

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.5:621.1

А. Г. ЛЮТОВ, В. Ц. ЗОРИКТУЕВ, М. Ю. ОЗЕРОВ, А. И. ЯМАЕВ

АНАЛИЗ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА
ОТОПИТЕЛЬНОГО КОТЛА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Проанализирована система автоматического регулирования газозвдушного тракта отопительного котла. Предложены новые способы регулирования газозвдушного тракта отопительного котла. Разработана имитационная модель. Проведено исследование газозвдушного тракта отопительного котла. Система автоматического регулирования ; газозвдушный тракт ; отопительный котел ; имитационная модель

На современном этапе развития промышленного производства ввиду высокой стоимости и дефицита энергии очень остро встает вопрос энергосбережения. Учитывая суровые климатические условия нашей страны, повышение энергоэффективности технологического процесса производства тепла является актуальной задачей. Один из действенных путей ее решения – разработка энергоэффективной системы автоматического регулирования газозвдушного тракта отопительного котла (САР ГВТ ОК) [1, 2].

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

С целью анализа наблюдаемых, управляемых и возмущающих параметров рассмотрим работу ГВТ ОК как объекта управления.

В процессе работы ОК возникает необходимость регулирования тепловой энергии, вырабатываемой котлом [3].

Мощность ОК

$$Q_k = \sum_{i=1}^n Q_{in} + Q_{пот}, \quad (1)$$

где Q_k – тепловая энергия вырабатываемая котлом, Q_{in} – тепловая энергия потребляемая i -м абонентом тепловой сети, $Q_{пот}$ – потери тепловой энергии в процессе передачи от ОК к абонентам тепловой сети.

Изменение Q_{in} обусловлено двумя основными причинами:

- изменением температуры окружающей среды ($t_{окр}$) [4];
- изменением потребления тепловой энергии абонентами тепловой сети в целях ее экономии. Например, снижение потребления в ночные часы для производственных предприятий [5].

Таким образом, температура окружающей среды ($t_{окр}$), тепловая энергия, потребленная абонентами тепловой сети (Q_{in}), и потери тепловой энергии в тепловых сетях ($Q_{пот}$) являются основными возмущающими факторами, определяющими необходимость изменения мощности, и, как следствие, изменению расхода топлива.

В то же время из формулы (2) видно, что изменение расхода топлива (B_p) приводит к изменению расхода воздуха (V_a) и является основным возмущающим воздействием для воздушного тракта ОК, и определяют необходимость регулировки подачи воздуха в ОК.

$$V_a = V_o B_p T (t_b + 273) / 273, \quad (2)$$

где B_p – расчетный расход топлива, V_o – теоретический расход воздуха для сгорания 1кг топлива, T – коэффициент избытка воздуха в топке, t_b – температура воздуха.

При работе ОК с уравновешенным ГВТ для обеспечения нормального топчного режима необходимо наличие небольшого постоянного разрежения в верхней части топки ОК до 20–30 Па. Для обеспечения этого условия необходимо, чтобы производительность дымососа соответствовала объему продуктов сгорания перед дымососом ($V_{др}$) в соответствии с формулой (3). Изменение температуры уходящих газов (T_{yx}), расхода топлива (V_T), и изменение действительного количества продуктов сгорания являются возмущающими воздействиями для газового тракта ОК.

$$V_{др} = V_z (273 + T_{yx}) / 273, \quad (3)$$

$$V_r = V_n B_p,$$

где V_n – суммарный объем продуктов сгорания 1кг топлива, V_r – действительное количество продуктов сгорания, $V_{др}$ – объем продуктов сгорания перед дымососом, T_{yx} – температура уходящих газов.

Таким образом, в результате воздействия рассмотренных выше возмущающих факторов возникает задача регулирования количества воздуха, расходуемого для сжигания топлива и разряжения в топке ОК.

В качестве датчиков наблюдаемых параметров для определения фактического расхода воздуха и разряжения используются датчики давления и разряжения [4].

Для управления подачей воздуха и создания разряжения в топке ОК применяются вентиляторы. На рис. 1 показаны характеристики вентилятора – зависимость выходного давления H от расхода воздуха B , и характеристики системы подачи воздуха или отводящих газов.

Точка пересечения двух кривых является фактической рабочей точкой, определяющей расход (B) в системе.

Исходя из графика (рис.1) изменение расхода воздуха и разряжение возможно двумя основными способами:

- изменяя характеристики системы подачи воздуха или отводящих газов;
- изменяя характеристики вентилятора или дымососа.

Наиболее целесообразно осуществлять этот процесс в автоматическом режиме.

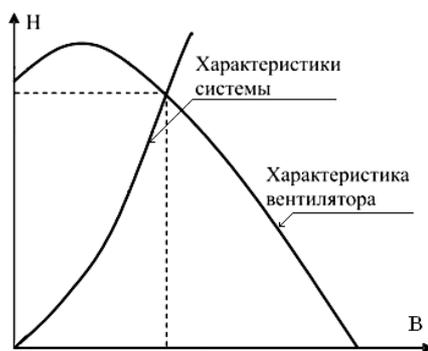


Рис. 1

Рассмотрим основные требования к САР ГВТ ОК. Заданные значения расхода воздуха и разряжения в соответствии с формулами (2) и (3) обеспечивают полное и эффективное сгорание топлива при условии безопасной работы ОК. Нарушение этих соотношений приводит к срабатыванию автоматики защиты ОК и его отключению.

В то же время, чтобы избежать ложных срабатываний, устанавливается время задержки ($t_{\text{зад}}$), в течение которого возможны нарушения соотношений (2) и (3), и предельные отклонения расхода воздуха и разряжения от заданных зна-

чений ($\delta_{\text{пред}}$), которые устанавливаются на уровне $\delta = 5\%$.

Из вышеизложенного следуют требования к САР ГВТ ОК:

- точность поддержания заданных значений расхода воздуха и разряжения в топке ОК не более 5%;
- быстродействие САР ГВТ ОК, определяемое как время перехода от одних заданных значений расхода воздуха B_v и разряжения, не более $t_{\text{зад}}$, где $t_{\text{зад}}$ – время задержки срабатывания защиты ОК;
- перерегулирование в процессе автоматического управления не более 5%.

Наиболее распространенным видом регулирования расхода является дросселирование. Регулирование воздушного потока в этом случае осуществляется за счет изменения сопротивления воздушного канала при помощи направляющих аппаратов (заслонки) [8]. Метод позволяет достаточно быстро обрабатывать возмущающие воздействия. Энергетическая эффективность этого вида регулирования чрезвычайно низка, и чем глубже осуществляется процесс регулирования, тем больше потери электроэнергии.

Наиболее экономичным способом регулирования производительности вентиляторов и дымососов является изменение их скорости вращения, которое достигается при помощи частотно-регулируемого электропривода [7].

Недостатком этого метода является низкое быстродействие, обусловленное инерционностью рабочих колес дымососов и вентиляторов. Задача поддержания оптимального режима горения в топке обеспечивается выбором необходимой частоты вращения электродвигателей тягодутьевых механизмов при полностью открытых направляющих аппаратах практически во всем диапазоне производительности котельной. Однако при полностью открытых направляющих аппаратах возможно возникновение неустойчивого режима горения при розжиге котла либо «отрыв» пламени от запальника или от горелки. Неустойчивый режим определяется динамическими возмущениями давления/разрежения в топке котла, вызываемыми работой рядом расположенных котлов, связанных по газходам с общей дымовой трубой. Причиной отрыва пламени может быть изменение естественной тяги дымовой трубы [2, 6].

Таким образом, эффективная САР ГВТ ОК должна отвечать следующим основным требованиям:

- обеспечивать устойчивую работу ОК во всех режимах с учетом требований к САР ГВТ ОК;
- обеспечивать снижение затрат электроэнергии при регулировании производительности дымососа и вентиляторов.

2. НОВЫЙ СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Для решения этой задачи предложен новый способ регулирования. Суть разработанного метода заключается в одновременной регулировке сопротивления ГВТ при помощи направляющих устройств (заслонки) и изменении частоты вращения рабочих колес дымососа и вентилятора [9]. В установившихся режимах и в условиях медленно меняющихся возмущений регулирование осуществляется за счет изменения частоты питающего напряжения электродвигателей тягодутьевых механизмов. При этом направляющие аппараты открываются, уменьшая сопротивление ГВТ, и, как следствие, снижая энергопотребление дымососа и вентилятора.

На рис. 2 и 3 показаны функциональные схемы САР, реализующих предложенный способ для дымососа и вентилятора ОК.

САР вентилятором ОК (рис. 2) содержит вентилятор, электрически связанный с частотным преобразователем, датчик положения заслонки, регулятор. Текущее значение давления измеряется датчиком давления, связанным с регулятором.

Необходимую подачу воздуха (измеряют по значению давления) в процессе эксплуатации котлоагрегата задают блоком задатчика и сравнивают с текущим значением, поступающим от датчика давления. Разностный сигнал формируют в блоке регулятора, который управляет положением заслонки подачи воздуха в топку котлоагрегата. В зависимости от положения датчика положения заслонки, регулятор формирует сигналы управления частотным преобразователем, который в свою очередь плавно изменяет работу вентилятора, учитывая угол открытия поворотной заслонки, и изменяет частоту вращения рабочего колеса вентилятора таким образом, чтобы угол открытия заслонки находился в заданных пределах. При этом устанавливают на регуляторе значения x_1 (минимальный уровень открытия заслонки) и x_2 (максимальный уровень открытия заслонки), при выходе за эти граничные значения регулятор формирует сигналы управления частотным преобразователем, который в свою очередь плавно изменяет работу вентилятора в сторону увеличения (если уровень открытия заслонки больше

значения x_2) или уменьшения (если уровень открытия заслонки меньше значения x_1) частоты вращения вентилятора.

Принцип работы САР дымососом (рис. 3), реализующий предложенный способ управления, аналогичен вышеописанному.

Таким образом, система регулирования позволяет обеспечить компенсацию быстроизменяющихся возмущений за счет регулирования заслонки, а медленные возмущения (например, изменения температуры) за счет изменения частоты вращения рабочего колеса дымососа и вентилятора.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ САР

Для исследования предложенной САР режимов работы тягодутьевых механизмов ОК целесообразно применить имитационное моделирование с использованием инструментального средства для моделирования динамических систем SIMULINK, входящего в состав пакета MATLAB. Имитационная модель газовой котельной установки выполнена на версии 6 пакета SIMULINK, входящего в состав 14 релиза MATLAB7.

Структурная схема имитационной модели САР приведена на рис. 4. Модель содержит 5 основных блоков, относящихся к основным структурам газовой системы и элементам управления.

Модель асинхронного привода включает модель двигателя переменного тока, использующего уравнения обобщенной электрической машины блок «AD-KZ». Входами для него являются задатчики частоты (f) и напряжения питания (u) и угловой скорости вращения ротора (ω). Выходным сигналом является электромагнитный момент (M) на валу двигателя. Внутренние настройки блока «AD-KZ» позволяют ввести значения элементов электрической схемы замещения для настройки его под конкретный двигатель. Далее в блоке суммирования производится вычитание момента трения, полезного момента сопротивления от вентилятора, результат поступает на интегрирующее звено, каковым является ротор, в блок которого вводится момент инерции системы двигатель-вентилятор. Выходом для этого звена является угловая скорость в соответствии с уравнением движения:

$$M = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4)$$

где J – момент инерции механической системы (ротор электродвигателя и рабочее колесо); ω – угловая скорость; t – время; M – момент.

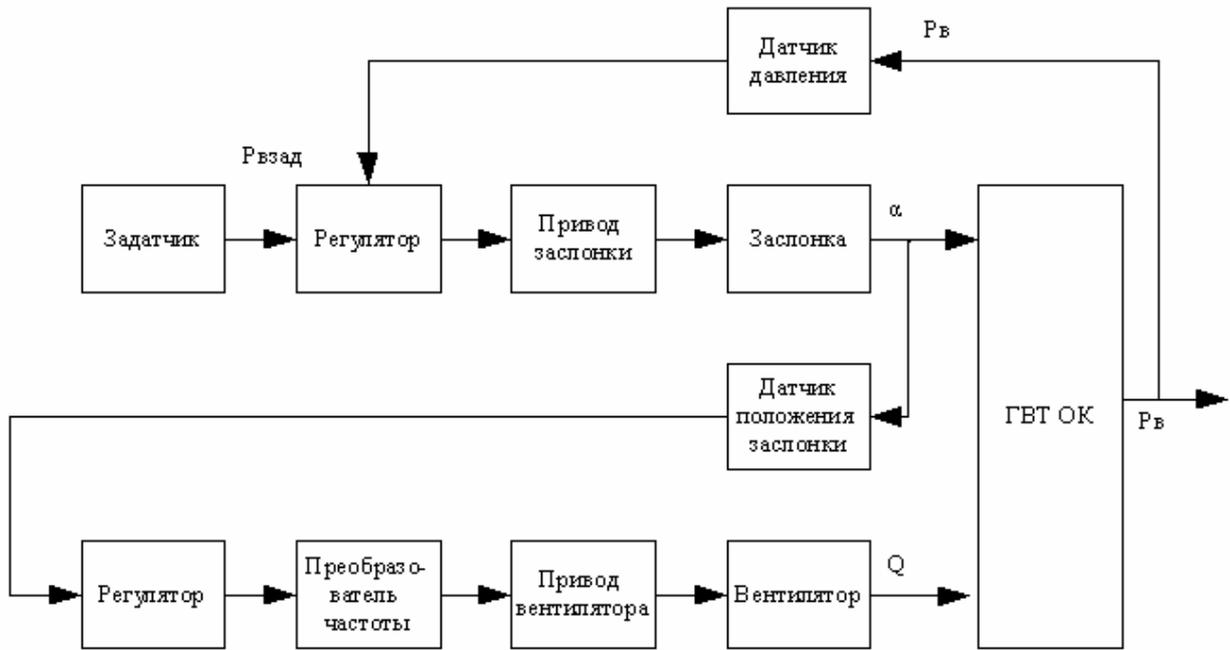


Рис. 2. Функциональная схема САР давлением воздуха в ОК

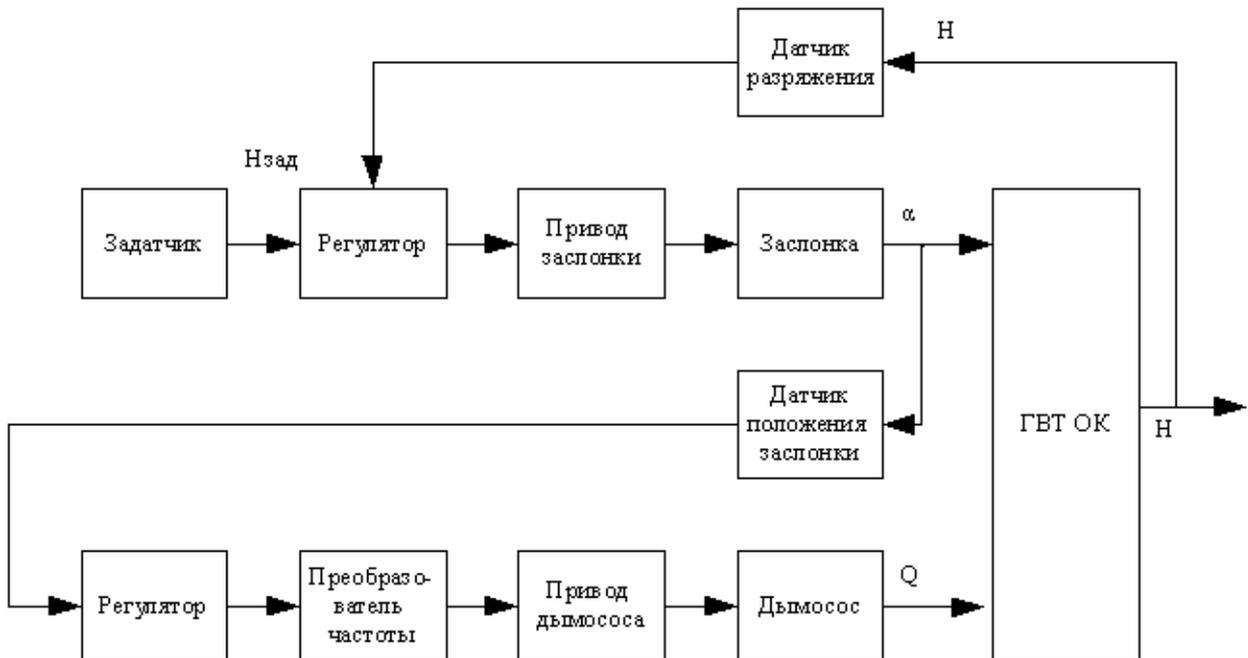


Рис. 3. Функциональная схема САР разряжением воздуха в ОК

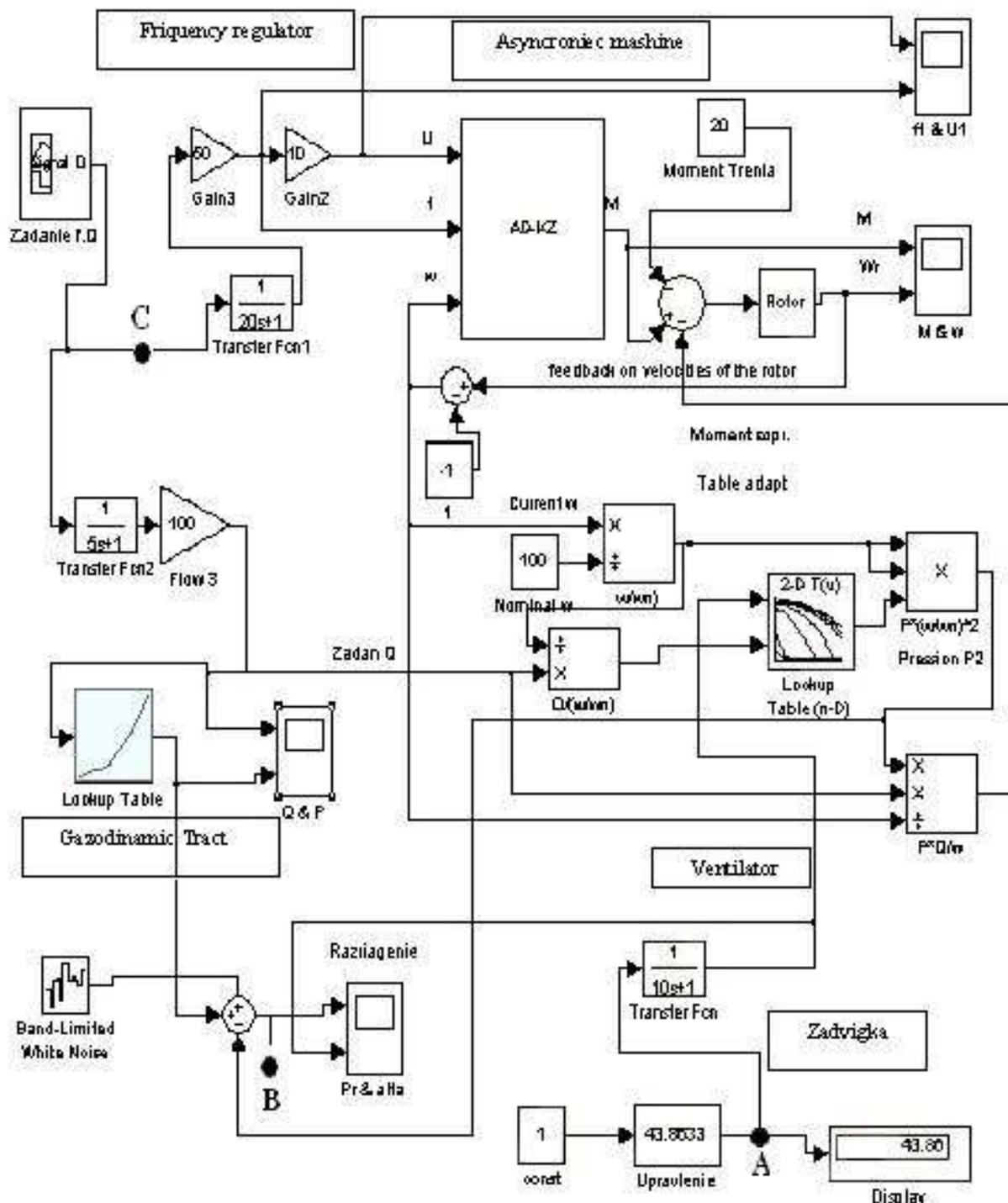


Рис. 4. Структурная схема имитационной модели САУ ГВТ ОК

Регулятор частоты может быть представлен пропорционально-интегральнодифференциальным звеном [10].

$$f = W_{\text{ПИД}}(p)U_{\text{вх}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{вх}}$ – величина действующего значения напряжения, f – частота выходного напряжения, $W(p)_{\text{ПИД}}$ – передаточная функция ПИД-регулятора.

$$U = K_p f, \quad (6)$$

где K_p – коэффициент пропорциональности. Газовый тракт моделируется таблицей $P = f(Q)$ (где P – давление воздуха, Q – расход), снятой с конкретного объекта, на вход которого поступает через пропорционально-интегральное звено сигнал с датчика производительности, реализованного блоком SIGNAL BILDER.

Таким образом, узел вентилятора имеет входы производительности (Q) и положения заслонки в градусах (α). Следует подробнее рассказать о регулировке по скорости вращения ротора. Данные в таблице приведены для номинальной скорости вращения, поэтому чтобы получить значение давления при заданной скорости, необходимо воспользоваться известными соотношениями $Q = Q_n(w/w_n)$ и $P = P_n(w/w_n)^2$ (где Q – расход, P – давление воздуха, w – угловая скорость, Q_n – номинальный расход, P_n – номинальное давление воздуха, w_n – номинальная угловая скорость). Момент сопротивления вентилятора вычисляется как

$$M = QP/w. \quad (7)$$

Узел заслонки моделируется в основном блоком Slider Gain, позволяющим оценить возможности ручной регулировки.

Измерения на реальных объектах показывают, что процессы горения сопровождаются случайными флуктуациями давления в ГВТ, что можно моделировать блоком «белого шума», входящего в пакет SIMULINK.

Проводились исследования модели, предложенной САР ГВТ ОК.

Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными графиками переходных процессов давления воздуха и разряжения в топке ОК КВ-ГМ-35-150, полученными при регулировании с помощью направляющих аппаратов (при этом частота питающего напряжения $f = 50$ Гц) – кривые 1, 2 из рис. 5 и рис. 6, и при регулировании изменением частоты питающего напряжения дымососа и вентилятора (в этом случае направляющие аппараты полностью открыты $\alpha = 0$) – кривые 1, 2 из рис. 7 и рис. 8. Кривые 1 на рис. 5, 6, 7, 8 – расчетные, а 2 – экспериментальные.

Точность совпадения экспериментальных данных с результатами имитационного моделирования составила 20%.

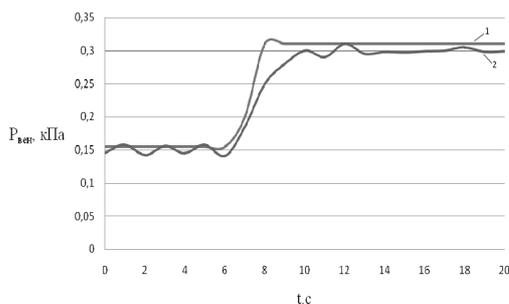


Рис. 5. Переходные процессы в САР при регулировании давления с помощью направляющих аппаратов

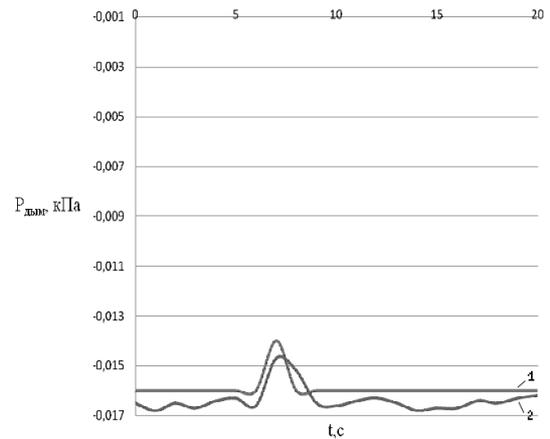


Рис. 6. Переходные процессы в САР при регулировании разряжения с помощью направляющих аппаратов

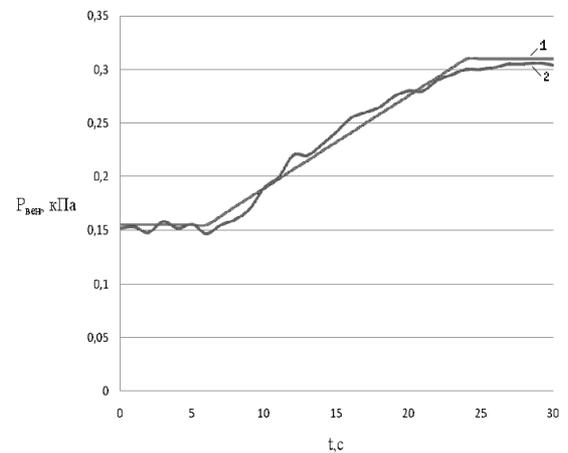


Рис. 7. Переходные процессы в САР при регулировании давления изменением частоты питающего напряжения

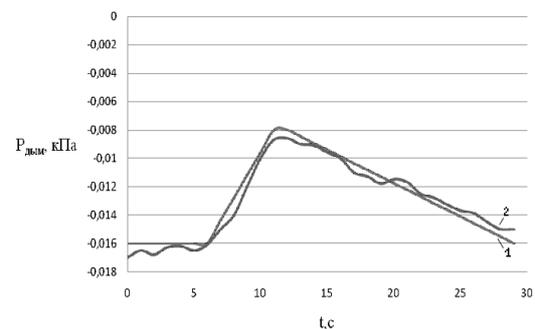


Рис. 8. Переходные процессы в САР при регулировании разряжения изменением частоты питающего напряжения

ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ разработанной модели ГВТ позволяет сделать следующие выводы:

1. Осуществлен анализ ГВТ ОК как объекта управления, сформулированы основные тре-

бования к САР ГВТ ОК, разработана имитационная модель ГВТ.

2. Предложенная модель удовлетворяет условию корректно поставленной математической задачи по Адамару, т.е. задачи, для которой решение существует, оно единственно и непрерывно зависит от исходных данных.

3. Предложенную модель можно использовать для исследования САР ГВТ ОК, регулирующей производительность дымососа и вентилятора, как с помощью заслонки, так и изменением частоты питающего напряжения электродвигателей, так как она учитывает управление подачей воздуха и разряжения в топке отопительного котла как с помощью частотного регулирования привода, так и с помощью направляющих аппаратов с достаточной для исследования точностью.

4. Система регулирования позволяет обеспечить компенсацию быстроизменяющихся возмущений за счет регулирования заслонки, а медленные возмущения (например, изменения температуры) за счет изменения частоты вращения рабочего колеса дымососа и вентилятора.

5. Система внедрена на котельной УНПЗ, экономия электроэнергии, потребляемой дымососами за отопительный период, составила 30% по сравнению с предыдущим отопительным сезоном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасов, Д. В.** Требования к частотно-регулируемым электроприводам насосов и вентиляторов при аварийных режимах в системе электропитания котельных / Д. В. Тарасов // Электрические станции. 2006. № 1.

2. **Хечуев, Ю. Д.** Частотно-регулируемые электроприводы тягодутьевых и насосных механизмов котельных на базе преобразователей частоты АТ корпорации «Триол» / Ю. Д. Хечуев, Б. Е. Калашников, В. И. Ольшевский // Электрические станции. 2006. № 1.

3. **Бузников, Е. Ф.** Производственные и отопительные котельные / Е. Ф. Бузников, К. Ф. Роддасис, Э. Я. Берзиньш. М. : Энергоатомиздат, 1984.

4. **Озеров, М. Ю.** Энергосберегающие технологии в системе отопления / М. Ю. Озеров, А. Г. Тихонов, Р. А. Гареев // Сб. докладов Всероссийск. науч.-техн. конф. «Энергосбережение и энергоэффективные технологии-2004». Липецк : ЛГТУ, 2004

5. **Озеров, М. Ю.** Автоматическое регулирование системы отопления / М. Ю. Озеров, А. Г. Тихонов, Р. А. Гареев // Ежемесячный научно-практический журнал «Энергетика – наш регион» 2004. № 7–8.

6. **Тверской, Ю. А.** Регулирование разряжения в топке котла – современный подход / Ю. А. Твер-

ской // Известия Академии наук. Энергетика. 2003. № 1.

7. **Захаренков, А. В.** Применение частотно-регулируемых электроприводов тягодутьевых механизмов и питательного насоса в АСУТП котла ТЭЦ / А. В. Захаренков // Электротехника. 2005. № 8.

8. **Плетнев, Г. П.** Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций / Г. П. Плетнев. М. : Энергоиздат, 1981.

9. **Ямаев, А. И.** Способ автоматического регулирования разрежения в топке отопительного котла / А. И. Ямаев, М. Ю. Озеров // Патент №2322642 от 05.09.2006.

10. **Корпорация «Триол»** – документация [Электронный ресурс]. (<http://www.triolcorp.com/russ/tecsupport/>).

ОБ АВТОРАХ



Лютов Алексей Германович, проф., зав. каф. АТП. Дипл. инж. электронной техники (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по системн. анализу, упр. и обработке информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. автоматизации и упр. сложн. техн. объектами и процессами.



Зориктуев Вячеслав Цыденович, проф. той же каф. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1963). Д-р техн. наук по технологии машиностроения и АСУ ТП (Мосстанкине, 1990). Засл. деят. науки РБ. Иссл. в обл. упр. технологич. процессами в машиностроении.



Озеров Михаил Юрьевич, доц. той же каф. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1979). Канд. техн. наук по автоматизации технологич. процессов и производств (УГАТУ, 1989). Иссл. в обл. автоматизации и упр. сложн. техн. объектами.



Ямаев Артур Ирекович, асп. той же каф. Дипл. инж. по автоматизации технологич. процессов и производств (УГНТУ, 2005). Готовит дис. в обл. автоматизации технологич. процесса теплоснабжения.