

А. Г. Лютов, М. Ю. Озеров, Г. Н. Коуров, А. И. Ямаев, А. А. Гайнцев

## АНАЛИЗ ОБОРУДОВАНИЯ КАНАЛА УДАЛЕНИЯ ГАЗОВ В ВОДОГРЕЙНОМ КОТЛЕ С УРАВНОВЕШЕННОЙ ТЯГОЙ КАК ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В работе определена актуальность энергоресурсосбережения при производстве тепла в водогрейных установках. Предложен способ экономии энергоресурсов за счет применения системы автоматического регулирования напора дымососа. Выполнено математическое описание дымососа, разработана его структурная схема. Канал удаления продуктов сгорания представлен как объект управления. *Энергоресурсосбережение; водогрейная установка; дымосос; система автоматического регулирования напора; математическое описание; структурная схема*

### ВВЕДЕНИЕ

На большей территории России суровые и продолжительные зимы, а продолжительность отопительного сезона превышает 7 мес. На многих котельных установках количество тепла, отдаваемое потребителю, определяется по среднесуточной температуре окружающего воздуха и задается вручную один раз в сутки. Нормативные параметры ведения процесса получения тепла имеют большие диапазоны допусков. В связи с этим потери тепла при его производстве могут достигать значительных размеров. Поэтому проблема энергоресурсосбережения является весьма актуальной.

Решение поставленной проблемы в настоящее время ведется весьма активно. Вопросам энергоресурсосбережения посвящен ряд научных трудов [1, 2], поданы заявки и получены патенты на изобретения [3], 23 ноября 2009 г. Президентом Российской Федерации Д. А. Медведевым подписан Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности».

Одним из элементов энергоресурсосбережения при производстве тепла может быть канал удаления отработанных газов. Энергоресурсосбережение может быть реализовано за счет применения системы автоматического регулирования (САР) напора дымососа водогрейного котла, позволяющей держать выходную координату с высокой точностью – с точностью датчика. За счет снижения допуска на разброс напора КПД установки может увеличиться на 5–10% номинального значения. При разработке САР существенную проблему составляет анализ процесса удаления продуктов сгорания как объект управления (ОУ). В работе сделана попытка

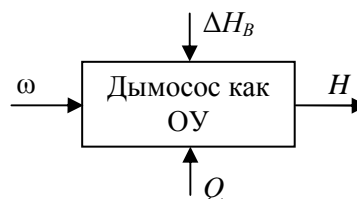
представить систему удаления продуктов сгорания (включающую в себя дымосос, электродвигатель, преобразователь энергии) как ОУ.

### 1. ДЫМОСОС

#### 1.1. Дымосос как ОУ

Определим границы объекта управления.

Выходной координатой объекта управления является напор выходящих газов; управляющим воздействием является угловая частота вращения вала дымососа. Сигнал задания поступает от системы подачи воздуха в топку котла. В качестве возмущения будет выступать изменение напора вентилятора, вызванное подсосом и задуванием ветра в дымоходную трубу, входной параметр – производительность дымососа.



**Рис. 1.** Дымосос как ОУ:  $\omega$  – угловая частота вращения вала дымососа;  $H$  – напор дымососа;  $Q$  – производительность дымососа (объемная подача отработанных газов);  $\Delta H_B$  – колебание напора от задуваемого ветра и подсоса

#### 1.2. Математическое описание дымососа

На основании закона сохранения энергии и с использованием уравнения Эйлера для получения теоретической характеристики напора произведем математическое описание связи на-

пора объемной подачи отработанных газов и скорости вращения вала.

Для машины с заданными геометрическими размерами связь напора объемной подачи и скорости вращения вала определяется выражением

$$H_T = \frac{(\pi D_2 n)^2}{3600g} - Q \frac{n \cdot \text{ctg} \beta_2}{60 b_2 g}, \quad (1)$$

где  $H_T$  – теоретический напор дымососа;  $D_2$  – диаметр рабочего колеса;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\beta_2$  – конструктивный параметр дымососа;  $Q$  – производительность дымососа (объемная подача, расход);  $n$  – скорость вращения вала дымососа.

На рис. 1 управляющей координатой для дымососа является угловая частота вращения вала двигателя  $\omega$ . Связь между  $\omega$  и  $n$  определяется выражением

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

Рассмотрим конструктивную схему колеса центробежной машины, представленную на рис. 2 [4].

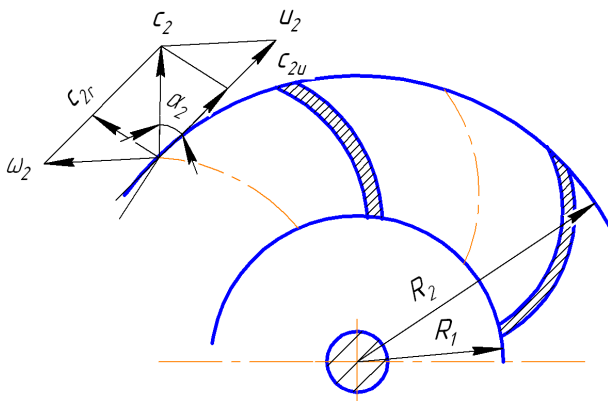


Рис. 2. Конструктивная схема колеса центробежной машины

На рис. 2 представлены параллелограммы скоростей частиц воздуха на входе и выходе межлопастных каналов дымососа.

Связь между  $Q$  и  $n$  может быть установлена при помощи следующих выражений:

$$Q = \pi D_2 b_2 C_{2r}, \quad C_{2u} = \omega R_2, \quad \frac{C_{2r}}{C_{2u}} = \text{tg} \alpha_2,$$

то есть

$$C_{2r} = C_{2u} \text{tg} \alpha_2, \quad C_{2r} = \omega R_2 \text{tg} \alpha_2,$$

таким образом,

$$Q = \pi D_2 b_2 R_2 \omega \text{tg} \alpha_2,$$

то есть

$$Q = K_{PK} \omega, \quad K_{PK} = \frac{1}{2} \pi b_2 R_2^2 \text{tg} \alpha_2,$$

где  $\alpha_2$  – конструктивный коэффициент машины;  $D_2$  – внешний диаметр колеса центробежной машины;  $b_2$  – ширина лопасти колеса;  $C_{2r}$  – составляющая вектора абсолютной скорости движения частиц воздуха;  $C_{2u}$  – составляющая окружной скорости движения частиц воздуха;  $R_2$  – радиус внешней окружности колеса центробежной машины.

Таким образом, связь между  $\omega$  и  $Q$  может быть представлена в виде динамического звена в соответствии с рис. 3.

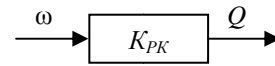


Рис. 3. Связь между  $\omega$  и  $Q$  как динамическое звено

Согласно выражению (1), напор дымососа также связан со скоростью вращения вала.

Структурная схема связи напора дымососа и скорости вращения вала при таком математическом описании может быть представлена на рис. 4 в следующем виде.

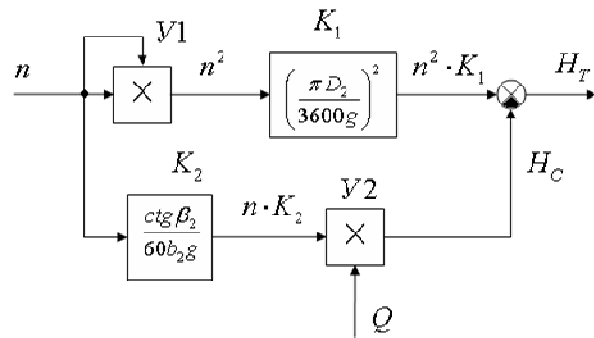


Рис. 4. Структурная схема связи напора и скорости вращения вала дымососа

Выражение (1) представляет собой теоретическую связь между  $H_T$  и  $Q$ .

Обозначив

$$\frac{(\pi D_2 n)^2}{3600 g} = C = \text{const}, \quad \frac{n \cdot \text{ctg} \beta_2}{60 b_2 g} = E = \text{const},$$

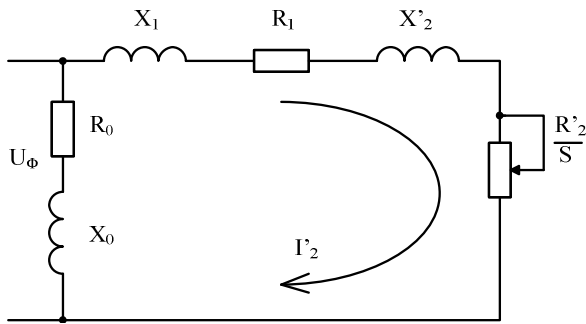
получим выражение

$$H_T = C - EQ.$$

Если представить выражение в виде графика, то он имеет форму наклонной прямой  $H_T = f(Q)$ , что представлено на рис. 5.



нагрузки двигателя от угловой частоты поля статора,  $\Delta\omega = \omega_0 S$ .



**Рис. 8.** Схема замещения одной фазы асинхронного двигателя:  $R_0$  – активное сопротивление контура намагничивания;  $X_0$  – реактивное сопротивление контура намагничивания;  $X_1$  – реактивная составляющая сопротивления обмотки статора;  $X_2$  – реактивная составляющая сопротивления обмотки ротора, приведенная к цепи обмотки статора;  $R_1$  – активная составляющая сопротивления обмотки статора;  $R_2'$  – активная составляющая сопротивления обмотки ротора, приведенная к цепи обмотки статора;  $I_2'$  – ток цепи обмотки статора, соответствующий моменту нагрузки двигателя;  $U_\phi$  – напряжение фазы двигателя;  $S$  – скольжение ротора двигателя,  $S = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ , где  $\omega$  – угловая частота вращения вала двигателя;  $\omega_0$  – скорость вращения поля двигателя,  $\omega_0 = 2\pi f / p$ , где  $f$  – частота питающей сети;  $p$  – число пар полюсов двигателя

Учитывая эти два уравнения, можно установить связь между механическими и электрическими параметрами машины.

$$M = \frac{(I_2')^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot S}$$

Величина тока  $I_2'$  определяется согласно схеме замещения по выражению:

$$I_2' = \frac{U_\phi}{Z},$$

где  $Z$  – полное сопротивление обмоток статора и ротора,

$$Z = \sqrt{(X_1 + X_2')^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2}.$$

Таким образом,

$$M = \frac{3U_\phi^2 R_2'}{\omega_0 S \left[ (X_1 + X_2')^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 \right]}.$$

Учитывая, что двигатель трехфазный, в числителе имеется коэффициент 3.

Электрический момент машины  $M$  уравнивается моментом сопротивления нагрузки.

$$M = M_{ст} + M_{дин},$$

где  $M_{ст}$  – момент статической нагрузки вала дымососа,  $M_{дин}$  – динамический момент нагрузки вала дымососа.

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt},$$

$J$  – суммарный момент инерции вращающихся частей механической системы.

## 2.2. Возмущающие воздействия двигателя

Двигатель работает с переменной нагрузкой, в результате чего его нагрев изменяется. При нагреве двигателя от 20 °С до номинальной температуры 80 °С сопротивление обмоток изменяется на 25% номинального значения, то есть

$$R_1 = R_{10} + \Delta R_1,$$

где  $R_{10}$  – сопротивление обмотки статора при 20 °С;  $\Delta R_1$  – приращение сопротивления обмотки при нагреве до номинальной температуры.

$$R_2' = R_{20}' + \Delta R_2',$$

где  $R_{20}'$  – сопротивление обмотки ротора, приведенное к цепи статора при 20 °С;  $\Delta R_2'$  – приращение сопротивления обмотки ротора, приведенное к цепи статора при номинальной температуре.  $M$  – момент двигателя, является величиной переменной и в процессе работы дымососа изменится в пределах от момента холостого хода  $M_{ХХ}$  до номинального момента, то есть

$$M_{ст} = M_{ХХ} + \Delta M_C,$$

$$M = M_{ст} + M_{дин}.$$

Момент инерции также является величиной переменной, он зависит от скорости вращения вала, из-за изменения плотности отработанных газов, то есть

$$J = J_0 + \Delta J,$$

где  $J_0$  – минимальный момент инерции;  $\Delta J$  – возможное приращение момента инерции.

Таким образом, основными возмущениями, действующими на двигатель, являются  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2'$ ,  $\Delta M_C$ ,  $\Delta J$ .

### 2.3. Функциональная схема

Функциональная схема двигателя как ОУ может быть представлена в следующем виде на рис. 9.

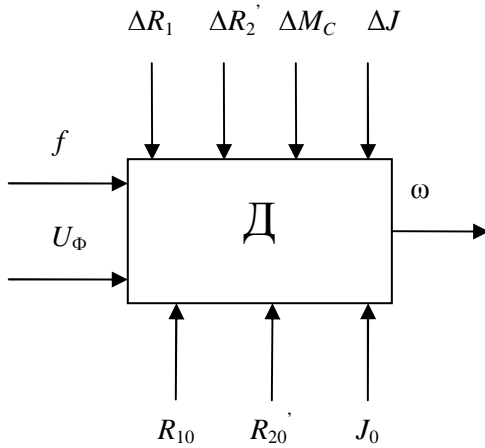


Рис. 9. Функциональная схема двигателя как ОУ

### 2.4. Структурная схема

С учетом математического описания, структурная схема двигателя может быть представлена в виде рис. 10.

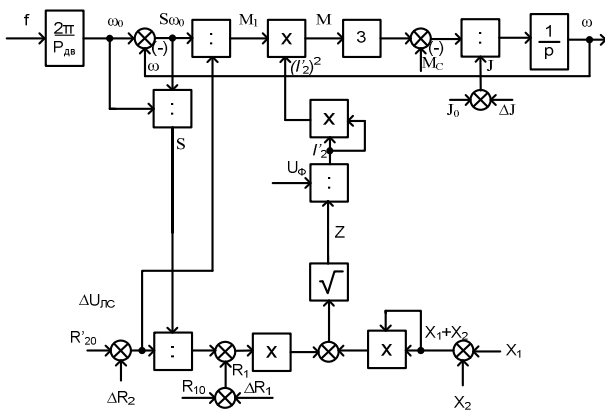


Рис. 10. Структурная схема двигателя

Структурная схема двигателя содержит несколько нелинейных звеньев типа блоков умножения, деления и степенной зависимости; при использовании структурной схемы двигателя для анализа и синтеза САР схема должна быть линеаризована.

Двигатель представляет собой инерционное позиционное звено с переменными параметрами.

## 3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

Дымососы часто поставляются совместно с асинхронным двигателем. Для регулирования скорости двигателя целесообразно использовать современные преобразователи частоты (ПЧ).

### 3.1. Принцип действия преобразователя энергии

В качестве преобразователя энергии использован электронный двухзвенный ПЧ с автономным инвертором напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией. Управляющей координатой является напряжение, задающее частоту. Пропорционально изменению частоты изменяется линейное напряжение двигателя. Преобразователь частоты подключен к промышленной сети, на него действует возмущение, возникающее от колебаний сетевого напряжения.

Достоинствами этого преобразователя являются:

- широкий диапазон частот (от 0 до 1000 Гц и более);
- возможность формирования необходимой кривой тока (обычно синусоидальной);
- простота силовой схемы ПЧ.

Недостатками являются:

- неререверсивность при выполнении по основной схеме;
- большая скорость изменения напряжения на обмотке двигателя.

Учитывая, что не предполагается высокое быстродействие канала удаления продуктов сгорания, названные недостатки не окажут влияния на работу дымососа.

Двухзвенный ПЧ с автономным инвертором напряжения состоит из трех основных элементов: выпрямителя (В), АИН и промежуточного контура постоянного тока, включающего конденсатор С, который является источником реактивной мощности для двигателя. Двухзвенный ПЧ с АИН изображен на рис. 11.

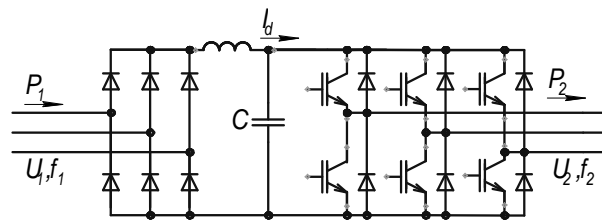


Рис. 11. ПЧ с транзисторным АИН

Здесь показаны только основные силовые элементы ПЧ, необходимые для процесса преобразования. Принципы инвертирования напряжения АИН хорошо известны [6].

Для регулирования скорости вращения асинхронного двигателя дымососа одновременно с изменением частоты необходимо изменять напряжение двигателя. При регулировании частоты  $f_2$  и напряжения  $U_2$  изменяется скважность импульсов, частота которых равна частоте переключения  $f_k$  (коммутации) транзисторов в АИН, а их амплитуда остается постоянной и равной  $U_d$  – напряжению на конденсаторе  $C$ . Величина  $U_d$  зависит от сетевого напряжения. Для мостовой трехфазной схемы выпрямления  $U_d = 1,35U_L$ . Однако  $U_L$  – линейное напряжение промышленной сети согласно ГОСТ может отклоняться от  $+10\% U_H$  до  $-15\% U_H$ . Поэтому в качестве базового напряжения в сети нужно взять его минимальное значение  $U_{Cmin}$ . То есть если  $U_H = 380$  В, то  $U_{Cmin} = 380 - 57 = 323$  В, а максимальное напряжение будет составлять  $U_{Cmax} = 418$  В. Максимальное колебание напряжения будет составлять  $\Delta U_C = U_{Cmax} - U_{Cmin} = 95$  В, что в процентах от  $U_{Cmin}$  составляет 30%. Величина  $\Delta U_C$  является возмущающим воздействием преобразователя энергии как ОУ.

Управляющими воздействиями преобразователя энергии являются напряжение задания частоты  $f_{2y}$  и напряжение модуляции  $U_{2y}$ . На рис. 12  $U_1$  – напряжение сети,  $f_1$  – частота питающей сети,  $U_2$  – напряжение инвертора, подаваемого на двигатель,  $f_2$  – частота напряжения инвертора, подаваемого на двигатель.

### 3.2. Преобразователь энергии как ОУ

Двухзвенный ПЧ с АИН как ОУ представлен на рис. 12.

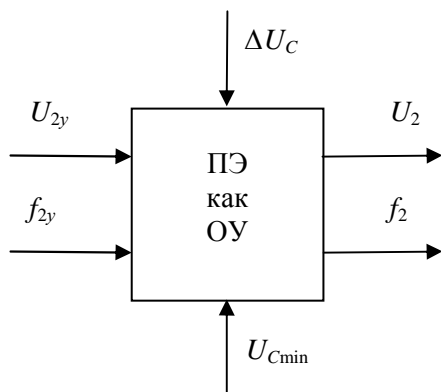


Рис. 12. Преобразователь энергии как ОУ

### 3.3. Структурная схема

Структурная схема двухзвенного ПЧ с АИН представлена на рис. 13.

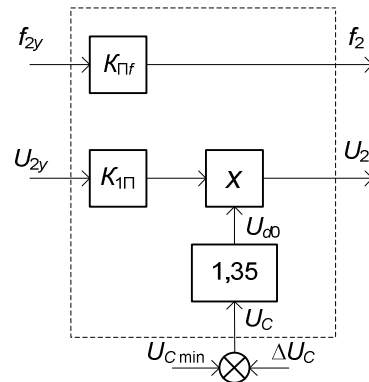


Рис. 13. Структурная схема преобразователя энергии

### 3.4. Математическое описание канала передачи сигнала управления по частоте:

$$f = K_{if} \cdot f_{2y},$$

где  $f$  – выходная частота инвертора; номинальное значение выходной частоты  $f_H = 50$  Гц;  $K_{Пф}$  – коэффициент передачи инвертора по частоте;  $f_{2y}$  – напряжение управления частотой, номинальное значение напряжения управления  $f_{2yH} = 5$  В.

Для определения коэффициента  $K_{Пф}$  возьмем отношение  $\frac{f_H}{f_{2yH}}$ .

$$K_{Пф} = \frac{50 \text{ Гц}}{5 \text{ В}} = 10 \frac{\text{Гц}}{\text{В}}.$$

### 3.5. Математическое описание канала передачи сигнала управления по напряжению:

$$\varepsilon = U_{2y} \cdot K_{1П},$$

где  $\varepsilon$  – скважность импульсов, изменяется в пределах от 0 до 1;  $U_{2y}$  – напряжение управления; изменяется от 0 до 5 В.

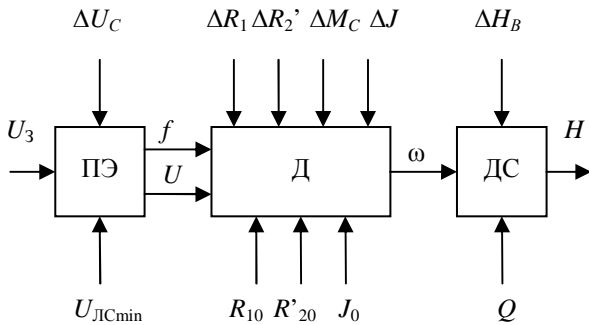
Отсюда коэффициент передачи:

$$K_{1П} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta U_{2y}} = \frac{1}{5 \text{ В}} = 0,2 \frac{1}{\text{В}},$$

$$U_C = U_{Cmin} + \Delta U_C.$$

**4. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА КАНАЛА УДАЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ**

Функциональная схема канала удаления продуктов сгорания как ОУ представлена на рис. 14.



**Рис. 14.** Функциональная схема канала удаления продуктов сгорания как ОУ: ПЭ – преобразователь энергии; Д – электродвигатель; ДС – дымосос;  $U_3$  – управляющая координата;  $H$  – выходная координата;  $\Delta U_c, \Delta R_1, \Delta R_2, \Delta M_c, \Delta H_b, \Delta J$  – возмущения;  $U_{лс\min}, R_{10}, R'_{20}, J_0$  – входные параметры

**5. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА КАНАЛА УДАЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ**

Структурная схема канала удаления продуктов сгорания как ОУ представлена на рис. 15.

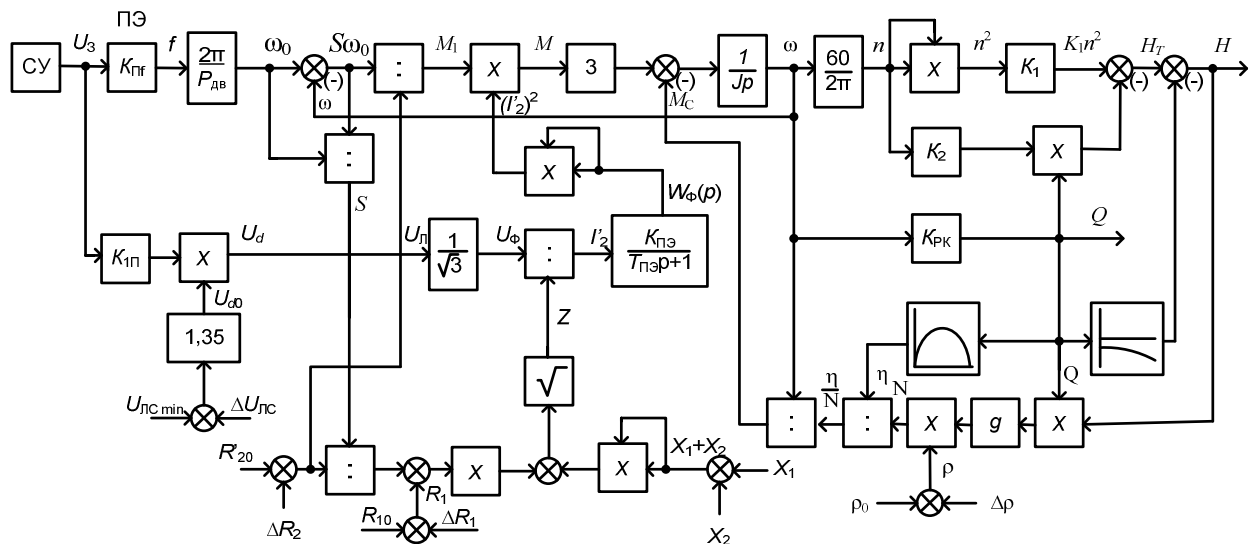
**ВЫВОДЫ**

Канал удаления продуктов сгорания водогрейного котла подвержен ряду возмущений, которые при постоянном управляющем воздействии могут отклонять выходную координату, за счет этого уменьшается КПД котла, что приводит к необоснованным потерям энергоресурсов.

Снизить необоснованные потери энергоресурсов возможно за счет применения системы автоматического регулирования напора дымососа, позволяющей компенсировать действие возмущений.

Структурная схема канала удаления продуктов сгорания содержит ряд нелинейных элементов, что необходимо учитывать при построении системы автоматического регулирования.

Разработанная структурная схема позволяет моделировать канал удаления продуктов сгорания как динамическую систему и может быть использована при построении системы автоматического регулирования напора дымососа.



**Рис. 15.** Структурная схема канала удаления продуктов сгорания

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Белов М. В.** Исследование и разработка системы управления водогрейным котлом тепловой станции с использованием частотно-регулируемого привода. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: М., 2008. 188 с.
2. Анализ газоздушного тракта отопительного котла как объекта управления / А. Г. Лютов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2009. № 1.
3. **Штрамбранд Б. А.** Способ автоматического управления и контроля котлоагрегата. Патент России № С2. 2300705, МПК F23N1/00 / (Россия). 2005101303/6; Заявлено 21.01.2005; Опубликовано 10.07.2006.
4. **Черкасский В. М.** Насосы, вентиляторы, компрессоры: учебник для теплоэнергетических специальностей вузов. М.: Энергия, 1984. 416 с.
5. **Чиликин М. Г., Сандлер А. С.** Общий курс электропривода: учеб. для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
6. **Герасимов В. Г.** Электротехнический справочник: В 4-х т. Т. 4 Использование электрической энергии. М.: МЭИ, 2004. 696 с.

**ОБ АВТОРАХ**

**Лютов Алексей Германович**, проф., зав. каф. автоматизации технологическ. процессов. Дипл. инженер электр. 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.

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

**Коуров Георгий Николаевич**, доц. той же каф. Дипл. инженер по автоматизации технологическ. процессов и производств (СГИ, 1968). Канд. техн. наук по автоматизации технологическ. процессов и производств (СГИ, 1976). Иссл. в обл. автоматизации технологическ. процессов и производств.

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

**Гайнцев Александр Александрович**, дипл. инженер по автоматизации технологическ. процессов и производств (УГАТУ, 2010). Готовит дис. в обл. автоматизации технологическ. оборудования коммунального хозяйства.