

DOI:

## ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА ФАЗОВЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ И УПРАВЛЕНИЯ<sup>1</sup>

Гулюкина С.И., Уткин В.А.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,*

*Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

*gulyukina.s.i@mail.ru, vicutkin@ipu.ru*

*Аннотация: Работа посвящена задаче синтеза робастного управления парогенератором с учетом ограничений на фазовые переменные и управление под действием внешних неконтролируемых возмущений. Для решения поставленной задачи применяется идеология блочного метода с использованием в качестве локальных обратных связей sat-функций, ограничивающие фазовые переменные и управление.*

Ключевые слова: блочный подход, фазовые ограничения, нелинейная задача слежения.

### Введение

В настоящее время на основе теплоэнергетических установок производится основной объем мировой электроэнергии и тепловой энергии. По-видимому, еще долгие годы такая ситуация будет сохраняться и, как следствие, актуальными останутся вопросы автоматизации объектов теплоэнергетики. И действительно в настоящее время наблюдается большая публикационная активность в этой области.

Объекты теплоэнергетики моделируются сложными нелинейными дифференциальными уравнениями при наличии параметрических неопределенностей и при действии произвольных детерминированных возмущений, не доступных для измерения [1]. Задача управления такими системами сильно усложняется из-за того, что измерениям доступна только часть вектора состояния, причем оставшиеся переменные часто не могут быть измерены физически.

Приходится констатировать, что большинство известных методов теории управления оказываются недостаточно разработанными для решения подобных задач. В частности, метод линеаризации нелинейных систем [2] работоспособен лишь в ограниченной области рабочего режима и, кроме того, в случае, когда нелинейности включают в себя и сигнальные неопределенности линеаризация их в принципе не возможна. Использование методов синтеза робастных и адаптивных систем [3] усложняется наличием внешних возмущений и неполной информации о векторе состояний. Применение оптимального управления и теории ( $H - \infty$ ) [4] к тому же не грубо к вариации неизвестных параметров. Целый ряд публикаций, использующих методы синтеза нелинейных систем [5], как правило, не учитывают всего комплекса неопределенностей модели объекта управления. Вообще говоря, не приводят к удовлетворительному решению задачи управления также и использование теории скользящих режимов [6] в силу отсутствия инвариантности движений в скользящем режиме к несогласованным возмущениям.

В данной работе для решения задачи управления парогенератором используется новая парадигма в теории управления, предложенная проф. Красновой С.А. [7] и названная «билет в один конец». Суть этой концепции состоит в следующем. Исходная модель объекта управления по измеряемому выходу неизвестным преобразованием приводится к соотношению вход-выход. Далее для полученной формы строится наблюдатель состояния и возмущений [8] и синтезируется управление в рамках блочного подхода [9]. Таким образом, про модель объекта управления известны только такие структурные свойства, как управляемость и наблюдаемость, размерность вектора состояния и относительная степень. Само же название «билет в один конец» объясняет тот факт, что синтез обратной связи осуществляется в новом координатном базисе и не предполагает обратного преобразования (которое неизвестно).

В данной работе ставится задача синтеза робастного управления парогенератором, инвариантного относительно действующих на систему внешних несогласованных, ограниченных по модулю возмущений. Цель управления состоит в поддержании давления перед задвижкой, регулирующей

---

*<sup>1</sup>Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты №18-01-00846А и 20-01-00363А)*

подачу пара на турбину, на заданном уровне с учетом ограничений на фазовые переменные и управление. Данная работа развивает результаты, полученные в [10] с введением дополнительного требования на ограниченность по модулю компонент вектора состояния и управления. Следует отметить, что задача синтеза систем управления с наложенными ограничениями на фазовые переменные и управления в теории управления изучена недостаточно.

Работа организована следующим образом. В разделе 1 приводится математическая модель объекта управления и дается постановка задачи. Раздел 2 посвящен синтезу обратной связи с учетом ограничений на фазовые переменные и управления. В разделе 3 разрабатывается наблюдатель вектора состояния и возмущения. В разделе 4 приводятся результаты численного моделирования, демонстрирующие работоспособность разработанного метода в среде Matlab-Simulink.

## 1 Математическая модель объекта управления. Постановка задачи.

Рассматриваемая система представлена котлом- парогенератором, используемым в паровых турбинах. Данный вид парогенератора широко применяется в технологических операциях различных производств. Промышленный парогенератор состоит из металлического бойлера с водой. Посредством теплового потока  $D_Q$  нагревательный прибор внутри устройства доводит воду до кипения, которая затем переходит в состояние пара. Перегретый пар поднимается к задвижке, находящейся в положении  $q$ , перед которой создается высокое давление  $P_T$ . Управляющим воздействием в системе является подача топлива в топку печи, пропорциональная расходу топлива  $u$ .

Модель процессов в котле описывается системой из трех дифференциальных уравнений вида [9]

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{P}_T &= -a_{11}P_Tq + a_{12}\sqrt{P_D - P_T}, \\ \dot{P}_D &= -a_{22}\sqrt{P_D - P_T} + a_{23}D_Q, \\ \dot{D}_Q &= -bD_Q + bu, \end{aligned}$$

$$a_{11} = \frac{k_\mu}{C_n}, a_{12} = \frac{k_s}{C_n}, a_{22} = \frac{k_s}{C_b}, a_{23} = \frac{k_m}{C_b}, b = \frac{1}{T_b}, \text{ где } a_{ij}, i, j = \overline{1,2}, b = \text{const} > 0, q - \text{положение выпускной}$$

задвижки,  $P_T$  – давление пара перед задвижкой,  $P_D$  – давление пара на выходе из котла – парогенератора регулирующей подачу пара непосредственно в турбину,  $D_Q$  – тепловой поток печи,  $u$  – расход топлива в топке печи.

Представим модель (1) в переменных  $x_1 = P_T - P_{Td}$ ,  $P_{Td}(t)$  – желаемое давление перед задвижкой,  $x_2 = P_D - P_T$ ,  $x_3 = D_Q$ :

$$(2) \quad \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -a_{11}qx_1 + a_{12}\sqrt{x_2} - a_{11}qP_{Td} - \dot{P}_{Td}, \\ \dot{x}_2 &= a_{11}qx_1 - (a_{22} + a_{12})\sqrt{x_2} + a_{23}x_3 + a_{11}qP_{Td} + \dot{P}_{Td}, \\ \dot{x}_3 &= -bx_3 + bu. \end{aligned}$$

Ставится задача слежения за заданным значением давления перед задвижкой с заданной точностью

$$(3) \quad |x_1| \leq \Delta_1 = \text{const}.$$

в следующих предположениях относительно системы (2):

- 1) для измерения доступны давление перед задвижкой  $P_T(t)$  и его заданная величина  $P_{Td}(t)$ ;
- 2) в качестве внешнего возмущения рассматривается положение задвижки по  $q(t)$  и производные по заданным значениям  $P_{Td}(t)$ . Предполагается, что эти переменные ограничены вместе со своими первыми тремя производными. Отметим, что последнее является вполне приемлемым требованием;
- 3) параметры объекта управления полагаются неизвестными;
- 4) на переменные системы наложены физические ограничения

$$(4) \quad x_i \in [0, X_i], i = \overline{2,3}, u \in [0, U], X_i, U = \text{const} > 0.$$

В разделе 3 решается задача синтеза обратной связи в условиях полной определенности. В разделе 4 решается задача оценивания смешанных переменных. Раздел 5 посвящен моделированию режимов работы парогенератора.

## 2 Синтез обратной связи

При синтезе управления в системе (2) возникает ряд малоизученных проблем. Собственно возмущениями в системе (2) являются слагаемые, содержащие неизвестные  $q(t)$  и  $P_{Td}(t)$ . Если бы были известны параметры модели объекта управления и вектор состояния, то эти возмущения можно было бы оценить с помощью наблюдателя. В ситуации, когда для измерения доступна только выходная переменная, а параметры неизвестны, представим систему (2) к форме, независимой от неизвестных параметров, отнеся параметрические неопределенности к внешним возмущениям.

Замена переменных

$$(5) \quad \bar{x}_1 = x_1, \bar{x}_2 = a_{12}\sqrt{x_2}, \bar{x}_3 = \frac{a_{12}^2 a_{23}}{2\bar{x}_2} x_3$$

приводит систему (2) к следующему виду

$$(6) \quad \dot{\bar{x}}_1 = \bar{x}_2 + \eta_1, \dot{\bar{x}}_2 = \bar{x}_3 + \eta_2, \dot{\bar{x}}_3 = \bar{b}u + \eta_3,$$

$$\text{где } \bar{b} = 0,5a_{12}^2 a_{23} \frac{b}{\bar{x}_2}, \eta_1 = -a_{11}q\bar{x}_1 - a_{11}qP_T - \dot{P}_{Td} \leq 0, \eta_2 = 0,5\left[\frac{a_{12}^2 a_{11} q x_1}{\bar{x}_2} - a_{12}(a_{22} + a_{12}) + \frac{a_{12}^2}{\bar{x}_2}(a_{11}qP_T + \dot{P}_{Td})\right] \leq 0, \\ \eta_3 = -0,5a_{12}^2 a_{23} \frac{1}{\bar{x}_2} \dot{\bar{x}}_2 x_3 - \bar{b}x_3 \leq 0.$$

В системе (6) присутствует только один неопределенный скаляр  $\bar{b}$  и вместе с возмущениями на практике можно определить принадлежность их к некоторым технически допустимым диапазонам вида

$$(7) \quad \eta_i \in [N_{i1}, N_{i2}], N_{i1}, N_{i2} = \text{const} < 0, i = \overline{1,3}, \bar{b} \in [\bar{b}_1, \bar{b}_2], \bar{b}_1, \bar{b}_2 = \text{const} > 0, \left| \dot{\bar{b}} \right| \leq \bar{B} = \text{const}.$$

Дадим определения, используемые далее.

Определение. Пусть  $M = \text{const} > 0, b = \text{const}$ . Тогда:

- 1)  $M\text{sat}(s) = \min(M, |s|)\text{sign}(s)$ ;
- 2)  $b[M\text{sat}(s)] = \min(|bM|, |s|)\text{sign}(s), \bar{s} = bs$ ;
- 3)  $M\text{sat}^+(s) = M\text{sat}(s)0,5[1 - \text{sign}(s)]$ ;
- 4)  $b[M\text{sat}^+(s)] = b[M\text{sat}(s)]0,5[1 - \text{sign}(s)]$ .

Введем замену переменных с учетом ограничений вида

$$(8) \quad s_2 = \bar{x}_2 + M_1\text{sat}^+(\bar{s}_2) + \eta_1 + g_1, s_3 = \bar{x}_3 + M_2\text{sat}^+(\bar{s}_2) + \frac{d}{dt}[M_1\text{sat}^+(\bar{s}_1)] + \eta_2 + \dot{\eta}_1 + g_2,$$

где  $\bar{s}_1 = k_1 x_1 + g_1, \bar{s}_2 = k_2 s_2 + g_2, g_1, g_2 = \text{const} > 0$ .

Система (6) в переменных (8) примет следующий вид:

$$(9) \quad \dot{s}_1 = -M_1\text{sat}^+(\bar{s}_1) + s_2 + g_1, \\ \dot{s}_2 = -M_2\text{sat}^+(\bar{s}_2) + s_3 + g_2, \\ \dot{s}_3 = \bar{b}u + \bar{\eta}_3,$$

$$\text{где } \bar{\eta}_3 = \eta_3 + \frac{d}{dt}M_2\text{sat}^+(\bar{s}_2) + \frac{d^2}{dt^2}M_1\text{sat}^+(\bar{s}_1) + \dot{\eta}_2 + \ddot{\eta}_1.$$

Система (9) не содержит неизвестных параметров, кроме неизвестных скалярной функции  $\bar{b}$  (с известными диапазонами изменения и ограниченной первой производной (7)) и возмущения  $\bar{\eta}_3$ , относительно которого предположим его ограниченность вместе с первой производной.

Если в системе (9) удастся стабилизировать переменную  $s_3 \rightarrow 0$ , то оставшиеся вторая и первая подсистемы выбором амплитуды и коэффициента усиления  $\text{sat}$  – функций последовательно стабилизируются.

Действительно, рассмотрим вторую подсистему (9) при  $s_3 = 0$ . Условие устойчивости этой подсистемы сводится к условию попадания переменной  $\bar{s}_2 = k_2 s_2 + g_2$  в линейную зону  $\bar{s}_2 \in (-M_2, 0)$ , которое сводится к выполнению соотношения  $\bar{s}_2 \dot{\bar{s}}_2 < 0$  в нелинейной зоне.

Тогда из  $\dot{\bar{s}}_2 = k_2[-M_2 \text{sat}^+(\bar{s}_2) + g_2]$  следует: а)  $\bar{s}_2 > 0 \Rightarrow -M_2 \text{sat}^+(\bar{s}_2) = 0 \Rightarrow \dot{\bar{s}}_2 = k_2 g_2 < 0$ , б)  $\bar{s}_2 < -M_2 \Rightarrow -M_2 \text{sat}^+(\bar{s}_2) = M_2 > -g_2 \Rightarrow \dot{\bar{s}}_2 > 0$ .

Число  $g_2 < 0$  выбирается из диапазона  $g_2 \in [N_{21}, N_{22}]$ , см. (7). Оценка скорости схождения в линейную зону справа оценивается снизу  $\dot{\bar{s}}_2 = k_2 g_2 < -k_2 N_{22}$ . Амплитуда определяется неравенством  $M_2 > -N_{21}$ , а оценка скорости схождения в линейную зону оценивается снизу  $\dot{\bar{s}}_2 = -k_1 g_2 < -k_1(M_2 + N_{21})$ .

В линейной зоне вторая подсистема описывается устойчивым уравнением  $\dot{s}_2 = -k_2 s_2$ . Аналогичный анализ применяется и для первой подсистемы при  $s_2 = 0$ .

Решение задачи стабилизации третьей подсистемы (9) осложняется из-за неизвестного скаляра перед управлением. Для решения этой проблемы используем метод расширения пространства состояний за счет введения фильтра первого порядка

$$(10) \quad u = z, \dot{z} = -\alpha z + v, \alpha = \text{const} > 0$$

и после преобразования

$$(11) \quad s_4 = \dot{z} + \bar{\eta}_3 + k_3 s_3$$

система (8) с учетом (10), (11) примет вид

$$(12) \quad \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -M_1 \text{sat}^+(\bar{s}_1) + s_2 - g_1, \\ \dot{s}_2 &= -M_2 \text{sat}^+(\bar{s}_2) + s_3 - g_2, \\ \dot{s}_3 &= -k_3 s_3 + s_4, \\ \dot{s}_4 &= -\alpha s_4 + \bar{b} v + \eta_4, \end{aligned}$$

где  $\eta_4 = \dot{\bar{b}}z + \alpha(k_3 s_3 + \bar{\eta}_3) + (k_3 \dot{s}_3 + \dot{\bar{\eta}}_3)$ .

Система (12) является управляемой относительно нового управления  $v$  и наблюдаемой относительно выходной переменной  $x_1$  с учетом ограничений (СФУНО). В следующем разделе будет решена задача оценивания вектора состояния системы (12). Сейчас в предположении, что вектор состояния системы (12) известен, приведем без доказательства следующий результат.

Лемма. Пусть в последнем уравнении системы (12) выполняются условия  $|\eta_4| \leq N_4 = \text{const}$ .

Тогда управление  $v = -M_4 \text{sign}(s_4), \bar{b}_1 M_4 = \text{const} > N_4$  обеспечивает за конечное время движение в скольльзящем режиме по линии  $s_4 = 0$ . При этом из того, что  $\alpha |s_4(0)| + N_4 < \bar{b}_2 M_4$  следует  $\alpha |s_4(t)| < \bar{b}_2 M_4 - N_4$  для  $\forall t > 0$ .

Согласно Лемме выбором коэффициента  $\alpha$  можно обеспечить ограниченность переменной  $s_4$  и, следовательно, управления  $u = z = 1/\bar{b}[s_4 - (k_3 s_3 + \bar{\eta}_3)]$ . Более детально это соотношение выглядит следующим образом

- на выбор амплитуды разрывного управления  $\bar{b}_1 M_4 > \dot{\bar{b}}z + \alpha(k_3 s_3 + \bar{\eta}_3) + (k_3 \dot{s}_3 + \dot{\bar{\eta}}_3)$ ;
- оценка на переменную  $|s_4| \leq (k_3 s_3 + \bar{\eta}_3) + 1/\alpha[\dot{\bar{b}}z + (k_3 \dot{s}_3 + \dot{\bar{\eta}}_3)]$ . Из последнего соотношения следует, что с ростом  $\alpha \rightarrow \infty$  оценка стремится первому слагаемому  $|s_4| \leq (k_3 s_3 + \bar{\eta}_3) + O(1/\alpha)$  и, следовательно,  $z = 1/\bar{b}[s_4 - (\bar{\eta}_3 + k_3 s_3)] \leq 2/\bar{b}(N_3 + k_3 \Delta_3)$ .

С учетом условий существования скольльзящего движения в систем в заданном симметричном относительно нуля диапазоне  $|v| < 1/\alpha(M_4 - N_4)$ .

Для случая, когда в системе (12) выполняется условие  $\eta_4 \in (N_{41}, N_{42}), N_{4i} = \text{const} < 0$  удается обеспечить ограничения (4)  $u = z \in [0, U]$  выбором в (12) несимметричного управления  $v = -M \text{sign}^+(s_4)$ , где  $-M \text{sign}^+(s_4) = 0,5 M \text{sign}(s_4)(1 - \text{sign}(s_4))$ . Условия существования движения по линии  $s_4 = 0$  определяется условием  $s_4 \dot{s}_4 < 0$  при  $s_4 \neq 0$ : из  $s_4 > 0 \Rightarrow v = 0$  следует  $\dot{s}_4 = -\alpha s_4 + \eta_4 < 0$ , из  $s_4 < 0 \Rightarrow v = M, \bar{b}_1 M > N_4$  следует  $\dot{s}_4 = -\alpha s + \bar{b} M + \eta_4 > 0$ .

Таким образом, алгоритм (10), (11) можно охарактеризовать, как способ обеспечить ограниченность переменных вектора состояния на основе метода расширения пространства состояний [26].

### 3 Синтез наблюдателя

Синтезируем наблюдатель на скользящих режимах вида

$$(13) \quad \begin{aligned} \dot{z}_1 &= -M_1 \text{sat}^+(\bar{s}_1) + z_2 + v_1 + g_1, \\ \dot{z}_2 &= -M_2 \text{sat}^+(k_2 z_2 + g_2) + z_3 + v_2 + g_2, \\ \dot{z}_3 &= -k_3 z_3 + z_4 + v_3, \\ \dot{z}_4 &= -\alpha z_4 + v_4, \end{aligned}$$

где корректирующие воздействия  $v_i, i = \overline{1,4}$  выбираются далее. Запишем уравнения относительно невязок  $e_i = s_i - z_i, i = \overline{1,4}$  согласно (12) и (13):

$$(14) \quad \begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 - v_1, \\ \dot{e}_2 &= -M_2 \text{sat}^+(\bar{s}_2) + M_2 \text{sat}^+(k_2 z_2 + g_2) + e_3 - v_2, \\ \dot{e}_3 &= -k_3 e_3 + e_4 - v_3, \\ \dot{e}_4 &= -\alpha e_4 + \bar{b} v + \eta_4 - v_4, \end{aligned}$$

Приведем пошаговый алгоритм стабилизации системы (14), что решает задачу получения оценок вектора состояния системы (12).

Шаг 1. Выберем корректирующее воздействие  $v_1$  следующим образом:  $v_1 = L_1 \text{sign}(e_1), L_1 = \text{const} > 0$ . После подстановки, первое уравнение системы (14) примет вид  $\dot{e}_1 = e_2 - L_1 \text{sign}(e_1)$ . Выбор амплитуды  $L_1 > 0$ , обеспечивающей скользящий режим по прямой  $e_1 = 0$  определяется на основе второго метода Ляпунова:  $V = 0.5e_1^2$ . Производная функции Ляпунова имеет вид:  $\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 \leq |e_1|(|e_2| - L_1) < 0$ , откуда следует неравенство, определяющее выбор амплитуды  $L_1 > |e_2|$ . При выполнении условия  $L_1 > |e_2|$  возникает скользящий режим по прямой  $e_1 = 0$ , то есть  $z_1 = s_1$ . Следовательно  $\dot{e}_1 = 0$ , откуда получим среднее значение разрывного сигнала  $v_{1eq} = e_2$ .

Шаг 2. Выбором корректирующего воздействия во второй подсистеме (14) в виде  $v_2 = L_2 \text{sign}(v_{1eq}), L_2 = \text{const} > 0$  и при выполнении условия  $L_2 > 2M_2 + |e_3|$ , обеспечивается скользящий режим по прямой  $e_2 = 0$ . Откуда следует равенство наблюдаемой и реальной компоненты  $z_2 = s_2$ , откуда среднее значение разрывного сигнала в виде:  $v_{2eq} = e_3$ .

Шаг 3. Выбрав корректирующее воздействие в третьей подсистеме в виде  $v_3 = L_3 \text{sign}(v_{2eq}), L_3 = \text{const} > 0$  с учетом неравенств на выбор амплитуды сигма функции  $L_3 > |e_4|$  обеспечим скользящий режим по прямой  $e_3 = 0$ . При этом среднее значение разрывного сигнала равно  $v_{3eq} = e_4$ .

Шаг 4. На последнем шаге рассмотрим четвертое уравнение системы (14). Выберем корректирующее воздействие как  $v_4 = L_4 \text{sign}(v_{3eq}), L_4 = \text{const} > 0$ . Потребуем выполнение соотношения на выбор амплитуды, которое следует из второго метода Ляпунова:  $L_4 > |\bar{b} v| + |\eta_4|$ . При выполнении этого соотношения обеспечивается скользящий режим по прямой  $e_4 = 0 \Rightarrow v_{4eq} = (\bar{b} v + \eta_4)$ .

Отметим, что соответствующие эквивалентные значения корректирующих воздействий наблюдателя можно получить на выходе низкочастотного фильтра первого порядка  $\mu_i \dot{\tau}_i = \tau_i + v_i, \mu_i > 0, i = \overline{1,4}, v_{ieq} = \tau_i$ .

Таким образом, решена задача получения оценок компонент вектора состояния системы (12)  $z_i = s_i, i = \overline{1,4}$ .

### 4 Моделирование

Численное моделирование было реализовано в среде Matlab-Simulink. Интегрирование системы (1) с управлением (4) проводилось методом Рунге-Кутты 5 порядка с фиксированным шагом. Результаты моделирования подтверждают высокую эффективность и работоспособность изложенного подхода. Для моделирования были выбраны параметры из таблицы 1 применительно к системам (1),(10),(12).

Таблица 1. Параметры модели.

<p>А) Объект управления:  <math>a_{11} = 0.09, a_{12} = 0.87, a_{22} = 0.087, a_{23} = 7.2 \cdot 10^{-5}, b = 0.0067, q \in [0,1], P_{Td} = 16.</math></p>
<p>Б) Начальные условия:  <math>P_T = 14, P_D = 15.1, D_Q = 1300.</math></p>
<p>В) Параметры наблюдателя и регулятора:  <math>z(0) = z_1(0) = z_2(0) = z_3(0) = z_4(0) = 0,</math>  <math>M_1 = 10, M_2 = 30, M = 2000, k_1 = 0.8, k_2 = 0.8, k_3 = 3,</math>  <math>g_1 = -3, g_2 = -20, L_1 = 100, L_2 = 200, L_3 = 1000, L_4 = 1000, \alpha = 10.</math></p>

Представленные графики соответствуют следующей ситуации: задвижка из положения  $q = 0.7$  в момент времени  $t = 600$  скачком переходит в положение  $q = 0.5$  (Рис.1.). Отметим, что положение задвижки в алгоритме управления не используется. Под действием управления  $u(t)$  (Рис.2.) давление пара перед задвижкой  $P_T$  увеличивается и достигает заданного значения  $P_{Td}$ , разность давлений стремится к нулю (Рис.3.). На Рис.4 и Рис.5 представлены графики давления на выходе из котла  $P_D$  и теплового потока  $D_Q$ .

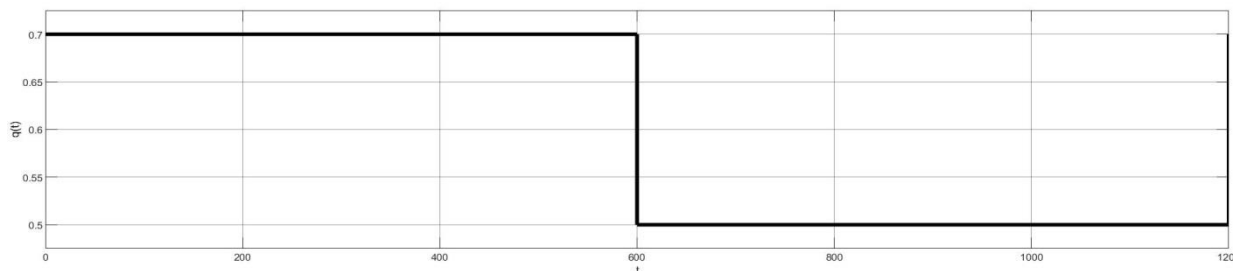


Рис. 1. Положение задвижки  $q(t)$

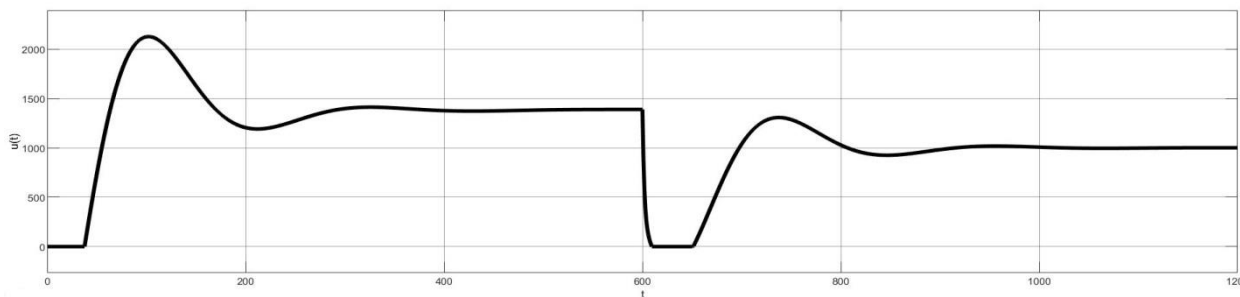


Рис.2. Расход топлива в топке печи  $u(t)$ .

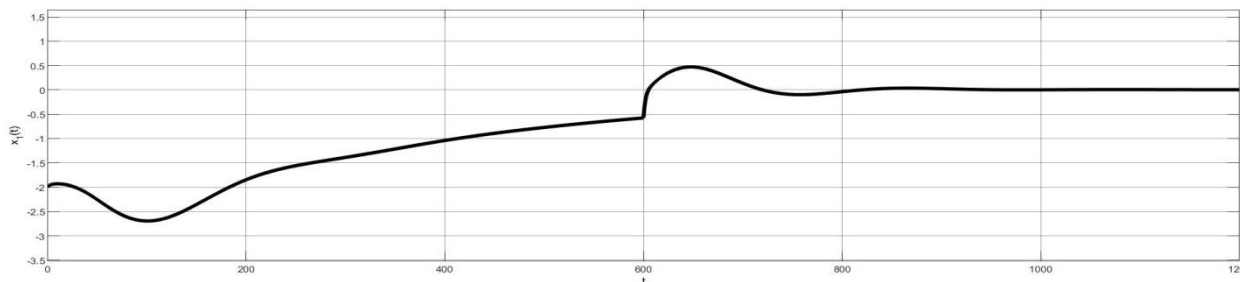


Рис.3. Ошибка слежения  $x(t) = P_T - P_{Td}$ .

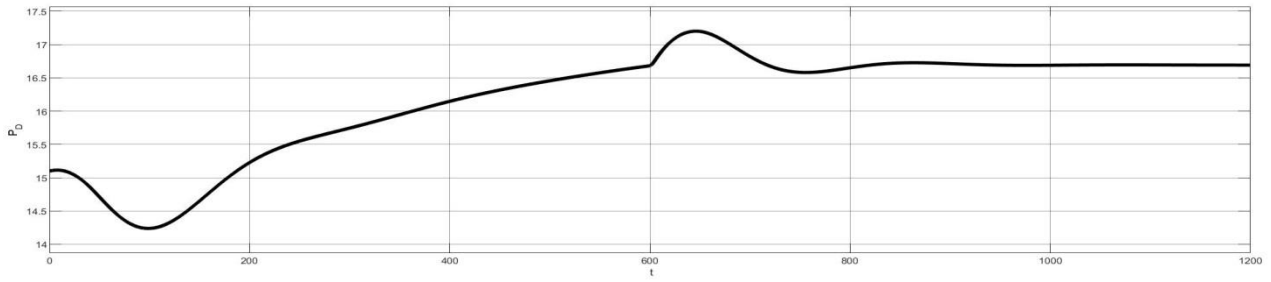


Рис.4. Давление пара на выходе из котла  $P_D$ .

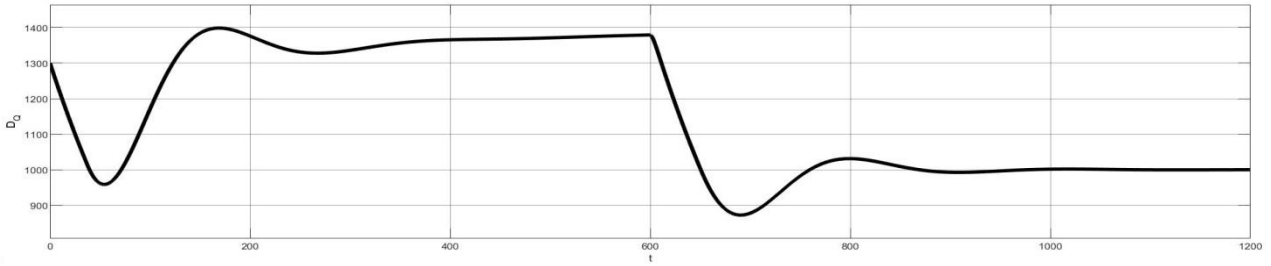


Рис.5. Тепловой поток печи  $D_Q$

На Рис. 6-Рис.9 представлены графики ошибок наблюдения.

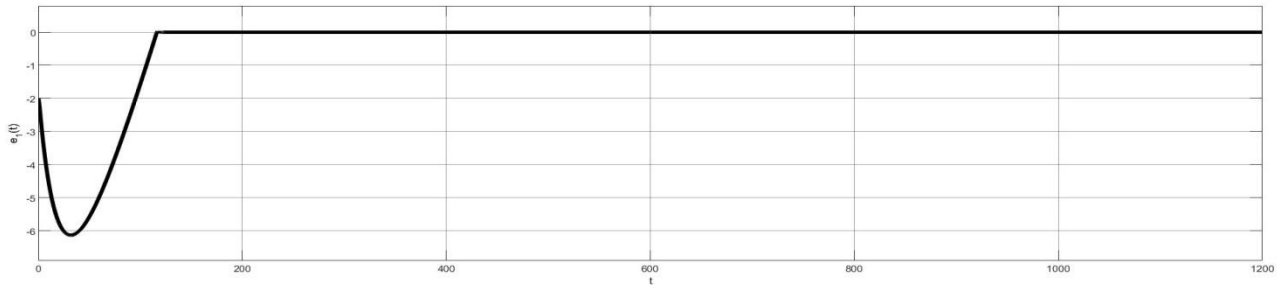


Рис.6. Ошибка наблюдения  $e_1$ .

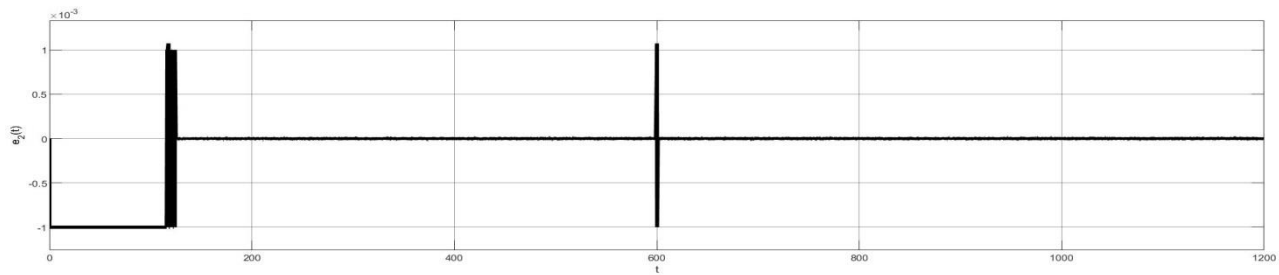


Рис.6. Ошибка наблюдения  $e_2$ .

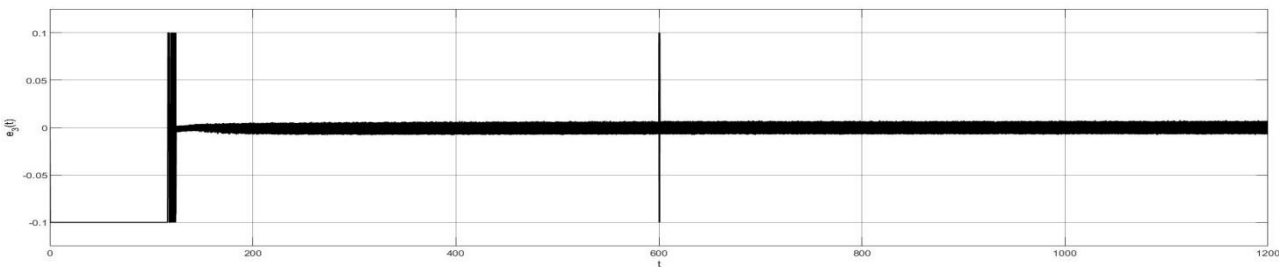


Рис.6. Ошибка наблюдения  $e_3$ .

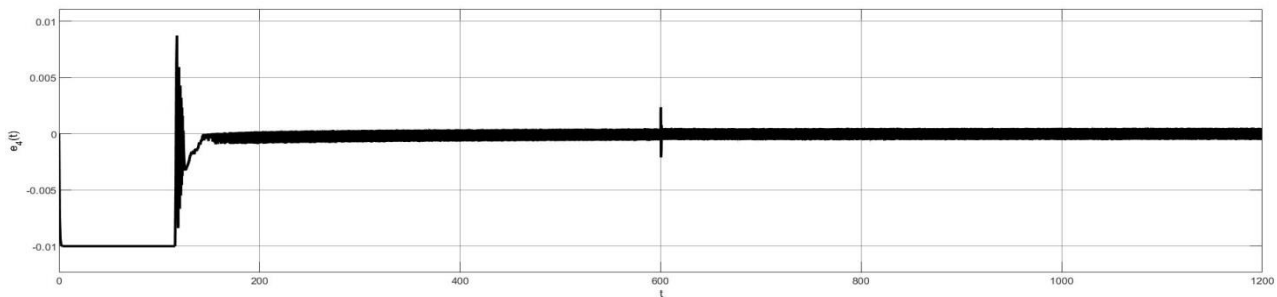


Рис.6. Ошибка наблюдения  $e_4$ .

## Заключение

В работе разработан метод синтеза систем управления в условиях неопределенности и при неполной информации о векторе состояния. Решена мало изученная в теории управления задача синтеза обратной связи с учетом ограничений на фазовые переменные и управление применительно к парогенератору. Работоспособность предложенного алгоритма подтверждена как аналитически, так и с помощью моделирования на Matlab-Simulink.

## Литература

1. *Astrom Karl Johan and Rodney D Bell*, Drum Boiler Dynamics, Automatica, 36, 363-378, 2000.
2. *M. Keshavarz, M. Barkhordari-Yazdi, M.R. Jahed-Motlagh*, Piecewise affine modeling and control of a boiler-turbine unit, Applied Thermal Engineering, 30: 781-791, 2010.
3. *Zheng, K., J. Bentsman, and C. W. Taft*, Full Operating Range Robust Hybrid Control of a Coal-Fired Boiler/Turbine Unit, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 130, no. 4, 041011-1–041011-14, 2008.
4. *H.P. Pang, C. Xia*, Global robust optimal sliding mode control for uncertain affine nonlinear system, Journal of System Engineering and Electronics, 20 (4): 838-843, 2009.
5. *Utkin V.I., Guldner J., Shi J.* Sliding mode control in electromechanical systems. – New York: CRC Press, 2009. – 485 p.
6. *Ахобадзе А.Г., Краснова С.А.*, Задача слежения в линейных многомерных системах при наличии внешних возмущений // Автоматика и телемеханика. 2009. №6. С. 21–47.
7. *Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В.*, Блочный подход к анализу и синтезу инвариантных нелинейных систем слежения // Автоматика и телемеханика. № 12. 2017. С.26–53.
8. *Краснова С.А., Уткин В. А, Михеев Ю.В.* Каскадный синтез наблюдателей состояния нелинейных многомерных систем // АИТ. 2001. №2. С. 43–63.
9. *Уткин А.В.*, Синтез системы управления паротурбинной установкой // Автоматика и телемеханика. 2018. №12. С. 103–123.
10. *Utkin V.A., Krasnova S.A., Kochetkov S.A. and Utkin A.V.*, Ensuring of Invariance of the Output Variables of Linear Systems to External Unmatched Disturbances under Restrictions on the State Variables and Controls // Proceedings of the International Workshop on Recent Advances in Sliding Modes (RASM 2015), 9-11 April 2015, Istanbul, Turkey. ID-0000825, 6 p.