

**Д. А. Ковалёв
В. А. Шаряков
О. Л. Шарякова**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

**Учебно-методическое пособие
для выполнения курсовой работы**

**Санкт-Петербург
2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики**

**Д. А. Ковалёв
В. А. Шаряков
О. Л. Шарякова**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

**Учебно-методическое пособие
для выполнения курсовой работы**

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2023

УДК 681.3(07)
ББК 32.97р
К 560

Рецензенты:

доктор технических наук, зав. кафедрой автоматизации процессов химической промышленности Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), профессор

Л. А. Русинов;

кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-измерительных технологий и систем управления Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

А. В. Бахтин

Ковалёв, Д. А.

К 560 Моделирование объектов управления: учебно-методическое пособие для выполнения курсовой работы / Д. А. Ковалёв, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. — 153 с.

Учебно-методическое пособие соответствует программе и учебному плану дисциплины «Моделирование объектов управления» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

В учебно-методическом пособии изложены цели и содержание курсовой работы, теоретические материалы, необходимые для выполнения разделов, приведены справочные материалы и примеры выполнения отдельных глав.

Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения курсовой работы.

УДК 681.3(07)
ББК 32.97р

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023
© Ковалёв Д. А., Шаряков В. А.,
Шарякова О. Л., 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	6
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	8
2.1. Математические модели процессов	9
2.1.1. Определение передаточной функции объекта управления системы автоматического управления параметром	10
2.1.2. Определение параметров объектов. Объект вида апериодическое звено	12
2.1.3. Определение параметров объектов. Объект вида апериодическое звено с запаздыванием	13
2.1.4. Определение параметров объектов. Объект вида интегрирующее звено с запаздыванием	17
2.2. Понятие замкнутого контура автоматического управления параметром	21
2.2.1. Определение передаточной функции замкнутой системы по задающему воздействию	25
2.2.2. Определение передаточной функции замкнутой системы по каналу возмущения	26
2.3. Определение передаточных функций измерительных устройств и датчиков управляемого сигнала	27
2.4. Регулирующие органы и исполнительные механизмы	29
2.4.1. Дроссельный регулирующий орган (РО)	30
2.4.2. Регулирование производительности вентиляторов и дымососов	32
2.4.3. Исполнительные механизмы	36
3. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	40
3.1. Типовые регуляторы	47
3.1.1. Пропорциональный регулятор (П-регулятор)	47
3.1.2. Пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор)	47
3.1.3. Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор)	47
3.2. Стандартные настройки простейших контуров. Настройки на оптимум по модулю	48
4. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ ПО КУРСОВОЙ РАБОТЕ «МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ БАРАБАННЫХ КОТЛОВ»	62
4.1. Замкнутый контур управления давлением пара за барабаном	65
4.1.1. Выбор необходимого оборудования	66
4.1.2. Построение структурно-аналитической схемы замкнутого контура регулирования величины давления пара за барабаном	66
4.1.3. Передаточные функции элементов системы	67
4.1.4. Синтез системы	70

4.1.5. Анализ синтезированной системы	75
4.2. Замкнутый контур регулирования разрежением в верхней части топки	78
4.2.1. Выбор необходимого оборудования при использовании НА	79
4.2.2. Выбор необходимого оборудования при использовании частотного регулирования производительности	88
4.3. Замкнутый контур регулирования температурой перегретого пара.....	100
4.3.1. Выбор необходимого оборудования	101
4.3.2. Построение структурно-аналитической схемы замкнутого контура регулирования температуры перегретого пара	101
4.3.3. Передаточные функции элементов системы	102
4.3.4. Синтез системы.....	105
4.3.5. Анализ синтезированной системы	107
4.4. Замкнутый контур регулирования уровня воды в барабане котла	109
4.4.1. Выбор необходимого оборудования	110
4.4.2. Построение структурно-аналитической схемы замкнутого контура регулирования уровня воды в барабане котла	110
4.4.3. Передаточные функции элементов системы	111
4.4.4. Синтез системы.....	114
4.4.5. Анализ синтезированной системы	119
5. ЗАДАНИЕ	120
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	153

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование является важным этапом при создании систем автоматического управления (САУ) в автоматизированных системах и процессах. Качество модели в значительной степени определяет качество работы САУ. Поэтому основной задачей курсовой работы является развитие навыков самостоятельного творческого поиска при создании современных САУ автоматизированных систем и процессов и ознакомление с основными этапами моделирования подобных систем.

Курсовая работа является заключительным этапом в изучении дисциплины «Моделирование объектов управления».

Ее целью является закрепление знаний по построению, синтезу и математическому моделированию современных систем автоматизации оборудования.

В настоящем учебно-методическом пособии рассматриваются структура курсовой работы и ее содержание, приводятся теоретические материалы и примеры выполнения курсовой работы.

1. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа представляется в виде пояснительной записки объемом 10–15 листов печатного текста и графической части, содержащей следующие обязательные элементы: функциональная схема системы автоматического управления (САУ) параметром, структурно-аналитическая схема САУ, имитационные модели и результаты моделирования. Графическая часть может быть выполнена на формате А3 или А4 и вложена в пояснительную записку в качестве приложения.

Работа выполняется индивидуально с использованием компьютера и оргтехники.

Курсовая работа содержит следующие разделы.

Введение

Здесь необходимо дать общую характеристику предложенной САУ.

Построение математической модели системы автоматического управления параметром

В этом разделе следует:

- представить функциональную схему САУ параметром в объекте управления;
- построить алгоритмическую схему САУ параметром;
- определить передаточные функции элементов оборудования САУ.
- выбрать необходимое оборудование САУ, используя открытые источники и интернет.
- определить передаточные функции оборудования, входящих в контур регулирования.
- построить имитационную модель подчиненного управления (каскадной системы):
 - внутренний контур – регулирование положения штока исполнительного механизма или частоты вращения вала электрического двигателя тягодутьевой машины;
 - внешний контур – управление заданным параметром.

Произвести параметрический синтез системы

В этом разделе следует:

- Произвести синтез внутреннего контура регулирования:
 - выбрать тип регуляторов внутреннего контура;
 - определить настройки регулятора;
 - определить передаточную функцию разомкнутого внутреннего контура системы;
 - определить передаточную функцию замкнутого внутреннего контура системы;
 - определить эквивалентную передаточную функцию замкнутого внутреннего контура.
- Произвести синтез внешнего контура регулирования заданным параметром:

- выбрать тип регуляторов внешнего контура;
- определить настройки регулятора;
- определить передаточную функцию разомкнутого внешнего контура системы;
- определить передаточную функцию замкнутого внешнего контура системы.

Математическое моделирование работы системы

В этом разделе следует:

- Построить математическую модель
- Выполнить моделирование работы модели
- Дать оценку полученным результатам моделирования.

Заключение

Основные результаты курсовой работы.

Список литературы

На все позиции списка литературы должна быть ссылка в тексте пояснительной записки курсовой работы.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Динамическая система – комплекс технических устройств, в которых приложенные внешние воздействия определяют протекающие в них процессы, с учетом взаимных связей и начальных условий.

Первым понятием, необходимым для анализа воздействия обобщенных сил на объект управления (ОУ), являющийся предметом воздействия, есть понятие математической модели.

Под моделью понимается математическая абстракция, характеризующая физический, биологический, экономический процесс или процесс другой природы. Модель представляет процесс через математические связи между тремя совокупностями переменных: переменными входа, переменными выхода и переменными состояния.

Переменные входа или выхода называются также входными или выходными сигналами. Часто для краткости говорят о входе или выходе и о состоянии.

Вход представляет в виде явных функций времени обобщенные внешние силы, действующие на процесс, динамику которого, т. е. поведение во времени, надлежит исследовать. Аналогично выход представляет непосредственно наблюдаемый ход процесса во времени. Вход и выход имеют причинно-следственную связь, однако в зависимости от природы процесса эта связь может быть сильной или слабой.

Отметим, что на протекание динамического процесса влияют не только приложенные в данный момент воздействия, но также могут оказывать влияния воздействия, которые были приложены ранее. В таких случаях говорится о наличии у динамического процесса памяти (рис. 1), в которой накапливаются последствия прошлых воздействий. Для характеристики этой памяти вводится понятие состояния процесса, т. е. совокупности числовых величин, полностью характеризующих последствия прошлых воздействий на процесс. В зависимости от природы процесса эта совокупность может иметь конечное число элементов (тогда и говорят о текущем состоянии или просто о состоянии процесса) или бесконечное число элементов, состоящих, например, из функций, определенных на некотором интервале времени $[t_0 - \tau, t_0]$ (тогда говорят об обобщенном состоянии).

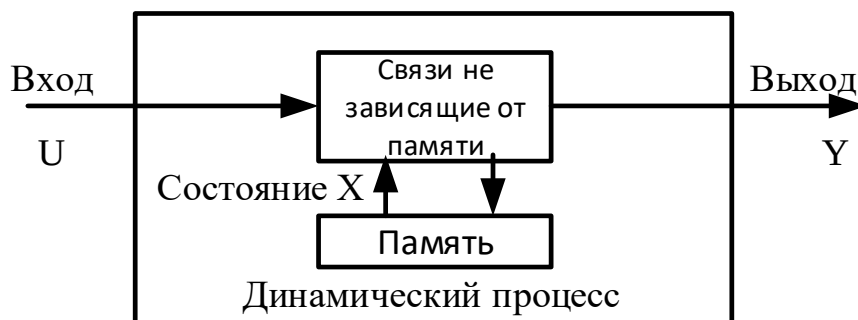


Рис. 1. Понятия входа, выхода и состояния динамического процесса

Знания состояния процесса (текущего или обобщенного) в момент времени t_0 , а также знания внешних воздействий, т. е. входа на интервале $[t_0, t_1]$, достаточно для определения выхода и состояния процесса на полуоткрытом интервале $[t_0, t_1]$.

2.1. Математические модели процессов

Управляемые процессы – это процессы, подвергающиеся целенаправленным воздействиям, а системы управления – это совокупность процессов и устройств для реализации целенаправленных воздействий на эти процессы.

Для анализа и синтеза систем управления необходимо знать их математические модели.

Выбор математической модели ОУ зависит:

- от свойств объекта;
- от назначения системы управления;
- от выполняемых системой управления функций;
- от задач, которые должна решить система управления.

К сожалению, для достаточно большого количества технологических систем ОУ не существует точного математического аппарата, позволяющего однозначно дать математическое описание. В таких случаях используют статические и динамические характеристики регулируемых объектов.

Статическими характеристиками технологических систем, ОУ или звеньев (узлов, блоков) называют зависимость:

$$y = f(x), \quad (1)$$

где y – выходная величина; x – входная величина.

Отметим, что при построении статических характеристик не учитывается изменения входных и выходных величин во времени, т. е. они позволяют определить состояние звеньев технологической системы, например, значения регулируемых параметров, положение регулирующих органов, расходы веществ или энергии и другие данные в установившемся состоянии.

Соответственно, динамические характеристики дают информацию о поведении звеньев технологической системы в переходных процессах или позволяют определить инерционные свойства объектов (систем, элементов систем). Такая информация является исходной для синтеза автоматических систем регулирования.

Для определения динамических и статических характеристик объектов технологических систем в некотором рабочем диапазоне (для разных задач такой диапазон может быть различным в одной технологической системе) используются экспериментальные методы (рис. 2).

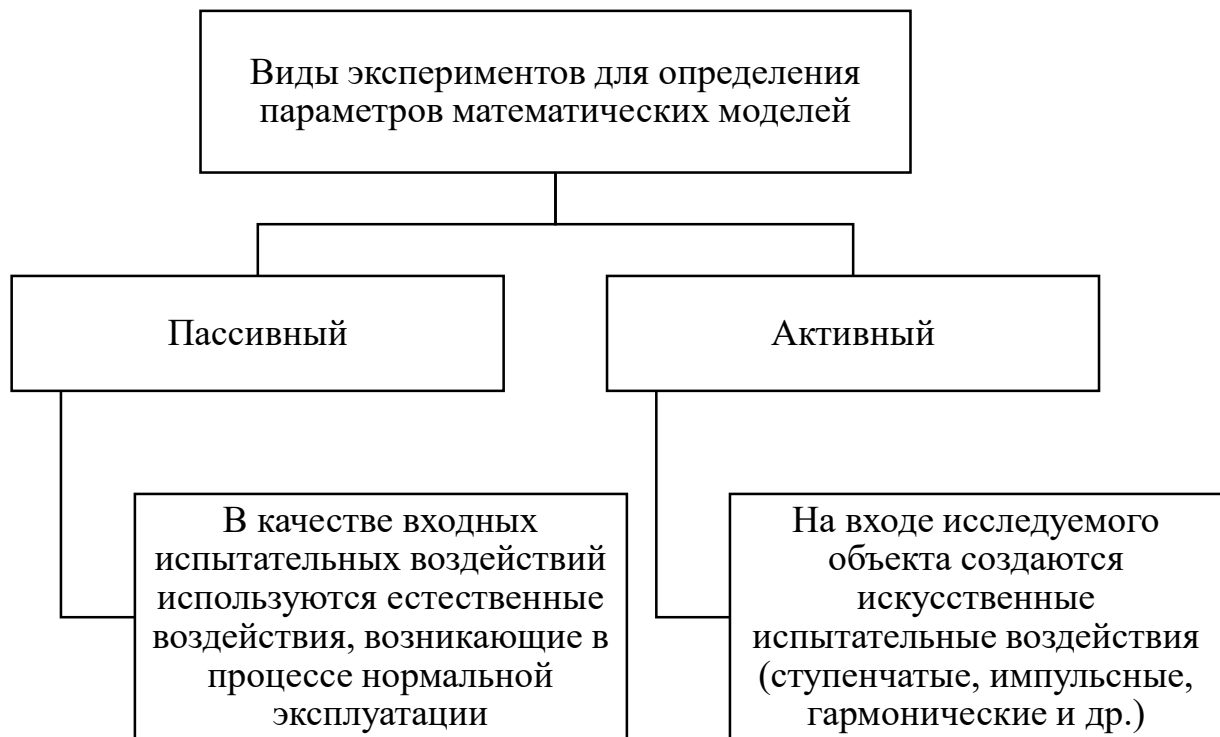


Рис. 2. Виды экспериментов для определения параметров математических моделей

На основе полученной информации о статических и динамических характеристиках объектов технологической системы для дальнейшего исследования поведения системы (математического моделирования) обычно используют аппарат, получивший название в теории автоматического управления (ТАУ) передаточные функции [3].

2.1.1. Определение передаточной функции объекта управления системы автоматического управления параметром

Алгоритм определения передаточной функции ОУ по динамической (разгонной) характеристике:

При подаче на вход ОУ ступенчатого воздействия в некоторых случаях изменяется входная величина (расход топлива, давление и т. д.), на выходе снимается переходная характеристика $h(t)$.

Алгоритм проведения активного эксперимента показан на рис. 3.



Рис. 3. Алгоритм проведения активного эксперимента

Эксперимент необходимо провести несколько раз, начиная приблизительно с одних и тех же значений регулируемой величины и изменяя на одну и ту же величину возмущающее воздействие.

На основе усредненных полученных данных строится разгонная кривая. По характеру изменения регулируемой величины определяется структура передаточной функции и ее параметры. Для большинства технических объектов передаточная функция ОУ может быть представлена в виде:

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-p \cdot \tau}}{p^n \cdot (T_i \cdot p + 1)^m}, \quad (2)$$

где $K = \frac{y(t)}{x(t)}$ – коэффициент усиления звена; n – порядок астатизма звена; T_i – постоянная времени; m – порядок апериодического звена.

2.1.2. Определение параметров объектов. Объект вида апериодическое звено

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-p \cdot \tau}}{p^n \cdot (T_i \cdot p + 1)^m} \stackrel{=0}{=} \stackrel{=1}{=} \frac{K}{T_i \cdot p + 1}. \quad (3)$$

График изменения регулируемой величины в этом случае будет иметь следующий вид (рис. 4):

$$y(t) = h(t) = K_0 \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)} \right). \quad (4)$$

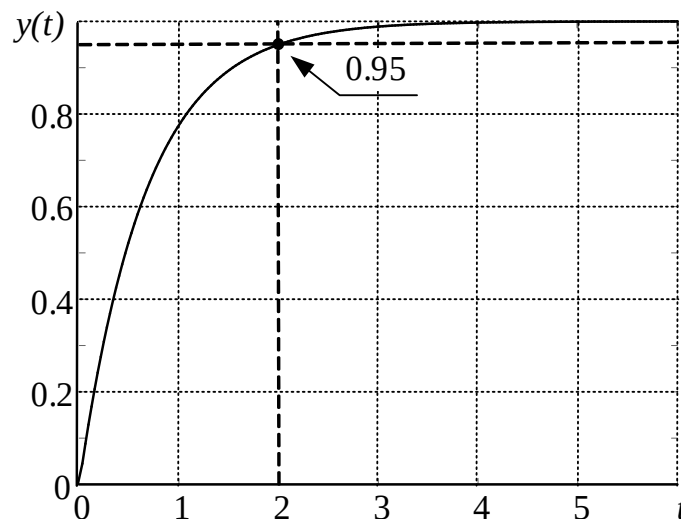


Рис. 4. График изменения регулируемой величины – объект апериодическое звено на ступенчатое воздействие

По рис. 4 можно непосредственно определить значения параметров T и K .

Считая, что время переходного процесса определяется временем вхождения графика переходного процесса в зону $(1 \pm 0.05) \cdot y(t \rightarrow \infty)$, из выражения (4) можно определить постоянную времени:

$$T = \frac{t_{\text{III}}}{\ln \left(1 - \frac{(1 \pm 0.05) \cdot y(t \rightarrow \infty)}{K} \right)} . \quad (5)$$

Из (5) можно определить соотношение между временем переходного процесса и постоянной времени апериодического звена:

$$\frac{t_{\text{III}}}{T} = -\ln(1 - 0.95) = 2.996 \approx 3$$

$$\Downarrow$$

$$t_{\text{III}} = T \cdot 2.996 \approx T \cdot 3 \quad (6)$$

Согласно (6), для графика переходного процесса, показанного на рис. 4, постоянная времени будет $T = \frac{2}{2.996} = 0.668$.

Коэффициент усиления K определяется отношением:

$$K = \frac{y(t \rightarrow \infty)}{u(t \rightarrow \infty)} \quad (7)$$

2.1.3. Определение параметров объектов. Объект вида апериодическое звено с запаздыванием

Разгонная кривая будет иметь следующий вид (рис. 5).

Переходная характеристика имеет вид:

$$y(t) = h(t) = K_0 \left(1 - e^{-\left(\frac{t-\tau}{T} \right)} \right), \quad t \geq \tau . \quad (8)$$

По рис. 5 можно непосредственно определить величины параметров τ , T и K_0 .

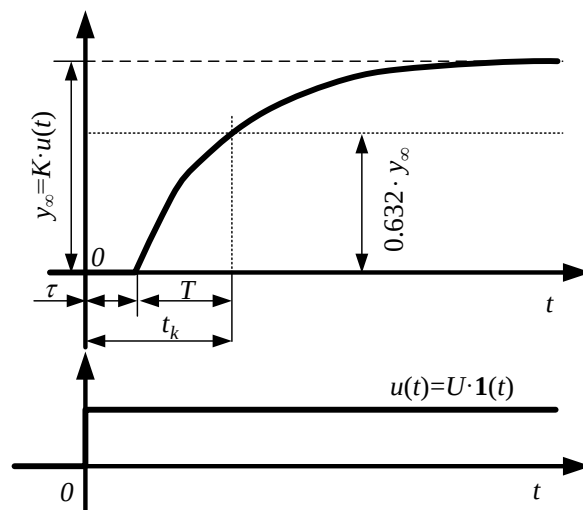


Рис. 5. Определение параметров объекта апериодическое звено с запаздыванием на ступенчатое воздействие

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-p \cdot \tau}}{p^n \cdot (T_i \cdot p + 1)^m} = \frac{K \cdot e^{-p \cdot \tau}}{T_i \cdot p + 1} \quad (9)$$

Время запаздывания τ – это интервал времени от момента подачи воздействия до момента, когда начинает нарастать сигнал $y(t)$. Следовательно, в течение этого интервала времени $u(t) \neq 0$, а $y(t) \equiv 0$.

Постоянная времени T – это время $t_k - \tau$, в течение которого $y(t)$ достигает величины $(1 - e^{-1}) \cdot y(\infty)$, что приблизительно равно 63,2% от установившегося значения $y(\infty)$.

Коэффициент усиления K_0 определяется отношением:

$$K_0 = \frac{y(\infty)}{u(\infty)}, \quad (10)$$

и, следовательно, отношением выхода ко входу в установившемся состоянии.

2.1.3.1. Определение передаточной функции объекта управления по управляющему воздействию

Экспериментальная кривая зависимости давления пара при изменении расхода топлива показаны на рис. 6.

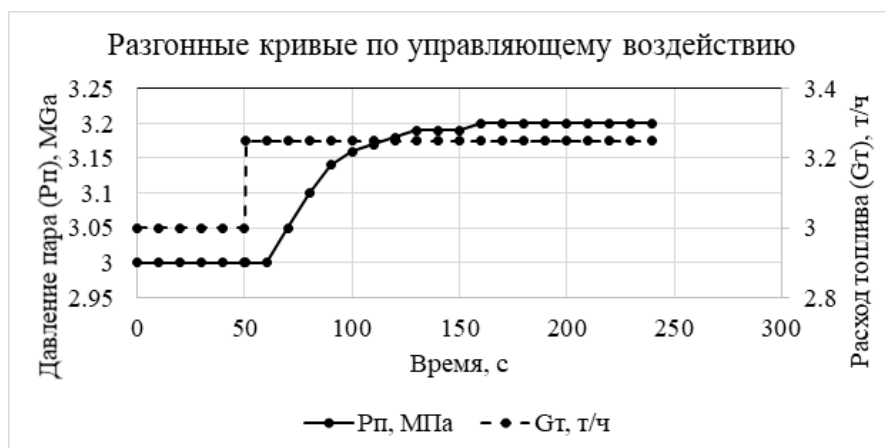


Рис. 6. Экспериментальная кривая зависимости давления пара при изменении расхода топлива

В качестве структуры математической модели объекта выбираем передаточную функцию вида (9):

Согласно методике (п. 0), определим параметры звена.

Для упрощения процесса определения параметров перепишем рис. 6 следующим образом (рис. 7):

- сместим график на 50 с влево, чтобы видеть только переходный процесс;

- сместим график 3 МПа, чтобы исследуемая кривая начиналась из «0».

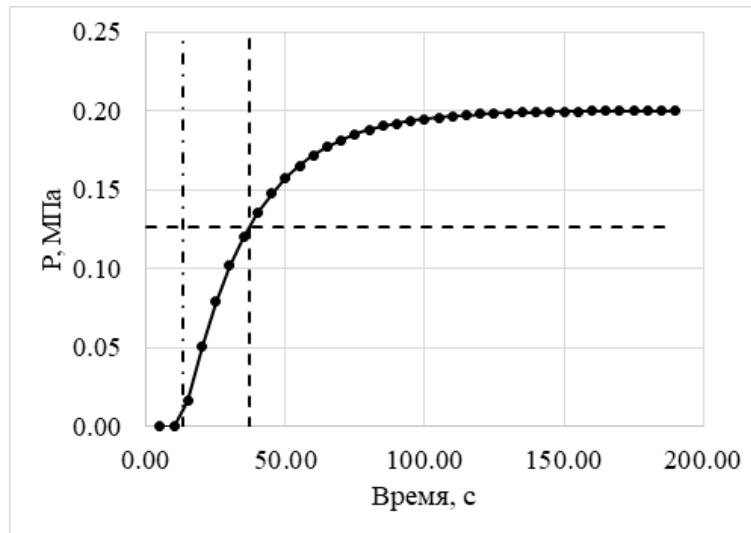


Рис. 7. Откорректированная кривая зависимости давления пара при изменении расхода топлива

Время запаздывания τ – это интервал времени от момента подачи воздействия до момента, когда начинает нарастать сигнал $y(t)$. Следовательно, в течение этого интервала времени $u(t) \neq 0$, а $y(t) \equiv 0$. Из рис. 7 следует $\tau=10$, с.

Постоянная времени T – это время $t_k - \tau$, в течение которого $y(t)$ достигает величины $(1 - e^{-1}) \cdot y(\infty)$, что приблизительно равно 63,2 % от установившегося значения $y(\infty)$. На рис. 7 показана линия на уровне $0,623 \cdot y(\infty) = 0,623 \cdot 0,2 = 0,1264$, место ее пересечения с кривой имеет координаты (40, 0,1264), следовательно $T = 40 - \tau = 40 - 10 = 30$, с.

Коэффициент усиления K_0 определяется отношением:

$$K_0 = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = \frac{0,2}{0,25} = 0,8. \quad (11)$$

Передаточная функция ОУ по управляющему воздействию, полученная по экспериментальной кривой, будет иметь вид:

$$W_{\text{ОУ}}(p) = \frac{P_{\text{ПБ}}(p)}{G_T(p)} = \frac{0,8 \cdot e^{-10p}}{30 \cdot p + 1}. \quad (12)$$

2.1.3.2. Определение передаточной функции объекта управления по возмущающему воздействию

Экспериментальная кривая зависимости давление пара при изменении расхода топлива показана на рис. 8:

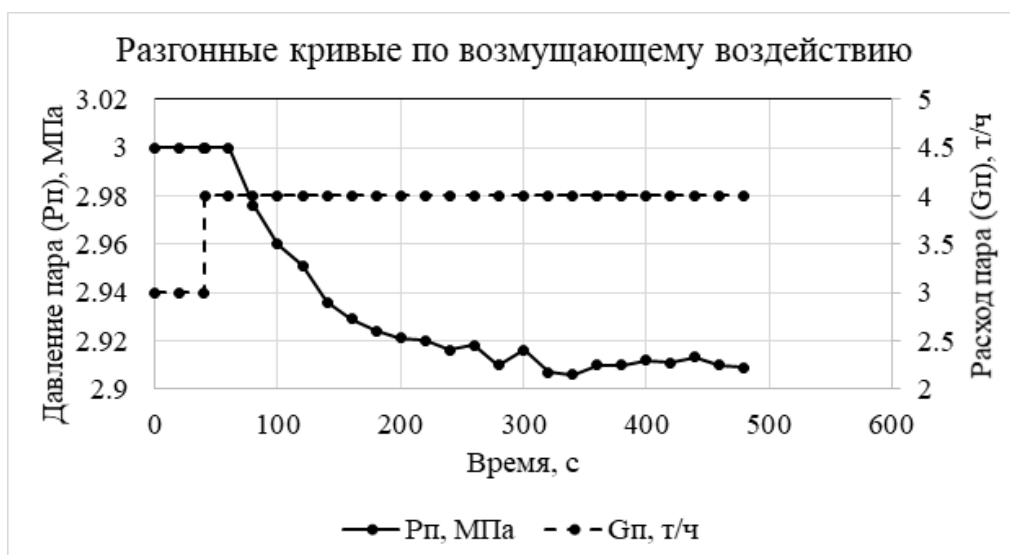


Рис. 8. Экспериментальная кривая зависимости давления пара при изменении расхода пара

В качестве структуры математической модели объекта можно также выбрать передаточную функцию.

Для упрощения процесса определения параметров на основе данных перепишем рис. 8 следующим образом (рис. 9):

- сместим график на 50 с влево, чтобы видеть только переходный процесс;
- сместим график 3 МПа, чтобы исследуемая кривая начиналась из «0».

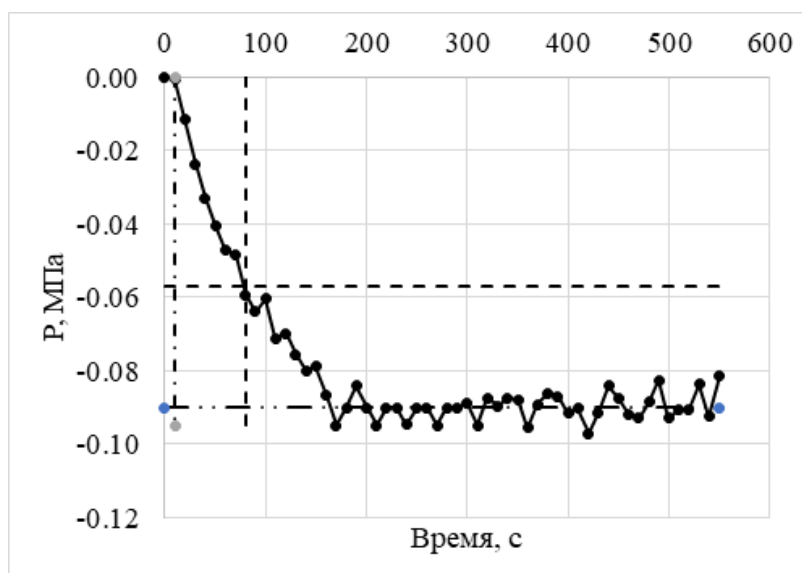


Рис. 9. Откорректированная кривая зависимости давления пара при изменении расхода пара

Из рис. 9 следует:

- время запаздывания $\tau = 10$, с;
- постоянная времени $T = 80 - \tau = 80 - 10 = 70$, с.

– коэффициент усиления $K_0 = y(\infty)/u(\infty) = 0.09/1 = 0.09 \left[\frac{\text{МПа}}{\text{Т/Ч}} \right]$.

Передаточная функция ОУ по управляющему воздействию, полученная по экспериментальной кривой, будет иметь вид:

$$W_{\text{ОУ}}(p) = \frac{P_{\text{ПБ}}(p)}{G_{\text{П}}(p)} = \frac{-0.09 \cdot e^{-10p}}{80 \cdot p + 1}. \quad (13)$$

2.1.4. Определение параметров объектов. Объект вида интегрирующее звено с запаздыванием

Дифференциальное уравнение:

$$T \cdot \dot{y}(t) = k \cdot (t - \tau), \quad y(0) = 0. \quad (14)$$

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{1 \cdot e^{-p\tau}}{T \cdot p} = \frac{k \cdot e^{-p\tau}}{p} \quad (15)$$

Разгонная кривая будет иметь следующий вид:

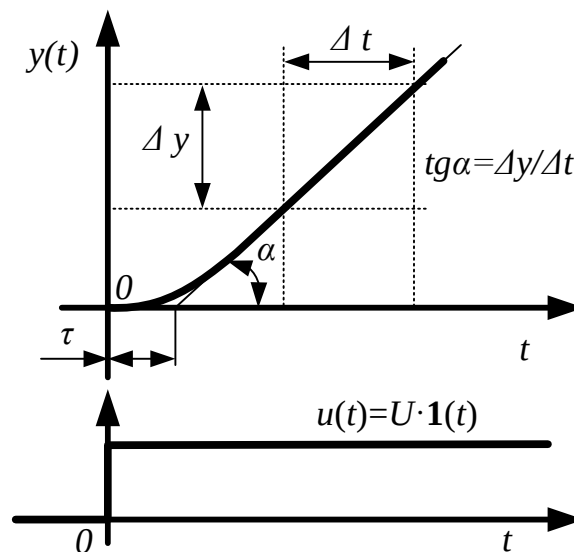


Рис. 10. Определение параметров объекта интегрирующее звено с запаздыванием

Коэффициент усиления K_0 определяется отношением:

$$K_0 = \frac{\Delta y / \Delta u|_{u(t) \neq 1}}{\Delta t}. \quad (16)$$

Постоянная времени определяется как обратная величина коэффициента усиления:

$$T = 1/K_0, \text{ с.} \quad (17)$$

2.1.4.1. Определение передаточной функции объекта управления по управляющему воздействию

Для получения экспериментальной кривой принудительно был увеличен расход топлива на 5 м³/ч, начиная с 50 секунды снятия графика, полученная кривая представлена на рис. 11. Через 150 секунд расход был возвращен на рабочий уровень.

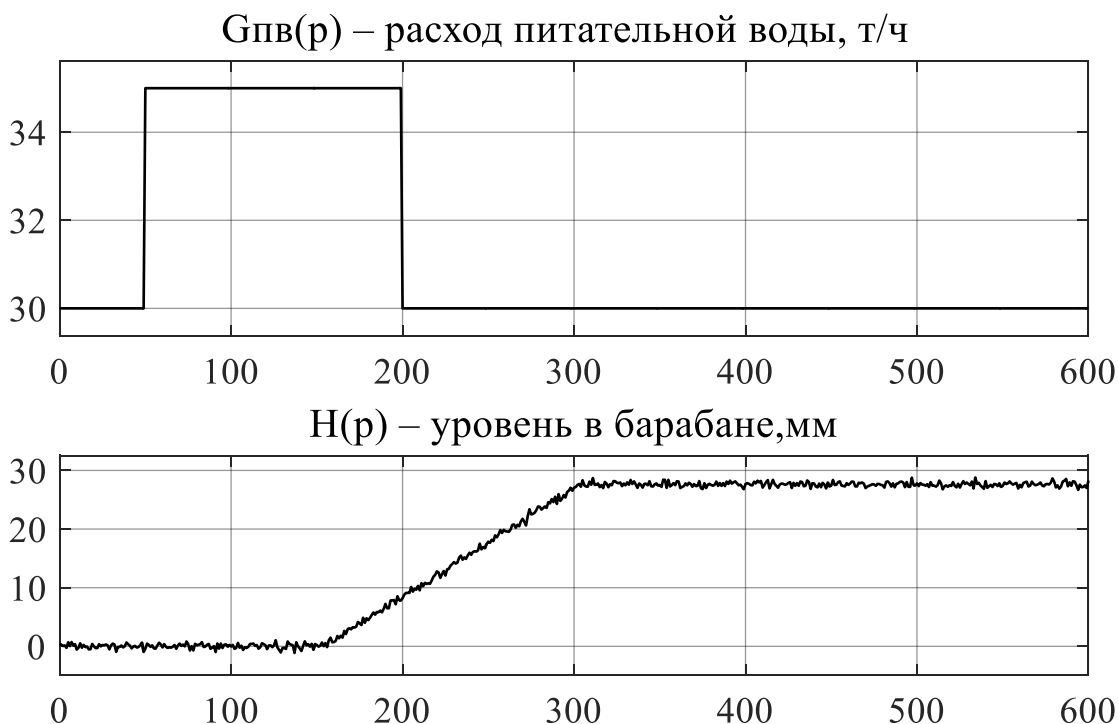


Рис. 11. Экспериментальная кривая регулирования уровня воды в барабане котла

В качестве структуры математической модели объекта можно выбрать передаточную функцию следующего вида интегрирующего звена:

$$W(p) = \frac{e^{-\tau \cdot p}}{T \cdot p} = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{p}. \quad (18)$$

Для упрощения процесса определения параметров на основе данных таблицы перепишем рис. 11 следующим образом (рис. 12):

- сместим график на 50 с влево, чтобы видеть только переходный процесс;
- рассматриваться будет только участок роста уровня воды.

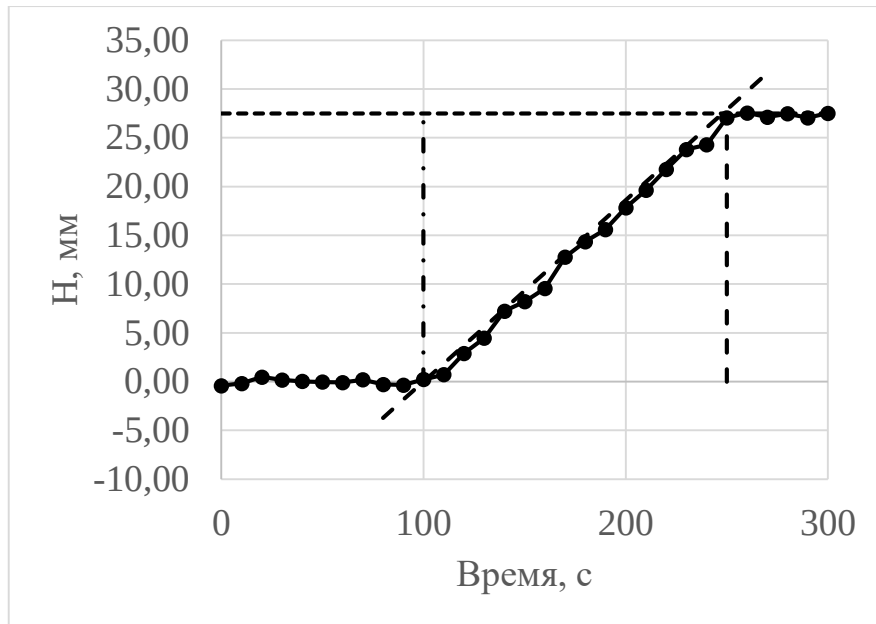


Рис. 12. Откорректированная кривая зависимости температуры пара от расхода топлива

Для определения параметров объекта воспользуемся рис. 10.

Из рис. 12 следует:

- Коэффициент усиления K_0 определяется отношением:

$$K_0 = \frac{\Delta y / \Delta u|_{u \neq 1}}{\Delta t} = \frac{28/5}{150} = 0,0372 \left[\frac{\text{мм}}{\text{с}} \right]. \quad (19)$$

- Время запаздывания $\tau = 100$, с.
- Постоянная времени $T = 1/K = 1/0,0372 = 27$, с.

Передаточная функция ОУ по управляющему воздействию, полученная по экспериментальной кривой, будет иметь вид:

$$W_{\text{ОУ}}(p) = \frac{H(p)}{G_{\text{ПВ}}(p)} = \frac{0,0372 \cdot e^{-100p}}{p}. \quad (20)$$

2.1.4.2. Определение передаточной функции объекта управления по возмущающему воздействию

Для получения экспериментальной кривой принудительно увеличен расход топлива на 1 т/ч, начиная с 50 секунды снятия графика, полученная кривая представлена на рис. 13.

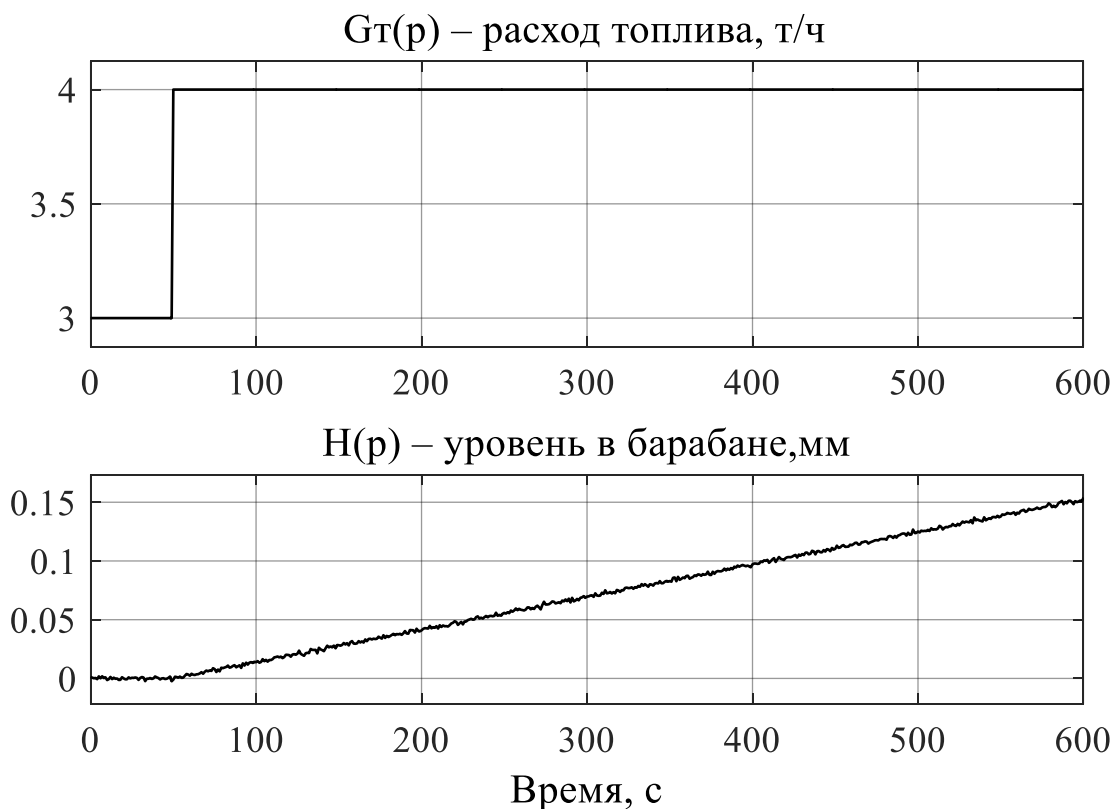


Рис. 13. Экспериментальная кривая уровня воды
в зависимости от расхода топлива

В качестве структуры математической модели объекта можно выбрать передаточную функцию следующего вида интегрирующего звена:

$$W(p) = \frac{1}{T \cdot p} = \frac{K}{p}. \quad (21)$$

Для определения параметров объекта воспользуемся рис. 10, приняв время запаздывания $\tau=100$, с.

Для упрощения процесса определения параметров на основе данных таблицы перепишем рис. 13 следующим образом (рис. 14):

- Сместим график на 50 с влево, чтобы видеть только переходный процесс.

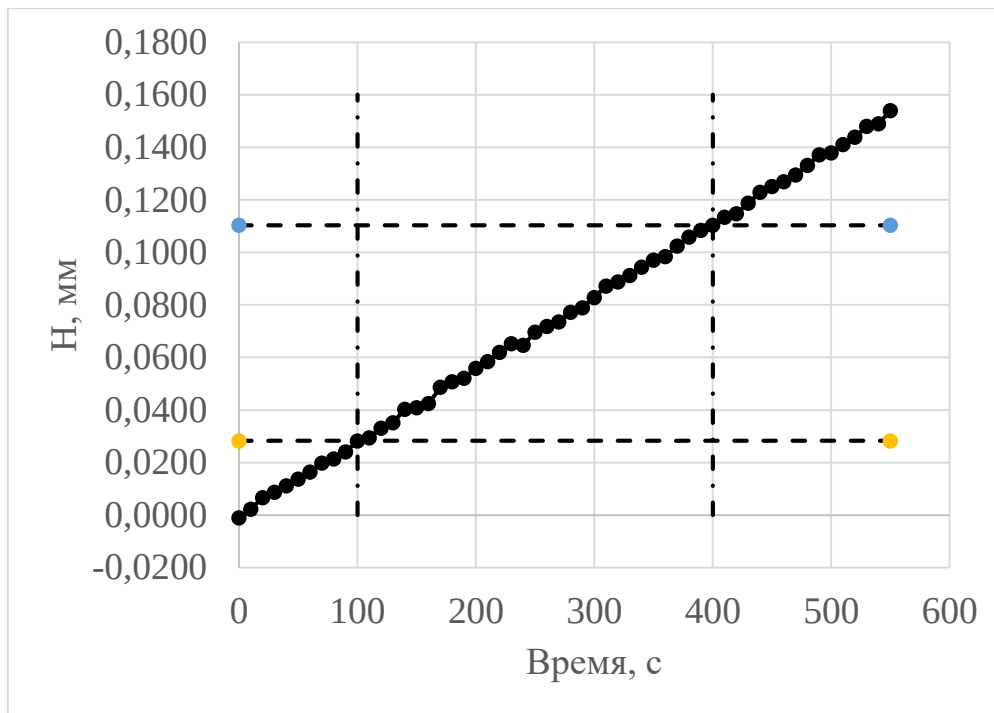


Рис. 14. Откорректированная кривая зависимости температуры пара от степени открытия дроссельной поворотной заслонки

Из рис. 14 следует:

- Коэффициент усиления K_0 определяется отношением

$$K_0 = \frac{\Delta y / \Delta u|_{u \neq 1}}{\Delta t} = \frac{0,1103 - 0,0283 / 1}{300} = 0,000274 \left[\frac{\text{мм}}{\text{с}} \right] \quad (22)$$

- Постоянная времени $T = 1/K = 1/0,000274 = 3656$, с.

Передаточная функция ОУ по управляющему воздействию, полученная по экспериментальной кривой, будет иметь вид:

$$W_{OY}(p) = \frac{H(p)}{G_T(p)} = \frac{0,000274}{p}. \quad (23)$$

2.2. Понятие замкнутого контура автоматического управления параметром

Замкнутый контур управления состоит из объекта управления, регулятора и исполнительного устройства (рис. 15).



Рис. 15. Замкнутый контур автоматического управления

На рис. 16 показан пример замкнутого контура автоматической системы регулирования (САР) давления пара.

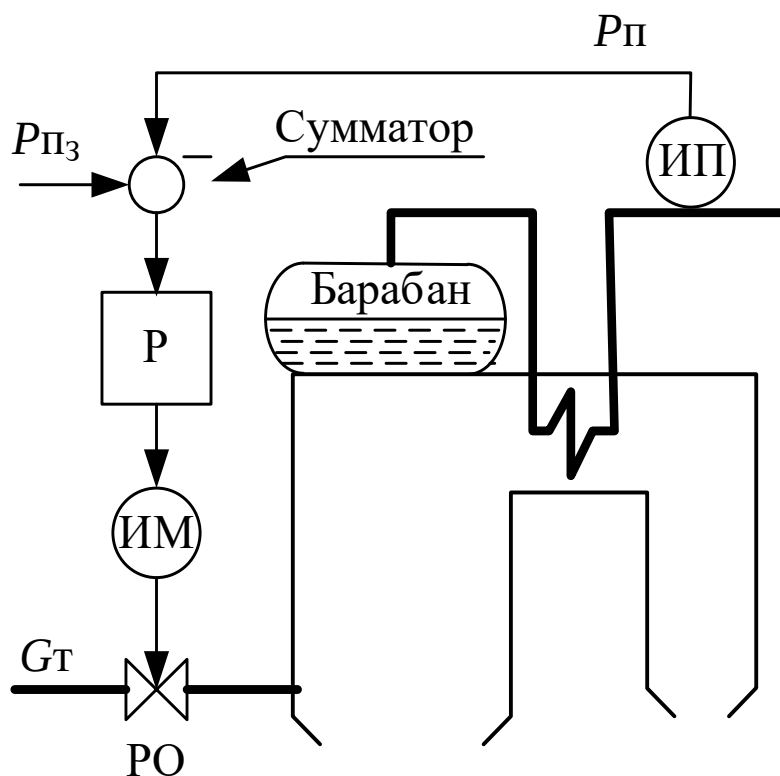


Рис. 16. Замкнутый контур автоматической системы регулирования давления пара

На рис. 16. давление пара, значение которого измерено измерительным преобразователем (ИП), поддерживает регулятор давления (Р), воздействующий на регулирующий орган (РО) через исполнительный механизм (ИМ), обеспечивающий требуемую подачу топлива.

Структурная схема замкнутого контура управления показана на рис. 17.

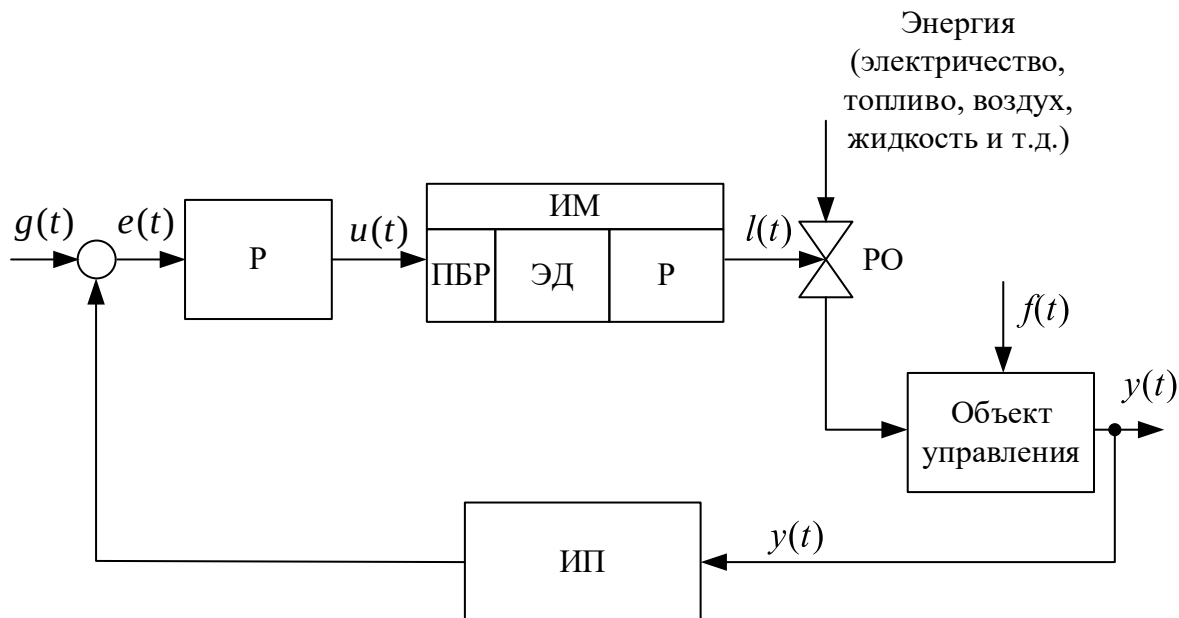


Рис. 17. Структурная схема замкнутого контура системы автоматического регулирования

Для реализации процесса управления в САУ используют следующие технические устройства (рис. 18).

Устройства, показанные на рис. 18, и ОУ являются элементами САУ (в ряде технологических систем часть устройств могут быть физически объединены в один конструктивно законченный блок, например, в блок процессора могут быть объединены сумматор и регулятор, а регулирующий орган может поставляться совместно с исполнительным механизмом).



Рис. 18. Технические устройства САУ

Воздействия (информация) передаются от одного устройства к другому только в одном направлении сигналами различной физической природы: механической, пневматической, электрической, информационной:

- регулируемая величина $y(t)$ является:
 - выходной переменной объекта управления;
 - входным воздействием для измерительного устройства.
- сигнал ошибки является:
 - выходной величиной сумматора, где выполняется арифметическое действие:

$$e(t) = K_3 \cdot g(t) - K_{иу} \cdot y(t), \quad (24)$$

где $K_{иу}$ – коэффициент передачи измерительного устройства;
 K_3 – коэффициент передачи задатчика управляемого сигнала.

- входным воздействием на регулятор.
- управляющее воздействие $u(t)$ является:
 - выходной переменной регулятора;
 - входной величиной исполнительного механизма.
- сигнал управления регулирующим органом $l(t)$ является:
 - выходной переменной исполнительного механизма;
 - входной величиной регулирующего органа.
- величина расхода среды или энергии является:
 - выходной регулирующего органа;
 - входной величиной объекта управления.
- возмущающее воздействие $f(t)$ является вторым входным воздействием для объекта управления.

Цель работы замкнутого контура – обеспечить равенство выходной величины замкнутого контура (объекта управления) заданному значению $g(t)$ или минимизации величины ошибки:

$$g(t) = y(t) \quad \text{или} \quad (25)$$

$$e(t) = g(t) - y(t) \rightarrow 0$$

2.2.1. Определение передаточной функции замкнутой системы по задающему воздействию

На рис. 19 приведена структурно-аналитическая схема САУ [3].

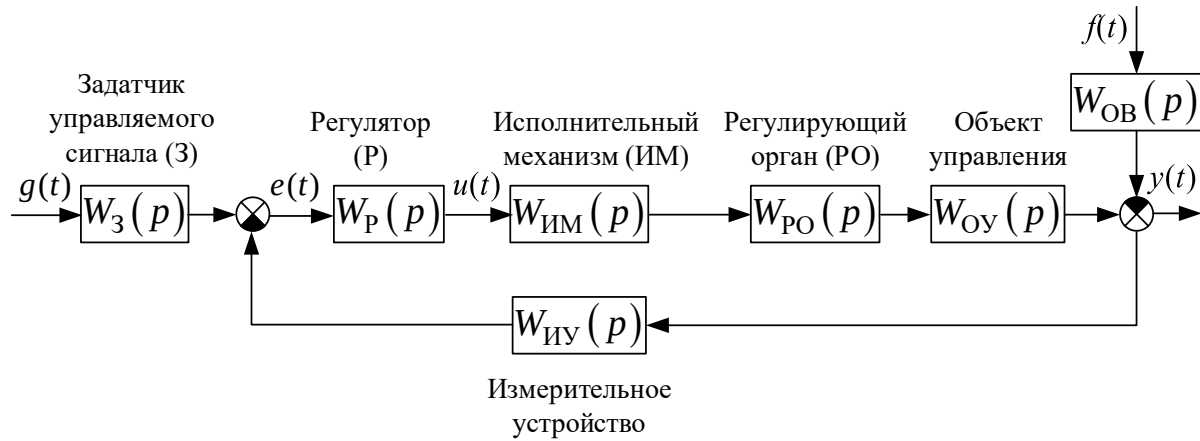


Рис. 19. Структурно-аналитическая схема САУ

Объект управления описывается уравнением:

$$y(t) = W_{ОУ}(p) \cdot u(t) - W_{ОВ}(p) \cdot f(t). \quad (26)$$

На рис. 19 введены следующие обозначения: $y(t)$ – регулируемая величина; $W_{ОУ}(p)$ – передаточная функция объекта по управляющему воздействию; $W_{ОВ}(p)$ – передаточная функция объекта по возмущающему воздействию.

Для определения передаточной функции САУ по задающему воздействию приравняем возмущающее воздействие $f(p) = 0$ [3].

$$W_{ЗАМ_{УПР}}(p) = \frac{Y(p)}{G(p)} = \frac{W_{ПП}(p)}{1 + W_{ПП}(p) \cdot W_{ОС}(p)} \quad (27)$$

где $W_{ПП}(p) = W_P(p) \cdot W_{ИМ}(p) \cdot W_{РО}(p) \cdot W_{ОУ_{УПР}}(p)$ – передаточная функция прямого пути; $W_{ОС}(p) = W_{ИУ}(p)$ – передаточная функция обратного пути.

$$\begin{aligned} W_{ЗАМ_{УПР}}(p) &= \\ &= W_3(p) \cdot \frac{W_P(p) \cdot W_{ИМ}(p) \cdot W_{РО}(p) \cdot W_{ОУ_{УПР}}(p)}{1 + W_P(p) \cdot W_{ИМ}(p) \cdot W_{РО}(p) \cdot W_{ОУ_{УПР}}(p) \cdot W_{ИУ}(p)} \end{aligned} \quad (28)$$

2.2.2. Определение передаточной функции замкнутой системы по каналу возмущения

Для определения передаточной функции по возмущающему воздействию преобразуем структурно-аналитическую схему САУ (рис. 19) следующим образом (рис. 20) и считаем управляющее воздействие равным нулю $u(p) = 0$ [3]:

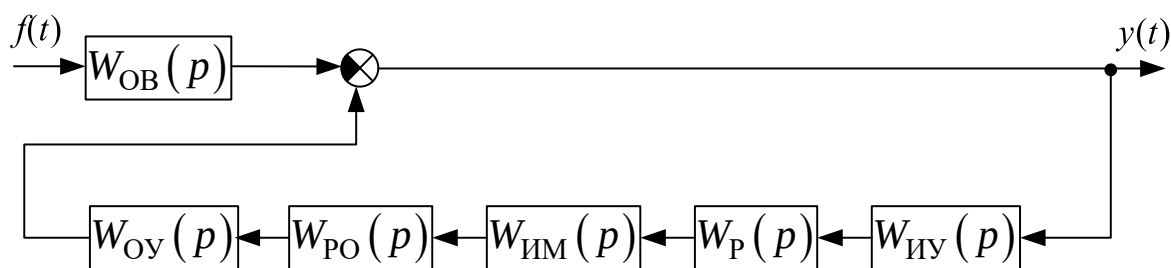


Рис. 20. Структурно-аналитическая схема САУ по каналу возмущения

$$W_{\text{ЗАМ}_{\text{ВОЗМ}}}(p) = \frac{Y(p)}{F(p)} =$$

$$= -W_{\text{ОБ}_{\text{ВОЗМ}}}(p) \cdot \frac{1}{1 + W_P(p) \cdot W_{\text{ИМ}}(p) \cdot W_{\text{РО}}(p) \cdot W_{\text{ОУ}_{\text{ВОЗМ}}}(p) \cdot W_{\text{ИУ}}(p)} \quad (29)$$

2.3. Определение передаточных функций измерительных устройств и задатчиков управляемого сигнала

Во время протекания технологического процесса необходимо производить измерение величин, характеризующих его состояние, а также тех величин, которые необходимо регулировать. К таким величинам относят:

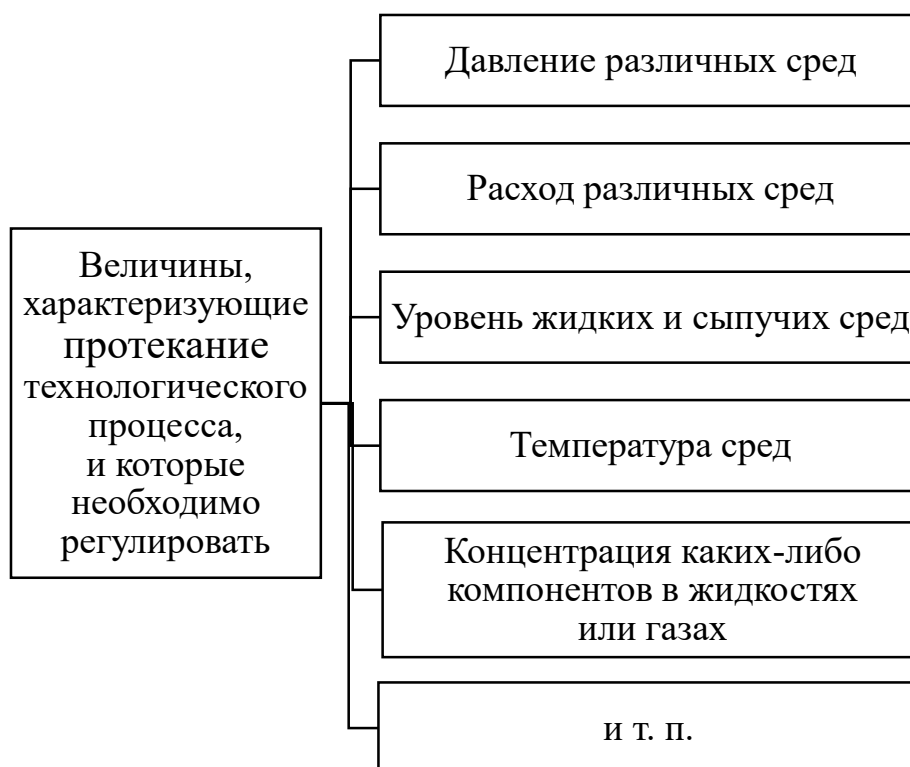


Рис. 21. Величины, характеризующие протекание технологического процесса

Для измерения этих величин выпускаются различные контрольно-измерительные приборы (рис. 22).

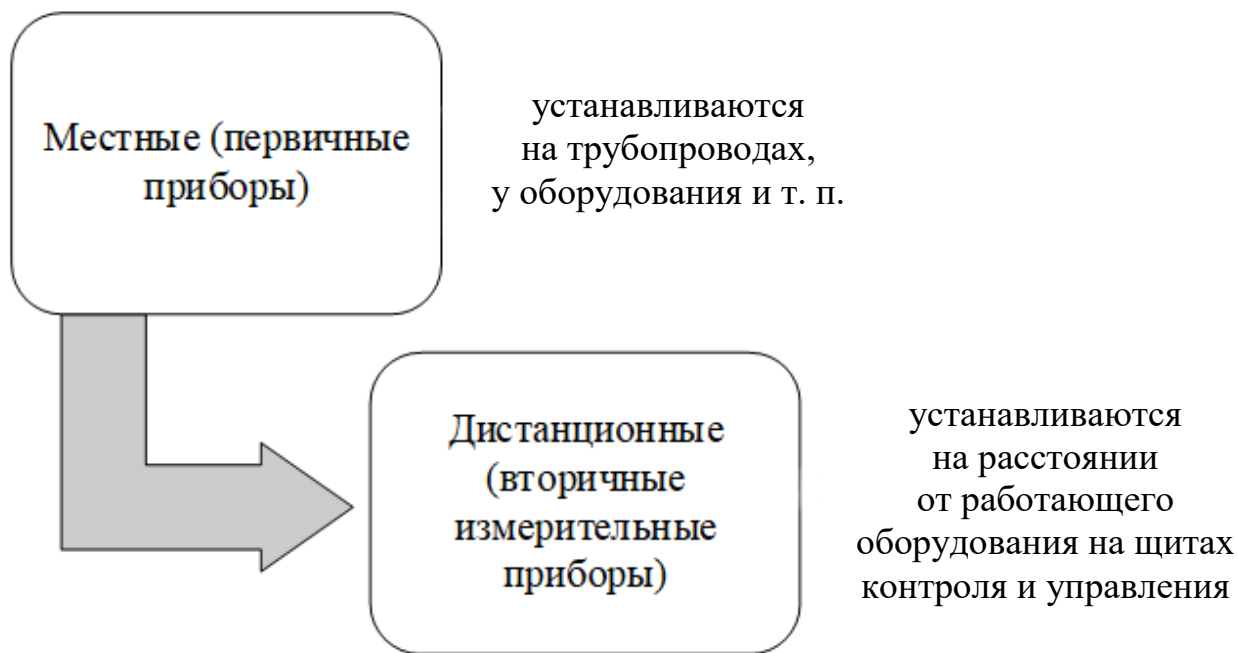


Рис. 22. Контрольно-измерительные приборы

К местным (первичным приборам) относят датчики с преобразователями различного типа для передачи информации на расстояние к вторичным измерительным приборам и регуляторам.

В настоящее время выпускаются датчики с унифицированными нормированными выходными сигналами. В качестве унифицированных сигналов чаще используются токовые сигналы (0-5 мА; 4-20 мА). В последнее время появились датчики, передающие данные по цифровым интерфейсам (RS-485, CAN и др.).

Учитывая, что датчики имеют минимальную инерционность, которая по сравнению с другими постоянными времени объектов САУ в десятки раз меньше, можно использовать безынерционное звено.

Параметры коэффициента передачи звена определяются как отношение выходного сигнала к входному, например, если датчик температуры имеет диапазон измерения и преобразования температур: $-40 \dots +800$ °С, а выходной сигнал 4–20 мА, то

$$K_{\text{дт}} = \frac{I_{\text{дт}}(p)}{\Theta(p)} = \frac{4 \dots 20}{-40 \dots 800} = \frac{20 - 4}{800 - (-40)} = 0.019 \left[\frac{\text{мА}}{^{\circ}\text{С}} \right] \quad (30)$$

Задатчик управляемого параметра, чаще всего имеет коэффициент передачи, равный коэффициенту передачи датчика

$$K_{\text{зи}} = K_{\text{д}_i} \quad (31)$$

2.4. Регулирующие органы и исполнительные механизмы

Для регулирования подачи сред (потоков энергии) на объект управления пропорционально управляющему воздействию используют регулирующие органы (РО) (рис. 23):



Рис. 23. Виды регулирующих органов

Виды регулирующих органов:

- дроссельные;
- насосы-дозаторы;
- насосы с частотно-управляемыми электроприводами;
- насосы и вентиляторы с регулируемым гидромуфтами;
- тягодутьевые устройства с регулируемым направляющими аппаратами вентиляторов.

Все эти устройства являются самостоятельными, достаточно сложными агрегатами. Выпускаются они с собственными системами регулирования.

Для регулирования режимов работы электрических печей и электронагревателей используют вентильные или трансформаторные преобразователи для плавного регулирования напряжения или электрические реле для дискретного включения и выключения тепловыделяющих элементов нагревателей.

Для регулирования подачи материальных и тепловых потоков: расходов жидкости, пара, газа, воздуха – применяют дроссельные регулирующие органы [5].

2.4.1. Дроссельный регулирующий орган (РО)

Дроссельный регулирующий орган – это арматура на технологических трубопроводах с изменяемым сопротивлением истечению газового, парового или жидкого потока среды (рис. 24), которая в свою очередь разделяется на:

- закрывающую арматуру (рис. 24а) – имеет только два рабочих состояния:
 - полностью открыто;
 - полностью закрыто.
- регулиющую арматуру (рис. 24б) – предназначена для установки требуемого расхода среды.

Закрывающая аппаратура приводится в действие клапанами (электромагнитными, пневматическими или гидравлическими).

Закрывающую аппаратура обычно применяют в системах защиты или в схемах, где возможно регулирование по принципу включено / выключено, например, совместно с релейными (позиционными) регуляторами.

Большее распространение получила регулирующая арматура с электрическими приводными устройствами моторного типа исполнительными механизмами (ИМ) (рис. 24б).

Основными требованиями к регулирующему органу в САР является:

- однозначность установки расхода регулируемого материального и теплового потока;
- отсутствие инерции.

$$W_{PO} = \frac{G(p)}{l(p)} = K_{PO}, \quad (32)$$

где $G(p)$ – расход среды; $l(p)$ – ход штока исполнительного механизма (степень открытия РО).

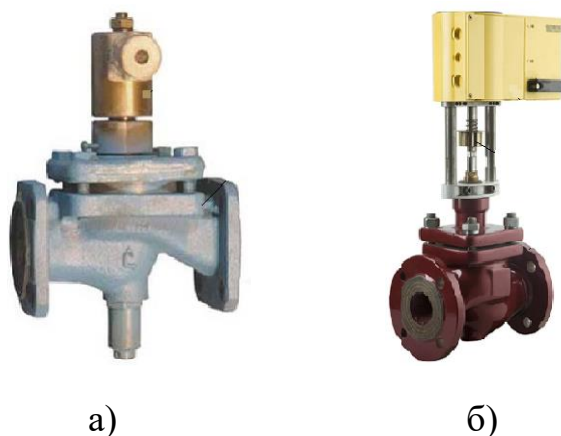


Рис. 24. Виды арматуры:
а – закрывающая; б – регулирующая

Однако в ряде случаев применяют РО с параболическими и логарифмическими характеристиками (рис. 25).

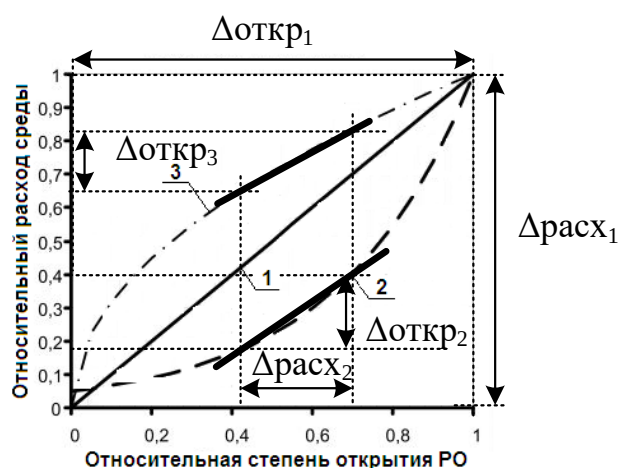


Рис. 25. Виды стандартных расходных характеристик
регулирующих органов:
1 – линейная характеристика; 2 – параболическая
характеристика; 3 – логарифмическая характеристика

В случае линейного типа характеристики РО (рис. 25.1) коэффициент передачи можно определить:

$$K_{PO\ 1} = \frac{\Delta \text{расх}_1}{\Delta \text{откр}_1}. \quad (33)$$

Если РО имеет параболические и логарифмические характеристики, то определяется рабочий диапазон отклонений РО и определяется коэффициент передачи [2]:

$$K_{PO\ 2} = \frac{\Delta \text{расх}_2}{\Delta \text{откр}_2}, \quad (34)$$

$$K_{PO\ 3} = \frac{\Delta p_{асх_2}}{\Delta p_{откр_3}}, \quad (35)$$

где степень открытия может быть принята в относительных единицах или процентах.

2.4.2. Регулирование производительности вентиляторов и дымососов

Существуют следующие способы регулирования производительности вентиляторов и дымососов (рис. 26) [5].

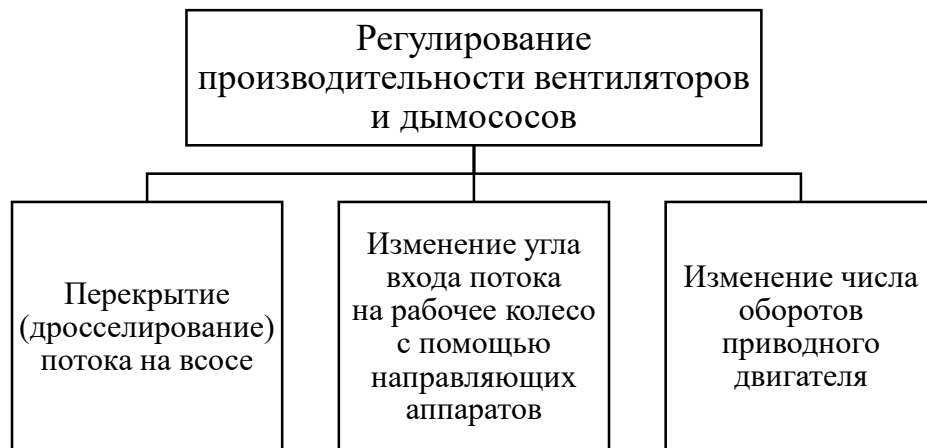


Рис. 26. Способы регулирования производительности

Указанные способы отличаются по потребляемой мощности (рис. 27) [11].

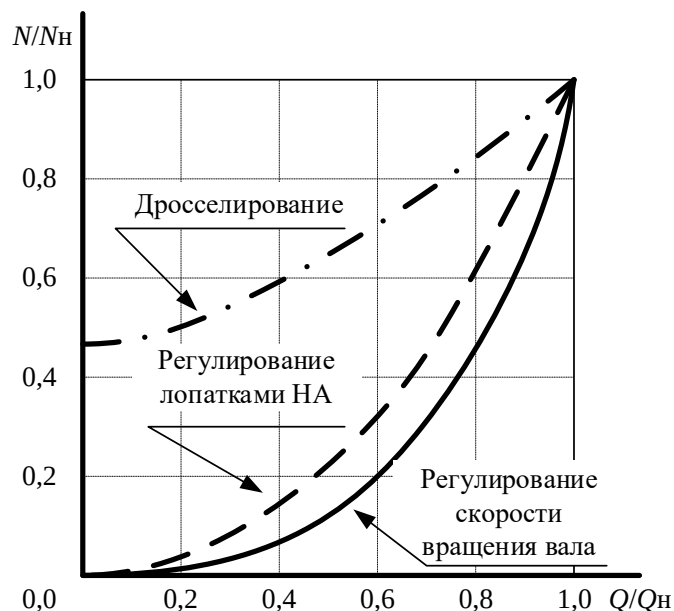


Рис. 27. Относительное потребление мощности электродвигателем дымососов (N/N_n) и вентиляторов при разных способах регулирования производительности (Q/Q_n)

2.4.2.1. Дроссельное регулирование

Характеризуется:

- относительной простотой реализации самым;
- высокой надежностью;
- широким диапазоном регулирования
- низкой экономичностью.

Для регулирования производительности используют поворотную дроссельную заслонку или шибер, тем самым перекрывают воздушный тракт.

Перекрываемый воздушный тракт создает дополнительное сопротивление работе вентиляторов и дымососов, что увеличивает момент сопротивления приводных электродвигателей на преодоления которого дополнительно расходуется энергия (рис. 27 – штрих пунктирная линия).

Используется достаточно редко.

2.4.2.2. Изменение угла входа потока на рабочее колесо с помощью направляющих аппаратов

Является более экономичным способом регулирования (рис. 27 – пунктирная линия).

Для регулирования производительности изменяют угол входа потока воздуха на рабочее колесо вентиляторов и дымососов (рис. 28).

Диапазон регулирования приходится только на первую половину хода направляющих аппаратов в пределах поворота лопаток $10-70^\circ$.

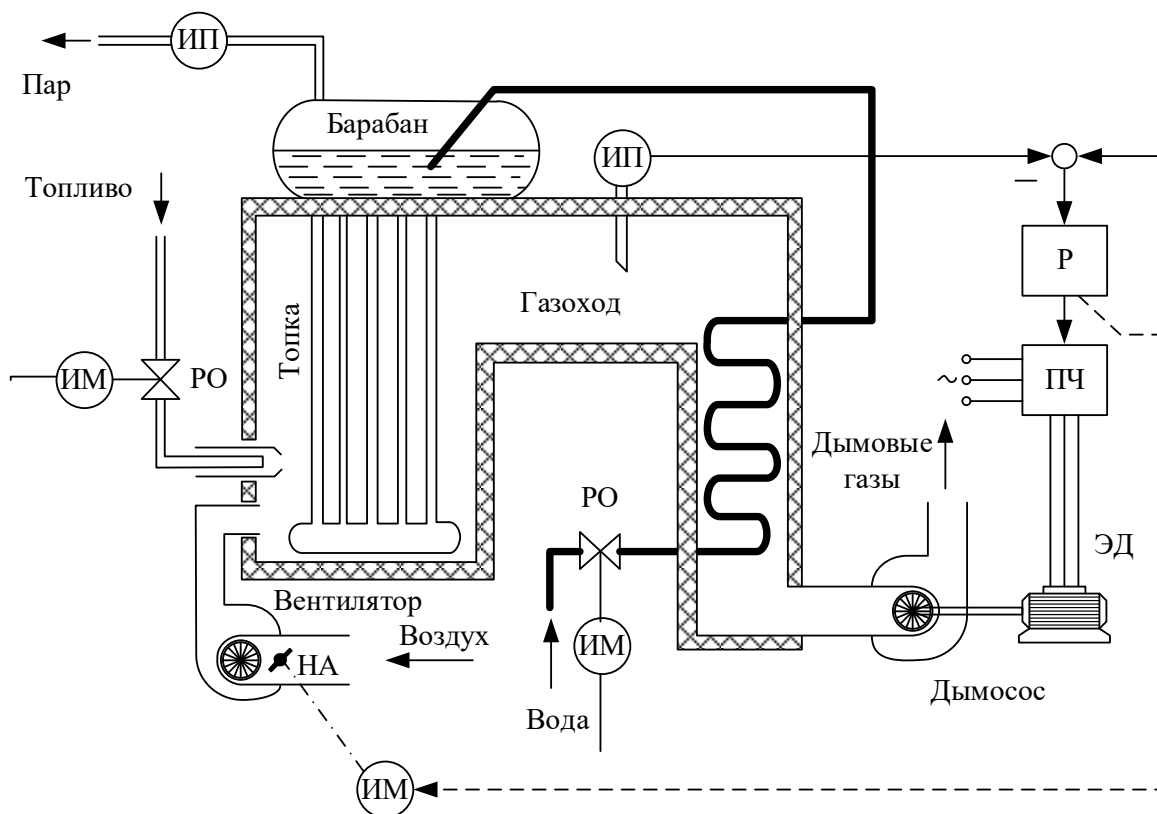


Рис. 28. Функциональная схема управления разрежением в верхней части топки

- электродвигателем дымососа преобразователем частоты;
 - - - - с помощью направляющего аппарата

Пример рабочей расходной характеристики направляющего аппарата показана на рис. 29.

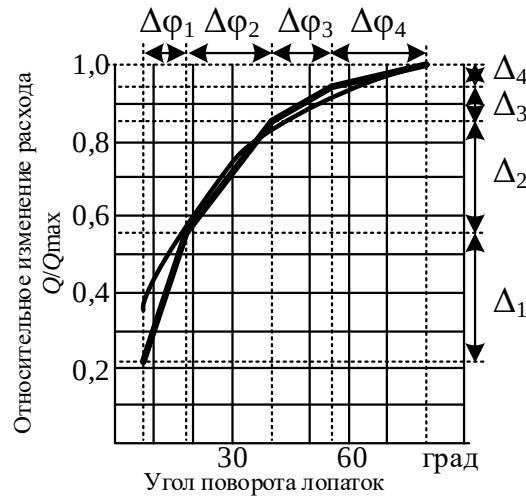


Рис. 29. Пример рабочей расходной характеристики направляющего аппарата

Направляющий аппарат является РО и соответственно должен однозначно устанавливать расход и не иметь инерции. Следовательно передаточная функция НА будет иметь вид безынерционного звена

$$W_{\text{НА}} = \frac{Q(p)}{\varphi(p)} = K_{\text{НА}}, \quad (36)$$

где $Q(p)$ – изменение расхода воздуха; $\varphi(p)$ – угол поворота лопаток НА.

Учитывая нелинейность рабочих характеристик направляющего аппарата, коэффициент передачи можно определить, используя метод кусочной аппроксимации:

$$K_{\text{НА}} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{\Delta_i}{\Delta\varphi_i}}{m} \quad (37)$$

2.4.2.3. Регулирование производительности тягодутьевых машин за счет изменения числа оборотов вала машины

Для изменения производительности вентиляторов и дымососов изменяют скорость вращения их рабочих колес, применяя частотное регулирование с использованием преобразователей частоты (ПЧ).

Учитывая, что в режимах минимальной тяги теперь снижается частота вращения вала АД, то будет снижаться потребляемая мощность (рис. 27 – сплошная линия) [11].

Функциональная схема системы регулирования разрежением в верхней части топки при изменении частоты вращения вала дымососа показана на рис. 28.

Определим передаточные функции преобразователя частоты (ПЧ), электродвигателя (ЭД) и насоса (Н) (рис. 28).

Передаточная функция частотного преобразователя описывается апериодическим звеном:

$$W_{\text{ЧП}}(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{\gamma(p)}{I_y(p)} = \frac{K_{\text{ЧП}}}{T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1}, \quad (38)$$

где $K_{\text{ЧП}}$ – коэффициент передачи частотного преобразователя;

$T_{\text{ЧП}}$

– постоянная времени частотного преобразователя, 0.005... 0.07 с; $\gamma = U/U_H$ –

относительное напряжение питания электродвигателя;

U – текущее

напряжение, подаваемое ПЧ на электродвигатель;

U_H –

номинальное напряжение электродвигателя;

I_y

– выходной сигнал регулятора в диапазоне, например 4...16мА.

$$K_{\text{ЧП}} = \frac{0...1}{4...20} = \frac{1}{16} = 0.0625 \quad (39)$$

Передаточная функция электрического двигателя описывается апериодическим звеном первого порядка:

$$W_{\text{ЭД}}(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{\omega_{\text{ЭД}}(p)}{\gamma(p)} = \frac{K_{\text{ЭД}}}{T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1}, \quad (40)$$

где $K_{\text{ЭД}}$ – коэффициент передачи электродвигателя; $T_{\text{ЭД}}$ – постоянная времени электродвигателя; $\omega_{\text{ЭД}}$ – частота вращения вала электродвигателя:

$$K_{\text{ЭД}} = \frac{\omega_{\text{ЭД}}(p)}{\gamma(p)} \quad (41)$$

Считается, что двигатель средней мощности разгоняется до номинальной скорости за 2.5...3.9 с. Из (6) следует, что переменная достигает 5 %-ой зоны от установившегося значения за время $t_{\text{ПП}} = 2.996 \cdot T$:

$$T_{\text{ЭД}} = \frac{2.5...3.9}{2.996} = 1.167 \text{ [с]} \quad (42)$$

Передаточная функция тягодутьевой машины может быть представлена безынерционным звеном:

$$W_{\text{ТДМ}}(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{G_{\text{ПВ}}(p)}{\omega_{\text{ЭД}}(p)} = \frac{K_{\text{ТВМ}}}{T_{\text{ТВМ}} \cdot p + 1}, \quad (43)$$

где $G_{\text{ПВ}}(p)$ – выходная величина НА – подача воздуха в топку, определяется максимальным допустимым значением, соответствующему технологическому

процессу; $K_{\text{ТВМ}} = \frac{G_{\text{ПВ}}(p)}{\omega_{\text{ЭД}}(p)}$ – коэффициент передачи тягодутьевой машины; $T_{\text{ТВМ}}$ – постоянная времени тягодутьевой машины, обычно постоянной времени тягодутьевой машины пренебрегают.

2.4.3. Исполнительные механизмы

Исполнительный механизм (ИМ) – это устройство, предназначенное для преобразования энергии (электрической, сжатого газа (воздуха) или сжатой жидкости (воды или масла) в механическую работу по перемещению подвижной части в дроссельном РО (изменения положения штока клапана или шибер, или угла поворота заслонки (рис. 30).

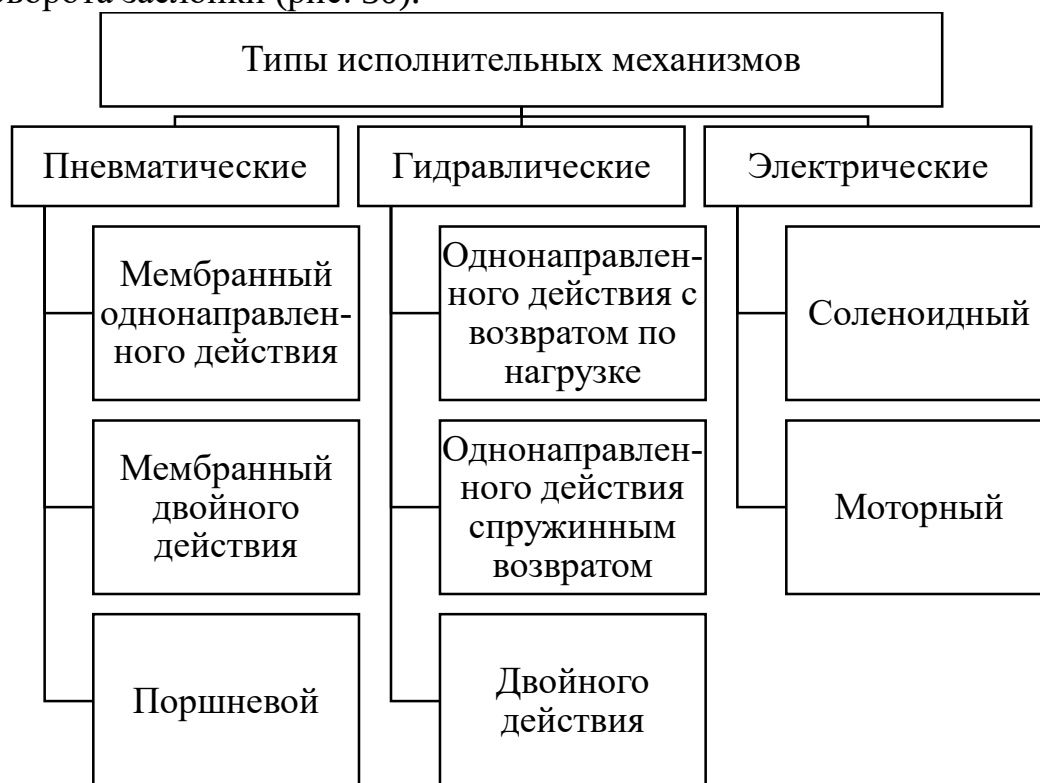


Рис. 30. Типы исполнительных механизмов

Выбор исполнительного механизма, определяется:

- особенностью технологического процесса;
- действием, которое должно быть выполнено;
- быстродействием.

В системах автоматизации ИМ с электродвигателями называются исполнительными механизмами с постоянной скоростью [9].

Упрощенный вид моторного ИМ, поясняющий принцип действия, показан на рис. 31. При подаче напряжения на обмотки электродвигателя вал двигателя начинает вращаться, приводя во вращение вал редуктора. В редукторе происходит преобразование вращательного движения в движение, необходимое для перемещения штока ИМ. В простейшем случае в ИМ устанавливаются

концевые выключатели (обозначенные А и Б), для отключения двигателя при приближении штока к границам рабочей зоны (состояние полностью открыт / закрыт).

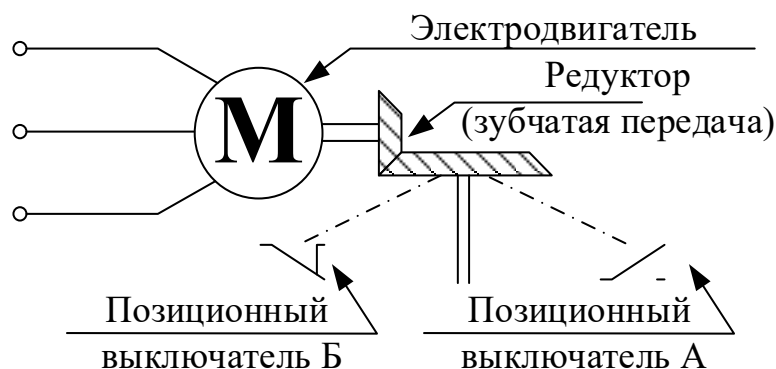


Рис. 31. Электрический моторный исполнительный механизм

Время, за которое ИМ, воздействуя на РО, переводит его из состояния «полностью закрытый» в «полностью открытый», называется временем полного хода выходного вала [9]. Эта характеристика указывается в паспорте ИМ и нормируется = 10, 25, 63, 100, 160 с. Необходимо отметить, что ИМ является достаточно инерционным звеном, что практически не проявится на качестве работы системы автоматического регулирования т.к. постоянные времени теплоэнергетических объектов значительно ее превышают.

Для управления ИМ используют блоки реверсивных пускателей (БПР), которые бывают контактными и бесконтактными. Первые выполнены на основе электромагнитных контакторов и по командам от АСУТП подают напряжение прямой или обратной последовательности для питания обмоток ЭД. Вторые состоят из бесконтактных реле (тиристоры или семистры) и кроме подачи напряжения, выполняют функцию его регулирования, обеспечивая тем самым плавный пуск ЭД и работу на нескольких скоростях.

Структурно-аналитическая схема исполнительного механизма показана на рис. 32.

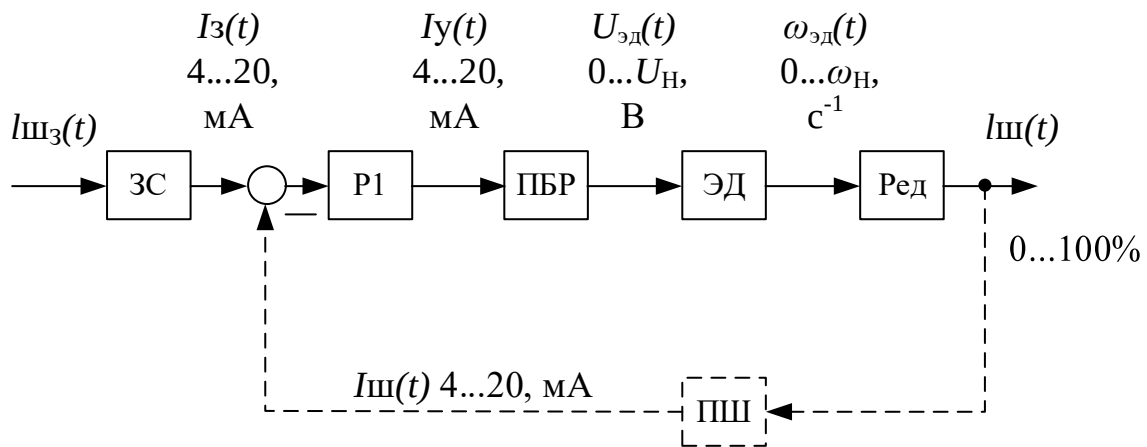


Рис. 32. Структурно-аналитическая схема исполнительного механизма

Отметим, что в последнее время получили широкое распространение ИМ с аналоговыми датчиками положения штока (ДШ), если сигнал о положении штока используется системой управления для задания положения штока, то такой исполнительный механизм называют позиционером.

На рис. 32 показаны следующие блоки:

- Р1 – регулятор положения штока позиционера;
- ПБР – пускатель бесконтактный реверсивный;
- ЭД – электрический двигатель;
- Ред – редуктор;
- ДШ – датчик положения штока позиционера.

Пунктирной линией показана обратная связь по положению штока исполнительного механизма.

Блок реверсивных пускателей может быть описан аperiodическим звеном первого порядка:

$$W_{\text{БРП}}(p) = \frac{U_{\text{ЭД}}(p)}{I_3(p)} = \frac{K_{\text{БРП}}}{T_{\text{БРП}} \cdot p + 1}, \quad (44)$$

где $K_{\text{БРП}}$ – коэффициент передачи блока реверсивных пускателей;
 $T_{\text{БРП}}$ – постоянная времени блока реверсивных пускателей;
 $U_{\text{ЭД}}(p)$ – напряжение питания электродвигателя; $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение питания, приведено в паспорте ИМ; $I_3(p)$ – сигнал задания регулятора, например, ток

$$K_{\text{БРП}} = \frac{U_{\text{БРП}}}{I_3} = \frac{[0 \dots U_{\text{н}}, \text{В}]}{[4 \dots 20, \text{мА}]} = \frac{380}{20 - 4} = 23.75. \quad (45)$$

Постоянная времени блока реверсивных пускателей $T_{\text{БРП}} = 0.001 \dots 0.1$, с.

Электрический двигатель может быть описан аperiodическим звеном первого порядка:

$$W_{\text{ЭД}}(p) = \frac{\omega_{\text{ЭД}}(p)}{U_{\text{ЭД}}(p)} = \frac{K_{\text{ЭД}}}{T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1}, \quad (46)$$

где $K_{\text{ЭД}}$ – коэффициент передачи электродвигателя; $T_{\text{ЭД}}$ – постоянная времени электродвигателя; $\omega_{\text{ЭД}}(p)$ – скорость вращения вала электродвигателя; $\omega_{\text{н}} = n_{\text{н}} \cdot \pi / 30$ – номинальная частота вращения вала двигателя; $n_{\text{н}}$ – номинальное число оборотов вала двигателя, приведено в паспорте ИМ.

$$K_{\text{ЭД}} = \frac{\omega_{\text{ЭД}}}{U_{\text{БРП}}} = \frac{[0 \dots \omega_{\text{н}}, \text{с}^{-1}]}{[0 \dots U_{\text{н}}, \text{В}]} = \frac{146}{380} = 0.38. \quad (47)$$

Считается, что двигатель малой мощности разгоняется до номинальной скорости за 1.5...1.9 с. Из (6) следует, что переменная достигает 5-ой% зоны от установившегося значения за время $t_{\text{III}} = 2.996 \cdot T$.

$$T_{\text{ЭД}} = \frac{1.5 \dots 1.9}{2.996} = 0.567 [\text{с}]. \quad (48)$$

Так как в редукторе происходит преобразование скорости в перемещение, т. е. происходит интегрирование, то редуктор будет описываться интегрирующим звеном:

$$W_{\text{Ред}}(p) = \frac{l_{\text{РО}}(p)}{\omega_{\text{ЭД}}(p)} = \frac{K_{\text{Ред}}}{T_{\text{ИМ}} \cdot p}, \quad (49)$$

где $l_{\text{РО}}(p)$ – ход штока исполнительного механизма.

Коэффициент передачи редуктора будет

$$K_{\text{Ред}} = \frac{l_{\text{РО}}(p)}{\omega(p)} = \frac{100}{146} = 0.685 \left[\frac{\%}{\text{с}^{-1}} \right] \quad (50)$$

Выше было отмечено, что время полного хода выходного вала $T_{\text{ИМ}}$ указывается в паспорте ИМ.

Тогда передаточная функция модели ИМ может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned} W_{\text{ИМ}}(p) &= W_{\text{БРП}}(p) \cdot W_{\text{ЭД}}(p) \cdot W_{\text{Ред}}(p) = \\ &= \frac{K_{\text{ЭД}} \cdot K_{\text{Ред}} \cdot K_{\text{БРП}}}{T_{\text{ИМ}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{БРП}} \cdot p + 1)} = \\ &= \frac{0.38 \cdot 0.685 \cdot 23.75}{10 \cdot p \cdot (0.567 \cdot p + 1) \cdot (0.05 \cdot p + 1)} \end{aligned} \quad (51)$$

3. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Определение зависимости, согласно которой регулятор формирует управляющее воздействие $u(t)$, называется законом регулирования (закон управления):

$$u(t) = F[e(t), g(t), f(t)], \quad (52)$$

где $e(t)$ – ошибка регулирования; $g(t)$ – задающее воздействие; $f(t)$ – возмущающее воздействие.

Обычно зависимость (52) является нелинейной.

Выражение (52) можно записать в виде:

$$u(t) = F_1(e) + F_2(g) + F_3(f). \quad (53)$$

Принцип регулирования определяют слагаемые:

- $F_1(e)$ – регулирование по ошибке (отклонению), получивший название принцип Ползунова – Уатта [4].
- $F_2(g)$ и $F_3(f)$ – регулирование по внешнему управляющему и / или возмущающему воздействию – принцип Понселе [4].

Отметим, что для замкнутой системы выражение для определения ошибки регулирования будет:

$$e(p) = \frac{g(p)}{1 + W_{\text{PA3}}(p)} - \frac{W_f(p)}{1 + W_{\text{PA3}}(p)}, \quad (54)$$

где $W_{\text{PA3}}(p)$ – передаточная функция разомкнутого контура регулирования:

$$W_{\text{PA3}}(p) = W_p(p) \cdot \prod_{i=1} W_{\text{HH}}(p), \quad (55)$$

где $W_{\text{HH}}(p) = \prod_{i=1} W_i(p)$ – передаточная функции неизменяемой части контура, состоящая звеньев прямого пути, входящих в контур, кроме регулятора; $W_p(p)$ – передаточная функция регулятора.

Отметим, что для разомкнутого контура справедливо выражение:

$$e(p) \cdot W_{\text{PA3}}(p) = y(p). \quad (56)$$

Для установившегося режима ($p \rightarrow 0$) выражение (55) можно записать в виде:

$$\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{PA3}}(p) = \prod_{i=1} k_i = K, \quad (57)$$

где k_i – коэффициент усиления звеньев, входящих в контур.

Тогда выражение (56) можно записать:

$$e_{\text{уст}} = \frac{y_{\text{уст}}}{K}, \quad (58)$$

где $e_{уст}$ – установившаяся (статическая) ошибка.

Целью регулирования является стремление минимально уменьшить величину ошибки:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \rightarrow 0. \quad (59)$$

Следовательно, при синтезе системы необходимо подобрать такой закон регулирования, который обеспечил снижение ошибки регулирования до нуля.

Устройства, реализующие требуемые законы управления, называются регуляторами. Регуляторами также называют типовые корректирующие устройства, определение параметров которых осуществляется по определенным правилам [4].

Регуляторы различают по следующим признакам:

- По закону регулирования:
 - пропорциональные (П);
 - интегральные (И);
 - пропорционально-интегральные (ПИ);
 - пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД);
 - релейные (Р).
- По способности изменять свою структуру:
 - с фиксированной структурой;
 - с переменной структурой.
- По характеру математической связи между выходной и входной координатами:
 - линейные;
 - нелинейные.
- По числу регулируемых переменных:
 - одномерные;
 - многомерные.

Описание основных законов регулирования представлено в таблицах 1 – 4.

Таблица 1 – Пропорциональное регулирование

Закон регулирования	Пропорциональное регулирование
Описание закона	Управляющее воздействие пропорционально ошибке регулирования
Выражение закона регулирования	$u(t) = k_{\text{РП}} \cdot e(t)$ $\Downarrow$ $u(p) = W_{\text{РП}}(p) \cdot e(p) =$ $= k_{\text{РП}} \cdot e(p)$
Передаточная функция разомкнутой системы $W_{\text{РАЗ}}(p)$	$W_{\text{РП}}(p) \cdot \prod_{i=1} W_{\text{НН}}(p)$
Передаточная функция разомкнутого контура в установившемся состоянии $\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{РАЗ}}(p)$	$k_{\text{РП}} \cdot \prod_{i=1} k_i = K$
Выражение для определения ошибки в установившемся режиме ($p \rightarrow 0$) по управляющему воздействию $e_{\text{уст упр}} = \frac{g(p)}{1 + W_{\text{РАЗ}}(p)}$	$\frac{g(0)}{1 + \underbrace{W_{\text{РАЗ}}(0)}_{\rightarrow K}} \neq 0$
	Всегда присутствует ошибка. Система – статическая

Таблица 2 – Интегральное регулирование

Закон регулирования	Интегральное регулирование
Описание закона	Скорость изменения управляющего воздействия пропорционально ошибке регулирования
Выражение закона регулирования	$\frac{d}{dt} \cdot u(t) = k_{\text{РИ}} \cdot e(t)$ $\Downarrow \left(\frac{d}{dt} \rightarrow p \right)$ $p \cdot u(p) = k_{\text{РИ}} \cdot e(p)$ $\Downarrow$ $u(p) = W_{\text{РИ}}(p) \cdot e(p) = \frac{k_{\text{РИ}}}{p} \cdot e(p)$
Передаточная функция разомкнутой системы $W_{\text{РАЗ}}(p)$	$W_{\text{РИ}}(p) \cdot K_i \cdot W_{\text{НН}}(p) =$ $\frac{k_{\text{РИ}} \cdot K_i}{p} \cdot W_{\text{НН}}(p)$
Передаточная функция разомкнутого контура в установившемся состоянии $\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{РАЗ}}(p)$	$\frac{k_{\text{РИ}} \cdot K_i}{p} \cdot W_{\text{НН}}(0) \rightarrow \infty$ $\rightarrow 0$
Выражение для определения ошибки в установившемся режиме ($p \rightarrow 0$) по управляющему воздействию $e_{\text{уст упр}} = \frac{g(p)}{1 + W_{\text{РАЗ}}(p)}$	$\frac{g(0)}{1 + \underbrace{W_{\text{РАЗ}}(0)}_{\rightarrow \infty}} \rightarrow 0$
	Отсутствует ошибка. Система – астатическая

Таблица 3 – Пропорционально-интегральное регулирование

Закон регулирования	Пропорционально-интегральное регулирование
Описание закона	Регулирование происходит в два этапа: – на первом этапе преобладает пропорциональное регулирование; – на втором – интегральное.
Выражение закона регулирования	$u(p) =$ $= k_{\text{РП}} \cdot e(p) + \frac{k_{\text{РИ}}}{p} \cdot e(p) =$ $= \frac{k_{\text{РП}} \cdot p + k_{\text{РИ}}}{p} \cdot e(p) =$ $k_{\text{РП}} \cdot \frac{\left(\frac{k_{\text{РП}}}{k_{\text{РИ}}} \cdot p + 1\right)}{\frac{k_{\text{РП}}}{k_{\text{РИ}}} \cdot p} \cdot e(p)$
Передаточная функция разомкнутой системы $W_{\text{РАЗ}}(p)$	$W_{\text{РПИ}}(p) \cdot K_i \cdot W_{\text{НН}}(p) =$ $k_{\text{РП}} \cdot \frac{\left(\frac{k_{\text{РП}}}{k_{\text{РИ}}} \cdot p + 1\right)}{\frac{k_{\text{РП}}}{k_{\text{РИ}}} \cdot p} \cdot K_i \cdot W_{\text{НН}}(p)$
Передаточная функция разомкнутого контура в установившемся состоянии $\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{РАЗ}}(p)$	$k_{\text{РП}} \cdot \frac{\left(\frac{k_{\text{РП}}}{k_{\text{РИ}}} \cdot p + 1\right)}{\frac{k_{\text{РП}}}{k_{\text{РИ}}} \cdot p} \cdot K_i \cdot W_{\text{НН}}(0) \rightarrow \infty$
Выражение для определения ошибки в установившемся режиме ($p \rightarrow 0$) по управляющему воздействию $e_{\text{уст упр}} = \frac{g(p)}{1 + W_{\text{РАЗ}}(p)}$	$\frac{g(t)}{\underbrace{1 + W_{\text{РАЗ}}(0)}_{\rightarrow \infty}} \rightarrow 0$
	Отсутствует ошибка. Система - астатическая

Таблица 4 – Регулирование по производным

Закон регулирования	Регулирование по производным
Описание закона	Управляющее воздействие определяется скоростью изменения ошибки
Выражение закона регулирования	$u(t) = k_{\text{ПИ}} \cdot \frac{d}{dt} \cdot e(t)$ $\Downarrow \left(\frac{d}{dt} \rightarrow p \right)$ $u(p) = k_{\text{РД}} \cdot p \cdot e(p)$ $\Downarrow$ $u(p) = W_{\text{РД}}(p) \cdot e(p) = k_{\text{РД}} \cdot p \cdot e(p)$
Передаточная функция разомкнутой системы $W_{\text{РАЗ}}(p)$	$W_{\text{РД}}(p) \cdot K_i \cdot W_{\text{НН}}(p) =$ $k_{\text{РД}} \cdot p \cdot K_i \cdot W_{\text{НН}}(p)$
Передаточная функция разомкнутого контура в установившемся состоянии $\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{РАЗ}}(p)$	$\frac{k_{\text{ПИ}} \cdot K_i}{p} \cdot W_{\text{НН}}(p) \rightarrow 0$
Выражение для определения ошибки в установившемся режиме ($p \rightarrow 0$) по управляющему воздействию $e_{\text{уст упр}} = \frac{g(p)}{1 + W_{\text{РАЗ}}(p)}$	$\frac{g(t)}{1 + \underbrace{W_{\text{РАЗ}}(0)}_{\rightarrow 0}} \rightarrow g(0)$
	Самостоятельно не используется

Таблица 5 – Пропорционально-интегрально-дифференцирующее регулирование

Закон регулирования	Пропорционально-интегрально-дифференцирующее регулирование
Описание закона	Управляющее воздействие определяется: – ошибкой регулирования; – скоростью изменения ошибки регулирования. Учитывается скорость изменения управляющего воздействия
Выражение закона регулирования	$u(p) = \left(k_{рп} + \frac{k_{ри}}{p} + k_{рд} \cdot p \right) \cdot e(p) =$ $= \frac{k_{рп} \cdot p + k_{ри} + k_{рд} \cdot p^2}{p} \cdot e(p)$
Передаточная функция разомкнутой системы $W_{раз}(p)$	$W_{рпид}(p) \cdot K_i \cdot W_{нн}(p) =$ $k_{рп} \cdot \frac{\left(\frac{k_{рп}}{k_{ри}} \cdot p + 1 \right)}{\frac{k_{рп}}{k_{ри}} \cdot p} \cdot K_i \cdot W_{нн}(p)$
Передаточная функция разомкнутого контура в установившемся состоянии $\lim_{p \rightarrow 0} W_{раз}(p)$	$\frac{\overset{\rightarrow 0}{k_{рп} \cdot p} + \overset{\rightarrow 0}{k_{ри}} + k_{рд} \cdot p^2}{\underset{\rightarrow 0}{p}} \cdot K_i \cdot W_{нн}(0) \rightarrow \infty$
Выражение для определения ошибки в установившемся режиме ($p \rightarrow 0$) по управляющему воздействию $e_{уст упр} = \frac{g(p)}{1 + W_{раз}(p)}$	$\frac{g(t)}{1 + \underbrace{W_{раз}(0)}_{\rightarrow \infty}} \rightarrow 0$
	Отсутствует ошибка. Система - астатическая

3.1. Типовые регуляторы

3.1.1. Пропорциональный регулятор (П-регулятор)

Передаточная функция П-регулятора имеет вид

$$W_P(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = \beta = k_{\Pi}, \quad (60)$$

где k_{Π} , β – коэффициент передачи регулятора.

Используется в системах с низкими требованиями к точности регулирования или в астатических системах. В статических системах применение П-регулятора приведет к наличию статической ошибки ($\nu = 0$) (табл. 1), снижение которой возможно путем увеличения коэффициента усиления регулятора, но такой подход может снизить запасы устойчивости.

3.1.2. Пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор)

Передаточная функция регулятора

$$W_P(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{p} = \frac{k_{\Pi} \cdot p + k_{\text{И}}}{p}. \quad (61)$$

Если $k_{\Pi} = \beta$ и $k_{\text{И}} = \frac{\beta}{\tau}$, то передаточную функцию регулятора можно записать следующим образом:

$$W_P(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = \beta \cdot \frac{(\tau \cdot p + 1)}{\tau \cdot p}. \quad (62)$$

В статических системах наличие ПИ-регулятора устраняет статическую ошибку. Наличие интегральной составляющей в регуляторе снижает запасы устойчивости.

3.1.3. Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор)

Регулятор описывается передаточной функцией:

$$\begin{aligned} W_P(p) &= \frac{U(p)}{E(p)} = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{p} + k_{\text{Д}} \cdot p = \\ &= \frac{k_{\text{Д}} \cdot p^2 + k_{\Pi} \cdot p + k_{\text{И}}}{p} = \frac{\beta \cdot (\tau_1 \cdot p + 1)(\tau_2 \cdot p + 1)}{\tau_1 \cdot p}, \end{aligned} \quad (63)$$

где $k_{\text{Д}}$ – коэффициент передачи, определяющий зависимость скорости изменения управляющего воздействия.

В реальных технических системах и в ряде математических пакетов применение идеального дифференцирующего звена невозможно, поэтому передаточная функция ПИД-регулятора принимает вид:

$$W_P(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{p} + \frac{k_{\text{Д}} \cdot p}{T_{\text{Д}} \cdot p + 1} =$$

$$= \frac{\beta \cdot (\tau_1 \cdot p + 1)(\tau_2 \cdot p + 1)}{\tau_1 \cdot p(T_{\text{Д}} \cdot p + 1)}, \quad (64)$$

где $T_{\text{Д}}$ – постоянная времени, характеризующая инерционные свойства реального дифференцирующего звена.

Для выражений (63) и (64) справедливы следующие соотношения $k_{\Pi} = \beta \cdot \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1}$; $k_{\text{И}} = \frac{\beta}{\tau_1}$; $k_{\text{Д}} = \beta \cdot \tau_2$.

3.2. Стандартные настройки простейших контуров. Настройки на оптимум по модулю

Как уже отмечалось ранее, цель контура регулирования (рис. 33) – уменьшение ошибки регулирования в идеальном случае до нуля:

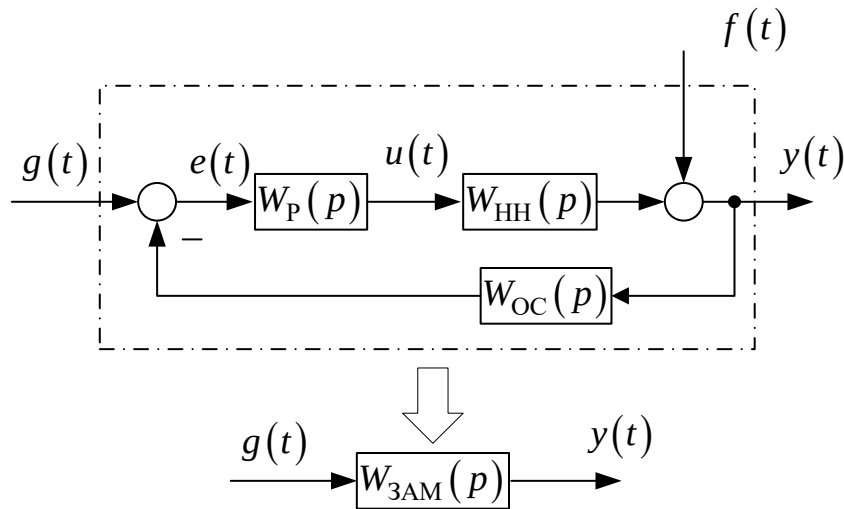


Рис. 33. Замкнутый контур с объектом управления в виде интегрирующего звена

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(p) - y(p) = 0 \quad \text{или} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e(p) = 0 \quad (65)$$

Следовательно, при синтезе системы выбирают такую структуру регулятора и его настройки, чтобы вырабатываемое им управляющее воздействие $u(t)$ обеспечивало:

- практически точное повторение регулируемой величины $y(t)$ изменения задающего воздействия $g(t)$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{y(t)}{g(t)} \rightarrow 1 \quad \text{или} \quad \lim_{p \rightarrow 0} \frac{Y(p)}{G(p)} \rightarrow 1; \quad (66)$$

- практически не реагировало на изменения возмущения $f(t)$.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{y(t)}{f(t)} \rightarrow 0 \text{ или } \lim_{p \rightarrow 0} \frac{Y(p)}{F(p)} \rightarrow 0. \quad (67)$$

При этом переходный процесс должен протекать без возникновения колебаний с минимальными запаздываниями [4].

Достигнуть идеального протекания переходного процесса невозможно из-за инерционности звеньев, входящих в контур регулирования.

Для получения близкого к идеальному переходному процессу при синтезе системы управления выбирают регулятор с переходной характеристикой, обеспечивающей максимальное снижение влияния постоянных времени.

Отметим, что отношение изображения по Лапласу выходной величины к входной является передаточной функцией, следовательно, выражение (66) для замкнутого контура регулирования (рис. 33) будет являться определением передаточной функции.

$$\begin{aligned} \lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{ЗАМ}}(p) &= \frac{Y(p)}{G(p)} = \frac{W_{\text{ПП}}}{1 + W_{\text{ПП}} \cdot W_{\text{ОП}}} = \\ &= \frac{W_{\text{Р}}(p) \cdot W_{\text{НН1}}(p) \cdot W_{\text{НН2}}(p)}{1 + W_{\text{Р}}(p) \cdot W_{\text{НН1}}(p) \cdot W_{\text{НН2}}(p) \cdot W_{\text{ОС}}(p)} = \\ &= \frac{W_{\text{Р}}(p) \cdot W_{\text{НН}}(p)}{1 + W_{\text{Р}}(p) \cdot W_{\text{НН}}(p) \cdot W_{\text{ОС}}(p)} \rightarrow 1 \end{aligned} \quad (68)$$

Выражение (68) относится ко всему спектру частот сигналов, от нулевой частоты до бесконечно высокой.

Получается, что целесообразно добиться по крайней мере для части спектра частот, точнее, для полосы от нуля до возможно более высокой частоты, такого положения, чтобы модуль передаточной функции в этой полосе был как можно ближе к единице:

$$|W_{\text{ЗАМ}}(j \cdot \omega)| \rightarrow 1 \quad (69)$$

И в этом случае в момент начала переходного процесса наиболее резко выражены наивысшие частоты спектра сигнала. Естественно, нельзя добиться того, чтобы регулируемая величина в точности следовала за задающей. Затем на первый план выступают все более низкие частоты. И если в этой полосе частот модуль передаточной функции близок к единице, то всюду, кроме начального интервала времени, отклонение регулируемой величины относительно задающей будет близка к нулю.

Описанный метод настройки называется настройкой на оптимум по модулю (ОМ).

Настройка на ОМ – это стремление в широкой полосе частот сделать модуль частотной характеристики (69) замкнутого контура близким к единице [10].

Отметим, что при настройке на ОМ ЛАХ скорректированного замкнутого контура будет:

$$L_{\text{ЗАМ}}(\omega) = 20 \lg(|W(j \cdot \omega)| \rightarrow 1) = 0. \quad (70)$$

При синтезе САР реальный контур регулирования представляют в виде звеньев первого или второго порядка, соединенных последовательно. В соответствии с типом звеньев, входящих в контур, и их постоянных времени выбирают передаточную функцию регулятора (тип регулятора) и его параметры.

При таком преобразовании считают, что одним апериодическим звеном первого порядка практически без искажения качественных показателей переходного процесса можно заменить последовательное соединение двух и более апериодических звеньев первого порядка. Для такого звена постоянную времени выбирают как сумму постоянных времени, входивших в контур $\sum T_v = T$.

$$\frac{K_1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \frac{K_2}{T_2 \cdot p + 1} \cdot \frac{K_3}{T_3 \cdot p + 1} \cdot \frac{K_4}{T_4 \cdot p + 1} \dots = \frac{\prod_{v=1}^n K_v}{\sum_{v=1}^n T_v \cdot p + 1}. \quad (71)$$

При этом, однако, необходимо, чтобы в рассматриваемом контуре имелось по крайней мере одно интегрирующее звено или хотя бы одно апериодическое звено с постоянной времени, во много раз большей, чем сумма малых постоянных времени (рис. 34).

Звено с запаздыванием можно также представить в виде апериодического звена 2-го порядка:

$$W(p) = \frac{k \cdot e^{-\tau \cdot p}}{T \cdot p + 1} \approx \frac{k}{T \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau \cdot p + 1}. \quad (72)$$

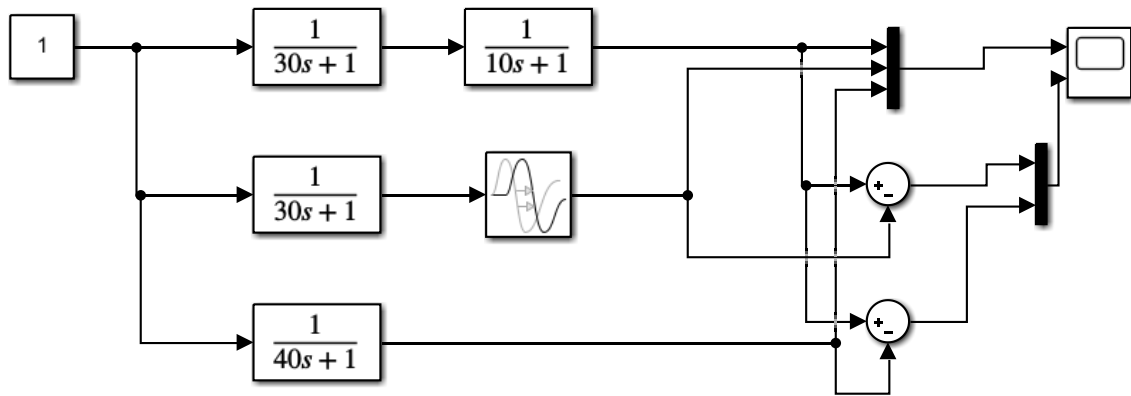


Рис. 34. Апериодическое звено первого порядка с запаздыванием, апериодическое звено второго порядка и апериодическое звено первого порядка с суммарной постоянной времени

Графики переходного процесса и ошибка для указанных случаев (71) и (72) показаны на рис. 35.

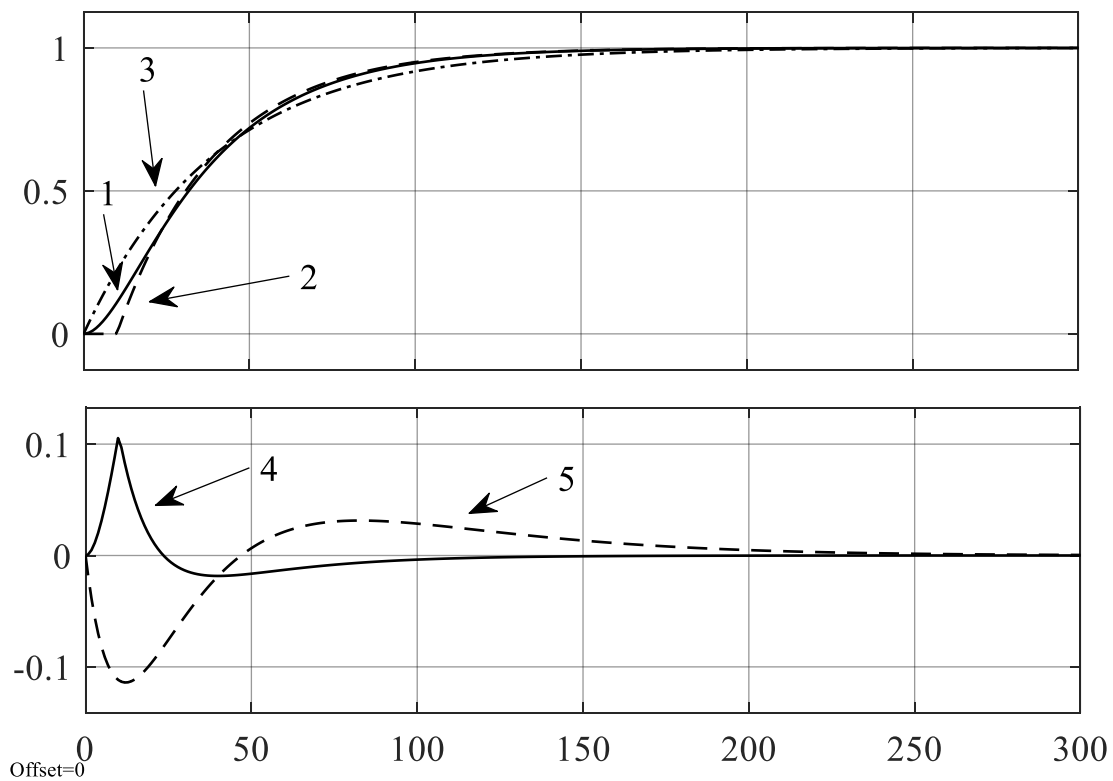


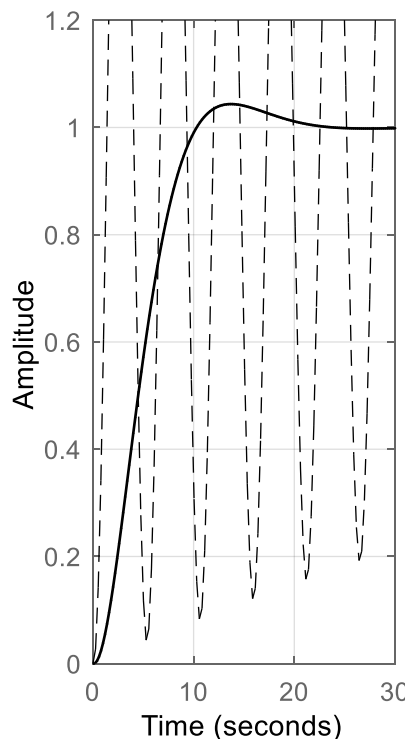
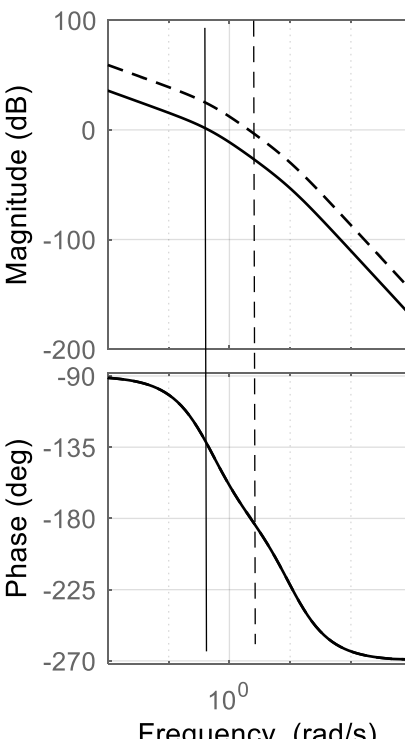
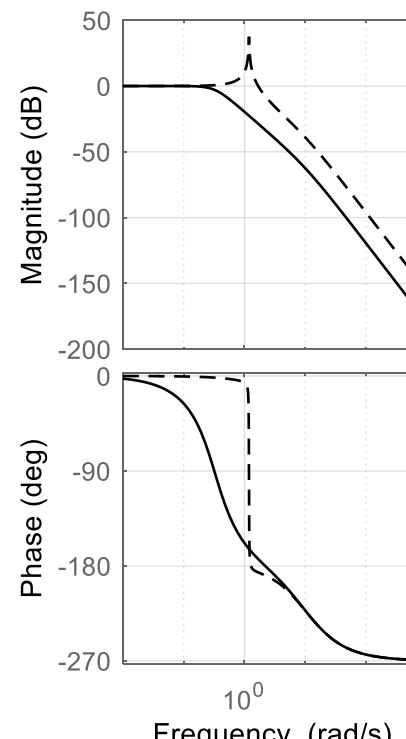
Рис. 35. Графики переходного процесса:

- 1 – аperiodическое звено первого порядка с запаздыванием;
- 2 – аperiodическое звено второго порядка;
- 3 – аperiodическое звено первого порядка с суммарной постоянной времени;
- 4 – разность между графиками переходного процесса двух звеньев (1) и (2);
- 5 – разность между графиками переходного процесса двух звеньев (1) и (3)

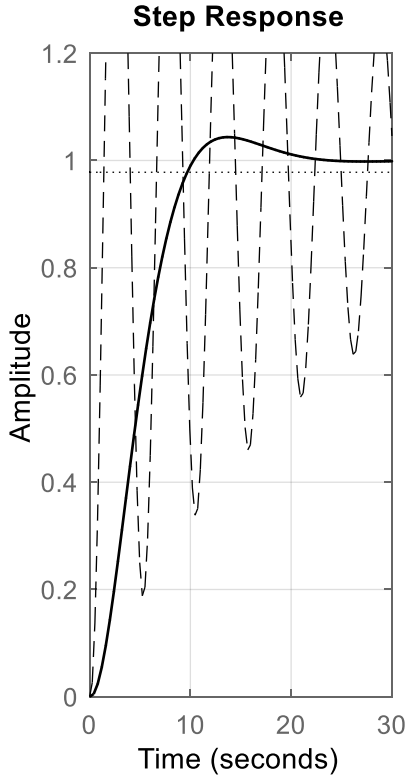
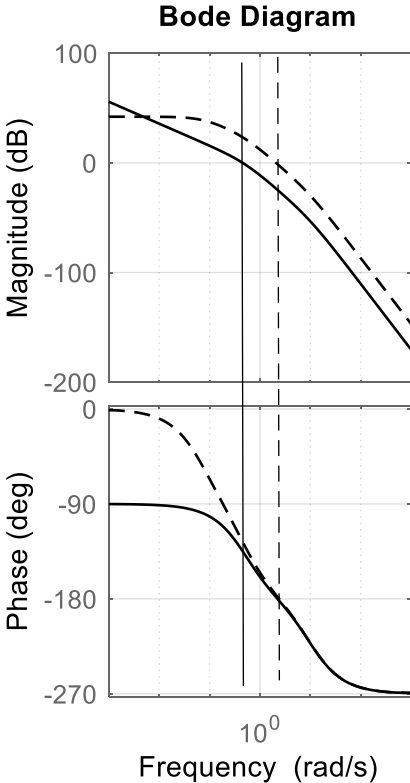
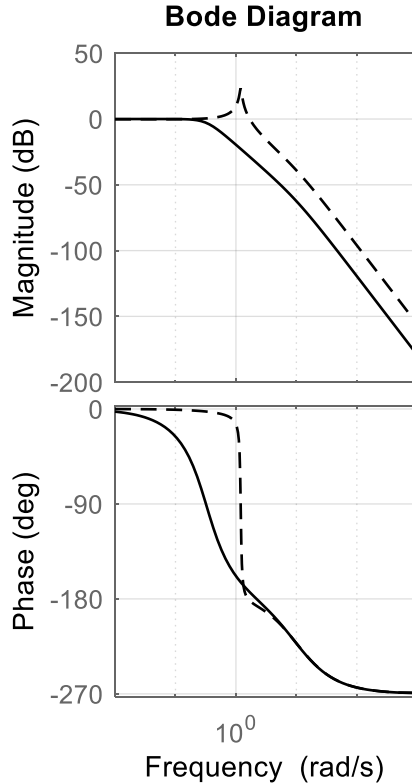
Для распространенных случаев соединения звеньев контура при преобразовании к эквивалентному контуру первого или второго порядка настройки регуляторов, синтезированных на ОМ, приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Выбор типа регулятора и его параметров при настройках на оптимум по модулю для контура регулирования состоящего из типовых звеньев

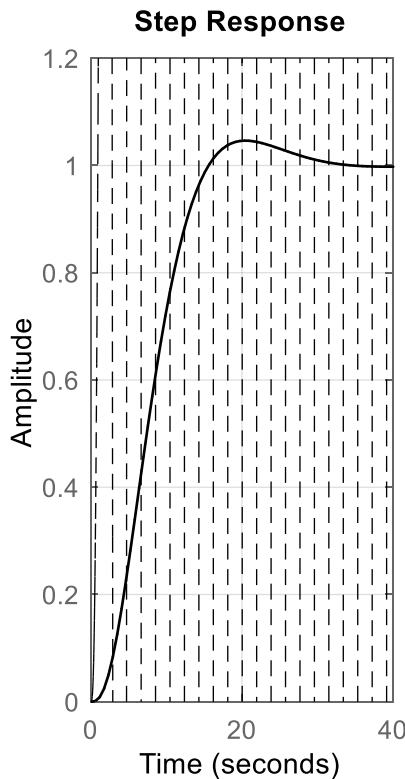
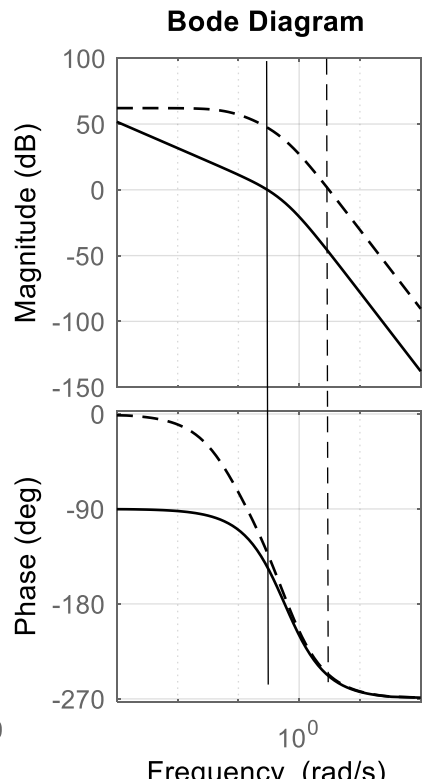
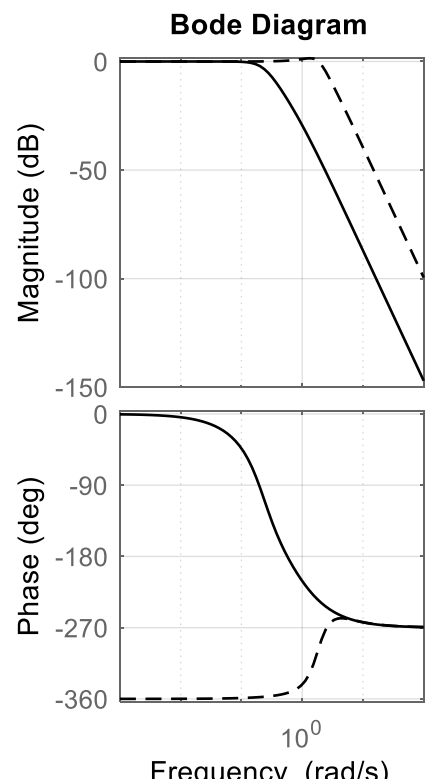
№ п/п	Вид передаточной функции неизменяемой части $W_{\text{НН}}(p)$	Тип регулятора	Настройки регулятора	Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура
1.	$W_{\text{НН}}(p) = \frac{K_1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \dots \cdot \frac{K_n}{T_n \cdot p + 1} \cdot \frac{K_O}{T_O \cdot p} \approx$ $\approx \frac{K_\mu}{T_\mu \cdot p + 1} \cdot \frac{K_O}{T_O \cdot p}$ где $K_\mu = \prod_{v=1}^n K_v$; $T_\mu = \sum_{v=1}^n T_v$	П-регулятор $W_P(p) = \beta$	$\beta = \frac{T_O}{2 \cdot T_\mu \cdot K_\mu \cdot K_O}$	$W_{\text{РАЗ}}(p) = W_P(p) \cdot W_{\text{НН}}(p) =$ $= \frac{\cancel{T_O}}{2 \cdot T_\mu \cdot \cancel{K_\mu} \cdot \cancel{K_O} \cdot K_{\text{ОС}}} \cdot \frac{\cancel{K_\mu}}{T_\mu \cdot p + 1} \cdot \frac{\cancel{K_O}}{\cancel{T_O} \cdot p} =$ $\frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{\text{ОС}} \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}$ $W_{\text{ЗАМ}}(p) = \frac{W_{\text{РАЗ}}(p)}{1 + W_{\text{РАЗ}}(p) \cdot W_{\text{ОС}}(p)} =$ $= \frac{1}{1 + \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{\text{ОС}} \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)} \cdot K_{\text{ОС}}} =$ $= \frac{1 / K_{\text{ОС}}}{2 \cdot T_\mu^2 \cdot p + 2 \cdot T_\mu \cdot p + 1}$

№ п/п	Вид передаточной функции неизменяемой части $W_{HH}(p)$	Тип регулятора	Настройки регулятора	Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура
	Step Response  а) Bode Diagram  б) Bode Diagram  в) (- - -) –исходная система; (—) –синтезированная система; а) – графики переходного процесса; б) – логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура; в) – логарифмические частотные характеристики замкнутого контура			

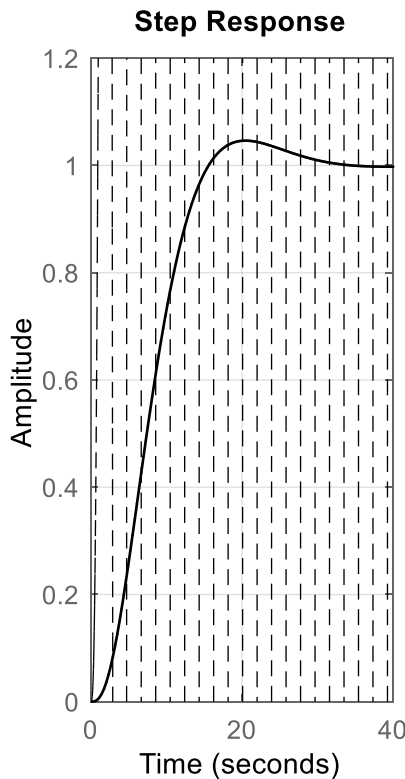
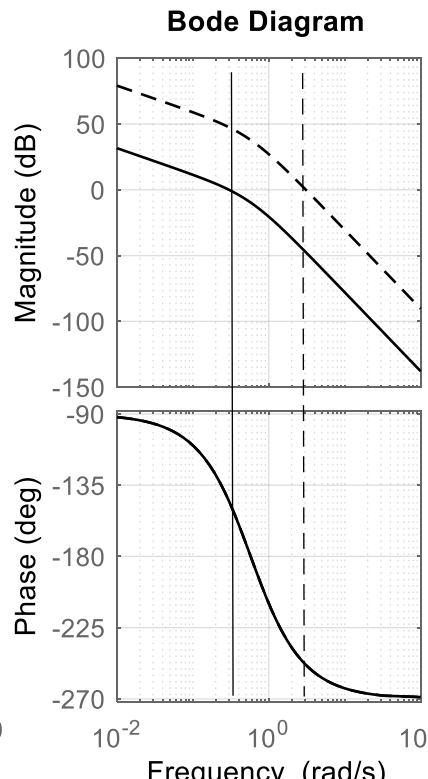
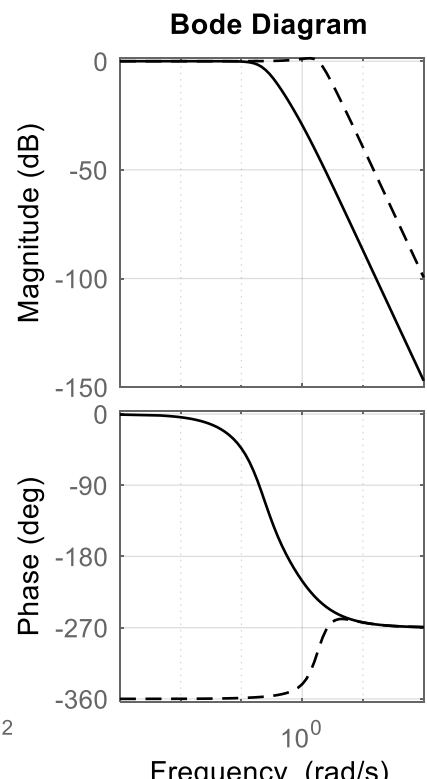
№ п/п	Вид передаточной функции неизменяемой части $W_{\text{НН}}(p)$	Тип регулятора	Настройки регулятора	Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура
2.	$W_{\text{НН}}(p) = \frac{K_1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \dots \cdot \frac{K_n}{T_n \cdot p + 1} \cdot \frac{K_O}{T_O \cdot p + 1} \approx$ $\approx \frac{K_\mu}{T_\mu \cdot p + 1} \cdot \frac{K_O}{T_O \cdot p + 1}$ где $K_\mu = \prod_{v=1}^n K_v$; $T_\mu = \sum_{v=1}^n T_v$ $T_O \gg T_v$	ПИ-регулятор $W_P(p) =$ $= \beta \cdot \frac{\tau \cdot p + 1}{\tau \cdot p}$	$\beta = \frac{T_O}{2 \cdot T_\mu \cdot K_\mu \cdot K_O}$ $\tau = T_O$	$W_{\text{РАЗ}}(p) = W_P(p) \cdot W_{\text{НН}}(p) =$ $= \frac{\cancel{T_O} \cdot \cancel{T_O \cdot p + 1}}{2 \cdot T_\mu \cdot \cancel{K_\mu} \cdot \cancel{K_O} \cdot K_{\text{ОС}}} \cdot \frac{\cancel{T_O \cdot p + 1}}{\cancel{T_O} \cdot p}$ $\cdot \frac{\cancel{K_\mu}}{T_\mu \cdot p + 1} \cdot \frac{\cancel{K_O}}{\cancel{T_O \cdot p + 1}} =$ $= \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{\text{ОС}} \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}$ $W_{\text{ЗАМ}}(p) = \frac{W_{\text{РАЗ}}(p)}{1 + W_{\text{РАЗ}}(p) \cdot W_{\text{ОС}}(p)} =$ $= \frac{1}{1 + \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{\text{ОС}} \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)} \cdot K_{\text{ОС}}}$ $= \frac{1/K_{\text{ОС}}}{2 \cdot T_\mu^2 \cdot p + 2 \cdot T_\mu \cdot p + 1}$

№ п/п	Вид передаточной функции неизменяемой части $W_{HH}(p)$	Тип регулятора	Настройки регулятора	Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура
	 а)  б)  в) (- - -) –исходная система; (—) –синтезированная система; а) – графики переходного процесса; б) – логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура; в) – логарифмические частотные характеристики замкнутого контура			

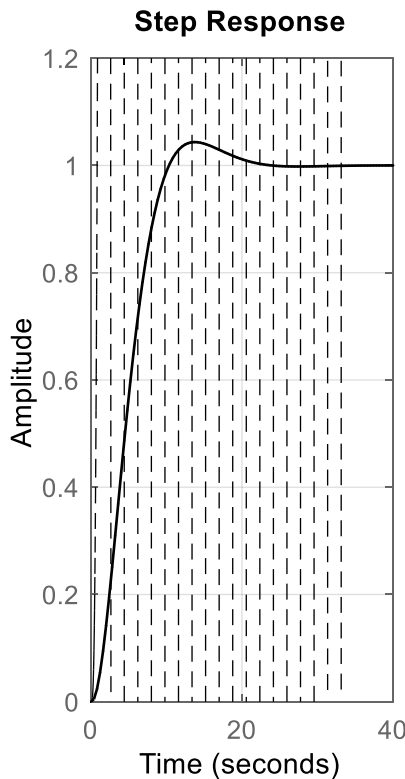
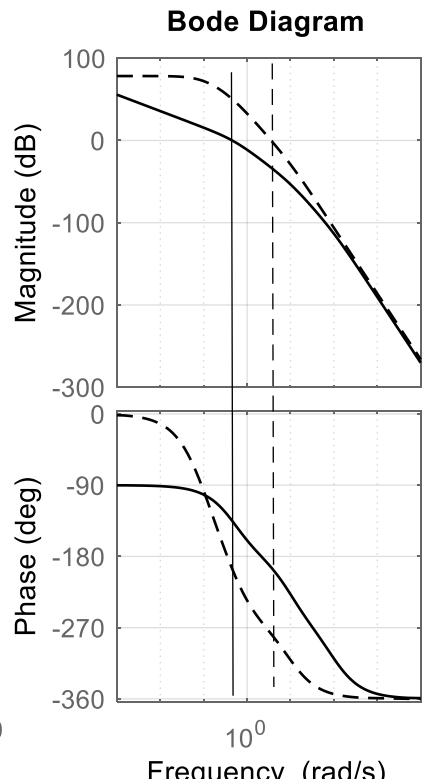
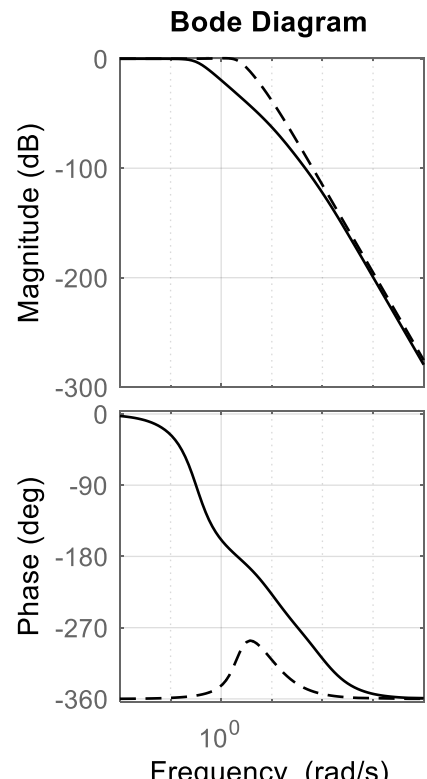
№ п/п	Вид передаточной функции неизменяемой части $W_{\text{НН}}(p)$	Тип регулятора	Настройки регулятора	Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура
3.	$W_{\text{НН}}(p) = \frac{K_1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \frac{K_O \cdot e^{-\tau_O \cdot p}}{T_O \cdot p + 1} \approx$ $\approx \frac{K_1}{T_\mu \cdot p + 1} \cdot \frac{K_O}{T_O \cdot p + 1}$ где $T_\mu = T_1 + \tau_O$ $T_O > T_1$ и $T_O > \tau_O$	ПИ-регулятор $W_P(p) =$ $= \beta \cdot \frac{\tau \cdot p + 1}{\tau \cdot p}$	$\beta = \frac{T_O}{2 \cdot T_\mu \cdot K_1 \cdot K_O}$ $\tau = T_O$	$W_{\text{РАЗ}}(p) = W_P(p) \cdot W_{\text{НН}}(p) =$ $= \frac{\cancel{T_O}}{2 \cdot T_\mu \cdot \cancel{K_1} \cdot \cancel{K_O} \cdot K_{\text{OC}}} \cdot \frac{\cancel{T_O \cdot p + 1}}{\cancel{T_O} \cdot p} \cdot$ $\cdot \frac{\cancel{K_1}}{T_\mu \cdot p + 1} \cdot \frac{\cancel{K_O}}{\cancel{T_O \cdot p + 1}} =$ $= \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{\text{OC}} \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}$ $W_{\text{ЗАМ}}(p) = \frac{W_{\text{РАЗ}}(p)}{1 + W_{\text{РАЗ}}(p) \cdot W_{\text{OC}}(p)} =$ $= \frac{1}{1 + \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{\text{OC}} \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)} \cdot K_{\text{OC}}} =$ $= \frac{1/\cancel{K_{\text{OC}}}}{2 \cdot T_\mu^2 \cdot p + 2 \cdot T_\mu \cdot p + 1}$

№ п/п	Вид передаточной функции неизменяемой части $W_{HH}(p)$	Тип регулятора	Настройки регулятора	Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура
	 а)  б)  в) (- - -) –исходная система; (———) –синтезированная система; а) – графики переходного процесса; б) – логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура; в) – логарифмические частотные характеристики замкнутого контура			

№ п/п	Вид передаточной функции неизменяемой части $W_{\text{НН}}(p)$	Тип регулятора	Настройки регулятора	Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура
4.	$W_{\text{НН}}(p) = \frac{K_1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \frac{K_O \cdot e^{-\tau_O \cdot p}}{T_O \cdot p} \approx$ $\approx \frac{K_1}{T_\mu \cdot p + 1} \cdot \frac{K_O}{T_O \cdot p}$ где $T_\mu = T_1 + \tau_O$ $T_O > T_1$ и $T_O > \tau_O$	П-регулятор $W_P(p) = \beta$	$\beta = \frac{T_O}{2 \cdot T_\mu \cdot K_1 \cdot K_O}$	$W_{\text{РАЗ}}(p) = W_P(p) \cdot W_{\text{НН}}(p) =$ $= \frac{\cancel{T_O}}{2 \cdot T_\mu \cdot \cancel{K_1} \cdot \cancel{K_O} \cdot K_{\text{OC}}} \cdot \frac{\cancel{K_1}}{T_\mu \cdot p + 1} \cdot \frac{\cancel{K_O}}{\cancel{T_O} \cdot p} =$ $\frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{\text{OC}} \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}$ $W_{\text{ЗАМ}}(p) = \frac{W_{\text{РАЗ}}(p)}{1 + W_{\text{РАЗ}}(p) \cdot W_{\text{OC}}(p)} =$ $= \frac{1}{1 + \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{\text{OC}} \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)} \cdot K_{\text{OC}}} =$ $= \frac{1/K_{\text{OC}}}{2 \cdot T_\mu^2 \cdot p + 2 \cdot T_\mu \cdot p + 1}$

№ п/п	Вид передаточной функции неизменяемой части $W_{\text{нн}}(p)$	Тип регулятора	Настройки регулятора	Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура
	 а)  б)  в) (- - -) –исходная система; (———) –синтезированная система; а) – графики переходного процесса; б) – логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура; в) – логарифмические частотные характеристики замкнутого контура			

№ п/п	Вид передаточной функции неизменяемой части $W_{\text{НН}}(p)$	Тип регулятора	Настройки регулятора	Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура
5.	$W_{\text{НН}}(p) = \frac{K_1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \dots \cdot \frac{K_n}{T_n \cdot p + 1} \cdot \frac{K_O}{T_O \cdot p + 1} \approx$ $\approx \frac{K_\mu}{T_\mu \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \frac{K_O}{T_O \cdot p + 1}$ где $K_\mu = \prod_{v=1}^n K_v$; $T_\mu = \sum_{v=2}^n T_v + T_D$; $T_O \gg T_v$; $T_O \approx T_1$; $T_v \gg T_D$	ПИД-регулятор $W_P(p) =$ $= \beta \cdot \frac{\tau \cdot p + 1}{\tau \cdot p} \cdot \frac{\tau_2 \cdot p + 1}{T_D \cdot p + 1}$	$\beta = \frac{T_O}{2 \cdot T_\mu \cdot K_\mu \cdot K_O}$ $\tau = T_O$ $\tau_2 = T_1$	$W_{\text{РАЗ}}(p) = W_P(p) \cdot W_{\text{НН}}(p) =$ $= \frac{\cancel{T_O} \cdot \cancel{T_O \cdot p + 1}}{2 \cdot T_\mu \cdot \cancel{K_\mu} \cdot \cancel{K_O} \cdot K_{OC}} \cdot \frac{\cancel{T_O} \cdot p}{\cancel{T_O} \cdot p} =$ $\cdot \underbrace{\frac{\cancel{T_1 \cdot p + 1}}{T_D \cdot p + 1} \cdot \frac{\cancel{K_\mu}}{T_\mu \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\cancel{T_1 \cdot p + 1}} \cdot \frac{\cancel{K_O}}{\cancel{T_O \cdot p + 1}}}_{\substack{\downarrow 0 \\ 1}} =$ $= \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{OC} \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}$ $W_{\text{ЗАМ}}(p) = \frac{W_{\text{РАЗ}}(p)}{1 + W_{\text{РАЗ}}(p) \cdot W_{OC}(p)} =$ $= \frac{1}{1 + \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{OC} \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)} \cdot K_{OC}} =$ $= \frac{1/K_{OC}}{2 \cdot T_\mu^2 \cdot p + 2 \cdot T_\mu \cdot p + 1}$

№ п/п	Вид передаточной функции неизменяемой части $W_{HH}(p)$	Тип регулятора	Настройки регулятора	Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура
	 а)  б)  в) (- - -) –исходная система; (—) –синтезированная система; а) – графики переходного процесса; б) – логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура; в) – логарифмические частотные характеристики замкнутого контура			

4. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ ПО КУРСОВОЙ РАБОТЕ «МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ БАРАБАННЫХ КОТЛОВ»

«Они стояли на стальном листовом полу около гигантского котла, в который уголь, только что раздробленный в мельчайшую пыль, в огромном количестве вдувался напором воздуха. В котле уголь мгновенно воспламенялся и прокаливался до белизны, небольшой участок этого пекла можно было увидеть в специальное застекленное отверстие для контроля – это было похоже на попытку заглянуть в ад в дверной глазок. Жар от угля нагревал воду в трубах котла, расположенных в виде решетки. Вода быстро превращалась в пар под большим давлением, который с шумом поступал в специальное отделение, где нагревался до сверхвысоких температур, достигающих до тысячи градусов по Фаренгейту. Пар в свою очередь заставлял вращаться турбогенератор, который вместе с другими агрегатами вырабатывал почти три четверти, потребляемой Денвером и ближайшими населенными пунктами электроэнергии – общая мощность электростанции составляла миллион киловатт».

Arthur Hailey OVERLOAD 1986 (Артур Хейли ПЕРЕГРУЗКА 1986 г.)

На рис. 36 показана упрощенная технологическая схема энергоблока: барабанный котел – турбина [7].

В топку котла подается смесь из топлива G_T и прогретого в воздухоподогревателе (ВП) воздуха. Выделяемая при сгорании топлива тепловая энергия передается через поверхности нагрева: экранными трубами (ЭК), пароперегревателем (ПП) и экономайзером (ВЭ), что приводит к последовательному превращению в насыщенный пар, затем в перегретый пар с давлением $P_{ПП}$ и температурой $\Theta_{ПП}$ поступившей в котел питательной воды $G_{ПВ}$, отделение воды от пара происходит в барабане котла (Б).

Через дымовую трубу удаляются очищенные продукты сгорания топлива.

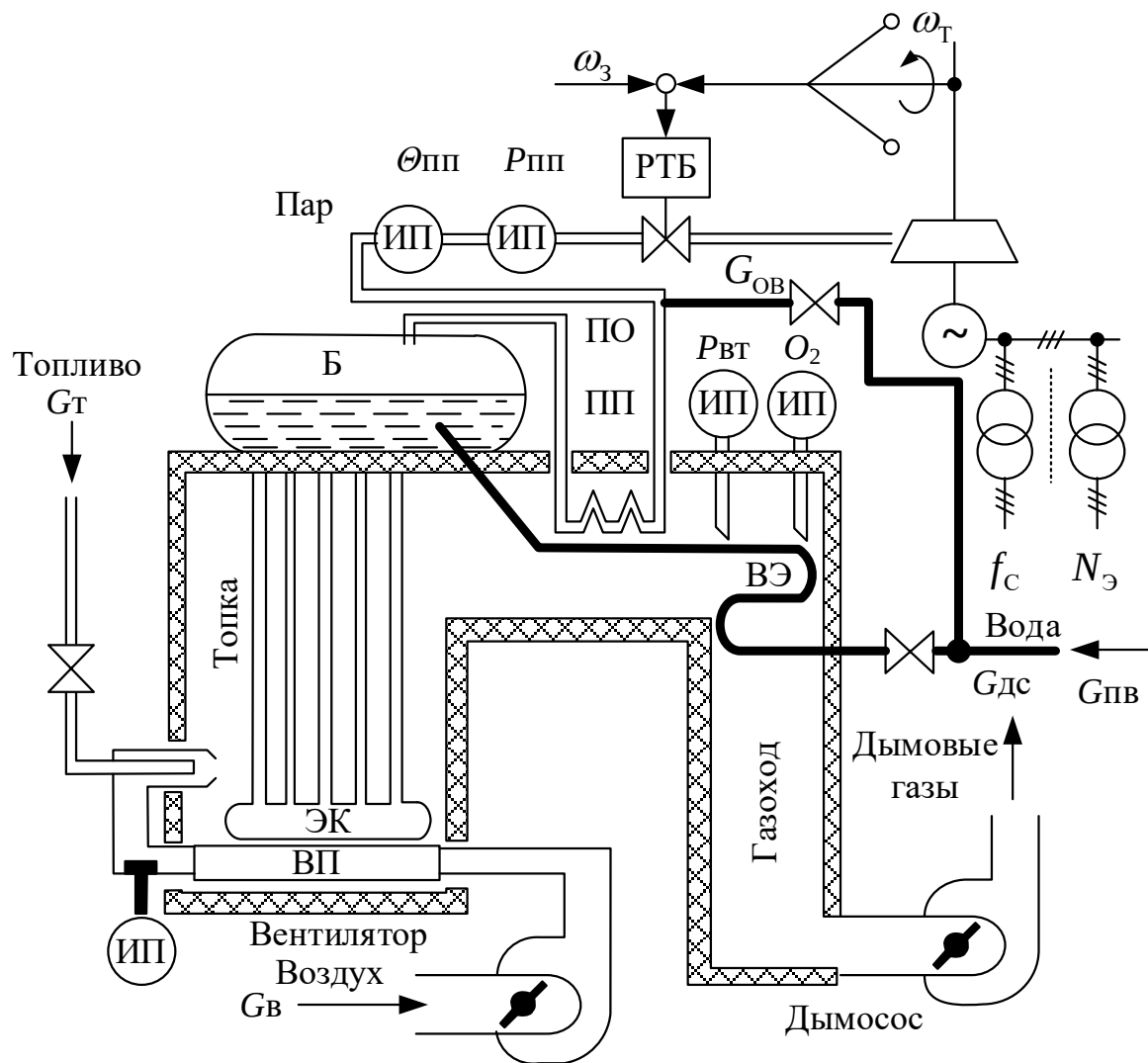


Рис. 36. Технологическая схема энергоблока:
барбанный котел – турбина в упрощенном виде

Дальнейшее преобразование механической энергии перегретого пара в электрическую энергию трехфазного переменного тока заданной частоты f_c и напряжения происходит в турбогенераторе (совмещенные на одном валу паровая турбина и синхронный генератор).

Цель управления такой энергетической системой – выработка в каждый момент времени требуемого количества электрической энергии (мощности $N_э$) (рис. 37) [7].

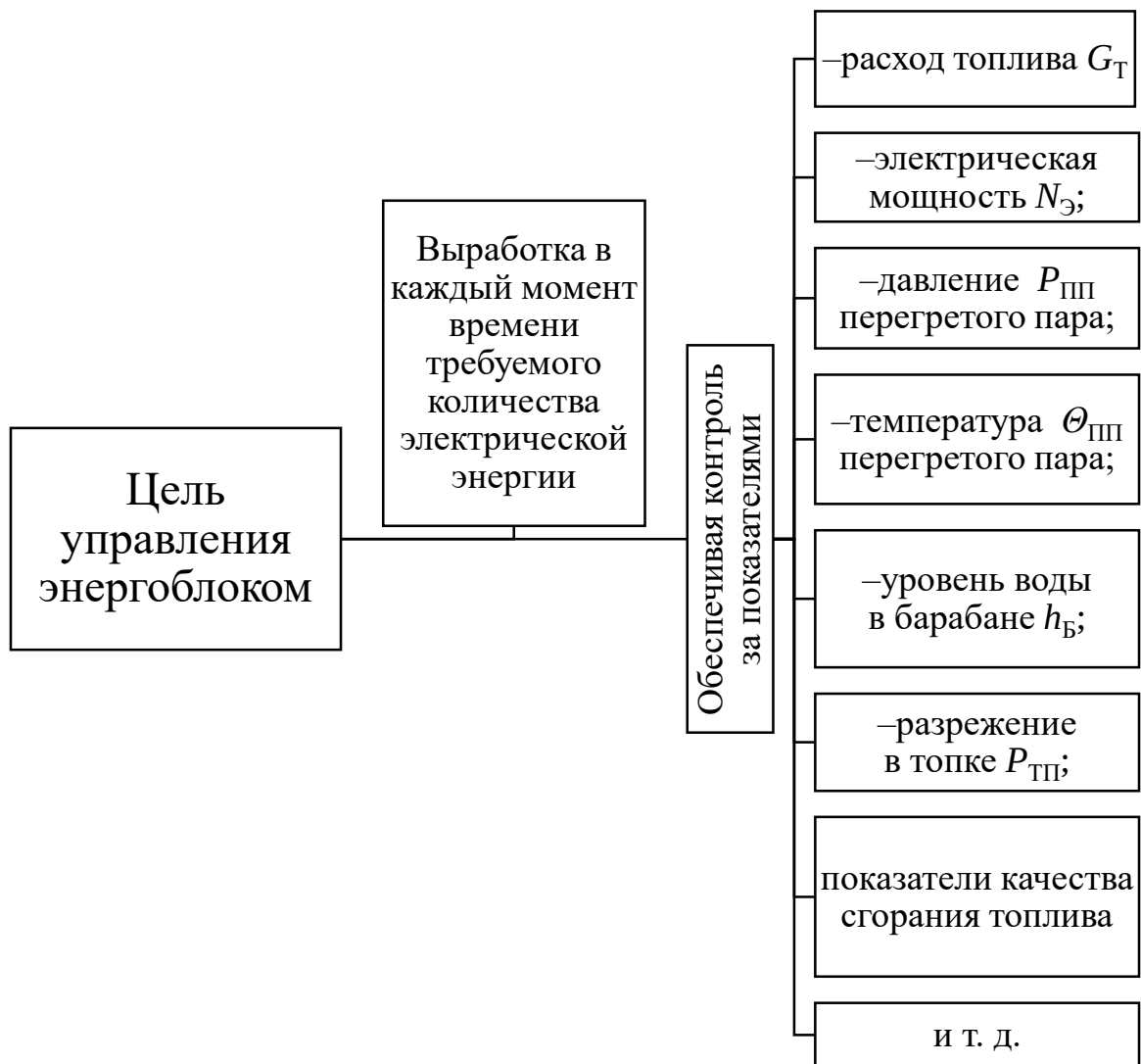


Рис. 37. Цель управления энергетической системой

Для обеспечения возможности управлять показателями (рис. 37) в энергоблоке используют управляющие и регулирующие органы [6]:

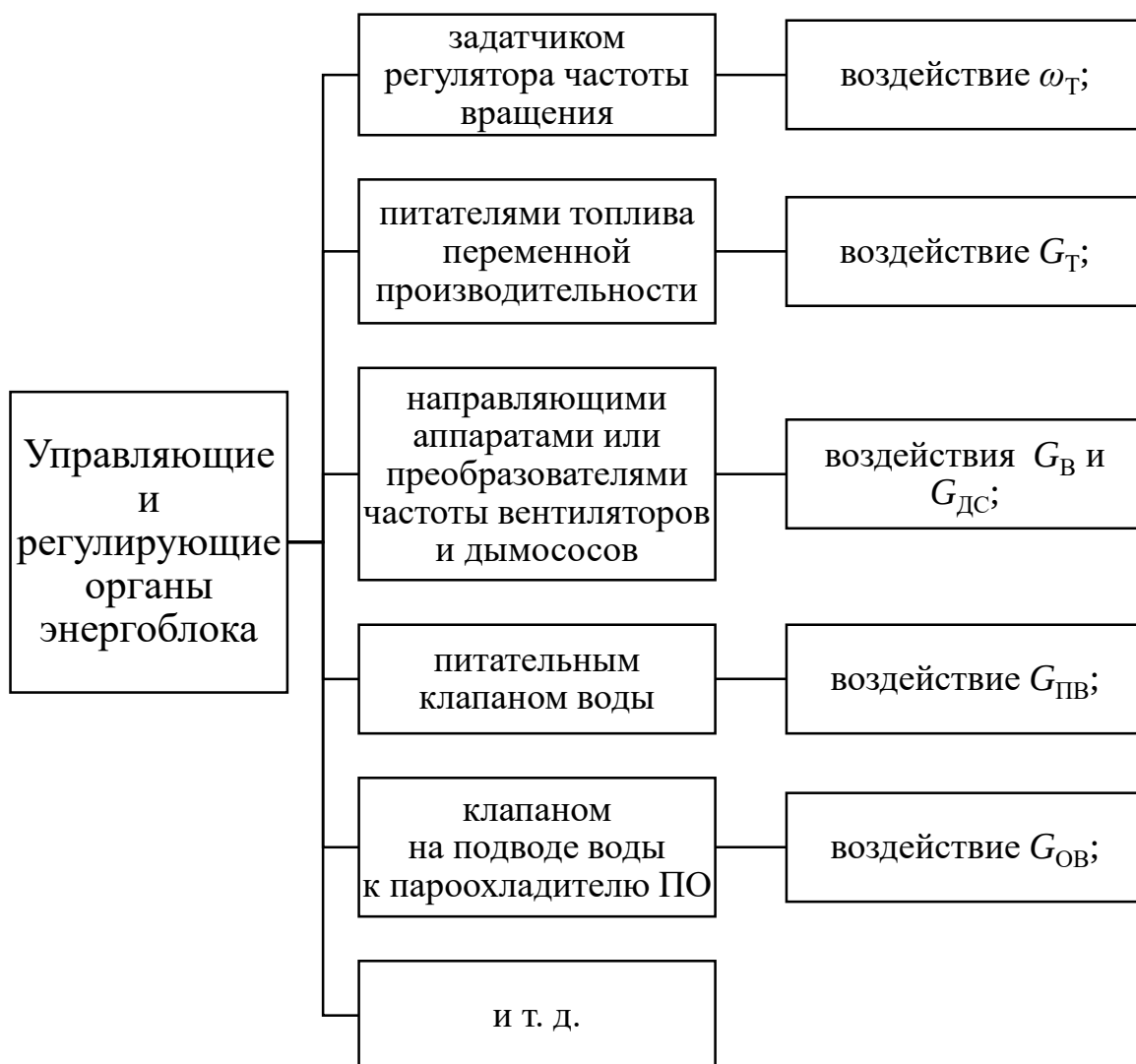


Рис. 38. Управляющие и регулирующие органы энергоблока

4.1. Замкнутый контур управления давлением пара за барабаном

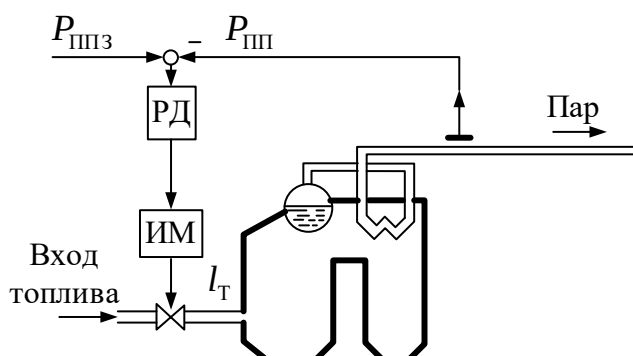


Рис. 39. Функциональная схема системы регулирования давлением пара за барабаном

Замкнутый контур управления давлением пара за барабаном показан на рис. 39.

Из рис. 39 следует, что в контур управления величины давления пара за барабаном будет в себя включать:

- Объект управления, включающий в себя топку, барабан, для которого управляющим воздействием будет расход топлива $G_T(p) \left[\frac{\text{т}}{\text{час}} \right]$, а возмущающим – расход пара $G_{\Pi}(p) \left[\frac{\text{т}}{\text{час}} \right]$.
- Датчик давления пара;
- Регулятор;
- Исполнительный механизм – позиционер;
- Регулирующий орган.

4.1.1. Выбор необходимого оборудования

4.1.1.1. В качестве датчика давления пара выбран *датчик*:

Тип – xxx

Производитель xxx

Основные технические характеристики

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

Верхний предел измерения – 4,5 МПа;

Выходной сигнал – 4-20 мА.

4.1.1.2. Исполнительный механизм – позиционер

Тип xxx

1 – Тип механизма (xxx)

2 – Номинальный крутящий момент на выходном валу, Н м (xxx)

3 – Номинальное время полного хода выходного вала (10 секунд)

4 – Номинальное значение полного хода выходного вала, об, с (xxx)

5 – Модельный год (xxx)

К – трехфазное напряжение питания (xxx).

4.1.1.3. В качестве регулирующего органа используется *затвор дисковый*, применяются в качестве запорно-регулирующих устройств в технологических линиях на рабочие среды: вода, воздух, газ, пар, мазут, масло, нефтепродуктTM.

4.1.2. Построение структурно-аналитической схемы замкнутого контура регулирования величины давления пара за барабаном

Структурно-аналитическую схему системы регулирования по каналу «расход топлива – давление пара за барабаном» можно представить в виде рис. 40.

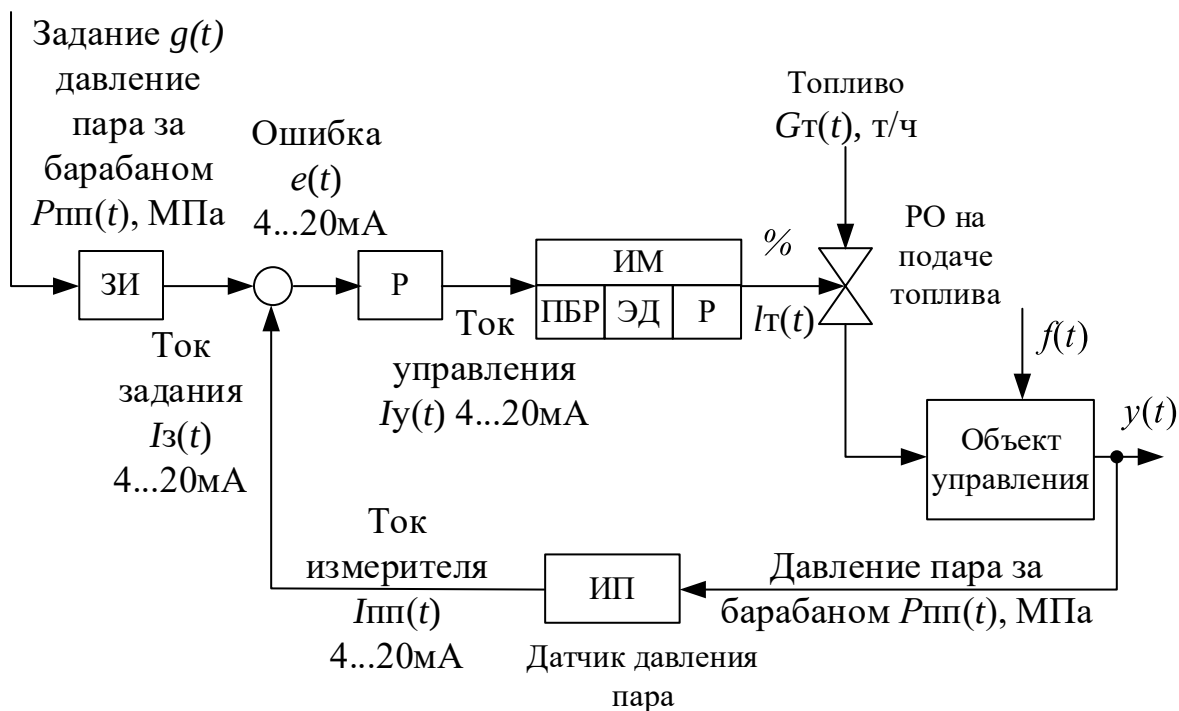


Рис. 40. Алгоритмическая схема системы регулирования по каналу «расход топлива – давление пара за барабаном»

4.1.3. Передаточные функции элементов системы $W(p) = \frac{Y(p)}{U(p)}$:

Для определения передаточных функций будем считать, что построена аналоговая система, в которой переменные передаются токовым сигналом 4...20 мА.

– Датчика давления перегретого пара:

$$W_{\text{ДПП}}(p) = \frac{I_{\text{ПП}}(p)}{P_{\text{П.П.}}(p)} = K_{\text{ДД}}, \quad (73)$$

где $I_{\text{ПП}}(p)$ – выходной ток датчика давления перегретого пара, мА; $P_{\text{П.П.}}(p)$ – регулируемая величина – давление перегретого пара, МПа, определяется максимальным значением датчика давления:

$$K_{\text{ДД}} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 4.5} = \frac{20 - 4}{4.5 - 0} = 3.556 \left[\frac{\text{мА}}{\text{МПа}} \right]. \quad (74)$$

– Задатчика управляемого параметра (здатчик интенсивности):

$$W_{\text{ЗИ}}(p) = \frac{I_3(p)}{P_{\text{П.П.}}(p)} = K_{\text{ЗИ}}, \quad (75)$$

где $I_3(p)$ – выходной ток ЗИ, мА; $g(p)$ – заданная величина – давление перегретого пара, МПа, определяется максимальным значением, соответствующим технологическому процессу:

$$K_{\text{ЗИ}} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 4.5} = \frac{20 - 4}{4.5 - 0} = 3.556 \left[\frac{\text{мА}}{\text{МПа}} \right]. \quad (76)$$

– Исполнительного механизма:

Передаточная функция исполнительного механизма, согласно выражениям (44) – (50), будет:

$$\begin{aligned} W_{\text{ИМ}}(p) &= W_{\text{БРП}}(p) \cdot W_{\text{ЭД}}(p) \cdot W_{\text{Ред}}(p) = \\ &= \frac{K_{\text{ЭД}} \cdot K_{\text{Ред}} \cdot K_{\text{БРП}}}{T_{\text{ИМ}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{БРП}} \cdot p + 1)} = \\ &= \frac{0.38 \cdot 0.685 \cdot 23.75}{10 \cdot p \cdot (0.567 \cdot p + 1) \cdot (0.05 \cdot p + 1)} \end{aligned} \quad (77)$$

– Передаточная функция датчика положения штока:

$$W_{\text{ДШ}}(p) = \frac{I_l(p)}{l_{\text{Ш}}(p)} = K_{\text{Ш}} \quad (78)$$

$$K_{\text{Ш}} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 100} = \frac{16}{100 - 0} = 0.16 \left[\frac{\text{мА}}{\%} \right]. \quad (79)$$

– Регулирующего органа:

$$W_{\text{РО}}(p) = \frac{G_{\text{T}}(p)}{l_{\text{T}}(p)} = K_{\text{РО}}, \quad (80)$$

где $G_{\text{T}}(p)$ – выходная величина РО – подача топлива в топку, т/ч, определяется максимальным допустимым значением, соответствующим технологическому процессу.

$$K_{\text{РО}} = \frac{0 \dots 5}{0 \dots 100} = \frac{5 - 0}{100 - 0} = 0.05 \left[\frac{\text{т/ч}}{\%} \right] \quad (81)$$

– Объекта управления по управляющему воздействию.

График изменения давления, перегретого при изменении подачи топлива, имеет вид, показанный на рис. 41.

Вид временной разгонной характеристики соответствует переходной характеристики апериодического звена первого порядка с некоторым запаздыванием.

$$P_{\text{П.П.}}(t) = K_{\text{ОУ}} \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T_{\text{ОУ}}}} \right). \quad (82)$$

Методика определения параметров звена изложена в (п. 0).

$$W_{\text{ОУ|У}}(p) = \frac{P_{\text{П.П.}}(p)}{G_{\text{T}}(p)} = \frac{K_{\text{ОУ|У}} \cdot e^{-\tau_{\text{У}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|У}} \cdot p + 1} = \frac{0.8 \cdot e^{-10p}}{30 \cdot p + 1}. \quad (83)$$

График изменения величины давления пара $P_{\text{п.п.}}(t)$ при изменении расхода пара $G_{\text{п.п.}}(t)$ также имеет вид апериодического процесса (рис. 42).

Передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию будет иметь вид (п. 0):

$$W_{\text{ОУ|В}}(p) = \frac{P_{\text{п.п.}}(p)}{G_{\text{п.п.}}(p)} = \frac{K_{\text{ОУ|В}} \cdot e^{-\tau_{\text{В}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|В}} \cdot p + 1} = \frac{-0.09 \cdot e^{-10p}}{80 \cdot p + 1}. \quad (84)$$

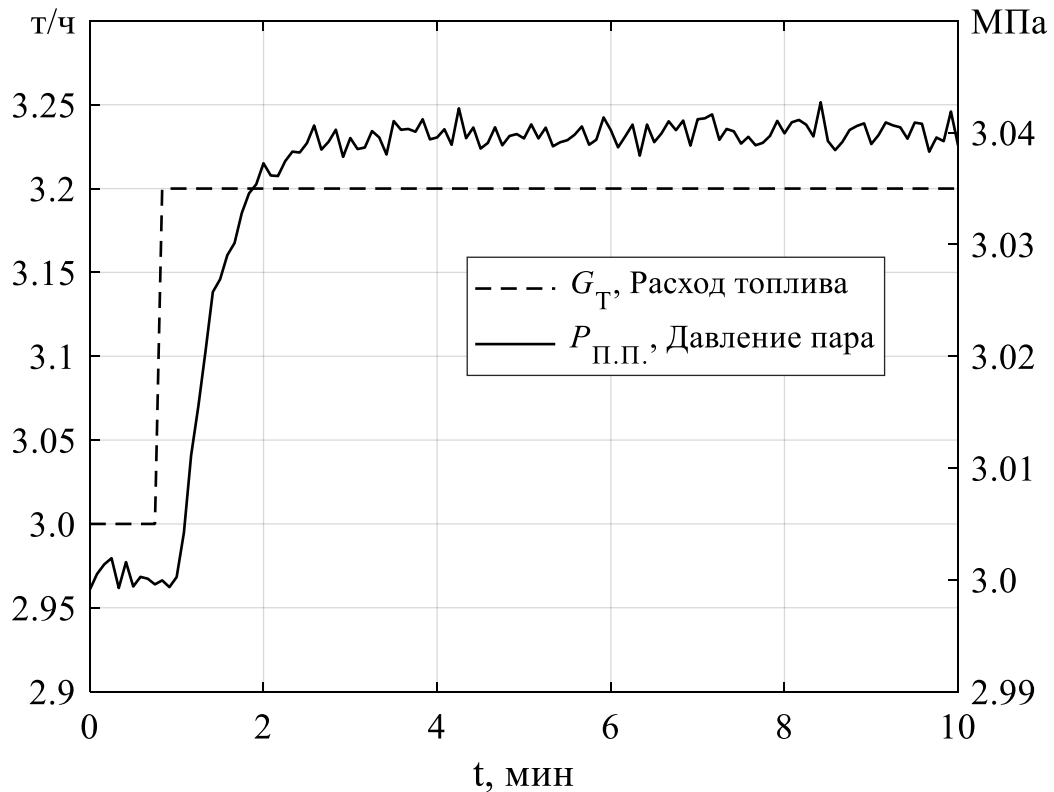


Рис. 41. График изменения давления перегретого пара при изменении подачи топлива

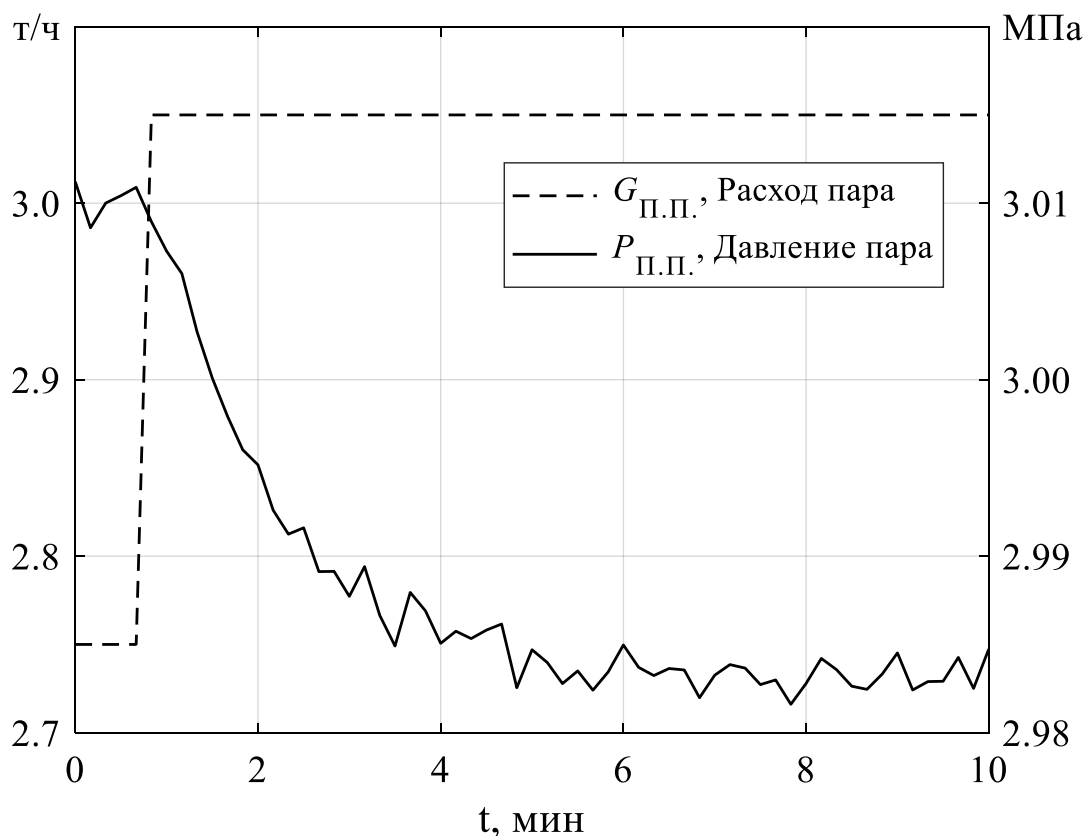


Рис. 42. График изменения давления перегретого пара при изменении расхода пара

4.1.4. Синтез системы

Данную систему будем рассматривать как двухконтурную каскадную систему (систему подчиненного регулирования) рис. 43.

На рис. 43 показаны следующие блоки:

- Р2 – регулятор величины давления пара за барабаном;
- Р1 – регулятор положения штока позиционера;
- ПБР – пускатель бесконтактный реверсивный;
- ЭД – электрический двигатель позиционера;
- Ред – редуктор позиционера;
- РО – регулирующий орган;
- ОУ – объект управления;
- Д_ш – датчик положения штока позиционера;
- Д_{рв} – датчик регулируемой величины (давления пара).

Блоки, входящие в позиционер, обведены пунктирной линией.

Синтез такой системы будем производить от внутреннего контура (Р1-ПБР-ЭД-Ред- Д_ш) к внешнему.

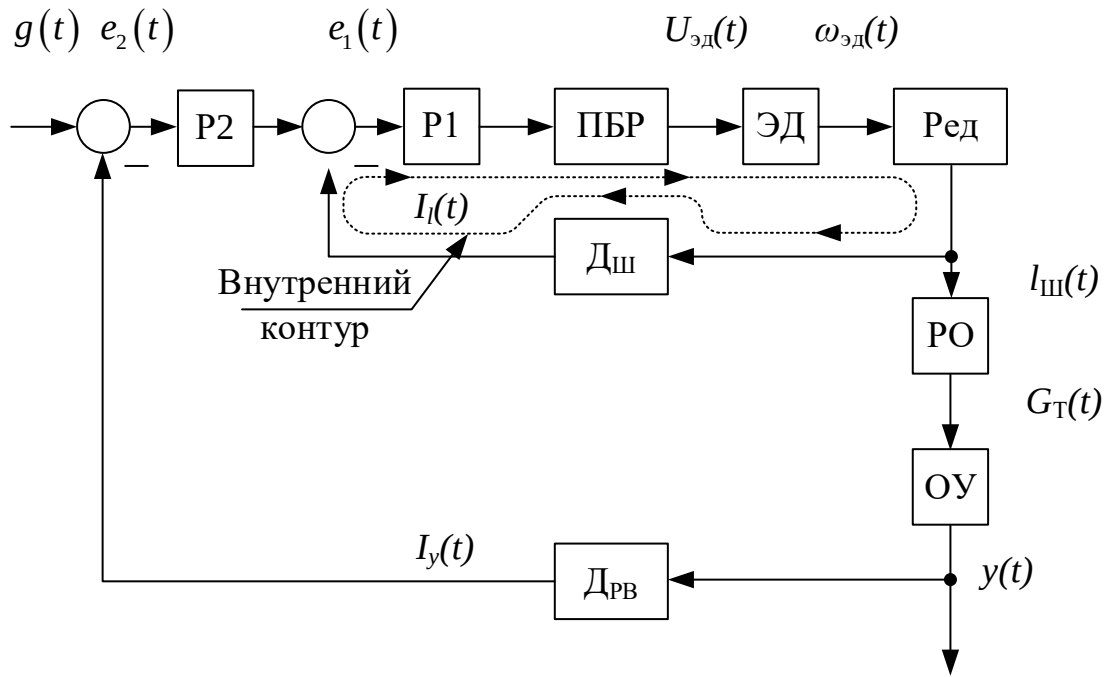


Рис. 43. Алгоритмическая схема каскадной системы (система подчиненного регулирования)

Согласно рис. 43, передаточная функция неизменяемой части внутреннего контура будет:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{НН}}(p) &= W_{\text{БРП}}(p) \cdot W_{\text{ЭД}}(p) \cdot W_{\text{Ред}}(p) = \\
 &= \frac{K_{\text{БРП}}}{T_{\text{БРП}} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{\text{ЭД}}}{T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{\text{Ред}}}{T_{\text{ИМ}} \cdot p} \\
 &= \frac{0.38 \cdot 0.685 \cdot 23.75}{10 \cdot p \cdot (0.567 \cdot p + 1) \cdot (0.05 \cdot p + 1)}
 \end{aligned} \tag{85}$$

Как было отмечено в главе 0, при синтезе системы, состоящей из апериодических звеньев и одного интегрирующего, достаточно применить П-регулятор.

$$W_{\text{Р1}}(p) = \beta_{\text{Р1}} \tag{86}$$

$$\begin{aligned}
 \beta_{\text{Р1}} &= \frac{T_{\text{ИМ}}}{2(T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot K_{\text{БРП}} \cdot K_{\text{ЭД}} \cdot K_{\text{Ред}} \cdot K_{\text{Ш}}} = \\
 &= \frac{10}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot 0.38 \cdot 0.685 \cdot 23.75 \cdot 0.16} = 8.1927
 \end{aligned} \tag{87}$$

Передаточную функцию разомкнутого внутреннего контура запишем следующим образом:

$$\begin{aligned}
W_{\text{РАЗЛ}}(p) &= W_{\text{П1}}(p) \cdot W_{\text{НН1}}(p) = \\
&= W_{\text{П1}}(p) \cdot W_{\text{БРП}}(p) \cdot W_{\text{ЭД}}(p) \cdot W_{\text{Ред}}(p) = \\
&= \frac{\cancel{T_{\text{ИМ}}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot \cancel{K_{\text{БРП}}} \cdot \cancel{K_{\text{ЭД}}} \cdot \cancel{K_{\text{Ред}}} \cdot K_{\text{Ш}}} \cdot \\
&\quad \cdot \frac{\cancel{K_{\text{БРП}}}}{T_{\text{БРП}} \cdot p + 1} \cdot \frac{\cancel{K_{\text{ЭД}}}}{T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1} \cdot \frac{\cancel{K_{\text{Ред}}}}{\cancel{T_{\text{ИМ}}} \cdot p} = \\
&= \frac{1}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot K_{\text{Ш}} \cdot p \cdot (T_{\text{БРП}} \cdot p + 1) (T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1)} = \\
&= \frac{1}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot 0.16 \cdot p \cdot ((0.05 + 0.567) \cdot p + 1)}
\end{aligned} \tag{88}$$

Передаточная функция замкнутого контура будет:

$$\begin{aligned}
W_{\text{ЗАМЛ}}(p) &= \frac{W_{\text{РАЗЛ}}(p)}{1 + W_{\text{РАЗЛ}}(p) \cdot W_{\text{ОС}}(p)} = \\
&= \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot K_{\text{Ш}} \cdot p \cdot ((T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1)}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot K_{\text{Ш}} \cdot p \cdot ((T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1)} \cdot K_{\text{Ш}}} = \\
&= \frac{1}{\frac{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot K_{\text{Ш}} \cdot p \cdot ((T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1)}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot K_{\text{Ш}} \cdot p \cdot ((T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1)} + K_{\text{Ш}}} = \\
&= \frac{1/K_{\text{Ш}}}{\left[2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p \cdot ((T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1) + 1 \right]} = \\
&= \frac{1/K_{\text{Ш}}}{2^2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}})^2 \cdot p^2 + 2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \approx \\
&\approx \frac{1/K_{\text{Ш}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} = \frac{1/0.16}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot p + 1}
\end{aligned} \tag{89}$$

Внешний контур (рис. 43) состоит из следующих блоков:

- Р2 – регулятор величины давления пара за барабаном;
- Замкнутый внутренний контур;
- ОУ – объект управления;
- ДРВ – датчик регулируемой величины (давления пара).

Определим передаточную функцию внешнего разомкнутого контура:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{РА32}}(p) &= W_{\text{Р2}}(p) \cdot W_{\text{ЗАМ1}}(p) \cdot W_{\text{РО}}(p) \cdot W_{\text{ОУ}}(p) = \\
 &= W_{\text{Р2}}(p) \cdot \frac{1/K_{\text{Ш}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot K_{\text{РО}} \cdot \frac{K_{\text{О|У}} \cdot e^{-\tau_{\text{У}} \cdot p}}{T_{\text{О|У}} \cdot p + 1} = \\
 &= W_{\text{Р2}}(p) \cdot \underbrace{\frac{1/0.16}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot p + 1}}_{T_1} \cdot 0.05 \cdot \underbrace{\frac{0.8 \cdot e^{-10 \cdot p}}{30 \cdot p + 1}}_{T_2}
 \end{aligned} \tag{90}$$

После подстановки цифровых значений получаем следующие соотношения между постоянными времени T_i :

$$\underbrace{2 \cdot (0.05 + 0.567)}_{T_1} < \underbrace{10}_{T_2} < \underbrace{30}_{T_3} \tag{91}$$

В главе 0 показано, что звено с запаздыванием можно считать апериодическим звеном второго порядка.

Следовательно, для внешнего контура при синтезе можно считать, что система состоит из трех апериодических звеньев с одной большой постоянной времени $T_{\text{О|У}}$ и двумя с малыми $T_{\mu} = 2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) + \tau_{\text{У}}$.

$$\begin{aligned}
 W_{\text{РА32}}(p) &= \frac{1/K_{\text{Ш}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot K_{\text{РО}} \cdot \frac{K_{\text{О|У}}}{T_{\text{О|У}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{\text{У}} \cdot p + 1} = \\
 &= \frac{1/K_{\text{Ш}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot K_{\text{РО}} \cdot \frac{K_{\text{О|У}}}{T_{\text{О|У}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{\text{У}} \cdot p + 1} = \\
 &= \underbrace{\frac{1/0.16}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot p + 1}}_{T_1} \cdot 0.05 \cdot \underbrace{\frac{0.8}{30 \cdot p + 1}}_{T_2} \cdot \underbrace{\frac{1}{10 \cdot p + 1}}_{T_3}
 \end{aligned} \tag{92}$$

Тогда в качестве регулятора будем использовать ПИ-регулятор, настроенный на ОМ (глава 0):

$$W_{\text{Р}}(p) = \beta_{\text{Р}} \cdot \frac{\tau_{\text{Р}} \cdot p + 1}{\tau_{\text{Р}} \cdot p} \tag{93}$$

Настройки регулятора должны быть следующими:

$$\beta_p = \frac{T_O}{2 \cdot T_\mu \cdot \prod_{v=1}^n K_v} \quad (94)$$

$$\beta_{p2} = \frac{T_{O|y}}{2 \cdot \left(2 \cdot (T_{БРП} + T_{ЭД}) + \tau_{|y} \right) \cdot \frac{1}{K_{III}} \cdot K_{РО} \cdot K_{O|y} \cdot K_{ДД}} =$$

$$= \frac{30}{2 \cdot \left(2 \cdot (0.05 + 0.567) + 10 \right) \cdot \frac{1}{0.16} \cdot 0.05 \cdot 0.8 \cdot 3.556} = 1.5019 \quad (95)$$

$$\tau_{p2} = T_{O|y} = 30 \quad (96)$$

С учетом (95) выражение (90) запишем следующим образом:

$$W_{РА32}(p) = W_{P2}(p) \cdot W_{ЗАМ1}(p) \cdot W_{РО}(p) \cdot W_O(p) =$$

$$= \frac{\cancel{T_{O|y}}}{2 \cdot T_\mu \cdot \cancel{\frac{1}{K_{III}}} \cdot \cancel{K_{РО}} \cdot \cancel{K_{O|y}} \cdot K_{ДД}} \cdot \frac{\cancel{T_{O|y}} \cdot p + 1}{\cancel{T_{O|y}} \cdot p} \cdot$$

$$\cdot \frac{\cancel{\frac{1}{K_{III}}}}{2 \cdot (T_{БРП} + T_{ЭД}) \cdot p + 1} \cdot \cancel{K_{РО}} \cdot \frac{\cancel{K_{O|y}}}{\cancel{T_{O|y}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{|y} \cdot p + 1} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot K_{ДД}} \cdot \frac{1}{2 \cdot (T_{БРП} + T_{ЭД}) \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{|y} \cdot p + 1} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot K_{ДД} \cdot (T_\mu \cdot p + 1)} \quad (97)$$

На рис. 44 показаны окна настроек блоков, задающих ступенчатое воздействие (Step) и блока ввода транспортного запаздывания (Transport Delay).

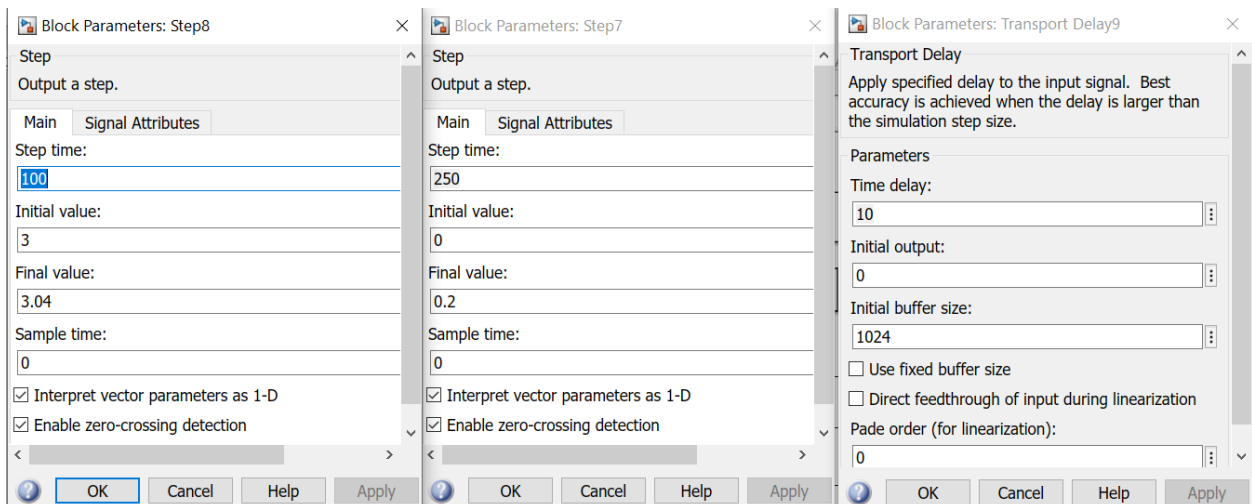


Рис. 44. Окна настроек блоков Step и Transport Delay

4.1.5. Анализ синтезированной системы

Результаты моделирования при ступенчатом отклонении регулируемой величины ($3 \rightarrow 3,04$) и отклонении возмущающего воздействия ($3 \rightarrow 0,02$) на рис. 45.

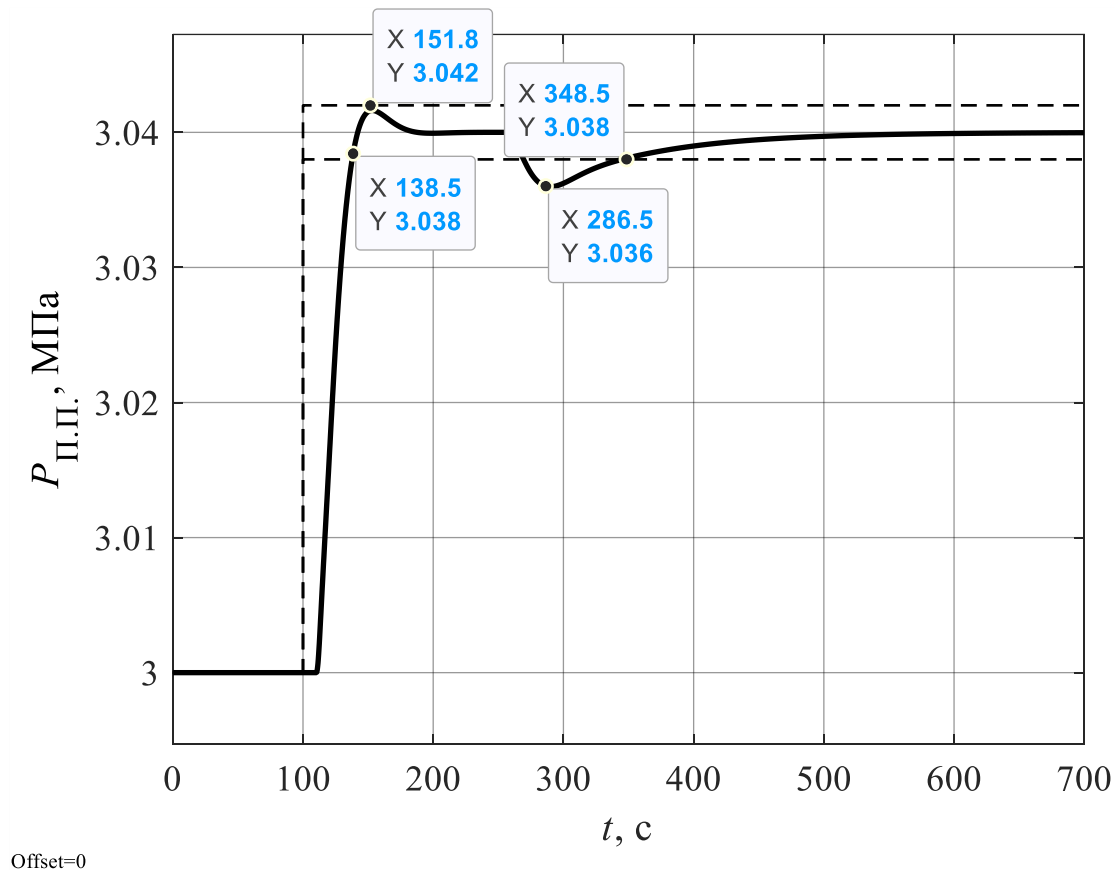


Рис. 45. График изменения давления пара в системе регулирования по каналу «расход топлива – давление пара за барабаном»

При ступенчатом управляющем воздействии получен переходный процесс с перерегулированием меньше 5%, время переходного процесса составило 138 секунды (рис. 45).

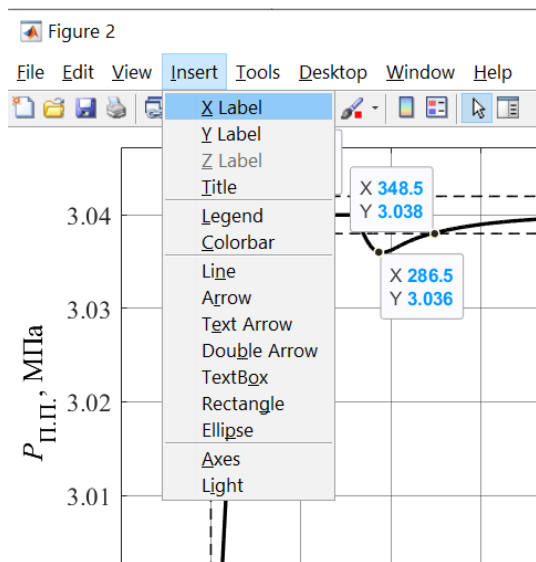
При ступенчатом возмущении максимальное отклонение не превысило 0,004 МПа (рис. 45).

Команда для построения наименования осей показана на рис. 46а.

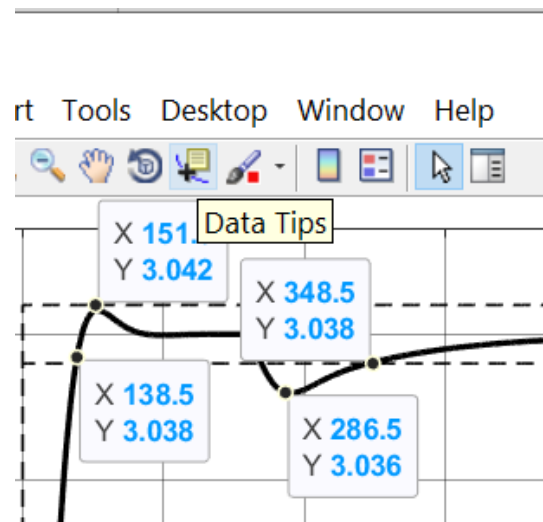
Для задания различного написания шрифтов используются команды LaTeX [12] для заголовка оси:

- Y « $\langle \textit{P} \rangle \text{rm_} \Pi_ \Pi_ , \text{МПа} \rangle$ »;
- X « $\langle \textit{t} \rangle \text{rm, с} \rangle$ ».

Команда для установки маркеров показана на рис. 46б.



а)



б)

Рис. 46. Команда для установки маркеров

Имитационная модель системы регулирования по каналу «расход топлива – давление пара за барабаном» приведена на рис. 47.

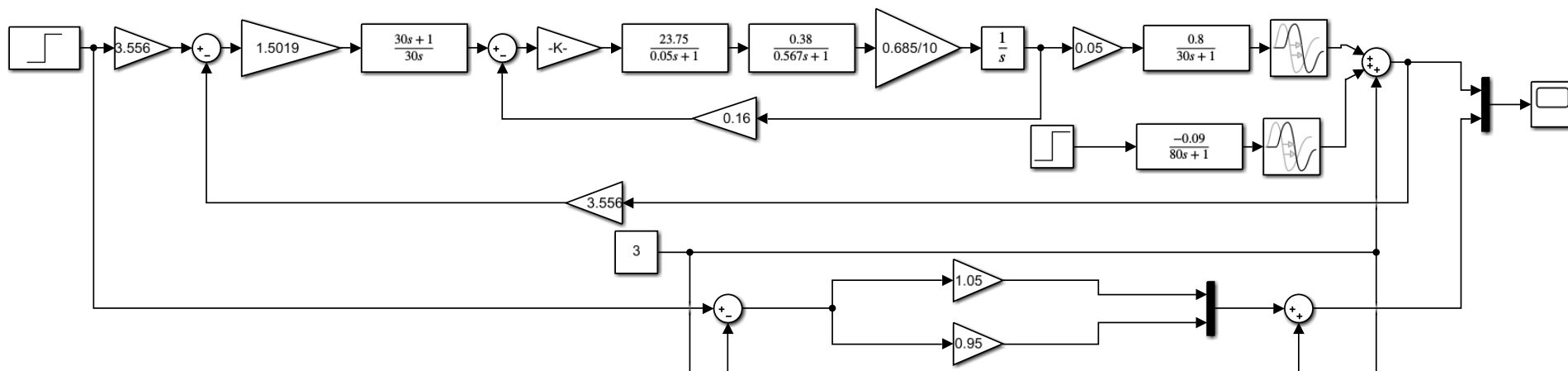


Рис. 47. Имитационная модель системы регулирования по каналу «расход топлива – давление пара за барабаном»

4.2. Замкнутый контур регулирования разрежением в верхней части топки

Функциональная схема системы регулирования разрежением в верхней части топки показана на рис. 48.

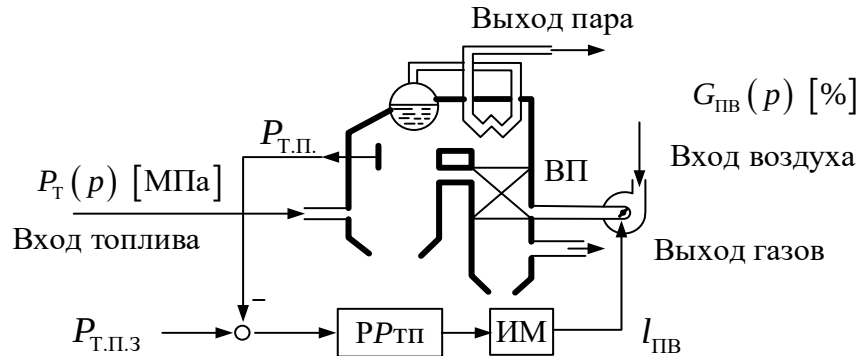


Рис. 48. Функциональная схема системы регулирования разрежением в верхней части топки

Из рис. 48 следует, что в контур управления разрежением в верхней части топки будет в себя включать:

- объект управления, включающий в себя топку, барабан, для которого управляющим воздействием будет подача воздуха $G_{пв}(p)$ [%] где 100% это $55\ 000\ \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$, а возмущающим – давление топлива $P_T(p)$ [МПа];
- датчик давления разрежения в верхней части топки;
- регулятор;
- исполнительный механизм (позиционер);
- регулирующий орган (НА).

Отметим, что согласно п. 0, регулирование производительности тягодутьевой машины может производиться за счет изменения числа оборотов вентилятора, тогда контур управления разрежением в верхней части топки будет в себя включать:

- объект управления, включающий в себя топку, барабан, для которого управляющим воздействием будет подача воздуха $G_{пв}(p)$ [%], где 100% – это $55\ 000\ \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$, а возмущающим – давление топлива $P_T(p)$ [МПа].
- датчик давления разрежения в верхней части топки;
- регулятор;
- преобразователь частоты;
- тягодутьевой аппарат.

4.2.1. Выбор необходимого оборудования при использовании НА

4.2.1.1. В качестве *напорометров* будем использовать:

Тип – xxx

Производитель xxx

Основные технические характеристики

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

Верхний предел измерения – 4,5 МПа;

Выходной сигнал – 4-20 мА.

4.2.1.2. *Исполнительный механизм*

Тип xxx

1 – Тип механизма (xxx)

2 – Номинальный крутящий момент на выходном валу, Н м (xxx)

3 – Номинальное время полного хода выходного вала (10 секунд)

4 – Номинальное значение полного хода выходного вала, об, с (xxx)

5 – Модельный год (xxx)

К – трехфазное напряжение питания (xxx).

4.2.1.3. В качестве регулирующего органа используется *направляющий аппарат*:

Тип – xxx

Производитель xxx

Основные технические характеристики

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

4.2.1.4. *Построение структурно-аналитической схемы замкнутого контура регулирования разрежением в верхней части топки*

Структурно-аналитическую схему системы регулирования по каналу «расход воздуха – разрежение в верхней части топки» можно представить в виде рис. 49.

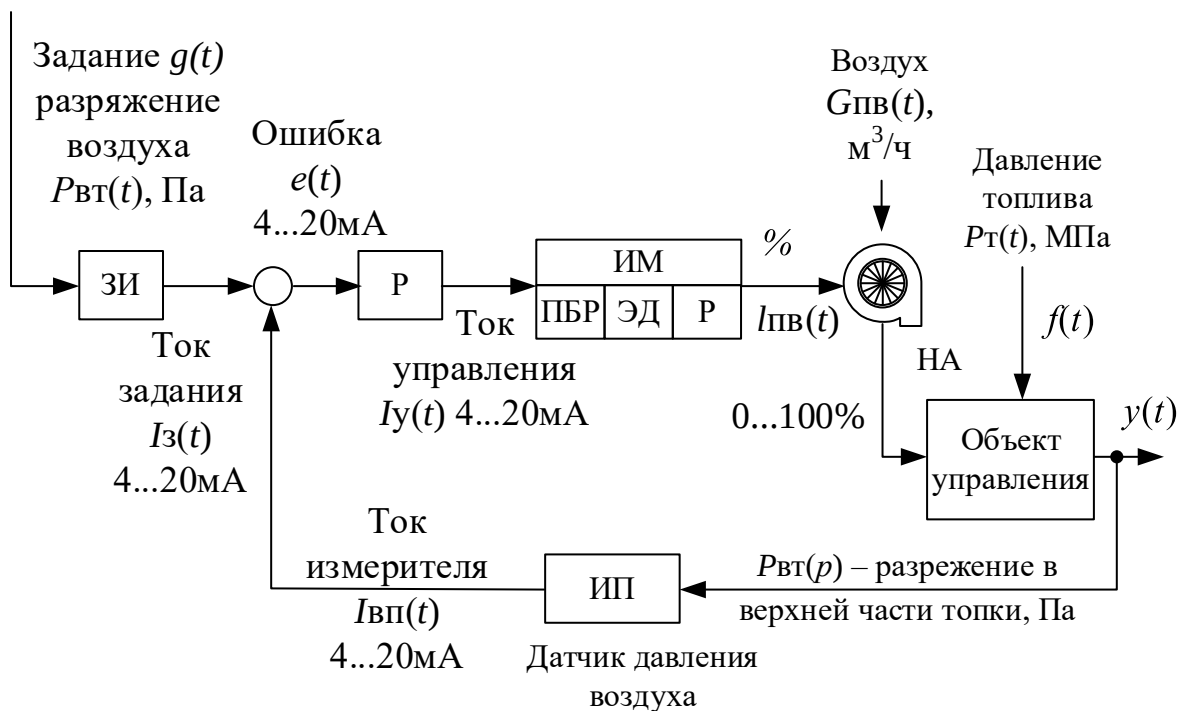


Рис. 49. Алгоритмическая схема системы регулирования по каналу «расход воздуха – разрежение в верхней части топки»

4.2.1.5. Передаточные функции элементов системы:

– Датчика:

$$W_{\text{ДВТ}}(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{I_{\text{ДВТ}}(p)}{P_{\text{ВТ}}(p)} = K_{\text{ДВТ}} \quad (98)$$

$$K_{\text{ДВТ}} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 125} = \frac{20 - 4}{125 - 0} = 0,128 \left[\frac{\text{мА}}{\text{Па}} \right], \quad (99)$$

где $I_{\text{ДВТ}}(p)$ – выходной ток датчика разрежения в верхней части топки, мА;
 $P_{\text{ВТ}}(p)$ – регулируемая величина – разрежение в верхней части топки, Па, определяется максимальным значением датчика давления.

– Задатчика управляемого параметра (здатчик интенсивности):

$$W_{\text{ЗИ}}(p) = \frac{I_3(p)}{P_{\text{ПЗ}}(p)} = K_{\text{ЗИ}}, \quad (100)$$

$$K_{\text{ЗИ}} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 125} = 0,128 \left[\frac{\text{мА}}{\text{Па}} \right], \quad (101)$$

где $I_3(p)$ – выходной ток ЗИ, мА; $g(p)$ – заданная величина – разрежение в верхней части топки, Па, определяется максимальным значением, соответствующему технологическому процессу.

– Исполнительного механизма:

Передаточная функция исполнительного механизма, согласно выражениям (44) – (50), будет:

$$\begin{aligned} W_{\text{ИМ}}(p) &= W_{\text{БРП}}(p) \cdot W_{\text{ЭД}}(p) \cdot W_{\text{Ред}}(p) = \\ &= \frac{K_{\text{ЭД}} \cdot K_{\text{Ред}} \cdot K_{\text{БРП}}}{T_{\text{ИМ}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{БРП}} \cdot p + 1)} = \\ &= \frac{0.38 \cdot 0.685 \cdot 23.75}{10 \cdot p \cdot (0.567 \cdot p + 1) \cdot (0.05 \cdot p + 1)} \end{aligned} \quad (102)$$

– Передаточная функция датчика положения штока:

$$W_{\text{ДШ}}(p) = \frac{I_l(p)}{I_{\text{Ш}}(p)} = K_{\text{Ш}} \quad (103)$$

$$K_{\text{Ш}} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 100} = \frac{16}{100 - 0} = 0,16 \left[\frac{\text{mA}}{\%} \right]. \quad (104)$$

– Регулирующего органа:

$$W_{\text{НА}}(p) = \frac{G_{\text{ПВ}}(p)}{I_{\text{ПВ}}(p)} = K_{\text{НА}} \quad (105)$$

$$K_{\text{НА}} = \frac{0 \dots 100}{0 \dots 100} = \frac{100 - 0}{100 - 0} = 1, \quad (106)$$

где $G_{\text{ПВ}}(p)$ – выходная величина НА – подача воздуха в топку, %, определяется максимальным допустимым значением, соответствующим технологическому процессу.

– Объекта управления по управляющему воздействию.

По виду экспериментального графика изменения разрежения в верхней части топки при изменении расхода воздуха – можно сказать, что передаточная функция объекта управления обладает самовыравниванием и некоторым запаздыванием и имеет вид переходной функции апериодического звена первого порядка.

Методика определения параметров звена изложена в (п. 0).

$$W_{\text{ОУ|У}}(p) = \frac{P_{\text{ВТ}}(p)}{G_{\text{ПВ}}(p)} = \frac{K_{\text{ОУ|У}} \cdot e^{-\tau_{\text{У}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|У}} \cdot p + 1} = \frac{0,4 \cdot e^{-10p}}{25 \cdot p + 1} \quad (107)$$

График изменения величины разрежения в верхней части топки $P_{\text{ВТ}}(t)$ при изменении давления топлива $P_{\text{Т}}(t)$ также имеет вид апериодического процесса (рис. 51).

Передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию определяется согласно (п. 0):

$$W_{\text{ОУ|В}}(p) = \frac{P_{\text{ВТ}}(p)}{P_{\text{Т}}(p)} = \frac{K_{\text{ОУ|В}} \cdot e^{-\tau_{\text{В}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|В}} \cdot p + 1} = \frac{-8 \cdot e^{-10p}}{25 \cdot p + 1}. \quad (108)$$

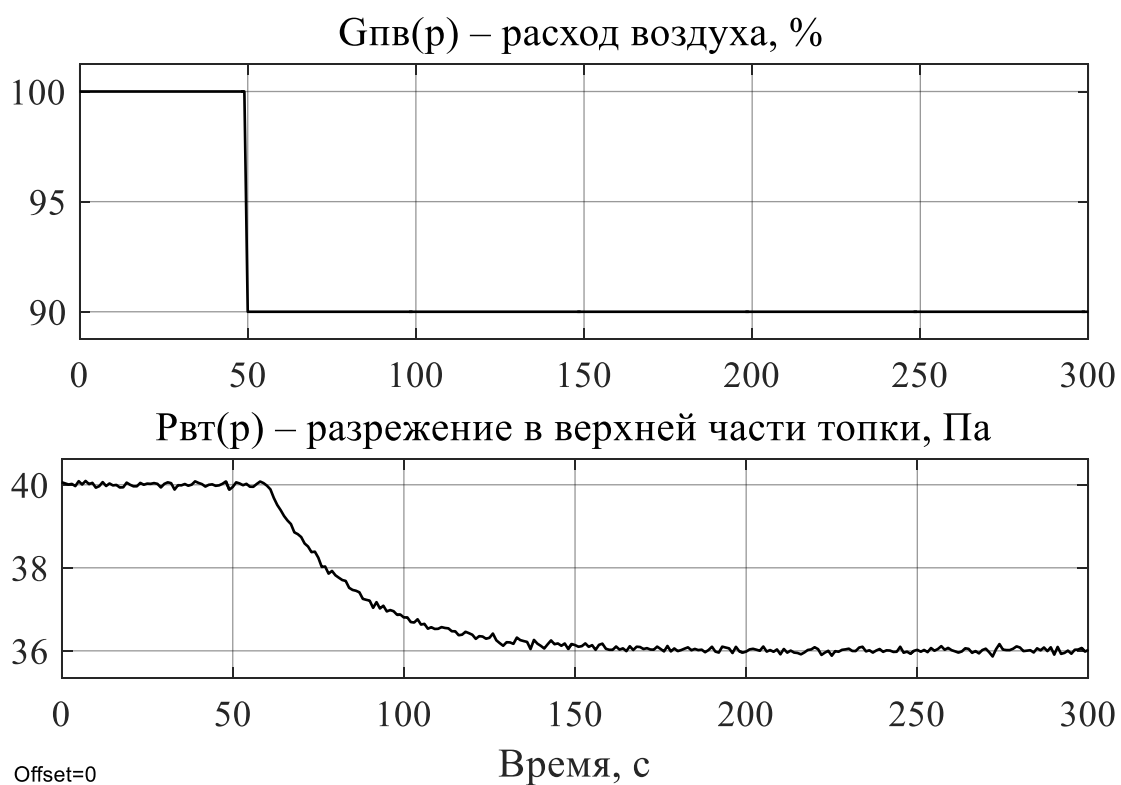


Рис. 50. Экспериментальная кривая зависимости расхода воздуха – разрежение в верхней части топки

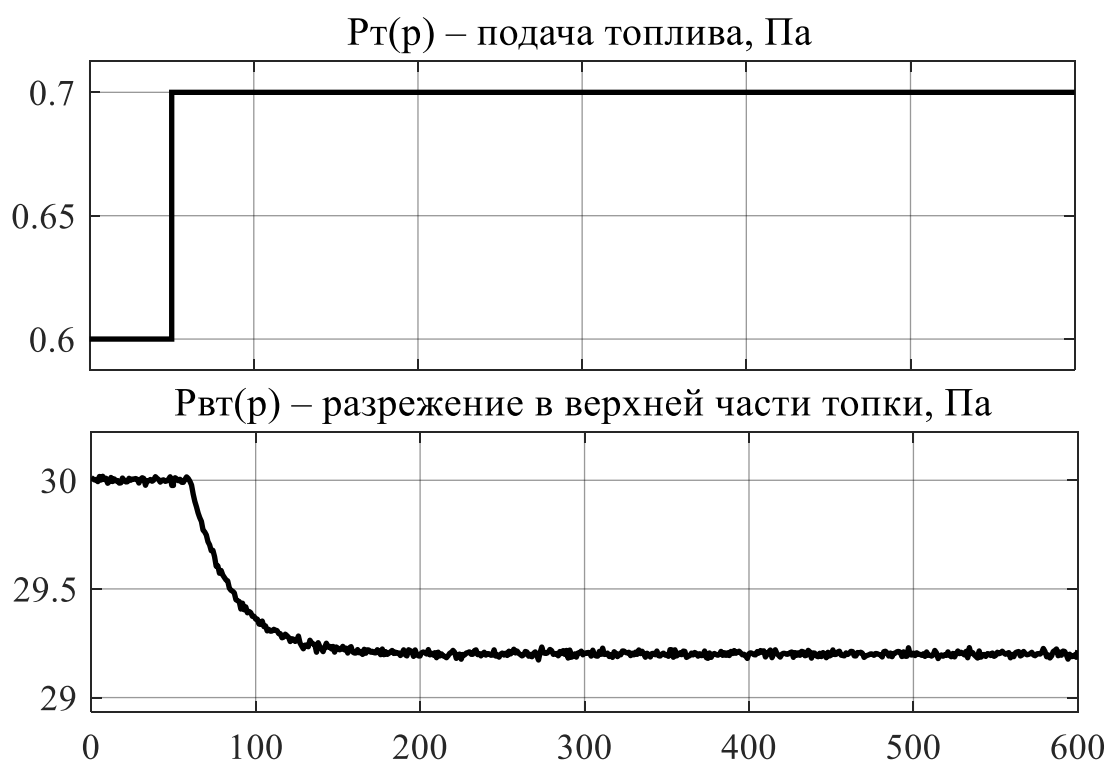


Рис. 51. Экспериментальная кривая зависимости давление топлива – разрежение в верхней части топки

4.2.1.6. Синтез системы

Данную систему будем рассматривать как двухконтурную каскадную систему (систему подчиненного регулирования) (рис. 43, см. п. 0), тогда передаточная функция внутреннего замкнутого контура, согласно (85) – (89) будет:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{ЗАМ1}}(p) &= \frac{W_{\text{РА31}}(p)}{1 + W_{\text{РА31}}(p) \cdot W_{\text{ОС}}(p)} = \\
 &= \frac{1/K_{\text{Ш}}}{\left[2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p \cdot ((T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1) + 1 \right]} = \\
 &= \frac{1/K_{\text{Ш}}}{2^2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}})^2 \cdot p^2 + 2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \approx \\
 &\approx \frac{1/K_{\text{Ш}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} = \frac{1/0.16}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot p + 1}
 \end{aligned} \tag{109}$$

Внешний контур (рис. 43) состоит из следующих блоков:

- Р2 – регулятор величины давления пара за барабаном;
- Замкнутый внутренний контур;
- ОУ – объект управления;
- ДРВ – датчик регулируемой величины (датчик разрежения в верхней части топки).

Определим передаточную функцию внешнего разомкнутого контура:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{РА32}}(p) &= W_{\text{Р2}}(p) \cdot W_{\text{ЗАМ1}}(p) \cdot W_{\text{НА}}(p) \cdot W_{\text{ОУ}}(p) = \\
 &= W_{\text{Р2}}(p) \cdot \frac{1/K_{\text{Ш}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot K_{\text{НА}} \cdot \frac{K_{\text{ОУ}} \cdot e^{-\tau_{\text{У}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ}} \cdot p + 1} = \\
 &= W_{\text{Р2}}(p) \cdot \underbrace{\frac{1/0.16}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot p + 1}}_{T_1} \cdot 1 \cdot \underbrace{\frac{0.4 \cdot e^{-10 \cdot p}}{25 \cdot p + 1}}_{T_2}
 \end{aligned} \tag{110}$$

После подстановки цифровых значений получаем следующие соотношения между постоянными времени T_i :

$$\underbrace{2 \cdot (0.05 + 0.567)}_{T_1} < 10 < 25 \tag{111}$$

$T_2 \quad T_3$

В главе 0 показано, что звено с запаздыванием можно считать аperiодическим звеном второго порядка.

Следовательно, для внешнего контура при синтезе можно считать, что система состоит из трех апериодических звеньев с одной большой постоянной времени $T_{O|y}$ и двумя с малыми $T_\mu = 2 \cdot (T_{БРП} + T_{ЭД}) + \tau_{|y}$:

$$\begin{aligned}
 W_{PA32}(p) &= \\
 &= \frac{1/K_{Ш}}{2 \cdot (T_{БРП} + T_{ЭД}) \cdot p + 1} \cdot K_{НА} \cdot \frac{K_{O|y}}{T_{O|y} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{|y} \cdot p + 1} = \\
 &= \frac{1/0.16}{\underbrace{2 \cdot (0.05 + 0.567)}_{T_1} \cdot p + 1} \cdot 1 \cdot \frac{0.4}{\underbrace{25}_{T_2} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\underbrace{10}_{T_3} \cdot p + 1} =
 \end{aligned} \tag{112}$$

Тогда в качестве регулятора будем использовать ПИ-регулятор, настроенный на ОМ (глава 0):

$$W_{P2}(p) = \beta_{P2} \cdot \frac{\tau_{P2} \cdot p + 1}{\tau_{P2} \cdot p}. \tag{113}$$

Настройки регулятора должны быть следующими:

$$\beta_{P2} = \frac{T_O}{2 \cdot T_\mu \cdot \prod_{v=1}^n K_v} \tag{114}$$

$$\begin{aligned}
 \beta_{P2} &= \frac{T_{O|y}}{2 \cdot (2 \cdot (T_{БРП} + T_{ЭД}) + \tau_{|y}) \cdot 1/K_{Ш} \cdot K_{НА} \cdot K_{O|y} \cdot K_{ДВТ}} = \\
 &= \frac{25}{2 \cdot (2 \cdot (0.05 + 0.567) + 10) \cdot 1/0.16 \cdot 1 \cdot 0.4 \cdot 0.128} = 1.49
 \end{aligned} \tag{115}$$

$$\tau_{P2} = T_{O|y} = 25 \tag{116}$$

С учетом (115) и (116), выражение (112) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned}
W_{\text{PA3}}(p) &= W_P(p) \cdot W_{\text{ЗАМ1}}(p) \cdot W_{\text{НА}}(p) \cdot W_O(p) = \\
&= \frac{\cancel{T_{O|Y}}}{2 \cdot T_\mu \cdot \cancel{1/K_{\text{И}}}} \cdot \cancel{K_{\text{РQ}}} \cdot \cancel{K_{O|Y}} \cdot K_{\text{ДВТ}} \cdot \frac{\cancel{T_{O|Y} \cdot p + 1}}{\cancel{T_{O|Y} \cdot p}} \cdot \\
&\cdot \frac{\cancel{1/K_{\text{И}}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot \cancel{K_{\text{НА}}} \cdot \frac{\cancel{K_{O|Y}}}{\cancel{T_{O|Y} \cdot p + 1}} \cdot \frac{1}{\tau_{|Y} \cdot p + 1} = \\
&= \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot K_{\text{ДВТ}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{|Y} \cdot p + 1} = \\
&= \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot K_{\text{ДВТ}} \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}
\end{aligned} \tag{117}$$

Ниже приведен листинг расчета переходных процессов по управлению (изменение задающего сигнала $25 \rightarrow 27$) и по возмущению (изменение давления топлива на 0,1 МПа).

```

Pvt_z=2;%Изменение задающего воздействия 0=>2, Па
Pt=0.1;%Изменение возмущающего воздействия 0=>0,1,
МПа
Pvt_0=25;%Начальное значение разрежения, Па
tpp=600;%Время моделирования, подбирается,
%      чтоб был виден весь переходный процесс
%      Задание 5% поцентной зоны для определения
%      времени переходного процесса
tuv=[0,tpp];
yuv=[Pvt_0+(Pvt_z*1.05),Pvt_0+(Pvt_z*1.05)];
tun=[0,tpp];
yun=[Pvt_0+(Pvt_z*0.95),Pvt_0+(Pvt_z*0.95)];
%Задание параметров передаточных функций
%ИМ
Tim=10;
Kpbr=23.75;
Tpbr=0.05;
Ked=0.38;
Kred=0.685;
Ted=0.567;
Ksh=0.16;
%НА
Kna=1;
%Объекта управления по управляющему воздействию

```

```

Kou_u=0.4;
Tou_u=25;
tau_u=10;
%Объекта управления по возмущающему воздействию
Kou_v=-8;
Tou_v=25;
tau_v=10;
%Датчика давления
Kdvt=0.128;
%Ввод передаточных функций
Wdvt=tf([Kdvt],[1]);%Датчика давления
Wzi=tf([Kdvt],[1]);%Задатчика управляющего сигнала
%Позиционер
Wpbr=tf([Kpbr],[Tpbr 1]);
Wed=tf([Ked],[Ted 1]);
Wred=tf([Kred],[Tim 0]);
Wsh=tf([Ksh],[1]);
Wna=tf([Kna],[1]);%НА
Wou_u=tf([Kou_u],[Tou_u 1], 'inputdelay', tau_u);%ОУ
по упр.
Wou_v=tf([Kou_v],[Tou_v 1], 'inputdelay', tau_v);%ОУ
по возм.
%Синтез внутреннего контура
%Определение параметров ПИ-регулятора
beta1=Tim/(2*(Ted+Tpbr)*Kpbr*Ked*Kred*Ksh);
tau1=Tim;
Wr1=tf([beta1],[1])*tf([tau1 1],[tau1 0]);
%Определение передаточной функции внутреннего контура
Wraz1=Wr1*Wpbr*Wed*Wred;
Wzam1=Wraz1/(1+Wraz1*Wsh)
%Синтез внешнего контура
%Определение параметров ПИ-регулятора
beta2=Tou_u/(2*(2*(Ted+Tpbr)+Tou_u)*Kou_u*Kna*Kdvt*(1/Ksh));
tau2=Tou_u
Wr2=tf([beta2],[1])*tf([tau2 1],[tau2 0]);
%Построение передаточной функции разомкнутой системы
Wraz_u=Wr2*Wzam1*Wna*Wou_u;
%Построение передаточной функции замкнутой системы
%по управляющему воздействию
Wzam_u=Wraz_u/(1+Wraz_u*Wdvt);
%Построение передаточной функции замкнутой системы

```

```

%по возмущающему воздействию
Wzam_v=Wou_v/(1+Wraz_u*Wdvt);
%Расчет переходного процесса
%по управляющему воздействию
[y_u,t_u]=step(Wzam_u*Wzi*Pvt_z,tpp);
%Расчет переходного процесса
%по возмущающему воздействию
[y_v,t_v]=step(Wzam_v*Pt,tpp);
%Ввод параметров графика
set(0,'DefaultAxesFontSize',14,'DefaultAxesFontName',
'Times New Roman');
set(0,'DefaultTextFontSize',14,'DefaultTextFontName',
'Times New Roman');
%Построение графиков переходного процесса
subplot(121)
hPlot_u = plot(t_u,y_u+Pvt_0,'k-',...
    tuv,yuv,'k--',tun,yun,'k--'),grid;
set(hPlot_u,'LineWidth',2);
xlabel('\it t\rm, c');
ylabel('\it P\rm_B_T_, Па');
subplot(122)
hPlot_u = plot(t_v,y_v+Pvt_0+Pvt_z,...
    'k-',tuv,yuv,'k--',tun,yun,'k--'),grid;
set(hPlot_u,'LineWidth',2);
xlabel('\it t\rm, c');
ylabel('\it P\rm_B_T_, Па');

```

Результат моделирования показан на рис. 52.

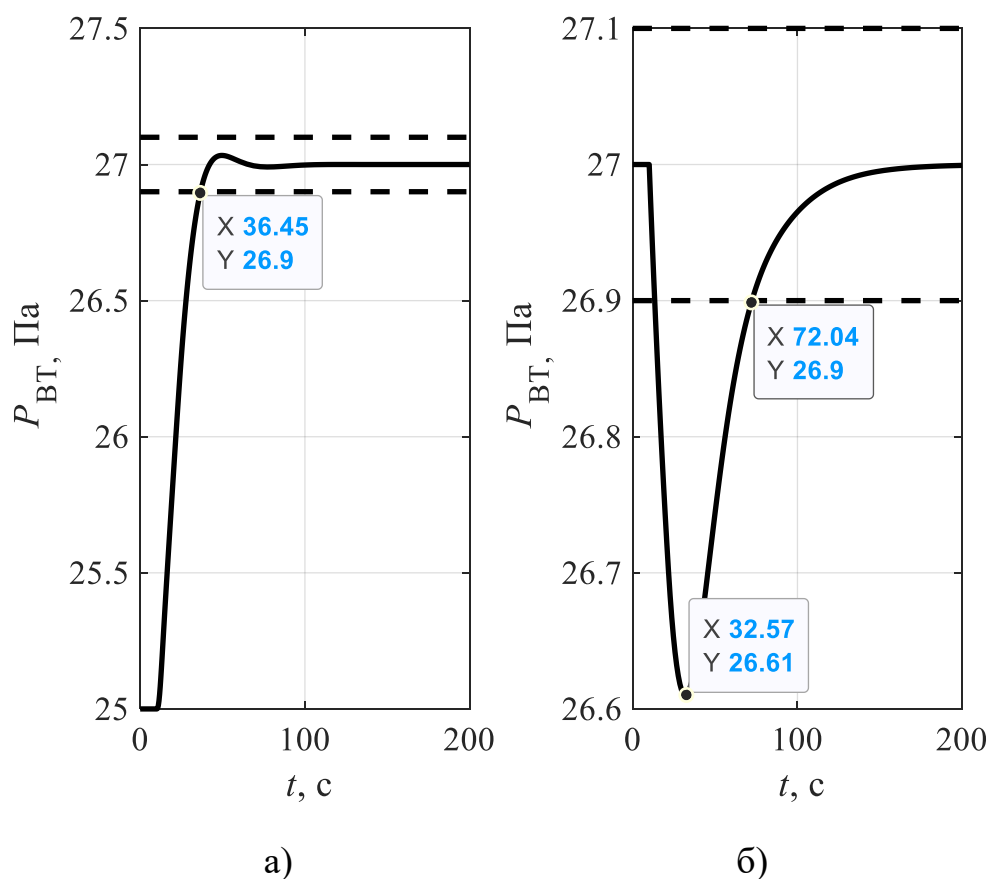


Рис. 52. График изменения разрежения
в верхней части топки

- а) переходный процесс по управляющему воздействию;
б) переходный процесс по возмущающему воздействию

4.2.1.7. Анализ синтезированной системы

Из рис. 52 следует, что получены:

- переходный процесс по управлению с перерегулированием, не превышающем 5% и время переходного процесса составило 37 с;
- переходный процесс по возмущению с максимальным отклонением 0,4 Па, время переходного процесса составило 67 с;

4.2.2. Выбор необходимого оборудования при использовании частотного регулирования производительности

4.2.2.1. В качестве *напорометров* будем использовать:

Тип – xxx

Производитель xxx

Основные технические характеристики

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

Верхний предел измерения – 4,5 МПа;

Выходной сигнал – 4-20 мА.

4.2.2.2. Тягодутьевой аппарат

Тип xxx

1 – Производительность (xxx)

2 – Номинальная частота вращения (xxx)

3 – Номинальная мощность (xxx)

Основные технические характеристики

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

4.2.2.3. Для питания электрического двигателя тягодутьевой машины будем использовать **частотный преобразователь**:

Тип – xxx

Производитель xxx

Мощность – xxx

Основные технические характеристики

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

4.2.2.4. Построение структурно-аналитической схемы замкнутого контура регулирования разрежением в верхней части топки

Структурно-аналитическую схему системы регулирования по каналу «расход воздуха – разрежение в верхней части топки» при изменении производительности тягодутьевой машины можно представить в виде рис. 49.

4.2.2.5. Передаточные функции элементов системы:

– Датчика:

$$W_{\text{ДВТ}}(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{I_{\text{ДВТ}}(p)}{P_{\text{ВТ}}(p)} = K_{\text{ДВТ}} \quad (118)$$

$$K_{\text{ДВТ}} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 125} = \frac{20 - 4}{125 - 0} = 0,128 \left[\frac{\text{мА}}{\text{Па}} \right], \quad (119)$$

где $I_{\text{ДВТ}}(p)$ – выходной ток датчика разрежения в верхней части топки, мА;
 $P_{\text{ВТ}}(p)$ – регулируемая величина – разрежение в верхней части топки, Па, определяется максимальным значением датчика давления.

– Задатчика управляемого параметра (задатчик интенсивности):

$$W_{\text{ЗИ}}(p) = \frac{I_3(p)}{P_{\text{ПЗ}}(p)} = K_{\text{ЗИ}} \quad (120)$$

$$K_{3И} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 125} = 0,128 \left[\frac{\text{мА}}{\text{Па}} \right], \quad (121)$$

где $I_3(p)$ – выходной ток ЗИ, мА; $g(p)$ – заданная величина – разрежение в верхней части топки, Па, определяется максимальным значением, соответствующим технологическому процессу.

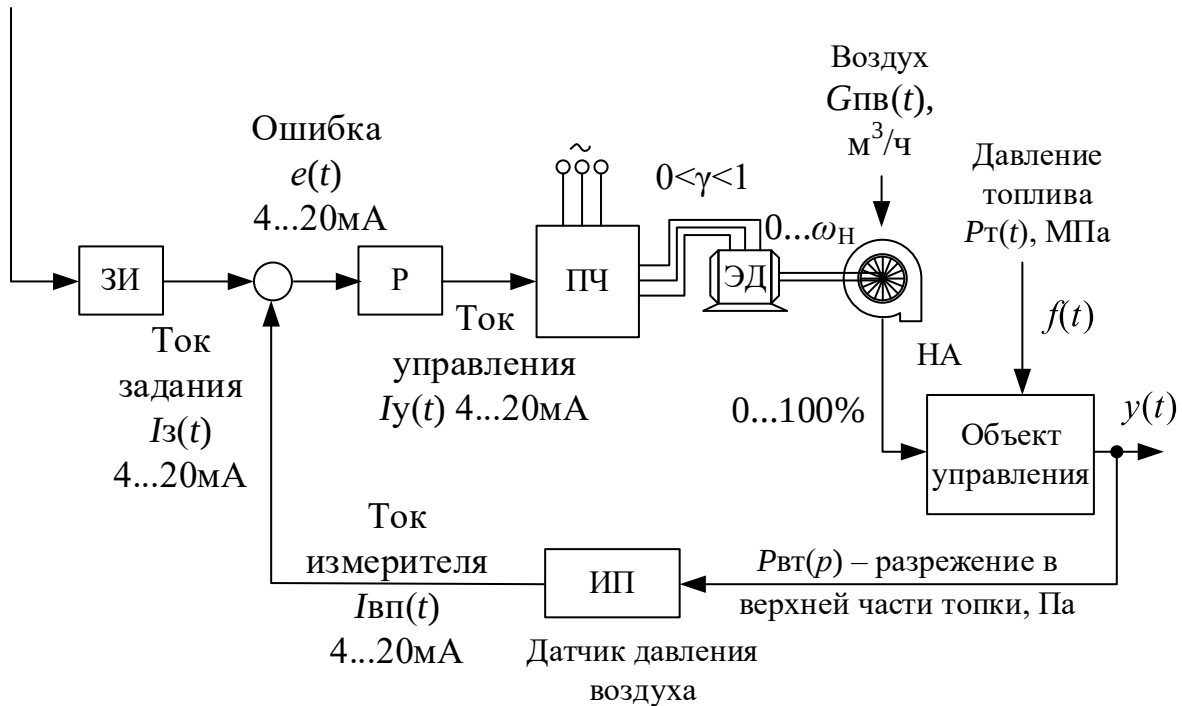


Рис. 53. Алгоритмическая схема системы регулирования по каналу «расход воздуха – разрежение в верхней части топки»

– Частотного преобразователя:

$$W_{чп}(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{U_{эд}(p)}{I_y(p)} = \frac{K_{чп}}{T_{чп} \cdot p + 1} = \frac{23.75}{0.015 \cdot p + 1} \quad (122)$$

где $K_{чп}$ – коэффициент передачи частотного преобразователя;

$T_{чп}$

– постоянная времени частотного преобразователя, 0.005... 0.07 с.

$$K_{чп} = \frac{0 \dots 380}{4 \dots 20} = \frac{1}{16} = 23.75. \quad (123)$$

Электрического двигателя:

$$W_{эд}(p) = \frac{\omega_{эд}(p)}{U_{эд}(p)} = \frac{K_{эд}}{T_{эд} \cdot p + 1} = \frac{146}{1.167 \cdot p + 1}, \quad (124)$$

где $K_{эд}$ – коэффициент передачи электродвигателя;

$T_{эд}$ – постоянная времени электродвигателя:

$$K_{эд} = \frac{\omega_{эд}(p)}{U_{эд}(p)} = \frac{146}{380} = 0.384. \quad (125)$$

Двигатель выбран с номинальной частотой 1400 об/мин, тогда $\omega = n \cdot \pi / 30$. Считается, что двигатель средней мощности разгоняется до номинальной скорости за 2.5...3.9 с. Из (8) следует, что при запаздывании $\tau = 0$ переменная достигает 5-ой% зоны от установившегося значения за время $t_{\text{ПП}} = 3 \cdot T$.

$$T_{\text{ЭД}} = \frac{2.5 \dots 3.9}{3} = 1.167 \text{ [с]} \quad (126)$$

– Датчик частоты вращения вала двигателя:

$$W_{\text{Д}\omega}(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{I_{\text{Д}\omega}(p)}{\omega_{\text{ЭД}}(p)} = K_{\text{Д}\omega} \quad (127)$$

$$K_{\text{Д}\omega} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 146} = \frac{20 - 4}{300 - 0} = 0,05 \left[\frac{\text{мА}}{\text{с}^{-1}} \right], \quad (128)$$

где $I_{\text{Д}\omega}(p)$ – выходной ток датчика частоты вращения вала двигателя, мА; $\omega_{\text{ЭД}}(p)$ – регулируемая величина – частота вращения вала двигателя, с^{-1} , определяется максимальным значением датчика давления.

– Тягодутьевой машины:

$$W_{\text{ТДМ}}(p) = \frac{G_{\text{ПВ}}(p)}{\omega(p)} = K_{\text{ТВМ}} \quad (129)$$

$$K_{\text{ТВМ}} = \frac{0 \dots 100}{0 \dots 146} = \frac{100 - 0}{146 - 0} = 0.685, \quad (130)$$

где $G_{\text{ПВ}}(p)$ – выходная величина НА – подача воздуха в топку, %, определяется максимальным допустимым значением, соответствующим технологическому процессу.

– Объекта управления по управляющему воздействию:

Остается без изменений:

$$W_{\text{ОУ|У}}(p) = \frac{P_{\text{ВТ}}(p)}{G_{\text{ПВ}}(p)} = \frac{K_{\text{ОУ|У}} \cdot e^{-\tau_{\text{У}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|У}} \cdot p + 1} = \frac{0,4 \cdot e^{-10p}}{25 \cdot p + 1}. \quad (131)$$

Передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию остается без изменений:

$$W_{\text{ОУ|В}}(p) = \frac{P_{\text{ВТ}}(p)}{P_{\text{Т}}(p)} = \frac{K_{\text{ОУ|В}} \cdot e^{-\tau_{\text{В}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|В}} \cdot p + 1} = \frac{-8 \cdot e^{-10p}}{25 \cdot p + 1}. \quad (132)$$

4.2.2.6. Синтез системы

Данную систему будем рассматривать как двухконтурную каскадную систему (систему подчиненного регулирования) (рис. 54).

На рис. 54 показаны следующие блоки:

- Р2 – регулятор величины разрежения в верхней части топки;
- Р1 – регулятор положения частоты вращения вала двигателя тягодутьевой машины;
- ЧП – частотный преобразователь;
- ЭД – электрический двигатель тягодутьевой машины;
- ТДМ – тягодутьевая машина;
- ОУ – объект управления;
- D_ω – датчик частоты вращения вала двигателя тягодутьевой машины;
- $D_{ДТВ}$ – датчик регулируемой величины (давления пара).

Синтез такой системы будем производить от внутреннего контура (Р1-ЧП-ЭД- D_ω) к внешнему.

Согласно рис. 54, передаточная функция неизменяемой части внутреннего контура будет:

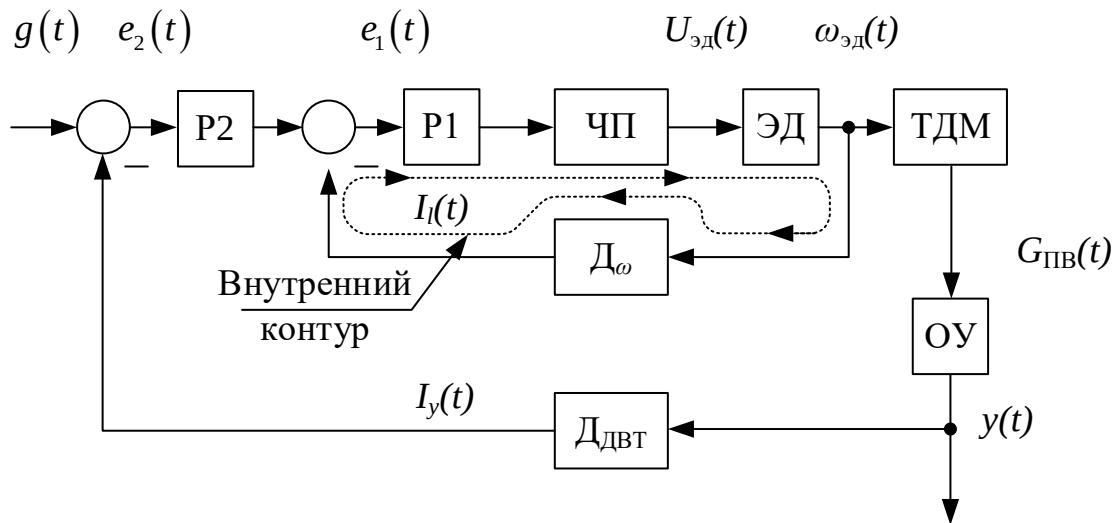


Рис. 54. Алгоритмическая схема каскадной системы (система подчиненного регулирования)

$$\begin{aligned}
 W_{\text{НН1}}(p) &= W_{\text{ЧП}}(p) \cdot W_{\text{ЭД}}(p) = \\
 &= \frac{K_{\text{ЧП}}}{T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{\text{ЭД}}}{T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1} = \\
 &= \frac{23.75}{0.015 \cdot p + 1} \cdot \frac{0.384}{1.167 \cdot p + 1}
 \end{aligned} \tag{133}$$

Как было отмечено в главе 0, при синтезе системы, состоящей из апериодических звеньев, необходимо применять ПИ-регулятор.

$$W_{\text{Р1}}(p) = \beta_{\text{Р1}} \cdot \frac{\tau_{\text{Р1}} \cdot p + 1}{\tau_{\text{Р1}} \cdot p} \tag{134}$$

$$\begin{aligned}
\beta_{p1} &= \frac{T_{\text{ЭД}}}{2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot K_{\text{ЧП}} \cdot K_{\text{ЭД}} \cdot K_{\text{Д}\omega}} = \\
&= \frac{1.167}{2 \cdot 0.015 \cdot 0.38 \cdot 23.75 \cdot 0.05} = 85.2
\end{aligned} \tag{135}$$

Передаточную функцию разомкнутого внутреннего контура запишем следующим образом:

$$\begin{aligned}
W_{\text{РАЗ1}}(p) &= W_{\text{П1}}(p) \cdot W_{\text{НН1}}(p) = \\
&= W_{\text{П1}}(p) \cdot W_{\text{ЧП}}(p) \cdot W_{\text{ЭД}}(p) = \\
&= \frac{\cancel{T_{\text{ЭД}}}}{2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot \cancel{K_{\text{ЧП}}} \cdot \cancel{K_{\text{ЭД}}} \cdot K_{\text{Д}\omega}} \cdot \frac{\cancel{T_{\text{ЭД}}} \cdot p + 1}{\cancel{T_{\text{ЭД}}} \cdot p} \\
&\quad \cdot \frac{\cancel{K_{\text{ЧП}}}}{T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1} \cdot \frac{\cancel{K_{\text{ЭД}}}}{T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1} = \\
&= \frac{1}{2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot K_{\text{Д}\omega} \cdot p \cdot (T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1)} = \\
&= \frac{1}{2 \cdot 0.015 \cdot 0.05 \cdot p \cdot (0.015 \cdot p + 1)}
\end{aligned} \tag{136}$$

Передаточная функция замкнутого контура будет:

$$\begin{aligned}
W_{\text{ЗАМ1}}(p) &= \frac{W_{\text{РАЗ1}}(p)}{1 + W_{\text{РАЗ1}}(p) \cdot W_{\text{ОС}}(p)} = \\
&= \frac{1}{1 + \frac{1}{2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot K_{\text{Д}\omega} \cdot p \cdot (T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1)} \cdot K_{\text{Д}\omega}} = \\
&= \frac{1}{2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot K_{\text{Д}\omega} \cdot p \cdot (T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1)} \cdot \frac{\cancel{2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot K_{\text{Д}\omega} \cdot p \cdot (T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1)}}{\cancel{2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot K_{\text{Д}\omega} \cdot p \cdot (T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1)} + 1} = \\
&= \frac{1/\cancel{K_{\text{Д}\omega}}}{\left[2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1) + 1 \right]} = \\
&= \frac{1/\cancel{K_{\text{Д}\omega}}}{2^2 \cdot T_{\text{ЧП}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1} \approx \\
&\approx \frac{1/\cancel{K_{\text{Д}\omega}}}{2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1} = \frac{1/\cancel{0.05}}{2 \cdot 0.015 \cdot p + 1}
\end{aligned} \tag{137}$$

Внешний контур (рис. 54) состоит из следующих блоков:

- P2 – регулятор величины давления пара за барабаном;
- Замкнутый внутренний контур;
- ОУ – объект управления;
- ДДВТ – датчик регулируемой величины (давления пара).

Определим передаточную функцию внешнего разомкнутого контура:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{РАЗ}}(p) &= W_{\text{P2}}(p) \cdot W_{\text{ЗАМ}}(p) \cdot W_{\text{ТДВ}}(p) \cdot W_{\text{ОУ}}(p) = \\
 &= W_{\text{P2}}(p) \cdot \frac{1/K_{\text{ДВ}}}{2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1} \cdot K_{\text{ТДВ}} \cdot \frac{K_{\text{ОУ}} \cdot e^{-\tau_{\text{У}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ}} \cdot p + 1} = \\
 &= W_{\text{P2}}(p) \cdot \frac{1/0.05}{\underbrace{2 \cdot 0.015}_{T_1} \cdot p + 1} \cdot 0.685 \cdot \frac{0.4 \cdot e^{-10 \cdot p}}{\underbrace{25}_{T_2} \cdot p + 1} =
 \end{aligned} \tag{138}$$

После подстановки цифровых значений получаем следующие соотношения между постоянными времени T_i :

$$\underbrace{2 \cdot 0.015}_{T_1} < \underbrace{10}_{T_2} < \underbrace{25}_{T_3}. \tag{139}$$

В главе 0 показано, что звено с запаздыванием можно считать апериодическим звеном второго порядка.

Следовательно, для внешнего контура при синтезе можно считать, что система состоит из трех апериодических звеньев с одной большой постоянной времени $T_{\text{ОУ}}$ и двумя с малыми $T_{\mu} = 2 \cdot T_{\text{ЧП}} + \tau_{\text{У}}$.

$$\begin{aligned}
 W_{\text{РАЗ}}(p) &= W_{\text{P2}}(p) \cdot \frac{1/K_{\text{ДВ}}}{2 \cdot T_{\text{ЧП}} \cdot p + 1} \cdot K_{\text{ТДВ}} \cdot \frac{K_{\text{ОУ}}}{T_{\text{ОУ}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{\text{У}} \cdot p + 1} = \\
 &= W_{\text{P2}}(p) \cdot \frac{1/0.05}{\underbrace{2 \cdot 0.015}_{T_1} \cdot p + 1} \cdot 0.685 \cdot \frac{0.4}{\underbrace{25}_{T_2} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\underbrace{10}_{T_3} \cdot p + 1} =
 \end{aligned} \tag{140}$$

Тогда в качестве регулятора будем использовать ПИ-регулятор, настроенный на ОМ (глава 0).

$$W_{\text{P2}}(p) = \beta_{\text{P2}} \cdot \frac{\tau_{\text{P2}} \cdot p + 1}{\tau_{\text{P2}} \cdot p}. \tag{141}$$

Настройки регулятора должны быть следующими:

$$\beta_{\text{P2}} = \frac{T_{\text{О}}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot \prod_{v=1}^n K_v}, \tag{142}$$

$$\beta_{P2} = \frac{T_{O|y}}{2 \cdot (2 \cdot T_{\text{чп}} + \tau_{|y}) \cdot \frac{1}{K_{\text{ш}}} \cdot K_{\text{ТДВ}} \cdot K_{O|y} \cdot K_{\text{ДТВ}}} =$$

$$= \frac{25}{2 \cdot (2 \cdot 0.015 + 10) \cdot \frac{1}{0.05} \cdot 0.685 \cdot 0.4 \cdot 0.128} = 1.78$$

$$\tau_{P2} = T_{O|y} = 25 \quad (144)$$

С учетом (144) и (143) выражение (140) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} W_{\text{РАЗ}}(p) &= W_P(p) \cdot W_{\text{ЗАМ1}}(p) \cdot W_{\text{РО}}(p) \cdot W_O(p) = \\ &= \frac{\cancel{T_{O|y}}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot \cancel{\frac{1}{K_{\text{ш}}}} \cdot \cancel{K_{\text{РQ}}} \cdot \cancel{K_{O|y}} \cdot K_{\text{ДД}}} \cdot \frac{\cancel{T_{O|y}} \cdot p + 1}{\cancel{T_{O|y}} \cdot p} \cdot \\ &\cdot \frac{\cancel{\frac{1}{K_{\text{ш}}}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot \cancel{K_{\text{РQ}}} \cdot \frac{\cancel{K_{O|y}}}{\cancel{T_{O|y}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{|y} \cdot p + 1} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot K_{\text{ДД}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{|y} \cdot p + 1} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot K_{\text{ДТВ}} \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 10.03 \cdot p \cdot 0.128 \cdot (10.03 \cdot p + 1)} \end{aligned} \quad (145)$$

Имитационная модель системы регулирования по каналу «расход топлива – давление в верхней части топки» приведена на рис. 47.

Ниже приведен листинг расчета переходных процессов по управлению (изменение задающего сигнала $25 \rightarrow 27$) и по возмущению (изменение давления топлива на 0.1 МПа).

```
Pvt_z=2;%Изменение задающего воздействия 0=>2, Па
Pt=0.1;%Изменение возмущающего воздействия 0=>0,1,
МПа
Pvt_0=25;%Начальное значение разрежения, Па
tpp=200;%Время моделирования, подбирается,
%      чтоб был виден весь переходный процесс
%      Задание 5% поцентной зоны для определения
%      времени переходного процесса
tuv=[0,tpp];
yuv=[Pvt_0+(Pvt_z*1.05),Pvt_0+(Pvt_z*1.05)];
tun=[0,tpp];
```

```

yun=[Pvt_0+(Pvt_z*0.95),Pvt_0+(Pvt_z*0.95)];
%Задание параметров передаточных функций
%ЧП
Tch=0.015;
Kch=0.0625;
Wch=tf([Kch],[Tch 1]);
%ЭД
Ked=146;
Ted=1.167;
Wed=tf([Ked],[Ted 1]);
Kdw=0.05;
Wdw=tf([Kdw],[1]);%датчика частоты вращения
%ТДМ
Ktdm=0.685;
Wtdm=tf([Ktdm],[1]);%НА
%Объекта управления по управляющему воздействию
Kou_u=0.4;
Tou_u=25;
tau_u=10;
%Объекта управления по возмущающему воздействию
Kou_v=-8;
Tou_v=25;
tau_v=10;
%Датчика давления
Kdvt=0.128;
%Ввод передаточных функций
Wdvt=tf([Kdvt],[1]);%Датчика давления
Wzi=tf([Kdvt],[1]);%Задатчика управляющего сигнала
Wou_u=tf([Kou_u],[Tou_u 1], 'inputdelay', tau_u);%ОУ
по упр.
Wou_v=tf([Kou_v],[Tou_v 1], 'inputdelay', tau_v);%ОУ
по возм.
%Синтез внутреннего контура
%Определение параметров ПИ-регулятора
beta1=Ted/(2*Tch*Kch*Ked*Kdw);
tau1=Ted;
Wr1=tf([beta1],[1])*tf([tau1 1],[tau1 0]);
%Определение передаточной функции внутреннего контура
Wraz1=Wr1*Wch*Wed;
Wzam1=Wraz1/(1+Wraz1*Wdw)
%Синтез внешнего контура
%Определение параметров ПИ-регулятора

```

```

beta2=Tou_u/(2*(2*Tch+tau_u)*Kou_u*Ktdm*Kdvt*(1/Kdw))
;
tau2=Tou_u
Wr2=tf([beta2],[1])*tf([tau2 1],[tau2 0]);
%Построение передаточной функции разомкнутой системы
Wraz_u=Wr2*Wzam1*Wtdm*Wou_u;
%Построение передаточной функции замкнутой системы
%по управляющему воздействию
Wzam_u=Wraz_u/(1+Wraz_u*Wdvt);
%Построение передаточной функции замкнутой системы
%по возмущающему воздействию
Wzam_v=Wou_v/(1+Wraz_u*Wdvt);
%Расчет переходного процесса
%по управляющему воздействию
[y_u,t_u]=step(Wzam_u*Wzi*Pvt_z,tpp);
%Расчет переходного процесса
%по возмущающему воздействию
[y_v,t_v]=step(Wzam_v*Pt,tpp);
%Ввод параметров графика
set(0,'DefaultAxesFontSize',14,'DefaultAxesFontName',
'Times New Roman');
set(0,'DefaultTextFontSize',14,'DefaultTextFontName',
'Times New Roman');
%Построение графиков переходного процесса
subplot(121)
hPlot_u = plot(t_u,y_u+Pvt_0,'k-',...
    tuv,yuv,'k--',tun,yun,'k--'),grid;
set(hPlot_u,'LineWidth',2);
xlabel('\it t\rm, c');
ylabel('\it P\rm_B_T, Па');
subplot(122)
hPlot_u = plot(t_v,y_v+Pvt_0+Pvt_z,...
    'k-',tuv,yuv,'k--',tun,yun,'k--'),grid;
set(hPlot_u,'LineWidth',2);
xlabel('\it t\rm, c');
ylabel('\it P\rm_B_T, Па');

```

Результат моделирования показан на рис. 55.

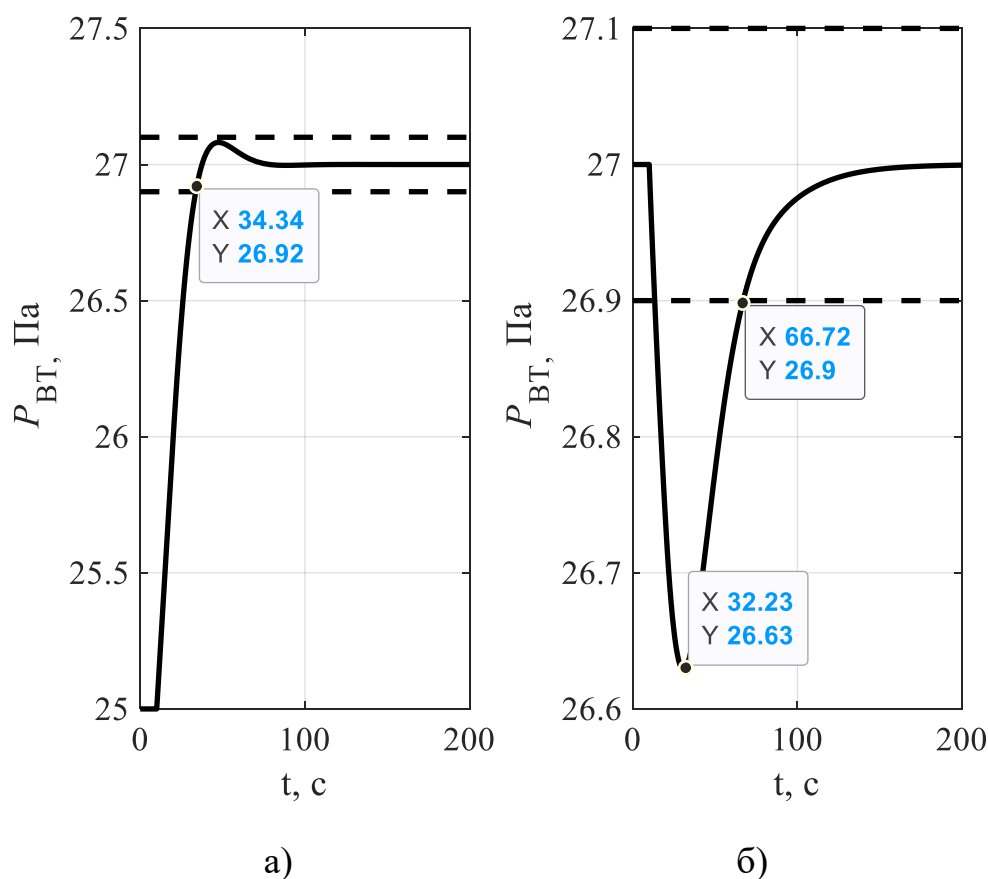


Рис. 55. График изменения разрежение в верхней части топки при изменении числа оборотов тягодутьевой машины:
 а) переходный процесс по управляющему воздействию;
 б) переходный процесс по возмущающему воздействию

4.2.2.7. Анализ синтезированной системы

Из рис. 55 следует, что получены:

- переходный процесс по управлению с перерегулированием, не превышающем 5 % и время переходного процесса составило 35 с;
- переходный процесс по возмущению с максимальным отклонением 0,4 Па, время переходного процесса составило 66 с.

На рис. 56 показана имитационная модель системы регулирования разрежения в верхней части топки при изменении числа оборотов тягодутьевой машины, результаты работы модели показаны на рис. 57.

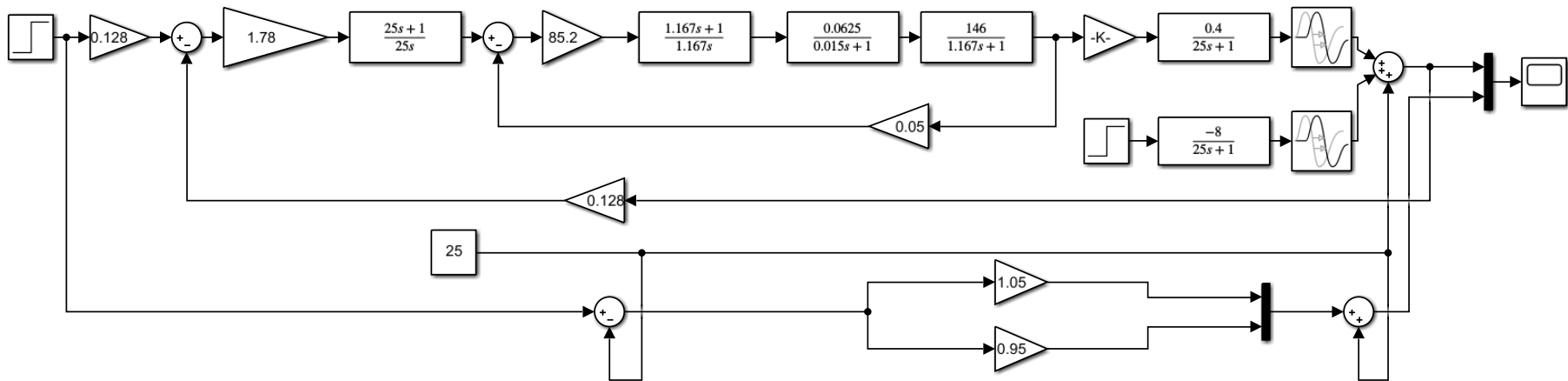


Рис. 56. Имитационная модель системы регулирования разрежение в верхней части топки при изменении числа оборотов тягодутьевой машины

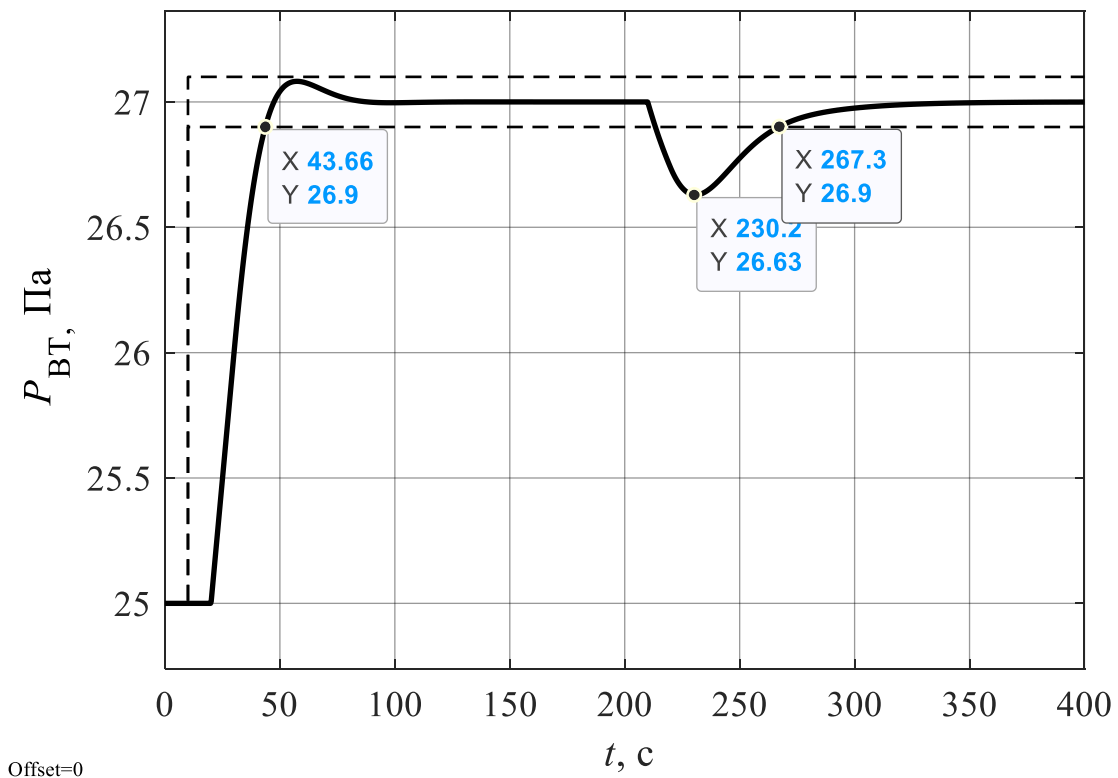


Рис. 57. График изменения разрежение в верхней части топки при изменении числа оборотов тягодутьевой машины

4.3. Замкнутый контур регулирования температурой перегретого пара

Функциональная схема системы регулирования температурой перегретого пара показана на рис. 58.

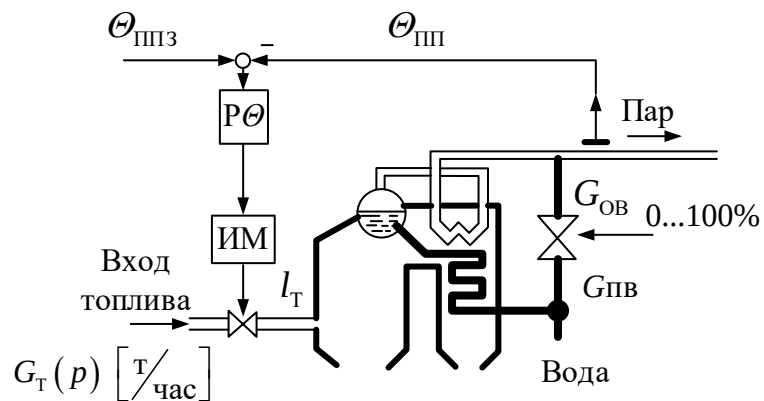


Рис. 58. Функциональная схема системы регулирования температурой перегретого пара

Из рис. 58 следует, что контур управления температурой перегретого пара будет в себя включать:

- объект управления, включающий в себя топку, барабан, для которого управляющим воздействием будет подача топлива $G_T(p) \left[\frac{\text{т}}{\text{час}} \right]$, а возмущающим – подача питательной воды в парохладитель $G_{ОВ}(p) [\%]$;
- датчик температуры перегретого пара;
- регулятор;
- исполнительный механизм;
- регулирующий орган.

4.3.1. Выбор необходимого оборудования

4.3.1.1. В качестве *датчика температуры перегретого пара* будем использовать:

Тип – xxx

Производитель xxx

Основные технические характеристики:

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

Диапазон измерения – -40...+800 °С;

Выходной сигнал – 4-20 мА.

4.3.1.2. Исполнительный механизм

Тип xxx

1 – Тип механизма (xxx).

2 – Номинальный крутящий момент на выходном валу, Н м (xxx).

3 – Номинальное время полного хода выходного вала (100 секунд).

4 – Номинальное значение полного хода выходного вала, об, с (xxx).

5 – Модельный год (xxx).

К – Трехфазное напряжение питания (xxx).

4.3.1.3. В качестве регулирующего органа используется *запорная арматура*:

Тип – xxx

Производитель xxx

Основные технические характеристики:

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx.

4.3.2. Построение структурно-аналитической схемы замкнутого контура регулирования температуры перегретого пара

Структурно-аналитическую схему системы регулирования температуры перегретого пара можно представить в виде рис. 59.

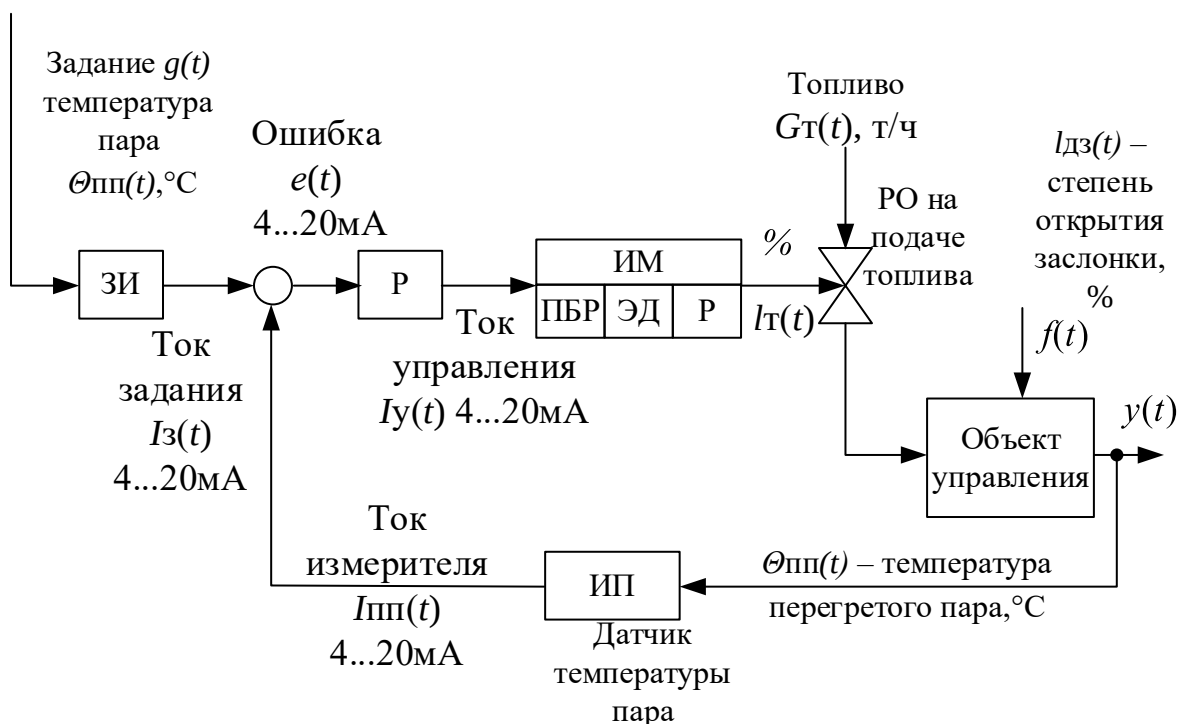


Рис. 59. Структурно-аналитическая схема системы регулирования температуры перегретого пара

4.3.3. Передаточные функции элементов системы

– Датчика температуры перегретого пара:

$$W_{дт}(p) = \frac{I_{дт}(p)}{\Theta_{пп}(p)} = K_{дд} \quad (146)$$

$$K_{дд} = \frac{4...20}{-40...800} = \frac{20 - 4}{800 - (-40)} = \frac{16}{840} = 0,02 \left[\frac{\text{мА}}{^{\circ}\text{C}} \right], \quad (147)$$

где $I_{дт}(p)$ – выходной ток датчика температуры перегретого пара, мА; $\Theta_{пп}(p)$ – регулируемая величина – температура перегретого пара, $^{\circ}\text{C}$, определяется максимальным значением датчика температуры.

– Задатчика управляемого параметра (здатчик интенсивности):

$$W_{зи}(p) = \frac{I_3(p)}{\Theta_{ппз}(p)} = K_{зи} \quad (148)$$

$$K_{зи} = \frac{4...20}{0...800} = 0,02 \left[\frac{\text{мА}}{^{\circ}\text{C}} \right], \quad (149)$$

где $I_3(p)$ – выходной ток ЗИ, мА; $g(p)$ – заданная величина – температура перегретого пара, $^{\circ}\text{C}$, определяется максимальным значением, соответствующему технологическому процессу.

– Исполнительного механизма:

Передаточная функция исполнительного механизма согласно выражениям (44) – (50) будет:

$$\begin{aligned} W_{\text{ИМ}}(p) &= W_{\text{БРП}}(p) \cdot W_{\text{ЭД}}(p) \cdot W_{\text{Ред}}(p) = \\ &= \frac{K_{\text{ЭД}} \cdot K_{\text{Ред}} \cdot K_{\text{БРП}}}{T_{\text{ИМ}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{БРП}} \cdot p + 1)} = \\ &= \frac{0.38 \cdot 0.685 \cdot 23.75}{10 \cdot p \cdot (0.567 \cdot p + 1) \cdot (0.05 \cdot p + 1)} \end{aligned} \quad (150)$$

– Передаточная функция датчика положения штока:

$$W_{\text{ДШ}}(p) = \frac{I_l(p)}{I_{\text{Ш}}(p)} = K_{\text{Ш}} \quad (151)$$

$$K_{\text{Ш}} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 100} = \frac{16}{100 - 0} = 0,16 \left[\frac{\text{mA}}{\%} \right]. \quad (152)$$

– Регулирующего органа:

$$W_{\text{РО}}(p) = \frac{G_T(p)}{I_T(p)} = K_{\text{РО}} \quad (153)$$

$$K_{\text{РО}} = \frac{0 \dots 4}{0 \dots 100} = 0,04 \left[\frac{\text{T/ч}}{\%} \right], \quad (154)$$

где $G_T(p)$ – выходная величина РО – подача топлива в топку, T/ч , определяется максимальным допустимым значением, соответствующим технологическому процессу.

– Объекта управления по управляющему воздействию:

По виду экспериментального графика изменения температуры перегретого пара при изменении подачи топлива в топку (рис. 60) можно сказать, что передаточная функция объекта управления обладает самовыравниванием и некоторым запаздыванием и имеет вид переходной функции апериодического звена первого порядка.

Методика определения параметров звена изложена в (п. 0).

$$W_{\text{ОУ|У}}(p) = \frac{\Theta_{\text{ПП}}(p)}{G_T(p)} = \frac{K_{\text{ОУ|У}} \cdot e^{-\tau_{\text{У}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|У}} \cdot p + 1} = \frac{0,033 \cdot e^{-20 \cdot p}}{60 \cdot p + 1}. \quad (155)$$

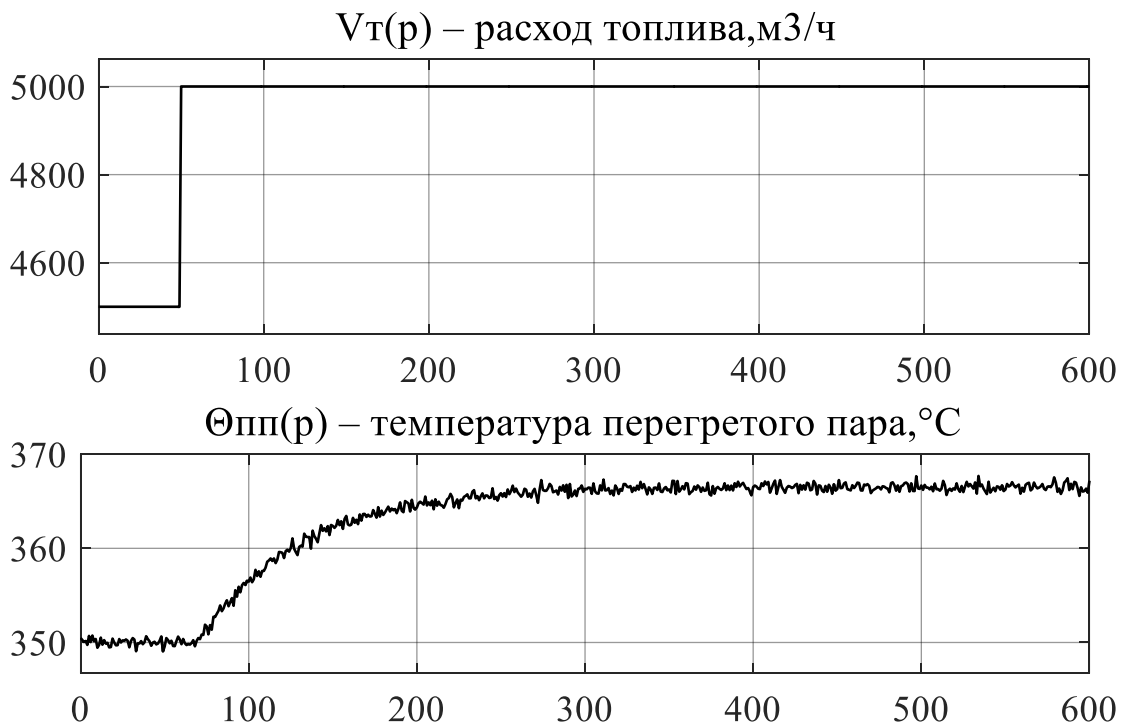


Рис. 60. Экспериментальная кривая зависимости температуры пара от расхода топлива

График изменения температуры перегретого пара $\Theta_{\text{ПП}}(t)$ при изменении степени открытия дроссельной поворотной заслонки $l_{\text{ДЗ}}(t)$ на трубопроводе питательной воды в пароохладитель также имеет вид апериодического процесса (рис. 61).

Передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию определяется согласно (п. 0):

$$W_{\text{ОУ|В}}(p) = \frac{\Theta_{\text{ПП}}(p)}{l_{\text{ДЗ}}(p)} = \frac{K_{\text{ОУ|В}} \cdot e^{-\tau_{\text{В}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ|В}} \cdot p + 1} = \frac{-1,95 \cdot e^{-60p}}{90 \cdot p + 1}. \quad (156)$$



Рис. 61. Экспериментальная кривая зависимости температуры пара от степени открытия дроссельной поворотной заслонки

4.3.4. Синтез системы

Данную систему будем рассматривать как двухконтурную каскадную систему (систему подчиненного регулирования) (рис. 43, см. п. 0), тогда передаточная функция внутреннего замкнутого контура, согласно (85) – (89) будет:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{ЗАМ1}}(p) &= \frac{W_{\text{РАЗ1}}(p)}{1 + W_{\text{РАЗ1}}(p) \cdot W_{\text{ОС}}(p)} = \\
 &= \frac{1/K_{\text{III}}}{\left[2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p \cdot ((T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1) + 1 \right]} = \\
 &= \frac{1/K_{\text{III}}}{2^2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}})^2 \cdot p^2 + 2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \approx \\
 &\approx \frac{1/K_{\text{III}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} = \frac{1/0.16}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot p + 1}
 \end{aligned} \tag{157}$$

Внешний контур (рис. 43) состоит из следующих блоков:

- Р2 – регулятор величины температуры перегретого пара;
- Замкнутый внутренний контур;
- ОУ – объект управления;
- ДРВ – датчик регулируемой величины (температура перегретого пара).

Определим передаточную функцию внешнего разомкнутого контура:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{РА32}}(p) &= W_{\text{Р2}}(p) \cdot W_{\text{ЗАМ1}}(p) \cdot W_{\text{РО}}(p) \cdot W_{\text{ОУ}}(p) = \\
 &= W_{\text{Р2}}(p) \cdot \frac{1/K_{\text{Ш}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot K_{\text{РО}} \cdot \frac{K_{\text{О|У}} \cdot e^{-\tau_{\text{У}} \cdot p}}{T_{\text{О|У}} \cdot p + 1} = \\
 &= W_{\text{Р2}}(p) \cdot \underbrace{\frac{1/0.16}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot p + 1}}_{T_1} \cdot 0.04 \cdot \underbrace{\frac{0.033 \cdot e^{-20 \cdot p}}{60 \cdot p + 1}}_{T_2}
 \end{aligned} \tag{158}$$

После подстановки цифровых значений получаем следующие соотношения между постоянными времени T_i :

$$\underbrace{2 \cdot (0.05 + 0.567)}_{T_1} < 20 < 60. \tag{159}$$

В главе 0 показано, что звено с запаздыванием можно считать апериодическим звеном второго порядка.

Следовательно, для внешнего контура при синтезе можно считать, что система состоит из трех апериодических звеньев с одной большой постоянной времени $T_{\text{О|У}}$ и двумя с малыми $T_{\mu} = 2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) + \tau_{\text{У}}$.

$$\begin{aligned}
 W_{\text{РА32}}(p) &= \\
 &= \frac{1/K_{\text{Ш}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot K_{\text{РО}} \cdot \frac{K_{\text{О|У}}}{T_{\text{О|У}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{\text{У}} \cdot p + 1} = \\
 &= \underbrace{\frac{1/0.16}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot p + 1}}_{T_1} \cdot 0.04 \cdot \underbrace{\frac{0.033}{60 \cdot p + 1}}_{T_2} \cdot \underbrace{\frac{1}{20 \cdot p + 1}}_{T_3}
 \end{aligned} \tag{160}$$

Тогда в качестве регулятора будем использовать ПИ-регулятор, настроенный на ОМ (глава 0):

$$W_{\text{Р2}}(p) = \beta_{\text{Р2}} \cdot \frac{\tau_{\text{Р2}} \cdot p + 1}{\tau_{\text{Р2}} \cdot p}. \tag{161}$$

Настройки регулятора должны быть следующими:

$$\beta_{p2} = \frac{T_O}{2 \cdot T_\mu \cdot \prod_{v=1}^n K_v}, \quad (162)$$

$$\beta_{p2} = \frac{T_{O|y}}{2 \cdot \left(2 \cdot (T_{БРП} + T_{ЭД}) + \tau_{|y} \right) \cdot \frac{1}{K_{III}} \cdot K_{РО} \cdot K_{O|y} \cdot K_{ДТ}} =$$

$$= \frac{60}{2 \cdot \left(2 \cdot (0.05 + 0.567) + 20 \right) \cdot \frac{1}{0.16} \cdot 0.04 \cdot 0.033 \cdot 0.02} = 8562.6$$

$$\tau_{p2} = T_{O|y} = 60 \quad (164)$$

С учетом (115) и (116), выражение (112) запишем следующем образом:

$$W_{РАЗ}(p) = W_P(p) \cdot W_{ЗАМ1}(p) \cdot W_{РО}(p) \cdot W_O(p) =$$

$$= \frac{\cancel{T_{O|y}}}{2 \cdot T_\mu \cdot \cancel{\frac{1}{K_{III}}} \cdot \cancel{K_{РО}} \cdot \cancel{K_{O|y}} \cdot K_{ДТ}} \cdot \frac{\cancel{T_{O|y}} \cdot p + 1}{\cancel{T_{O|y}} \cdot p} \cdot$$

$$\cdot \frac{\cancel{\frac{1}{K_{III}}}}{2 \cdot (T_{БРП} + T_{ЭД}) \cdot p + 1} \cdot \cancel{K_{РО}} \cdot \frac{\cancel{K_{O|y}}}{\cancel{T_{O|y}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{|y} \cdot p + 1} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot K_{ДТ}} \cdot \frac{1}{2 \cdot (T_{БРП} + T_{ЭД}) \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{|y} \cdot p + 1} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot K_{ДТ} \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}$$

На рис. 62 показана имитационная модель системы регулирования температуры перегретого пара.

4.3.5. Анализ синтезированной системы

Результаты моделирования при ступенчатом управляющем воздействии ($350 \rightarrow 365$) и ступенчатом возмущающем воздействии ($0 \rightarrow 10$) показаны на рис. 63. При ступенчатом управляющем воздействии получен переходный процесс с перерегулированием, не превышающем 5 %, время переходного процесса составило 172 секунды. При ступенчатом возмущении максимальное отклонение не превысило 7°C .

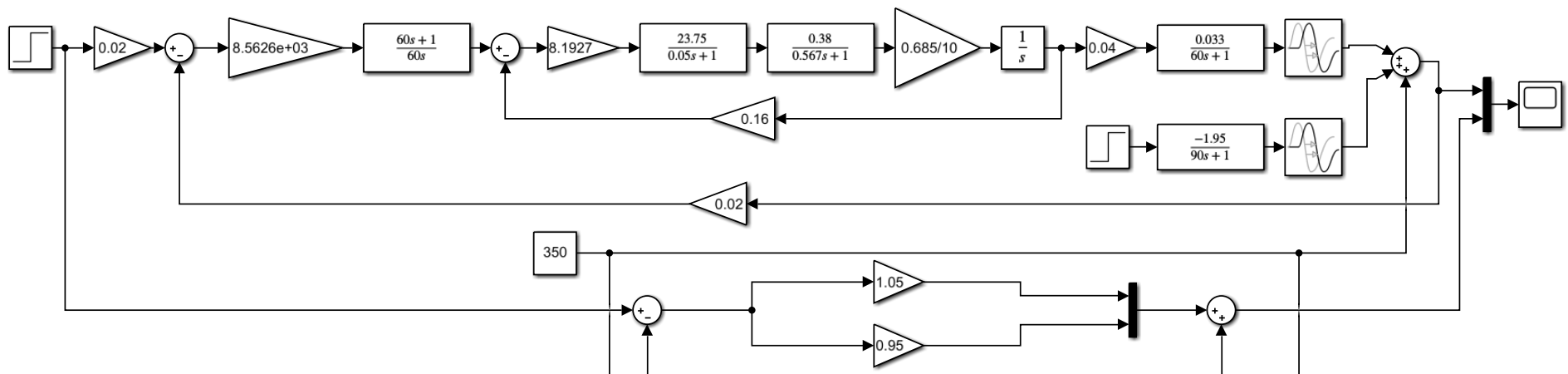


Рис. 62. Имитационная модель системы регулирования температуры перегретого пара

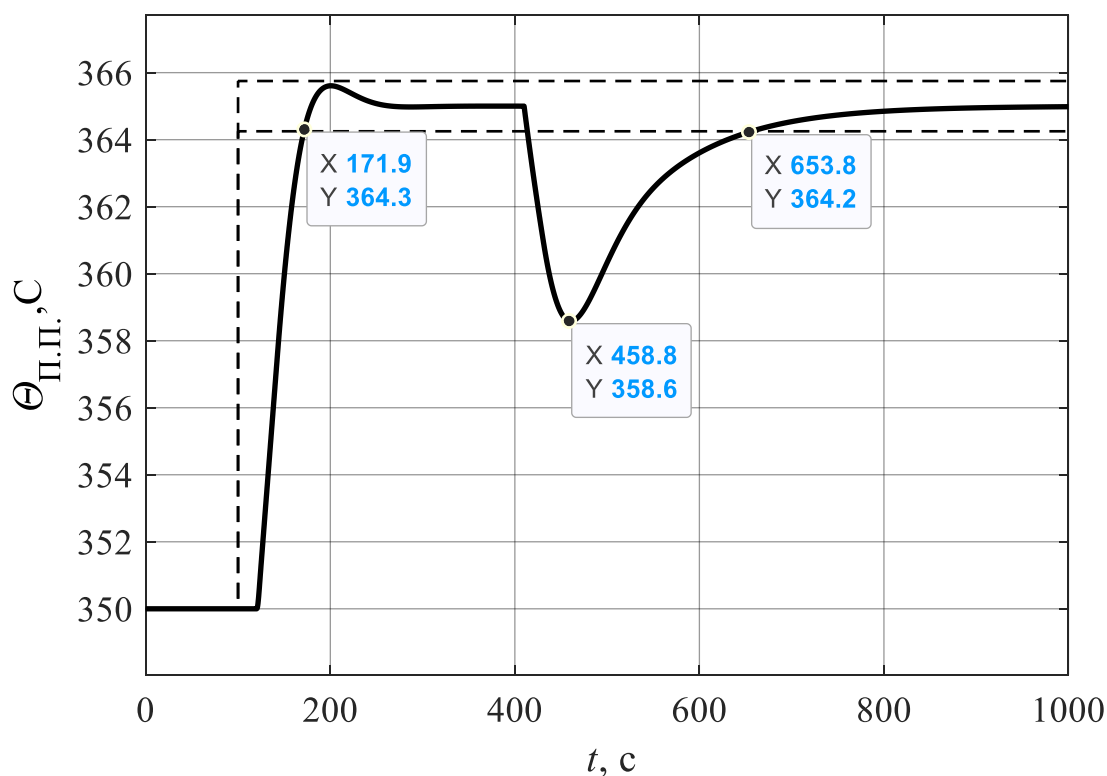


Рис. 63. График изменения температуры перегретого пара при использовании ПИ-регулятора ОМ

4.4.Замкнутый контур регулирования уровня воды в барабане котла

Функциональная схема системы регулирования уровня воды в барабане котла показана на рис. 64.

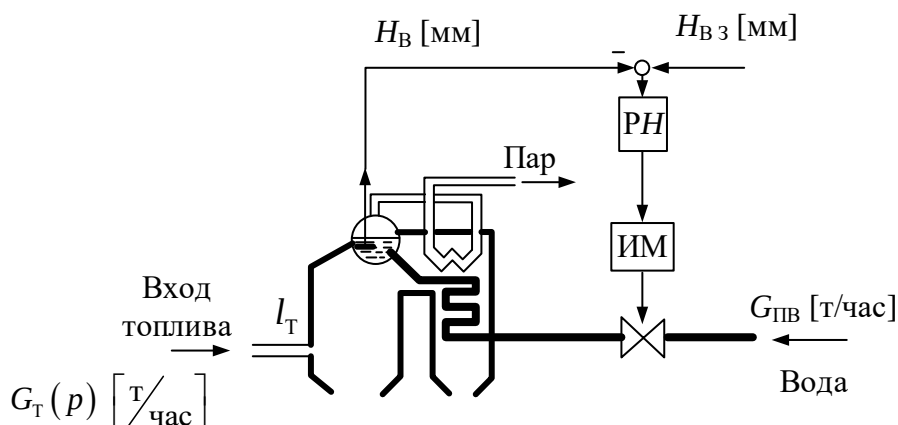


Рис. 64. Функциональная схема системы регулирования уровня воды в барабане котла

Из рис. 64 следует, что в контур регулирования уровня воды в барабане котла будет в себя включать:

- объект управления, включающий в себя топку, барабан, для которого управляющим воздействием будет подача питательной воды в барабан

$G_{\text{ПВ}}(p) \left[\frac{\text{т}}{\text{час}} \right]$, а возмущающим – подача топлива в топку $G_{\text{Т}}(p) \left[\frac{\text{т}}{\text{час}} \right]$.

- датчик уровня в барабане;
- регулятор;
- исполнительный механизм;
- регулирующий орган.

4.4.1. Выбор необходимого оборудования

4.4.1.1. В качестве *датчика уровня воды в барабане* будем использовать:

Тип – xxx

Производитель xxx

Основные технические характеристики:

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx.

Диапазон измерения – 0...250 мм;

Выходной сигнал – 4-20 мА.

4.4.1.2. Исполнительный механизм

Тип xxx

1 – Тип механизма (xxx).

2 – Номинальный крутящий момент на выходном валу, Н м (xxx).

3 – Номинальное время полного хода выходного вала (63 с).

4 – Номинальное значение полного хода выходного вала, об, с (xxx).

5 – Модельный год (xxx).

К – трехфазное напряжение питания (xxx).

4.4.1.3. В качестве *регулирующего органа* используется запорная арматура:

Тип – xxx

Производитель xxx

Основные технические характеристики:

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx;

xxx xxx xxx.

4.4.2. Построение структурно-аналитической схемы замкнутого контура регулирования уровня воды в барабане котла

Структурно-аналитическую схему системы регулирования уровня воды в барабане котла можно представить в виде рис. 65.

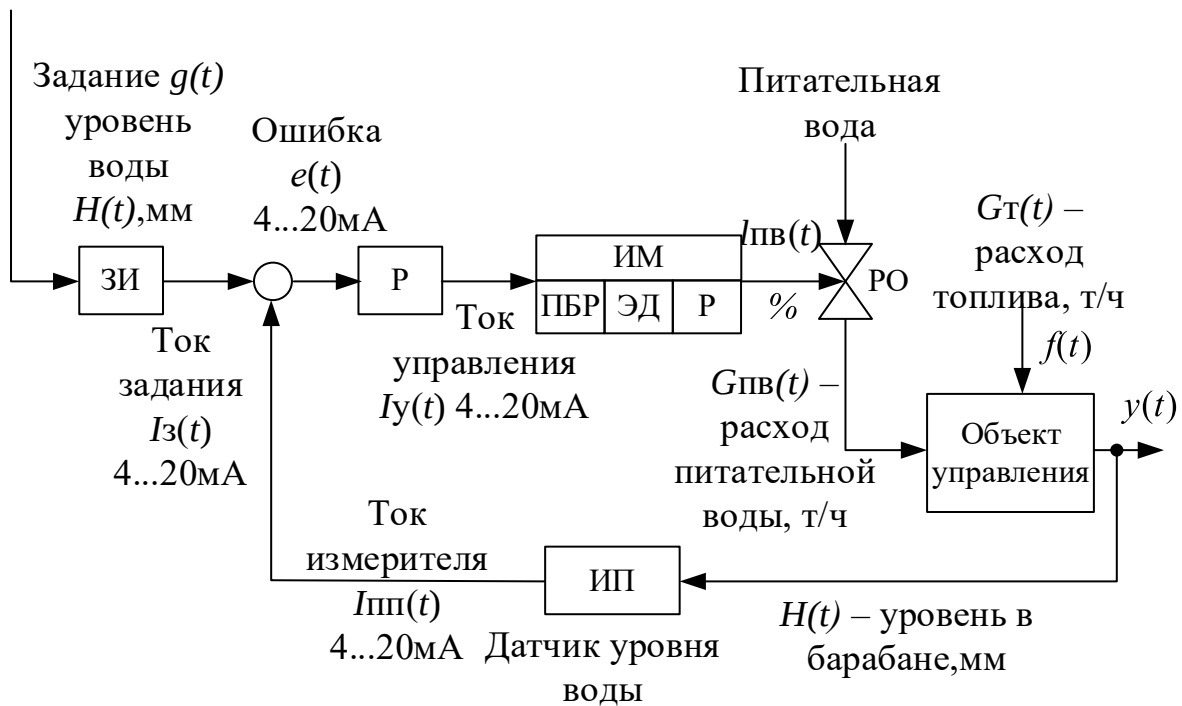


Рис. 65. Структурно-аналитическая схема системы регулирования уровня воды в барабане котла

4.4.3. Передаточные функции элементов системы

– Датчика уровня воды в барабане котла:

$$W_{\text{ДУ}}(p) = \frac{I_{\text{ДУ}}(p)}{H_{\text{В}}(p)} = K_{\text{ДУ}} \quad (166)$$

$$K_{\text{ДУ}} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 250} = \frac{20 - 4}{250 - 0} = 0,064 \left[\frac{\text{мА}}{\text{мм}} \right], \quad (167)$$

где $I_{\text{ДУ}}(p)$ – выходной ток датчика уровня воды в барабане котла, мА;
 $H_{\text{В}}(p)$ – регулируемая величина – уровня воды в барабане котла, мм, определяется максимальным значением датчика уровня.

– Задатчика управляемого параметра (здатчик интенсивности):

$$W_{\text{ЗИ}}(p) = \frac{I_3(p)}{H_{\text{ВЗ}}(p)} = K_{\text{ЗИ}} \quad (168)$$

$$K_{\text{ЗИ}} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 250} = 0,064 \left[\frac{\text{мА}}{\text{мм}} \right], \quad (169)$$

где $I_3(p)$ – выходной ток ЗИ, мА; $g(p)$ – заданная величина – уровень воды в барабане котла, мм, определяется максимальным значением, соответствующему технологическому процессу.

– Исполнительного механизма:

Передаточная функция исполнительного механизма, согласно выражениям (44) – (50), будет:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{ИМ}}(p) &= W_{\text{БРП}}(p) \cdot W_{\text{ЭД}}(p) \cdot W_{\text{Ред}}(p) = \\
 &= \frac{K_{\text{ЭД}} \cdot K_{\text{Ред}} \cdot K_{\text{БРП}}}{T_{\text{ИМ}} \cdot p \cdot (T_{\text{ЭД}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{БРП}} \cdot p + 1)} = \\
 &= \frac{0.38 \cdot 0.685 \cdot 23.75}{10 \cdot p \cdot (0.567 \cdot p + 1) \cdot (0.05 \cdot p + 1)}
 \end{aligned} \tag{170}$$

– Передаточная функция датчика положения штока:

$$W_{\text{ДШ}}(p) = \frac{I_l(p)}{I_{\text{Ш}}(p)} = K_{\text{Ш}} \tag{171}$$

$$K_{\text{Ш}} = \frac{4 \dots 20}{0 \dots 100} = \frac{16}{100 - 0} = 0,16 \left[\frac{\text{mA}}{\%} \right] \tag{172}$$

– Регулирующего органа:

$$W_{\text{РО}}(p) = \frac{G_{\text{ПВ}}(p)}{I_{\text{ПВ}}(p)} = K_{\text{РО}} \tag{173}$$

$$K_{\text{РО}} = \frac{0 \dots 50}{0 \dots 100} = 0,5 \left[\frac{\text{т/ч}}{\%} \right], \tag{174}$$

где $G_{\text{П}}(p)$ – выходная величина РО – подача воды в барабан, т/ч , определяется максимальным допустимым значением, соответствующему технологическому процессу.

– Объекта управления по управляющему воздействию.

По виду временной разгонной характеристики (рис. 66) можно сказать, что переходная функция объекта не обладает самовыравниванием и имеет некоторое запаздывание.

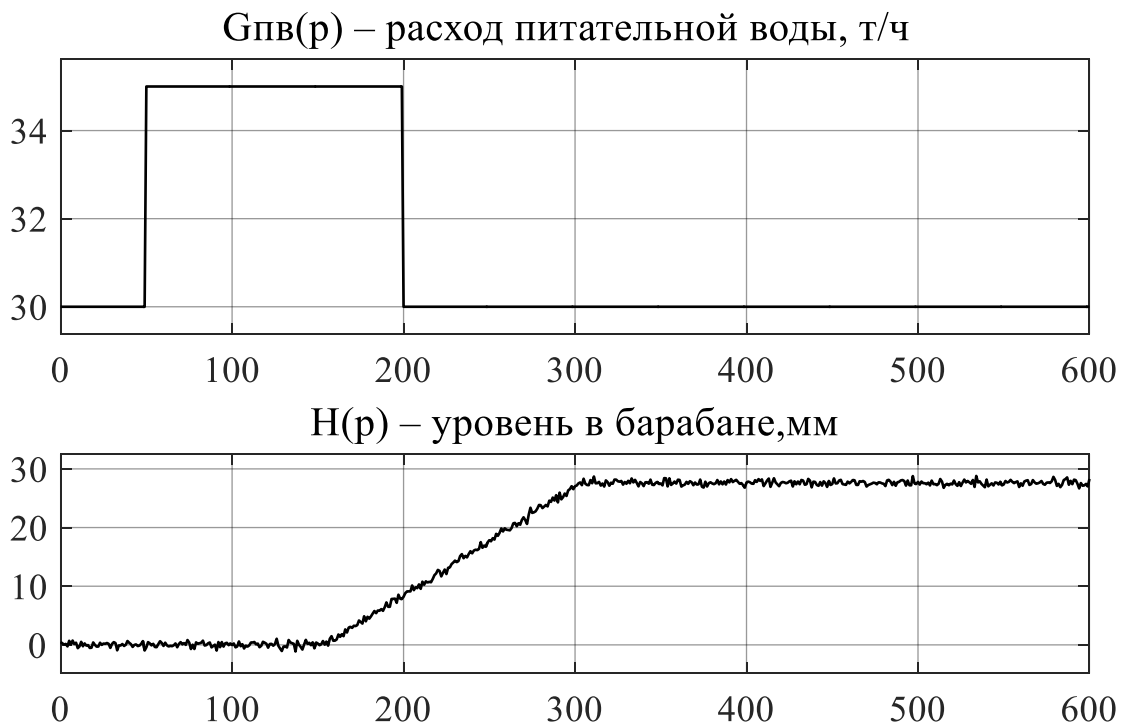


Рис. 66. Экспериментальная кривая регулирования уровня воды в барабане котла

Поэтому в качестве структуры математической модели объекта можно выбрать передаточную функцию следующего вида интегрирующего звена:

$$W(p) = \frac{e^{-\tau \cdot p}}{T \cdot p} = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{p}. \quad (175)$$

Методика определения параметров звена приведена в п 0

Передаточная функция объекта управления по управляющему воздействию, полученная по экспериментальной кривой будет иметь вид:

$$W_{oy}(p) = \frac{H(p)}{G_{пв}(p)} = \frac{1 \cdot e^{-100p}}{26 \cdot p}. \quad (176)$$

Изменение уровня воды при изменении расхода топлива показана на рис. 67.

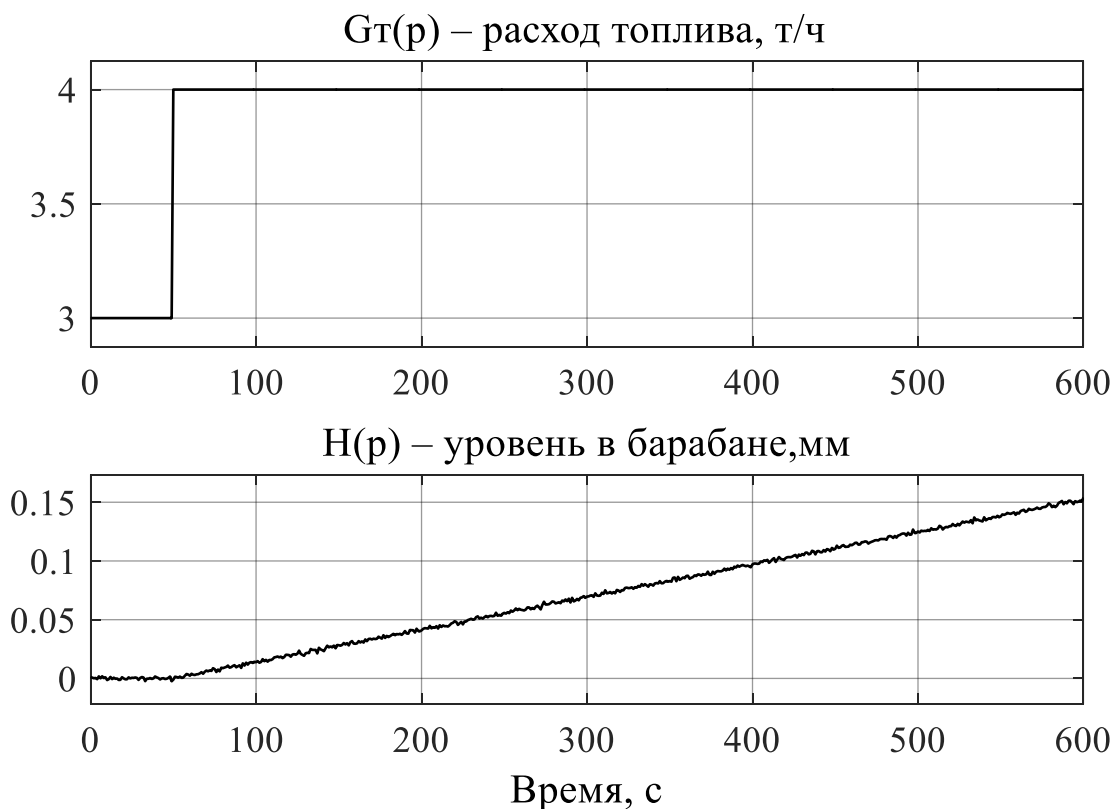


Рис. 67. Экспериментальная кривая уровня воды
в зависимости от расхода топлива

По виду временной разгонной характеристики можно сказать, что переходная функция объекта не обладает самовыравниванием без запаздывания. Поэтому в качестве структуры математической модели объекта можно выбрать передаточную функцию вида интегрирующего звена:

$$W(p) = \frac{1}{T \cdot p} = \frac{K}{p}. \quad (177)$$

Методика определения параметров звена приведена в п 0.

Передаточная функция объекта управления по управляющему воздействию, полученная по экспериментальной кривой, будет иметь вид:

$$W_{\text{ов}}(p) = \frac{H(p)}{G_T(p)} = \frac{0,000274}{p}. \quad (178)$$

4.4.4. Синтез системы

Данную систему будем рассматривать как двухконтурную каскадную систему (систему подчиненного регулирования) (рис. 43, см. п. 0), тогда передаточная функция внутреннего замкнутого контура, согласно (85) – (89) будет:

$$\begin{aligned}
W_{\text{ЗАМ1}}(p) &= \frac{W_{\text{РА31}}(p)}{1 + W_{\text{РА31}}(p) \cdot W_{\text{ОС}}(p)} = \\
&= \frac{1/K_{\text{III}}}{\left[2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p \cdot ((T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1) + 1 \right]} = \\
&= \frac{1/K_{\text{III}}}{2^2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}})^2 \cdot p^2 + 2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \approx \\
&\approx \frac{1/K_{\text{III}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} = \frac{1/0.16}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot p + 1}
\end{aligned} \tag{179}$$

Внешний контур (рис. 43) состоит из следующих блоков:

- Р2 – регулятор величины уровня воды;
- замкнутый внутренний контур;
- ОУ – объект управления;
- ДРВ – датчик регулируемой величины (датчик уровня воды).

Определим передаточную функцию внешнего разомкнутого контура:

$$\begin{aligned}
W_{\text{РА32}}(p) &= W_{\text{Р2}}(p) \cdot W_{\text{ЗАМ1}}(p) \cdot W_{\text{РО}}(p) \cdot W_{\text{ОУ}}(p) = \\
&= W_{\text{Р2}}(p) \cdot \frac{1/K_{\text{III}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot K_{\text{РО}} \cdot \frac{K_{\text{ОУ}} \cdot e^{-\tau_{\text{У}} \cdot p}}{T_{\text{ОУ}} \cdot p + 1} = \\
&= W_{\text{Р2}}(p) \cdot \underbrace{\frac{1/0.16}{2 \cdot (0.05 + 0.567) \cdot p + 1}}_{T_1} \cdot 0.5 \cdot \underbrace{\frac{1 \cdot e^{-100 \cdot p}}{26 \cdot p}}_{T_2}^{T_3}
\end{aligned} \tag{180}$$

После подстановки цифровых значений получаем следующие соотношения между постоянными времени T_i :

$$\underbrace{2 \cdot (0.05 + 0.567)}_{T_1} < \underbrace{26}_{T_2} < \underbrace{100}_{T_3}. \tag{181}$$

В главе 0 показано, что звено с запаздыванием можно считать апериодическим звеном второго порядка.

Следовательно, для внешнего контура при синтезе можно считать, что система состоит из двух апериодических звеньев и одного интегрирующего звена постоянной времени $T_{\text{ОУ}}$.

$$T_{\mu} = 2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) + \tau_{\text{У}}, \tag{182}$$

$$\begin{aligned}
W_{\text{РАЗ2}}(p) &= \\
&= \frac{1/\cancel{K_{\text{Ш}}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot K_{\text{РО}} \cdot \frac{1}{T_{\text{О|Y}} \cdot p} \cdot \frac{1}{\tau_{\text{Y}} \cdot p + 1} = \\
&= \frac{1/\cancel{0.16}}{\underbrace{2 \cdot (0.05 + 0.567)}_{T_1} \cdot p + 1} \cdot \underbrace{0.5}_{T_2} \cdot \frac{1}{26 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\underbrace{100}_{T_3} \cdot p + 1} =
\end{aligned} \tag{183}$$

Тогда в качестве регулятора будем использовать П-регулятор, настроенный на ОМ (глава 0):

$$W_{\text{P2}}(p) = \beta_{\text{P2}}. \tag{184}$$

Настройки регулятора должны быть следующими:

$$\beta_{\text{P2}} = \frac{T_{\text{O}}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot \prod_{v=1}^n K_v}, \tag{185}$$

$$\begin{aligned}
\beta_{\text{P2}} &= \frac{T_{\text{O|Y}}}{2 \cdot (2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) + \tau_{\text{Y}}) \cdot \cancel{1/K_{\text{Ш}}}} \cdot \cancel{K_{\text{РО}}} \cdot K_{\text{О|Y}} \cdot K_{\text{ДУ}} = \\
&= \frac{26}{2 \cdot (2 \cdot (0.05 + 0.567) + 100) \cdot \cancel{1/0.16}} \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.064 = 1.49
\end{aligned} \tag{186}$$

С учетом (115) и (116), выражение (112) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned}
W_{\text{РАЗ}}(p) &= W_{\text{P}}(p) \cdot W_{\text{ЗАМ1}}(p) \cdot W_{\text{РО}}(p) \cdot W_{\text{O}}(p) = \\
&= \frac{\cancel{T_{\text{O|Y}}}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot \cancel{1/K_{\text{Ш}}}} \cdot \cancel{K_{\text{РО}}} \cdot \cancel{K_{\text{О|Y}}} \cdot K_{\text{ДУ}} \cdot \\
&\cdot \frac{\cancel{1/K_{\text{Ш}}}}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot \cancel{K_{\text{РО}}} \cdot \frac{\cancel{K_{\text{О|Y}}}}{\cancel{T_{\text{O|Y}} \cdot p}} \cdot \frac{1}{\tau_{\text{Y}} \cdot p + 1} = \\
&= \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot K_{\text{ДУ}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot (T_{\text{БРП}} + T_{\text{ЭД}}) \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_{\text{Y}} \cdot p + 1} = \\
&= \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot K_{\text{ДУ}} \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)}
\end{aligned} \tag{187}$$

Ниже приведен листинг моделирования двухконтурной системы регулирования уровня воды в барабане котла.

```

Hv_z=10;%Изменение задающего воздействия 0=>10, мм
Gt=2;%Изменение возмущающего воздействия 0=>1, т/ч
Hv_0=20;%Начальное значение уровня, мм
tpp=1000;%Время моделирования, подбирается,
% чтоб был виден весь переходный процесс
% Задание 5% поцентной зоны для определения
% времени переходного процесса по управляющему
воздействию
tuv=[0,tpp];
yuv=[Hv_0+(Hv_z*1.05),Hv_0+(Hv_z*1.05)];
tun=[0,tpp];
yun=[Hv_0+(Hv_z*0.95),Hv_0+(Hv_z*0.95)];
%Задание параметров передаточных функций
%ИМ
%ИМ
Tim=10;
Kpbr=23.75;
Tpbr=0.05;
Ked=0.38;
Kred=0.685;
Ted=0.567;
Ksh=0.16;%коэффициент передачи датчика положения
штока
Wzi_im=tf([Ksh],[1]);%Датчика штока
%РО
Кро=0.5;
%Объекта управления по управляющему воздействию
Kou_u=0.03723;
Tou_u=1;
tau_u=100;
%Объекта управления по возмущающему воздействию
Kou_v=0.000274;
Tou_v=1;
tau_v=0;
%Датчика уровня
Kh=0.064;
%Ввод передаточных функций
Wdh=tf([Kh],[1]);%Датчика уровня
Wzi=tf([Kh],[1]);%Задатчика управляющего сигнала
%Позиционер
Wpbr=tf([Kpbr],[Tpbr 1]);
Wed=tf([Ked],[Ted 1]);

```

```

Wred=tf([Kred],[Tim 0]);
Wsh=tf([Ksh],[1]);
Wpo=tf([Kpo],[1]);%PO
Wou_u=tf([Kou_u],[Tou_u 0], 'inputdelay', tau_u);%OУ
по упр.
Wou_v=tf([Kou_v],[Tou_v 0], 'inputdelay', tau_v);%OУ
по возм.
%Синтез внутреннего контура
%Определение параметров ПИ-регулятора
beta1=Tim/(2*(Ted+Tpbr)*Kpbr*Ked*Kred*Ksh);
taul=Tim;
Wr1=tf([beta1],[1])*tf([taul 1],[taul 0]);
%Определение передаточной функции внутреннего контура
Wraz1=Wr1*Wpbr*Wed*Wred;
Wzam1=Wraz1/(1+Wraz1*Wsh)
%Синтез внешнего контура
%Определение параметров П-регулятора
beta2=Tou_u/(2*(2*(Ted+Tpbr)+tau_u)*Kou_u*Kpo*Kh*(1/K
sh));
Wr2=tf([beta2],[1]);
%Построение передаточной функции разомкнутой системы
Wraz_u=Wr2*Wzam1*Wpo*Wou_u;
%Построение передаточной функции замкнутой системы
%по управляющему воздействию
Wzam_u=Wraz_u/(1+Wraz_u*Wdh);
%Расчет переходного процесса
%по управляющему воздействию
[y_u,t_u]=step(Wzam_u*Wzi*Nv_z,tpp);
%Расчет переходного процесса
%по возмущающему воздействию
[y_v,t_v]=step(Wzam_v*Gt,tpp);
%Ввод параметров графика
set(0,'DefaultAxesFontSize',14,'DefaultAxesFontName',
'Times New Roman');
set(0,'DefaultTextFontSize',14,'DefaultTextFontName',
'Times New Roman');
%Построение графиков переходного процесса ОМ
subplot(121)
hPlot_u = plot(t_u,y_u+Hv_0,'k-',...
    tuv,yuv,'k--',tun,yun,'k--'),grid;
set(hPlot_u,'LineWidth', 2);
xlabel('\it t\rm, c');

```

```

ylabel('\it H\rm_B, мм');
subplot(122)
hPlot_v = plot(t_v,y_v+Hv_0+Hv_z,...
    'k-',tuv,yuv,'k--',tun,yun,'k--'),grid;
set( hPlot_v, 'LineWidth', 2);
xlabel('\it t\rm, с');
ylabel('\it H\rm_B, мм');

```

4.4.5. Анализ синтезированной системы

График моделирования переходного процесса всей системы при изменении управляющего воздействия ($20\text{мм} \rightarrow 30\text{мм}$) показан на рис. 68 а. Перерегулирование меньше 5%, время переходного процесса 345 секунд.

График моделирования переходного процесса всей системы при ступенчатом возмущающем воздействии ($0 \rightarrow 1 \text{ т/ч}$) показаны на рис. 68 б. Отклонение не превысило 0,5 %, однако имеется статическая ошибка 0,4 %.

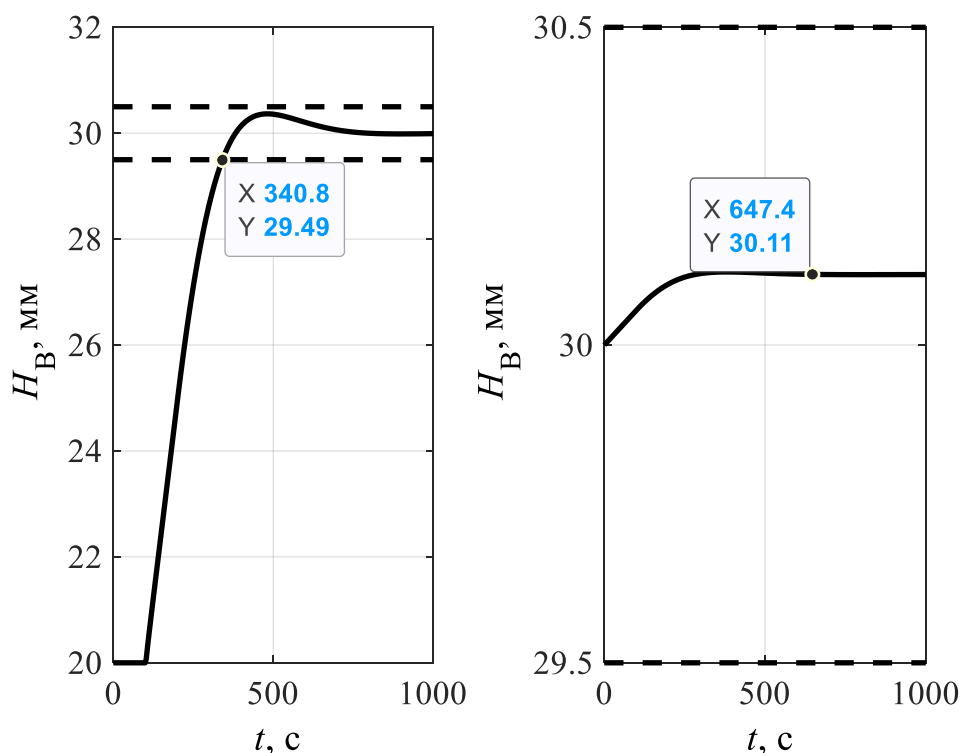


Рис. 68. Результат моделирования двухконтурной системы регулирования уровня воды в барабане котла

5. ЗАДАНИЕ

Для формирования задания использовались данные, приведенные в [8].

Таблица 1

Пример					
Управляющее воздействие			Возмущающее воздействие		
Время, с	Рп, МПа	Гт, т/ч	Время, с	Рп, МПа	Гп, т/ч
0	3	0	0	3.01	3
10	3	0	20	3	3
20	3	0	40	3	3
30	3	0	60	3	4
40	3	0	80	2.98	4
50	3	0	100	3	4
60	3	4	120	2.95	4
70	3.05	4	140	2.94	4
80	3.1	4	160	2.93	4
90	3.14	4	180	2.92	4
100	3.16	4	200	2.92	4
110	3.17	4	220	2.93	4
120	3.18	4	240	2.92	4
130	3.19	4	260	2.92	4
140	3.19	4	280	2.92	4
150	3.19	4	300	2.92	4
160	3.2	4	320	2.91	4
170	3.2	4	340	2.91	4
180	3.2	4	360	2.92	4
190	3.2	4	380	2.9	4
200	3.2	4	400	2.91	4
210	3.2	4	420	2.91	4
220	3.2	4	440	2.91	4
230	3.2	4	460	2.9	4
240	3.2	4	480	2.91	4

Вариант 1.**Контур давление пара за барабаном**

G_T , т/ч – расход топлива (управляющее воздействие)

G_P , т/ч – расход пара (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 10 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 3000 об/мин

Время, с	G_T , т/ч	P_P , МПа	Время, с	G_P , т/ч	P_P , МПа
0	2.00	4.00	0	2.50	3.50
10	2.00	4.00	10	2.50	3.50
20	2.00	4.00	20	2.50	3.50
21	2.25	4.00	30	2.75	3.50
22	2.25	4.00	31	2.75	3.50
24	2.25	4.00	32	2.75	3.50
26	2.25	4.00	34	2.75	3.50
28	2.25	4.00	36	2.75	3.50
30	2.25	4.00	38	2.75	3.50
32	2.25	4.00	40	2.75	3.50
34	2.25	4.00	42	2.75	3.50
36	2.25	4.00	44	2.75	3.50
38	2.25	4.01	46	2.75	3.50
40	2.25	4.02	48	2.75	3.49
60	2.25	4.10	50	2.75	3.49
80	2.25	4.15	60	2.75	3.49
100	2.25	4.17	70	2.75	3.48
120	2.25	4.18	100	2.75	3.46
140	2.25	4.19	130	2.75	3.45
160	2.25	4.20	160	2.75	3.45
180	2.25	4.20	190	2.75	3.44
200	2.25	4.20	220	2.75	3.44
220	2.25	4.20	250	2.75	3.44
240	2.25	4.20	280	2.75	3.44
260	2.25	4.20	310	2.75	3.43
280	2.25	4.20	340	2.75	3.43
300	2.25	4.20	370	2.75	3.43
320	2.25	4.20	400	2.75	3.43
340	2.25	4.20	430	2.75	3.43
360	2.25	4.20	460	2.75	3.43
380	2.25	4.20	490	2.75	3.43

Вариант 2.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины с использованием направляющего аппарата

$G_{пв}$, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

P_t , МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 10 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 3000 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, %	$P_{вт(р)}$, Па	Время, с	P_t , МПа	$P_{вт(р)}$, Па
0	75.00	40.00	0	0.80	35.00
10	75.00	40.00	5	0.80	35.00
15	75.00	40.00	10	0.80	35.00
16	75.00	40.00	15	0.80	35.00
18	75.00	40.00	16	0.95	35.00
20	75.00	40.00	18	0.95	35.00
25	75.00	40.00	20	0.95	35.00
26	90.00	40.00	22	0.95	35.00
28	90.00	40.00	24	0.95	35.00
30	90.00	40.00	26	0.95	34.95
32	90.00	40.00	28	0.95	34.86
34	90.00	40.00	30	0.95	34.78
36	90.00	40.24	32	0.95	34.71
38	90.00	40.68	34	0.95	34.64
40	90.00	41.09	36	0.95	34.57
50	90.00	42.71	46	0.95	34.32
60	90.00	43.79	56	0.95	34.15
70	90.00	44.52	66	0.95	34.03
80	90.00	45.01	76	0.95	33.96
90	90.00	45.34	86	0.95	33.90
100	90.00	45.55	106	0.95	33.85
110	90.00	45.70	126	0.95	33.82
120	90.00	45.80	146	0.95	33.81
130	90.00	45.87	166	0.95	33.80
140	90.00	45.91	186	0.95	33.80
150	90.00	45.94	206	0.95	33.80
160	90.00	45.96	226	0.95	33.80
190	90.00	45.99	256	0.95	33.80
220	90.00	46.00	286	0.95	33.80
250	90.00	46.00	326	0.95	33.80
280	90.00	46.00	366	0.95	33.80

Вариант 3.

Контур регулирования температуры пара

$l_{дз}$, % – степень открытия дроссельной поворотной заслонки на трубопроводе питательной воды в пароохладитель (управляющее воздействие)

V_T , м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 15 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 750 об/мин

Время, с	$l_{дз}$, %	$\Theta_{пп}$, °C	Время, с	V_T , м ³ /ч	$\Theta_{пп}$, °C
0	40.00	350.00	0	4000.00	350.00
5	40.00	350.00	10	4000.00	350.00
10	40.00	350.00	15	4000.00	350.00
15	40.00	350.00	16	4000.00	350.00
20	40.00	350.00	18	4000.00	350.00
25	40.00	350.00	20	4000.00	350.00
30	40.00	350.00	25	4000.00	350.00
35	40.00	350.00	26	4500.00	350.00
36	80.00	350.00	28	4500.00	350.00
40	80.00	350.00	30	4500.00	350.00
45	80.00	350.00	32	4500.00	350.00
50	80.00	349.82	34	4500.00	350.00
55	80.00	349.65	36	4500.00	350.00
60	80.00	349.49	38	4500.00	350.00
65	80.00	349.34	40	4500.00	350.00
75	80.00	349.08	42	4500.00	350.00
85	80.00	348.84	44	4500.00	350.00
95	80.00	348.64	54	4500.00	368.39
105	80.00	348.46	64	4500.00	385.83
115	80.00	348.30	74	4500.00	400.59
135	80.00	348.04	84	4500.00	413.09
155	80.00	347.85	94	4500.00	423.67
175	80.00	347.69	114	4500.00	440.20
195	80.00	347.58	134	4500.00	452.05
215	80.00	347.49	154	4500.00	460.54
235	80.00	347.42	174	4500.00	466.62
265	80.00	347.35	194	4500.00	470.98
295	80.00	347.30	214	4500.00	474.11
325	80.00	347.27	234	4500.00	476.34
355	80.00	347.24	254	4500.00	477.95
385	80.00	347.23	274	4500.00	479.10

Вариант 4.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины изменением числа оборотов электродвигателя

$G_{пв}$, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

P_T , МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Номинальная частота вращения вала двигателя – 3000 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, %	$P_{вТ(р)}$, Па	Время, с	P_T , МПа	$P_{вТ(р)}$, Па
0	75.00	40.00	0	0.80	35.00
10	75.00	40.00	5	0.80	35.00
15	75.00	40.00	10	0.80	35.00
16	75.00	40.00	15	0.80	35.00
18	75.00	40.00	16	0.95	35.00
20	75.00	40.00	18	0.95	35.00
25	75.00	40.00	20	0.95	35.00
26	90.00	40.00	22	0.95	35.00
28	90.00	40.00	24	0.95	35.00
30	90.00	40.00	26	0.95	34.95
32	90.00	40.00	28	0.95	34.86
34	90.00	40.00	30	0.95	34.78
36	90.00	40.24	32	0.95	34.71
38	90.00	40.68	34	0.95	34.64
40	90.00	41.09	36	0.95	34.57
50	90.00	42.71	46	0.95	34.32
60	90.00	43.79	56	0.95	34.15
70	90.00	44.52	66	0.95	34.03
80	90.00	45.01	76	0.95	33.96
90	90.00	45.34	86	0.95	33.90
100	90.00	45.55	106	0.95	33.85
110	90.00	45.70	126	0.95	33.82
120	90.00	45.80	146	0.95	33.81
130	90.00	45.87	166	0.95	33.80
140	90.00	45.91	186	0.95	33.80
150	90.00	45.94	206	0.95	33.80
160	90.00	45.96	226	0.95	33.80
190	90.00	45.99	256	0.95	33.80
220	90.00	46.00	286	0.95	33.80
250	90.00	46.00	326	0.95	33.80
280	90.00	46.00	366	0.95	33.80

Вариант 5.**Контур управления уровнем воды в барабане котла**

$G_{пв}$, т/ч – расход питательной воды (управляющее воздействие)

$G_{т}$, м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 10 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 3000 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, т/ч	Н, мм	Время, с	$G_{т}$, м ³ /ч	Н, мм
0	64.00	36.00	0	80.00	37.00
2	64.00	36.00	2	80.00	37.00
4	64.00	36.00	4	80.00	37.00
6	64.00	36.00	6	80.00	37.00
8	64.00	36.00	8	80.00	37.00
10	72.00	36.00	10	80.00	37.00
12	72.00	36.00	12	80.00	37.00
14	72.00	36.00	14	80.00	37.00
16	72.00	36.00	16	110.00	37.00
18	72.00	36.00	18	110.00	37.00
20	72.00	36.27	20	110.00	37.00
22	72.00	36.80	22	110.00	37.00
24	72.00	37.33	24	110.00	36.99
26	72.00	37.87	26	110.00	36.98
28	72.00	38.40	28	110.00	36.97
30	72.00	38.93	30	110.00	36.95
32	72.00	39.47	32	110.00	36.94
34	72.00	40.00	34	110.00	36.93
36	72.00	40.53	36	110.00	36.92
38	72.00	41.07	38	110.00	36.90
40	72.00	41.60	40	110.00	36.89
42	72.00	42.13	42	110.00	36.88
44	72.00	42.67	44	110.00	36.86
46	72.00	43.20	46	110.00	36.85
48	72.00	43.73	48	110.00	36.84
50	72.00	44.27	50	110.00	36.83
52	72.00	44.80	52	110.00	36.81
54	72.00	45.33	54	110.00	36.80
56	72.00	45.87	56	110.00	36.79
58	72.00	46.40	58	110.00	36.77
60	72.00	46.93	60	110.00	36.76

Вариант 6.**Контур давление пара за барабаном**

G_T , т/ч – расход топлива (управляющее воздействие)

G_P , т/ч – расход пара (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 12,5 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 1500 об/мин

Время, с	G_T , т/ч	P_P , МПа	Время, с	G_P , т/ч	P_P , МПа
0	2.00	4.00	0	2.50	3.50
10	2.00	4.00	10	2.50	3.50
20	2.00	4.00	20	2.50	3.50
21	2.25	4.00	30	2.75	3.50
22	2.25	4.00	31	2.75	3.50
24	2.25	4.00	32	2.75	3.50
26	2.25	4.00	34	2.75	3.50
28	2.25	4.00	36	2.75	3.50
30	2.25	4.00	38	2.75	3.50
32	2.25	4.01	40	2.75	3.50
34	2.25	4.03	42	2.75	3.50
36	2.25	4.05	44	2.75	3.50
38	2.25	4.06	46	2.75	3.50
40	2.25	4.08	48	2.75	3.50
60	2.25	4.17	50	2.75	3.49
80	2.25	4.21	60	2.75	3.49
100	2.25	4.23	70	2.75	3.48
120	2.25	4.24	100	2.75	3.47
140	2.25	4.25	130	2.75	3.46
160	2.25	4.25	160	2.75	3.46
180	2.25	4.25	190	2.75	3.45
200	2.25	4.25	220	2.75	3.45
220	2.25	4.25	250	2.75	3.45
240	2.25	4.25	280	2.75	3.45
260	2.25	4.25	310	2.75	3.45
280	2.25	4.25	340	2.75	3.45
300	2.25	4.25	370	2.75	3.45
320	2.25	4.25	400	2.75	3.45
340	2.25	4.25	430	2.75	3.45
360	2.25	4.25	460	2.75	3.45
380	2.25	4.25	490	2.75	3.45

Вариант 7.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины с использованием направляющего аппарата

$G_{пв}$, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

P_t , МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 12,5 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 1500 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, %	$P_{вт(р)}$, Па	Время, с	P_t , МПа	$P_{вт(р)}$, Па
0	75.00	42.00	0	0.80	33.00
10	75.00	42.00	5	0.80	33.00
15	75.00	42.00	10	0.80	33.00
16	75.00	42.00	15	0.80	33.00
18	75.00	42.00	16	0.93	33.00
20	75.00	42.00	18	0.93	33.00
25	75.00	42.00	20	0.93	33.00
26	85.00	42.00	22	0.93	33.00
28	85.00	42.00	24	0.93	33.00
30	85.00	42.00	26	0.93	33.00
32	85.00	42.00	28	0.93	33.00
34	85.00	42.00	30	0.93	33.00
36	85.00	42.00	32	0.93	32.93
38	85.00	42.16	34	0.93	32.86
40	85.00	42.47	36	0.93	32.80
50	85.00	43.72	46	0.93	32.54
60	85.00	44.58	56	0.93	32.36
70	85.00	45.17	66	0.93	32.23
80	85.00	45.58	76	0.93	32.13
90	85.00	45.87	86	0.93	32.07
100	85.00	46.06	106	0.93	31.98
110	85.00	46.20	126	0.93	31.94
120	85.00	46.29	146	0.93	31.92
130	85.00	46.36	166	0.93	31.91
140	85.00	46.40	186	0.93	31.90
150	85.00	46.43	206	0.93	31.90
160	85.00	46.45	226	0.93	31.90
190	85.00	46.48	256	0.93	31.90
220	85.00	46.49	286	0.93	31.90
250	85.00	46.50	326	0.93	31.90
280	85.00	46.50	366	0.93	31.90

Вариант 8.

Контур регулирования температуры пара

$l_{дз}$, % – степень открытия дроссельной поворотной заслонки на трубопроводе питательной воды в парохладитель (управляющее воздействие)

V_T , м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 25 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 500 об/мин

Время, с	$l_{дз}$, %	$\Theta_{пп}$, °C	Время, с	V_T , м ³ /ч	$\Theta_{пп}$, °C
0	40.00	350.00	0	4000.00	350.00
5	40.00	350.00	10	4000.00	350.00
10	40.00	350.00	15	4000.00	350.00
15	40.00	350.00	16	4000.00	350.00
20	40.00	350.00	18	4000.00	350.00
25	40.00	350.00	20	4000.00	350.00
30	40.00	350.00	25	4000.00	350.00
35	40.00	350.00	26	4500.00	350.00
36	80.00	350.00	28	4500.00	350.00
40	80.00	350.00	30	4500.00	350.00
45	80.00	350.00	32	4500.00	350.00
50	80.00	350.00	34	4500.00	350.00
55	80.00	349.71	36	4500.00	350.00
60	80.00	349.45	38	4500.00	350.00
65	80.00	349.20	40	4500.00	350.00
75	80.00	348.77	42	4500.00	354.84
85	80.00	348.41	44	4500.00	359.55
95	80.00	348.10	54	4500.00	381.18
105	80.00	347.84	64	4500.00	399.92
115	80.00	347.62	74	4500.00	416.18
135	80.00	347.27	84	4500.00	430.26
155	80.00	347.03	94	4500.00	442.48
175	80.00	346.85	114	4500.00	462.24
195	80.00	346.72	134	4500.00	477.09
215	80.00	346.63	154	4500.00	488.25
235	80.00	346.56	174	4500.00	496.64
265	80.00	346.50	194	4500.00	502.94
295	80.00	346.46	214	4500.00	507.68
325	80.00	346.44	234	4500.00	511.24
355	80.00	346.42	254	4500.00	513.91
385	80.00	346.41	274	4500.00	515.92

Вариант 9.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины изменением числа оборотов электродвигателя

Гпв, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

P_T , МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Номинальная частота вращения вала двигателя – 1500 об/мин

Время, с	Гпв, %	$P_{VT(p)}$, Па	Время, с	P_T , МПа	$P_{VT(p)}$, Па
0	75.00	42.00	0	0.80	33.00
10	75.00	42.00	5	0.80	33.00
15	75.00	42.00	10	0.80	33.00
16	75.00	42.00	15	0.80	33.00
18	75.00	42.00	16	0.93	33.00
20	75.00	42.00	18	0.93	33.00
25	75.00	42.00	20	0.93	33.00
26	85.00	42.00	22	0.93	33.00
28	85.00	42.00	24	0.93	33.00
30	85.00	42.00	26	0.93	33.00
32	85.00	42.00	28	0.93	33.00
34	85.00	42.00	30	0.93	33.00
36	85.00	42.00	32	0.93	32.93
38	85.00	42.16	34	0.93	32.86
40	85.00	42.47	36	0.93	32.80
50	85.00	43.72	46	0.93	32.54
60	85.00	44.58	56	0.93	32.36
70	85.00	45.17	66	0.93	32.23
80	85.00	45.58	76	0.93	32.13
90	85.00	45.87	86	0.93	32.07
100	85.00	46.06	106	0.93	31.98
110	85.00	46.20	126	0.93	31.94
120	85.00	46.29	146	0.93	31.92
130	85.00	46.36	166	0.93	31.91
140	85.00	46.40	186	0.93	31.90
150	85.00	46.43	206	0.93	31.90
160	85.00	46.45	226	0.93	31.90
190	85.00	46.48	256	0.93	31.90
220	85.00	46.49	286	0.93	31.90
250	85.00	46.50	326	0.93	31.90
280	85.00	46.50	366	0.93	31.90

Вариант 10.**Контур управления уровнем воды в барабане котла**

Гпв, т/ч – расход питательной воды (управляющее воздействие)

Гт, м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 12,5 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 1500 об/мин

Время, с	Гпв, т/ч	Н, мм	Время, с	Гт, м ³ /ч	Н, мм
0	60.00	30.00	0	91.00	30.00
2	60.00	30.00	2	91.00	30.00
4	60.00	30.00	4	91.00	30.00
6	60.00	30.00	6	91.00	30.00
8	60.00	30.00	8	91.00	30.00
10	60.00	30.00	10	91.00	30.00
12	60.00	30.00	12	91.00	30.00
14	60.00	30.00	14	119.00	30.00
16	79.00	30.00	16	119.00	30.00
18	79.00	30.00	18	119.00	30.00
20	79.00	30.00	20	119.00	30.00
22	79.00	30.68	22	119.00	30.00
24	79.00	32.04	24	119.00	29.99
26	79.00	33.39	26	119.00	29.98
28	79.00	34.75	28	119.00	29.96
30	79.00	36.11	30	119.00	29.95
32	79.00	37.46	32	119.00	29.94
34	79.00	38.82	34	119.00	29.93
36	79.00	40.18	36	119.00	29.92
38	79.00	41.54	38	119.00	29.90
40	79.00	42.89	40	119.00	29.89
42	79.00	44.25	42	119.00	29.88
44	79.00	45.61	44	119.00	29.87
46	79.00	46.96	46	119.00	29.85
48	79.00	48.32	48	119.00	29.84
50	79.00	49.68	50	119.00	29.83
52	79.00	51.04	52	119.00	29.82
54	79.00	52.39	54	119.00	29.81
56	79.00	53.75	56	119.00	29.79
58	79.00	55.11	58	119.00	29.78
60	79.00	56.46	60	119.00	29.77

Вариант 11.

Контур давление пара за барабаном

G_T , т/ч – расход топлива (управляющее воздействие)

G_P , т/ч – расход пара (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 15 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 750 об/мин

Время, с	G_T , т/ч	P_P , МПа	Время, с	G_P , т/ч	P_P , МПа
0	3.00	4.00	0	3.25	3.50
10	3.00	4.00	10	3.25	3.50
15	3.00	4.00	20	3.25	3.50
16	3.50	4.00	21	3.75	3.50
18	3.50	4.00	23	3.75	3.50
20	3.50	4.00	25	3.75	3.50
22	3.50	4.00	27	3.75	3.50
24	3.50	4.00	29	3.75	3.50
26	3.50	4.00	31	3.75	3.50
28	3.50	4.01	33	3.75	3.50
30	3.50	4.04	35	3.75	3.50
35	3.50	4.09	37	3.75	3.50
40	3.50	4.13	39	3.75	3.50
50	3.50	4.20	49	3.75	3.49
60	3.50	4.25	59	3.75	3.48
70	3.50	4.28	69	3.75	3.48
80	3.50	4.30	79	3.75	3.47
90	3.50	4.32	99	3.75	3.46
100	3.50	4.33	119	3.75	3.45
110	3.50	4.33	139	3.75	3.45
120	3.50	4.34	159	3.75	3.44
130	3.50	4.34	179	3.75	3.44
140	3.50	4.34	199	3.75	3.44
150	3.50	4.35	229	3.75	3.43
160	3.50	4.35	259	3.75	3.43
170	3.50	4.35	289	3.75	3.43
180	3.50	4.35	319	3.75	3.43
190	3.50	4.35	349	3.75	3.43
200	3.50	4.35	379	3.75	3.43
210	3.50	4.35	409	3.75	3.43
220	3.50	4.35	439	3.75	3.43

Вариант 12.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины с использованием направляющего аппарата

$G_{пв}$, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

P_t , МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 15 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 750 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, %	$P_{вт(р)}$, Па	Время, с	P_t , МПа	$P_{вт(р)}$, Па
0	72.00	42.00	0	0.83	33.00
10	72.00	42.00	5	0.83	33.00
15	72.00	42.00	10	0.83	33.00
16	72.00	42.00	15	0.83	33.00
18	72.00	42.00	16	0.93	33.00
20	72.00	42.00	18	0.93	33.00
25	72.00	42.00	20	0.93	33.00
26	85.00	42.00	22	0.93	33.00
28	85.00	42.00	24	0.93	33.00
30	85.00	42.00	26	0.93	32.97
32	85.00	42.00	28	0.93	32.93
34	85.00	42.27	30	0.93	32.88
36	85.00	42.78	32	0.93	32.84
38	85.00	43.24	34	0.93	32.80
40	85.00	43.67	36	0.93	32.76
50	85.00	45.29	46	0.93	32.61
60	85.00	46.32	56	0.93	32.49
70	85.00	46.97	66	0.93	32.41
80	85.00	47.39	76	0.93	32.35
90	85.00	47.65	86	0.93	32.30
100	85.00	47.82	106	0.93	32.25
110	85.00	47.93	126	0.93	32.21
120	85.00	47.99	146	0.93	32.20
130	85.00	48.04	166	0.93	32.19
140	85.00	48.06	186	0.93	32.19
150	85.00	48.08	206	0.93	32.18
160	85.00	48.09	226	0.93	32.18
190	85.00	48.11	256	0.93	32.18
220	85.00	48.11	286	0.93	32.18
250	85.00	48.11	326	0.93	32.18
280	85.00	48.11	366	0.93	32.18

Вариант 13.

Контур регулирования температуры пара

$l_{дз}$, % – степень открытия дроссельной поворотной заслонки на трубопроводе питательной воды в пароохладитель (управляющее воздействие)

V_T , м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 30 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 375 об/мин

Время, с	$l_{дз}$, %	$\Theta_{пп}$, °C	Время, с	V_T , м ³ /ч	$\Theta_{пп}$, °C
0	50.00	375.00	0	3500.00	325.00
5	50.00	375.00	10	3500.00	325.00
10	50.00	375.00	15	3500.00	325.00
15	50.00	375.00	16	3500.00	325.00
20	50.00	375.00	18	3500.00	325.00
25	50.00	375.00	20	3500.00	325.00
26	100.00	375.00	21	3950.00	325.00
28	100.00	375.00	26	3950.00	325.00
30	100.00	375.00	28	3950.00	325.00
32	100.00	375.00	30	3950.00	325.00
34	100.00	375.00	32	3950.00	329.51
36	100.00	375.00	34	3950.00	333.86
38	100.00	375.00	36	3950.00	338.07
40	100.00	375.00	38	3950.00	342.14
42	100.00	375.00	40	3950.00	346.06
44	100.00	375.00	42	3950.00	349.86
46	100.00	374.96	44	3950.00	353.52
48	100.00	374.89	54	3950.00	370.07
50	100.00	374.81	64	3950.00	383.99
60	100.00	374.48	74	3950.00	395.71
70	100.00	374.20	84	3950.00	405.58
80	100.00	373.96	94	3950.00	413.88
100	100.00	373.57	114	3950.00	426.75
120	100.00	373.29	134	3950.00	435.86
140	100.00	373.08	154	3950.00	442.32
160	100.00	372.93	174	3950.00	446.89
190	100.00	372.77	194	3950.00	450.13
220	100.00	372.67	214	3950.00	452.43
250	100.00	372.61	234	3950.00	454.05
280	100.00	372.57	254	3950.00	455.20
310	100.00	372.54	274	3950.00	456.02

Вариант 14.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины изменением числа оборотов электродвигателя

$G_{пв}$, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

P_t , МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Номинальная частота вращения вала двигателя – 750 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, %	$P_{вт(р)}$, Па	Время, с	P_t , МПа	$P_{вт(р)}$, Па
0	72.00	42.00	0	0.83	33.00
10	72.00	42.00	5	0.83	33.00
15	72.00	42.00	10	0.83	33.00
16	72.00	42.00	15	0.83	33.00
18	72.00	42.00	16	0.93	33.00
20	72.00	42.00	18	0.93	33.00
25	72.00	42.00	20	0.93	33.00
26	85.00	42.00	22	0.93	33.00
28	85.00	42.00	24	0.93	33.00
30	85.00	42.00	26	0.93	32.97
32	85.00	42.00	28	0.93	32.93
34	85.00	42.27	30	0.93	32.88
36	85.00	42.78	32	0.93	32.84
38	85.00	43.24	34	0.93	32.80
40	85.00	43.67	36	0.93	32.76
50	85.00	45.29	46	0.93	32.61
60	85.00	46.32	56	0.93	32.49
70	85.00	46.97	66	0.93	32.41
80	85.00	47.39	76	0.93	32.35
90	85.00	47.65	86	0.93	32.30
100	85.00	47.82	106	0.93	32.25
110	85.00	47.93	126	0.93	32.21
120	85.00	47.99	146	0.93	32.20
130	85.00	48.04	166	0.93	32.19
140	85.00	48.06	186	0.93	32.19
150	85.00	48.08	206	0.93	32.18
160	85.00	48.09	226	0.93	32.18
190	85.00	48.11	256	0.93	32.18
220	85.00	48.11	286	0.93	32.18
250	85.00	48.11	326	0.93	32.18
280	85.00	48.11	366	0.93	32.18

Вариант 15.

Контур управления уровнем воды в барабане котла

Гпв, т/ч – расход питательной воды (управляющее воздействие)

Гт, м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 15 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 750 об/мин

Время, с	Гпв, т/ч	Н, мм	Время, с	Гт, м ³ /ч	Н, мм
0	61.00	40.00	0	94.00	31.00
2	61.00	40.00	2	94.00	31.00
4	61.00	40.00	4	94.00	31.00
6	61.00	40.00	6	94.00	31.00
8	61.00	40.00	8	94.00	31.00
10	73.00	40.00	10	94.00	31.00
12	73.00	40.00	12	94.00	31.00
14	73.00	40.00	14	94.00	31.00
16	73.00	40.00	16	108.00	31.00
18	73.00	40.57	18	108.00	31.00
20	73.00	41.71	20	108.00	31.00
22	73.00	42.86	22	108.00	30.99
24	73.00	44.00	24	108.00	30.99
26	73.00	45.14	26	108.00	30.98
28	73.00	46.29	28	108.00	30.97
30	73.00	47.43	30	108.00	30.97
32	73.00	48.57	32	108.00	30.96
34	73.00	49.71	34	108.00	30.96
36	73.00	50.86	36	108.00	30.95
38	73.00	52.00	38	108.00	30.94
40	73.00	53.14	40	108.00	30.94
42	73.00	54.29	42	108.00	30.93
44	73.00	55.43	44	108.00	30.93
46	73.00	56.57	46	108.00	30.92
48	73.00	57.71	48	108.00	30.91
50	73.00	58.86	50	108.00	30.91
52	73.00	60.00	52	108.00	30.90
54	73.00	61.14	54	108.00	30.90
56	73.00	62.29	56	108.00	30.89
58	73.00	63.43	58	108.00	30.88
60	73.00	64.57	60	108.00	30.88

Вариант 16.**Контур давление пара за барабаном**

G_T , т/ч – расход топлива (управляющее воздействие)

G_P , т/ч – расход пара (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 25 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 500 об/мин

Время, с	G_T , т/ч	P_P , МПа	Время, с	G_P , т/ч	P_P , МПа
0	3.00	4.00	0	3.25	3.50
10	3.00	4.00	10	3.25	3.50
15	3.00	4.00	20	3.25	3.50
16	3.50	4.00	21	3.75	3.50
18	3.50	4.00	23	3.75	3.50
20	3.50	4.00	25	3.75	3.50
22	3.50	4.00	27	3.75	3.50
24	3.50	4.00	29	3.75	3.50
26	3.50	4.00	31	3.75	3.50
28	3.50	4.00	33	3.75	3.50
30	3.50	4.00	35	3.75	3.50
35	3.50	4.08	37	3.75	3.50
40	3.50	4.15	39	3.75	3.50
50	3.50	4.26	49	3.75	3.49
60	3.50	4.35	59	3.75	3.48
70	3.50	4.41	69	3.75	3.47
80	3.50	4.46	79	3.75	3.46
90	3.50	4.49	99	3.75	3.45
100	3.50	4.52	119	3.75	3.44
110	3.50	4.54	139	3.75	3.44
120	3.50	4.55	159	3.75	3.43
130	3.50	4.57	179	3.75	3.43
140	3.50	4.57	199	3.75	3.42
150	3.50	4.58	229	3.75	3.42
160	3.50	4.59	259	3.75	3.42
170	3.50	4.59	289	3.75	3.41
180	3.50	4.59	319	3.75	3.41
190	3.50	4.59	349	3.75	3.41
200	3.50	4.60	379	3.75	3.41
210	3.50	4.60	409	3.75	3.41
220	3.50	4.60	439	3.75	3.41

Вариант 17.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины с использованием направляющего аппарата

$G_{пв}$, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

P_t , МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 37 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 300 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, %	$P_{вт(р)}$, Па	Время, с	P_t , МПа	$P_{вт(р)}$, Па
0	63.00	35.00	0	0.63	45.00
5	63.00	35.00	5	0.63	45.00
10	63.00	35.00	10	0.63	45.00
15	63.00	35.00	15	0.63	45.00
20	63.00	35.00	20	0.63	45.00
25	63.00	35.00	25	0.63	45.00
26	78.00	35.00	30	0.63	45.00
28	78.00	35.00	31	0.88	45.00
30	78.00	35.00	32	0.88	45.00
32	78.00	35.00	34	0.88	45.00
34	78.00	35.00	36	0.88	45.00
36	78.00	35.17	38	0.88	45.00
38	78.00	35.48	40	0.88	45.00
40	78.00	35.78	42	0.88	44.87
50	78.00	37.03	44	0.88	44.76
60	78.00	37.97	54	0.88	44.26
70	78.00	38.66	64	0.88	43.89
80	78.00	39.18	74	0.88	43.61
90	78.00	39.57	84	0.88	43.40
100	78.00	39.86	94	0.88	43.25
110	78.00	40.07	104	0.88	43.13
120	78.00	40.23	114	0.88	43.05
130	78.00	40.35	124	0.88	42.99
140	78.00	40.44	134	0.88	42.94
150	78.00	40.51	144	0.88	42.90
160	78.00	40.56	154	0.88	42.88
170	78.00	40.59	164	0.88	42.86
180	78.00	40.62	174	0.88	42.84
190	78.00	40.64	184	0.88	42.83
200	78.00	40.66	194	0.88	42.82
210	78.00	40.67	204	0.88	42.82

Вариант 18.

Контур регулирования температуры пара

$l_{дз}$, % – степень открытия дроссельной поворотной заслонки на трубопроводе питательной воды в пароохладитель (управляющее воздействие)

V_T , м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 37 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 300 об/мин

Время, с	$l_{дз}$, %	$\Theta_{пп}$, °C	Время, с	V_T , м ³ /ч	$\Theta_{пп}$, °C
0	50.00	375.00	0	3500.00	325.00
5	50.00	375.00	10	3500.00	325.00
10	50.00	375.00	15	3500.00	325.00
15	50.00	375.00	16	3500.00	325.00
20	50.00	375.00	18	3500.00	325.00
25	50.00	375.00	20	3500.00	325.00
26	100.00	375.00	21	3950.00	325.00
28	100.00	375.00	26	3950.00	325.00
30	100.00	375.00	28	3950.00	325.00
32	100.00	375.00	30	3950.00	325.00
34	100.00	375.00	32	3950.00	325.00
36	100.00	375.00	34	3950.00	325.00
38	100.00	375.00	36	3950.00	326.50
40	100.00	375.00	38	3950.00	329.42
42	100.00	374.79	40	3950.00	332.26
44	100.00	374.58	42	3950.00	335.01
46	100.00	374.38	44	3950.00	337.67
48	100.00	374.19	54	3950.00	349.84
50	100.00	374.00	64	3950.00	360.27
60	100.00	373.14	74	3950.00	369.22
70	100.00	372.39	84	3950.00	376.89
80	100.00	371.74	94	3950.00	383.46
100	100.00	370.68	114	3950.00	393.93
120	100.00	369.89	134	3950.00	401.63
140	100.00	369.30	154	3950.00	407.29
160	100.00	368.85	174	3950.00	411.45
190	100.00	368.38	194	3950.00	414.51
220	100.00	368.07	214	3950.00	416.76
250	100.00	367.87	234	3950.00	418.41
280	100.00	367.74	254	3950.00	419.63
310	100.00	367.66	274	3950.00	420.52

Вариант 19.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины изменением числа оборотов электродвигателя

$G_{пв}$, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

$P_{т}$, МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Номинальная частота вращения вала двигателя – 500 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, %	$P_{вт(р)}$, Па	Время, с	$P_{т}$, МПа	$P_{вт(р)}$, Па
0	60.00	42.00	0	0.83	33.00
10	60.00	42.00	5	0.83	33.00
20	60.00	42.00	10	0.83	33.00
30	60.00	42.00	15	0.83	33.00
31	85.00	42.00	20	0.95	33.00
33	85.00	42.00	21	0.95	33.00
35	85.00	42.00	22	0.95	33.00
37	85.00	42.00	24	0.95	33.00
39	85.00	42.00	26	0.95	33.00
41	85.00	42.00	28	0.95	33.00
43	85.00	42.00	30	0.95	33.00
45	85.00	42.56	32	0.95	33.00
47	85.00	43.09	34	0.95	32.97
49	85.00	43.59	36	0.95	32.92
59	85.00	45.62	46	0.95	32.70
69	85.00	47.07	56	0.95	32.54
79	85.00	48.11	66	0.95	32.42
89	85.00	48.86	76	0.95	32.34
99	85.00	49.40	86	0.95	32.28
109	85.00	49.78	96	0.95	32.24
119	85.00	50.06	106	0.95	32.21
129	85.00	50.25	116	0.95	32.19
139	85.00	50.39	126	0.95	32.17
149	85.00	50.49	136	0.95	32.16
159	85.00	50.57	146	0.95	32.16
169	85.00	50.62	156	0.95	32.15
179	85.00	50.66	166	0.95	32.15
189	85.00	50.68	176	0.95	32.14
199	85.00	50.70	186	0.95	32.14
209	85.00	50.72	196	0.95	32.14
219	85.00	50.73	206	0.95	32.14

Вариант 20.

Контур регулирования температуры пара

$l_{дз}$, % – степень открытия дроссельной поворотной заслонки на трубопроводе питательной воды в пароохладитель (управляющее воздействие)

V_T , м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 100 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 500 об/мин

Время, с	$l_{дз}$, %	$\Theta_{пп}$, °C	Время, с	V_T , м ³ /ч	$\Theta_{пп}$, °C
0	30.00	355.00	0	3500.00	375.00
5	30.00	355.00	10	3500.00	375.00
10	30.00	355.00	15	3500.00	375.00
15	30.00	355.00	16	3500.00	375.00
20	30.00	355.00	18	3500.00	375.00
21	85.00	355.00	20	3500.00	375.00
23	85.00	355.00	21	3950.00	375.00
25	85.00	355.00	26	3950.00	375.00
27	85.00	355.00	28	3950.00	375.00
29	85.00	355.00	30	3950.00	377.94
31	85.00	355.00	32	3950.00	380.80
33	85.00	354.96	34	3950.00	383.57
35	85.00	354.87	36	3950.00	386.27
37	85.00	354.79	38	3950.00	388.88
39	85.00	354.71	40	3950.00	391.42
41	85.00	354.64	42	3950.00	393.89
51	85.00	354.29	44	3950.00	396.28
61	85.00	353.98	54	3950.00	407.25
71	85.00	353.72	64	3950.00	416.72
81	85.00	353.49	74	3950.00	424.90
91	85.00	353.29	84	3950.00	431.95
101	85.00	353.12	94	3950.00	438.05
111	85.00	352.97	114	3950.00	447.84
131	85.00	352.73	134	3950.00	455.15
151	85.00	352.55	154	3950.00	460.59
171	85.00	352.41	174	3950.00	464.64
191	85.00	352.31	194	3950.00	467.66
221	85.00	352.20	214	3950.00	469.92
251	85.00	352.13	234	3950.00	471.59
281	85.00	352.09	254	3950.00	472.84
321	85.00	352.05	274	3950.00	473.78

Вариант 21.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины изменением числа оборотов электродвигателя

$G_{пв}$, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

$P_{т}$, МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Номинальная частота вращения вала двигателя – 375 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, %	$P_{вт(р)}$, Па	Время, с	$P_{т}$, МПа	$P_{вт(р)}$, Па
0	63.00	42.00	0	0.63	33.00
10	63.00	42.00	5	0.63	33.00
20	63.00	42.00	10	0.63	33.00
30	63.00	42.00	15	0.63	33.00
31	85.00	42.00	20	0.95	33.00
33	85.00	42.00	21	0.95	33.00
35	85.00	42.00	22	0.95	33.00
37	85.00	42.00	24	0.95	33.00
39	85.00	42.00	26	0.95	33.00
41	85.00	42.00	28	0.95	33.00
43	85.00	42.00	30	0.95	33.00
45	85.00	42.00	32	0.95	33.00
47	85.00	42.67	34	0.95	33.00
49	85.00	43.29	36	0.95	32.91
59	85.00	45.81	46	0.95	32.19
69	85.00	47.57	56	0.95	31.68
79	85.00	48.81	66	0.95	31.33
89	85.00	49.67	76	0.95	31.08
99	85.00	50.27	86	0.95	30.91
109	85.00	50.70	96	0.95	30.79
119	85.00	50.99	106	0.95	30.70
129	85.00	51.20	116	0.95	30.64
139	85.00	51.34	126	0.95	30.60
149	85.00	51.44	136	0.95	30.57
159	85.00	51.51	146	0.95	30.55
169	85.00	51.56	156	0.95	30.54
179	85.00	51.60	166	0.95	30.53
189	85.00	51.62	176	0.95	30.52
199	85.00	51.64	186	0.95	30.52
209	85.00	51.65	196	0.95	30.51
219	85.00	51.66	206	0.95	30.51

Вариант 22.

Контур управления уровнем воды в барабане котла

Гпв, т/ч – расход питательной воды (управляющее воздействие)

Гт, м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 25 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 500 об/мин

Время, с	Гпв, т/ч	Н, мм	Время, с	Гт, м ³ /ч	Н, мм
0	61.00	39.00	0	92.00	30.00
2	61.00	39.00	2	92.00	30.00
4	61.00	39.00	4	92.00	30.00
6	61.00	39.00	6	92.00	30.00
8	61.00	39.00	8	107.00	30.00
10	61.00	39.00	10	107.00	30.00
12	78.00	39.00	12	107.00	30.00
14	78.00	39.00	14	107.00	30.00
16	78.00	39.00	16	107.00	30.00
18	78.00	40.17	18	107.00	29.99
20	78.00	41.34	20	107.00	29.98
22	78.00	42.52	22	107.00	29.98
24	78.00	43.69	24	107.00	29.97
26	78.00	44.86	26	107.00	29.96
28	78.00	46.03	28	107.00	29.96
30	78.00	47.21	30	107.00	29.95
32	78.00	48.38	32	107.00	29.95
34	78.00	49.55	34	107.00	29.94
36	78.00	50.72	36	107.00	29.93
38	78.00	51.90	38	107.00	29.93
40	78.00	53.07	40	107.00	29.92
42	78.00	54.24	42	107.00	29.91
44	78.00	55.41	44	107.00	29.91
46	78.00	56.59	46	107.00	29.90
48	78.00	57.76	48	107.00	29.89
50	78.00	58.93	50	107.00	29.89
52	78.00	60.10	52	107.00	29.88
54	78.00	61.28	54	107.00	29.87
56	78.00	62.45	56	107.00	29.87
58	78.00	63.62	58	107.00	29.86
60	78.00	64.79	60	107.00	29.86

Вариант 23.**Контур давление пара за барабаном**

G_T , т/ч – расход топлива (управляющее воздействие)

G_P , т/ч – расход пара (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 10 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 3000 об/мин

Время, с	G_T , т/ч	P_P , МПа	Время, с	G_P , т/ч	P_P , МПа
0	2.00	3.50	0	3.25	3.00
10	2.00	3.50	5	3.25	3.00
15	2.00	3.50	10	3.25	3.00
16	2.00	3.50	15	3.75	3.00
18	2.00	3.50	20	3.75	3.00
20	2.00	3.50	25	3.75	3.00
25	2.00	3.50	30	3.75	3.00
26	2.20	3.50	35	3.75	3.00
28	2.20	3.50	36	3.75	3.00
30	2.20	3.50	40	3.75	3.00
32	2.20	3.50	45	3.75	3.00
34	2.20	3.50	50	3.75	3.00
36	2.20	3.50	55	3.75	2.99
38	2.20	3.50	60	3.75	2.99
40	2.20	3.51	65	3.75	2.98
42	2.20	3.52	75	3.75	2.97
44	2.20	3.53	85	3.75	2.96
54	2.20	3.59	95	3.75	2.96
64	2.20	3.63	105	3.75	2.95
74	2.20	3.65	115	3.75	2.94
84	2.20	3.67	135	3.75	2.93
94	2.20	3.69	155	3.75	2.93
114	2.20	3.70	175	3.75	2.92
134	2.20	3.71	195	3.75	2.92
154	2.20	3.72	215	3.75	2.91
174	2.20	3.72	235	3.75	2.91
194	2.20	3.72	265	3.75	2.91
214	2.20	3.72	295	3.75	2.90
234	2.20	3.72	325	3.75	2.90
254	2.20	3.72	355	3.75	2.90
274	2.20	3.72	385	3.75	2.90

Вариант 24.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины с использованием направляющего аппарата

$G_{пв}$, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

$P_{т}$, МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 25 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 500 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, %	$P_{вт(р)}$, Па	Время, с	$P_{т}$, МПа	$P_{вт(р)}$, Па
0	60.00	42.00	0	0.83	33.00
10	60.00	42.00	5	0.83	33.00
20	60.00	42.00	10	0.83	33.00
30	60.00	42.00	15	0.83	33.00
31	85.00	42.00	20	0.95	33.00
33	85.00	42.00	21	0.95	33.00
35	85.00	42.00	22	0.95	33.00
37	85.00	42.00	24	0.95	33.00
39	85.00	42.00	26	0.95	33.00
41	85.00	42.00	28	0.95	33.00
43	85.00	42.00	30	0.95	33.00
45	85.00	42.56	32	0.95	33.00
47	85.00	43.09	34	0.95	32.97
49	85.00	43.59	36	0.95	32.92
59	85.00	45.62	46	0.95	32.70
69	85.00	47.07	56	0.95	32.54
79	85.00	48.11	66	0.95	32.42
89	85.00	48.86	76	0.95	32.34
99	85.00	49.40	86	0.95	32.28
109	85.00	49.78	96	0.95	32.24
119	85.00	50.06	106	0.95	32.21
129	85.00	50.25	116	0.95	32.19
139	85.00	50.39	126	0.95	32.17
149	85.00	50.49	136	0.95	32.16
159	85.00	50.57	146	0.95	32.16
169	85.00	50.62	156	0.95	32.15
179	85.00	50.66	166	0.95	32.15
189	85.00	50.68	176	0.95	32.14
199	85.00	50.70	186	0.95	32.14
209	85.00	50.72	196	0.95	32.14
219	85.00	50.73	206	0.95	32.14

Вариант 25.

Контур регулирования температуры пара

$l_{дз}$, % – степень открытия дроссельной поворотной заслонки на трубопроводе питательной воды в пароохладитель (управляющее воздействие)

V_T , м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 63 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 150 об/мин

Время, с	$l_{дз}$, %	$\Theta_{пп}$, °C	Время, с	V_T , м ³ /ч	$\Theta_{пп}$, °C
0	45.00	355.00	0	3500.00	375.00
5	45.00	355.00	10	3500.00	375.00
10	45.00	355.00	15	3500.00	375.00
15	45.00	355.00	16	3500.00	375.00
20	45.00	355.00	18	3500.00	375.00
21	90.00	355.00	20	3500.00	375.00
23	90.00	355.00	21	4000.00	375.00
25	90.00	355.00	26	4000.00	375.00
27	90.00	355.00	28	4000.00	375.00
29	90.00	355.00	30	4000.00	378.35
31	90.00	355.00	32	4000.00	381.60
33	90.00	355.00	34	4000.00	384.75
35	90.00	355.00	36	4000.00	387.82
37	90.00	355.00	38	4000.00	390.80
39	90.00	354.95	40	4000.00	393.69
41	90.00	354.84	42	4000.00	396.49
51	90.00	354.35	44	4000.00	399.22
61	90.00	353.93	54	4000.00	411.70
71	90.00	353.57	64	4000.00	422.48
81	90.00	353.26	74	4000.00	431.78
91	90.00	352.99	84	4000.00	439.81
101	90.00	352.77	94	4000.00	446.74
111	90.00	352.57	114	4000.00	457.89
131	90.00	352.26	134	4000.00	466.20
151	90.00	352.03	154	4000.00	472.39
171	90.00	351.87	174	4000.00	477.01
191	90.00	351.74	194	4000.00	480.44
221	90.00	351.62	214	4000.00	483.01
251	90.00	351.54	234	4000.00	484.92
281	90.00	351.49	254	4000.00	486.34
321	90.00	351.45	274	4000.00	487.40

Вариант 26.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины изменением числа оборотов электродвигателя

$G_{пв}$, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

$P_{т}$, МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Номинальная частота вращения вала двигателя – 300 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, %	$P_{вт(р)}$, Па	Время, с	$P_{т}$, МПа	$P_{вт(р)}$, Па
0	63.00	35.00	0	0.63	45.00
5	63.00	35.00	5	0.63	45.00
10	63.00	35.00	10	0.63	45.00
15	63.00	35.00	15	0.63	45.00
20	63.00	35.00	20	0.63	45.00
25	63.00	35.00	25	0.63	45.00
26	78.00	35.00	30	0.63	45.00
28	78.00	35.00	31	0.88	45.00
30	78.00	35.00	32	0.88	45.00
32	78.00	35.00	34	0.88	45.00
34	78.00	35.00	36	0.88	45.00
36	78.00	35.17	38	0.88	45.00
38	78.00	35.48	40	0.88	45.00
40	78.00	35.78	42	0.88	44.87
50	78.00	37.03	44	0.88	44.76
60	78.00	37.97	54	0.88	44.26
70	78.00	38.66	64	0.88	43.89
80	78.00	39.18	74	0.88	43.61
90	78.00	39.57	84	0.88	43.40
100	78.00	39.86	94	0.88	43.25
110	78.00	40.07	104	0.88	43.13
120	78.00	40.23	114	0.88	43.05
130	78.00	40.35	124	0.88	42.99
140	78.00	40.44	134	0.88	42.94
150	78.00	40.51	144	0.88	42.90
160	78.00	40.56	154	0.88	42.88
170	78.00	40.59	164	0.88	42.86
180	78.00	40.62	174	0.88	42.84
190	78.00	40.64	184	0.88	42.83
200	78.00	40.66	194	0.88	42.82
210	78.00	40.67	204	0.88	42.82

Вариант 27.

Контур управления уровнем воды в барабане котла

Гпв, т/ч – расход питательной воды (управляющее воздействие)

Гт, м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 10 с

Номинальная частота вращения вала двигателя 3000 об/мин

Время, с	Гпв, т/ч	Н, мм	Время, с	Гт, м ³ /ч	Н, мм
0	68.00	37.00	0	94.00	32.00
2	68.00	37.00	2	94.00	32.00
4	68.00	37.00	4	94.00	32.00
6	68.00	37.00	6	94.00	32.00
8	68.00	37.00	8	94.00	32.00
10	72.00	37.00	10	109.00	32.00
12	72.00	37.00	12	109.00	32.00
14	72.00	37.00	14	109.00	32.00
16	72.00	37.15	16	109.00	32.00
18	72.00	37.44	18	109.00	31.99
20	72.00	37.74	20	109.00	31.99
22	72.00	38.04	22	109.00	31.98
24	72.00	38.33	24	109.00	31.97
26	72.00	38.63	26	109.00	31.97
28	72.00	38.93	28	109.00	31.96
30	72.00	39.22	30	109.00	31.95
32	72.00	39.52	32	109.00	31.95
34	72.00	39.81	34	109.00	31.94
36	72.00	40.11	36	109.00	31.93
38	72.00	40.41	38	109.00	31.93
40	72.00	40.70	40	109.00	31.92
42	72.00	41.00	42	109.00	31.91
44	72.00	41.30	44	109.00	31.91
46	72.00	41.59	46	109.00	31.90
48	72.00	41.89	48	109.00	31.89
50	72.00	42.19	50	109.00	31.89
52	72.00	42.48	52	109.00	31.88
54	72.00	42.78	54	109.00	31.87
56	72.00	43.07	56	109.00	31.87
58	72.00	43.37	58	109.00	31.86
60	72.00	43.67	60	109.00	31.85

Вариант 28.**Контур давление пара за барабаном**

G_T , т/ч – расход топлива (управляющее воздействие)

G_P , т/ч – расход пара (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 12,5 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 1500 об/мин

Время, с	G_T , т/ч	P_P , МПа	Время, с	G_P , т/ч	P_P , МПа
0	2.00	3.50	0	3.25	3.00
10	2.00	3.50	5	3.25	3.00
15	2.00	3.50	10	3.25	3.00
16	2.00	3.50	15	3.75	3.00
18	2.00	3.50	20	3.75	3.00
20	2.00	3.50	25	3.75	3.00
25	2.00	3.50	30	3.75	3.00
26	2.20	3.50	35	3.75	3.00
28	2.20	3.50	36	3.75	3.00
30	2.20	3.50	40	3.75	3.00
32	2.20	3.50	45	3.75	3.00
34	2.20	3.50	50	3.75	2.99
36	2.20	3.50	55	3.75	2.99
38	2.20	3.50	60	3.75	2.98
40	2.20	3.50	65	3.75	2.98
42	2.20	3.50	75	3.75	2.97
44	2.20	3.51	85	3.75	2.96
54	2.20	3.55	95	3.75	2.96
64	2.20	3.57	105	3.75	2.95
74	2.20	3.59	115	3.75	2.95
84	2.20	3.60	135	3.75	2.94
94	2.20	3.61	155	3.75	2.93
114	2.20	3.61	175	3.75	2.93
134	2.20	3.62	195	3.75	2.92
154	2.20	3.62	215	3.75	2.92
174	2.20	3.62	235	3.75	2.92
194	2.20	3.62	265	3.75	2.92
214	2.20	3.62	295	3.75	2.92
234	2.20	3.62	325	3.75	2.91
254	2.20	3.62	355	3.75	2.91
274	2.20	3.62	385	3.75	2.91

Вариант 29.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины с использованием направляющего аппарата

$G_{пв}$, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

P_t , МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 30 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 375 об/мин

Время, с	$G_{пв}$, %	$P_{вт(р)}$, Па	Время, с	P_t , МПа	$P_{вт(р)}$, Па
0	63.00	42.00	0	0.63	33.00
10	63.00	42.00	5	0.63	33.00
20	63.00	42.00	10	0.63	33.00
30	63.00	42.00	15	0.63	33.00
31	85.00	42.00	20	0.95	33.00
33	85.00	42.00	21	0.95	33.00
35	85.00	42.00	22	0.95	33.00
37	85.00	42.00	24	0.95	33.00
39	85.00	42.00	26	0.95	33.00
41	85.00	42.00	28	0.95	33.00
43	85.00	42.00	30	0.95	33.00
45	85.00	42.00	32	0.95	33.00
47	85.00	42.67	34	0.95	33.00
49	85.00	43.29	36	0.95	32.91
59	85.00	45.81	46	0.95	32.19
69	85.00	47.57	56	0.95	31.68
79	85.00	48.81	66	0.95	31.33
89	85.00	49.67	76	0.95	31.08
99	85.00	50.27	86	0.95	30.91
109	85.00	50.70	96	0.95	30.79
119	85.00	50.99	106	0.95	30.70
129	85.00	51.20	116	0.95	30.64
139	85.00	51.34	126	0.95	30.60
149	85.00	51.44	136	0.95	30.57
159	85.00	51.51	146	0.95	30.55
169	85.00	51.56	156	0.95	30.54
179	85.00	51.60	166	0.95	30.53
189	85.00	51.62	176	0.95	30.52
199	85.00	51.64	186	0.95	30.52
209	85.00	51.65	196	0.95	30.51
219	85.00	51.66	206	0.95	30.51

Вариант 30.

Контур регулирования температуры пара

$l_{дз}$, % – степень открытия дроссельной поворотной заслонки на трубопроводе питательной воды в парохладитель (управляющее воздействие)

V_T , м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 160 с

Номинальная частота вращения вала двигателя ИМ – 750об/мин

Время, с	$l_{дз}$, %	$\Theta_{пп}$, °C	Время, с	V_T , м ³ /ч	$\Theta_{пп}$, °C
0	30.00	370.00	0	3500.00	400.00
5	30.00	370.00	10	3500.00	400.00
10	30.00	370.00	15	3500.00	400.00
15	30.00	370.00	16	3500.00	400.00
16	65.00	370.00	18	3500.00	400.00
18	65.00	370.00	20	3500.00	400.00
20	65.00	370.00	25	3500.00	400.00
22	65.00	370.00	26	3850.00	400.00
24	65.00	370.00	28	3850.00	400.00
26	65.00	370.00	30	3850.00	400.00
28	65.00	370.00	32	3850.00	400.00
30	65.00	370.00	34	3850.00	400.00
32	65.00	370.00	36	3850.00	400.00
34	65.00	369.96	38	3850.00	402.02
36	65.00	369.92	40	3850.00	405.97
46	65.00	369.74	50	3850.00	423.86
56	65.00	369.59	60	3850.00	439.01
66	65.00	369.45	70	3850.00	451.82
76	65.00	369.33	80	3850.00	462.67
86	65.00	369.23	90	3850.00	471.86
106	65.00	369.06	100	3850.00	479.63
126	65.00	368.93	110	3850.00	486.21
146	65.00	368.83	120	3850.00	491.78
166	65.00	368.75	130	3850.00	496.50
186	65.00	368.69	140	3850.00	500.49
206	65.00	368.65	150	3850.00	503.87
226	65.00	368.61	160	3850.00	506.73
256	65.00	368.58	190	3850.00	512.93
286	65.00	368.55	220	3850.00	516.70
326	65.00	368.53	250	3850.00	518.98
366	65.00	368.52	280	3850.00	520.37

Вариант 31.

Контур управления разрежением в верхней части топки Регулирование производительности тягодутьевой машины изменением числа оборотов электродвигателя

Гпв, % – расход воздуха (управляющее воздействие)

P_T , МПа – давление топлива в топку (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 63 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 150 об/мин

Время, с	Гпв, %	$P_{VT(p)}$, Па	Время, с	P_T , МПа	$P_{VT(p)}$, Па
0	67.00	37.00	0	0.69	42.00
5	67.00	37.00	5	0.69	42.00
10	67.00	37.00	10	0.69	42.00
15	67.00	37.00	15	0.69	42.00
20	67.00	37.00	20	0.69	42.00
25	67.00	37.00	25	0.69	42.00
26	80.00	37.00	30	0.69	42.00
28	80.00	37.00	31	0.98	42.00
30	80.00	37.00	32	0.98	42.00
32	80.00	37.00	34	0.98	42.00
34	80.00	37.19	36	0.98	42.00
36	80.00	37.55	38	0.98	42.00
38	80.00	37.89	40	0.98	41.84
40	80.00	38.21	42	0.98	41.68
50	80.00	39.48	44	0.98	41.54
60	80.00	40.38	54	0.98	40.96
70	80.00	41.00	64	0.98	40.56
80	80.00	41.44	74	0.98	40.28
90	80.00	41.75	84	0.98	40.08
100	80.00	41.96	94	0.98	39.94
110	80.00	42.11	104	0.98	39.85
120	80.00	42.22	114	0.98	39.78
130	80.00	42.29	124	0.98	39.73
140	80.00	42.34	134	0.98	39.70
150	80.00	42.38	144	0.98	39.68
160	80.00	42.40	154	0.98	39.66
170	80.00	42.42	164	0.98	39.65
180	80.00	42.43	174	0.98	39.64
190	80.00	42.44	184	0.98	39.63
200	80.00	42.45	194	0.98	39.63
210	80.00	42.45	204	0.98	39.63

Вариант 32.

Контур управления уровнем воды в барабане котла

Гпв, т/ч – расход питательной воды (управляющее воздействие)

Гт, м³/ч – расход топлива (возмущающее воздействие)

Время полного хода выходного вала – 12,5 с

Номинальная частота вращения вала двигателя – 1500 об/мин

Время, с	Гпв, т/ч	Н, мм	Время, с	Гт, м ³ /ч	Н, мм
0	62.00	31.00	0	100.00	30.00
2	62.00	31.00	2	100.00	30.00
4	62.00	31.00	4	100.00	30.00
6	62.00	31.00	6	100.00	30.00
8	62.00	31.00	8	100.00	30.00
10	75.00	31.00	10	114.00	30.00
12	75.00	31.00	12	114.00	30.00
14	75.00	31.00	14	114.00	30.00
16	75.00	31.00	16	114.00	30.00
18	75.00	31.00	18	114.00	29.99
20	75.00	31.57	20	114.00	29.99
22	75.00	32.70	22	114.00	29.98
24	75.00	33.83	24	114.00	29.98
26	75.00	34.96	26	114.00	29.97
28	75.00	36.09	28	114.00	29.96
30	75.00	37.22	30	114.00	29.96
32	75.00	38.35	32	114.00	29.95
34	75.00	39.48	34	114.00	29.94
36	75.00	40.61	36	114.00	29.94
38	75.00	41.74	38	114.00	29.93
40	75.00	42.87	40	114.00	29.93
42	75.00	44.00	42	114.00	29.92
44	75.00	45.13	44	114.00	29.91
46	75.00	46.26	46	114.00	29.91
48	75.00	47.39	48	114.00	29.90
50	75.00	48.52	50	114.00	29.90
52	75.00	49.65	52	114.00	29.89
54	75.00	50.78	54	114.00	29.88
56	75.00	51.91	56	114.00	29.88
58	75.00	53.04	58	114.00	29.87
60	75.00	54.17	60	114.00	29.86

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гурецкий, Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием [Текст] / Х. Гурецкий. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
2. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 1972. – 768 с.
3. Ковалёв, Д. А. Теория автоматического управления [Текст]: учебное пособие / Д. А. Ковалёв, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2019. – 80 с.
4. Ковалёв, Д. А. Теория автоматического управления [Текст]: практикум / Д. А. Ковалёв, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2022. – 131 с.
5. Управление и инноватика в теплоэнергетике [Текст]: учебное пособие / А. В. Андрюшин, В. Р. Сабанин, Н. И. Смирнов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 392 с.
6. Плетнев, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике [Электронный ресурс]: учебник для студентов вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016.
7. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами [Текст]: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
8. Суриков, В. Н. Автоматизация технологических процессов и производств [Текст]: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию / В. Н. Суриков, Г. П. Буйлов. – ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2017. – 116 с.
9. Сайт ГК Теплоприбор. Механизмы исполнительные МЭО-250/63, 25, 160 и МЭОФ [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://теплоприбор.рф/catalog/mechanizm-ispolnitelnyj-meo-250-63-25-160-meof/>
10. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования [Текст] / Ф. Фрер, Ф. Орттенбургер. – Пер. с нем. – М.: Энергия, 1973. – 192 с.
11. Роддатис, К. Ф. Котельные установки [Текст]: учеб. пособие для студентов неэнергетических специальностей вузов. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
12. Львовский, С. М. Набор и верстка в пакете LaTeX [Текст]. – М.: Космос-информ, 1995.

Учебное издание

**Ковалёв Дмитрий Александрович
Шаряков Владимир Анатольевич
Шарякова Ольга Леонидовна**

Моделирование объектов управления

*Учебно-методическое пособие
для выполнения курсовой работы*

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 04.04.2023 г. Рег. № 5110/22

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.