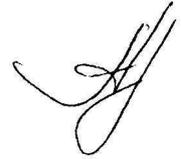


На правах рукописи



МАРЧЕНКО МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАЗРЕЖЕНИЯ КОТЛОАГРЕГАТА НА
ОСНОВЕ АСИНХРОННОГО УПРАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
СИМАКОВ Геннадий Михайлович

Официальные оппоненты: **ОСТРОВЛЯНЧИК Виктор Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный индустриальный университет, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и промышленной электроники

ТОМИЛОВ Виталий Георгиевич, доктор технических наук, Новосибирский государственный технический университет, профессор кафедры тепловых электрических станций

Ведущая организация: Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирская государственная академия водного транспорта»

Защита диссертации состоится «20» декабря 2012 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092 РФ, г. Новосибирск, пр. К. Маркса 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета

Автореферат разослан «16» ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Нейман Владимир Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема энерго- и ресурсосбережения существует уже давно. Тем не менее, она и по сей день остается одной из наиболее актуальных. В настоящее время эффективность использования энергоресурсов в России не превышает 30%. Вопросы энергосбережения и повышения энергоэффективности в последнее время становятся все более актуальными и для предприятий энергетики. На генерирующих предприятиях энергетики задача снижения затрат на «собственные нужды» с каждым годом становится все более острой.

Дальнейшее развитие электроэнергетики возможно только на основе энергоэффективных технологий, в том числе за счет повышения КПД вспомогательного оборудования и переводом его в режимы экономичного изменения производительности с помощью регулируемого электропривода. Переход к применению частотно-регулируемого электропривода с регулируемой частотой вращения принципиально позволяет:

- исключить дросселирование в трактах питательной и сетевой воды, воздуха и уходящих газов в котлах, а значит существенно повысить КПД насосов и тягодутьевых машин;
- экономить электроэнергию;
- увеличить срок службы приводных асинхронных двигателей за счет плавного пуска;
- исключить гидравлические удары;
- экономить затраты на ремонт оборудования;

Целью диссертационной работы является разработка системы регулирования разрежения в топке котла барабанного типа с уравновешенной тягой на основе асинхронного управляемого электропривода. В ходе проводимых исследований для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать котлоагрегат по тракту регулирования разрежения в верхней части топки и разработать математическую модель объекта регулирования с учетом применения регулируемого асинхронного электропривода.
2. С учетом специфики объекта управления и характера нагрузки разработать варианты построения регулируемого асинхронного электропривода, реализующие переменную жесткость механических характеристик.
3. Разработать структуру и алгоритмы управления одноканальной системы управления разрежением котлоагрегата на основе асинхронного управляемого электропривода.
4. Провести теоретические исследования и создать основу построения рациональной системы автоматического управления разрежением котлоагрегата с использованием асинхронного регулируемого электропривода тягодутьевых машин.

Методы исследований. Разработанные в диссертации научные подходы к решению задач управления регулируемым асинхронным электроприводом тягодутьевых машин основываются на базе фундаментальных законов и уравнений термодинамики, теории электропривода. Используются теория автоматиче-

ского управления и регулирования, математический аппарат дифференциального и интегрального исчислений, методы переменных состояний и модального управления.

Научная значимость. В диссертационной работе развиты элементы теории построения регулируемого асинхронного электропривода в системе автоматического управления разрежением котлоагрегата с учетом вентиляторного характера нагрузки. Это позволяет математически адекватно описывать поведение электропривода, и строить на его основе системы автоматического управления разрежением с улучшенными технико-экономическими характеристиками.

Научная новизна основных результатов диссертации заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм управления электроприводом, предполагающий работу электропривода на механических характеристиках, ортогональных к вентиляторной характеристике нагрузки, позволяющий обеспечить постоянство времени переходных процессов в различных режимах работы тягодутьевых машин.

2. Предложены варианты реализации регулируемого асинхронного электропривода с большим моментом инерции и вентиляторным характером нагрузки, уменьшающие динамические перегрузки электропривода.

3. Созданы варианты построения и методы расчета одноканальных САУ разрежением на основе регулируемого асинхронного электропривода с учетом нелинейностей тракта разрежения.

4. Разработана структура системы управления разрежением по двум каналам воздействия, на основе регулируемого асинхронного электропривода тягодутьевых машин, позволяющая сократить время неустановившихся режимов в топке котлоагрегата.

Достоверность полученных результатов исследований определяется корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений, адекватностью используемых при исследовании математических моделей и методов, сравнением полученных результатов путем параллельного расчета и моделирования, экспериментальными исследованиями.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что:

1. Для тягодутьевых машин предложен новый алгоритм управления, предполагающий работу асинхронного электропривода на характеристиках ортогональных механической характеристике нагрузки. Данный вариант может быть использован для управления другими механизмами с вентиляторным характером нагрузки.

2. Разработаны методики синтеза одноканальной и по двум каналам воздействия систем регулирования разрежения на основе модифицированного модального метода.

3. Разработано программное обеспечение процесса управления разрежением котлоагрегата на основе регулируемого асинхронного электропривода.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Принципы построения и структура регулируемого асинхронного электропривода с вентиляторным характером нагрузки.
2. Способ построения и расчет параметров регуляторов одноканальной системы автоматического управления разрежением котлоагрегата с использованием регулируемого асинхронного электропривода.
3. Основы построения системы автоматического управления разрежением по двум каналам воздействия на основе регулируемого асинхронного электропривода тягодутьевых машин.
4. Структура системы регулирования разрежения котлоагрегатов с уравновешенной тягой по двум каналам воздействия.

Апробация работы. Основные результаты работы представлялись, докладывались и обсуждались на семинаре по обмену опытом на кафедре эксплуатации тепломеханического оборудования Петербургского энергетического института повышения квалификации, на научных семинарах факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета, на 3-й международной научно-технической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт», г. Омск 2007 г., на третьей и четвертой научно-технических конференциях с международным участием «Электротехника, электромеханика, электротехнологии», г. Новосибирск 2007, 2009 г., на международной научно-практической конференции «Электроэнергетика в сельском хозяйстве», Эрларгол 2009 г., на X международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» г. Новосибирск, 2010 г., на второй международной научно-практической конференции «Электроэнергетика в сельском хозяйстве», Новосибирск-Барнаул, 2011 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, в том числе: четыре научные статьи в рецензируемых журналах, рекомендованном перечне ВАК РФ; 5 опубликованных докладов на международных и всероссийских научно-технических конференциях, две статьи в сборнике научных трудов НГТУ «Автоматизированные электромеханические системы».

Личный вклад автора в научные работы, опубликованные в соавторстве, заключается в: постановке частных задач; выполнении расчетов; разработке методик синтеза систем регулирования разрежения и основ построения двухканальной системы регулирования разрежения; исследовании синтезированных алгоритмов методом численного моделирования; анализе полученных результатов.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 85 наименований и приложений. Объём работы составляет 159 страниц основного текста, включая 74 рисунка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведен обзор вопросов энергосбережения и энергоэффективности в электроэнергетике, приведены достоинства применения регулируемого электропривода, обоснована актуальность темы диссертационной работы,

сформулированы цели и поставлены задачи диссертационного исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

Первая глава диссертационной работы посвящена описанию котлоагрегата как объекта управления, созданию математического описания тракта регулирования разрежения, анализу существующих систем регулирования.

Вывод математического описания основан на балансе масс и давлений и на уравнении термодинамического баланса. Записаны уравнения динамики отдельных элементов упрощенной системы регулирования, с использованием которых получено математическое описание объекта:

$$\int \frac{G_{\text{ВХ}} - G_{\text{ВЫХ}}}{k_G T} dt - p_{\text{ВЫХ}} = k_L G_{\text{ВЫХ}}^2 - k_H \omega^2, \quad (1)$$

где $k_G = G_{\text{НОМ}}/p_{\text{НОМ}}$ – коэффициент расхода; $p_{\text{ВЫХ}}$ – атмосферное давление; $G_{\text{ВХ}}, G_{\text{ВЫХ}}$ – весовой расход дымовых газов на входе в тракт и выходе из него; ω – скорость вращения дымососа; k_L – коэффициент сопротивления газового тракта; k_H – коэффициент напора; T – постоянная времени изменения состояния вещества.

На основании выражения (1) составлена математическая модель тракта регулирования разрежения в топке рис.1.

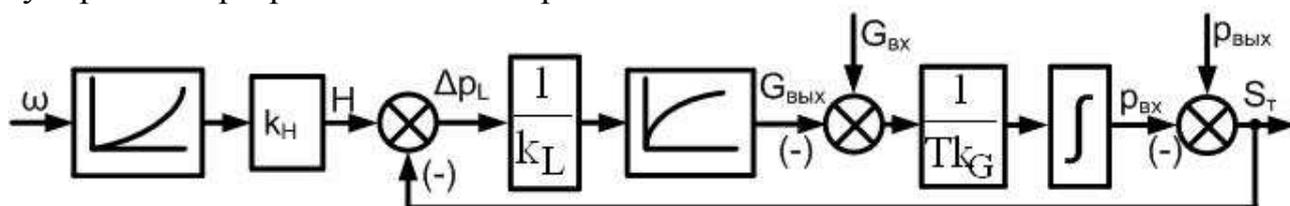


Рис.1. Модель тракта регулирования разрежения в топке котла.

H – напор развиваемый дымососом; Δp_L – сопротивление тракта; $p_{\text{ВХ}}$ – давление в топке; S_T – разрежение в топке

Во второй главе рассмотрены способы построения асинхронного электропривода с вентиляторным характером нагрузки. Основной особенностью турбомеханизмов, с точки зрения условий работы регулируемого электропривода является нелинейный характер нагрузки:

$$M = k_m \omega^2, \quad (2)$$

где k_m – коэффициент связывающий скорость с моментом электродвигателя.

Так же к особенностям турбомеханизмов относятся: большие маховые массы электропривода, ограничение допустимой скорости вращения, ограничение ускорений электропривода, условия эксплуатации и т.д.

Предложено два варианта построения автоматизированного электропривода тягодутьевых машин. Первый вариант реализует работу электропривода с постоянным динамическим моментом. Второй вариант предполагает работу электропривода на характеристиках с переменной жесткостью. Как будет показано ниже, первый вариант имеет предпочтительные характеристики при управляющих, а второй вариант при возмущающих воздействиях.

Переменная жесткость характеристик электропривода может быть реализована двояко. Первый способ предполагает изменение параметров регулятора скорости и коэффициента обратной связи по скорости. Второй способ реализу-

ется только изменением параметров регулятора скорости и управлением, по определенному закону задающим напряжением U_3 на входе регулятора скорости.

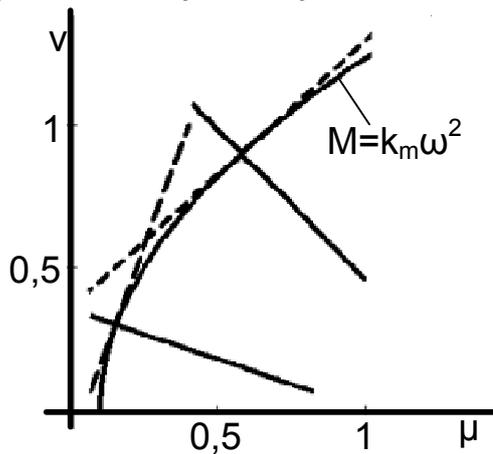


Рис.2. Механические характеристики нагрузки и ортогональные механические характеристики электропривода

Уравнение механической характеристики электропривода расположенной ортогонально механической характеристике механизма имеет вид:

$$\mu = \frac{M_{\text{НОМ}}}{-2k_m \omega_{\text{НОМ}}^2 v_t} (v - v_t) + \mu_t, \quad (3)$$

где μ_t – текущий момент в о.е.; v_t – текущая скорость в о.е.

Согласно выражению (3) построены расчетные ортогональные механические характеристики нагрузки и электропривода рис.2.

Упрощенная функциональная схема контура скорости регулируемого асинхронного электропривода приведена на рис. 3. Если электропривод работает на линейном участке механической характеристики двигателя (векторное управление) и быстродействие контура регулирования момента гораздо выше чем контура скорости, то инерционностью контура момента можно пренебречь.

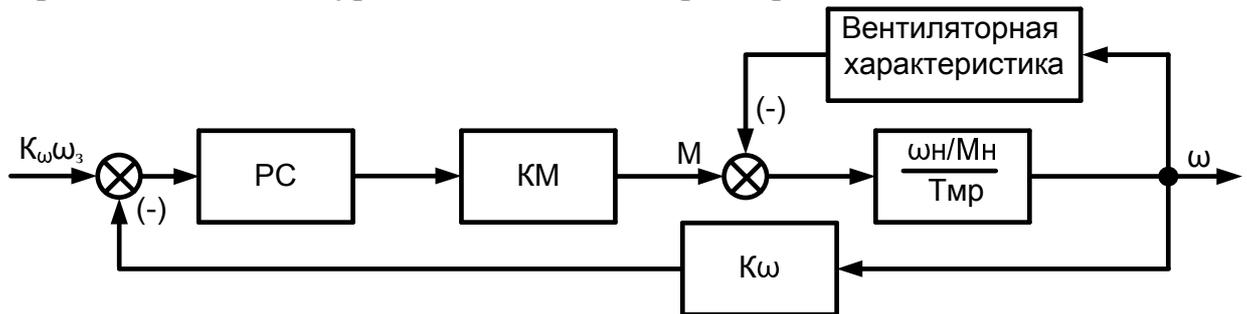


Рис.3. Упрощенная функциональная схема электропривода

Здесь обозначено: РС – регулятор скорости, с коэффициентом K_{pc} ; КМ – контур регулирования момента с коэффициентом $K_{км}$; T_m – механическая постоянная времени, $T_m = J \frac{\omega_H}{M_H}$; K_ω – коэффициент обратной связи по скорости.

В результате проведенных расчетов K_{pc} и K_ω имеет вид:

$$K_{pc} = \frac{M_H^2}{2k_m K_\omega K_{км} \omega_H^2 \omega_t}, \quad K_\omega = \frac{U_3}{\omega_t + \frac{M_t}{2k_m \omega_H^2 \omega_t} M_H^2}. \quad (4)$$

Для подтверждения расчетов в среде MATLAB было проведено моделирование, результаты которого приведены на рис.4. В предложенной системе электропривода при переходе с одной скорости на другую отсутствует перерегулирование, изменение скорости происходит без колебаний, отсутствуют значительные броски момента.

Формирование пуско-тормозных режимов приводов с вентиляторным характером нагрузки имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать.

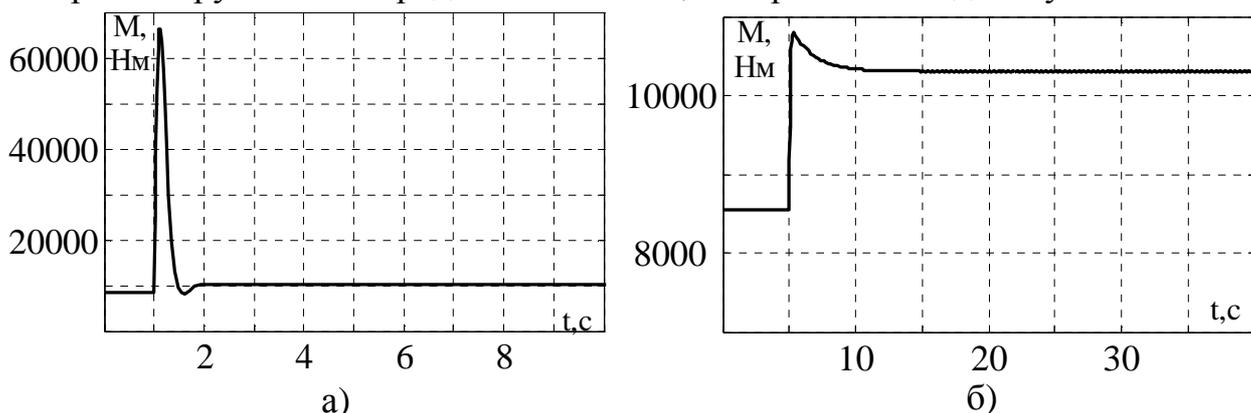


Рис.4. Результаты исследования динамики электропривода при изменении скорости на 10 c^{-1} а) с постоянными параметрами настройки регулятора; б) с переменным коэффициентом регулятора скорости

С точки зрения ограничения динамических ударов наиболее рациональным режимом пуска турбомеханизмов является пуск, при котором скорость меняется по линейному закону. Это возможно, если в процессе пуска и торможения динамический момент сохраняется постоянным. Если регулируемый асинхронный электропривод строится как система с векторным управлением, то электропривод имеет, как правило, два контура регулирования: контур регулирования тока (момента) и контур регулирования скорости. В этом случае обеспечить постоянство динамического момента может следующая система автоматизированного электропривода, показанная на рис.5.

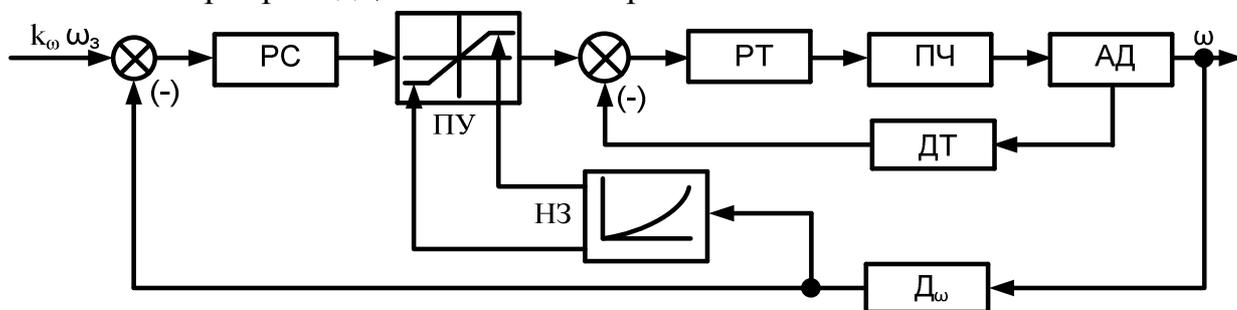


Рис. 5. Функциональная схема автоматизированного электропривода

Здесь обозначено: РС – регулятор скорости; ПУ – промежуточный усилитель с регулируемым уровнем насыщения; РТ – регулятор токов; ПЧ – преобразователь частоты; АД – асинхронный электродвигатель; ДТ – датчик тока; НЗ – нелинейное звено; ДС – датчик скорости.

Звено насыщения, стоящее в тракте управления задает динамический момент двигателя. Звено положительной обратной связи имеет нелинейную параболическую характеристику. Тем самым обеспечивается независимо от скорости постоянство динамического момента в процессе разгона и торможения электропривода.

На рисунках 6, 7 показаны процессы пуска электропривода при постоянстве динамического момента электропривода, построенного в соответствии с функ-

циональной схемой рис. 5 и процесс пуска электропривода при переменной жесткости механических характеристик.

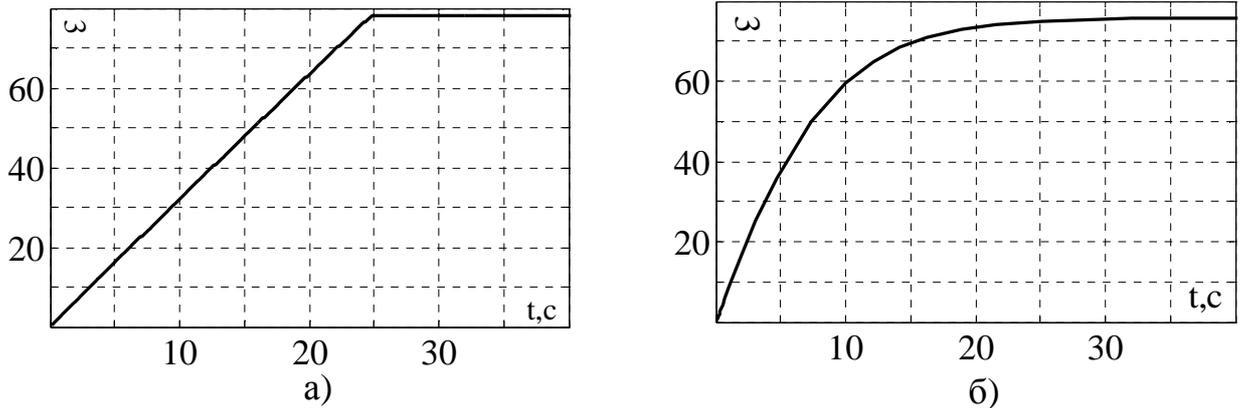


Рис.6. Процесс разгона электропривода при обеспечении: а) постоянного динамического момента; б) ортогональности механических характеристик

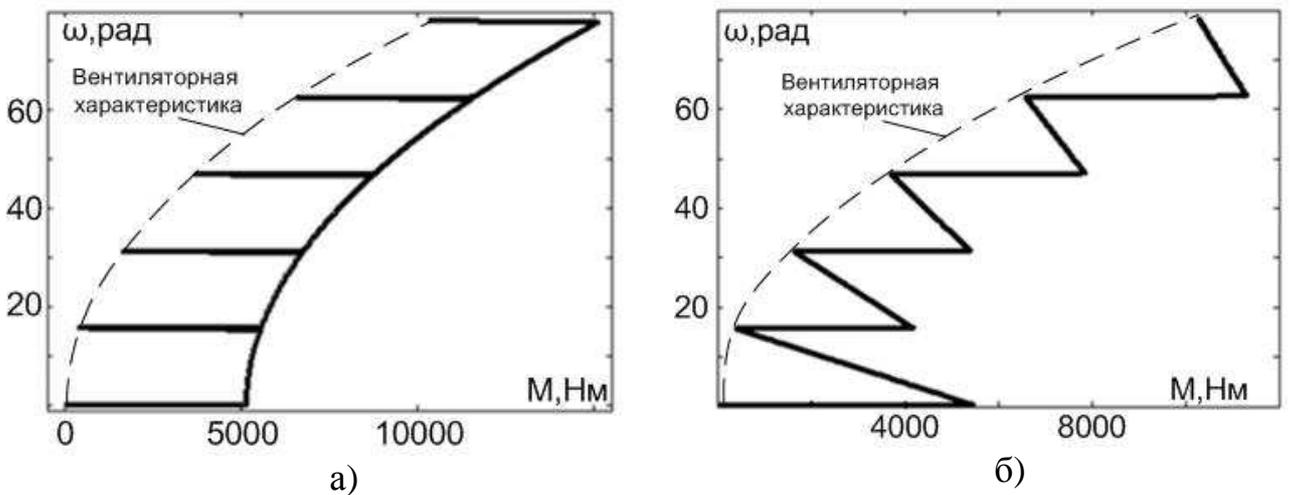


Рис.7. Динамические характеристики электропривода при обеспечении: а) постоянного динамического момента; б) ортогональности механических характеристик

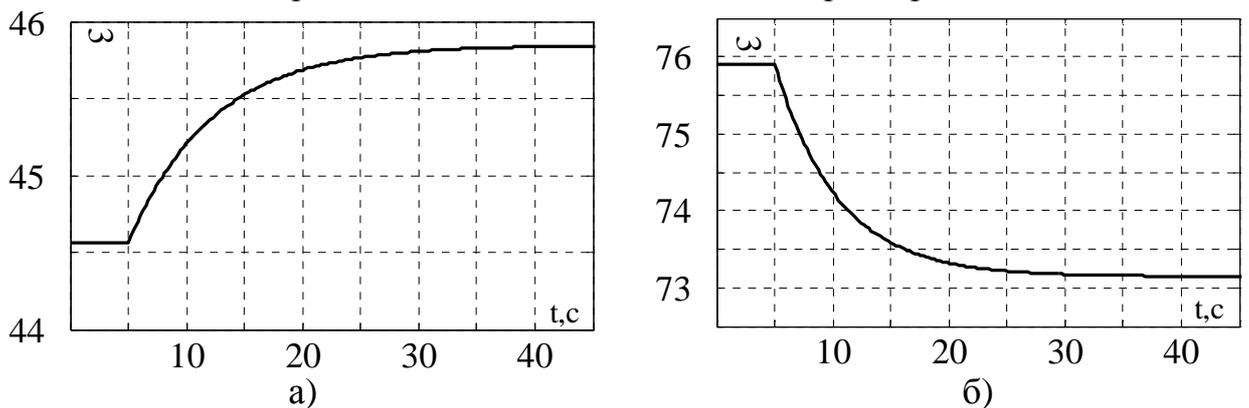


Рис.8. Переходные процессы электропривода работающего на ортогональных характеристиках при а) уменьшении нагрузки (смещении Q-N характеристики) на 10%, б) увеличении нагрузки на 10%

Характеристики переходных процессов при работе электропривода на ортогональных характеристиках, рис. 8, показывают, что и при повышении скорости и при ее снижении, в результате возмущающего воздействия, время пере-

ходных процессов примерно одинаково, причем это распространяется на весь рабочий диапазон скоростей вращения электропривода. Так как при ортогональности характеристик отношение $\Delta M/\Delta \omega$ в разных установившихся режимах примерно постоянно, этот факт позволяет приближенно считать систему электропривода динамическим звеном с постоянными коэффициентами несмотря на нелинейность вентиляторной характеристики нагрузки.

В третьей главе рассматривается одноканальная система регулирования разрежения в топке котла с управляемым электроприводом дымососа. Показателем материального баланса в топке котла является наличие небольшого (20-30 Па) разрежения в ее верхней части. Функциональная схема системы регулирования разрежения в топке котлоагрегата приведена на рис.9.

В этой главе предложен вариант построения одноканальной системы регулирования разрежения в топке котлоагрегата с уравновешенной тягой. Определена его структура рис.10.

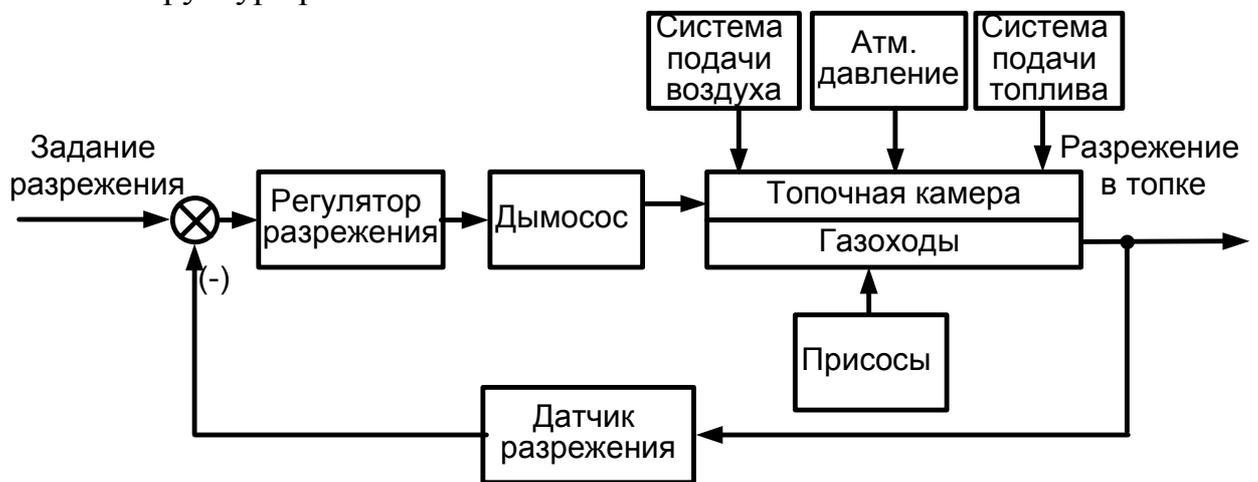


Рис. 9. Функциональная схема системы регулирования разрежения в топке

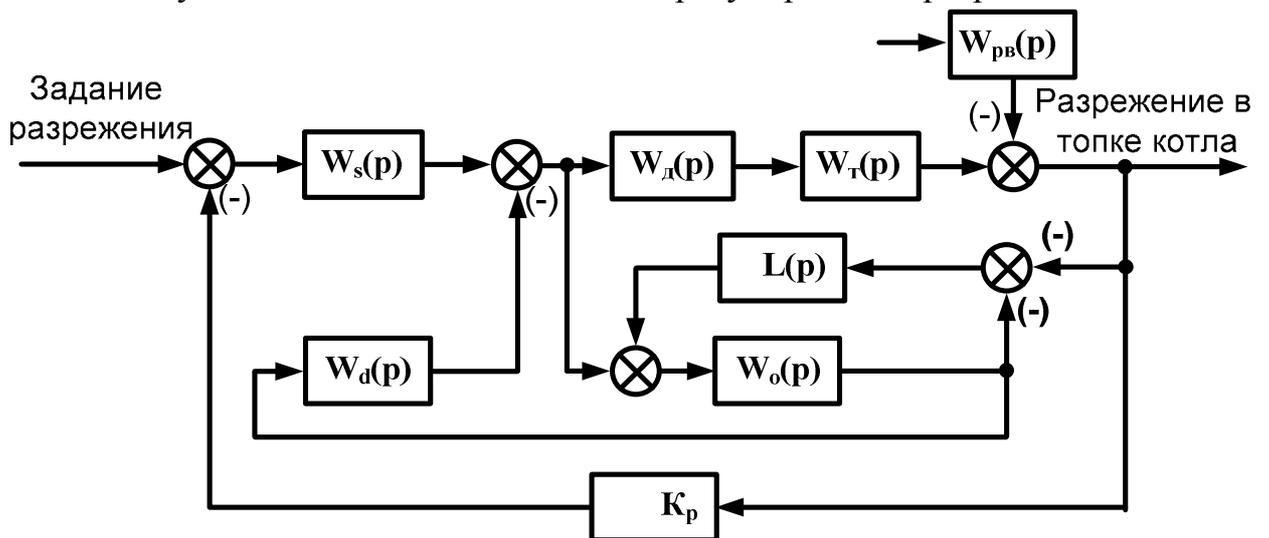


Рис.10. Структурная схема системы регулирования разрежения в топке котла с использованием наблюдателя Люенбергера

На схеме обозначено: $W_{рв}(p)$ – передаточная функция системы регулирования расхода воздуха совместно с воздушным трактом; K_p – коэффициент передачи датчика разрежения; $W_d(p) = K_{эд}/(T_{эд}p + 1)$ – передаточная функция элект-

тропровода дымососа; скорость асинхронного двигателя регулируется частотным способом с векторным управлением; $W_T(p) = K_{тр} / (T_{тр}p + 1)$ – передаточная функция котла по тракту разрежения; $W_s(p)$ – корректор статики регулятора разрежения; $W_d(p)$ – корректор динамики регулятора разрежения; $W_o(p)$ – передаточная функция объекта регулирования; $L(p)$ – стабилизирующая добавка.

К качеству переходных процессов предъявляются определенные требования. Для их выполнения необходимо задать время переходного процесса t_n , перерегулирование σ , ошибку Δ^0 . Передаточная функция поведения системы регулирования разрежения имеет вид:

$$W_o(p) = \frac{K_{эд}}{T_{эд}p + 1} \frac{K_{тр}}{T_{тр}p + 1} = \frac{K_{об}}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (5)$$

где $T_1 = \sqrt{T_{эд} T_{тр}}$; $T_2 = T_{эд} + T_{тр}$; $K_{об} = K_{эд} K_{тр}$.

При определении параметров регулятора использована операторная процедура модального синтеза. Нулевая статическая ошибка системы обеспечивается корректором статики

$$W_s(p) = \frac{K_s}{p}. \quad (6)$$

С целью обеспечения требуемых динамических свойств формируется корректор динамики:

$$W_d(p) = \frac{d_1 p + d_0}{K_{об}}. \quad (7)$$

Определение неизвестных коэффициентов регулятора K_s , d_1 , d_0 производится на основании характеристического уравнения замкнутой системы:

$$A(p) = p^3 + \frac{T_2 + d_1}{T_1^2} p^2 + \frac{1 + d_0}{T_1^2} p + \frac{K_{об} K_s K_p}{T_1^2} = 0. \quad (8)$$

и желаемого характеристического уравнения третьего порядка:

$$C(p) = p^3 + c_1 p^2 + c_2 p + c_3. \quad (9)$$

С использованием (8), (9) составлены расчетные соотношения и определены неизвестные коэффициенты K_s , d_1 , d_0 .

$$d_1 = c_1 T_1^2 - T_2; \quad d_0 = c_2 T_1^2 - 1; \quad K_s = \frac{c_3 T_1^2}{K_{об} K_p}. \quad (10)$$

Для реализации корректора динамики предлагается использовать наблюдатель Люенберга. Он состоит из модели объекта и стабилизирующей добавки $L(p)$.

$$L(p) = \frac{K_{LF}(\tau_1 p + 1)}{\tau_2 p + 1}. \quad (11)$$

Процедура определения параметров стабилизирующей добавки аналогична процедуре определения параметров корректоров статики и динамики.

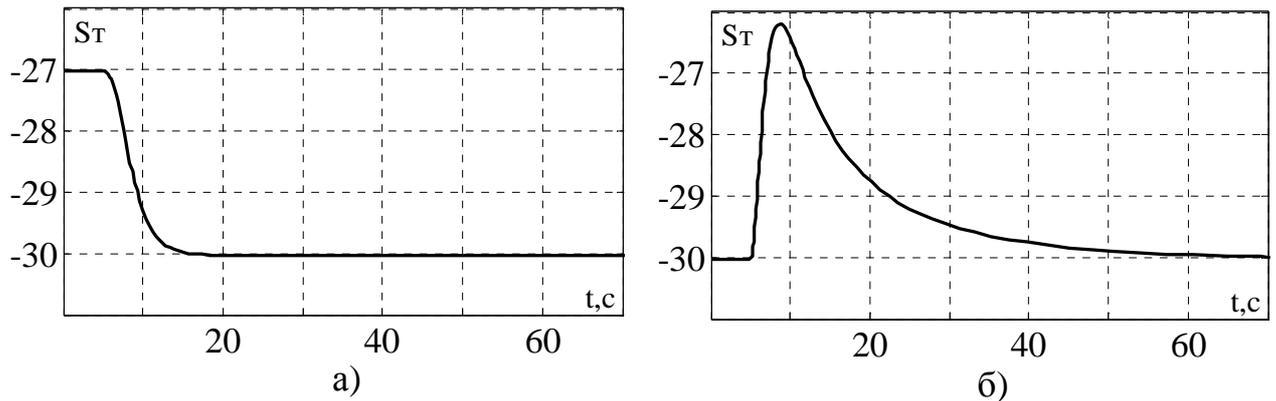


Рис.11. Изменение разрежения в топке: а) при изменении задания; б) при изменении нагрузки котлоагрегата

Проведено исследование динамических режимов линеаризованной системы регулирования разрежения, рис.11. Как показало моделирование предложенная система регулирования и настройки выбранного регулятора обеспечивают требуемые параметры работы котлоагрегата по тракту разрежения.

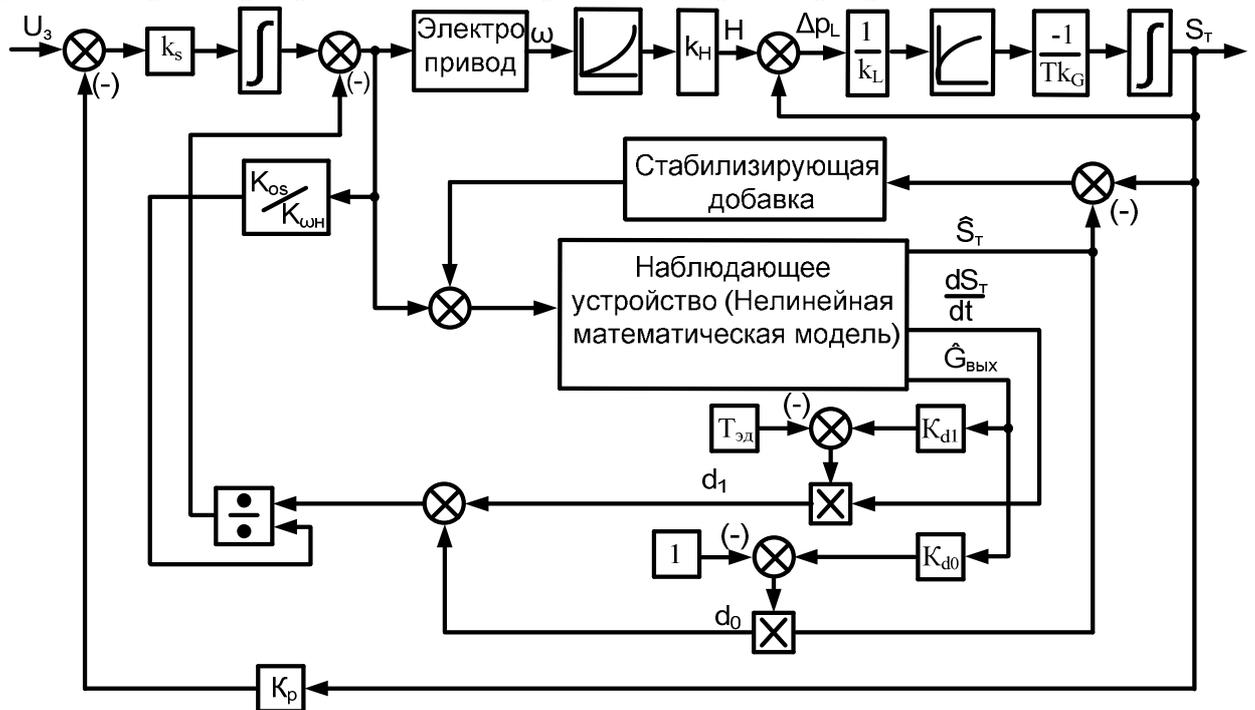


Рис. 12. Структурная схема системы регулирования разрежения с учетом нелинейностей объекта

На рис.12 обозначено: $K_{d1}=k_L T_{kG}(c_1 T_{эд}-1)$; $K_{d0}=c_2 T_{эд} k_L T_{kG}$; где c_1, c_2 коэффициенты желаемого характеристического уравнения.

Показанный на рис. 1 объект регулирования имеет существенные нелинейности. При построении системы регулирования произведен учет этих нелинейностей следующим образом. Как известно коэффициент передачи любого звена равен отношению сигнала на выходе к отношению сигнала на входе. Поэтому коэффициент напора k_{HW} , и коэффициент сопротивления газового тракта k_{LW} определяется следующими выражениями:

$$k_{HW} = \frac{H}{\omega} = \frac{k_H \omega^2}{\omega} = k_H \omega; k_{LW} = \frac{G_{\text{ВЫХ}}}{\Delta p_L} = \frac{k_L G_{\text{ВЫХ}}}{\Delta p_L} = \frac{1}{k_L G_{\text{ВЫХ}}}. \quad (12)$$

На рис. 12 приведена структурная схема системы регулирования, составленная с учетом нелинейностей объекта и выражений (12).

На основании структурной схемы рис. 12 составлена модель и проведено исследование ее работы, которое показало, что предложенная система работоспособна. Время переходных процессов, рис. 13, уменьшается как при управляющем, так и при возмущающем воздействии. Учет нелинейностей объекта позволяет более адекватно отражать свойства системы регулирования разрежения в топке и рационально управлять производительностью дымососов.

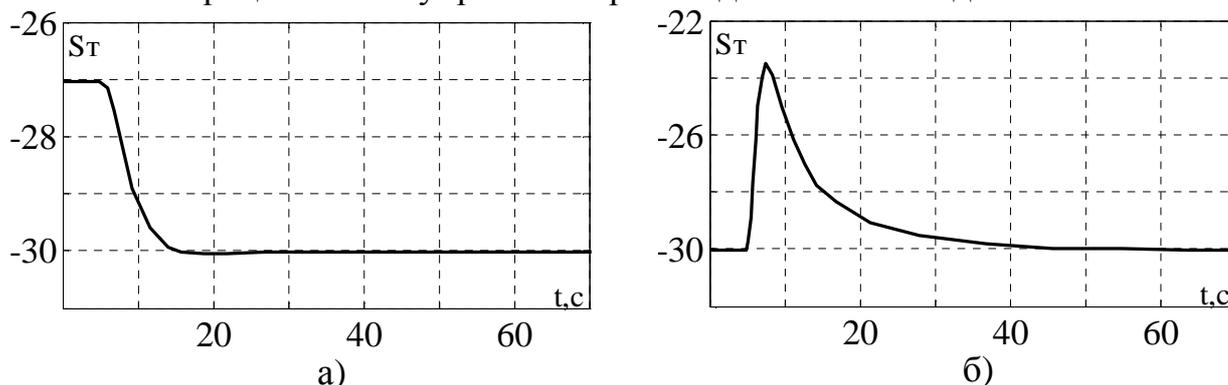


Рис. 13. Переходные процессы при: а) увеличении управляющего воздействия на 10 %; б) увеличением нагрузки котлоагрегата на 10 %

Разрежение в топке котла в статическом режиме работы поддерживается с высокой точностью. В переходных режимах работы отклонение регулируемой величины не выходит за допустимые пределы. При управляющем воздействии изменение регулируемой величины происходит без перерегулирования, время переходных процессов остается постоянным при любых нагрузках котлоагрегата. При возмущающем воздействии с увеличением нагрузки котлоагрегата отклонение регулируемой величины от номинального значения увеличивается, соответственно увеличивается и время переходных процессов. Предлагаемая система обеспечивает требуемое качество переходных процессов во всем диапазоне регулирования разрежения. Таким образом, предложенный регулятор обеспечивает стабильную и качественную работу котлоагрегата при различных нагрузках.

В четвертой главе проведены теоретические исследования и созданы основы построения системы автоматического управления разрежением котлоагрегата по двум каналам воздействия с использованием асинхронного регулируемого электропривода тягодутьевых машин.

Наиболее эффективна автоматизация процесса горения с применением частотных преобразователей для регулирования производительности дымососа и вентилятора с поддержанием оптимального соотношения топливо-воздух. Однако в связи с тем, что тягодутьевые машины имеют большой момент инерции, время переходных процессов в электроприводе соизмеримо с быстродействием топки. Также необходимо учитывать то, что вследствие различных масс

дымососа и вентилятора быстродействие канала регулирования подачи воздуха и канала разрежения различны. В связи с чем, возникает задача учета и согласования времени регулирования подачи воздуха и разрежения.

Для увеличения стабильности разрежения в топке и быстродействия системы предлагается система регулирования разрежения по двум каналам воздействия, рис.14, которая позволяет в переходных режимах совместно управлять работой дутьевого вентилятора и дымососа.

Особенностью построения такой системы является следующие обстоятельства. Так как работа дутьевого вентилятора подчинена в установившихся режимах основному тракту регулирования – соотношению топливо-воздух, то вмешиваться в работу дутьевого вентилятора можно только в переходных режимах, когда процесс горения является нерациональным. Это позволяет сократить время переходных режимов по тракту разрежения и оптимизировать процесс горения.

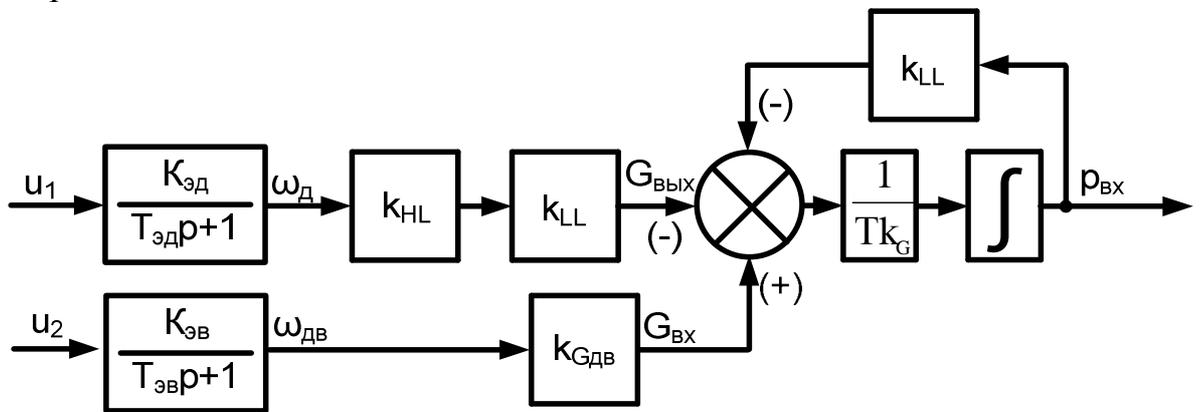


Рис.14. Структурная схема системы управления разрежением в топке котла по двум каналам воздействия

На схеме обозначено: $\omega_д$ – скорость вращения электропривода дымососа; $K_{эв}$ – коэффициент передачи электропривода дутьевого вентилятора (ДВ); $T_{эв}$ – постоянная времени электропривода ДВ; $\omega_{дв}$ – скорость вращения электропривода ДВ; $k_{НЛ}$ – коэффициент напора дымососа; k_{LL} – коэффициент сопротивления тракта дымовых газов; $k_{ГДВ}$ – коэффициент расхода воздуха; u_1, u_2 – управляющие воздействия по разрежению и расходу воздуха соответственно.

Для синтеза регулятора используется модификация модального метода для двухканальных систем. Объект управления рис.14 описывается системой уравнений 3-го порядка.

$$\begin{cases} \frac{d\omega_д}{dt} = -\frac{1}{T_{эд}}\omega_д + \frac{k_{эд}}{T_{эд}}u_1, \\ \frac{d\omega_{дв}}{dt} = -\frac{1}{T_{эв}}\omega_{дв} + \frac{k_{эв}}{T_{эв}}u_2, \\ \frac{dp_{вх}}{dt} = -\frac{k_{НЛ}k_{LL}}{Tk_G}\omega_д + \frac{k_{ГДВ}}{Tk_G}\omega_{дв} + \frac{k_{LL}}{Tk_G}p_{вх}. \end{cases} \quad (13)$$

Элементы матрицы коэффициентов обратных связей K для многоканальных систем задаются исходя из технических соображений и определяются из условия $N=n(m-1)$:

$$K = \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Операторное уравнение замкнутой системы принимает вид

$$(pD_1(p) + k_{pc})y = k_{pc}g, \quad (15)$$

что соответствует характеристическому полиному каждого канала

$$D_3(p) = pD_1(p) + k_{pc}. \quad (16)$$

В выражении (15) обозначено: g – задающее воздействие, определяющее желаемое установившееся значение выхода y . Приравнявая характеристический полином (16) к нормированному $N(p)$

$$N(p) = p^4 + c_3p^3 + c_2p^2 + c_1p + c_0, \quad (17)$$

находим неизвестные коэффициенты:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{c_3T_{ЭД} - 1}{K_{ЭД}} + \frac{T_{ЭД}(T_{ЭВ}k_{LL} - T_Tk_G)}{K_{ЭД}T_{ЭВ}T_Tk_G}, \\ k_2 &= \frac{c_1T_{ЭД}T_{ЭВ}T_Tk_G}{K_{ЭД}K_{ЭВ}k_{LL}k_{HL}k_3} + \frac{K_{ЭД}(k_2 + k_{HL}k_3) + 1}{K_{ЭД}K_{ЭВ}k_{HL}k_3} + \frac{k_{ГДВ}(K_{ЭД}k_1 - 1)}{K_{ЭД}k_{LL}k_{HL}}, \\ k_3 &= \frac{T_Tk_G(c_2T_{ЭД}T_{ЭВ} - K_{ЭД}k_1 - 1) + k_{LL}(T_{ЭД} + T_{ЭВ} + K_{ЭД}k_1T_{ЭВ})}{K_{ЭВ}k_{ГДВ}T_{ЭД} - k_{HL}k_{LL}K_{ЭД}T_{ЭВ}}. \end{aligned} \right\} (18)$$

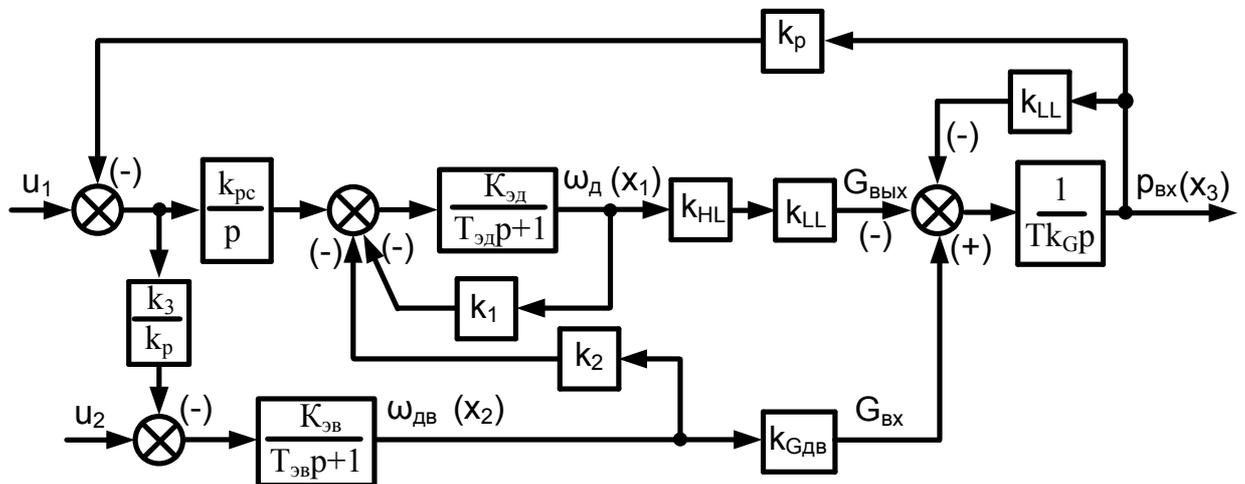


Рис. 15. Структурная схема синтезированной «прямым» методом системы регулирования разрежения в топке котла

где k_1, k_2, k_3 коэффициенты обратных связей модального корректора.

Проведено исследование работы предложенной системы регулирования, при разных вариантах построения, которое показало рациональность применения такой системы. Результаты исследования приведены на рис.16,17. Несмотря на то, что при работе системы появляется колебательность, при возмущающем воздействии отклонение параметра незначительное. Скорость электропривода, как дымососа, так и дутьевого вентилятора изменяется значительно мед-

леннее, чем разрежение в топке, но за счет совместной работы механизмов управляемых предложенным регулятором обеспечивается стабильность регулируемого параметра. Повышенная инерционность регулируемого электропривода не оказывает отрицательного влияния на быстродействие системы регулирования разрежения.

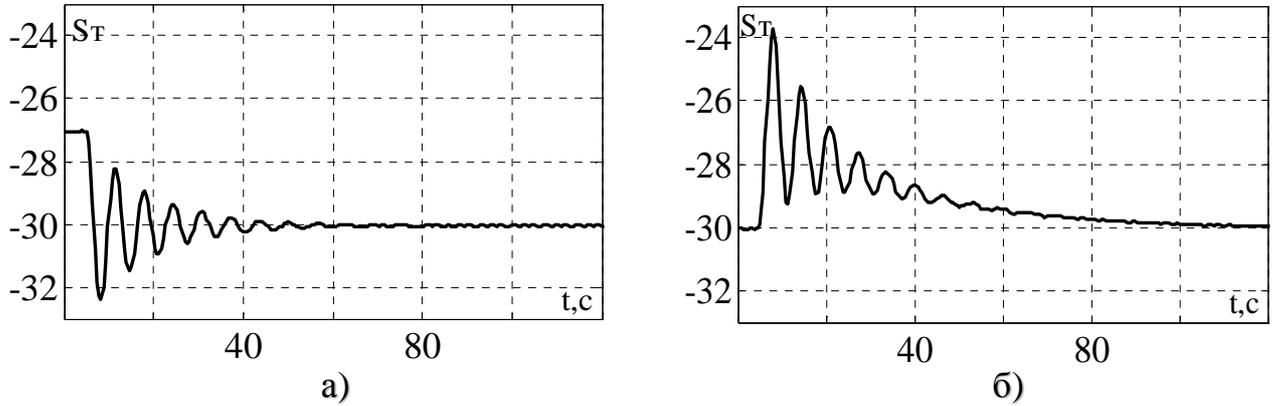


рис.16. Обработка рассогласования по разрежению а) по управляющему воздействию; б) по возмущающему воздействию

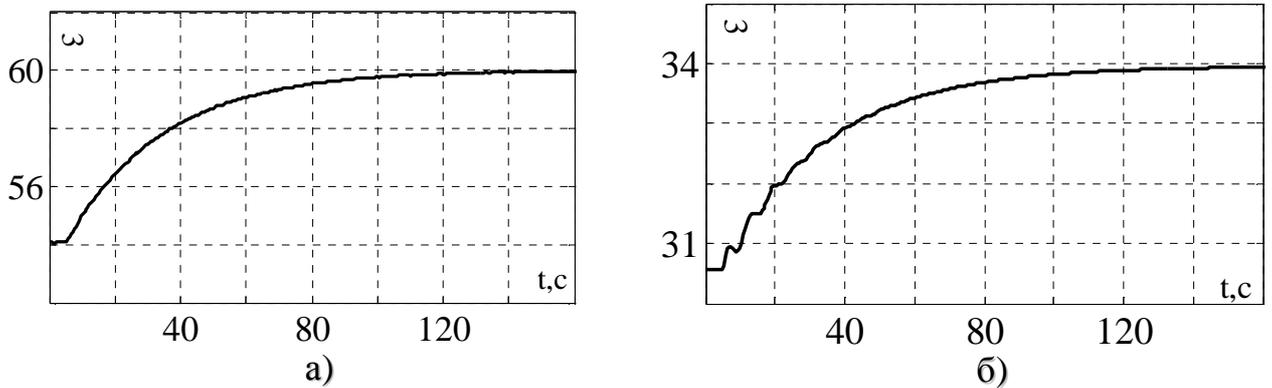


рис.17. Изменение скорости в системе управления разрежением по двум каналам воздействия при увеличении нагрузки котлоагрегата а) дымососа; б) дутьевого вентилятора



Рис.18. Экспериментальная установка

В пятой главе Проведены исследования на экспериментальной установке разработанного варианта регулятора одноканальной системы регулирования с нелинейной моделью тракта в наблюдателе Люенбергера.

В экспериментальной установке рис. 18 используется асинхронный электродвигатель со следующими параметрами: $P_n=0,37$ кВт; $U_n=380$ В; $\omega_n=2880$ мин⁻¹; $I_n=1,74/1$ А; пусковой ток 4,9/5,3 I_n ; $\cos\phi=0,8$. Электродвигатель управляется преобразователем частоты VLT HVAC FC102 фирмы «Danfoss». Преобразователь реализует векторное управление асинхронным электродвигателем. Тракт регулирования описывается передаточной функцией полученной экспериментально.

$$W_{\text{эy}}(p) = \frac{K_{\text{эy}}}{T_{\text{эy}}p + 1} = \frac{0,002}{5p + 1}. \quad (19)$$

Рассчитаны параметры регулятора и проведено исследование работы построенной системы регулирования. Результаты исследования работы предложенного варианта построения системы регулирования разрежения показаны на рис. 19. Как при увеличении, так и при уменьшении управляющего воздействия на 20% время регулирования остается одинаковым. При этом перерегулирование практически отсутствует.

Также было проведено исследование работы предложенного регулятора в динамических режимах при возмущающем воздействии. Возмущающее воздействие на систему регулирования осуществлялось двумя путями: 1) изменением характеристики (сопротивления) тракта; 2) изменением расхода среды. В обоих случаях отклонение регулируемой величины от заданного значения составило около 20%. При этом время переходного процесса при изменении характеристики тракта меньше на 20 % чем, при изменении расхода. среды.

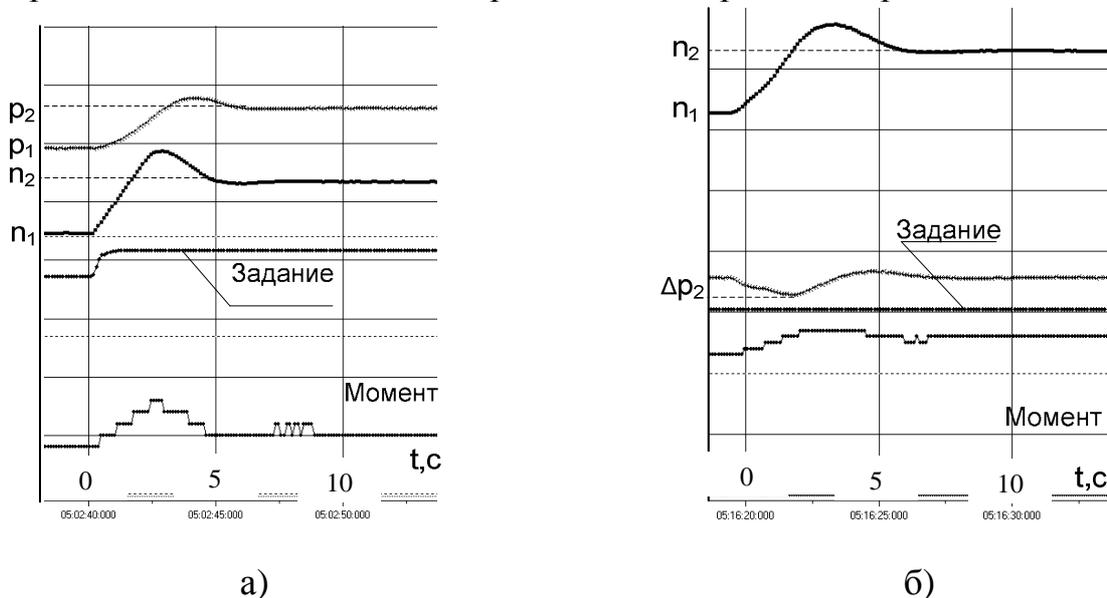


Рис.19. Изменение давления и скорости при а) изменении управляющего воздействия на 20%; б) возмущающем воздействии расходом среды

Таким образом, экспериментальные исследования работы предложенного варианта построения одноканальной системы регулирования разрежения подтвердили достоверность проведенных расчетов и работоспособность предложенной системы регулирования.

Приведено описание контроллера МС8 программно-технического комплекса Контар. На контроллере МС8, реализованы разработанные алгоритмы управления разрежением в топке котла с регулируемым асинхронным электроприводом тягодутьевых машин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены теоретические и практические результаты работы, направленной на решение научно-технической проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное значение – применение управляемого асинхронного элект-

тропривода в системе регулирования разрежения котлоагрегата. Проведенные в диссертационной работе исследования позволили получить следующие основные результаты:

1. Составлено математическое описание объекта регулирования с учетом применения регулируемого асинхронного электропривода с нелинейным характером нагрузки и существующих нелинейностей объекта регулирования.
2. Разработан способ построения регулируемого асинхронного электропривода, работающего с использованием условия ортогональности механических характеристик электропривода и нагрузки. Это позволяет обеспечить постоянство качества переходных процессов при изменении скорости вращения.
3. Разработана структура и алгоритмы управления одноканальной системы управления разрежением котлоагрегата с использованием регулируемого асинхронного электропривода. Предложен вариант учета нелинейности объекта при построении структуры управления разрежением.
4. Проведены исследования, создана структура и предложены алгоритмы управления разрежением котлоагрегата по двум каналам воздействия с использованием асинхронного регулируемого электропривода тягодутьевых машин. Динамика системы регулирования разрежения улучшается, так время переходных процессов уменьшается практически в два раза, по сравнению с одноканальной.

**Список работ, опубликованных по теме диссертации
Работы, опубликованные в центральных журналах,
рекомендованных списком ВАК:**

1. Симаков Г. М., Марченко М. А. Линеаризованная математическая модель котлоагрегата по тракту разрежения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1. С. 194–200.
2. Симаков Г. М., Марченко М. А. Система автоматического регулирования разрежения в топке парового котла барабанного типа с управляемым асинхронным электроприводом // Транспорт: наука, техника, управление. 2010. № 8. С. 35–37.
3. Симаков Г. М., Марченко М. А. Процессы пуска и торможения асинхронного электропривода с частотным управлением при вентиляторной нагрузке // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 2. С. 383–387.
4. Марченко М. А., Симаков Г. М. Регулируемый асинхронный электропривод тягодутьевых машин в системе двухканального управления разрежением котлоагрегатов с уравновешенной тягой // Ползуновский вестник. 2011. № 2–1. С. 95–100.

Прочие публикации

5. Марченко М. А., Симаков Г. М. Исследование системы автоматического регулирования разрежения парового барабанного котла // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт : тр. 3 Междун. науч.-техн. конф., Омск, 5–8 июня 2007 г. Омск, 2007. Ч. 2. С. 27–31.
6. Марченко М. А., Симаков Г. М. Система автоматического регулирования разрежения парового котла с бездатчиковым асинхронным электроприво-

- дом // Электротехника, электромеханика и электротехнологии. ЭЭЭ–2007 : материалы 3 науч.-техн. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 25–26 окт. 2007 г. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2007. С. 104–109.
7. Марченко М. А., Симаков Г. М. Применение регулируемого асинхронного электропривода в системе управления разрежением парового котла // Автоматизированные электромеханические системы : [сб. науч. тр.]. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. С. 188–196.
 8. Симаков Г. М., Марченко М. А. Математическая модель котлоагрегата по тракту разрежения // Электроэнергетика в сельском хозяйстве : материалы междунар. науч.-практ. конф. (Республика Алтай, Чемал. р-н, база НГТУ Эрлагол, 26–30 июня 2009 г.). Новосибирск, 2009. С. 257–264.
 9. Симаков Г. М., Марченко М. А. Способ построения регулируемого асинхронного электропривода с вентиляторной нагрузкой // Электротехника, электромеханика и электротехнологии. ЭЭЭ–2009 : материалы 4 науч.-техн. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 23–24 окт. 2009 г. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. С. 159–166.
 10. Симаков Г. М., Марченко М. А., Симаков Д. Г. Формирование пуско-тормозных режимов работы асинхронного электропривода с вентиляторной нагрузкой // Автоматизированные электромеханические системы : [сб. науч. тр.]. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. С. 61–68.
 11. Симаков Г. М., Марченко М. А. Система автоматического регулирования разрежением котлоагрегата, управляемая по двум каналам воздействия // 10 International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings. АРЕИЕ–2010 = Материалы 10 международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». АПЭП–2010, Новосибирск, 2010 г. Новосибирск, 2010. Т. 7. С. 85–89.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630092, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 1570. Подписано в печать 14.11.2012 г.