

УДК 658.527.012.122

Параметрический синтез регуляторов теплоэнергетических объектов с использованием информационного подхода

А.М. Прохоренков¹, Н.М. Качала²

¹ Политехнический факультет МГТУ, кафедра автоматике и вычислительной техники

² Экономический факультет МГТУ, кафедра информационных систем и прикладной математики

Аннотация. Рассматриваются вопросы синтеза адаптивной системы управления с выполнением оценки пропускной способности канала управления и пропускной способности канала возмущения. Для достижения заданных показателей качества управления предложен критерий, учитывающий случайный характер возмущающих воздействий. Представлены результаты моделирования системы управления уровнем котловой воды, реализованной на базе адаптивного трехимпульсного регулятора.

Abstract. Design of adaptive control system estimating disturbance channel capacity has been considered. In order to provide prescribed control quality items a criterion has been suggested. It takes into account random character of disturbing actions. Modeling results for a control system of boiler water level realized on the base of adaptive three-pulse regulator have been presented.

Ключевые слова: адаптивное управление, трехимпульсный регулятор, случайный процесс, паровой котел, информационный подход

Key words: adaptive control, three-pulse regulator, random process, steam boiler, information approach

1. Введение

Одним из основных направлений совершенствования систем управления (СУ) является повышение качества управления и стабилизации технологических параметров в достаточно узких пределах. Решение задачи обеспечения заданного качества управления является актуальным как при проектировании СУ, так и при их промышленной эксплуатации. Наиболее остро требования качественной настройки регуляторов проявляются на теплоэнергетических предприятиях, что вызвано необходимостью экономии топливно-энергетических ресурсов.

Общая задача системы управления котлом – поддержание на выходе котла требуемого режима по температуре, давлению и расходу пара. Основными параметрами, характеризующими вектор состояния парового котла как объекта управления, являются уровень воды, давление пара, разрежение в верхней части топки, избыток воздуха за пароперегревателями, концентрация оксидов азота и углерода в дымовых газах, солесодержание котловой воды. Особенностью паровых барабанных котлов как объектов управления является относительная автономность основных каналов регулирования (Плетнев, 1995). Это позволяет осуществлять стабилизацию управляемых величин с помощью независимых контуров распределённой многосвязной СУ. Управляющее воздействие того или иного участка служит основным способом стабилизации его выходной величины, а другие воздействия являются по отношению к этому участку внутренними или внешними возмущениями (Плетнев, 1995; Ротач, 2008).

Одной из важнейших и труднореализуемых задач является задача поддержания уровня воды в барабане парового котла в допустимых пределах с целью исключения аварийных ситуаций, к которым может привести как повышение, так и снижение уровня относительно предельно допустимых значений. Барабанный котел с естественной циркуляцией воды обладает рядом свойств, затрудняющих поддержание уровня воды в переходных режимах. Вследствие возмущений, обусловленных изменением расхода пара (нагрузки), а также подпитки котла водой, процесс изменения уровня воды характеризуется запаздыванием, "набуханием" и отсутствием самовыравнивания (Плетнев, 1995). В современных СУ уровнем воды барабанных котлов находят широкое применение трехимпульсные регуляторы (Левин, 1987; Плетнев, 1995; Ротач, 2008).

В настоящее время можно выделить следующие направления исследований по проблемам управления паровыми котлами тепловых электростанций и отопительных котельных: совершенствование известных структурных схем на базе новой элементной базы; применение критериев управления, направленных на обеспечение экономии энергоресурсов (Кузеванов и др., 2007; Левин, 1987); реализация СУ на базе нечеткой логики (Ковриго и др., 2007) и нейронных сетей (Чернов, Аbruков, 2009); анализ и имитационное моделирование систем с переменной структурой (Каревский, Бурковский, 2007).

Многочисленность работ и широта направлений исследований говорят об актуальности поиска новых решений в области управления теплоэнергетическими процессами.

Анализ эксплуатационных характеристик котла как объекта управления показал, что его динамические характеристики изменяются во времени, а протекающие в системе управления процессы являются нестационарными. Как показала практика проектирования и эксплуатации средств автоматизации в промышленности (Ковриго и др., 2007; Ротач, 2007), обеспечение заданного показателя качества управления возможно, только если СУ обладает адаптивными свойствами.

В системах, где процессы, протекающие в объектах, имеют случайный характер, наилучшим критерием качества управления, в предположении нормального распределения ошибки, является критерий минимума средней квадратической ошибки (Основы..., 1968). В условиях отсутствия априорных сведений о действительных распределениях ошибки и случайных помех целесообразно использование информационного подхода, в котором предположение о нормальном распределении ошибки управления не является ограничением при решении задачи параметрической оптимизации (Клюев, Лебедев, 1994). Известна практика использования информационного подхода в решении задач оптимизации одноконтурных СУ, систем управления с компенсацией возмущения и каскадных схем с вспомогательной переменной (Клюев, Лебедев, 1994). Проблемы синтеза трехимпульсных схем в известных источниках не освещены. В данной работе рассматривается применение информационного подхода при параметрическом синтезе трехимпульсной схемы управления на примере СУ уровнем питательной воды в барабане парового котла.

2. Постановка задачи

При формировании стратегии управления следует учитывать случайный характер протекающих процессов. Для систем стабилизации выходных параметров объектов стратегия управления может быть задана, исходя из необходимости обеспечения следующих условий:

смещение управляемой величины $y(t)$ по математическому ожиданию должно стремиться к минимально допустимому значению:

$$\varepsilon_M(t) = |M_3(t) - M_T(t)| \rightarrow \varepsilon_{M\text{доп}}; \quad (1)$$

смещение управляемой величины $y(t)$ по дисперсии должно стремиться к минимально допустимому значению:

$$\varepsilon_{\sigma^2}(t) = |\sigma_3^2(t) - \sigma_T^2(t)| \rightarrow \varepsilon_{\sigma^2\text{доп}}, \quad (2)$$

где $M_3(t)$, $M_T(t)$ – заданное и текущее значения математического ожидания управляемой величины, $\sigma_3^2(t)$, $\sigma_T^2(t)$ – заданное и текущее значения дисперсии управляемой величины.

В связи с тем, что качество управления можно оценить по смещению математического ожидания (1) и дисперсии (2) управляемой величины, предлагается реализация управления, обеспечивающего получение на интервале управления N минимум функционала (Прохоренков и др., 1992):

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_{Mi}^2 + \beta \varepsilon_{\sigma_i^2}^2) \rightarrow \min \quad (3)$$

при ограничениях

$$\varepsilon_{Mi} \leq \Delta_{M\text{доп}} \text{ и } \varepsilon_{\sigma_i^2} \leq \Delta_{\sigma^2\text{доп}}, \quad (4)$$

здесь β – весовой коэффициент, i – момент времени при переходе к дискретным отсчетам.

Состояние технологического процесса в любой момент времени определяется управляемой величиной $y(t)$. Точность стабилизации параметра $y(t)$ характеризуется допустимой без ущерба для протекания технологического процесса дисперсией $\sigma_{\text{у\text{мин}}}^2$. С информационных позиций величина $y(t)$, обладая некоторой неопределенностью, может быть охарактеризована энтропией $H(y)$. Цель управления объектом сводится к уменьшению неопределенности $y(t)$ до уровня $H(y)_{\text{мин}}$, заданного требованиями по допустимому значению дисперсии $\sigma_{\text{у\text{мин}}}^2$ управляемой величины.

Для обеспечения требуемых показателей качества управления необходимо, чтобы система была управляема. Как известно, система управляема, если она может быть переведена из любого состояния $y(t)$ при $t = t_0$ в желаемое состояние $y(t)$ за конечный интервал времени (Основы..., 1968). Под действием возмущения λ изменяется энтропия управляемой величины y со скоростью c_λ , определяемой пропускной способностью объекта по каналу возмущения. Пропускной способностью канала передачи информации называется максимальное количество информации, которое может быть передано по данному каналу в единицу времени (Клюев, Лебедев, 1994; Основы..., 1968). Спустя время, необходимое СУ для обработки информации, управляющее устройство вырабатывает управление $u(t)$, компенсирующее возмущение и

изменяющее энтропию управляемой величины с максимально возможной скоростью c_u , определяемой пропускной способностью объекта по каналу управления. Математически информационные условия управляемости записываются в следующем виде (Клюев, Лебедев, 1994):

$$\Delta c = c_u - c_\lambda > 0. \quad (5)$$

При этом, чем больше Δc , тем выше точность управления.

Задачу синтеза СУ можно сформулировать следующим образом: для объекта управления (парового котла), динамика которого описана в (Левин, 1987), найти управление

$$u(t) = f(y(t), x(t), \{v(t)\}, \{q(t)\}),$$

как функцию от величины задания $x(t)$, управляемой величины $y(t)$ и множеств контролируемых $\{v(t)\}$ и неконтролируемых $\{q(t)\}$ возмущений, обеспечивающее движение замкнутой системы из любого состояния $y(t_0)$ в желаемое состояние $y(t_1)$ в соответствии с заданным критерием (3) при выполнении ограничений (4) и условия управляемости (5) на заданном интервале управления.

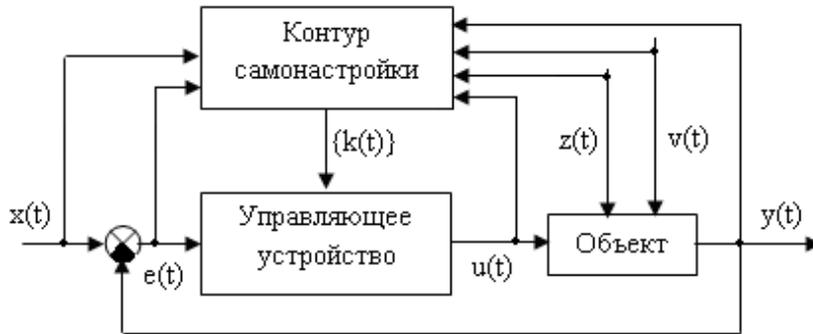


Рис. 1. Общая структура системы управления

Предлагаемая структура СУ (рис. 1), входит в класс самонастраивающихся систем с замкнутым контуром. Самонастройка производится по результатам измерения управляемой величины $y(t)$, контролируемых возмущений $\{v(t)\}$, задающего воздействия $x(t)$, ошибки управления $e(t)$ и, для трехимпульсных схем регулирования, вспомогательной переменной $z(t)$. Реализация стратегии управления объектом в соответствии с критерием (3) состоит в изменении значений коэффициентов $\{k(t)\}$ настройки регулятора.

3. Параметрический синтез трехимпульсной схемы регулирования

Структура трехимпульсной схемы регулирования представлена на рис. 2, где приняты следующие условные обозначения: x – заданное значение уровня, y – текущее значение уровня воды в

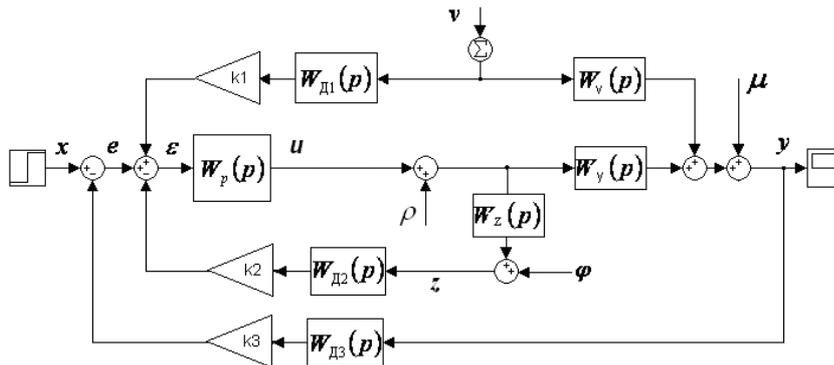


Рис. 2. Обобщенная структура трехимпульсной схемы регулирования

барабане котла, z – расход питательной воды, y – расход пара из барабана котла, μ – неконтролируемая помеха, приведенная к выходу объекта управления, ρ – возмущения со стороны регулирующего питательного клапана, φ – неконтролируемая помеха, $W_p(p)$, $W_y(p)$, $W_v(p)$, $W_z(p)$ – передаточные функции соответственно регулятора, объекта по каналу управления, каналу возмущения, по каналу вспомогательной переменной, $W_{д1}(p)$, $W_{д2}(p)$, $W_{д3}(p)$ – передаточные функции датчиков, k_1 , k_2 , k_3 – коэффициенты обратной связи по каналам расхода пара, расхода воды и уровня воды.

С информационной точки зрения управляемая величина y будет инвариантна к измеряемому возмущению v , если пропускная способность c_{uy} объекта по каналу управления будет больше пропускной способности c_{vy} объекта по каналу возмущения v (Клюев, Лебедев, 1994). Добавочный канал управления по координате z необходимо построить таким образом, чтобы часть помех ρ (в пределе все помехи) компенсировалась в нем управлением u прежде, чем эта часть помех повлияет на управляемую величину y .

Применение информационного подхода для решения задачи параметрического синтеза системы регулирования предполагает преобразование замкнутой системы в разомкнутый канал передачи информации. Замкнутую систему регулирования питания котла, структурная схема которой изображена на рис. 2, можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} y = \mu + (u + \rho)W_y(p) + vW_v(p) \\ z = (u + \rho)W_z(p) + \varphi \\ u = [x - yk_3W_{д3}(p) + vk_1W_{д1}(p) - zk_2W_{д2}(p)]W_p(p) \end{cases} \quad (6)$$

Из системы уравнений (6) получим выражение для управляемой величины:

$$y = x \frac{1}{W'(p)} + \mu \frac{1/W_p(p)W_y(p) + k_2W_{д2}(p)W_z(p)/W_y(p)}{W'(p)} + \rho \frac{1}{W_p(p)W'(p)} - \varphi \frac{k_2W_{д2}(p)}{W'(p)} + v \frac{W_v(p)/W_p(p)W_y(p) + k_1W_{д1}(p) + k_2W_{д2}(p)W_z(p)W_v(p)/W_y(p)}{W'(p)} + v \frac{W_v(p)/W_p(p)W_y(p) + k_1W_{д1}(p) + k_2W_{д2}(p)W_z(p)W_v(p)/W_y(p)}{W'(p)}, \quad (7)$$

где $W'(p) = k_3W_{д3}(p) + \frac{1}{W_p(p)W_y(p)} + \frac{k_2W_{д2}(p)W_z(p)}{W_y(p)}$.

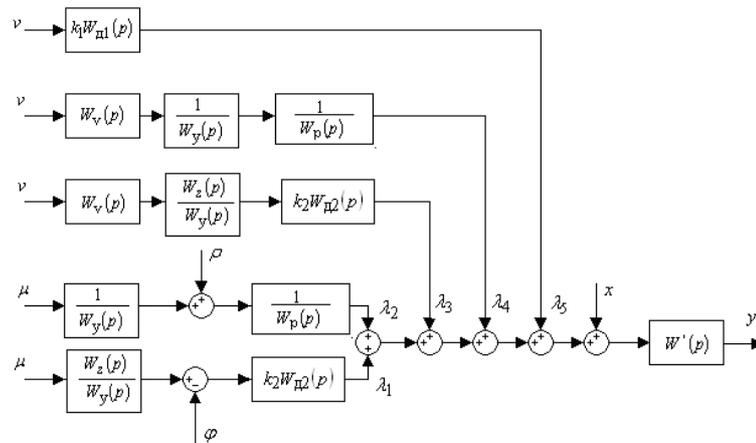


Рис. 3. Преобразованная разомкнутая структура трехимпульсной схемы регулирования

Вынося общий множитель $1/W'(p)$ в правой части уравнения (7) за скобки, преобразуем замкнутую схему (рис. 2) в разомкнутую схему, изображенную на рис. 3.

С позиций информационного подхода в качестве критерия оптимальности принимают критерий максимума разности скорости передачи информации R_x о задающем воздействии по каналу управления и скорости передачи информации по каналам возмущения R_λ (Клюев, Лебедев, 1994): $\Delta R = R_x - R_\lambda$. При оптимальной структуре и оптимальных параметрах регулятора справедливым будет равенство $\Delta R_{max} = \Delta c$, здесь Δc определяется по формуле (5).

Для одноконтурной СУ скорость передачи информации о задающем воздействии x в полосе частот $[0, F]$ при наличии аддитивной помехи и при произвольных спектрах сигнала S_x и помехи S_λ определяется по формуле, приведенной в (Клюев, Лебедев, 1994):

$$R_x = \int_0^F \log \left[1 + \frac{S_x(f) |W_p(jf) W_{\text{object}}(jf)|^2}{S_\lambda(f)} \right] df.$$

Скорость передачи информации по возмущающему воздействию λ :

$$R_\lambda = \int_0^F \log \left[1 + \frac{S_\lambda(f)}{S_x(f) |W_p(jf) W_{\text{object}}(jf)|^2} \right] df.$$

Приведенные формулы использовались при определении скорости передачи информации для трехимпульсной схемы. С учетом рекомендаций, изложенных в (Клюев, Лебедев, 1994), будем считать, что задающее и все возмущающие воздействия взаимно некоррелированы. Для рассматриваемой системы (рис. 3) разность скоростей передачи информации по каналу управления и по каналам возмущения имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta R = & \int_0^F \log S_x(f) df - \int_0^F \log \left\{ S_p(f) \left| \frac{1}{W_p(jf)} \right|^2 + S_\varphi(f) |kD|^2 + S_\mu(f) \left| \frac{1}{W_y(jf) W_p(jf)} + \frac{kD W_z(jf)}{W_y(jf)} \right|^2 + \right. \\ & \left. + S_\nu(f) \left| \frac{W_\nu(jf)}{W_y(jf) W_p(jf)} + \frac{kD W_z(jf) W_\nu(jf)}{W_y(jf)} + kD \right|^2 \right\} df. \end{aligned} \quad (8)$$

В уравнении (8) символом S с индексами обозначены спектры соответствующих сигналов. Передаточные функции датчиков расхода и уровня можно представить в виде пропорционального звена: $W_{д1}(p) = W_{д2}(p) = D$. Для того, чтобы система не обладала свойством остаточной неравномерности, коэффициенты k_1 и k_2 (см. рис. 2) подбираются таким образом, чтобы в установившихся режимах сигналы по расходу питательной воды и расходу пара взаимно компенсировались. Если предположить, что датчики по расходу пара и воды имеют одинаковые метрологические характеристики, то $k_1 = k_2 = k$.

Передаточная функция промышленных ПИД-регуляторов имеет следующий вид:

$$W_p(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d p}{T_f p + 1} \right),$$

здесь T_f – постоянная времени сглаживающего фильтра, включаемого в дифференциатор. Связь постоянной дифференцирования T_d и T_f определяется коэффициентом связи $k_f = T_d/T_f$, величина которого в промышленных регуляторах обычно ограничивается величиной 4-8 (Ротач, 2008).

Параметрический синтез СУ при заданной ее структуре проводится в два этапа. На первом этапе определяется граница области устойчивости СУ. На втором этапе осуществляется поиск оптимальных значений параметров системы на границе области устойчивости. Задача оптимизации при заданных ограничениях на k_f и предположении, что $k = 1$, сводится к максимизации выражения (8) на границе области устойчивости:

$$\psi = \psi(k_p, T_i, T_d, k_3).$$

Решение поставленной задачи оптимизации связано с определенными вычислительными трудностями. В (Клюев, Лебедев, 1994), на примере каскадной схемы показано, что возможна раздельная оптимизация схемы по каналам помех. Критерии оптимальности по каждому из каналов возмущений имеют следующий вид:

$$\Delta R_1 = \int_0^F \log |W_p(jf)|^2 df + \int_0^F \log \frac{S_x(f)}{S_\mu(f) |1/W_y(jf)|^2 + S_\varphi(f)} df; \quad (9)$$

$$\Delta R_2 = \int_0^F \log \left| \frac{1}{kD} \right|^2 df + \int_0^F \log \frac{S_x(f)}{S_\mu(f) |W_z(jf)/W_y(jf)|^2 + S_\varphi(f)} df; \quad (10)$$

$$\Delta R_3 = \int_0^F \log \left| \frac{1}{kD} \right|^2 df + \int_0^F \log \frac{S_x(f)}{S_\nu(f) |W_z(jf)/W_y(jf)|^2 |W_\nu(jf)|^2} df; \quad (11)$$

$$\Delta R_4 = \int_0^F |W_p(jf)|^2 df + \int_0^F \log \frac{S_x(f)}{S_v(f) |W_v(jf)/W_y(jf)|^2} df ; \quad (12)$$

$$\Delta R_5 = \int_0^F \log \left| \frac{1}{kD} \right|^2 df + \int_0^F \log \frac{S_x(f)}{S_v(f)} df . \quad (13)$$

Вторые слагаемые в правой части уравнений (9-13) не зависят от параметров k_p, T_n, T_d, k_3 . Задача оптимизации при принятом допущении, что $k = 1$, сводится к максимизации первых слагаемых в уравнениях (9, 12), а максимизации подлежит только функция:

$$\Theta = \int_0^F \log |W_p(jf)|^2 df . \quad (14)$$

Для решения задачи оптимизации уравнения (14) используем метод неопределенных множителей Лагранжа, в соответствии с которым составим функцию вида:

$$Q_1 = \int_0^F \log |W_p(jf)|^2 df + g \psi(k_p, T_n, T_d, k_3), \quad (15)$$

где g – неопределенный множитель.

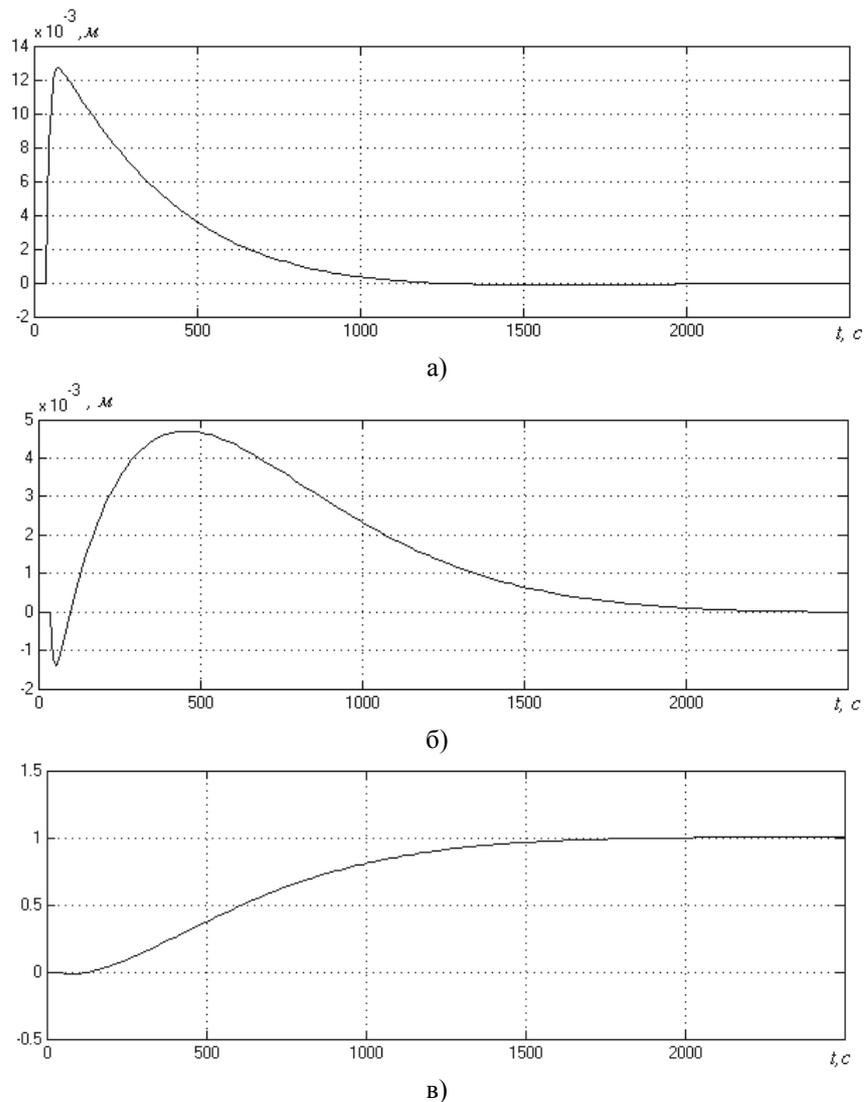


Рис. 4. Изменение уровня в барабане парового котла при подаче возмущения по каналу расхода пара (а) и по каналу подачи воды (б), при изменении задания (в)

Оптимальные параметры регулятора находятся путем решения системы уравнений, полученной в результате определения частных производных по параметрам k_p , $T_{ин}$, $T_{д}$, k_3 , входящим в уравнение (15). Методика решения системы уравнений изложена в (Клюев, Лебедев, 1994).

Рассмотренный выше подход использовался при настройке СУ уровнем питательной воды парового барабанного котла ГМ-50-14 на этапах пуско-наладочных работ и разработки режимных карт. Передаточные функции объекта управления получены с помощью метода аппроксимации кривых разгона (Стефани, 1972). Наряду с этим выполнено имитационное моделирование СУ в среде Matlab. Результаты моделирования при единичных ступенчатых воздействиях и с учетом запаздывания, свойственного реальным системам, приведены на рис. 4, где за нулевое значение принят средний уровень в барабане котла.

Приращение уровня воды в начальный момент времени, соответствующее увеличению расхода пара (рис. 4а), а также уменьшение уровня воды при подаче питательной воды в котел (рис. 4б), обусловлены явлением "вскипания" пограничного слоя раздела сред. Результаты моделирования системы управления при изменении задания по уровню, в относительных единицах, приведены на рис. 4в.

4. Алгоритм адаптации

Система управления уровнем воды в барабане парового котла является двухуровневой, в которой на нижнем уровне находится традиционный ПИД-регулятор, а на верхнем – блок формирования поправок к коэффициентам регулятора.

Оптимальные параметры регулятора при информационном подходе определяются в полосе частот канала передачи информации $[0, F]$, что следует из постановки задачи параметрического синтеза и ее решения (формулы 8-16). Однако полоса частот канала передачи может изменяться, что связано со спецификой работы котлоагрегатов. Об изменении спектральных характеристик как внешних возмущений (изменение нагрузки – расхода пара), так и внутренних неконтролируемых возмущений можно судить по изменению дисперсии управляемой величины. Для решения задачи формирования поправок к коэффициентам передачи регулятора были проведены натурные испытания СУ уровнем воды. Рабочий диапазон по расходу пара был разделен на 20 равных интервалов. Для каждого i -го значения расхода пара $v_{пi}$ определялись и записывались в базу данных коэффициенты регулятора питания котла, обеспечивающие минимум критерия (3) $J_{\text{опт}}$ и выполнение ограничений вида (4). Наряду с этим, в базе данных для ситуации, удовлетворяющей ограничениям (4), сохранялись значения критерия J_{ij} для j -той комбинации коэффициентов регулятора, входящих в область устойчивости СУ. Ограничения по смещению математического ожидания и дисперсии задавались, исходя из требований к качеству регулирования уровня воды в барабане парового котла. В стационарных режимах котла, согласно технической документации, максимально допустимые отклонения по уровню от среднего значения не

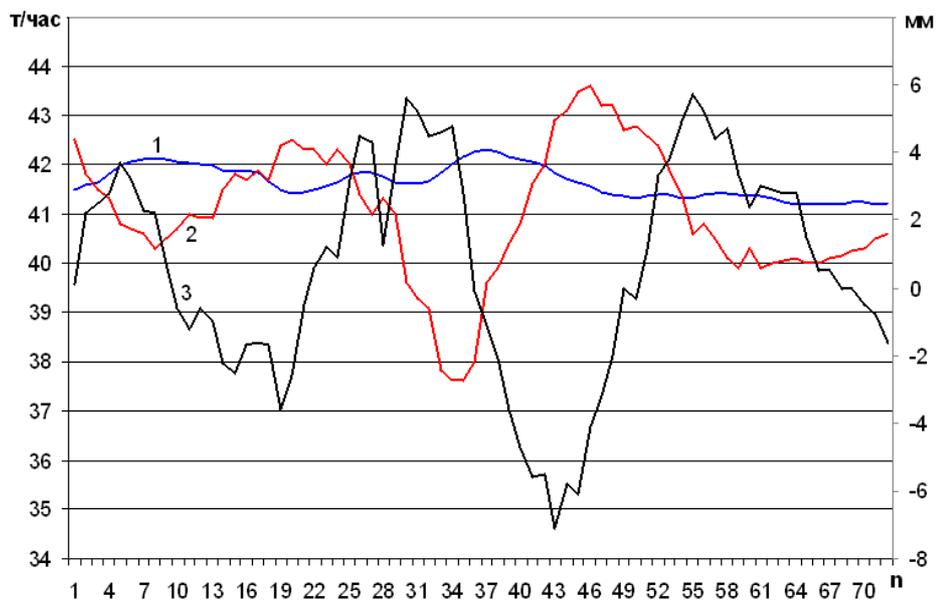


Рис. 5. Тренды изменения расхода пара (кривая 1), расхода питательной воды (кривая 2) и уровня воды в барабане котла (кривая 3)

должны превышать ± 10 мм, а число включений регулятора не должно превышать шести раз в минуту. Согласно ГОСТ 28269-89 при резком сбросе и наборе нагрузки до величины, равной до 50 % от производительности, регулятор питания должен удерживать уровень в пределах установок защит. Интервал наблюдения был выбран в результате спектрального анализа реализаций управляемой величины, который позволил определить значение нижней частоты, равной 0,005 Гц. Длина интервала наблюдения принята равной трем периодам низкочастотной составляющей исследуемого процесса.

В состав контура самонастройки входит блок, осуществляющий в реальном масштабе времени определение значений смещений ε_{mi} и $\varepsilon_{\sigma i}$ и управляемой величины $y(t)$. Процесс коррекции коэффициентов настройки регулятора реализуется при невыполнении условий (4). В этом случае в работу включается блок формирования поправок к коэффициентам регулятора, в котором реализуется алгоритм выбора ситуации, наиболее близкой по нагрузочному режиму к текущему $v_{тек}$, то есть удовлетворяющей условию $\min |v_{ni} - v_{тек}|$. Далее выполняются следующие этапы алгоритма самонастройки: вносятся поправки к коэффициентам ПИД-регулятора, соответствующие значению $J_{iопт}$; рассчитывается значение критерия (3) для текущего режима $J_{тек}$; проверяется выполнение условия $|J_{iопт} - J_{тек}| \leq \Delta J_{доп}$, где $\Delta J_{доп}$ определяется технико-экономическими требованиями и задается в пределах 3-5 %; если указанное условие не выполняется, то из базы данных выбираются коэффициенты регулятора, при которых выполняется условие $|J_{ij} - J_{тек}| \leq \Delta J_{доп}$.

Зависимость изменения уровня воды от нагрузки, определяемой расходом пара потребителями, представлена на рис. 5. По оси абсцисс указаны номера отсчетов – n , интервал дискретизации равен 20 секундам. Графики получены при реализации предлагаемых алгоритмов управления микропроцессорной системой управления TDC – 3000 в условиях промышленной эксплуатации котлоагрегатов типа ГМ-50-14.

5. Заключение

Проведенные исследования показали, что в условиях отсутствия априорной информации о свойствах процессов, протекающих в объектах, подверженных действию возмущающих воздействий, целесообразно при параметрическом синтезе систем управления применять информационный подход. Реализованный в контуре самонастройки алгоритм коррекции коэффициентов ПИД-регулятора обеспечивает выполнение критерия (3) при ограничениях (4) для всех эксплуатационных режимов работы объекта управления.

Литература

- Каревский Д.В., Бурковский В.Л.** Управление процессом поддержания уровня воды в парогенераторе на основе регулятора с переменной структурой. *Электротехнические комплексы и системы управления*, № 1, с.11-14, 2007.
- Клюев А.С., Лебедев А.Т.** Оптимизация систем технологического контроля и автоматизации: информационный подход. М., Энергоатомиздат, 96 с., 1994.
- Ковриго Ю.М., Мовчан А.П., Полищук И.А., Фоменко Б.В.** Адаптивное управление теплоэнергетическими процессами. *ААЭКС*, № 2, с.147-156, 2007.
- Кузеванов В.С., Шевчук В.П., Грошев Н.А., Раменский П.П.** Способ контроля текущей эффективности работы котлоагрегата. *Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика*, № 6, с.53-57, 2007.
- Левин Б.К.** Регулирование парокотельных установок пищевых предприятий. М., Агропромиздат, 224 с., 1987.
- Основы автоматического управления. Под ред. В.С. Пугачева. М., Наука, 680 с., 1968.
- Плетнев Г.П.** Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций. М., Издательский дом МЭИ, 332 с., 1995.
- Прохоренков А.М., Солодов В.С., Татьянченко Ю.Г.** Судовая автоматика. М., Колос, 448 с., 1992.
- Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М., Издательский дом МЭИ, 396 с., 2008.
- Стефани Е.П.** Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М., Энергия, 376 с., 1972.
- Чернов А.С., Аbruков В.С.** Разработка модели автоматического управления пароперегревателем котлоагрегата с помощью искусственных нейронных сетей. Дата публикации: 02.11.2009. URL: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/9996.html>.