

5. Самчелеев Ю.П. Универсальный высокоэффективный источник питания для электроприводов постоянного и переменного тока / Ю.П.Самчелеев, В.Г.Дрючин, Г.С.Белоха // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”: збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Х.: НТУ „ХПІ”. – 2013. – №36(1009). – С.317-321.
6. Самчелеев Ю.П. Преобразователь частоты электромагнитно совместимый с сетью / Самчелеев Ю.П., Дрючин В.Г. Белоха Г.С. // Електротехнічні та комп’ютерні системи: науково-технічний журнал. – Одесса. – 2014. – №15(91). – С.340-343.

Поступила в редколлегию 30.06.2014.

УДК 669.187.004.18

ЯШИНА К.В., к.т.н., доцент
САДОВОЙ А.В., д.т.н., профессор

Днепродзержинский государственный технический университет

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Введение. Моделирование – это замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели. При разработке автоматизированной системы управления (АСУ) моделирование технологического процесса (ТП) может быть эффективно применимо для выдачи управляющей системой соответствующих команд на базе собранных измерений и оценки реакции системы на конкретные возмущающие воздействия. На сегодняшний день существует множество видов моделирования. Однако, большинство из них позволяет получать сложные модели систем с неоднозначной структурой. Такие модели нелегко использовать при разработке АСУ [1-5].

Постановка задачи. Задачей исследования является разработка новой методики построения моделей ТП, которые могут быть эффективно применимы при разработке АСУТП.

Результаты работы. Согласно разработанной методике моделируемый технологический процесс рассматривается как система. Под системой авторы понимают любой объект, который рассматривается, с одной стороны, как единое целое, а с другой – как совокупность связанных между собой компонентов. Такое определение системы позволяет:

- проще интерпретировать назначение любой сложной структуры, состоящей из взаимодействующих друг с другом частей;
- при описании системы по-разному разбить ее на составные части;
- предвидеть поведение системы, основываясь на принципе «черного ящика» - соотношении „вход/выход”.

Для описания систем и их элементов целесообразно применять различные математические методы. Динамика - важнейшая характеристика системы, знание которой позволяет предсказать поведение системы и выбрать правильное управляющее воздействие в соответствие с поставленной целью [5].

Авторы используют технологические схемы (ТС) процессов для создания их динамических моделей. При этом модель технологического процесса рассматривается как совокупность моделей технологических аппаратов (ТА). Модель каждого технологического аппарата строится по принципам математического моделирования с использова-

нием разностных уравнений. Характеристики, вычисленные при моделировании одного технологического аппарата, используются в других технологических аппаратах, что позволяет отследить динамику системы.

Рассмотрим ТС работы парового котла №9 ПАО „Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э.Дзержинского (ДМКД)” (рис.1), отличительной чертой которого является возможность использования нескольких видов топлива. Технологические аппараты, описывающие элементы этой схемы, приведены в табл.1 [6].

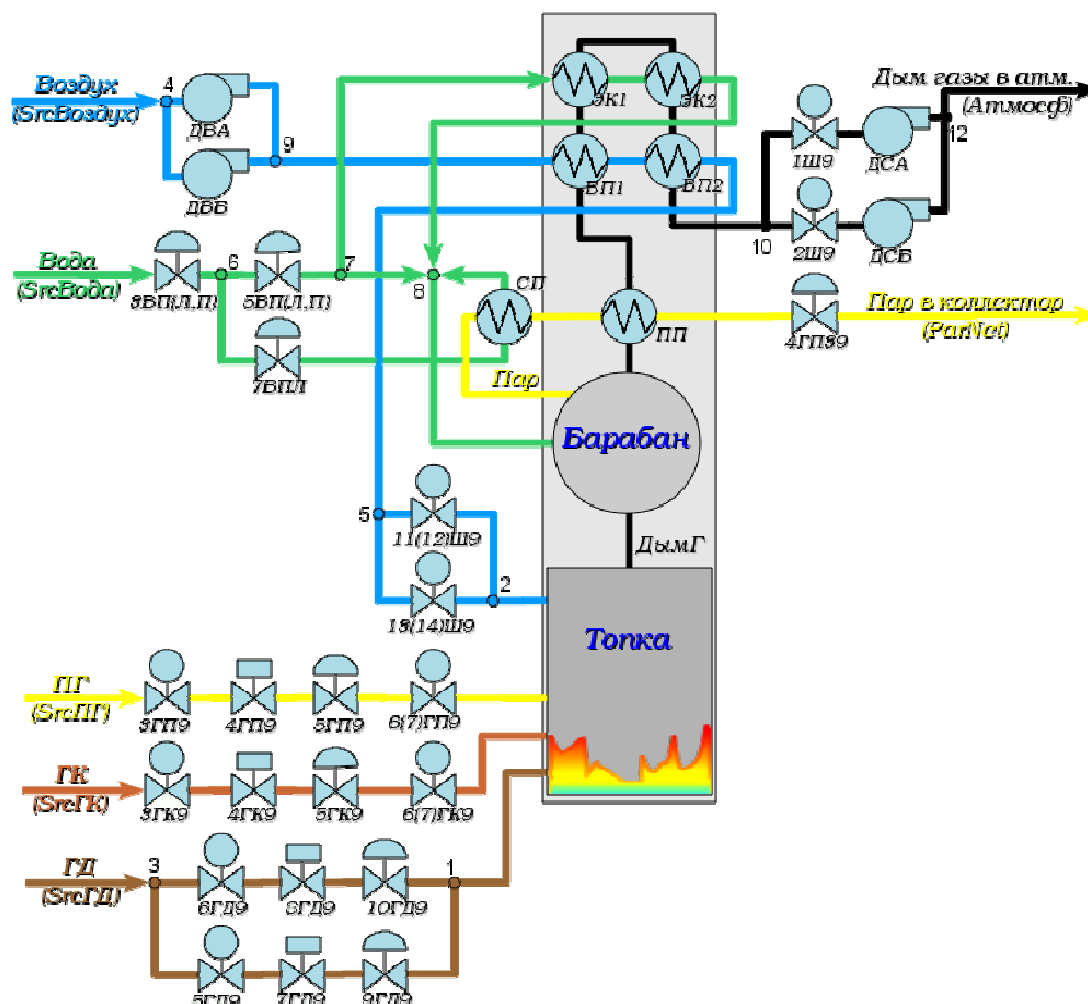


Рисунок 1– Технологическая схема парового котлоагрегата

Таблица 1 – Технологические аппараты, описывающие элементы ТС работы парового котла №9 ПАО „ДМКД”

Технологический аппарат	Элементы технологической схемы, описываемые с помощью этого аппарата
1	2
Задвижка	Природный газ: 3ГП9, 6(7) ГП9. Коксовый газ: 3ГК9, 6(7)ГК9. Доменный газ: 6ГД9, 5ГД9. Дымовые газы: 11(12)Ш9, 13(14)Ш9, 1Ш9, 2Ш9.
Клапан-отсекатель	Природный газ: 4ГП9. Коксовый газ: 4ГК9. Доменный газ: 8ГД9, 7ГД9.

Продолжение таблицы 1

1	2
Регулирующий клапан	Природный газ: 5ГП9. Коксовый газ: 5ГК9. Доменный газ: 10ГД9, 9ГД9. Вода: 3ВП, 5ВП, 7ВП. Пар: 4ГПЗ.
Теплообменник	Экономайзеры: ЭК1, ЭК2. Воздухоподогреватели: ВП1, ВП2. Сухопарник СП. Пароперегреватель ПП.
Барабан	Барабан
Топка	Топка
Компрессор	Дымососы: ДСА, ДСБ. Воздуходувки: ДВА, ДВБ.

Рассмотрим основные принципы моделирования каждого технологического аппарата.

При моделировании течения жидкостей и газов по трубам, через клапаны и задвижки используется уравнение Бернулли [7]. Пусть некоторый объем жидкости (газа) перемещается за некоторый интервал времени от участка трубы с сечением $S_1 (м^2)$ и давлением $p_1 (Па)$ до участка с сечением $S_2 (м^2)$ и давлением $p_2 (Па)$; $V_1 (\frac{м}{с})$ и $V_2 (\frac{м}{с})$ - скорости течения жидкости (газа) в рассматриваемых сечениях; $h_1 (м)$ и $h_2 (м)$ - высоты центра массы выделенного объема жидкости (газа) относительно некоторого нулевого горизонтального уровня. Уравнение Бернулли для жидкости имеет вид:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_{nom} = H = const, \quad (1)$$

где H - напор ($м$); h_{nom} - потерянный напор, который складывается из линейных потерь, вызванных силой трения между слоями жидкости, и потерь, вызванных местными сопротивлениями (изменениями конфигурации потока) ($м$); α_1 и α_2 - коэффициенты Кориолиса, которые равны 1 для турбулентного потока и 2 – для ламинарного.

Уравнение Бернулли для газа имеет вид:

$$h_1 \rho g + p_1 + \alpha_1 \frac{\rho V_1^2}{2} = h_2 \rho g + p_2 + \alpha_2 \frac{\rho V_2^2}{2} + \Delta p_{nom} = const, \quad (2)$$

где Δp_{nom} - потерянное давление ($Па$).

Если обозначить $F_1 (\frac{кг}{с})$ и $F_2 (\frac{кг}{с})$ - расход жидкости и газа через сечения S_1 и S_2 , то уравнение (1) примет вид (3), а уравнение (2) – вид (4):

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{F_1^2}{(S_1 \rho)^2 2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{F_2^2}{(S_2 \rho)^2 2g} + h_{nom} = H = const, \quad (3)$$

$$h_1 \rho g + p_1 + \alpha_1 \frac{\rho F_1^2}{2(S_1 \rho)^2} = h_2 \rho g + p_2 + \alpha_2 \frac{\rho F_2^2}{2(S_2 \rho)^2} + \Delta p_{nom} = const. \quad (4)$$

Таким образом, уравнения (3) и (4) описывают зависимости между входными и выходными значениями расходов и давлений жидкостей и газов для участка трубы, задвижки, клапана-отсекателя, регулирующего клапана.

При моделировании регулирующего клапана площадь сечения $S_{реал} (м^2)$ зависит от $L (%)$ - положения клапана (степени открытия):

$$S_{реал} = S \left(\frac{L}{100} \right)^{k_L},$$

где k_L - коэффициент нелинейности, характеризующий скорость хода клапана (при малом проценте открытия ход быстрее, при большом - медленнее); S - площадь сечения при положении клапана 100% ($м^2$).

При моделировании задвижки и клапана-отсекателя площадь сечения $S_{реал} = 0$ в случае, если задвижка или отсекатель закрыты, и $S_{реал} = S$, если задвижка или отсекатель открыты.

Рассмотрим модель теплообмена между двумя потоками. Пусть $F_1 \left(\frac{кг}{с} \right)$, $T_1 (K)$ – расход и температура первого потока, $F_2 \left(\frac{кг}{с} \right)$, $T_2 (K)$ – второго. Тогда температуры потоков в результате теплообмена вычисляются по формулам:

$$T_1^{рез} = \frac{F_1 T_1 c_1 + k_{обмен} F_2 T_2 c_2}{F_1 c_1 + k_{обмен} F_2 c_2}, \quad T_2^{рез} = \frac{k_{обмен} F_1 T_1 c_1 + F_2 T_2 c_2}{k_{обмен} F_1 c_1 + F_2 c_2},$$

где $k_{обмен}$ - коэффициент теплообмена; c_1 и c_2 - удельные теплоемкости потоков ($\frac{Дж}{кгK}$).

Для описания зависимости между входными и выходными значениями расходов и давлений целесообразно использовать уравнения (3) и (4).

Перейдем к рассмотрению модели топки парового многотопливного котлоагрегата. Пусть $F_{ГП}$ - расход природного газа, поступающего в топку ($\frac{кг}{с}$), $F_{ГД}$ - расход доменного газа, поступающего в топку ($\frac{кг}{с}$), $F_{ГК}$ - расход коксового газа, поступающего в топку ($\frac{кг}{с}$), $F_{воз}$ ($\frac{кг}{с}$), $T_{воз} (K)$ - расход и температура воздуха, поступающего в топку.

Тогда $F_{воз}^{необход}$ ($\frac{кг}{с}$) - расход воздуха, необходимый для полного сгорания топлива, поступающего в топку, вычисляется по формуле:

$$F_{воз}^{необход} = k_{ГП} F_{ГП} + k_{ГД} F_{ГД} + k_{ГК} F_{ГК},$$

где $k_{ГП}$ - коэффициент, характеризующий количество единиц воздуха, необходимых для сгорания единицы природного газа; $k_{ГД}$ - коэффициент, характеризующий количество единиц воздуха, необходимых для сгорания единицы доменного газа; $k_{ГК}$ - коэффициент, характеризующий количество единиц воздуха, необходимых для сгорания единицы коксового газа.

Расход дымовых газов, выделяющихся в результате сгорания топлива, вычисляется по формуле

$$F_{дг} = F_{воз} + F_{гп} + F_{гд} + F_{гк}.$$

Тогда процентное содержание остаточного кислорода в дымовых газах

$$O_2 = \frac{(F_{воз} - F_{воз}^{необход})}{F_{дг}} 100 \quad \text{при } F_{воз} > F_{воз}^{необход},$$

$$O_2 = 0 \quad \text{при } F_{воз} \leq F_{воз}^{необход}.$$

Количество тепла, выделяемое при сгорании топлива,

$$Q_{дг} = \int (q_{гп} F_{гп} + q_{гд} F_{гд} + q_{гк} F_{гк}) \frac{F_{воз}}{F_{воз}^{необход}} dt,$$

где $q_{гп}$ - удельная теплота сгорания природного газа ($\frac{Дж}{кг}$); $q_{гд}$ - удельная теплота сгорания доменного газа ($\frac{Дж}{кг}$); $q_{гк}$ - удельная теплота сгорания коксового газа ($\frac{Дж}{кг}$).

Температура дымовых газов

$$T_{дг} = \frac{Q_{дг}}{F_{дг} c_{дг} \Delta t} + T_{воз},$$

где $c_{дг}$ - удельная теплоемкость дымовых газов ($\frac{Дж}{кгК}$).

Рассмотрим модель работы барабана. Пусть $F_{воды}$ ($\frac{кг}{с}$), $T_{воды}$ (К) - расход и температура воды, поступающей в барабан. Для моделирования работы барабана составим тепловой баланс:

$$Q_{дг} = k_{потерь} (Q_{нагрев} + Q_{пар}),$$

где $k_{потерь}$ - коэффициент теплотерь; $Q_{нагрев}$ - количество теплоты, которое идет на нагрев воды в барабане до температуры парообразования (Дж); $Q_{пар}$ - количество теплоты парообразования (Дж).

$$Q_{нагрев} = c_{воды} m_{воды} (T_{пар} - T_{воды}),$$

где $c_{воды}$ - удельная теплоемкость воды ($\frac{Дж}{кгК}$); $m_{воды}$ - масса воды, поступившей в барабан (кг); $T_{пар}$ - температура парообразования (К).

$$m_{воды} = \int F_{воды} dt, \quad Q_{пар} = L_{пара} m_{пара}.$$

Тогда

$$m_{пара} = \frac{Q_{дг} - k_{потерь} Q_{нагрев}}{k_{потерь} L_{пара}},$$

$L_{пара}$ - удельная теплота парообразования ($\frac{Дж}{кг}$).

$$F_{\text{пара}} = \frac{dm_{\text{пара}}}{dt},$$

где $m_{\text{пара}}$ (кг), $F_{\text{пара}}$ ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$) – масса и расход пара.

$l_{\text{воды}}$ (%) - уровень воды в барабане вычисляется по формуле

$$l_{\text{воды}} = \frac{m_{\text{воды}} - m_{\text{пара}}}{\rho_{\text{воды}} V_{\text{бар}}} 100,$$

где $\rho_{\text{воды}}$ - плотность воды ($\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$); $V_{\text{бар}}$ – объем барабана (м^3).

Основные принципы, используемые авторами при моделировании компрессора, описаны в работе [8].

Численная реализация разработанной авторами модели парового котла №9 ПАО „ДМКД” была выполнена с помощью открытого программного проекта OpenScada. При этом рассмотренные выше модели технологических аппаратов добавлены в „Библиотеку технологических аппаратов” OpenScada и могут быть использованы для построения моделей различных технологических процессов.

Для подтверждения адекватности разработанной модели сравним модельные данные с данными суточной ведомости парового котла №9 ПАО „ДМКД” (табл.2-4).

Таблица 2 – Данные суточной ведомости парового котла №9 ПАО „ДМКД”

Часы	Нагрузка котла паромер	Пар		Питательная вода			Расход топлива Доменный газ	Давление топлива (доменный газ)		Температура уходящих дымовых газов	Разрежение в топке	Воздух	
		Давление в барабане	Температура перегретого пара	Давление до экономайзера	Расход перед пароохладителем	Температура после экономайзера		В коллекторе	Перед горелкой			Давление за воздухоподогревателем	Температура за воздухоподогревателем
	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$\times 10^4$ Па	К	$\times 10^4$ Па	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	К	$\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	$\times 10^6$ Па	$\times 10^6$ Па	К	Па	Па	К
1	26,39	345,19	698	411,88	5,61	516	20,27	39,23	7,85	468	26,48	284,39	578
5	27,22	347,15	698	411,88	6,11	516	21,39	44,13	10,79	470	26,48	284,39	578
10	22,78	354,02	698	431,49	2,58	515	17,78	34,32	5,88	464	26,48	284,39	571
15	20	353,03	698	411,88	4,89	517	16,11	93,16	2,94	461	26,48	313,81	563
20	25	351,08	693	431,68	5	518	21,94	53,94	9,8	468	29,42	274,58	578
24	25,84	341,27	693	402,07	4,39	516	21,11	53,94	9,8	469	24,52	274,58	578

Таблица 3 – Модельные данные

Часы	Нагрузка котла паромер	Пар		Питательная вода			Расход топлива	Давление топлива (доменный газ)		Температура уходящих дымовых газов	Разрежение в топке	Воздух	
		Давление в барабане	Температура перегретого пара	Давление до экономайзера	Расход перед парохладителем	Температура после экономайзера		В коллекторе	Перед горелкой			Давление за воздухоподогревателем	Температура за воздухоподогревателем
	$\frac{кг}{с}$	$\times 10^4$ Па	К	$\times 10^4$ Па	$\frac{кг}{с}$	К	$\frac{м^3}{с}$	$\times 10^6$ Па	$\times 10^6$ Па	К	Па	Па	К
1	29,23	358,17	711	382,77	4,8	520	23,43	43,37	10,14	483	23,12	273,42	599
5	32,01	361,14	694	395,9	7,12	521	23,19	48,03	12,8	490	22,8	270,36	584
10	26,34	376,01	705	457,54	1,91	517	13,84	34,12	3,79	453	23,46	272,12	583
15	18,05	361,13	702	452,67	4,11	520	15,23	87,21	1,03	448	22,53	290,18	577
20	22,24	354,11	691	424,79	3,9	521	27,14	46,48	10,32	456	27,18	256,79	594
24	29,23	352,17	693	382,77	3,87	520	24,43	45,37	10,14	483	23,12	273,42	599

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции между данными суточной ведомости парового котла №9 ПАО „ДМКД” и модельными данными

Нагрузка котла паромер	Пар		Питательная вода			Расход топлива	Давление топлива (доменный газ)		Температура уходящих дымовых газов	Разрежение в топке	Воздух	
	Давление в барабане	Температура перегретого пара	Давление до экономайзера	Расход перед парохладителем	Температура после экономайзера		В коллекторе	Перед горелкой			Давление за воздухоподогревателем	Температура за воздухоподогревателем
0,861	0,665	0,718	0,642	0,915	0,702	0,934	0,967	0,964	0,837	0,835	0,864	0,796

Выводы. Таким образом, авторами разработана новая методика построения моделей технологических процессов, позволяющая осуществлять моделирование в динамическом режиме и объединять несколько видов моделирования для описания одного

технологического процесса. Эта методика позволяет определить значения необходимых параметров технологического процесса с вероятностью не менее 84%. При этом между модельными данными и данными, полученными с помощью измерительных приборов, наблюдается сильная линейная корреляция. Следовательно, разработанная методика моделирования позволяет получать данные, которые описывают моделируемый процесс адекватно как количественно, так и качественно, что позволит использовать эту методику при разработке современных автоматизированных систем управления с целью оптимизации нагрузки на контроллеры, отработки алгоритмов управления, обучения технического персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарский А.А. Математическое моделирование / Самарский А.А., Михайлов А.П. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 320с.
2. Ашихмин В.Н. Введение в математическое моделирование / Ашихмин В.Н. – М.: ЛогосГод, 2005. – 440с.
3. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем / Алиев Т.И. – СПб.: Питер, 2009. – 363с.
4. Шикин Е.В. Математические методы и модели в управлении / Шикин Е.В., Чхартшвили А.Г. – М.: „Дело”, 2000. – 431с.
5. Густав О. Цифровые системы автоматизации и управления / Густав О., Джангуидо П. – СПб.: „Невский Диалект”, 2001. – 557с.
6. Динамическая модель парового котла № 9 ПАО „ДМКД”. – Режим доступа: www.oscada.org.
7. Уравнение Бернулли. Часть V. Динамика жидкостей и газов. – Режим доступа: <http://www.fizportal.ru>
8. Моделирование работы многоступенчатого осевого компрессора с учетом отбора воздуха / Л.Г.Бойко, А.Е.Демин, Ю.П.Максимов [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 4. – С.94-99. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/aktit_2005_4_22.pdf.

Поступила в редколлегию 09.09.2014.