

ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Д.Ю. ТВЕРСКОЙ, канд. техн. наук

Рассмотрена задача определения управляемых координат пылесистем прямого вдувания котлов тепловых электростанций как сложных технологических объектов управления. Дано обоснование обобщенных термодинамических координат пылесистем, применение которых позволяет оценивать неконтролируемые технологические параметры и решать широкий класс задач управления и диагностирования.

Ключевые слова: обобщенный термодинамический анализ, управляемые координаты, пылесистемы прямого вдувания.

USING GENERIC THERMODYNAMIC ANALYSIS IN DETERMINATION TASK OF CONTROL TECHNOLOGICAL OBJECT COORDINATES

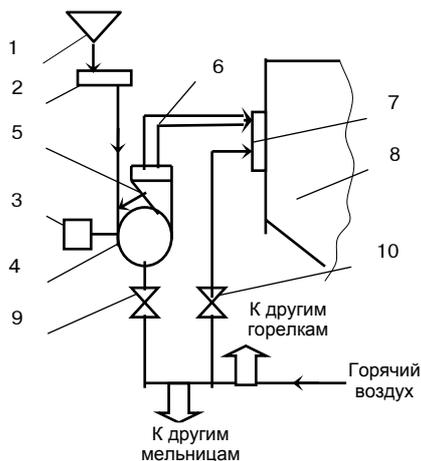
D.Yu. TVERSKOY, Candidate of Engineering

The author considers the determination task of controllable coordinates for coal-pulverization systems with direct injection of thermal power plant boilers as complex technological control units. The author describes the generic thermodynamic coordinates of coal-pulverization systems. The usage of coordinates allows to estimate uncontrolled technological parameters and to solve a wide range of control and diagnostics tasks.

Keywords: generic thermodynamic analysis, controllable coordinates, coal-pulverization systems with direct injection.

Введение. Задача получения необходимой информации о координатах технологических объектах управления (ТОУ) решается, как правило, из опыта или на основе экспериментальных исследований [1–3].

Идентификация ТОУ связана с определенными рисками при проведении экспериментальных исследований и с ограниченными возможностями непосредственного контроля технологических параметров [4, 5]. Например, для пылеугольных котлов с пылесистемами прямого вдувания задача идентификации осложнена спецификой технологических участков, в которых формируются потоки топливовоздушных смесей, направляемые в топку котла (см. рисунок).



Принципиальная схема пылесистем прямого вдувания котлов ТЭС: 1 – бункер сырого угля; 2 – питатель сырого угля с электроприводом; 3 – электропривод мельницы; 4 – мельница; 5 – сепаратор; 6 – канал подачи готового топлива в горелки; 7 – горелка; 8 – топка котла; 9, 10 – регулирующие органы подачи первичного и вторичного воздуха

Эти особенности связаны с физикой формирования топливовоздушных потоков в систе-

мах пылеприготовления, сложностью протекания мельничных процессов размола, сушки, перемещения пылепотоков и невозможностью непосредственного контроля основных параметров. При этом на физические переменные ТОУ (технологические параметры: расход сушильно-вентилирующего агента, загрузка мельницы топливом, температура аэросмеси, влажность пыли и др.) накладываются расчетно-конструкторские ограничения, при выполнении которых имеет место устойчивый массопоток топливовоздушной смеси и управляемость изделия в заданном диапазоне нагрузок. Основные допущения для нелинейной динамической модели рассматриваемого класса объектов сведены в таблицу [4, 6, 7, 8, 9] (табл. 1).

Ниже задача определения координат сложного ТОУ рассмотрена на основе развития обобщенного термодинамического анализа [10–12].

Обобщенные термодинамические потенциалы и координаты систем пылеприготовления по схеме прямого вдувания. Для того чтобы провести обобщенный термодинамический анализ эффективности той или иной сложной системы, необходимо одной группе переменных ТОУ приписать содержательный смысл обобщенного потенциала (обобщенных сил) X_i , а другой группе переменных – смысл обобщенных термодинамических координат x_i . При этом $X_i dx_i$ должно иметь смысл элементарной работы. Обобщенная физическая величина X_i является количественной мерой интенсивности процесса обмена. Обобщенная физическая величина x_i рассматривается как объект переноса, иными словами, является координатой состояния системы. Кроме того, одной из переменных необходимо приписать смысл абсолютной температуры, или энтропии.

Таблица 1. Основные ограничения (допущения)

Наименование фактора	Исходные посыпки
Расчетно-конструкторские ограничения на значения технологических параметров	заданы типоразмером мельницы – топливозодушный поток устойчивый, режим расчетный (номинальный), установившийся
Распределение пыли внутри объема мельницы и в потоке мельничного продукта	неравномерное (неизвестное)
Состояние потоков топливозодушной смеси	однозначно определяются характеристиками пылепотоков (концентрация, скорость движения, температура)
Химические реакции между компонентами пылевоздушной смеси	отсутствуют
Сушка топлива	заканчивается в объеме мельницы
Расход сушильно-вентилирующего агента	по пространственным координатам не изменяется
«Элементарный объем»	размеры не определены
Скорость центра масс «элементарного объема» для всех компонентов многофракционного потока топливозодушной смеси	$v_c = \frac{\bar{G}_c}{LD}$, м/с
Оценка плотности ρ_3 «элементарного объема» потока мельничного продукта (пылевоздушной смеси в объеме установки)	$\bar{\rho}_3 = \frac{\bar{M}}{V}$, кг/м ³
Оценка плотности ρ_2 «элементарного объема» потока готовой топливозодушной смеси	$\bar{\rho}_2 = \frac{\bar{M}_n}{V}$, кг/м ³
Масса готовой пыли определяется через ее концентрацию ρ_2^* в потоке готовой первичной топливозодушной смеси	$\bar{M}_n = \bar{\rho}_2^* \cdot V$, кг
Концентрация ρ_2^* пыли в потоке готовой первичной топливозодушной смеси	$\bar{\rho}_2^* = \frac{\bar{B}_2}{\bar{G}_c}$, кг/м ³
Концентрация ρ_3^* мельничного продукта	$\bar{\rho}_3^* = \frac{\bar{B}_3}{\bar{G}_c}$, кг/м ³
Для устойчивого массопотока (расчетный режим, см. п. 1)	$\bar{\rho}_3 \geq \bar{\rho}_3^*$, кг/м ³
Полагая, что $\rho_3 = \rho_3^*$ ММ с открытым ротором (встроенный гравитационный сепаратор)	$\frac{\bar{B}_3}{\bar{G}_c} = \frac{\bar{M}}{V} \rightarrow \bar{B}_3 = \frac{1}{V} \bar{M} \bar{G}_c$
Полагая, что $\bar{B}_3 = k_x \bar{B}_2$, получаем исходную посылку (допущение) математической модели П. Профоса k_x – экспериментальный коэффициент	$k_x \frac{\bar{B}_2}{\bar{G}_c} = \frac{\bar{M}}{V}$, $k_x = \frac{\bar{M} \bar{G}_c}{V \bar{B}_2}$.
Полагая, что $\rho_3 > \rho_3^*$ ММ с закрытым ротором (вынесенный сепаратор инерционный, центробежный)	$\bar{B}_3 = \alpha \frac{1}{V} \bar{M} \bar{G}_c$

Рассмотрим переменные системы пылеприготовления прямого вдувания как ТОУ в указанном содержательном смысле, выполняя требование сохранения размерности, Дж:

$$dA_i = X_i dx_i, \quad (1)$$

где X_i – обобщенный потенциал; dx_i – изменение обобщенной термодинамической координаты состояния системы.

Надо отметить, что в выборе координат существует известная свобода, а следовательно, существует известная свобода в выборе и сопряженных с ними потенциалов. Правильность выбора потенциалов по имеющимся рядам проверяют по формуле

$$X_i = \frac{\partial A}{\partial x_i}, \quad (2)$$

где $A = \sum_i A_i$ – сумма элементарных работ.

Рассмотрим следующие виды работ, совершаемых в системе пылеприготовления: работу перемещения потока мельничного продукта в пространстве мельничной системы; работу перемещения потока готовой пыли; работу по преодолению сопротивления установки; работу

по преодолению гравитационных сил; технические работы, определяемые работой ротора; тепловую работу в системе.

Гидродинамические работы. Работа перемещения топливозодушного потока в объеме системы мельница–сепаратор–пылепровод равна изменению кинетической энергии системы:

$$dA = d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = Mvdv + \frac{v^2}{2} dM, \quad (3)$$

где $v = v_c$ – скорость, м/с; M – масса перемещаемого топлива в потоке, кг.

Учитывая правила определенной свободы выбора зарядов, нетрудно видеть, что количественная мера интенсивности процесса переноса (обобщенный потенциал) есть удельный объем системы (объем системы, отнесенный к сечению ротора), который определяется строго конструкцией установки, а термодинамическими координатами, характеризующими состояние системы, являются сложные комплексированные параметры. При этом координата x_1 может быть определена по косвенным показа-

телям и использована при оценке состояния процесса.

Аэродинамическая работа, совершаемая потоком топливовоздушной смеси, направлена на преодоление сопротивления установки:

$$dA_3 = \mu dm, \quad (4)$$

где μ – гидродинамический потенциал, Дж/кг; m – масса перемещаемого продукта, кг,

$dm = d(\rho V) = Vd\rho$, где V – объем системы, m^3 ; ρ – плотность потока, $кг/м^3$; $\mu = \frac{P}{\rho}$, P – давление в

системе, Па.

В результате аэродинамический (гидродинамический) потенциал (обобщенная сила системы) определяется давлением в системе, Па:

$$X_3 = P,$$

а обобщенная координата (аэродинамический заряд) – объемом системы, m^3 :

$$x_3 = V.$$

Очевидно, что увеличение объема системы (изменение типоразмера мельницы) ведет к увеличению аэродинамической работы, совершаемой потоком. Рассматривая процесс в действующей системе приготовления топливовоздушной смеси, в которой объем V величина фиксированная, а работа совершается при соответствующей потере напора, и учитывая известную свободу в выборе X_i и x_i , можно записать

$$X_3 = V;$$

$$x_3 = P.$$

Работа преодоления гравитационных сил определяется перемещением потока мельничного продукта (в том числе, готовой пыли) в поле сил тяжести (по отношению к мельничному продукту гравитационные силы выполняют своего рода роль ступени сепарации):

$$dA_4 = d(Gh), \quad (5)$$

где $G = Mg$ – вес тела, Н; h – элементарное перемещение по вертикали, которое определяется приведенной высотой установки, м; M – масса перемещаемого продукта, кг.

В результате гравитационный потенциал системы (обобщенная гравитационная сила) определяется приведенной высотой h (для молотковых мельниц – отношение объема к сечению ротора), а координатой состояния системы является вес переносимой субстанции, $кг \cdot м/с^2 = Н$:

$$x_4 = Mg. \quad (6)$$

Полученный результат согласуется с известным расчетом шахтных (гравитационных) сепараторов молотковых мельниц [6].

Технические работы

Работа вращения ротора. Ротор мельницы представляет собой вращающуюся систему размольной камеры, которая обладает кинетической энергией вращения. Эта энергия определяется по формуле

$$A = \frac{J\omega^2}{2}, \quad dA_5 = d\left(\frac{J\omega^2}{2}\right), \quad (7)$$

где J – момент инерции системы, $Нм \cdot с^2$; ω – угловая скорость вращения системы, $1/с$.

Определим составляющие (7). Известно, что кинетическая энергия вращения находится путем суммирования кинетических энергий $\frac{m_i v_i^2}{2}$

всех частиц системы, обладающих массой m_i и скоростью v_i . Скорость каждой частицы находится по формуле

$$v_i = \omega \cdot r_i,$$

где r_i – расстояние от рассматриваемой частицы до оси вращения, м.

Суммирование дает

$$\sum_i \frac{m_i v_i^2}{2} = \sum_i \frac{m_i \omega^2 r_i^2}{2} = \frac{\omega^2}{2} \sum_i m_i r_i^2 = \frac{J\omega^2}{2}.$$

Таким образом, момент инерции системы равен

$$J = \sum_i m_i r_i^2,$$

угловая скорость, $р/с$,

$$\omega = \frac{2\pi n}{60},$$

где n – число оборотов ротора мельницы, об/мин.

Окружная скорость определяется скоростью бил:

$$v_i = u_6 = \frac{\pi D n}{60},$$

а $\sum_i m_i$ – массой M_p вращающихся частей ротора и массой M топлива, циркулирующего в системе:

$$\sum_i m_i = m_p + M = M_x.$$

В результате получаем

$$dA_5 = d\left(\sum_i \frac{m_i v_i^2}{2}\right) = d\left(\frac{1}{2} u_6^2 M_x\right). \quad (8)$$

Потенциал ротора (обобщенная сила) мельницы определяется квадратом окружной скорости бил ($м^2/с^2$), а координатой состояния системы является масса M_x системы. Полагая, что $m_p = \text{const}$ (режимные периоды времени), то обобщенная координата будет определяться только массой топлива.

Работа механического (дисперсионного) превращения в камере размола. Известно, что при размоле топлива изменяется масса m_i отдельных составляющих массовой загрузки. Например, масса исходного продукта, поступающего в мельницу, с плотностью ρ_1 превращается в мельничный продукт с плотностью ρ_3 , а затем в сепараторе – в готовую топливовоздушную смесь с плотностью ρ_2 . Чтобы учесть эту особенность процесса дисперсионного превращения, формулу для работы представим в обобщенном виде, Дж:

$$dA_6 = \mu_6 dm_6, \quad (9)$$

где μ_6 – механический потенциал системы, Дж/кг; m_6 – «дефект» массы, кг.

Очевидно, μ_6 равен обобщенному потенциалу ротора мельницы, m^2/c^2 , или, приводя к единой размерности, получаем, м,

$$X_6^* = \mu_6 = \frac{1}{2} \frac{u_6^2}{g},$$

где ускорение свободного падения g можно интерпретировать как нормирующий множитель.

«Дефект» массы m_6 определяется разностью количества M топлива, циркулирующего в системе, и массы M_6 возврата мельничного продукта, кг:

$$m_6 = M - M_6,$$

т.е. m_6 характеризуется массой M_n готового продукта, покидающего установку. Тогда

$$dA_6 = \frac{1}{2} u_6^2 d(M - M_6), \quad (10)$$

где координата состояния, характеризующая механическое превращение, с учетом нормирующего множителя приобретает вид

$$x_6^* = G_n = \frac{B_2}{G_c} Vg.$$

Поскольку работа, затрачиваемая на измельчение, есть доля полной работы вращения ротора, то полезный механический потенциал камеры размола не больше, очевидно, обобщенного потенциала ротора мельницы. Тогда

$$dA_6^* = \frac{1}{2} u_6^2 \cdot \eta dM, \quad (11)$$

где η – доля обобщенного потенциала, затрачиваемая на разمول и доведение топлива до заданного дисперсионного состояния (другими словами, обобщенный КПД пылесистемы). Исходя из равенства работ $A_6 = A_6^*$, получаем, что отношение полезно затраченной работы к полной равно

$$\eta = \frac{M - M_6}{M} = 1 - \frac{M_6}{M}.$$

Учитывая, что $M - M_6 = \frac{B_2}{G_c} V$, находим

$$\eta = \frac{\frac{B_2}{G_c} V}{M} = \frac{\rho_2}{\rho_3}. \quad (12)$$

Полученный результат (14–15 %) хорошо согласуется с экспериментальными оценками [7, 8], а также отражает физику реальных процессов. Например, при износе бил загрузка M растет при одновременном снижении производительности B_2 мельничной системы, т.е. η уменьшается.

Термическая работа в системе определяется количеством переданной теплоты, Дж:

$$dA_8 = dQ = TdS, \quad (13)$$

где T – абсолютная температура, К; S – энтропия, Дж/К;

$$dQ = d(c_m MT + c_M m_M T),$$

где C_m, C_M – теплоемкость соответствующего топлива и металла, Дж/кг·К; m_M – масса металла, аккумулирующая тепло. Будем полагать, что теплоемкость и масса металла не изменяются ($C_m, C_M = \text{const}$). Тогда при $T = \text{const}$ для конкретной марки топлива находим

$$dQ = d(c_m MT),$$

и термическая работа определяется как

$$dA_8 = Td(c_m M), \quad (14)$$

где термический потенциал, К,

$$X_8 = T,$$

а термической координатой является параметр, имеющий размерность энтропии S , Дж/К:

$$x_8 = c_m M.$$

Таким образом, термический потенциал системы определяется расчетной температурой сушильного агента, которая ограничена условиями нормальной (взрывобезопасной) эксплуатации пылесистемы.

Так как теплоемкость твердого топлива величина достаточно устойчивая к изменениям ($C_m = \text{const}$), то термическое состояние системы при заданном потенциале полностью определяется ее массовой загрузкой. Иными словами, обеспечив с помощью регулятора подачи топлива массовую загрузку мельницы постоянной, мы стабилизируем энтропию системы.

Обсуждение результата. Анализ координат пылесистемы как ТОО позволяет выделить четыре группы параметров (табл. 2). Первая группа параметров определяется массовой загрузкой M мельницы топливом и характеризует общее состояние установки. Вторая группа определяется перепадом давлений на установке P , работающей под наддувом, и характеризует нарушение устойчивости массопотока. Третья группа параметров определяется вектором координаты переносимой субстанции (мельничный продукт, готовое топливо и возврат мельничного продукта на домол). Эта группа параметров может служить теоретической основой для формирования комплексированных сигналов для решения информационно-управляющих задач. Четвертая группа параметров определяется дефектом массы металла ротора Mx , что связано с износом бил, и может служить для решения информационно-диагностических задач. Обобщенные координаты характеризуют режим работы установки и представляют собой показатели, которые в условиях АСУТП на базе ПТК могут быть сформированы в виде сигналов-параметров и в виде сложных комплексированных сигналов. Эти показатели могут служить теоретическим обоснованием параметров переопределенного объекта рассматриваемого класса и их комплексирования как способа определения неконтролируемых технологических параметров и совершенствования АСУТП электростанций [13].

Таблица 2. Сводная таблица обобщенных термодинамических потенциалов и координат системы пылеприготовления

Вид работы	A_i	Потенциал		Координата		Примечание
		X_i	разм.	x_i	разм.	
Работа перемещения потока мельничного продукта	A_1	$\frac{1}{2} \frac{V}{LD}$	m	$\frac{MG_c^2}{VLD}$	H	$B_3 = \frac{MG_c}{V}$ $x_1 = \frac{B_3 G_c}{LD}$
Работа перемещения потока готового топлива	A_2	$\frac{1}{2} \frac{V}{LD}$	m	$\frac{B_2 G_c}{LD}$	H	
Работа аэродинамических сил	A_3	а) V	m	P	$Па$	а,б – варианты представления
		б) $\frac{V}{LD}$	m	PLD	H	
Работа гравитационных сил	A_4	$\frac{V}{LD}$	m	Mg	H	
Работа вращения ротора	A_5	а) $\frac{1}{2} u_6^2$	$\frac{M^2}{c^2}$	M_x	$кг$	а,б,в – варианты представления
		б) $\frac{1}{2} \frac{u_6^2}{g}$	m	$M_x g$	H	
		в) $\frac{D^2 \pi^2 n_p^2}{g}$	m	G_x	H	
Работа дисперсионного превращения в камере размола	A_6	а) $\frac{1}{2} u_6^2$	$\frac{M^2}{c^2}$	$\frac{B_2 V}{G_c}$	$кг$	а,б – варианты представления
		б) $\frac{1}{2} \frac{u_6^2}{g}$	m	$\frac{B_2 V g}{G_c}$	H	
	A'_6	а) $\frac{1}{2} u_6^2$	$\frac{M^2}{c^2}$	M	$кг$	а,б – варианты представления
		б) $\frac{1}{2} \frac{u_6^2}{g}$	m	G	H	
Работа дисперсионного превращения в сепараторе	A_7	а) $\frac{1}{2} \frac{V}{LD}$	$\frac{m}{M^2}$	G	H	$G_{\text{возе}} = M_{\text{возе}} g$
		б) $\frac{1}{2} \frac{V}{LD} g$	$\frac{m}{c^2}$	$G_{\text{возе}}$	H	
Термическая работа	A_8	T	K	$c_m M$	$Дж/К$	

В частности, для рассматриваемого класса ТОУ обобщенными термодинамическими координатами, характеризующими состояние пылесистемы как термодинамической системы, служат режимные параметры пылесистемы: количество топлива, циркулирующего в системе мельница–сепаратор; гидродинамический перепад давлений на установке и некая новая обобщенная координата переносимой субстанции, характеризующая кинетическую энергию потока мельничного продукта.

Обобщенными потенциалами являются расчетно-конструктивные показатели, которые характеризуют типоразмер мельницы и могут служить основой оценки эффективности топливоприготовительного оборудования и его конструктивного совершенствования.

Таким образом, применение обобщенного термодинамического анализа позволяет дать строгое решение задачи определения управляемых координат сложного объекта, в том

числе оценивать неконтролируемые технологические параметры

Список литературы

1. **Автоматизация** настройки систем управления / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, А.С. Ключев и др.; под ред. В.Я. Ротача. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. **Разработка** и внедрение систем регулирования основных параметров котла в составе АСУТП энергоблока 500 МВт Рефтинской ГРЭС / В.А. Биленко, Н.Н. Деркач, Э.Э. Микушевич, Д.Ю. Никольский // Теплоэнергетика. – 1999. – № 10. – С. 2–9.
3. **АСУТП** энергоблока ПГУ-450 Калининградской ТЭЦ-2 / А.А. Умрихин, А.С. Ладохин, Ю.С. Тверской и др. // Технология АСУТП электростанций / под ред. Ю.С. Тверского. – Иваново, 2005. – С. 57–60.
4. **Тверской Ю.С.** Автоматизация котлов с пылесистемами прямого вдувания. – М.: Энергоатомиздат, 1996.
5. **Агафонова Н.А., Таламанов С.А., Тверской Ю.С.** Анализ промышленных методов идентификации на основе критерия минимума дисперсии частотных характеристик // Автоматика и телемеханика. – 1998. – № 6. – С.117–129.
6. **Расчет** и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов (нормативные материалы). – Л.: ЦКТИ, 1971. – 309 с.

7. **Осокин В.П.** Молотковые мельницы. – М.: Энергия, 1980.

8. **Левит Г.Т.** Пылеприготовление на тепловых электростанциях. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

9. **Тверской Д.Ю.** Особенности построения нелинейной динамической модели пылесистем прямого вдувания котлов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 83–89.

10. **Вейник А.И.** Термодинамика. – Минск: Высш. шк., 1965.

11. **Вейник А.И.** Новая система термодинамики обратимых и необратимых процессов. – Минск: Высш. шк., 1966.

12. **Бурдаков В.П., Данилов Ю.И.** Физические проблемы космической тяговой энергетики. – М.: Атомиздат, 1969.

13. **Тверской Д.Ю., Тверской Ю.С.** Задачи и проблемы совершенствования АСУТП энергоблоков в направлении их интеллектуализации / Управление и информационные технологии: сб. докл. IV Всерос. науч. конф., 10–12 октября 2006 г. – СПб., 2006. – С. 230–236.

Тверской Дмитрий Юрьевич,
ООО «Научно-производственное предприятие ИНОТЭКС»,
кандидат технических наук, исполнительный директор,
телефон (4932) 26-97-57,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru