УДК 669.046.658.52.011.56

Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, К.Г. Венгер, М.Г. Чичиндаев, А.А. Куценко

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВКИ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Одной из задач разработки, исследования и реализации систем автоматизации управления энергогенерирующм комплексом является задача идентификации, связанная с построением динамических моделей преобразующих каналов опытной установки сжигания водоугольного топлива (ВУТ). Из предварительных исследований, проведенных на действующей установке сжигания ВУТ, следует, что эта установка подвержена влиянию контролируемых и неконтролируемых возмущений [1].

Исследуемый объект включает (рис. 1) вихревую топку совместно со схемами подачи ВУТ, компрессорного воздуха в форсунку для распыления топлива, атмосферного воздуха на его горение, а также трактом эвакуации продуктов сгорания. ВУТ с помощью перистальтического насоса подается в форсунку для сжигания в вихревой топке. Топливо предварительно проходит через фильтр тонкой очистки. Атмосферный воздух для сжигания распыленного топлива с помощью дутьевого вентилятора подается в топку двумя трубопроводами, через один из которых воздух подается горизонтальной струей, а через другой – вертикальной. Трубопроводы оборудованы регулирующими клапанами для изменения «вручную» расхода атмосферного воздуха в каждом из них. Продукты сгорания топлива удаляются дымососом,

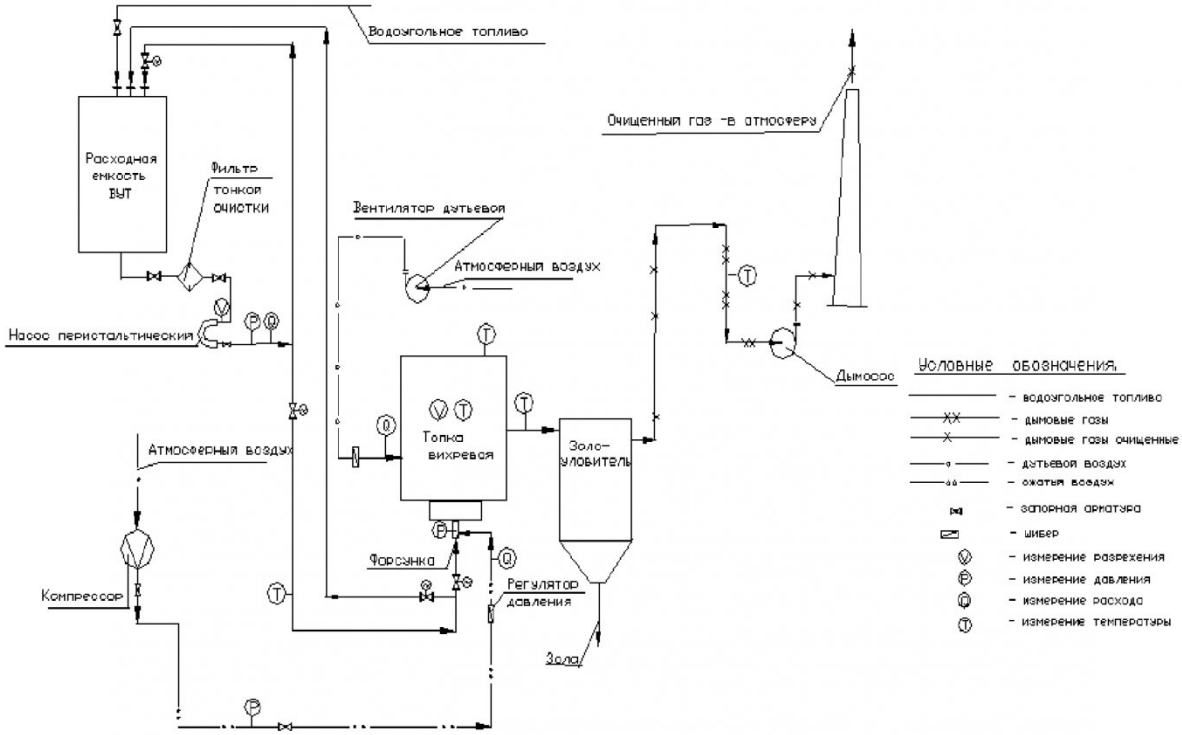

Рис.1. Схема установки сжигания водоугольного топлива

оборудованном направляющим аппаратом для изменения величины разрежения в топочном пространстве и, соответственно, расхода газа через дымовой тракт. Характеристика исходных данных приведена в табл. 1.

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. Первый из них был связан с проведением активных экспериментов на действующей опытной установке сжигания топлива и получением экспериментальных данных, а второй – с

[1] Работа выполнена в рамках проекта № 2010-218-02-174 по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Таблица 1. Характеристика исходных данных

Обозначение	Наименование, размерность	Диапазон	Способ, периодичность измерения
$Q_т$	расход водоугольного топлива, л/час	20÷120	автоматически, Δt = 1 сек.
$Q_{В1}$	расход атмосферного воздуха в топку горизонтальной струей, % хода регулирующего органа	0÷100	оценивается косвенно через положение регулирующего органа, по мере надобности
$Q_{В2}$	расход атмосферного воздуха в топку вертикальной струей, % хода регулирующего органа	0÷100	оценивается косвенно через положение регулирующего органа, по мере надобности
$Q_{КВ}$	расход компрессорного воздуха, нм^3/час	60÷130	показывающий прибор, по мере надобности
φ	Разрежение в дымовом тракте, % хода регулирующего органа,	0÷100	оценивается косвенно через положение жалюзи, по мере надобности
$t_п$	температура в вихревой зоне топки печи, ^{o}C	0÷1400	автоматически, Δt = 1 сек.
$t_д$	температура дыма на выходе из топки, ^{o}C	0÷1400	автоматически, Δt = 1 сек.
CO_2	содержание CO_2 в дымовом тракте,%	0÷20	автоматически, Δt = 1 сек.
O_2	содержание O_2 в дымовом тракте, %	0÷20	автоматически, Δt = 1 сек.
η	вязкость водоугольного топлива, мПа·с (СПз)	10÷300	лабораторный анализ для каждого вида топлива

Таблица 2. Матрица планирования экспериментов

Входные воздействия	Номер эксперимента										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$Q_Т$	б	+	–	б	б	б	б	б	б	б	б
$Q_{1В}$	б	б	б	+	–	б	б	б	б	б	б
$Q_{2В}$	б	б	б	б	б	–	+	б	б	б	б
$Q_{КВ}$	б	б	б	б	б	б	б	+	–	б	б
φ	б	б	б	б	б	б	б	б	б	+	–

обработкой данных.

Проведение эксперимента и получение данных. Поскольку исследования проводились на опытной установке сжигания ВУТ, функционирование которой не связано с получением коммерческой продукции, то ограничения на изменения входных воздействий исследовательского характера в рабочих диапазонах, указанных в таблице 1, практически отсутствовали. Поэтому был составлен план проведения активных экспериментов, который предусматривал получение данных, необходимых для построения динамических характеристик установки сжигания ВУТ – моделей каналов преобразования отклонений входных воздействий

– расхода ВУТ $Q_т$;

– расхода подаваемого в топку горизонтальной струей атмосферного воздуха на сжигание топлива $Q_{В1}$;

– расхода подаваемого в топку вертикальной струей атмосферного воздух на сжигание топлива $Q_{В2}$;

– изменение разрежения в дымовом тракте φ

в отклонения выходных воздействий

– температуры в топке $t_п$;

– температуры дыма непосредственно на выходе из топки $t_д$;

– процентного содержания в дыме CO_2 и O_2.

Матрица планирования экспериментов приведена в табл. 2, где : б – базовое значение воздействия, «+» означает повышение воздействия на величину, равную 10 – 20 % от его базового значения; «-» означает понижение воздействия на величину, равную 10– 20 % от его базового значения.

Перед нанесением исследовательских воздействий объект идентификации предварительно был выведен в базовый режим, который характеризовался следующими уровнями учитываемых его входных воздействий: $Q_Т^Б = 60{,}0$ л/час; $Q_{В1}^Б = 16{,}7$ % хода регулирующего органа; $Q_{В2}^Б = 16{,}7$ % хода регулирующего органа; $Q_{ВК}^Б = 90$ нм^3/час.; $\varphi^Б = 33{,}4$ % хода регулирующего органа; $\eta^Б = 207$ мПа·с. Основные показатели качества ВУТ приведены в табл. 3.

Схема проведения эксперимента основывалась

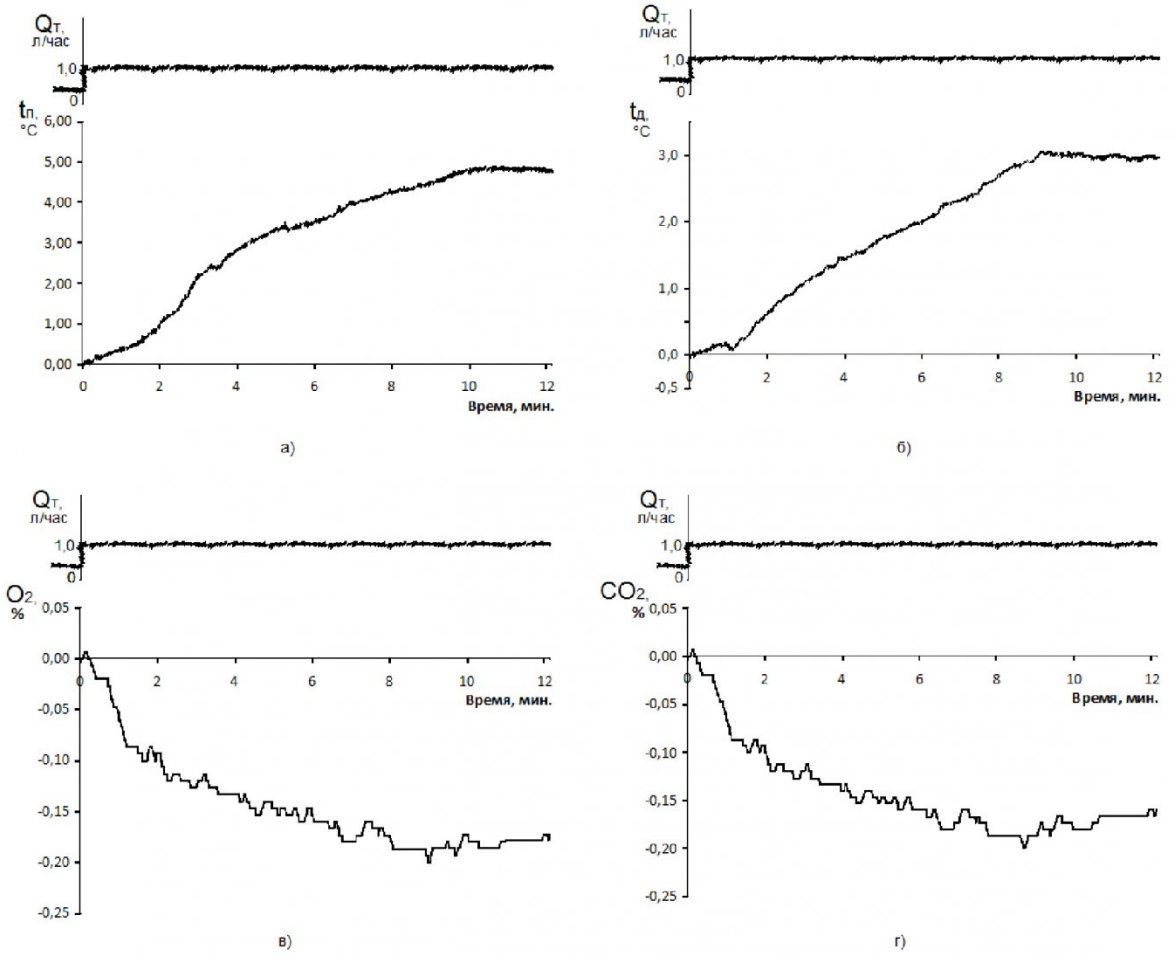

Рис. 2. Реакция объекта на единичное ступенчатое увеличение расхода топлива Q_m

на методе идентификации с нанесением испытательных воздействий на прогнозируемые траектории рабочих режимов управления [1] и заключалась в скачкообразном изменении соответствующего входного воздействия с одновременной записью реакции объекта по исследуемым выходным воздействиям.

Перед реализацией очередного эксперимента, заданного матрицей (таблица 2), текущую реализацию соответствующего входного воздействия предварительно сглаживали и экстраполировали.

Величина скачкообразного изменения расхода топлива $\delta Q_{\text{Т}}$ составляла 15-25 л/час, а $\delta Q_{\text{В1}}$, $\delta Q_{\text{В2}}$ и $\delta\varphi$ – 16,7% хода регулирующего органа. Поскольку объект идентификации функционирует в условиях неконтролируемых возмущений, эксперименты дублировались с целью их последующего усреднения по множеству.

Обработка данных. Обработку данных также

Таблица 3. Характеристика водоугольного топлива для сжигания в вихревой топке

Наименование показателя	Отходы из зумпфа проба № 1	Отходы из зумпфа проба № 2
Классы крупности, мм +1,0	0,1	-
0,355-1,0	1,7	1,8
0,250-0,355	3,0	2,9
0,071-0,250	27,7	26,8
-0,071	67,5	68,5
Итого:	100,0	100,0
Массовая доля твердого, $C_т$, %	55,6	52,8
Эффективная вязкость при скорости сдвига 81с$^{-1}$, η, мПа·с	207	119
Зольность, A^d, %	28,9	28,7
Низшая теплота сгорания, $Q_ш^к$, кДж/кг	11719,4	11036,9

осуществляли в два этапа. На первом этапе выполняли следующие операции:

1) сглаживали и экстраполировали измеренные траектории одного из входных воздействий, которое планировали изменять на следующем эксперименте, и выходных воздействий. Интервал экстраполяции выбирали с учетом оценки времени переходного процесса по исследуемым каналам преобразования воздействий;

2) фиксировали моменты нанесения скачкообразных изменений входных воздействий и окончания переходного процесса по каналам преобразования отклонений «$\delta V_i \to \delta Y_j$», где δV_i – отклонения входных воздействий объекта идентификации, δY_j - отклонения его выходных воздействий, i=j=1,…,4 – номера входного и выходного воздействий;

3) определяли значения δV_i по разности между его сглаженным и экстраполированным значениями;

4) определяли значения δV_i как разность между измеренными и экстраполированными их значениями;

5) нормировали значения полученных кривых переходного процесса приведением их к единичному скачкообразному изменению входного воздействия.

Пункты 1) – 5) указанной схемы повторяли при обработке реакции объекта на каждое новое исследовательское воздействие. Для примера на рис. 2 приведены полученные в результате такой обработки кривые переходного процесса для одного из экспериментов.

Наличие нерегулярных составляющих в сигналах измерительной информации, представленных на этом рисунке, обнаруживается непосредственно при их визуальном анализе и говорит о наличии неконтролируемых возмущений достаточно высокого уровня, особенно по каналам преобразования с выходом на переменные O_2 и CO_2 в продуктах сгорания. Кривые переходного процесса, полученные для одних и тех же каналов преобразования при приблизительно одинаковых условиях, сводили в одну группу для совместной обработки.

В качестве примера на рис.3 представлены в обобщенном виде полученные реализации переходных процессов по каналам преобразования, отражающим влияние изменений расхода ВУТ δQ_T и расхода воздуха δQ_{B1} на изменение температуры рабочего пространства печи $\delta t_{П}$.

Одновременно со средней реализацией, полученной путем их усреднения по множеству в этой группе, на этих рисунках приведены и огибающие, которые отражают разброс данных, полученных для одних и тех же условий. Аналогичные обобщенные кривые были сформированы и для других каналов преобразования объекта идентификации.

На втором этапе обработки данных осуществляли выбор структуры математической модели преобразующих каналов объекта идентификации и ее параметрическое оценивание.

Таблица 4 Оценки параметров моделей каналов преобразования входных воздействий

Обозначение канала	Коэффициент передачи k_0				Постоянная времени T_0, сек.			Время запаздывания τ, сек.		
	размерность	среднее значение	max значение	min значение	среднее значение	max значение	min значение	среднее значение	max значение	min значение
$\delta Q_T \to \delta T_п$	^0C/л/час	5,4	7,0	3,8	182	213	151	21	30	12
$\delta Q_T \to \delta T_д$	^0C/л/час	2,3	3,15	1,45	180	208	152	22	31	12
$\delta Q_T \to \delta CO_2$	% /л/час	0,14	0,19	0,09	78	102	52	11	15	7
$\delta Q_T \to \delta O_2$	% /л/час	-0,14	-0,19	-0,09	78	102	52	11	15	7
$\delta Q_{B1} \to \delta T_п$	^0C/%	-0,80	-1,10	-0,50	170	210	140	15	21	10
$\delta Q_{B1} \to \delta T_Д$	^0C/%	-0,96	-1,12	-0,80	170	186	154	15	21	11
$\delta Q_{B1} \to \delta CO_2$	% / %	-0,06	-0,09	-0,03	70	100	40	16	20	12
$\delta Q_{B1} \to \delta O_2$	% / %	0,05	0,070	0,03	70	100	40	16	20	12
$\delta Q_{B2} \to \delta T_п$	^0C/%	-2,7	-3,0	-2,4	175	190	160	16	20	12
$\delta Q_{B2} \to \delta T_Д$	^0C/%	-2,30	-3,15	-1,45	175	205	145	16	20	12
$\delta Q_{B2} \to \delta CO_2$	% / %	-0,02	-0,03	-0,00	105	140	60	16	20	12
$\delta Q_{B2} \to \delta O_2$	% / %	0,03	0,035	0,025	70	100	40	16	20	12
$\delta\varphi \to \delta T_Д$	% / %	-4,5	-5,0	-4,0	90	120	60	16	20	12
$\delta\varphi \to \delta T_п$	% / %	-3,3	-4,0	-2,6	90	125	55	16	20	12
$\delta\varphi \to \delta CO_2$	% / %	-0,18	-0,19	-0,17	90	120	60	5	10	0
$\delta\varphi \to -\delta O_2$	% / %	0,20	0,22	0,18	90	120	60	5	10	0

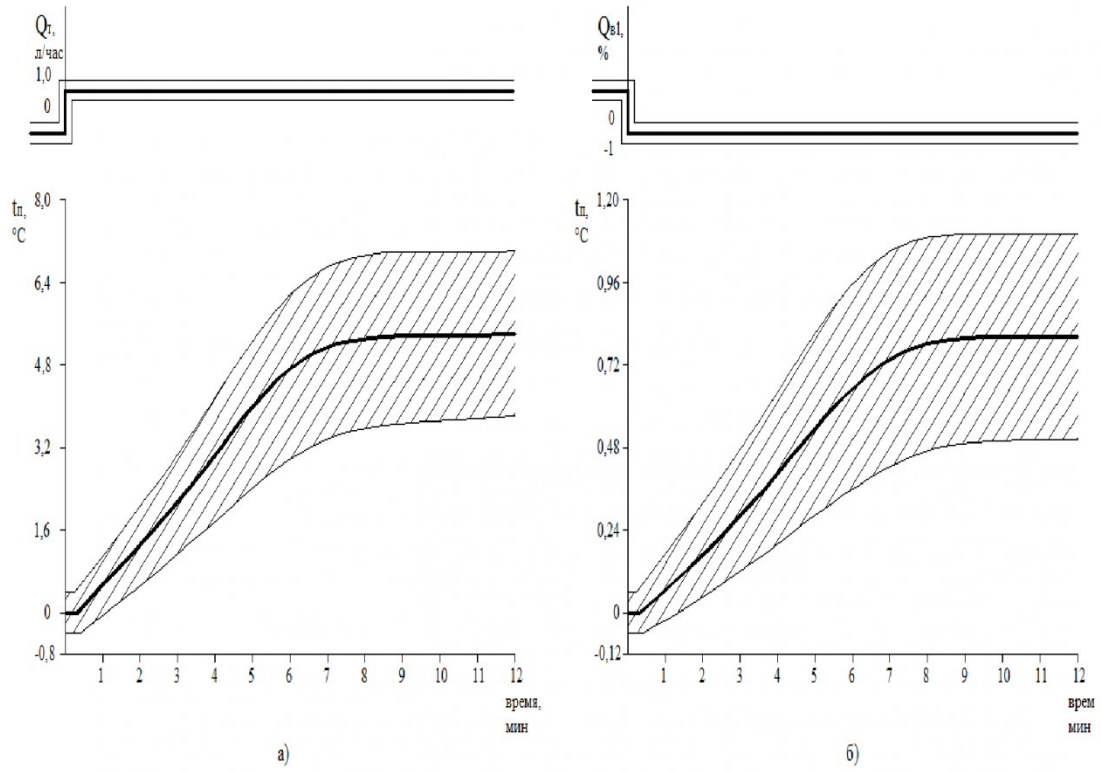

Рис. 3. Обобщенные реализации переходного процесса по каналу преобразования "δQт →δtп" (а) и "δQв1 →δtп" (б)

Структура модели, представленная в виде инерционного звена первого порядка, соединенного последовательно с звеном чистого запаздывания, была выбрана по результатам визуального анализа усредненных кривых разгона. Значения ее параметров по каждому каналу преобразования находили с помощью одной из известных процедур обработки кривых разгона, в частности, изложенной в [2]. Оценки параметров таких моделей k_0, T_0, τ_0 приведены в табл. 4. В ней приведены не только средние значения этих параметров, но и их минимальные и максимальные значения. Полученные диапазоны возможных значений этих параметров отражают тот уровень неопределенности, которым характеризуется объект идентификации.

Вывод. Проведенные на установке сжигания ВУТ экспериментальные исследования позволили получить новые данные о структуре и значениях параметров функциональных моделей ее преобразующих каналов, необходимые для разработки алгоритмического и технического обеспечений системы автоматизации управления энергогенерирующим комплексом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, А.С. Рыков, Л.П. Мышляев, Е.И. Львова, А.А. Ивушкин, Л.Г. Казакова. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2007. – 307с.

2. *Ротач В.Я.* Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования – М.: Энергия, 1973. – 440 с.

Авторы статьи:

Мышляев Леонид Павлович, докт. техн. наук, профессор, проректор ГОУ ВПО «СибГИУ» по научной работе и инновационному развитию, тел. (3843)465883.

Евтушенко Виктор Федорович, докт. техн. наук, профессор, проф. каф. автоматизации и информационных систем ГОУ ВПО «СибГИУ»,.тел. (3843)748806.

Венгер Константин Геннадьевич, технический директор ОК «Сибшахтострой», тел. (3843)721467.

Чичиндаев Михаил Георгиевич, генеральный директор ООО «Сибшахтостройпроект», тел. (3843)97-51-60.

Куценко Андрей Андреевич, аспирант ГОУ ВПО «СибГИУ», тел. (3843)749433.