

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЫЛЕСИСТЕМ ПРЯМОГО ВДУВАНИЯ КОТЛОВ*)

ТВЕРСКОЙ Д.Ю., инж.

Рассмотрены особенности построения системы нелинейных дифференциальных уравнений для создания высокоточных всережимных динамических моделей пылесистем прямого вдувания котлов ТЭС. Дан анализ результатов исследований имитационной модели пылесистемы с молотковыми мельницами.

Ключевые слова: системы пылеприготовления, имитационная модель, молотковые мельницы, динамические характеристики, математическая модель.

BUILDING CHARACTERISTICS OF NON-LINEAR DYNAMIC MODEL IN DUST-SYSTEM OF DIRECT INJECTION BOILER

D.Yu. TVERSKOY, Engineer

Main characteristics of non-linear differential equation system to build high-precision fully-variable dust-system models with direct injection boilers are considered for SPPs. The research results analysis of simulation dust-system with hammer mills is given.

Key words: pulverized – coal system, simulation model, hammer mill, dynamic characteristics, mathematical model.

Качество разрабатываемых систем автоматического управления во многом зависит от полноценности используемых на этапе функционального проектирования математических моделей технологических объектов управления [1, 2].

Физика формирования топливовоздушных потоков в мельничных системах отличается сложностью протекания мельничных процессов, отсутствием необходимой и достаточной информации о параметрах, характеризующих динамические особенности полидисперсных массопотоков в системе мельница-сепаратор [3, 4, 5, 6, 7 и др.]. Поэтому до сих пор не удавалось построить адекватную по сложности математическую модель пылесистем рассматриваемого класса [8, 9].

Систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных [10, 11] можно рассматривать как математическую основу для создания высокоточных всережимных динамических моделей рассматриваемого класса технологических объектов управления. В качестве типового (тиражируемого) макрообъекта моделирования рассматривается нитка пылесистемы прямого вдувания потока топливовоздушной смеси в топку парового котла (рис. 1). Пылесистема реализована на базе серийной молотковой мельницы ММТ 1500/2510-735 с гравитационным сепаратором при работе на непроектном топливе (Подмосковный бурый уголь, котел ТП-208, блок 200 МВт).

Основные допущения. Анализ технологических особенностей основных вариантов принципиальных схем индивидуальных замкнутых пылесистем прямого вдувания [3, 7, 9 и др.] позволяет представить схему движения потоков массы рабочего тела и сушильно-вентилирующего агента в виде открытой поточной системы. В открытой поточной системе поток вещества входит в

те при конечных расчетных параметрах [12, 13]. Представленная схема поточной структуры модели сохраняет свои функциональные связи вне зависимости от типа мельничной установки и вида топлива, т.е. является обобщенной (рис. 2).

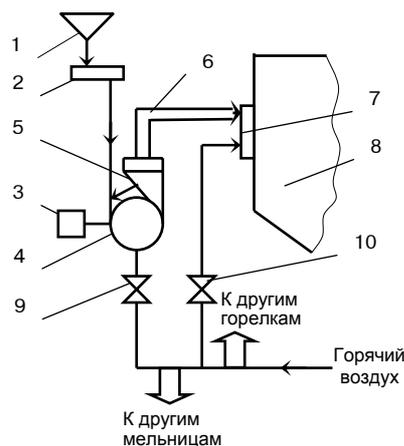


Рис. 1. Принципиальная схема пылесистем прямого вдувания котлов ТЭС: 1 – бункер сырого угля; 2 – питатель сырого угля с электроприводом; 3 – электропривод мельницы; 4 – мельница; 5 – сепаратор; 6 – канал подачи готового топлива в горелки; 7 – горелка; 8 – топка котла; 9, 10 – регулирующие органы подачи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

Определим основные физические переменные обобщенной системы пылеприготовления и принимаемые далее основные допущения (исходные посылки).

1. На физические переменные (технологические параметры: расход сушильно-вентилирующего агента, загрузка мельницы топливом, температура аэросмеси, влажность пыли и др.) накладываются заданные типоразмером мельницы расчетно-конструкторские ограничения, при выполнении которых имеет место устойчивый мас-

*) Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований: проект №07-08-00360 «Развитие методов феноменологической термодинамики для построения высокоточных нелинейных динамических моделей технологических объектов управления с аккумуляцией топлива в каналах формирования потоков топливовоздушных смесей»

обеспечиваются штатные (нормальные, расчетные) режимы работы пылесистемы, при которых мельница и топливоприготовительная установка в целом могут работать устойчиво сколь угодно долгое время. Критические режимы (завал мельницы, переход на другой вид твердого топлива и проч.) в настоящей работе не рассматриваются.

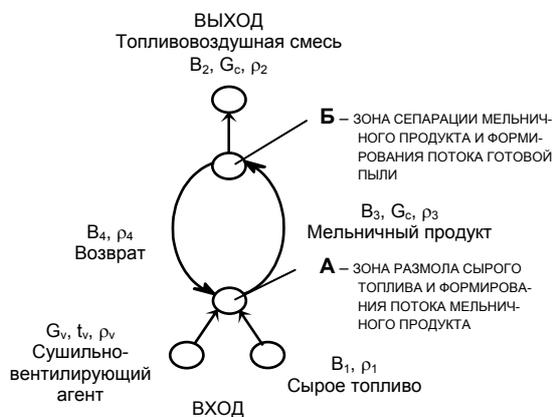


Рис. 2. Обобщенная схема движения потоков массы рабочего тела и сушильно-вентилирующего агента: V_1 – расход сырого топлива на входе в мельничную систему, кг/с; ρ_1 – плотность сырого топлива (насыпная), кг/с; G_v – расход горячего воздуха (поток сушильно-вентилирующего агента на входе в установку), м³/с; ρ_v – плотность горячего воздуха, кг/м³; t_v – температура горячего воздуха, °С; B_2 – расход готовой пыли за сепаратором, кг/с; ρ_2 – плотность потока готовой топливовоздушной смеси, кг/м³; G_c – расход отработанного сушильного агента, м³/с; B_3 – расход мельничного продукта, кг/с; ρ_3 – плотность потока мельничного продукта, кг/м³; B_4 – расход возврата мельничного продукта из зоны сепарации в камеру размола, кг/с; ρ_4 – плотность потока возврата, кг/м³

2. Распределение пыли внутри объема мельницы и в потоке мельничного продукта, по-видимому, неравномерное (неизвестное). Однако, учитывая, что угольная пыль хорошо транспортируется потоком сушильно-вентилирующего агента, а пылевоздушная смесь образует подвижную эмульсию [3, 4], для устойчивого массопотока принимается, что характеристики потока (концентрация, скорость движения, температура) однозначно определяют его состояние. При этом химические реакции между компонентами пылевоздушной смеси отсутствуют.

3. Скорость центра масс «элементарного объема» (размеры которого не определены) для всех компонентов многофракционного потока топливовоздушной смеси в системе пылеприготовления принимается при допущении, что сушка топлива заканчивается в объеме мельницы и расход сушильно-вентилирующего агента по пространственным координатам не изменяется. При этом скорость центра масс «элементарного объема» потока топливовоздушной смеси определяется некоторой относительной скоростью отработанного сушильного агента в продольном сечении ротора мельницы (как расход отработанного сушильного агента, отнесенный к сечению ротора мельницы) [5, 6, 7], м/с:

$$v_c = \frac{G_c}{LD}, \quad (1)$$

где L, D – длина и диаметр ротора мельницы.

4. Оценку плотности ρ_3 «элементарного объема» потока мельничного продукта (пылевоздушной смеси в объеме установки) определим через отношение массы M топлива, заполняющего установку, циркулирующего в системе мельница-сепаратор и питающего поток мельничного продукта, к объему V системы, кг/м³:

$$\rho_3 = \frac{M}{V}. \quad (2)$$

5. Методика определения массы топлива, заполняющего систему мельница-сепаратор (массовая загрузка молотковой мельницы), изложена в [4, 9].

6. Плотность ρ_2 «элементарного объема» потока готовой топливовоздушной смеси определим как отношение массы M_n готовой пыли, аккумулированной в объеме системы, к этому объему, кг/м³:

$$\rho_2 = \frac{M_n}{V}. \quad (3)$$

7. Масса готовой пыли, которая аккумулирована (содержится) в объеме системы мельница-сепаратор, может быть определена через ее концентрацию ρ_2^* в потоке готовой первичной топливовоздушной смеси, покидающей установку, умноженной на объем системы:

$$M_n = \rho_2^* \cdot V, \quad (4)$$

где концентрация определяется как отношение расхода B_2 готового продукта к расходу G_c отработанного сушильно-вентилирующего агента:

$$\rho_2^* = \frac{B_2}{G_c}. \quad (5)$$

В индивидуальных системах пылеприготовления (располагаемых непосредственно у котла) концентрация пыли в потоке топливовоздушной смеси сравнительно невелика и составляет от 0,5 до 1,0 кг пыли на 1 кг воздуха [3].

8. Концентрация ρ_3^* мельничного продукта, покидающего размольную камеру, в потоке сушильно-вентилирующего агента, кг/м³,

$$\rho_3^* = \frac{B_3}{G_c} \quad (6)$$

определяется отношением расхода B_3 мельничного продукта к расходу G_c отработанного сушильно-вентилирующего агента.

9. Для устойчивого массопотока можно полагать, что плотность мельничного продукта в объеме пылесистемы и концентрация пыли в потоке мельничного продукта на входе в сепаратор имеют определенное соответствие:

$$\rho_3 \geq \rho_3^*. \quad (7)$$

Анализ исходных посылок. Полагая, что (7) есть равенство (открытый ротор, шахтный сепаратор, несущественная циркуляция топлива в камере размола), тогда, согласно [8, 9],

$$\frac{B_3}{G_c} = \frac{M}{V} \quad (8)$$

и недоступный для непосредственного контроля расход мельничного продукта может быть определен как, кг/с,

$$B_3 = \frac{1}{V} M G_c. \quad (9)$$

Выражение (9) согласуется с результатами [15] и определяет способ формирования сигнала по косвенной оценке расхода мельничного продукта, устраняет неточность [16], где полагается, что произведение сигналов по загрузке мельницы и расхода сушильно-вентилирующего агента есть «импульс по расходу пыли» $B_2 \approx N_M G_V$ из молотковой мельницы.

Если при этом положить, что

$$B_3 = k_x B_2, \quad (10)$$

то получаем известное допущение математической модели П. Профоса [8]:

$$k_x \frac{B_2}{G_c} = \frac{M}{V}, \quad (11)$$

где B_2 – расход готовой пыли; k_x – коэффициент, определяемый, согласно [8], экспериментально.

Назовем k_x статическим коэффициентом трансформации потока мельничного продукта в зоне сепарации. При этом, определяя по методике (3) количество топлива M , можем найти для заданной производительности пылесистемы аналитическую оценку k_x :

$$k_x = \frac{M G_c}{V B_2}. \quad (12)$$

Для современных мельничных систем (закрытый ротор, вынесенный сепаратор: инерционный, центробежный) имеет место существенная кратность циркуляции топлива в камере размола и зоне сепарации. Поэтому надо, по-видимому, полагать, что

$$\rho_3 > \rho_3^*. \quad (13)$$

При этом формальная запись выражения (11) остается без изменений, а экспериментальный коэффициент k_x приобретает некоторое новое содержание, связанное как с трансформацией потока в сепараторе, так и с условиями его формирования в камере размола. В результате недоступный для непосредственного контроля расход мельничного продукта можно определить динамическим комплексом в виде, кг/с,

$$B_3 = \alpha \frac{1}{V} M G_c, \quad (14)$$

где коэффициент $\alpha \leq 1$ учитывает циркуляцию топлива в мельнице и первой ступени сепарации, например, на уровне выхода из камеры размола или на уровне входа потока мельничного продукта в сепаратор.

Анализ системы дифференциальных уравнений математической модели. В основу исследуемой ниже имитационной модели положены уравнения математической модели с сосредоточенными параметрами [10, 11].

1. *Уравнения материального баланса:*

- для количества топлива, циркулирующего в системе мельница-сепаратор,

$$\frac{dM}{dt} = B_1 - k_6 B_2; \quad (15)$$

- потока мельничного продукта

$$\frac{dB_3}{dt} = (\bar{B}_1(c) - \alpha B_3) \frac{B_3}{M}; \quad (16)$$

- потока готовой топливовоздушной смеси

$$\frac{dB_2}{dt} = (\alpha B_3 - k_6 B_2) \frac{G_c}{V}, \quad (17)$$

где B_1 – расход сырого топлива, кг/с; k_6 – коэффициент пересчета на влажность топлива; B_2 – расход готовой пыли, кг/с; B_3 – расход мельничного продукта; M – масса топлива, циркулирующего в системе мельница-сепаратор; α – коэффициент учета циркуляции топлива в системе мельница-сепаратор; $\bar{B}_1(c)$ – расчетная размольная производительность мельницы, кг/с.

2. *Уравнение теплового баланса:*

$$(c_T M + c_M m_M) \frac{dT_{ce}}{dt} = Q_1 - Q_2; \quad (18)$$

где $Q_1 = G_V c_V (t_V + 273) \rho_V + K_{мех} N_{y0} M$;

$$Q_2 = \frac{W_p - W^n}{100 - W^n} (2490,5 + 1,9 T_{ce} - 4,19 t_T) B_1 + G_c c_c \rho_c (T_{ce} - 5) + 42L + \frac{100 - W_p}{100} \left(c_T^c + \frac{4,19 W^n}{100 - W^n} \right) (T_{ce} - t_T) B_1;$$

c_T – теплоемкость сырого топлива, Дж/кг·°К; T_{ce} – температура аэросмеси за сепаратором, °С; Q_1 – теплота, подводимая в мельницу, Дж/с; Q_2 – теплота, отводимая из мельницы, Дж/с; G_V – расход первичного воздуха, м³/с; c_V – теплоемкость первичного воздуха, Дж/кг·°К; t_V – температура первичного воздуха, °С; ρ_V – плотность первичного воздуха, кг/м³; $K_{мех}$ – коэффициент механических потерь в тепло при измельчении угля; N_{y0} – удельная мощность, прикладываемая к единице массы размалываемого топлива, Вт/кг; W_p – влажность сырого топлива, %; W^n – влажность пыли, %; c_T^c – теплоемкость сухой массы топлива, Дж/кг·°К; t_T – температура сырого топлива, °С; c_c – теплоемкость сушильного агента, Дж/кг·°К; ρ_c – плотность сушильного агента за сепаратором, кг/м³.

Дополнительно к системе (15)–(18) необходимо рассмотреть уравнение состояния в виде нелинейного эмпирического выражения расчетной размольной производительности мельницы [5–7]:

$$\bar{B}_1(c) = a C_{конст} K_{P3M} K_{тонк} K_{вент} (1,43 N_i - 1)^n, \quad (19)$$

где a , n – коэффициенты, учитывающие тип мельницы и сепаратора; $C_{конст}$ – коэффициент, характеризующий конструктивные особенности мельницы; K_{P3M} – коэффициент, характеризующий

размол в мельнице; $K_{тонк}$ – коэффициент, характеризующий тонину помола; $K_{вент}$ – коэффициент, характеризующий вентиляцию мельницы; N_l – отнесенная мощность мельницы [5, 14].

Открытость распределенной модели [10] позволяет развить результат [11] путем подключения к системе (15)–(19) аэродинамических уравнений. Тогда:

$$\frac{dB_3}{dt} = \frac{B_3}{G_c} \frac{dG_c}{dt} + (\bar{B}_1(c) - \alpha B_3) \frac{B_3}{M}, \quad (20)$$

$$\frac{dG_c}{dt} = -\frac{(LD)^2}{M} (H_x - H_p) - LDg - \frac{G_c}{V} (K_v G_c - G_v), \quad (21)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{MG_c}{VLD} g + \frac{G_c}{V} (P_1 - P_2) - \frac{MG_c^2}{V^2(LD)^2} (K_v G_c - G_v) + \frac{1}{V} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{G_c^2}{(LD)^2} + \frac{V}{LD} g \right) \frac{dM}{dt}, \quad (22)$$

где P_1 – давление сушильно-вентилирующего агента в коробе первичного воздуха (перед мельницей); P_2 – давление сушильно-вентилирующего агента за мельницей (в пылепроводе); $\Delta P = P_1 - P_2 = \Delta H = H_x - H_p$ – гидравлическое сопротивление мельничной установки с вращающимся ротором (перепад давления на мельнице); H_x и H_p определяются по нелинейным эмпирическим выражениям [6].

*Исследование имитационной модели пылесистем прямого вдувания топлива***). Результаты исследования математической модели (15)–(22) выполнены универсальными инструментальными средствами имитационного моделирования.

Динамические характеристики пылесистемы определялись по результатам вычислительных экспериментов при ступенчатых изменениях подачи сырого топлива и расхода первичного воздуха в мельницу.

План эксперимента состоял из двух этапов. На первом этапе проведены исследования имитационной модели в номинальном режиме при малых возмущениях (линейные диапазоны): подачей топлива ($B_1 = 6,9$ кг/с) и первичного воздуха в мельницу ($G_v = 10$ м³/с). Динамические характеристики показаны как для известных контролируемых параметров (расход первичного воздуха, температура за мельницей, загрузка

мельницы), так и для новых комплексных показателей (рис. 3,а,б), полученных в результате обобщенного термодинамического анализа пылесистемы [15]. В частности, расширение математической модели с учетом дополнительных уравнений (20)–(22) ведет к уточнению динамических характеристик по каналам влияния на загрузку мельницы и температуру аэросмеси за сепаратором.

В результате число наблюдаемых координат переопределенного объекта увеличено с 1–2 [8, 9] до 10. Соответственно, существенно могут быть расширены возможности постановки новых задач диагностики и управления.

На втором этапе проведены исследования имитационной модели с учетом влияния на переходные процессы характеристик датчиков и исполнительных устройств (рис. 4, 5) путем сравнения аналитических и экспериментальных [9, 17] переходных характеристик.

Сравнение представленных переходных процессов говорит о достаточно высоком совпадении теоретических и экспериментальных результатов. Это позволило качественно оценить адекватность (верифицировать) динамических свойств по основным каналам регулирующих воздействий. С этой целью для параметров, доступных для непосредственного контроля, подключены соответствующие модели датчиков и исполнительных устройств.

Результаты выполненных исследований модели свидетельствуют о возможности создания высокоточной настраиваемой нелинейной динамической имитационной модели пылесистемы прямого вдувания топлива с молотковыми мельницами.

При разработке соответствующих программно-аппаратных средств «погружения» имитационной модели в среду реального времени ПТК возможно ее использование в интеллектуальных АСУТП для целей управления и диагностирования [18].

Разработанная модель используется в составе многоцелевого тренажерного комплекса котла ТП-208 полигонной версии АСУТП энергоблока 200 МВт.

** В апробации результатов исследований имитационной модели принимали участие инженеры Е.Д. Маршалов и А.Н. Никонов, д.т.н., профессор Ю.С. Тверской.

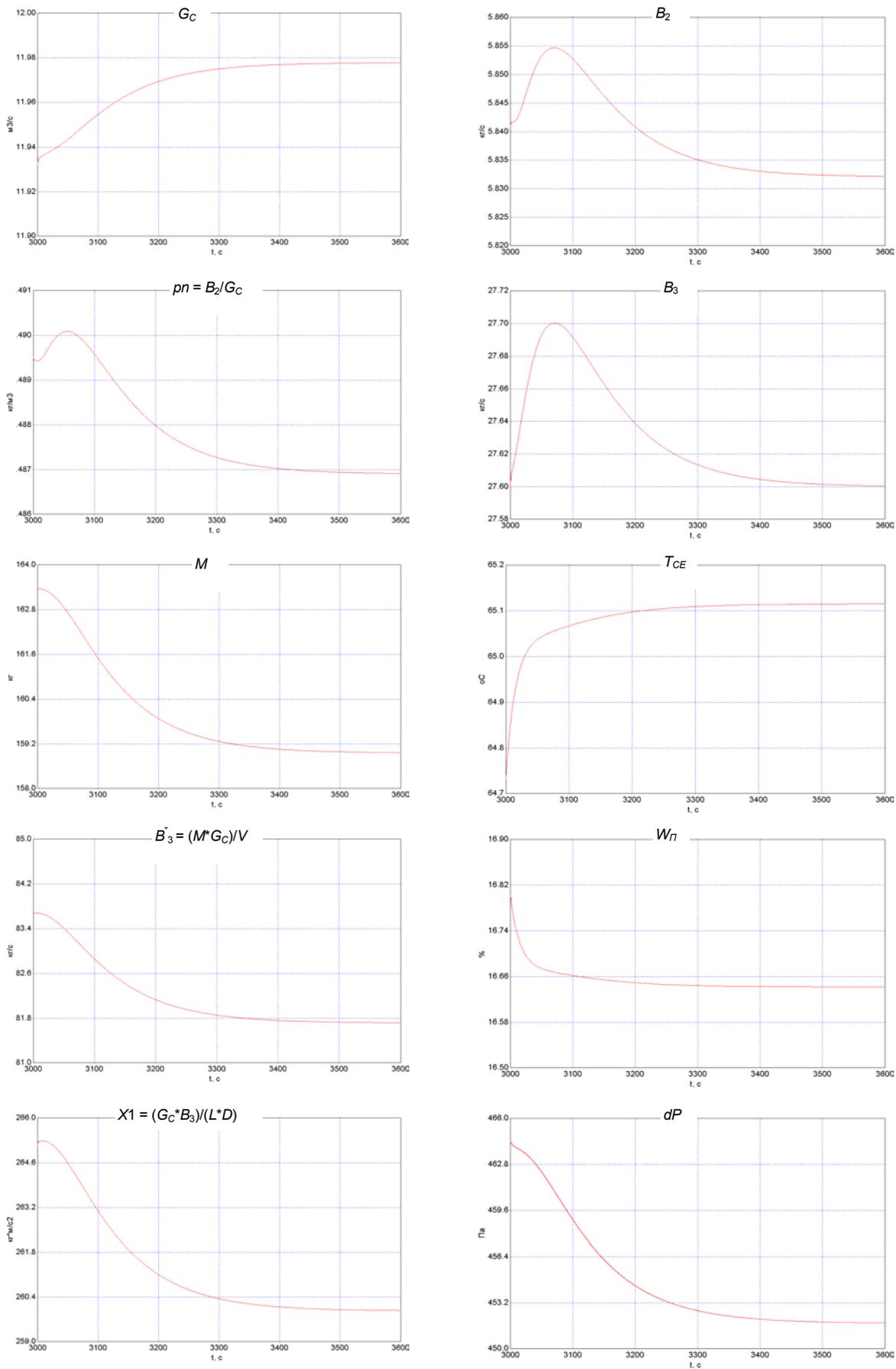


Рис. 3. Динамические характеристики математической модели: а – $\Delta G_v = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$

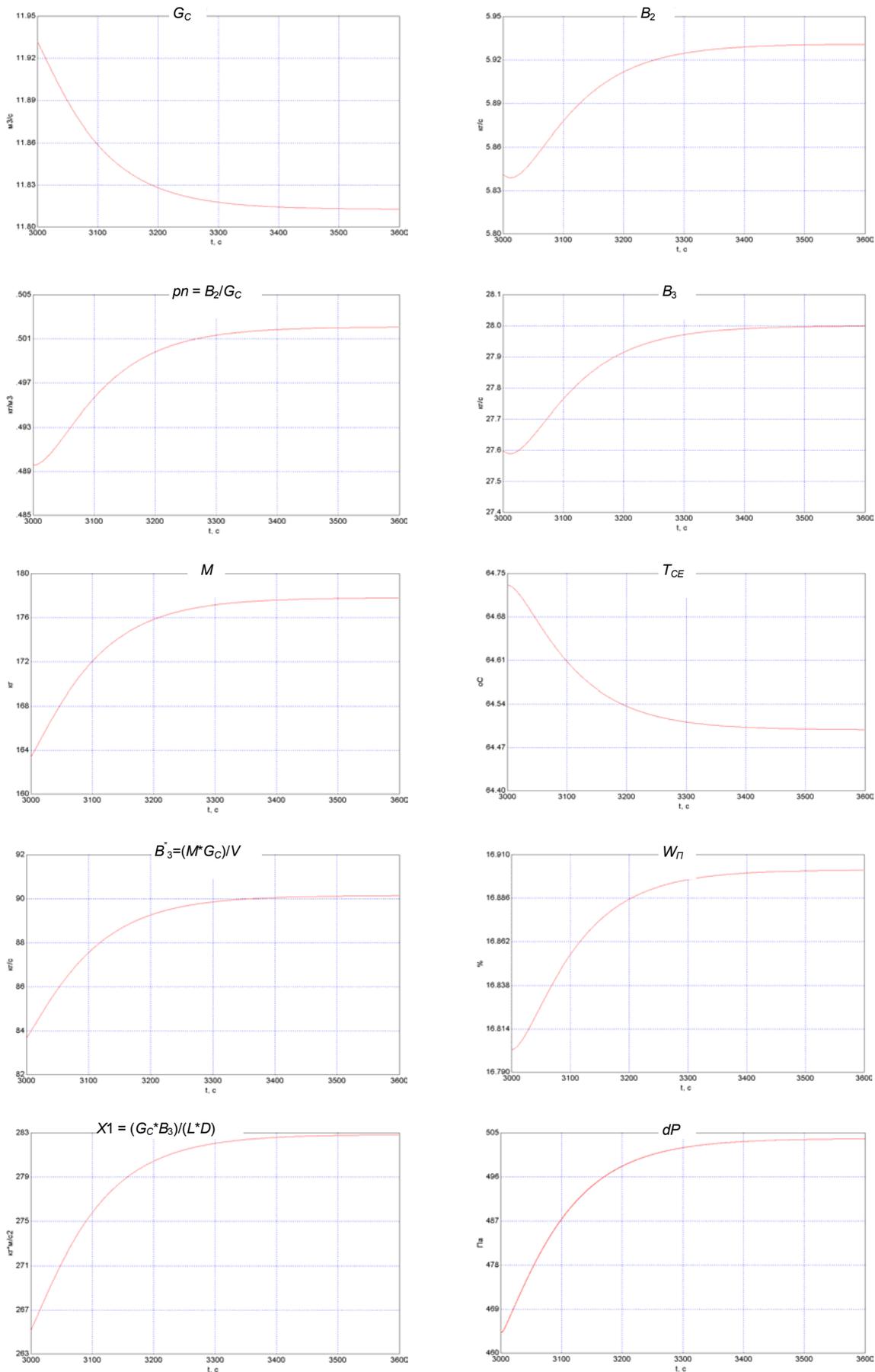


Рис. 3. Динамические характеристики математической модели: $\bar{b} - \Delta B_1 = 0,1 \text{ кг/с}$

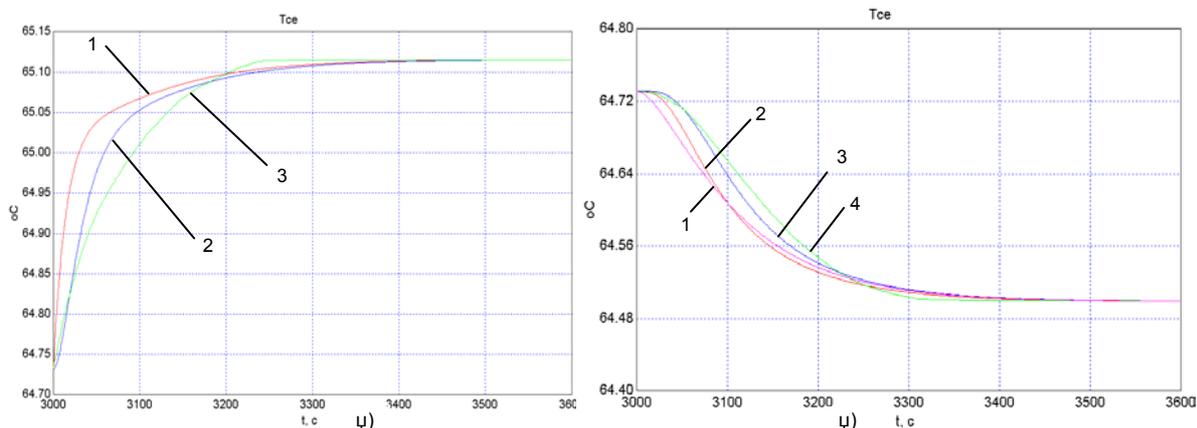


Рис. 4. Сравнение переходных процессов при $B_1 = 6,9$ кг/с; $G_v = 10$ м³/с: а – возмущение первичным воздухом $\Delta G_v = 0,1$ м³/с. Сигнал по температуре за сепаратором: 1 – аналитический; 2 – аналитический + термopара (модель первого порядка); 3 – экспериментальный; б – возмущение расходом топлива $\Delta B_1 = 0,1$ кг/с. Сигнал по температуре за сепаратором: 1 – аналитический, 2 – аналитический+ПСУ, 3 – аналитический+ТП+ПСУ, 4 – экспериментальный

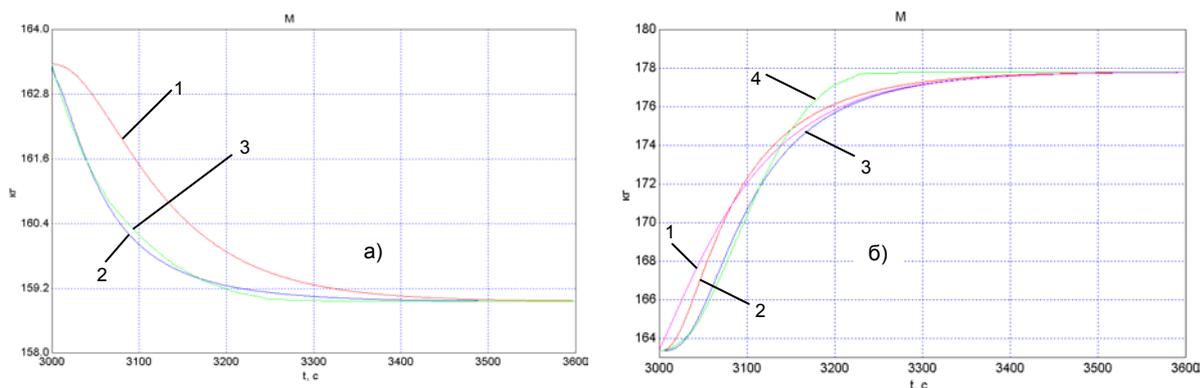


Рис. 5. Сравнение переходных процессов при $B_1 = 6,9$ кг/с; $G_v = 10$ м³/с: а – возмущение первичным воздухом $\Delta G_v = 0,1$ м³/с. Сигнал по загрузке мельницы топливом: 1 – аналитический; 2 – аналитический + двигатель; 3 – экспериментальный; б – возмущение расходом топлива $\Delta B_1 = 0,1$ кг/с. Сигнал по загрузке мельницы топливом: 1 – аналитический; 2 – аналитический+ПСУ; 3 – аналитический+ПСУ+двигатель+фильтр (20 с); 4 – экспериментальный

Список литературы

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.
2. Технология АСУТП электростанций / Под ред. д.т.н., проф. Ю.С. Тверского: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «XII Бенардосовские чтения». – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2005.
3. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства / Под ред. Д.М. Хзмаляна. – М.: Энергия, 1976.
4. Лузин П.М. О процессе размола в молотковой мельнице // Теплоэнергетика. – 1965. – № 6. – С. 10–14.
5. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов (нормативные материалы). – Л.: ЦКТИ, 1971.
6. Осокин В.П. Молотковые мельницы. – М.: Энергия, 1980.
7. Левит Г.Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Профос П. Регулирование паросиловых установок; Пер. с нем. / Под ред. Н.И. Давыдова. – М.: Энергия, 1967.
9. Тверской Ю.С. Автоматизация котлов с пылесистемами прямого вдувания. – М.: Энергоатомиздат, 1996.
10. Тверской Ю.С., Тверской Д.Ю. Теоретические основы динамических моделей каналов формирования потоков топливоздушных смесей в топку котлов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. Деп. в ВИНТИ 18.01.02 № 86-В2002.
11. Имитационная модель пылесистем по схеме прямого вдувания паровых котлов (теоретические основы и технология реализации в составе АСУТП) / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов, Д.Ю. Тверской и др. // Теплоэнергетика. – 2005. – № 9. – С. 61–69.
12. Калафати Д.Д. Применение первого закона термодинамики для закрытых поточных систем: Учеб. пособие. – М.: МЭИ, 1989.
13. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
14. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. – Т. 1. – 1976. – Т. 2.
15. Тверской Д.Ю. Методика термодинамического анализа пылесистем прямого вдувания паровых котлов электростанций: Мат-лы науч.-техн. конф. «Управление в технических системах». – Ковров: КГТА, 1998. – С. 95–97.
16. Буханов Ю.В., Мальгавка В.В. Регулирование загрузки мельницы первичным воздухом. Инф. листок № 726-79. – Свердловск: ЦНТИ, 1979.
17. Фонд экспериментальных динамических характеристик паровых котлов тепловых электрических станций / Д.Ю. Тверской, И.Е. Харитонов, С.А. Таламанов, Ю.С. Тверской // Теплоэнергетика. – 2005. – №10. – С. 32–35.
18. Тверской Д.Ю., Тверской Ю.С. Задачи и проблемы совершенствования АСУТП энергоблоков в направлении их интеллектуализации / Управление и информационные технологии: IV Всерос. науч. конф. 10–12 октября 2006 г. Сб. докл. – СПб., 2006. – С. 230–236.

Тверской Дмитрий Юрьевич,
ООО «Научное производственное предприятие «ИНОТЭК»»
заместитель директора по производству,
телефоны: (4932) 345-345, 269-757.