

*На правах рукописи*

**ТВЕРСКОЙ Дмитрий Юрьевич**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ПЫЛЕСИСТЕМ ПРЯМОГО ВДУВАНИЯ  
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами  
(промышленность)

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина" (ИГЭУ).

**Научный руководитель**

доктор технических наук, доцент Таламанов Сергей Александрович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор Аракелян Эдик Койрунович

доктор технических наук, профессор Староверов Борис Александрович

**Ведущая организация**

Филиал ОАО «Инженерный центр ЕЭС» – Фирма ОРГРЭС, г.Москва

Защита состоится “ 18 ” сентября 2009 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ИГЭУ по адресу: г.Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ауд. Б-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ, автореферат размещен на сайте [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru).

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.064.02

В.В. Тютиков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В долгосрочной перспективе развитие тепловой энергетики России связано с существенным увеличением доли угля в структуре потребляемого ТЭС органического топлива. Это требует решения комплекса задач, направленных на обеспечение эффективной работы большого числа действующих и строящихся пылеугольных энергоблоков, оснащаемых АСУТП на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой организации.

Мощный вычислительный ресурс ПТК позволяет реализовать в составе АСУТП сложные задачи технического диагностирования и управления и, таким образом, вскрыть резервы в повышении надежности оборудования и его технико-экономической эффективности. Однако на пути решения новых задач имеют место разного рода проблемы и трудности. Одна из них связана с формированием необходимой информации о состоянии объекта управления, а другая – с обоснованностью используемых математических моделей технологических объектов управления (ТОУ).

На решение проблемы построения математических моделей ТОУ направлены усилия многих ученых и специалистов, что связано с задачами совершенствования режимов работы оборудования ТЭС и рисками экспериментальных исследований, активным развитием энергетического тренажеростроения и многофункциональных полигонов, развитием методов прямого применения математических моделей в составе АСУТП. Для котельных установок ТЭС с пылесистемами прямого вдувания задача построения динамической модели до сих пор оставалась нерешенной, а попытки интеграции имитационной модели в состав АСУТП и соответствующих полигонов отсутствовали. Объясняется это тем, что физика формирования топливовоздушных потоков в системах пылеприготовления отличается сложностью математического описания мельничных процессов и недоступностью для непосредственного контроля многих технологических параметров.

Таким образом, задача теоретического обоснования управляемых координат рассматриваемого класса объектов, развитие методов построения и разработка нелинейных динамических моделей пылесистем прямого вдувания для совершенствования АСУТП котельных установок ТЭС и многофункциональных полигонов (тренажерных комплексов) является актуальной.

**Работа выполнялась** на кафедре систем управления в соответствии с планами ИГЭУ при поддержке следующих грантов Министерства образования и науки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ):

– «Создание комплекса имитационных макромоделей пылесистем по схеме прямого вдувания котлов ТЭС для решения задач управления и диагностирования». Проект Т00-1.2-3174 конкурса 2000 г. по фундаментальным исследованиям в области технических наук.

– «Исследование способов реализации имитационных моделей непрерывных технологических объектов в составе АСУТП на базе программно-технических комплексов сетевой организации». Проект Т02-03.2-2281 конкурса 2002 г. по фундаментальным исследованиям в области технических наук.

– «Развитие методов феноменологической термодинамики для построения высокоточных нелинейных динамических моделей технологических объектов управления с аккумуляцией топлива в каналах формирования потоков топливовоздушных смесей». Проект № 07-08-00360 конкурса РФФИ 2007-2008 г.г.

**Целью диссертационной работы** является совершенствование АСУТП котельных установок ТЭС на основе развития методов построения, разработки и применения нелинейных динамических моделей пылесистем прямого вдувания.

В соответствии с поставленной целью в работе решены следующие задачи:

– сформулированы требования к построению динамических моделей для совершенствования систем управления пылесистем прямого вдувания котлов;

– разработана методика и выполнен обобщенный термодинамический анализ пылесистем прямого вдувания котлов как сложных преопределенных технологических объектов управления;

– разработаны основы построения математических моделей каналов формирования потоков топливовоздушных смесей в топке котлов с пылесистемами прямого вдувания и нелинейная динамическая модель пылесистемы с молотковыми мельницами;

– выполнено исследование разработанных математических моделей средствами имитационного моделирования и показаны примеры практической реализации имитационных моделей в среде ПТК АСУТП;

– проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными ретроспективных исследований по идентификации теплоэнергетического оборудования;

– выполнено исследование вариантов алгоритмов (схем) автоматического управления пылеподачей в пылесистемах прямого вдувания.

**Методы исследования.** В работе используются методы теории автоматического управления, феноменологической термодинамики необратимых процессов, имитационного моделирования динамических систем и вычислительного эксперимента.

### **Научная новизна**

1. Впервые для разработки математической модели пылесистемы прямого вдувания применена методика обобщенного термодинамического анализа и определены математические выражения обобщенных термодинамических потенциалов и обобщенных термодинамических координат (на примере пылесистем с молотковыми мельницами).

2. Разработаны теоретические основы нелинейной динамической модели пылесистем прямого вдувания котлов в виде системы дифференциальных уравнений с распределенными и сосредоточенными параметрами на основе развития методов феноменологической термодинамики и использования результатов обобщенного термодинамического анализа мельничной системы.

3. Выполнено сравнение вариантов АСР пылеподачи в пылесистемах прямого вдувания с молотковыми мельницами и установлено, что применение АСР с использованием в качестве основного комплексированного сигнала новой термодинамической координаты обеспечивает существенно лучшие показатели качества автоматического регулирования по сравнению с известными техническими решениями.

4. Показано, что известные динамические модели рассматриваемого класса объектов теоретически обоснованы линейными приближениями разработанной модели на уровне уравнений материального баланса и сохранения количества движения.

### **Практическая значимость результатов**

1. Основные теоретические результаты нашли применение при создании моделей пылесистем прямого вдувания энергетических котлов, доведены до уровня полигонных версий АСУТП и используются в учебно-научном процессе ИГЭУ при подготовке инженеров по специальности 220201.65 "Управление и информатика в технических системах", а также при переподготовке специалистов энергетических предприятий.

2. Создан фонд (база данных) экспериментальных динамических характеристик котлов. Фонд использован для оценки адекватности разработанной математической модели и может применяться при верификации тренажерных комплексов различного назначения.

В целом полученные результаты ориентированы на использование инженерами и научными работниками при решении широкого круга задач анализа и синтеза систем управления ТООУ ТЭС.

### **Автор защищает:**

- методику обобщенного термодинамического анализа пылеприготовительного оборудования и результаты формирования комплекса управляемых параметров пылесистем прямого вдувания;
- нелинейную динамическую модель пылесистем прямого вдувания котлов и результаты ее исследования для пылесистем с молотковыми мельницами.

Личное участие автора состоит также в разработке фонда экспериментальных динамических характеристик котлов, сборе, анализе и подготовке его содержательной части.

**Обоснованность и достоверность** научных положений и методик обеспечивается применением апробированных методов математического моделирования, а также путем сопоставления результатов вычислительных экспериментов и полигонных испытаний с известными результатами промышленных экспериментов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Международных конференциях "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (Бенардосовские чтения; Иваново, ИГЭУ, 1997, 2005 гг.), Научно-технической конференции "Управление в технических системах" (Ковров, 1998), Всероссийской конференции "Управление и информационные технологии" (Санкт-Петербург, ЛЭТИ - 2006, 2008), Международной конференции «Теория и практика построения и функционирования АСУТП (CONTROL–2008)» (Москва, МЭИ (ТУ)-2008), научно-технических семинарах кафедры СУ ИГЭУ (1997-2008).

**Список публикаций.** Основные положения диссертации опубликованы в 14 работах, в том числе в 3-х статьях по списку ВАК, депонированной ВИНТИ рукописи, материалах 6 докладов на конференции и статьи в электронном издании. В ходе исследований получены патент РФ и свидетельство о государственной регистрации БД.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 113 наименований и 5 приложений. Материал диссертации изложен на 184 стр., в том числе 156 стр. основного текста.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность решаемой задачи и дается общая характеристика работы.

**В первой главе** выполнен анализ ключевых факторов, влияющих на эффективность современных АСУТП энергоблоков, определены требования к построению динамических моделей пылесистем прямого вдувания котлов, поставлена задача развития феноменологического

подхода для построения динамической модели пылесистем прямого вдувания котлов ТЭС.

Среди множества факторов, которые влияют на эффективность работы энергоблоков, фактор несовершенства технологии создания АСУТП на базе ПТК сетевой иерархической структуры представляется определяющим. Необходимость совершенствования технологии АСУТП требует разработки соответствующих полигонов, оснащаемых всережимными математическими моделями технологического оборудования. Создаваемые полигоны имеют многоцелевое назначение. Одна из основных задач таких установок заключается в разработке и освоении сложных функций АСУТП путем создания полигонных условий для их отработки. Вместе с этим, полигоны АСУТП хорошо себя зарекомендовали в качестве многофункциональных учебно-тренажерных комплексов. При этом эффективность конечных результатов напрямую связана с уровнем обоснованности используемых математических моделей управляемого тепломеханического оборудования (ТМО).

Известные математические описания динамических свойств систем пылеприготовления по схеме прямого вдувания наиболее полно представлены в работах П. Профоса, а обширные результаты экспериментальных исследований приведены в работах ВТИ и ИГЭУ (ИЭИ). При этом теоретически обоснованные методы, которые позволяли бы выполнить построение всережимных динамических моделей рассматриваемого класса объектов, до сих пор отсутствовали.

Объясняется это сложностью математического описания физических процессов подготовки топливовоздушных смесей в мельничных системах, невозможностью непосредственного контроля основных технологических координат и др. Поэтому к разрабатываемым математическим моделям должны быть предъявлены следующие требования:

- исходные системы уравнений должны позволять создавать всережимные (нелинейные) динамические модели;
- математическая модель должна быть перспективной для решения широкого класса задач (управления, диагностики, построения тренажеров, при анализе конструктивно-технологических решений и др.);
- структура модели должна быть открытой, т.е. технология ее построения должна предусматривать возможность простых переходов от упрощенных структур к более полным;
- математическая модель должна иметь меру адекватности;
- математическая модель должна быть реализуема инструментальными средствами имитационного моделирования в составе программно-технических комплексов АСУТП.

Решение проблемы построения динамических моделей предложено искать на пути развития методов феноменологической термодинамики. Основы методологии термодинамического подхода к задачам управления и анализу сложных систем создавались в работах В.П. Бурдакова, А.И. Вейника, К.П. Гурова, Ю.И. Данилова, Б.Н. Петрова, Л.И. Розоноэра, Г.М. Уланова и других ученых. Термодинамический подход использован при определении динамических свойств оборудования ТЭС в работах Е.П. Серова и Б.П. Королькова, В.М. Руцинского, А.С. Рубашкина и др.

В настоящей работе поставлена задача применения и развития феноменологического подхода для построения динамической модели пылесистем прямого вдувания котлов ТЭС. При этом математическая модель должна обеспечить определение изменений во времени всех физических переменных топливоприготовительной установки, которые предполагаются непрерывными по координатам и времени.

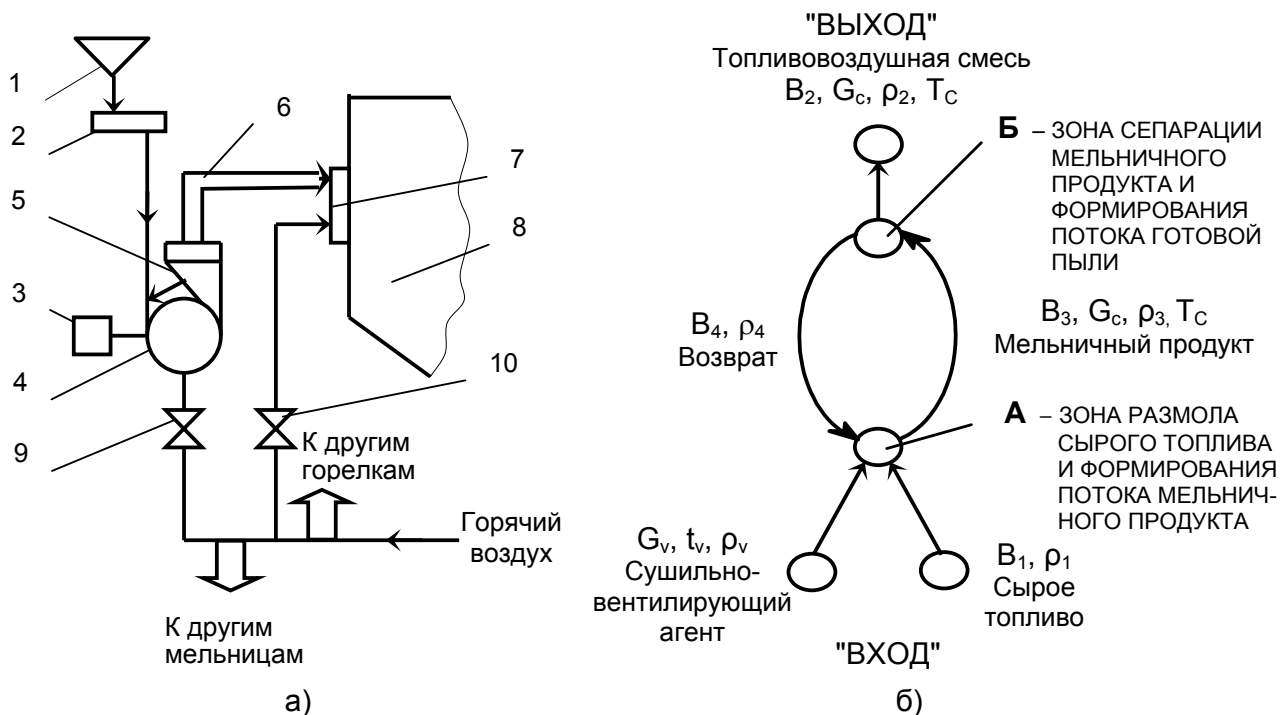


Рис.1. Принципиальная схема пылесистем прямого вдувания котлов ТЭС (а) и обобщенная схема движения потоков массы рабочего тела и сушильно-вентилирующего агента (б)

Обозначено:

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.

$V_1$  – расход сырого топлива на входе в мельничную систему, кг/с;  $\rho_1$  – плотность сырого топлива (насыпная), кг/с;  $G_v$  – расход горячего воздуха (поток сушильно-вентилирующего агента на входе в установку), м<sup>3</sup>/с;  $\rho_v$  – плотность горячего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $t_v$  – температура горячего воздуха, °С;  $V_2$  – расход готовой пыли за сепаратором, кг/с;  $\rho_2$  – плотность потока готовой топливовоздушной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $G_c$  – расход отработанного сушильного агента, м<sup>3</sup>/с;  $V_3$  – расход мельничного продукта, кг/с;  $\rho_3$  – плотность потока мельничного продукта, кг/м<sup>3</sup>;  $V_4$  – расход возврата мельничного продукта из зоны сепарации в камеру размола, кг/с;  $\rho_4$  – плотность потока возврата, кг/м<sup>3</sup>;  $T_c$  – температура топливовоздушной смеси.



**Вторая глава** посвящена разработке методики обобщенного термодинамического анализа систем пылеприготовления и обоснованного определения управляемых координат объекта.

Различие энергетических углей в отношении реакционной способности, зольности, влажности, абразивности приводит к необходимости применения различных технологических схем пылесистем и способов подготовки топлива к сжиганию в топках котлов.

Анализ технологических особенностей принципиальных схем индивидуальных замкнутых пылесистем прямого вдувания (рис.1а) позволяет представить движение потоков массы рабочего тела и сушильно-вентилирующего агента в виде потоковой структуры модели, которая сохраняет свои функциональные связи вне зависимости от типа мельничной установки и вида топлива, т.е. является обобщенной (рис.1б).

Методика обобщенного термодинамического анализа системы сводится к следующему. Одной группе переменных, характеризующих установку как термодинамическую систему, приписан содержательный смысл обобщенного потенциала  $X_i$ , а другой группе переменных – смысл обобщенных термодинамических координат  $x_i$ . При этом  $X_i dx_i$  должно иметь смысл элементарной работы  $dA_i = X_i dx_i$ .

Рассмотрены следующие виды работ, совершаемых в системе пылеприготовления: работа перемещения потока мельничного продукта в пространстве мельничной системы; работа перемещения потока готовой пыли; работа по преодолению сопротивления установки; работа по преодолению гравитационных сил; технические работы, определяемые работой ротора мельницы, и тепловая работа в системе. В результате определены математические выражения обобщенных термодинамических потенциалов и координат систем пылеприготовления (табл.).

Первая группа потенциалов (п.п.1-4 табл.) определяется работой, связанной с перемещением в замкнутом пространстве системы "мельница-сепаратор" потоков мельничного продукта, готового топлива, работой аэродинамических и гравитационных сил, и характеризуется отношением общего объема мельничной системы к сечению ротора. Вторая группа потенциалов (п.п.5-6табл.) определяется работой вращения ротора мельницы и процессом дисперсионного превращения в камере размола. Третья группа потенциалов (п.7 табл.) определяется термической работой и характеризует сушильную производительность мельничной системы, которая связана со свойствами топлива и, соответственно, температурой топливовоздушного потока за сепаратором. Обобщенными потенциалами являются расчетно-конструктивные показатели системы "мельница-сепаратор", что логично согласуется с

опытом конструирования типового ряда топливоприготовительного оборудования. Обобщенными координатами служат режимные параметры пылесистемы: количество топлива, циркулирующего в системе "мельница-сепаратор", гидродинамический перепад давлений на установке и сложные (комплексированные) параметры (п.п.1,2,6).

**Сводная таблица обобщенных термодинамических потенциалов и координат системы пылеприготовления**

№ п/п	Вид работы	Обозн. $A_i$	Потенциал		Координата		Примечание
			$X_i$	разм.	$x_i$	Разм.	
1	Работа перемещения потока мельничного продукта	$A_1$	$\frac{1}{2} \frac{V}{LD}$	$м$	$\frac{MG_c^2}{VLD}$	$Н$	$B_3 = \frac{MG_c}{V}$ $x_1 = \frac{B_3 G_c}{LD}$
2	Работа перемещения потока готового топлива	$A_2$	$\frac{1}{2} \frac{V}{LD}$	$м$	$\frac{B_2 G_c}{LD}$	$Н$	
3	Работа аэродинамических сил	$A_3$	а) $V$	$м^3$	$P$	$Па$	а,б – варианты представления
			б) $\frac{V}{LD}$	$м$	$PLD$	$Н$	
4	Работа гравитационных сил	$A_4$	$\frac{V}{LD}$	$м$	$Mg$	$Н$	
5	Работа вращения ротора	$A_5$	а) $\frac{1}{2} u_6^2$	$\frac{м^2}{с^2}$	$M_x$	$кг$	а,б,в – варианты представления
			б) $\frac{1}{2} \frac{u_6^2}{g}$	$м$	$M_x g$	$Н$	
			в) $\frac{D^2 \pi^2 n_p^2}{g}$	$м$	$G_x$	$Н$	
6	Работа дисперсионного превращения в камере размола	$A_6$	а) $\frac{1}{2} u_6^2$	$\frac{м^2}{с^2}$	$\frac{B_2}{G_c} V$	$кг$	а,б – варианты представления
			б) $\frac{1}{2} \frac{u_6^2}{g}$	$м$	$\frac{B_2}{G_c} Vg$	$Н$	
		$A'_6$	а) $\frac{1}{2} u_6^2$	$\frac{м^2}{с^2}$	$M$	$кг$	а,б – варианты представления
			б) $\frac{1}{2} \frac{u_6^2}{g}$	$м$	$G$	$Н$	
7	Термическая работа	$A_8$	$T$	$К$	$c_m M$	$Дж/К$	

Таким образом, эти показатели, сформированные в виде соответствующих сигналов-параметров и/или сигналов-комплексов, могут служить теоретическим обоснованием параметров переопределенного объекта рассматриваемого класса и их комплексирования (как способа "косвенного" измерения неконтролируемых технологических параметров).

**В третьей главе** выполнено развитие теоретических основ построения математических моделей каналов формирования потоков топливоздушных смесей в топки котлов на примере разработки нелинейной динамической модели пылесистем прямого вдувания с молотковыми мельницами.

В работе принят следующий общий методологический подход построения уравнений динамических процессов. Во-первых, ввиду сложности уравнений законов сохранения, записанных в общем виде, производится переход к одномерной модели объекта с распределенными параметрами. При этом уравнение материального баланса принимает вид:

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}(\rho_2 v_2), \frac{кг}{м^3 \cdot с}, \quad (1)$$

а уравнение сохранения количества движения:

$$\frac{\partial \rho_3 v_c}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho_3 v_c^2)}{\partial z} - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho_3 F, \frac{Па}{м}, \quad (2)$$

где  $\frac{\partial P}{\partial z}$  – характеризует аэродинамическое сопротивление элементарного объема вдоль координаты  $z$ ;  $F$  – внешняя сила, которая для замкнутого объема пылесистемы определяется ускорением  $g$  свободного падения; поток готового продукта - индекс 2; поток мельничного продукта - индекс 3.

Во-вторых, полагается, что на физические переменные накладываются расчетно-конструкторские ограничения, при выполнении которых мельница и установка в целом могут работать устойчиво сколь угодно долгое время. Полагаем также, что распределение пыли внутри объема мельницы и в потоке мельничного продукта неравномерное (неизвестное). Однако, учитывая, что угольная пыль хорошо транспортируется потоком сушильно-вентилирующего агента, а пылевоздушная смесь образует подвижную эмульсию, для устойчивого массопотока принимается, что характеристики потока (концентрация, скорость движения, температура) однозначно определяют его состояние. При этом сушка топлива заканчивается в объеме мельницы, а химические реакции между компонентами пылевоздушной смеси отсутствуют.

В-третьих, скорость центра масс «элементарного объема» для всех компонентов многофракционного пылепотока топливовоздушной смеси в системе пылеприготовления определяется некоторой относительной скоростью отработанного сушильного агента в продольном сечении ротора мельницы при допущении, что расход сушильно-вентилирующего агента по пространственным координатам не изменяется.

Далее, все уравнения математической модели составляются для выделенного «элементарного объема» системы пылеприготовления  $LDdz$ , где  $L, D$  – длина и диаметр ротора мельницы – характеризуют сечение канала;  $z$  – пространственная координата. В частности, считается, что разница между "притоком" и "стоком" вещества идет на изменение массы рабочего тела в «элементарном объеме».

Принятый подход позволяет сохранить достаточную строгость изложения при переходе к модели с сосредоточенными параметрами. Для этого производные по пространственной координате  $z$  заменяются отношением разности значений функций между «входом» и «выходом» к эквивалентной длине канала. В этом случае принимается допущение, что параметры в системе постоянны не только по сечению канала, но и по его длине на конечном участке.

В результате на основе (1) и (2) получим уравнение, характеризующее изменение расхода сушильно-вентилирующего агента в установившемся режиме:

$$\frac{\partial G_c}{\partial t} = -LD \frac{G_c}{B_2} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{G_c}{LD} \frac{\partial G_c}{\partial z} + LDg. \quad (3)$$

С учетом подстановки эмпирических выражений для определения гидравлического сопротивления молотковых мельниц (уравнения состояния) на основе (3) получим следующее дифференциальное уравнение модели с сосредоточенными параметрами:

$$\frac{dG_c}{dt} = F(M, G_c) = \left( -a_1 - a_2 G_c^2 - \frac{a_3}{a_4 M + 0,1 M G_c^2} \right), \quad (4)$$

где  $a_1 = LDg$ ,  $a_2 = \zeta_0 \cdot \frac{1}{2V}$ ,  $a_3 = c \cdot (LD)^2$ ,  $a_4 = (LD)^2$ .

Особый интерес представляет решение, получаемого из (4) нелинейного уравнения  $G_c(M)$  статики (рис.2). Нетрудно видеть, что незначительные размеры зоны устойчивого массопотока (малые отрицательные коэффициенты усиления, справа от области экстремума) говорят о существенной критичности мельниц к перегрузкам.

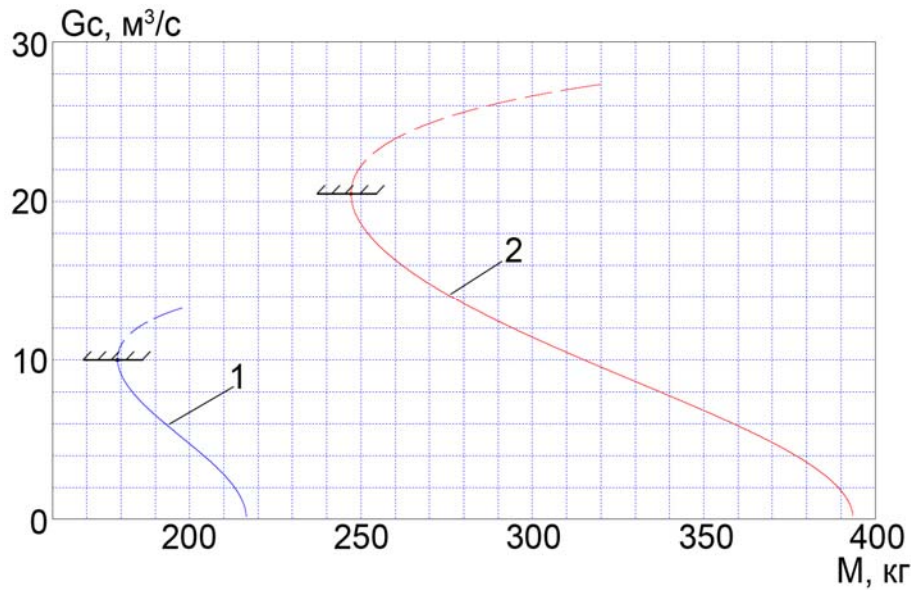


Рис 2. К решению уравнения состояния (4) для статического режима (1 – ММТ-1500/2510-735, 2 – ММТ-2000/2590-730)

Уравнение сохранения энергии для одномерной модели рассматриваемого класса мельничных систем имеет вид:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}(\rho v e) - \frac{\partial J_A}{\partial z} - \frac{\partial J_Q}{\partial z}, \quad (5)$$

где  $J_A$  – механическая работа,  $J_Q$  – поток теплоты,  $\rho e$  – плотность полной энергии, которая складывается из трех частей (см. табл.):

- плотности кинетической энергии движения потока, которая определяется как работа  $A_1$  перемещения потока мельничного продукта в объеме системы мельница-сепаратор, в том числе энергия  $A_2$  переноса готовой пыли; работа  $A_3$  преодоления сопротивления установки; энергия  $A_4$  преодоления гравитационных сил;

- плотности  $A_5$  потенциальной энергии, направленной на измельчение топлива, в физическом элементарном объеме, в поле внешних (по отношению к рассматриваемому элементарному объему) сил;

- плотности внутренней энергии  $A_8$ , состоящей из кинетической энергии теплового движения частиц и потенциальной энергии их взаимодействия (энергия, аккумулированная топливом и металлом установки, участвующая в обмене).

В результате плотность полной энергии:

$$\rho e = \frac{1}{2} \cdot \frac{MG_c^2}{V(LD)^2} + P + \frac{g}{LD} M + \frac{MЭ}{V} + \frac{c_m M + c_M m_M}{V} \cdot T \cdot Дж/м^3 \quad (6)$$

Левая часть дифференциального уравнения (5) есть производная плотности полной энергии (6). Правая часть (5) определяется как изменение полной энергии в локальном объеме системы за счет конвективного приноса (уноса) полной энергии потоком ( $\rho ev$ ), потока энергии, образованного механической работой ( $J_A$ ), и потока теплоты ( $J_Q$ ).

Анализ особенностей составляющих уравнения сохранения энергии для одномерной модели с распределенными параметрами позволил, рассматривая уравнение (5) совместно с уравнениями (1) материального баланса и (2) сохранения количества движения, представить математическую модель пылесистем рассматриваемого класса в виде следующей системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial M}{\partial t} = -\frac{V}{LD} \cdot \frac{\partial B_3}{\partial z}; \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{B_3}{G_c} \right) = -\frac{1}{LD} \cdot \frac{\partial B_3}{\partial z}; \\ \frac{\partial G_c}{\partial t} = -\frac{G_c}{LD} \frac{\partial G_c}{\partial z} - \frac{LDV}{M} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + LDg \\ \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{MG_c}{VLD} g + \frac{G_c}{LD} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{MG_c^2}{V(LD)^3} \cdot \frac{\partial G_c}{\partial z} - \frac{1}{V} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{G_c^2}{(LD)^2} + \frac{V}{LD} g \right) \frac{\partial M}{\partial t}; \\ \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{G_c}{LD} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{V}{c_m M + c_m m_M} \frac{\partial J_Q}{\partial z} - \frac{T}{LD} \frac{\partial G_c}{\partial z}; \\ \frac{\partial \Xi}{\partial t} = -\frac{G_c}{LD} \cdot \frac{\partial \Xi}{\partial z}. \end{array} \right. \quad (7)$$

Каждое из уравнений (7) имеет ясную физическую интерпретацию. Первые два уравнения характеризуют динамические особенности установки по условиям материального баланса. Третье и четвертое – аэродинамические особенности установки (эти уравнения позволяют связать параметры давление и расход сушильно-вентилирующего агента). Пятое уравнение системы характеризует динамические особенности теплообмена и сушки топлива. Учет шестого уравнения системы позволит, по-видимому, вскрыть динамические особенности процессов измельчения топлива и дисперсионного состава потока готовой пыли как дополнительного выходного параметра пылесистемы.

Систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (7) можно рассматривать как теоретическую основу для создания всережимных динамических моделей рассматриваемого класса объектов управления. Привязка системы к конкретной установке и виду топлива в соответствии с феноменологическим подходом

осуществляется посредством эмпирических уравнений состояния мельничных систем.

**Четвертая глава** посвящена разработке и практической реализации математической модели пылесистем прямого вдувания в универсальной среде имитационного моделирования и в среде ПТК АСУТП.

В качестве основного (тиражируемого) макрообъекта моделирования рассматривается нитка пылесистемы прямого вдувания с молотковыми мельницами. Учитывая, что модель должна быть реализуема инструментальными средствами имитационного моделирования ПТК в составе АСУТП, в основу имитационной модели положены уравнения модели с сосредоточенными параметрами.

Уравнение материального баланса записывается для количества топлива, циркулирующего в системе "мельница-сепаратор", потоков готовой топливовоздушной смеси и мельничного продукта:

$$\frac{dM}{dt} = B_1 - k_B B_2; \quad (8)$$

$$\frac{dB_2}{dt} = (\alpha B_3 - k_B B_2) \frac{G_c}{V}; \quad (9)$$

$$\frac{dB_3}{dt} = \frac{B_3}{G_c} \frac{dG_c}{dt} + (\bar{B}_1(c) - \alpha B_3) \frac{B_3}{M}; \quad (10)$$

где  $B_1$  – расход сырого топлива, кг/с;  $k_B$  – коэффициент пересчета на влажность топлива;  $B_2$  – расход готовой пыли, кг/с;  $\alpha$  – коэффициент учета циркуляции топлива в системе мельница-сепаратор;  $\bar{B}_1(c)$  – эмпирическое уравнение состояния, характеризующее размольную производительность мельничной установки, кг/с.

Учет влияния изменений расхода сушильно-вентилирующего агента и гидравлического сопротивления определяется уравнениями:

$$\frac{dG_c}{dt} = -\frac{(LD)^2}{M} (H_x - H_p) + LDg - \frac{G_c}{V} (K_v G_c - G_v); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_2}{dt} = & \frac{MG_c}{VLD} g + \frac{G_c}{V} (P_1 - P_2) - \frac{MG_c^2}{V^2 (LD)^2} (K_v G_c - G_v) + \\ & + \frac{1}{V} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{G_c^2}{(LD)^2} + \frac{V}{LD} g \right) \frac{dM}{dt}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $P_1$ ,  $P_2$  – давление сушильно-вентилирующего агента соответственно в коробе первичного воздуха (перед мельницей) и за мельницей (в пылепроводе);  $H_x - H_p$  – перепады давлений, определяемые эмпирическими выражениями для конкретной установки.

Уравнение теплового баланса определим при допущении, что сушка топлива заканчивается в объеме мельницы:

$$(c_T M + c_M m_M) \frac{dT_{ce}}{dt} = Q_1 - Q_2; \quad (13)$$

где  $Q_1 = G_V c_V t_V \rho_V + K_{мех} N_M$ ;

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

$Q_1$  – теплота, подводимая в мельницу, Дж/с;  $Q_2$  – теплота, отводимая из мельницы, Дж/с;  $G_V$  – расход первичного воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $c_T$  – теплоемкость сырого топлива, Дж/кг·°К;  $T_{ce}$  – температура аэросмеси, °С;  $c_V$  – теплоемкость первичного воздуха, Дж/кг·°К;  $t_V$  – температура первичного воздуха, °С;  $\rho_V$  – плотность первичного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $K_{мех}$  – коэффициент механических потерь в тепло при измельчении угля;  $N_M$  – мощность двигателя мельницы, Вт;  $W_p$  – 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;  $\rho_c$  – плотность сушильного агента за сепаратором, кг/м<sup>3</sup>.

Результаты исследования математической модели (8)-(13) выполнены универсальными инструментальными средствами имитационного моделирования и средствами ПТК «Квинт» в лаборатории «Полигон АСУТП электростанций» кафедры систем управления ИГЭУ.

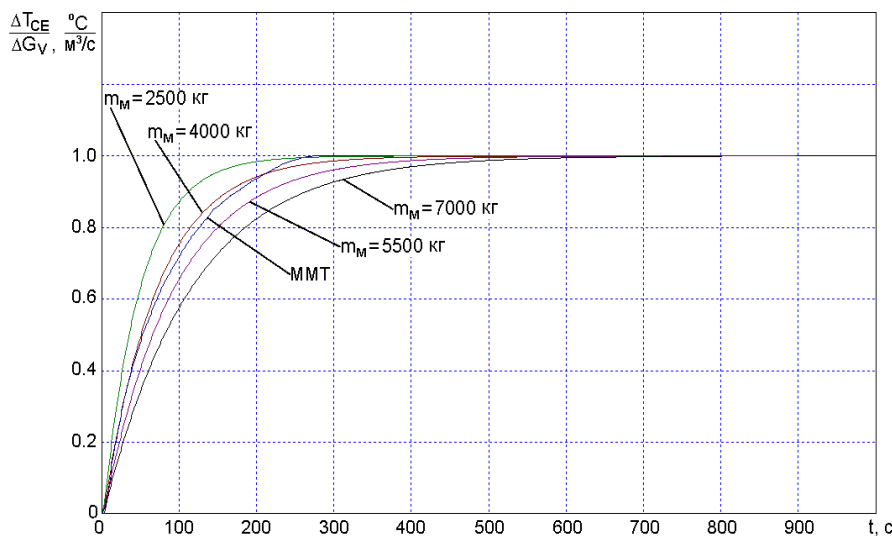


Рис.3. К оценке влияния массы металла, участвующего в теплообмене, на динамические характеристики (ММТ-2000/2590-730)



Задача рассмотрена на примере пылесистем прямого вдувания с молотковыми мельницами типа ММТ-1500/2510-735, работающих в составе барабанных котлов ТПЕ-208 энергоблоков 200 мВт, и пылесистем с мельницами типа ММТ-2000/2590-730, работающих в составе прямоточных котлов П-59 энергоблоков 300 мВт. Методика исследований сводится к настройке модели на заданный режим работы, оценке степени влияния на характер процессов параметров модели (например, сильно выраженное влияние на динамические характеристики модели оказывает неопределенное изначально значение части массы металла мельницы  $m_M$ , участвующего в теплообмене, рис.3), и последующему анализу результатов вычислительных экспериментов.

Вычислительные эксперименты по определению динамических характеристик модели выполнялись путем ступенчатых изменений подачи сырого топлива и расхода первичного воздуха в режиме нормальной работы установок. В результате получены динамические характеристики как для известных контролируемых параметров (температура за мельницей, загрузка топливом), так и для показателей, полученных в результате обобщенного термодинамического анализа пылесистемы (рис.4).

Для оценки адекватности разрабатываемых аналитических моделей по результатам ретроспективных исследований был создан фонд (БД) экспериментальных динамических характеристик и математических моделей котлов ТЭС. Фонд разработан таким образом, что допускает возможность постоянного развития и пополнения новыми экспериментальными данными и аналитическими моделями ТМО. Фонд непосредственно включен в состав интегрированной информационно-технической среды многофункционального учебно-исследовательского комплекса "Полигон АСУТП электростанций" и используется в учебно-научном процессе ИГЭУ.

На этапе вычислительных экспериментов проведены исследования динамических характеристик имитационной модели с учетом влияния на переходные процессы характеристик датчиков и исполнительных устройств. С этой целью для параметров, доступных для непосредственного контроля, подключены модели датчиков и исполнительных устройств. Сравнение переходных процессов говорит об удовлетворительном совпадении теоретических и экспериментальных результатов.

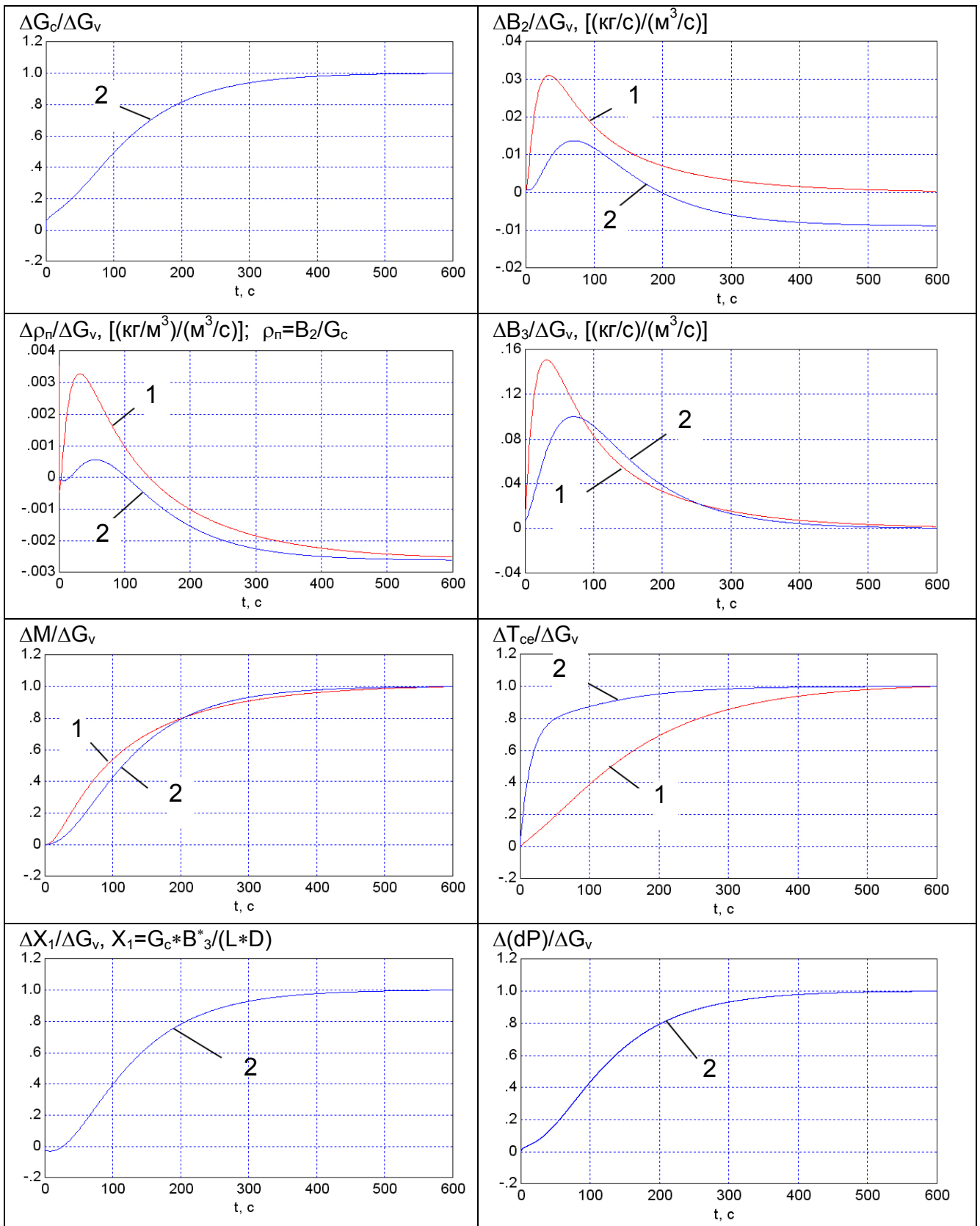


Рис.4. Нормированные переходные характеристики при возмущении по каналу подачи горячего воздуха ( $B_1 = 6,9 \text{ [кг/с]}$ ;  $G_v = 10 \text{ [м}^3\text{/с]}$ ;  $\Delta G_v = 0,1 \text{ [м}^3\text{/с]}$ )  
1 – базовая модель; 2 – расширенная модель

**В пятой главе** на базе разработанной математической модели выполнено аналитическое исследование вариантов схем управления пылеподачей в пылесистемах прямого вдувания.

Для котлов с пылесистемами прямого вдувания ключевой задачей синтеза АСР тепловой нагрузки котла является задача управления пылеподачей группы топливоприготовительных установок. При этом как отечественные, так и зарубежные технические решения можно классифицировать путём анализа способов структурного построения систем регулирования.

Для рассматриваемого класса объектов известны два исторически сложившихся способа реализации задачи управления пылеподачей (рис.5, а,б). Для реализации первого способа («на стоке» готовой пыли) управления пылеподачей в топку котла на каждой нитке пылесистемы предусматривается индивидуальный регулятор первичного воздуха (РПВ) в мельницу, а управление пылеподачей осуществляется путем изменения расхода сырого топлива. Для реализации второго способа («на притоке» сырого топлива) – на каждой нитке пылесистемы предусматривается индивидуальный регулятор подачи сырого топлива (РТ) в мельницу, а управление пылеподачей осуществляется путем изменения расхода сушильно-вентилирующего агента. Однако формального аналитического сравнения схемных решений до сих пор осуществить не представлялось возможным ввиду отсутствия полноценных математических моделей объектов рассматриваемого класса.

По результатам выполненного исследования синтезировано новое структурное решение по АСР пылеподачи с использованием в качестве основного сигнала комплексированного показателя  $x_1$ , сформированного по результатам обобщенного термодинамического анализа и характеризующего переносимую субстанцию в системах измельчения топлива (рис.5,в; рис.6).

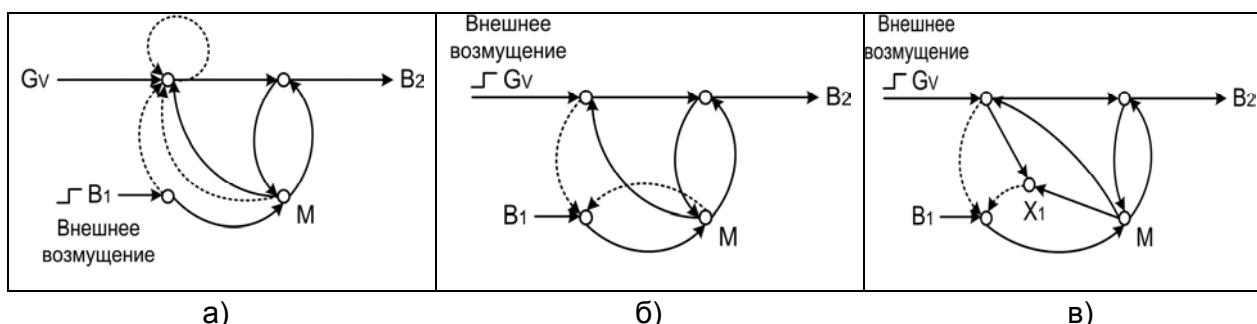


Рис.5. К сравнению потоковых структур АСР пылеподачи:  
а) «на стоке» готовой пыли, с РПВ; б) «на притоке» сырого топлива, с РТ1;  
в) «на притоке» с комплексированным показателем, с РТ2

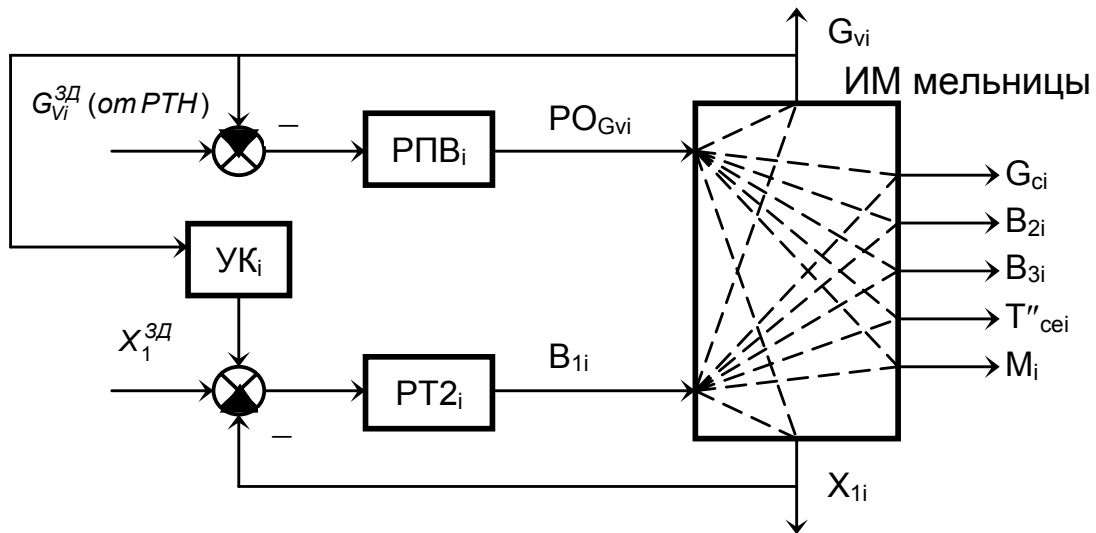


Рис.6. Структурная схема АСР пылеподдачи с новым сигналом  $X_1$  и регулятором  $PO_{G_{vi}}$

В целом рассмотренные системы представляют собой комбинированные АСР пылеподдачи с РПВ, РТ1 и РТ2, в которых основным регулируемым параметром является количество топлива  $M$ , циркулирующее в системе мельница-сепаратор, стабилизация которого обеспечивает безаварийный режим работы мельниц.

Сравнение переходных процессов (рис.7) в анализируемых схемах показывает, что в схеме с РПВ имеет место гораздо более существенные отклонения параметра. В схемах с РТ (РТ1 или РТ2) эти проявления минимизируются путем стабилизации генерирующей способности топливовоздушного потока ( $M = \text{const}$ ) и зависят практически только от качества настройки регулятора подачи сырого топлива в мельницу и, соответственно, устройства компенсации (УК) внешнего возмущения.

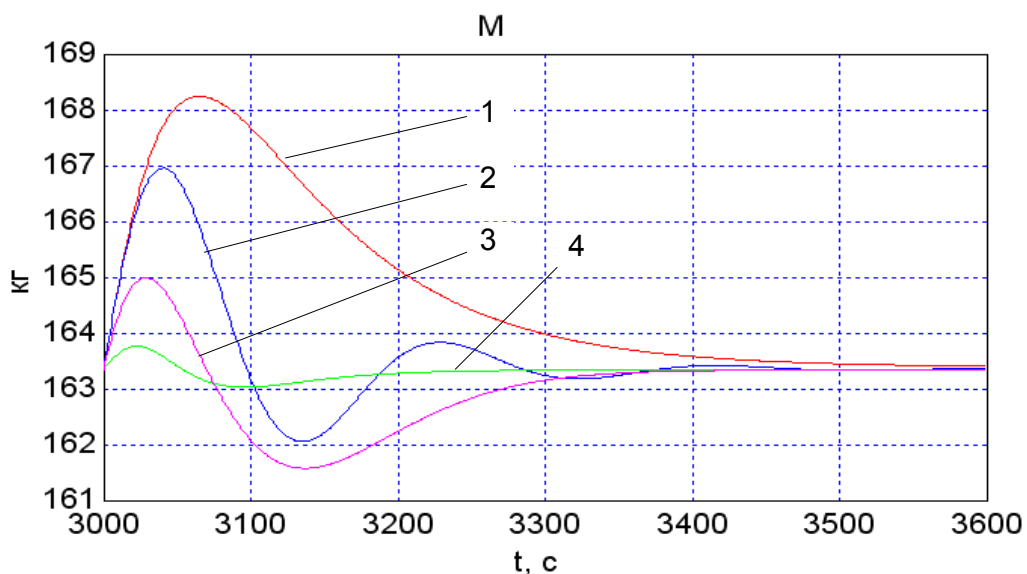


Рис.7. К вопросу о качестве переходных процессов в альтернативных АСР пылеподдачи котлов с пылесистемами прямого вдувания (1,2-РПВ, 3-РТ1, 4-РТ2)

В целом полученные результаты позволяют говорить о том, что АСР с новым комплексированным сигналом обеспечивает более высокое качество регулирования и соответственно стабилизацию режима работы мельничной установки.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Выполнен анализ ключевых факторов, влияющих на эффективность современных АСУТП энергоблоков, и определены основные требования к построению динамической модели пылесистем прямого вдувания котлов для совершенствования АСУТП тепловых электростанций.

2. Разработана методика обобщенного термодинамического анализа пылесистем прямого вдувания котлов как технологического объекта управления, позволяющая обосновать управляемые параметры сложного объекта и оценивать ряд неконтролируемых технологических координат.

3. Выполнен обобщенный термодинамический анализ пылесистем прямого вдувания котельных установок с молотковыми мельницами и определены математические выражения обобщенных термодинамических потенциалов и управляемых технологических координат пылесистемы.

4. Показано, что обобщенными термодинамическими потенциалами пылесистемы прямого вдувания с молотковыми мельницами служат конструктивные показатели: удельный объем системы (объем установки, отнесенный к сечению ротора мельницы) и квадрат окружной скорости бил ротора, а также температура топливоздушнoй смеси.

5. Показано, что обобщенными координатами, характеризующими состояние пылесистемы как термодинамической системы, служат режимные параметры пылесистемы: количество топлива, циркулирующего в системе мельница-сепаратор, гидродинамический перепад давлений на установке и обобщенная координата переносимой субстанции, определяемая произведением массы топлива, циркулирующего в системе мельница-сепаратор, и квадрата условной (в сечении ротора) скорости сушильно-вентилирующего агента.

6. Разработаны теоретические основы для создания математической модели пылесистем прямого вдувания котлов в виде систем нелинейных дифференциальных уравнений с распределенными и сосредоточенными параметрами. При этом каждое из уравнений имеет ясную физическую интерпретацию.

7. Показано, что известные структуры динамических моделей рассматриваемого класса объектов управления теоретически обоснованы линейными приближениями разработанной нелинейной модели (на

уровне уравнений материального баланса и сохранения количества движения).

8. Динамические нелинейные модели пылесистем прямого вдувания с молотковыми мельницами доведены до уровня имитационных моделей и моделей, реализованных средствами ПТК в составе полигонных версий АСУТП.

9. Создан фонд динамических характеристик котлов, выполнено сравнение полученных модельных результатов с экспериментальными данными ретроспективных исследований по идентификации теплоэнергетического оборудования. Показано удовлетворительное совпадение аналитических и экспериментальных результатов.

10. Выполнено исследование вариантов АСР пылеподдачи в системах пылеприготовления с молотковыми мельницами, в том числе с использованием в качестве основного сигнала обобщенной термодинамической координаты переносимой субстанции.

11. Показано, что использование в АСР пылеподдачи обоснованного разработанной моделью пылесистемы нового комплексированного сигнала позволяет достигнуть более высокого качества регулирования пылеподдачи.

В целом полученные результаты могут быть использованы при создании нелинейных динамических моделей топливоприготовительного оборудования котельных установок ТЭС, в том числе при разработке тренажерных комплексов и при решении широкого круга задач автоматического управления и диагностирования.

### **Основные публикации по теме диссертации**

#### *Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК*

1. 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, № 9, 2005. – С.61-69.

2. Фонд экспериментальных динамических характеристик паровых котлов тепловых электростанций / Д.Ю. Тверской, И.Е. Харитонов, С.А. Таламанов и др. // Теплоэнергетика, № 10, 2005. – С.32-35.

3. Тверской Д.Ю. Особенности построения нелинейной динамической модели пылесистем прямого вдувания котлов // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2008. – №3. – С. 83-89.

#### *Основные публикации в других изданиях*

4. Тверской Д.Ю. Особенности построения математической модели ШБМ под давлением в пылесистемах котлов с топками прямого вдувания // Тезисы докладов межд. научн.-техн. конф. "VIII Бенардосовские чтения". – Иваново: ИГЭУ, 1997. – С.91.

5. Тверской Д.Ю. Методика термодинамического анализа пылесистем прямого вдувания паровых котлов электростанций // Управление в технических системах: Материалы научн.-техн.конф. – Ковров: КГТА, 1998. – С.95-97.
6. Тверской Д.Ю., Тверской Ю.С. Теоретические основы динамических моделей каналов формирования потоков топливовоздушных смесей в топки котлов. Деп. в ВИНТИ 18.01.02, № 86-В2002. Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2002. – 74 с.
7. Тверской Ю.С., Тверской Д.Ю., Харитонов И.Е. О создании фонда экспериментальных динамических характеристик паровых котлов ТЭС // Новое в Российской электроэнергетике, 2002, №12. – С.16-24.
8. Патент № 2233404 «Способ сжигания топлива» // Тверской Ю.С., Андреев Ю.В., Андреев Н.В., Тверской Д.Ю.(Заявка №2001128269 от 18.10.2001). Опубл.27.07.04, Бюл.№21.
9. Методика реализации имитационной модели пылесистемы по схеме прямого вдувания средствами ПТК в составе АСУТП / Ю.С. Тверской, С.А.Таламанов, А.Н. Никоноров, Е.Д. Маршалов, Д.Ю. Тверской // Технология АСУТП электростанций: Труды Междунар. науч.-техн. конф. "XII Бенардосовские чтения", секция 3: Системы управления и автоматизация, 20-22 окт.2005. т.3. – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2005. – С.124-128.
10. Харитонов И.Е., Тверской Д.Ю. Требования к информационному обеспечению фонда экспериментальных характеристик теплотехнического оборудования ТЭС // Технология АСУТП электростанций: Труды Междунар. науч.-техн. конф. "XII Бенардосовские чтения", секция 3: Системы управления и автоматизация, 20-22 окт.2005. т.3. – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2005. – С.115-119.
11. Тверской Д.Ю., Тверской Ю.С. Задачи и проблемы совершенствования АСУТП энергоблоков в направлении их интеллектуализации // Управление и информационные технологии: Сб. докладов 4-ой Всероссийской научной конференции, 10-12 октября 2006 г. – Санкт-Петербург, 2006. – С.230-236.
12. Тверской Д.Ю., Маршалов Е.Д. Исследование нелинейной динамической модели пылесистемы прямого вдувания топлива с молотковыми мельницами. В кн. «Теория и практика построения и функционирования АСУТП»-«CONTROL-2008». – МЭИ, 2008. – С.149–152.
13. Нелинейная динамическая модель пылесистем прямого вдувания котлов электростанций // Тверской Д.Ю., Корольков В.В., Маршалов Е.Д. и др. Управление и информационные технологии: Сб. докладов 5-ой Всероссийской научной конференции, 14-16 октября 2008 г. – Санкт-Петербург, 2008. – С.100-102.
14. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2008620101 «Фонд экспериментальных характеристик объектов энергетики» (базовая версия) // Авт. Тверской Ю.С., Тверской Д.Ю., Харитонов И.Е., Таламанов С.А., Никоноров А.Н». Зарегистрирована в Реестре баз данных 18.02.2008.

**ТВЕРСКОЙ Дмитрий Юрьевич**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЫЛЕСИСТЕМ ПРЯМОГО ВДУВАНИЯ  
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Подписано в печать 24.04.2009. Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,39

Тираж 100 экз. Заказ № 123

ГОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический  
университет им. В.И.Ленина"

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.