} = b T_u (k_1 T_m + T_4) \delta_{\mu_1}$$

$$b_{23} = b k_1 T_u \delta_{\mu_1}$$

То же относительно  $\mu_1$

$$(a_{03} P^4 + a_{13} P^3 + a_{23} P^2 + a_{33} P + a_{43}) \mu_1 = (C_{03} P^4 + C_{13} P^3 + C_{23} P^2) \nu \quad (13)$$

Здесь:  $C_{03} = b T_u T_1^2 T_m \delta_{\mu_1}$

$$C_{13} = b T_u (T_1^2 + T_2 T_m) \delta_{\mu_1}$$

$$C_{23} = b T_u T_2 \delta_{\mu_1}$$

Исследование поведения уровня воды в барабане парового котла на действующих установках показывает, что уровень воды, как правило, непрерывно изменяется то в сторону повышения, то в сторону понижения, не сохраняя в течение длительного времени постоянного значения. Характер изменения уровня воды в барабане котла свидетельствует о периодическом характере возмущений, действующих на котел в процессе его работы. Возмущения возможны со стороны потребления пара, расхода топлива и расхода воды. Эти возмущения не имеют строгой закономерности, они могут возникать одновременно и порознь, действовать в одну сторону или в разные стороны.



В результате статистической обработки суточных диаграмм за продолжительный период, можно с достаточной для практики точностью установить примерный вид возмущений, которые носят обычно периодический характер. Поэтому при аналитических исследованиях качества работы регуляторов уровня следует исходить не только из скачкообразных возмущений, как это обычно принято, но и из наиболее характерных для котельного агрегата периодических возмущений. Изменение уровня воды в барабане котла при единичном скачкообразном возмущении по расходу пара  $\lambda - \varphi_\lambda(t)$  и перепаду давления на регулирующем клапане  $\nu - \varphi_\nu(t)$  для различных типов регуляторов уровня определяем по приведенным выше дифференциальным уравнениям.

Для системы с трехимпульсным изодромным регулятором уровня при скачкообразном возмущении по расходу пара, изменение уровня  $\varphi_{3\lambda}(t)$  определяется из выражения вида:

$$\begin{aligned} \frac{a_{03}}{b_{03\lambda}} \varphi_{3\lambda}(t) = & \frac{\gamma_3^2 - A_{13\lambda}\gamma_3 + A_{03\lambda}}{(\delta_3 - \gamma_3)[(\alpha_3 - \gamma_3)^2 + \beta_3^2]} e^{-\gamma_3 t} + \\ & + \frac{\delta_3^2 - A_{13\lambda}\delta_3}{(\gamma_3 - \delta_3)[(\alpha_3 - \delta_3)^2 + \beta_3^2]} e^{-\delta_3 t} + \\ & + \frac{1}{\beta_3} \sqrt{\frac{(\alpha_3^2 - \beta_3^2 - A_{13\lambda} + A_{03\lambda})^2 + \beta_3^2(A_{13\lambda} - 2\alpha_3)^2}{[(\delta_3 - \alpha_3)^2 + \beta_3^2][(\gamma_3 - \alpha_3)^2 + \beta_3^2]}} \times \\ & \times e^{-\alpha_3 t} \sin(\beta_3 t + \psi_3) \end{aligned} \quad (14)$$

$$A_{03\lambda} = \frac{b_{13}}{b_{03}}; \quad A_{13} = \frac{b_{23}}{b_{03}}$$

$$\gamma_3 = -p_1; \quad \delta_3 = -p_2; \quad \alpha_3 = -\rho$$

$p_1, p_2, p_3 = \rho + \beta i; \quad p_4 = \rho - \beta i$  — корни характеристического уравнения системы (9).

При скачкообразном возмущении по перепаду давления на регулирующем клапане, изменение уровня воды в барабане котла  $\varphi_{3\nu}(t)$  определяем также из уравнения (14) заменой коэффициентов с индексами  $\lambda$  на  $\nu$ .

Аналогичным путем могут быть получены выражения изменения уровня воды в барабане котла для двухимпульсного и одноимпульсного изодромного регуляторов.

Сравнительная оценка качества работы регуляторов уровня при периодических возмущениях производится для идеализированного случая, когда на регулируемый объект действуют гармонические возмущения синусоидальной формы с частотой  $\omega$ .

О качестве работы регуляторов уровня в этом случае судят по отношению амплитуд отклонения регулируемого параметра  $\Phi_{\lambda, \nu}$  и регулируемой среды  $M_{\lambda, \nu}$  к амплитуде возмущающего воздействия  $L_{\lambda, \nu}$ .

Эти отношения амплитуд определяются из соответствующих уравнений регулируемых систем.

Применительно к системе с трехимпульсным изодромным регулятором уровня получены следующие выражения для отношения амплитуд:

$$\frac{\Phi_{3\lambda}}{L_{3\lambda}} = \frac{\sqrt{(b_{33} - b_{13}\omega^2)^2 + (b_{23}\omega - b_{03}\omega^3)^2}}{\sqrt{(a_{03}\omega^4 - a_{23}\omega^2 + a_{43})^2 + (a_{33}\omega - a_{13}\omega^3)^2}}$$

$$\frac{M_{3\lambda}}{L_{3\lambda}} = \frac{\sqrt{(C_{43} + C_{03}\omega^4 - C_{23}\omega^2)^2 + (C_{33}\omega - C_{13}\omega^3)^2}}{\sqrt{(a_{03}\omega^4 - a_{23}\omega^2 + a_{43})^2 + (a_{33}\omega - a_{13}\omega^3)^2}}$$

$$\frac{\Phi_{3\nu}}{L_{3\nu}} = \frac{\sqrt{(b_{13\nu}\omega^2)^2 + (b_{23\nu}\omega - b_{03\nu}\omega^3)^2}}{\sqrt{(a_{03}\omega^4 - a_{23}\omega^2 + a_{43})^2 + (a_{33}\omega - a_{13}\omega^3)^2}}$$

$$\frac{M_{3\nu}}{L_{3\nu}} = \frac{\sqrt{(C_{03\nu}\omega^4 - C_{23\nu}\omega^2)^2 + (C_{13\nu}\omega^3)^2}}{\sqrt{(a_{03}\omega^4 - a_{23}\omega^2 + a_{43})^2 + (a_{33}\omega - a_{13}\omega^3)^2}}$$

Аналогичным путем могут быть получены отношения амплитуд для одноимпульсного изодромного и двухимпульсного регуляторов уровня.

Особое внимание в работе уделено экспериментальному исследованию динамики систем регулирования уровня воды в барабане парового котла. Сравнительные испытания регуляторов проводились на современных котлах в нормальных эксплуатационных условиях, когда обычно имеют место периодические возмущения, и при единичных скачкообразных возмущениях изменением подачи топлива, расхода пара и расхода воды.

На основании обширного экспериментального материала и аналитических исследований сделаны следующие выводы:

1. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили допустимость применения для целей аналитического исследования процессов регулирования уровня воды в барабане, уравнения питательного объема котла, в котором используются



статические зависимости объема пара под зеркалом испарения от нагрузки котла и давления пара.

2. Экспериментальными исследованиями установлено, что кипящий экономайзер, являясь последовательно включенным с барабаном аккумулирующим объемом, оказывает существенное влияние на динамику изменения уровня воды в барабане котла.

3. В современном котельном агрегате нет средств для эффективного восстановления уровня, отклонение которого обусловлено «набуханием» питательного объема.

Единственным средством для уменьшения величины отклонения уровня воды в барабане котла при изменениях паровой нагрузки является ограничение скорости ее изменения.

Допустимая скорость изменения паровой нагрузки устанавливается для каждого котла, в зависимости от его динамических свойств и допустимой по условиям сепарации и уноса величины отклонения уровня от равновесного положения.

4. Для класса объектов, к которым относится, в частности, и питательный объем котла, поведение регулируемого параметра не определяет однозначно, как это имеет место в простейших объектах, небаланс в системе.

В связи с этим, для некоторых объектов этого класса возникает два рода понятий качества регулирования, а именно:

- а) качество поддержания регулируемого параметра,
- б) качество поддержания баланса в регулируемом объекте.

5. Проведенные исследования показали, что одноимпульсный изодромный регулятор обеспечивает удовлетворительное поддержание уровня воды в барабане котла, как при рядовых и резких изменениях паровой нагрузки, так и вследствие аналогичных изменений перепада давления на регулирующем клапане. Однако, это регулирование уровня сопровождается более резкими, чем у двух и трехимпульсного регуляторов, изменениями расхода воды в котел.

6. Одноимпульсный изодромный регулятор с нулевой неравномерностью поддерживает эту статическую характеристику вне зависимости от вида возмущений и даже подвода части питательной воды помимо регулирующего клапана.

7. Двухимпульсный регулятор уровня как при рядовых, так и резких возмущениях, связанных с изменением расхода пара из котла, обеспечивает поддержание заданного значения уровня, при значительно более спокойном по сравнению с одноимпульсным регулятором, изменением расхода воды в котел.

8. При изменениях перепада давления на регулирующем клапане, а также при поступлении воды в котел помимо регулирующего клапана, двухимпульсный регулятор работает как одноимпульсный с жестким выключателем.

Установившееся значение уровня, поддерживаемого регулятором, в этом случае изменяется в соответствии с его статической характеристикой.

9. Трехимпульсный изодромный регулятор обеспечивает, при рядовых и резких изменениях паровой нагрузки, а также перепада давления на регулирующем клапане, вполне удовлетворительное поддержание уровня воды в барабане котла при таком же благоприятном характере изменения расхода воды в котел.

10. При возможных возмущениях по расходу пара из котла и перепаду давления на регулирующем клапане трехимпульсный регулятор наилучшим образом удовлетворяет требованиям поддержания уровня воды в барабане котла и минимального небаланса расход пара — расход воды.

11. Трехимпульсный регулятор уровня включает в себя положительные качества одноимпульсного изодромного и двухимпульсного регуляторов и в этом смысле является универсальным.

