

УДК 621.181.7-50

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОТЕЛЬНОМ АГРЕГАТЕ

А.М. КЛЕР, П.В. ЖАРКОВ

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

Разработана методика оптимального управления динамическими процессами в паровом котле на основе нелинейного математического программирования и проведена ее программная реализация. Представлено сравнение регулирования динамического процесса изменения нагрузки котла ТП-81 на основе данной методики и при использовании обычных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов.

ВВЕДЕНИЕ

На надежность и экономичность работы паровых энергетических котлов оказывают влияние динамические процессы, связанные с переходом из одного стационарного состояния в другое. Соответственно, важной задачей является получение оптимальных значений параметров управления для переходного процесса, качество которого можно оценить по значению функционала — например, определяющего интегральную тепловую эффективность котла.

Паропроизводительность котла в процессе эксплуатации может изменяться в широких пределах, определяемых режимом работы станции. При этом должны поддерживаться в допустимых пределах температура острого пара, уровень воды в барабане, температуры металла труб различных поверхностей нагрева и некоторые другие параметры.

В настоящее время формирование управляющих воздействий для изменения нагрузки и поддержания требуемых параметров котла осуществляется с помощью системы регуляторов [1, 2], работающих по заранее заданным, достаточно простым законам регулирования: пропорциональному, интегральному, пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД). Для ПИД регулятора связь между управляющим воздействием и отклонением регулируемой величины имеет вид

$$\mu = -S_1 \left(\sigma + \frac{S_0}{S_1} \int_{t_0}^{t_s} \sigma dt + \frac{S_2}{S_1} \sigma' \right), \quad (1)$$

где μ — управляющее воздействие, σ — относительное отклонение регулируемой величины, S_0 , S_1 , S_2 — коэффициенты пропорциональности, t_0 и t_s — начальный и конечный моменты времени переходного процесса соответственно. Использование таких регуляторов не позволяет осуществлять принцип оптимального управления, поскольку при этом не учитывается совместное влияние всех параметров состояния котла, динамика изменения температуры металла, и не обеспечивается минимальный расход топлива в переходном процессе. Переход на более эффективные методы управления динамическими процессами в энергооборудовании, основанные на методах

оптимального управления [3, 4], оказался невозможен из-за недостаточных вычислительных ресурсов компьютерной техники для решения задачи в реальном времени. В последние годы производительность вычислительной техники выросла, и появилась возможность решения таких задач. В настоящее время проблема состоит в практически полном отсутствии методических, аналитических и программных разработок, реализующих методы оптимального управления для объектов теплоэнергетики. Этим обусловлена актуальность, научная новизна и практическая значимость предлагаемой работы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для моделирования динамических режимов работы создается динамическая модель котла. Динамические процессы характеризуются изменением температуры металла труб теплообменных поверхностей нагрева, давления и массы рабочего тела, сосредоточенного в барабане и других элементах котла. При этом процессы гидродинамики (изменения расходов и давлений) протекают гораздо быстрее, чем процессы аккумуляции тепла и массы рабочего тела. При совместном рассмотрении первую группу процессов можно считать установившейся в любой момент времени и описывать подсистемой алгебраических и трансцендентных уравнений. Процессы второй группы представляются как динамические и описываются подсистемой дифференциальных уравнений.

Изменение нагрузки и поддержание требуемых параметров на выходе обеспечивается соответственно изменениями расходов топлива, воздуха, питательной воды и различным соотношением расходов собственного конденсата на впрыски парохладителей. Данные параметры являются управляющими. Задавая значения управляющих параметров в каждый момент времени, можно осуществить переход от одного стационарного режима с неизменной нагрузкой к другому. Величины следует подбирать таким образом, чтобы соблюдались все ограничения на параметры работы котла. Контролируемые параметры в конце процесса должны находиться в заданных интервалах. Кроме того, в общем случае должны быть ограничены скорости изменения (т. е. производные по времени) параметров котла, а суммарный расход топлива в течение переходного процесса с одного уровня нагрузки на другой был бы минимальным. Данная задача оптимизации динамического режима относится к задаче оптимального управления вида:

$$B = \int_{t_0}^{t_s} u_l(t) dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$H(u(t), y(t), z(t)) = 0, \quad (3)$$

$$G(u(t), y(t), z(t)) \geq 0, \quad (4)$$

$$z'(t) = \varphi(u(t), y(t), z(t)), \quad (5)$$

$$u^{\min} \leq u \leq u^{\max}, \quad (6)$$

$$u'_{\min} \leq u' \leq u'_{\max}, \quad (7)$$

$$y'_{\min} \leq y' \leq y'_{\max}, \quad (8)$$

$$z'_{\min} \leq z' \leq z'_{\max}, \quad (9)$$

$$-\varepsilon \leq z'(t_s) \leq \varepsilon, \quad (10)$$

$$z_p^{\min} \leq z_p(t_s) \leq z_p^{\max}, \quad p \in D, \quad (11)$$

$$y_h^{\min} \leq y_h(t_s) \leq y_h^{\max}, \quad h \in V, \quad (12)$$

$$z(t_0) = z^0, \quad (13)$$

где B — суммарный расход топлива за время переходного процесса, u — n -мерный вектор управляющих параметров (расходов топлива в топку котла, воды в барабан и др., причем расходу топлива отвечает l -ая компонента этого вектора), H — m -мерная векторная функция ограничений–равенств, заданная алгебраическими и трансцендентными уравнениями, y — m -мерный вектор параметров (температур, давлений, расходов теплоносителей по пароводяному и газозвоздушному трактам котла), определяемых из системы уравнений H , G — k -мерная векторная функция ограничений–неравенств, t_0 — начальный момент времени переходного процесса, t_s — конечный момент времени переходного процесса, z — r -мерный вектор интегрируемых переменных (температуры в элементах котла, уровень воды и давление в барабане и др.), u' — вектор производных u по времени, u'_{\max} — вектор максимальных значений компонент вектора u' , u'_{\min} — вектор минимальных значений компонент вектора u' , z' — вектор производных z по времени, z'_{\max} — вектор максимальных значений компонент вектора z' , z'_{\min} — вектор минимальных значений компонент вектора z' , ε — вектор с такими параметрами, что при соблюдении условия (10) процесс в момент времени t_s становится практически стационарным, y' — вектор производных y по времени, y'_{\max} — вектор максимальных значений компонент вектора y' , y'_{\min} — вектор минимальных значений компонент вектора y' , D — множество компонент вектора z значения которых необходимо контролировать в конце переходного процесса, V — множество компонент вектора y значения которых необходимо контролировать в конце переходного процесса, z_p^{\max} — максимальные значения p -го контролируемого параметра вектора z в конце переходного процесса, z_p^{\min} — минимальные значения p -го контролируемого параметра вектора z в конце переходного процесса, y_h^{\max} — максимальные значения h -ого контролируемого параметра вектора y в конце переходного процесса, y_h^{\min} — минимальное значение h контролируемого параметра вектора y в конце переходного процесса, z^0 — значения вектора z в начальный момент времени t_0 .

Поскольку учитывать ограничения и значения управляющих параметров на всем несчетном множестве точек интервала $[t_0, t_s]$ не представляется возможным, разбиваем переходный процесс на q равных участков при помощи $q+1$ базовых точек с номерами $1, 2, \dots, q+1$. Число этих точек определяем, исходя из необходимости получения требуемой точности решения оптимизационной задачи и приемлемого объема вычислений, причем первая базовая точка совпадает с началом интервала времени (t_0), последняя ($q+1$) — с его концом (t_s). Будем оптимизировать значения управляющих параметров, учитывать ограничения–неравенства и ограничения–равенства только в этих точках, принимая, что если векторы G и H не нарушаются в соседних базовых точках, то они не нарушаются и в любой

промежуточный момент времени, расположенный между этими точками, кроме того полагаем, что управляющие параметры между соседними точками изменяются по линейному закону. В результате получаем задачу нелинейного программирования:

$$\min_{u(t_1), \dots, u(t_{q+1})} B = \sum_{j=1}^{q+1} u_l(t_j), \quad (14)$$

$$u(t) = \left(\frac{u(t_i) - u(t_{i-1})}{\Delta t} \right) (t - t_{i-1}) + u(t_{i-1}), \text{ где } i \text{ отвечает условию}$$

$$t_i \geq t \geq t_{i-1}, \quad i \in [2, \dots, q+1], \quad (15)$$

$$H(u(t), y(t), z(t)) = 0, \quad (16)$$

$$G(u(t_j), y(t_j), z(t_j)) \geq 0, \quad j = 1, \dots, q+1, \quad (17)$$

$$z'(t) = \varphi(u(t), y(t), z(t)), \quad (18)$$

$$u^{\min} \leq u(t_j) \leq u^{\max}, \quad (19)$$

$$u'_{\min} \leq u'_i = \frac{u(t_{i+1}) - u(t_i)}{\Delta t} \leq u'_{\max}, \quad i = 1, \dots, q, \quad (20)$$

$$y'_{\min} \leq y'_i = \frac{y(t_{i+1}) - y(t_i)}{\Delta t} \leq y'_{\max}, \quad (21)$$

$$z'_{\min} \leq z'_i = \frac{z(t_{i+1}) - z(t_i)}{\Delta t} \leq z'_{\max}, \quad i = 1, \dots, q-1, \quad (22)$$

$$-\varepsilon \leq z'_q = \frac{z(t_{q+1}) - z(t_q)}{\Delta t} \leq \varepsilon, \quad (23)$$

$$z_p^{\min} \leq z_p(t_s) = z_p(t_{q+1}) \leq z_p^{\max}, \quad p \in D, \quad (24)$$

$$y_h^{\min} \leq y_h(t_s) = y_h(t_{q+1}) \leq y_h^{\max}, \quad h \in V, \quad (25)$$

$$z(t_0) = z(t_1) = z^0, \quad (26)$$

здесь $t = (t_s - t_0)/q$, $u(t_j)$ — n -мерный вектор управляющих параметров в базовой точке j .

Решение данной задачи требует больших затрат машинного времени, поэтому использование этого подхода для формирования управляющих воздействий в режиме реального времени весьма затруднительно.

Результаты совместного решения системы алгебраических и дифференциальных уравнений (16, 18) в различные моменты времени при заданных начальных условиях и управляющих воздействиях можно представить в виде векторных функций:

$$y(t_j) = \Psi(t_j, u(t_1), \dots, u(t_j), z^0), \quad (27)$$

$$z(t_j) = \Phi(t_j, u(t_1), \dots, u(t_j), z^0). \quad (28)$$

Определение векторов $y(t)$ и $z(t)$ может осуществляться численным методом. Подставляя в (16)–(25) вместо $y(t)$ и $z(t)$ векторные функции (27), (28) имеем

$$\min_{u(t_1), \dots, u(t_{q+1})} B = \sum_{j=1}^{q+1} u_l(t_j) = M(u_l(t_1), \dots, u_l(t_{q+1})), \quad j = 1, \dots, q+1, \quad (29)$$

$$u(t) = \left(\frac{u(t_i) - u(t_{i-1})}{\Delta t} \right) (t - t_{i-1}) + u(t_{i-1}), \quad \text{где } i \text{ отвечает условию } t_i \geq t \geq t_{i-1}, \\ i \in [2, \dots, q+1], \quad (30)$$

$$G(t_j, u(t_j), \Psi(t_j, u(t_1), \dots, u(t_j), z^0), \Phi(t_j, u(t_1), \dots, u(t_j), z^0)) = \\ = \bar{G}_j(u(t_1), \dots, u(t_j), z^0) \geq 0, \quad (31)$$

$$u^{\min} \leq u(t_j) \leq u^{\max}, \quad (32)$$

$$u'_{\min} \leq \frac{u(t_{i+1}) - u(t_i)}{\Delta t} \leq u'_{\max}, \quad i = 1, \dots, q, \quad (33)$$

$$y'_{\min} \leq \frac{\Psi(t_{i+1}, u(t_1), \dots, u(t_{i+1}), z^0) - \Psi(t_i, u(t_1), \dots, u(t_i), z^0)}{\Delta t} = \\ = \bar{\Psi}_i(u(t_1), \dots, u(t_{i+1}), z^0) \leq y'_{\max}, \quad (34)$$

$$z'_{\min} \leq \frac{\Phi(t_{i+1}, u(t_1), \dots, u(t_{i+1}), z^0) - \Phi(t_i, u(t_1), \dots, u(t_i), z^0)}{\Delta t} = \\ = \bar{\Phi}_i(u(t_1), \dots, u(t_{i+1}), z^0) \leq z'_{\max}, \quad i = 1, \dots, q-1, \quad (35)$$

$$-\varepsilon \leq \frac{\Phi(t_{q+1}, u(t_1), \dots, u(t_{q+1}), z^0) - \Phi(t_q, u(t_1), \dots, u(t_q), z^0)}{\Delta t} = \\ = \bar{\Phi}_q(u(t_1), \dots, u(t_{q+1}), z^0) \leq \varepsilon, \quad (36)$$

$$\min_p z_p(t_{q+1}) = \Phi_p(t_{q+1}, u(t_1), \dots, u(t_{q+1}), z^0) = \\ = z\Phi_p^{q+1}(u(t_1), \dots, u(t_{q+1}), z^0) \leq z_p^{\max}, \quad p \in D, \quad (37)$$

$$y_h^{\min} \leq y_h(t_{q+1}) = \Psi_h(t_{q+1}, u(t_1), \dots, u(t_{q+1}), z^0) = \\ = \Psi_p^{q+1}(u(t_1), \dots, u(t_{q+1}), z^0) \leq y_h^{\max}, \quad h \in V, \quad (38)$$

$$z(t_1) = z^0, \quad (39)$$

где подстрочными индексами p и h обозначают соответствующие компоненты векторных функций Φ , Φ^{q+1} , Ψ , Ψ^{q+1} .

Множественного ускорения процесса решения этой задачи можно достичь сведением задачи нелинейного программирования к задаче линейного программирования. С этой целью нелинейные функции цели B и ограничений G раскладывают в ряд Тейлора до членов первого порядка в окрестности точки линеаризации $\tilde{u}(t_j)$, \tilde{z}^0 , $j = 1, \dots, q+1$ что позволяет аппроксимировать их линейными функциями и свести общую задачу нелинейного программирования к задаче линейного программирования:

$$\min \left(\sum_{j=1}^{q+1} \sum_{a=1}^n \frac{\partial M}{\partial u_a(t_j)} (u_a(t_j) - \tilde{u}_a(t_j)) + \sum_{a=1}^r \frac{\partial M}{\partial z_a^0} (z_a^0 - \tilde{z}_a^0) \right), \quad (40)$$

$$\bar{G}_j(\tilde{u}(t_1), \dots, \tilde{u}(t_j), \tilde{z}^0) + \sum_{c=1}^j \sum_{a=1}^n \frac{\partial \bar{G}_j}{\partial u_a(t_c)} (u_a(t_c) - \tilde{u}_a(t_c)) + \sum_{a=1}^r \frac{\partial \bar{G}_j}{\partial z_a^0} (z_a^0 - \tilde{z}_a^0) \geq 0, \quad (41)$$

$$u^{\min} \leq u(t_j) \leq u^{\max}, \quad j = 1, \dots, q+1, \quad (42)$$

$$u'_{\min} \leq \frac{u(t_{i+1}) - u(t_i)}{\Delta t} \leq u'_{\max}, \quad i = 1, \dots, q, \quad (43)$$

$$y'_{\min} \leq \bar{\Psi}_i(\tilde{u}(t_1), \dots, \tilde{u}(t_{i+1}), \tilde{z}^0) + \sum_{c=1}^{i+1} \sum_{a=1}^n \frac{\partial \bar{\Psi}_i}{\partial u_a(t_c)} (u_a(t_c) - \tilde{u}_a(t_c)) + \sum_{a=1}^r \frac{\partial \bar{\Psi}_i}{\partial z_a^0} (z_a^0 - \tilde{z}_a^0) \leq y'_{\max}, \quad (44)$$

$$z'_{\min} \leq \bar{\Phi}_i(\tilde{u}(t_1), \dots, \tilde{u}(t_{i+1}), \tilde{z}^0) + \sum_{c=1}^{i+1} \sum_{a=1}^n \frac{\partial \bar{\Phi}_i}{\partial u_a(t_c)} (u_a(t_c) - \tilde{u}_a(t_c)) + \sum_{a=1}^r \frac{\partial \bar{\Phi}_i}{\partial z_a^0} (z_a^0 - \tilde{z}_a^0) \leq z'_{\max}, \quad i = 1, \dots, q-1, \quad (45)$$

$$-\varepsilon \leq \bar{\Phi}_q(\tilde{u}(t_1), \dots, \tilde{u}(t_{q+1}), \tilde{z}^0) + \sum_{c=1}^{q+1} \sum_{a=1}^n \frac{\partial \bar{\Phi}_q}{\partial u_a(t_c)} (u_a(t_c) - \tilde{u}_a(t_c)) + \sum_{a=1}^r \frac{\partial \bar{\Phi}_q}{\partial z_a^0} (z_a^0 - \tilde{z}_a^0) \leq \varepsilon \quad (46)$$

$$z_p^{\min} \leq \Phi_k^{q+1}(\tilde{u}(t_1), \dots, \tilde{u}(t_{q+1}), \tilde{z}^0) + \sum_{j=1}^{q+1} \sum_{a=1}^n \frac{\partial \Phi_k^{q+1}}{\partial u_a(t_j)} (u_a(t_{q+1}) - \tilde{u}_a(t_{q+1})) + \sum_{a=1}^r \frac{\partial \Phi_k^{q+1}}{\partial z_a^0} (z_a^0 - \tilde{z}_a^0) \leq z_p^{\max}, \quad \forall p \in D, \quad (47)$$

$$y_p^{\min} \leq \Psi_h^{q+1}(\tilde{u}(t_1), \dots, \tilde{u}(t_{q+1}), \tilde{z}^0) + \sum_{j=1}^{q+1} \sum_{a=1}^n \frac{\partial \Psi_h^{q+1}}{\partial u_a(t_j)} (u_a(t_{q+1}) - \tilde{u}_a(t_{q+1})) + \sum_{a=1}^r \frac{\partial \Psi_h^{q+1}}{\partial z_a^0} (z_a^0 - \tilde{z}_a^0) \leq y_h^{\max}, \quad \forall h \in V. \quad (48)$$

В случае, если в ходе реализации процесса оптимального управления, найденного в результате решения линеаризованной задачи (40)–(48), значения контролируемых параметров в момент t_s окажутся существенно отличными от значений,

определенных в результате решения задачи (29)–(39), то возможно повторное решение этой задачи (40)–(48) из новой исходной точки при скорректированных значениях свободных членов в выражениях (47)–(48) определяемых как:

$$\check{\Phi}_k^{q+1} = \Phi_k^{q+1} + (z_k^{\text{фактс}} - z_k^{\text{расчс}}), \quad (49)$$

$$\check{\Psi}_h^{q+1} = \Psi_h^{q+1} + (y_h^{\text{фактс}} - y_h^{\text{расчс}}), \quad (50)$$

где $\check{\Phi}_k^{q+1}$, $\check{\Psi}_h^{q+1}$ — скорректированные значения свободных членов в выражениях (47)–(48), Φ_k^{q+1} , Ψ_h^{q+1} — “старые” значения свободных членов в выражениях (47)–(48), $z_k^{\text{расчс}}$, $y_h^{\text{расчс}}$ — расчетные из линеаризованной модели значения параметров z_k , y_h в момент t_s , $z_k^{\text{фактс}}$, $y_h^{\text{фактс}}$ — замеряемые или определяемые из подробной нелинейной модели значения параметров z_k , y_h в момент t_s .

ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДИКИ

В качестве примера применения изложенной методики оптимального управления динамическими процессами рассмотрим оптимизацию переходного процесса для парового энергетического котла ТП-81, паропроизводительностью 420 т/ч с давлением острого пара 13,72 МПа и температурой острого пара 550 °С [5]. Расчетная схема котла представлена на рис. 1.

На первом этапе при помощи разработанного в ИСЭМ СО РАН программно-вычислительного комплекса “Система машинного построения программ” [6] строится математическая модель котла. В основе расчетов процессов теплообмена,

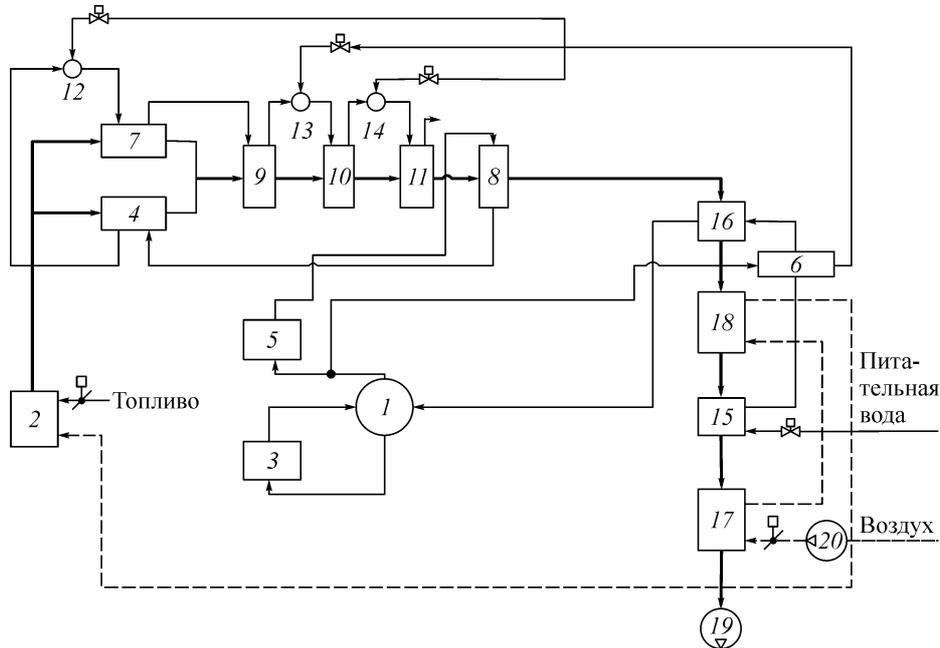


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема котла ТП-81.

1 — барабан-сепаратор, 2 — топочная камера, 3 — экранные поверхности в топке, 4 — средние ширмы, 5 — потолочный пароперегреватель, 6 — конденсационная установка, 7 — крайние ширмы, 8–11 — пакеты конвективных пароперегревателей 1–4-й ступеней, 12–14 — впрыскивающие парохладители, 15, 16 — водяные экономайзеры первой и второй ступеней, 17, 18 — воздухоподогреватели первой и второй ступеней, 19 — дымосос, 20 — дутьевой вентилятор.

аэродинамики и гидродинамики элементов лежат нормативные методы теплового, гидравлического и аэродинамического расчетов котельных агрегатов [7, 8, 9]. При разработке модели полагается, что различиями в работе параллельных труб теплообменных поверхностей котла можно пренебречь как при стационарных, так и при переходных режимах. В установившемся режиме все тепло, поступающее на поверхность теплообменника передается теплоносителю, а при нестационарном — часть тепла либо передается металлу труб, либо отводится от него. Каждый теплообменник по ходу нагреваемого теплоносителя разбивается на n участков, при этом температура металла на каждом из участков принимается одинаковой по всей его длине. Зная первоначальную температуру участка в начальный момент времени, считается небаланс между внешним теплоподводом и количеством тепла, отбираемого от внутренней теплообменной поверхности. Исходя из этого, вычисляется производная температуры металла участка по времени

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\Delta Q}{C_M * M}, \quad (51)$$

где $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ — небаланс между внешним теплоподводом (Q_1) и количеством тепла отбираемого от внутренней поверхности трубы (Q_2), $\partial T / \partial \tau$ — производная средней температуры металла участка по времени, C_M — теплоемкость металла, M — масса металла труб участка.

В качестве управляющих параметров принимается расход топлива, коэффициент избытка воздуха в топке, расход питательной воды и расходы охлаждающей воды в три парохладителя. Полагается, что, зная значения указанных управляющих параметров, можно определить обеспечивающие их значения, положения соответствующих регулирующих органов. В качестве целевой функции принимается суммарный расход топлива B за время процесса. В качестве ограничений учитываются:

- ограничения на предельно допустимую температуру (например 595 °С для стали 12Х1МФ, используемой в конвективных пароперегревателях) и расчетное механическое напряжение металла труб,
- ограничения на неотрицательность температурного напора на входе и выходе элементов котла,
- ограничения на неотрицательность расходов теплоносителей в элементах котла,
- ограничение на уровень воды в барабане котла,
- ограничения на скорость изменения управляющих параметров и некоторых зависимых параметров котла, определяемых из решения алгебраических и дифференциальных уравнений.

Рассматривается переходный процесс с начальной нагрузкой котла 101 кг/с до конечной 111 кг/с. Время процесса принимаем равным 75 с. Переходный процесс разбивается на 15 равных участков при помощи 16 базовых точек. Производится линеаризация зависимости целевой функции и ограничений от управляющих параметров и начальных условий в точке начального состояния. Исходя из этого, формулируется задача линейного программирования.

На рис. 2–7 построены графики изменения параметров работы котла по времени, полученные при применении методики оптимального управления динамическими процессами и при использовании обычных ПИД регуляторов.

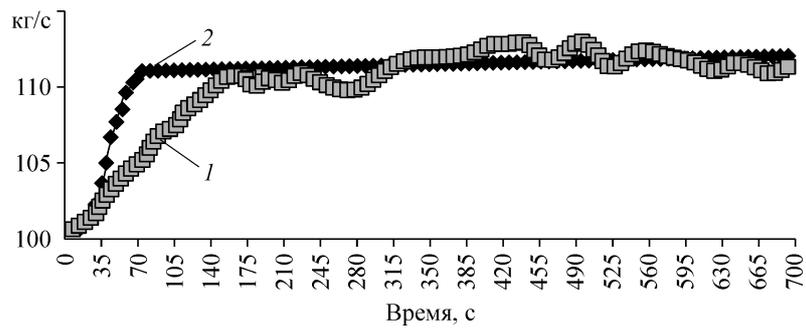


Рис. 2. Изменение нагрузки котла по времени (1 — при использовании обычных ПИД регуляторов, 2 — при применении методики оптимального управления динамическими процессами).

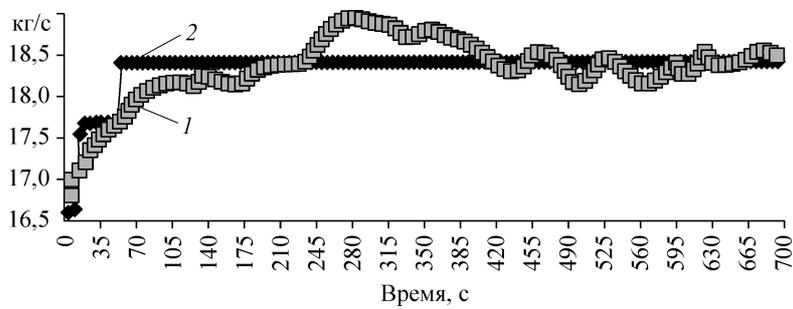


Рис. 3. Изменение расхода топлива по времени (1 — при использовании обычных ПИД регуляторов, 2 — при применении методики оптимального управления динамическими процессами).

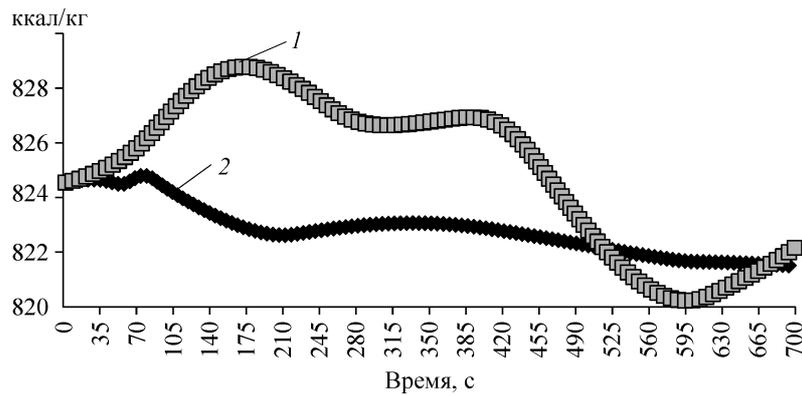


Рис. 4. Изменение энтальпии острого пара по времени (1 — при использовании обычных ПИД регуляторов, 2 — при применении методики оптимального управления динамическими процессами).

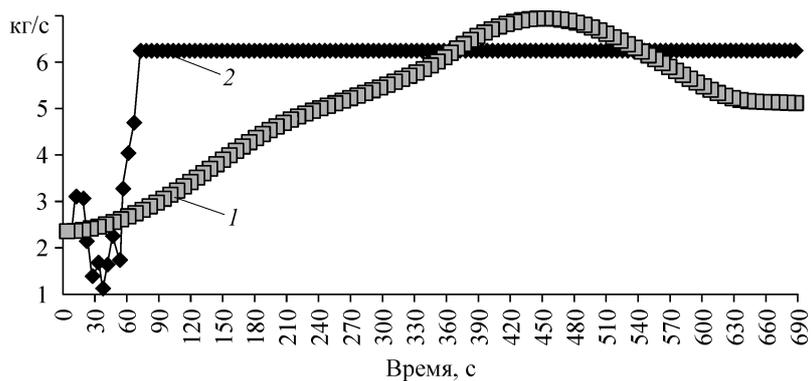


Рис. 5. Изменение суммарного расхода охлаждающей воды во впрыскивающие пароохладители по времени (1 — при использовании обычных ПИД регуляторов, 2 — при применении методики оптимального управления динамическими процессами).

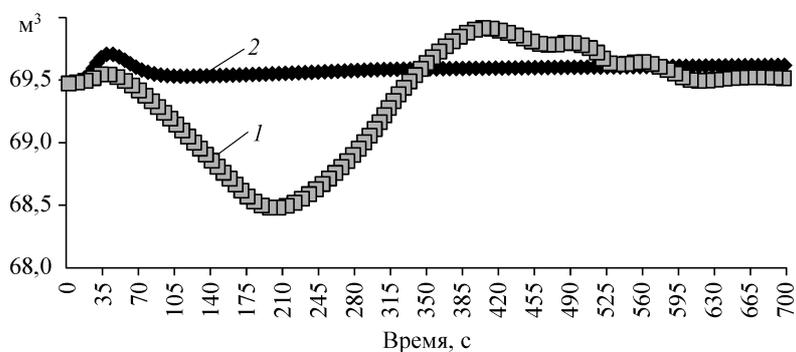


Рис. 6. Изменение объема воды в барабане котла по времени (1 — при использовании обычных ПИД регуляторов, 2 — при применении методики оптимального управления динамическими процессами).

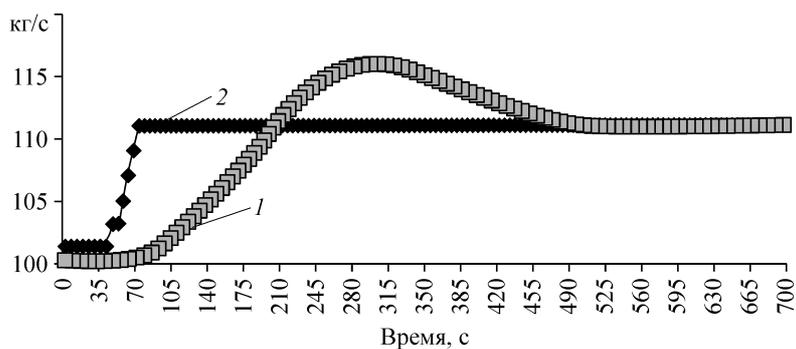


Рис. 7. Изменение расхода питательной воды по времени (1 — при использовании обычных ПИД регуляторов, 2 — при применении методики оптимального управления динамическими процессами).

Как видно из графиков, при формировании управляющих воздействий с помощью вышеизложенной методики, достижение требуемой нагрузки и стабилизация параметров котла происходят значительно быстрее, чем при применении ПИД регуляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика оптимального управления динамическими процессами в паровом котле на основе нелинейного математического программирования. Достигнуто многократное ускорение процесса решения задачи нелинейного программирования за счет сведения к задаче линейного программирования. Предложен подход настройки линейной задачи.

2. Приведен пример применения данной методики для динамического процесса изменения нагрузки котла ТП-81.

3. Показана эффективность использования методики при формировании управляющих воздействий для изменения нагрузки и поддержания требуемых параметров котла по сравнению с применением ПИД регуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автоматическое** управление теплоэнергетическими установками электростанций (техническая кибернетика в теплоэнергетике). — М.: Энергия, 1968. — 80 с.
2. **Шишмарев В.Ю.** Автоматика / Учебник для сред. проф. образования. — М.: Издательский центр “Академия”, 2005. — 288 с.
3. **Моисеев Н.Н.** Математические задачи системного анализа. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1981. — 488 с.
4. **Моисеев Н.Н.** Элементы теории оптимальных систем. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1975. — 528 с.
5. **Мейкляр М.В.** Современные котельные агрегаты ТКЗ / 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1978. — 223 с.
6. **Клер А. М., Деканова Н. П., Скрипкин С. К. и др.** Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями. — Новосибирск: Наука. СИФ РАН, 1997. — 120 с.
7. **Тепловой** расчет котельных агрегатов. Нормативный метод./ Под ред. Н.В. Кузнецова. — М.: Энергия, 1973. — 296 с.
8. **Гидравлический** расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. — М.: Энергия, 1978. — 255 с.
9. **Аэродинамический** расчет котельных установок. Нормативный метод / Под ред. С.И. Молчана. — Л.: Энергия, 1977. — 256 с.

Статья поступила в редакцию 21 марта 2007 г.