

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЧНОГО УСТРОЙСТВА КАК ИНТЕРВАЛЬНОЙ ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А. А. АБДУКАДЫРОВ, М. ТАХИРДЖАНОВ, З. Х. ЮЛДАШЕВ
Ташкентский государственный университет, Узбекистан
e-mail: tye000@apoi5408.silk.org

The paper treats the methodology development of modeling boilers in ferrous metallurgy under conditions of interval uncertainty of the input. The need to apply the object interval logic dynamic system as a mathematical model is substantiated. The numerical results of modeling some specific boilers are considered.

1. Постановка задачи

Характерной чертой работы энергетических парогенераторов предприятий черной металлургии является потребление ими в буферном режиме отходов доменного производства доменного и коксового газов [1]. Переменный характер поступления этих газов и связанный с этим дефицит пара покрывается резервными видами топлива — природным газом, мазутом, углем.

При повышенных расходах доменного газа из-за форсировки теплопередачи в пароперегревательном тракте температурный режим последнего ухудшается, а температура уходящих газов повышается на 30–60 °С в зависимости от доли доменного газа. В результате снижаются надежность работы тракта, среднеэксплуатационный КПД парогенератора и сужается диапазон регулирования паропроизводительности.

Например, парогенератор ТП-13Б оборудован шестью комбинированными горелками для совместно раздельного сжигания доменного, коксового, природного газов и угольной пыли. Резкие и глубокие колебания расхода доменного газа ΔB_i^d ($i = 1, \dots, I$) компенсируются соответствующими изменениями расхода природного газа ΔB_i^n с некоторым запаздыванием Z , в течение которого происходит отклонение всех параметров парогенератора — процесса горения, паропроизводительности, давления пара и др. Через некоторое Z кончается переходный процесс, вызванный последовательными изменениями ΔB_i^d и ΔB_i^n . Влияние ΔB_i^d можно проследить на изменении температур дымовых газов Δv_i и загрязненный труб $\Delta \theta_i$, а также оценить величиной импульса теплового воздействия Q_i — площадью, ограниченной графиком $\Delta \theta_i$ и осью Ot

$$Q_i = \int_{T_i}^{T_i+z} \Delta \theta_i(\tau) d\tau. \quad (1)$$

Как видно, процессы в парогенераторе и, в частности, топочном устройстве взаимосвязаны и протекают в широком временном диапазоне. Исследование динамики подобных сложных многосвязных объектов, как правило, требует проведения сложных дорогостоящих экспериментов. Знание динамики процесса позволяет найти методы и средства воздействия на топочные процессы с целью минимизации среднеквадратических отклонений режимных параметров, вести конструктивные изменения, а также синтезировать систему автоматического регулирования (САР) топочным процессом. При выборе типа структуры или параметров САР топочного устройства разработчику надо знать отклонения $\Delta\theta_i$, Δv_i , истинные значения величин $\Delta\theta_i$, Δv_i , Q_i , а также их максимальные $\Delta\theta_i$, Δv_i , Q_i , и минимальные $\Delta\theta_i$, Δv_i , Q_i , значения, возникающие при воздействии $\Delta B_i^{\text{д}}$.

2. Математическая модель динамики топочных процессов при совместном сжигании доменного и природного газов

Упомянутая в заголовке этого параграфа модель существенно нелинейна [1]. Линеаризация ее по общему правилу дает следующий результат:

$$\begin{aligned} T^{\text{r}} \frac{d\Delta v}{d\tau} + \Delta v &= K^{\text{з}} \Delta\theta + K^{\text{q}} \Delta B + K^{\text{в}} \Delta^{\text{в}}, \\ T^{\text{шл}} \frac{d\Delta\theta}{d\tau} + \Delta\theta &= K^{\text{г}} \Delta v, \\ \Delta v(0) = 0, \quad \Delta\theta(0) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь T^{r} и $T^{\text{шл}}$ — постоянные времени аккумуляции тепла газами и отложениями (в секундах), а $K^{\text{з}}$, K^{q} , $K^{\text{в}}$, $K^{\text{г}}$ — коэффициенты передачи соответственно по θ (температуре загрязнений), B (расходу топлива), температурам $v^{\text{в}}$ (воздуха) и v (топочных газов).

Связи между переменными и коэффициентами, характеризующими режимы работы топочного устройства, могут быть получены на основе специальных испытаний и ряда расчетов. Для рассматриваемого парогенератора ТП-13Б эти данные были получены в результате изменения концентрации доменного газа $0 < B^{\text{д}} < 100\%$ при заданной паропроизводительности (причем всегда $B^{\text{д}}\% + B^{\text{п}}\% = 100\%$) с шагом в 20% и представлены в виде таблицы в работе [1]. Каждому стационарному режиму работы топочного устройства ($B^{\text{з}}$, $\alpha^{\text{з}}$) соответствуют определенный столбец коэффициентов с наиболее близкими значениями $B^{\text{табл}}\%$ и избытка воздуха $\alpha^{\text{з}}$. Если вновь установившаяся концентрация доменного газа есть $B_s^{\text{д}} = B_{s-1}^{\text{д}} + \Delta B_s^{\text{д}}$, то концентрация природного газа $B^{\text{п}}$, подстраиваемая под расчетный расход топлива $B^{\text{р}}$, будет $B_s^{\text{п}} = B_{s-1}^{\text{п}} - \Delta B_s^{\text{п}}$, где $\Delta B_s^{\text{п}}$ эквивалентна теплотворной способности скачкообразного возмущения $\Delta B_s^{\text{д}}$.

Система автоматического регулирования процесса горения и регулятор тепловой нагрузки, в частности, должны при любом расходе подаваемого топлива обеспечивать эффективное поддержание заданных значений паропроизводительности и качественных показателей. Вследствие нелинейности объекта при скачкообразном изменении расхода доменного газа $B^{\text{д}}$ динамические свойства топочного устройства и соответственно его модели (1) изменяются, что видно из анализа таблиц [1]. Отсюда вытекает необходимость построения модели для различных концентраций газовой смеси ($0 < B^{\text{д}} < 100\%$), что удобно решается применением логико-динамических структур моделирования и управления [2].

3. Логико-динамическая модель топочного процесса

Используя гибридные функции Терно [2], переменные коэффициенты модели топочного устройства (1) представим в виде

$$S_i(B, \alpha) = \sum_{j=1}^J L_j(B, \alpha) K_{ij}, \quad (3)$$

где $L_j(B, \alpha)$ — логические переменные, являющиеся функцией действительных переменных B^A — расхода доменного газа и α — избытка воздуха, K_{ij} — значения коэффициентов модели (1), в общем случае также функции переменных $K_{ij}(B, \alpha)$ приведены в таблицах работы [1].

Перечень логических переменных $L_j(B, \alpha)$, $j = \overline{1, 6}$, по которым коэффициенты K_{ij} выбираются из таблицы, можно записать в виде

$$L_1 = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 < B < 10 \%, \\ 0, & \text{в других случаях;} \end{cases}$$

$$L_4 = \begin{cases} 1, & \text{при } 50 < B < 70 \%, \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

Приводя исходную модель топки (1) к нормальному виду Коши, с учетом вышеупомянутых гибридных функций, запишем

$$v = -1/S_6 v + S_4/S_6 \theta + S_2/S_6 B + S_3/S_6 v^B, \\ \theta = S_1/S_5 v - 1/S_5 \theta, \quad (4)$$

где переменные коэффициенты S_i , приведенные в табл. 1, можно расписать следующим образом:

$$S_1 = \sum_{j=1}^6 L_j(B, \alpha) K_j^r, \quad S_2 = \sum_{j=1}^6 L_j(B, \alpha) K_j^q, \\ S_3 = \sum_{j=1}^6 L_j(B, \alpha) K_j^B, \quad S_4 = \sum_{j=1}^6 L_j(B, \alpha) K_j^3, \\ S_5 = \sum_{j=1}^6 L_j(B, \alpha)^{шлj}, \quad S_6 = \sum_{j=1}^6 L_j(B, \alpha)^r.$$

С использованием переменных коэффициентов S_i из логико-динамической модели (4) можно последовательно выделять модели локальных s -х состояний в виде систем линеаризованных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами (для простоты записи обозначение Δ в (4) опущено).

Применение логико-динамических моделей типа (4) позволит разработчикам топочных устройств и систем управления ими изучить последствия многочисленных произвольных изменений расхода доменного газа B^A на всем диапазоне B , $0 < B < 100 \%$, проводя численные эксперименты на ЭВМ. При этом не только можно получить кривые переходных процессов в результате скачкообразных изменений расхода B^A , но и вывести значения коэффициентов модели и процентное содержание $B^A \%$ для вновь установившегося s -го режима.

Т а б л и ц а 1

S_i	Д, %	0–10	10–30	30–50	50–70	70–90	90–100
α_1/α_2	J	1	2	3	4	5	6
S_1	$K^Г$	2.53	2.46	2.43	3.00	2.76	1.93
		2.81	2.73	2.69	3.27	3.00	2.07
S_2	$K^В$	0.062	0.053	0.042	0.022	0.015	0.007
		0.049	0.042	0.033	0.017	0.012	0.008
S_3	K^q	42.6	44.4	45.5	34.0	39.2	66.2
		36.3	38.0	39.0	29.2	34.2	60.5
S_4	$K^З$	0.116	0.115	0.115	0.116	0.114	0.103
		0.120	0.120	0.120	0.120	0.117	0.105
S_5	$T^шл$	4.00	4.05	4.08	3.71	3.92	4.61
		3.75	3.81	3.85	3.46	3.70	4.50
S_6	$T^Г$	0.0024	0.0025	0.0019	0.0019	0.0022	0.0037
		0.0021	0.0022	0.0022	0.0016	0.0019	0.0034
S_7	T^O	1881	1853	1839	1795	1705	1401
		1778	1754	1742	1704	1620	1368
S_8	$N^З$	1631	1603	1589	1545	1455	1161
		1528	1528	1504	1492	1454	1377

4. Топочные устройства как интервальная логико-динамическая система

Логико-динамические структуры моделирования производственных процессов и систем являются мощным средством компьютерного исследования и проектирования объектов, а также разработки систем логического управления ими с применением управляющих ЭВМ и микропроцессорной техники. Однако при проведении серии вычислительных экспериментов, воспроизводящих различные режимы, изменения параметров или воздействий при достаточно большом количестве N локальных состояний $s = \overline{1, N}$, перед исследователем возникает проблема достоверности получаемых результатов. Так как погрешности различного рода при моделировании могут превысить допустимую погрешность [3], то применение пользователем конечного результата может привести к ошибочным проектным решениям или выработке неправильных управляющих воздействий.

В целом проблема контроля точности численного моделирования выходит за рамки теории логико-динамических систем. Способам учета влияния различных источников погрешностей посвящено множество работ. Одним из способов единовременного учета влияния различных источников погрешностей являются интервальные методы (см., например, [4, 6]).

Применение методов интервального анализа к топочным процессам (независимо от логико-динамических структур) целесообразно потому, что для них существуют некоторые колебания расходов доменного $B^д$ и природного $B^п$ газов. Последнее можно объяснить нестационарностью основного технологического процесса печей металлургического комбината и работы газопровода.

Интервальный вариант модели топочного устройства был рассмотрен в [5], и даны соответствующие оценки. Полученные на ее основе интервальные решения отклонений температур загрязнений θ для ряда изменений $B_i^д$ приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

T	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	ω
0.005	0.02746853	0.02831807	0.02916761	0.00169908
18.000	36.332430	37.456130	38.579840	2.2474100
38.544	0.98039840	1.0107240	1.0410450	0.06064660
60.000	0.02253355	0.02323054	0.02392734	0.00039379
60.005	0.05162456	0.05322119	0.05481592	0.00319136
77.989	73.270980	75.537050	77.803160	4.5321800
98.533	2.0144490	2.0767570	2.1390570	0.1246080
130.000	0.00821478	0.00846890	0.00872292	0.00050814
130.005	-0.0070400	-0.0072577	-0.0074754	0.00043540
148.120	-12.81874	-13.21519	-13.61166	0.79292000
168.820	-0.3592220	-0.3703308	-0.3814420	0.02222000
199.030	-0.0019464	-0.0020066	-0.0020066	0.00012040

5. Выводы

Наш анализ результатов моделирования топочного устройства как интервальной логико-динамической системы показал, что

— применение логико-динамических моделей повышает универсальность описания топочного устройства и позволяет изучать его динамику в широком диапазоне изменений значений параметров объекта и воздействий на него;

— использование методов интервального анализа, кроме классических точечных результатов моделирования дает исследователю гарантированные верхние, нижние и усредненные значения переменных, знание которых способствует разработке качественных САР топочных процессов.

Список литературы

- [1] ТАХИРДЖАНОВ М. Разработка и исследование САР тепловой нагрузки парогенератора при совместном сжигании доменного, коксового и природного газов: Дис. ... канд. техн. наук. Ташкент, 1980.
- [2] ЖУК К. Д., ТИМЧЕНКО А. А., ДОЛЕНКО Т. И. *Исследование структур и моделирование логико-динамических систем*. Наукова думка, Киев, 1975.
- [3] АБДУКАДЫРОВ А. А. О точности моделирования логико-динамических систем. *Вопросы кибернетики. Техническая кибернетика и теория информации*. Вып. 133. Ташкент, 1986, 50–55.
- [4] КАЛМЫКОВ С. А., ШОКИН Ю. И., ЮЛДАШЕВ З. Х. *Методы интервального анализа*. Наука, Новосибирск, 1986.
- [5] АБДУКАДЫРОВ А. А., ТАХИРДЖАНОВ М., ЮЛДАШЕВ З. Х. Об интервальном варианте модели топочного устройства. *Вычислительные технологии-94*. Новосибирск, 1995, 5–9.
- [6] NEUMAIER A. *Interval Methods for Systems of Equations*. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

Поступила в редакцию 2 ноября 1998 г.,
в переработанном виде 26 января 1999 г.