

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

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПОРА ДЫМОСОСА ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА С УРАВНОВЕШЕННОЙ ТЯГОЙ

В работе произведена постановка задачи разработки системы автоматического регулирования (САР) напора дымососа водогрейного котла с уравновешенной тягой, разработаны функциональная и структурная схемы САР напора дымососа. Произведена линеаризация нелинейных элементов САР. Выполнен анализ и произведен синтез САР с заданными показателями качества. Произведено моделирование линейной САР, определены показатели качества САР. *Водогрейная установка; дымосос; система автоматического регулирования напора; функциональная схема; структурная схема; линеаризация; анализ; синтез; моделирование САР*

ВВЕДЕНИЕ

В [1] обосновано, что энергоресурсосбережение при производстве тепла может быть реализовано за счет применения системы автоматического регулирования (САР) напора дымососа водогрейного котла, позволяющей держать выходную координату с высокой точностью – с точностью датчика.

Данная работа посвящена разработке САР напора дымососа водогрейного котла с уравновешенной тягой. Объектом управления (ОУ) является канал удаления продуктов сгорания, в который входят: дымосос, электродвигатель, преобразователь энергии. Предпосылкой создания САР напора дымососа является наличие возмущений и необходимость поддержания выходной координаты без статической ошибки. Особенностью объекта управления является наличие нелинейных звеньев.

Выходная координата САР напора дымососа контролируется датчиком напора. Сигнал обратной связи подается на сумматор, реализованный алгоритмически на контроллере электропривода.

Учитывая, что синтез САР осуществляется методами линейной теории автоматического регулирования, произведена линеаризация нелинейных звеньев, определена передаточная функция корректирующего устройства.

Моделирование динамических свойств САР выполнено с применением пакета прикладных программ Matlab Simulinc. Произведен анализ качества САР.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ САР

1.1. Функциональная схема канала удаления продуктов сгорания

Функциональная схема канала удаления продуктов сгорания как ОУ представлена на рис. 1.

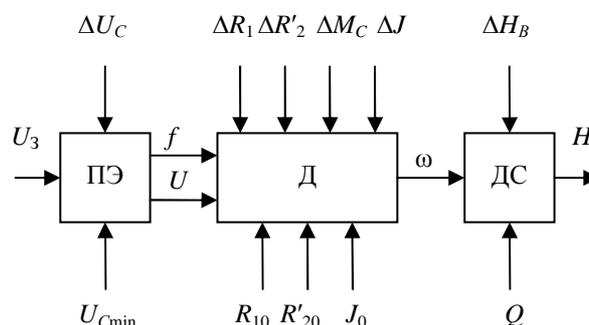


Рис. 1. Функциональная схема канала удаления продуктов сгорания как ОУ: ПЭ – преобразователь энергии; Д – электродвигатель; ДС – дымосос; U_3 – управляющая координата; H – выходная координата; ΔU_c , ΔR_1 , $\Delta R'_2$, ΔM_c , ΔH_b , ΔJ – возмущения; U_{cmin} , R_{10} , R'_{20} , J_0 – входные параметры

1.2. Определение диапазона изменения возмущений

$$\Delta U_c = U_{cmax} - U_{cmin},$$

$\Delta U_c = 95$ В, что в процентах от U_{cmin} составляет 30% U_{cmin} ; $\Delta R_1 = R_1 - R_{10}$, составляет 25% R_{10} ; $\Delta R'_2 = R'_2 - R'_{20}$, составляет 25% R'_{20} ; $\Delta M_c = M_H - M_{xx}$, составляет 95% M_H ; ΔH_b , составляет 10% H .

1.3. Определение отклонения выходной координаты при совместном действии возмущений

Для определения отклонения выходной координаты H дадим приращения возмущений в математическое описание канала удаления продуктов сгорания и определим максимальное отклонение ΔH . Величина ΔH при номинальных режимах работы элементов канала подачи воздуха составляет 15% H .

1.4. Определение диапазона изменения управляющего воздействия с целью компенсации действия возмущений

Электропривод дымососа позволяет регулировать скорость вращения вала дымососа в диапазоне $D = 1000:1$. С целью компенсации действия возмущений скорость вращения вала дымососа достаточно изменять на 15% номинального значения. Следовательно, диапазон регулирования электропривода позволяет компенсировать действие возмущений.

1.5. Принятие решения о типе САУ, которая может реализовать цель управления объектом

1. Учитывая, что статическая ошибка САР должна быть равна нулю, необходимо чтобы САР имела первый порядок астатизма. То есть нужно применить астатическую САР, причем интегратор должен быть установлен до звеньев, на которые действуют возмущения.

2. Управляющее воздействие изменяется сравнительно медленно, поэтому динамическую ошибку САР можно не учитывать.

3. Переходная функция должна соответствовать настройке на оптимум по модулю.

1.6. Определение коэффициента разомкнутой САР

Согласно регламенту ведения техпроцесса скорость изменения управляющего сигнала \dot{x} может составлять 5 В за 10 секунд, то есть 0,5 В/с. При этом выходная координата H изменяется от 0 до 410 м. Динамическая ошибка выходной координаты δ задана и составляет 3,42 м. Исходя из этого, определяем величину коэффициента разомкнутой системы САР K_{PC} по выражению:

$$\delta = \frac{\dot{x}}{K_{PC}},$$

отсюда

$$K_{PC} = 12 \frac{1}{c}.$$

2. САР НАПОРА ДЫМОСОСА

2.1. Функциональная схема САР напора дымососа

Функциональная схема САР напора дымососа (САР Н), изображенная на рис. 2, включает в себя канал удаления продуктов сгорания, регулятор напора (Per.), сумматор (С1), датчик напора дымососа (ДН) и согласующее устройство (СУ1).

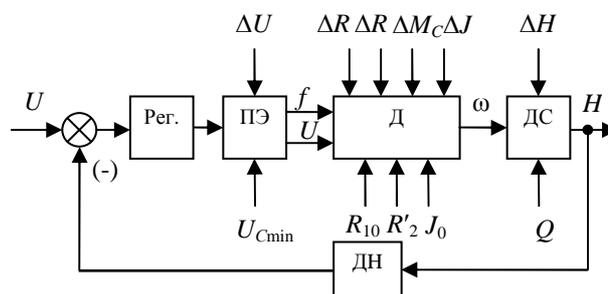


Рис. 2. Функциональная схема САР напора дымососа

2.2. Нелиinearизованная структурная схема САР напора дымососа

Нелиinearизованная структурная схема САР напора дымососа представлена на рис. 3. Для анализа и синтеза САР напора дымососа необходимо linearизовать структурную схему канала удаления продуктов сгорания.

3. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ САР НАПОРА ДЫМОСОСА

3.1. Linearизация структурной схемы асинхронного двигателя

В общем случае в асинхронном электроприводе (ЭП) протекают электромеханические переходные процессы, определяемые электромагнитной инерционностью обмоток двигателя и механической инерцией элементов ЭП, исполнительного органа рабочей машины и инерционностью электромагнитных процессов преобразователя энергии. Для анализа и синтеза САР Н воспользуемся упрощенным методом анализа linearизованного асинхронного двигателя [2]. Linearизованная структурная схема асинхронного двигателя представлена на рис. 4.

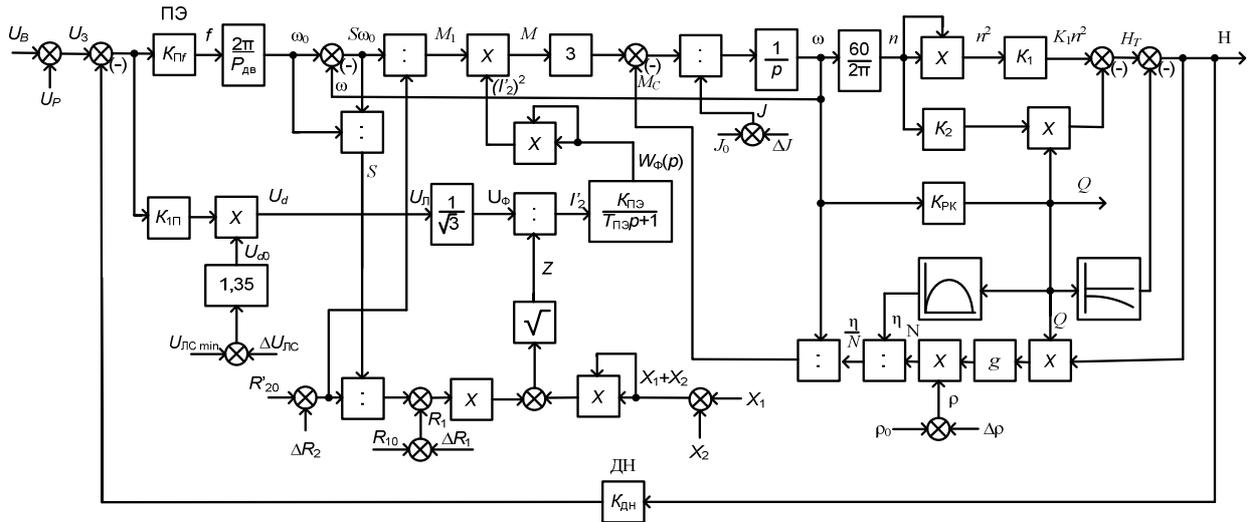


Рис. 3. Нелинеаризованная структурная схема САР напора дымососа

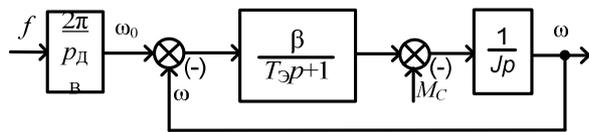


Рис. 4. Линеаризованная структурная схема асинхронного двигателя

На рис. 4 приняты следующие обозначения:

$p_{ДВ}$ – число пар полюсов;

ω_0 – значение угловой частоты вращения электромагнитного поля двигателя;

ω – текущее значение угловой частоты вращения вала двигателя;

β – жесткость механической характеристики асинхронного двигателя,

$$\beta = \frac{2M_{KP}}{\omega_0 S_{KP}},$$

где M_{KP} – критический момент двигателя;

S_{KP} – скольжение, соответствующее критическому моменту двигателя;

$T_Э$ – электромагнитная постоянная времени двигателя,

$$T_Э = \frac{1}{\omega_0 S_{KP}};$$

M – текущее значение момента двигателя;

M_C – момент сопротивления двигателя;

J – суммарный момент инерции двигателя и колеса дутьевого вентилятора;

$$S_{KP} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}.$$

3.2. Линеаризация структурной схемы преобразователя энергии

Учитывая, что в преобразователе энергии соотношение $U_{2y} / f_{2y} = \text{const}$, его можно представить в виде безынерционного звена с управляющей координатой f_{2y} , выходной координатой f_2 и коэффициентом передачи $K_{Пф}$ (рис. 5).

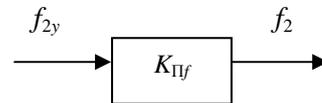


Рис. 5. Структурная схема преобразователя энергии по частоте

Определим $K_{Пф}$. Стандартный сигнал управления f_{2y} изменяется в пределах от 0 до 5 В, считаем, что f_2 при этом должно изменяться от 0 до 50 Гц. Таким образом, коэффициент передачи $K_{Пф}$ можно определить как отношение:

$$K_{Пф} = \frac{f_2}{f_{2y}},$$

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

3.3. Линеаризация структурной схемы дымососа

Линеаризацию структурной схемы дутьевого вентилятора произведем для номинального режима работы.

Определим коэффициент передачи нелинейного звена У1.

$$K_{y1} = \frac{n_H^2}{n_H} = \frac{740^2}{740} = 740.$$

Произведем линеаризацию нелинейного звена У2.

Обозначим $nK_2 = b$, тогда блок умножения может быть описан следующим выражением:

$$b\Delta Q + \Delta bQ = \Delta H_C,$$

где ΔQ , Δb , ΔH_C – приращения переменных,

$$\Delta Q = \Delta\omega \cdot K_{PK},$$

Структурная схема линеаризованного блока У2 представлена на рис. 6.

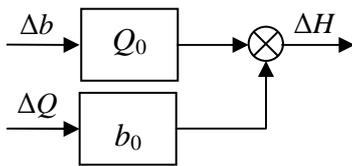


Рис. 6. Структурная схема линеаризованного блока У2

За точку линеаризации принимаем значение b и Q для номинального режима, при этом:

$$b = b_0, Q = Q_0,$$

$$b_0 = nK_2,$$

$$b_0 = 740 \cdot 0,0019 = 1,406,$$

$$Q_0 = Q_H = 39,44 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Линеаризованная структурная схема дымососа представлена на рис. 7.

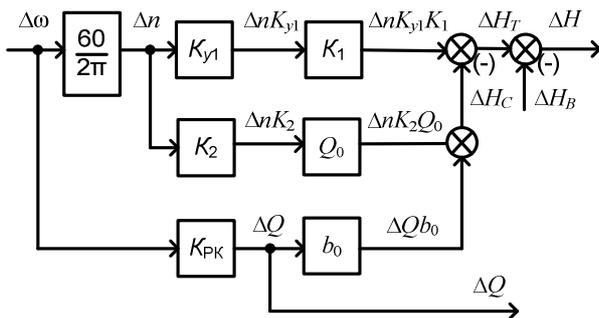


Рис. 7. Линеаризованная структурная схема дымососа

$$K_1 = 0,0004, K_2 = 0,0019,$$

$$K_{PK} = 0,509 \text{ м}^3 / \text{рад}, \Delta H_B = 40 \text{ м}.$$

3.4. Структурная схема канала действия момента сопротивления дымососа

Механическая характеристика $M = f(\omega)$ дымососа может быть описана эмпирическим выражением [3]:

$$M_C = M_0 + (M_H - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x, \quad (1)$$

где M_C – момент сопротивления дымососа; M_0 – момент холостого хода; M_H – номинальный момент сопротивления дымососа; ω – текущее значение угловой скорости вращения вала дымососа; ω_H – номинальное значение угловой скорости вращения вала дымососа; x – показатель степени.

Определяем конкретные значения переменных уравнения (1) для дымососа, используемого в работе, ДН-21-МГМ. Технические характеристики дымососа приведены в таблице.

Технические характеристики дымососа ДН-21-МГМ

Диаметр рабочего колеса, мм	2 100
Производительность, м ³ /час	142 000
Полное давление, Па	4 110
Частота вращения, об./мин.	750
Максимальный КПД дымососа, %	85
Температура (max), °С	300
Масса (без электродвигателя), кг	1650
Тип электродвигателя	4А355М8У3
Мощность, кВт	160
Напряжение, В	380
Максимальный КПД двигателя, %	93,5
Масса электродвигателя, кг	1720

Согласно таблице: $P_H = 160$ кВт.

Найдем номинальное значение момента сопротивления из выражения

$$P_H = M_H \cdot \omega_H.$$

Определим ω_H :

$$\omega_H = \frac{2\pi n_H}{60}, n_H = 740 \frac{\text{об.}}{\text{мин.}}$$

Таким образом,

$$\omega_H = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 740}{60} = 77,45 \frac{1}{\text{с}}.$$

Подставив соответствующие значения P_H и ω_H , получим

$$M_H = \frac{160000}{77,45} = 2065,85 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Определяем величину M_0 .

M_0 определим из потерь величины мощности P_H .

$$P_H = P_H \cdot (1 - \eta).$$

Значение η берем из таблицы.

$$\eta = 0,935.$$

Рассчитаем значение величины потерь мощности P_{II} .

$$P_{II} = 160000 \cdot (1 - 0,935) = 10400 \text{ Вт.}$$

Считаем, что потери от момента холостого хода M_0 составляют $0,5 P_{II}$.

Таким образом,

$$M_0 = \frac{0,5 P_{II}}{\omega_H} = \frac{0,5 \cdot 10400}{77,48} = 67,12 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Значение

$$M_H - M_0 = (2065,85 - 67,12) \text{ Н}\cdot\text{м,}$$

$$M_H - M_0 = 1998,73 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

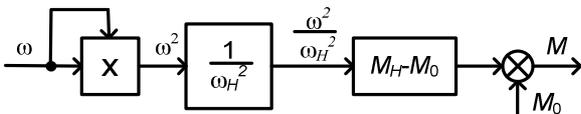


Рис. 8. Нелиinearизованная структурная схема канала действия момента сопротивления дымососа

Структурная схема (рис. 8) содержит нелинейное звено. Для синтеза САР необходимо линеаризовать структурную схему. Линеаризованная структурная схема представлена на рис. 9.

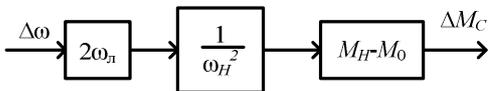


Рис. 9. Линеаризованная структурная схема канала действия момента сопротивления дымососа

3.5. Линеаризованная структурная схема САР напора дымососа

Линеаризованная структурная схема представлена на рис. 10.

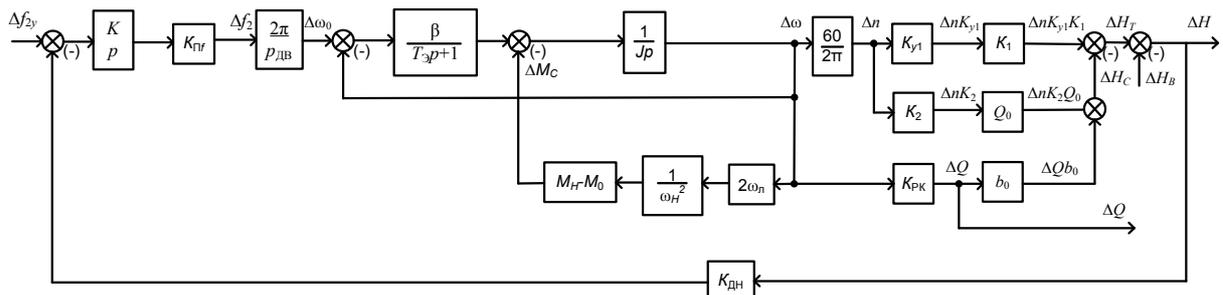


Рис. 10. Линеаризованная структурная схема САР напора дымососа

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ САР НАПОРА ДЫМОСОСА

Для исследования динамических свойств САР произведем моделирование в пакете прикладных программ MATLAB. Схема линеаризованной модели структурной схемы САР напора дымососа при исследовании по управляющему воздействию представлена на рис. 11. Модель структурной схемы САР напора дымососа при исследовании по возмущению представлена на рис. 12.

4.1. Исследование динамических свойств замкнутой САР напора дымососа

Выбор корректирующего устройства осуществляем с использованием метода логарифмических частотных характеристик. При выборе корректирующего устройства рассмотрены пропорциональный (П), интегрально-дифференциальный (ИД), интегральный (И), пропорционально-интегральный (ПИ) пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регуляторы. Учитывая то, что выходная координата должна регулироваться без статической ошибки, принимаем в качестве корректирующего устройства интегральный регулятор. Частотные характеристики САР анализируем для двух рабочих точек: для номинального режима и для 30% номинального режима напора удаления продуктов сгорания.

Система менее устойчива при работе в режиме 30% номинального значения, подбором коэффициента K добиваемся настройки системы на оптимум по модулю, однако при такой настройке на кривую переходного процесса накладывается знакопеременная составляющая ускорения двигателя, что нежелательно для электромеханической системы. Поэтому настройку производим таким образом, чтобы переходная функция не содержала знакопеременной составляющей ускорения. Исходя из сказанного, выбираем коэффициент передачи $K = 0,1$.

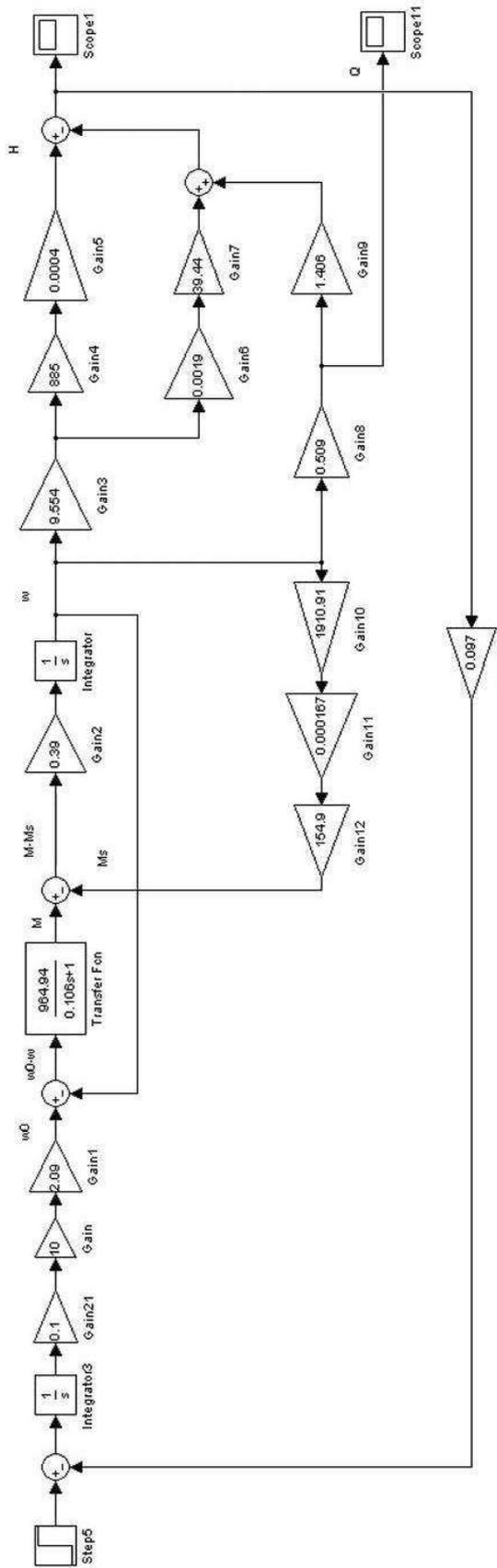


Рис. 11. Модель линеаризованной структурной схемы САР напора дымососа при исследовании по управляющему воздействию (точка линеаризации – номинальный режим)

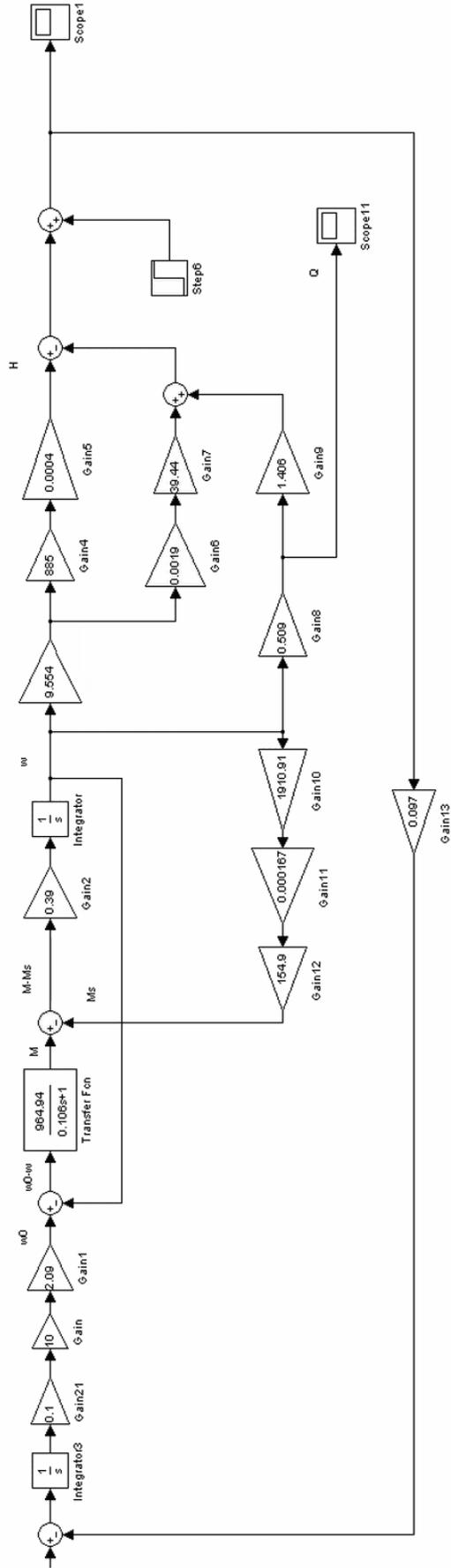


Рис. 12. Модель структурной схемы САР напора дымососа при исследовании по возмущению (точка линеаризации – номинальный режим)

4.2. Исследование качества САР по управляющему воздействию

Логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) разомкнутой САР с корректирующим устройством при номинальном режиме и при 30% номинального режима представлены на рис. 13 и 14.

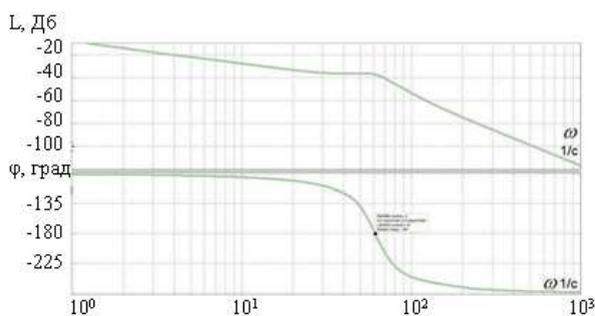


Рис. 13. ЛЧХ разомкнутой системы при номинальном режиме, с корректирующим устройством

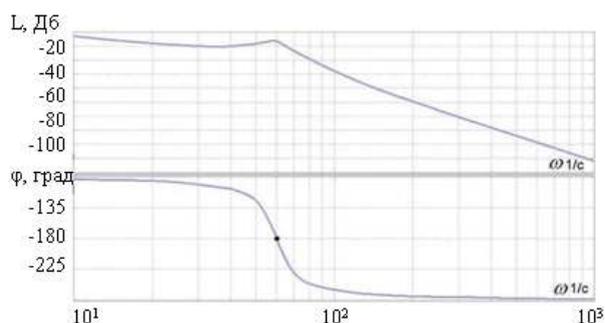


Рис. 14. ЛЧХ разомкнутой системы при 30% номинального режима, с корректирующим устройством

Окончательный анализ качества САР проводим по переходной функции. Для этого на вход замкнутой системы подаем единичный скачок управляющего воздействия, получаем переходную функцию.

Переходная функция замкнутой САР по управляющему воздействию при работе в номинальном режиме представлена на рис. 15.

Переходная функция $H(t)$ линеаризованной замкнутой системы по управляющему воздействию, при работе системы в 30% номинального режима работы представлена на рис. 16.

Характер переходного процесса по управляющему воздействию в номинальном режиме монотонный, перерегулирование отсутствует. Длительность переходного процесса составляет 8,1 секунды.

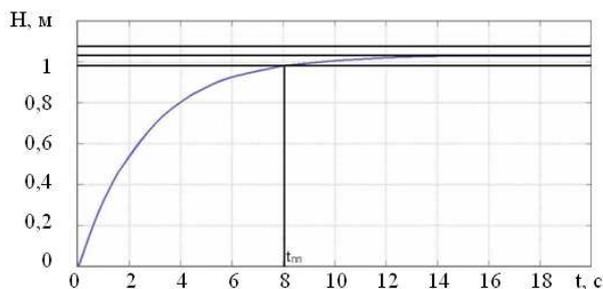


Рис. 15. Переходная функция напора дымососа линеаризованной замкнутой системы, по управляющему воздействию при номинальных значениях напора

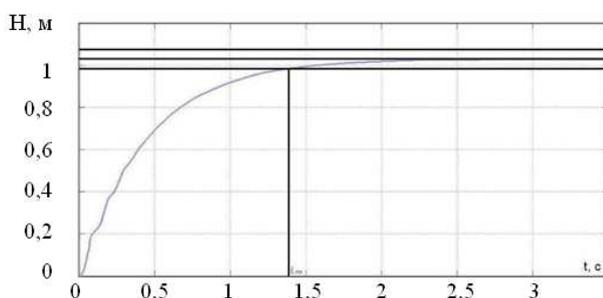


Рис. 16. Переходная функция напора дымососа линеаризованной замкнутой системы, по управляющему воздействию при 30% номинального значения напора

Качество переходной функции по управляющему воздействию при 30% номинального режима отличается от номинального режима. График переходной функции также апериодический, однако время переходного процесса составляет 1,4 секунды, то есть меньше на 6,7 секунды, чем при номинальном режиме. Это обусловлено изменением коэффициента передачи дымососа. Знакопеременность ускорения отсутствует.

4.2. Исследование качества САР по возмущению

Основным возмущающим воздействием канала напора дымососа является изменение напора, вызванное задуванием ветра в дымовую трубу. Изменение напора принимаем на уровне 10% от номинального напора дымососа. Изменение напора подается в виде единичного скачка.

Переходная функция по возмущению при номинальном режиме представлена на рис. 17. Переходная функция по возмущению при 30% номинального режима представлена на рис. 18.

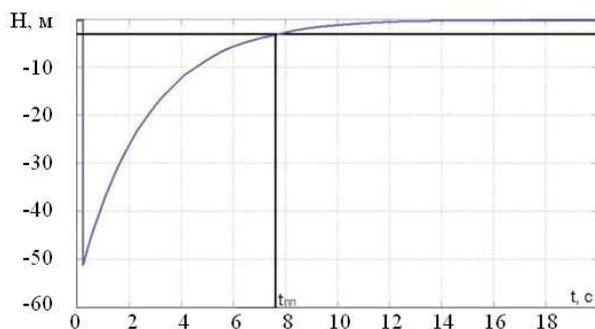


Рис. 17. Переходная функция напора дымососа линеаризованной замкнутой системы, по возмущению ($\Delta H = -51,32$) при номинальных значениях напора, при работе системы в номинальном режиме

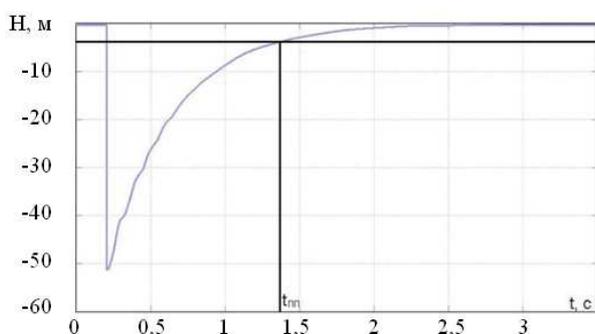


Рис. 18. Переходная функция напора дымососа линеаризованной замкнутой системы, по возмущению ($\Delta H = -51,32$) при 30% номинального значения напора

В замкнутой системе при действии возмущения реакция объекта управления представлена на рис. 17 и 18. Переходная функция также имеет скачкообразный характер. В начале переходного процесса величина отклонения выходной координаты близка к величине возмущения, по окончании переходного процесса выходная ордината возвращается в исходное состояние за счет действия регулятора. Длительность переходного процесса при номинальном режиме составляет 1,1 секунды. Длительность переходного процесса при 30% номинального режима составляет 3,2 секунды.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная САР удаления продуктов сгорания обеспечивает аperiodический пере-

ходный процесс в диапазоне от 30% до номинального значения напора дымососа;

2. Длительность переходного процесса зависит от рабочей точки и изменяется в пределах от 0,85 до 3,2 секунды;

3. Статическая ошибка САР напора дымососа равна нулю. Время компенсации действия возмущения находится в пределах 1,1–3,2;

4. В кривой переходного процесса знакопеременная составляющая второй производной отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ оборудования канала удаления газов в водогрейном котле с уравновешенной тягой как элементов системы автоматического управления / А. Г. Лютов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 2(42).
2. Герасимов В. Г. Электротехнический справочник: В 4-х т. Т. 4 Использование электрической энергии. М.: МЭИ, 2004. 696 с.
3. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода: учеб. для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 576 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.