

**Д.А. КОВАЛЁВ, В.А. ШАРЯКОВ,
О.Л. ШАРЯКОВА, И.А. ТРУХАНОВА**

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Учебно-методическое пособие
по курсовому проектированию**

Санкт–Петербург
2020

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, И.А. ТРУХАНОВА**

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Учебно-методическое пособие
по курсовому проектированию**

Санкт–Петербург
2020

УДК 62-5(075)
ББК 32.965я7
Т338

Ковалев Д.А., Шаряков В.А., Шарякова О.Л., Труханова И.А. Теория автоматического управления: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2020. – 65 с.

Учебно-методическое пособие содержит основной теоретический материал по дисциплине «Теория автоматического управления». Рассмотрены вопросы построения, математического описания, анализа и синтеза линейных систем.

Пособие содержит задания на курсовую работу, рекомендации по выполнению отдельных разделов работы и необходимый справочный материал.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» для выполнения курсового проекта по дисциплине «Теория автоматического управления» (ТАУ).

Рецензенты:

зав. кафедрой «Автоматизация процессов химической промышленности» ФГБОУВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технологический университет)», д-р. техн. наук, профессор Русинов Л.А.;

профессор кафедры ИИТСУ ВШТЭ СПбГУПТД, д-р техн. наук, профессор Кондрашкова Г.А.

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Института энергетики и автоматизации Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД (протокол № 2 от 28.09.2020).

Утверждено к изданию методической комиссией Института энергетики и автоматизации Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД (протокол № 2 от 29.10.2020).

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебно-методического пособия.

© Высшая школа технологии и энергетики
СПбГУПТД, 2020

© Ковалёв Д.А., Шаряков В.А., Шарякова О.Л.,
Труханова И.А., 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
1. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	6
2. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	8
2.1. Описание САР и её функциональная схема	8
2.2. Дифференциальные уравнения, описывающие работу системы.....	8
2.3. Функциональная схема САР.....	9
2.4. Передаточные функций объекта управления и элементов системы	11
2.5. Структурная схема исходной САР	15
2.6. Проведение исследования исходной САР на устойчивость	15
2.7. Построение графиков переходного процесса	22
2.8. Определение временных показателей исходной САР	30
2.9. Синтез САР с использованием типовых регуляторов.....	30
2.10. Исследование синтезированной САР на устойчивость с регуляторами П–; ПИ–; ПИД– типа.....	34
2.11. Построение графиков переходного процесса	37
2.12. Определение временных показатели синтезированной САР	39
2.13. Сравнение частотных показателей качества исходной САР и синтезированной САР.....	40
2.14. Сравнение временных показателей качества исходной САР и синтезированной САР.....	40
2.15. Выводы по работе	40
3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	41
3.1. Система автоматического регулирования давления пара перед турбиной	41
3.2. Система автоматического регулирования температуры в печи	43
3.3. Система автоматического регулирования разряжения в топке барabanного котла.....	45
3.4. Система автоматического регулирования температуры воздуха, подаваемого в топку котла	48
3.5. Система автоматического регулирования температуры воздуха, подаваемого в зерносушилку	50

3.6. Система автоматического регулирования температуры перегретого пара	52
3.7. Система автоматического регулирования давления в ресивере	55
3.8. Система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины	57
3.9. Система автоматического регулирования угловой скорости электродвигателя постоянного тока	59
3.10. Система автоматического регулирования глубины пахоты	61
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	65

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проектирование является важным этапом при создании систем автоматического управления (САУ). Качество проектирования в значительной степени определяет качество работы САУ. Поэтому основной задачей курсовой работы является развитие навыков самостоятельного творческого поиска при создании современных САУ электроприводами (ЭП) и ознакомление с основными этапами проектирования подобных систем.

Курсовая работа содержит расчетно–пояснительную записку на листах формата А4 (297х210 мм) и графический материал.

В тексте расчетно–пояснительной записки должны быть ссылки на литературу, из которой заимствованы методы расчета, формулы и т.д.

1. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Тематика курсовых проектов ориентируется на разработку систем автоматического управления.

Курсовой проект включает следующие разделы:

1. Задание
 - 1.1. Общая характеристика разрабатываемой САР.
 - 1.2. Принципиальная схема САР.
 - 1.3. Параметры САР.
 - 1.4. Описание принципа работы.
2. Дифференциальные уравнения, описывающие работу системы.
3. Функциональная схема САР.
4. Передаточные функций объекта управления и элементов системы.
5. Структурная схема исходной САР.
6. Исследование исходной САР на устойчивость.
 - 6.1. Корневой критерий устойчивости.
 - 6.2. Критерий устойчивости Найквиста.
 - 6.3. Частотные показатели качества синтезированной САР.
7. Построение графиков переходного процесса.
 - 7.1. По управляющему воздействию.
 - 7.2. По возмущающему воздействию.
8. Временные показатели синтезированной САР.
9. Синтез САР с использованием типовых регуляторов.
10. Исследование синтезированной САР на устойчивость с регуляторами П–; ПИ–; ПИД– типа.
 - 10.1. Корневой критерий устойчивости.
 - 10.2. Критерий устойчивости Найквиста.
 - 10.3. Частотные показатели качества синтезированной САР.
11. Построение графиков переходного процесса.
 - 11.1. По управляющему воздействию.

- 11.2. По возмущающему воздействию.
- 11.3. Общий график переходного процесса.
- 12. Временные показатели качества синтезированной САР.
- 13. Сравнение частотных показателей качества исходной САР и синтезированной САР.
- 14. Сравнение временных показателей качества исходной САР и синтезированной САР.
- 15. Выводы по работе.

2. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

2.1. Описание САР и её функциональная схема

Принципиальная схема автоматической системы регулирования (стабилизации) скорости теплового двигателя [5] представлена на рис.1.

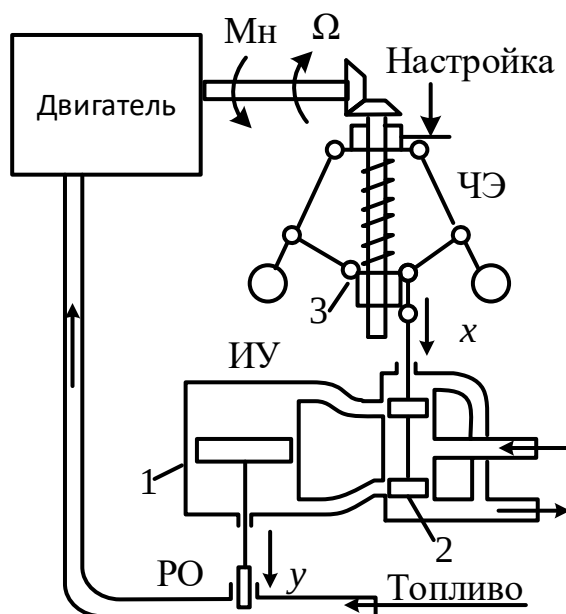


Рис. 1. Упрощённая принципиальная схема САР

Чувствительным элементом (ЧЭ) является центробежный измеритель скорости (ЦИС). Исполнительным устройством (ИУ) является гидравлический двигатель, состоящий из золотника 2, связанного с муфтой ЦИС 3, и силового поршня 1, связанного с заслонкой, или регулирующим органом (РО).

2.2. Дифференциальные уравнения, описывающие работу системы

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР описываются следующими дифференциальными и алгебраическими уравнениями.

Двигатель (объект):

$$T_0 \cdot \Omega(t) \frac{d}{dt} + \Omega(t) = k_0 \cdot y(t) - k_1 \cdot M(t), \quad (1)$$

где y – перемещение заслонки; M – момент нагрузки ($M = 30$ Нм); T_0 – постоянная времени ($T_0 = 1,2$ с); k_0 – передаточный коэффициент по управляющему воздействию ($k_0 = 30$); k_1 – передаточный коэффициент по возмущающему воздействию ($k_1 = 1,64$).

Центробежный измеритель скорости:

$$T_2^2 \cdot \frac{d^2 \cdot x(t)}{dt^2} + T_1 \cdot \frac{d \cdot x(t)}{dt} + x(t) = k_2 \cdot \Delta\Omega(t), \quad (2)$$

где x – перемещение муфты и золотника; T_1, T_2 – постоянные времени ($T_1 = 0,5$, с; $T_2 = 0,05$, с); k_2 – передаточный коэффициент ($k_2 = 2$).

Гидравлический двигатель

$$\frac{d}{dt} \cdot y(t) = k_3 \cdot x(t), \quad (3)$$

где k_3 – передаточный коэффициент ($k_3 = 0.89$).

$$\Delta\Omega = \Omega_3 - \Omega, \quad (4)$$

где $\Delta\Omega$ – сигнал рассогласования; Ω_3 – заданная угловая скорость.

2.3. Функциональная схема САР

Из анализа принципиальной схемы (рис. 1) и приведённого описания САР следует, что объектом управления является двигатель, который можно представить в виде функциональной схемы, показанной на рис. 2.

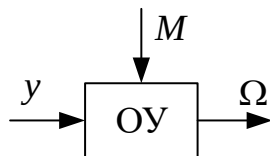


Рис. 2. Двигатель как объект управления,
где Ω – регулируемая величина; y – управляющее воздействие;
 M – возмущающее воздействие.

Из физического принципа работы синхронного генератора и анализа уравнения (1) следует, что при увеличении перемещения задвижки u к двигателю будет поступать больше топлива и его угловая скорость Ω будет увеличиваться. Влияние возмущения (момента нагрузки M) приводит к обратному эффекту: при росте момента нагрузки M угловая скорость Ω , а при снижении тока момента нагрузки M угловая скорость Ω увеличивается.

В рассматриваемой САР (рис. 1) гидравлический двигатель выполняет роль исполнительного органа (элемента), который можно представить в виде функционального элемента, показанного на рис. 3.

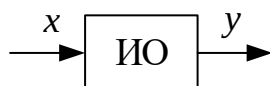


Рис. 3. Гидравлический двигатель как исполнительный орган

Центробежный измеритель скорости в рассматриваемой САР (рис. 1) выполняет роль преобразователя сигнала рассогласования $\Delta\Omega$ в перемещение муфты и золотника. Как функциональный элемент его можно изобразить в виде, приведённом на рис. 4.

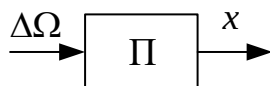


Рис. 4. Функциональная схема центробежного измерителя скорости

В рассматриваемом примере будет использоваться единичная обратная связь.

Задание скорости производится поджатием пружины ЦИС, а функциональную схему определения сигнала рассогласования можно представить в следующем виде (рис. 5). В разной литературе используются два способа обозначения устройств определения сигналов рассогласования (сумматоров), отличающихся обозначением действия. На рис. 5а заштрихованный сектор показывает, что входная величина имеет знак «минус», а на рис. 5б знак «минус» отображается на схеме и сектора не штрихуются.



Рис. 5. Функциональная схема сравнивающего органа

Объединяя элементарные функциональные схемы (рис. 2 – рис. 5) в соответствии с принципиальной схемой (рис. 1), функциональная схема САР примет вид, показанный на рис. 6.

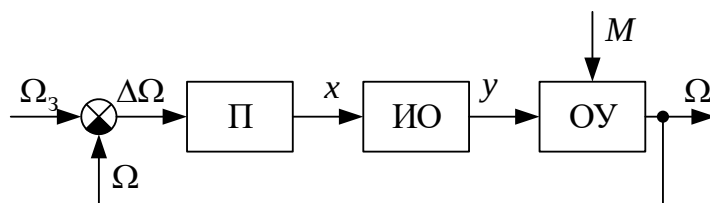


Рис. 6. Функциональная схема САР,

где ОУ – объект управления; ИО – исполнительный орган;

Π – преобразователь сигналов.

2.4. Передаточные функций объекта управления и элементов системы

Объект регулирования (рис. 2) имеет две входных величины и одну выходную. Следовательно, он будет иметь передаточные функции по каждому каналу: по регулирующему $W_p(p)$ и по возмущающему воздействиям $W_B(p)$.

Передаточной функцией звена (системы) от данного входа $u(t)$ к выходу $y(t)$ называется отношение изображений по Лапласу выходной переменной к входной переменной при нулевых начальных условиях и равенстве нулю прочих входов:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{U(p)}. \quad (5)$$

Передаточную функцию объекта регулирования по регулирующему воздействию $W_p(p)$, руководствуясь принципом суперпозиции, определим на основе уравнения (1) при $M = 0$.

$$T_0 \cdot \Omega \frac{d}{dt} + \Omega(t) = k_0 \cdot y(t), \quad (6)$$

преобразовав его по Лапласу как

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} &\Rightarrow p \\ T_0 \cdot p \cdot \Omega + \Omega(p) &= k_0 \cdot y(p) \\ \Downarrow \{ \text{выносим } \Omega(p) \text{ за скобку} \} \\ (T_0 p + 1) \cdot \Omega(p) &= k_0 \cdot y(p). \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что изображение входного воздействия по Лапласу – $y(p)$, а изображение выходной переменной – $\Omega(p)$, передаточная функция объекта управления будет:

$$\begin{aligned} (T_0 p + 1) \cdot \Omega(p) &= k_0 \cdot y(p) \Rightarrow \Omega(p) = \frac{k_0 \cdot y(p)}{(T_0 p + 1)} \\ \Downarrow \\ W_p(p) &= \frac{\Omega(p)}{y(p)} = \frac{k_0}{(T_0 p + 1)} \end{aligned} \quad (8)$$

Аналогично найдем передаточную функцию объекта регулирования по возмущающему воздействию $W_B(p)$; приняв $\Omega=0$:

$$\begin{aligned}
T_0 \cdot \Omega(t) \frac{d}{dt} + \Omega(t) &= -k_1 \cdot M(t) \\
\Downarrow \left\{ \frac{d}{dt} \rightarrow p \right\} \\
T_0 \cdot \Omega(p) \cdot p + \Omega(p) &= -k_1 \cdot M(p) \\
\Downarrow \{ \text{выносим } \Omega(p) \text{ за скобку} \} \\
(T_0 \cdot p + 1) \cdot \Omega(p) &= -k_1 \cdot M(p) \\
\Downarrow \{ \text{определяем } \Omega(p) \} \\
\Omega(p) = \frac{-k_1 \cdot M(p)}{(T_0 \cdot p + 1)} &\Rightarrow W_B(p) = \frac{\Omega(p)}{M(p)} = \frac{-k_1}{(T_0 \cdot p + 1)},
\end{aligned} \tag{9}$$

где $M(p)$ – изображение по Лапласу возмущающего воздействия.

С учётом передаточных функций (8), (9) структурную схему объекта регулирования можно представить в виде, показанном на рис. 7.

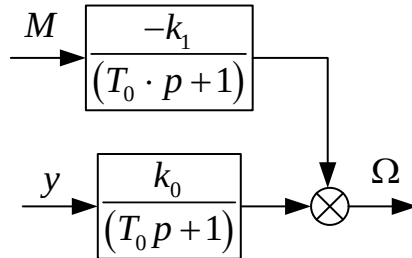


Рис. 7. Структурная схема объекта регулирования

Передаточная функция центробежного измерителя скорости будет:

$$\begin{aligned}
T_2^2 \cdot \frac{d^2 \cdot x(t)}{dt^2} + T_1 \cdot \frac{d \cdot x(t)}{dt} + x(t) &= k_2 \cdot \Delta\Omega(t) \\
\Downarrow \left\{ \frac{d}{dt} \rightarrow p \right\} \\
T_2^2 \cdot p^2 \cdot x(p) + T_1 \cdot p \cdot x(p) + x(p) &= k_2 \cdot \Delta\Omega(p) \\
\Downarrow \{ \text{выносим } x(p) \text{ за скобку} \} \\
(T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1) \cdot x(p) &= k_2 \cdot \Delta\Omega(p) \\
\Downarrow \{ \text{определяем } x(p) \}
\end{aligned} \tag{10}$$

$$x(p) = \frac{k_2 \cdot \Delta\Omega(p)}{(T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1)} \Rightarrow W_{\Pi}(p) = \frac{x(p)}{\Delta\Omega(p)} = \frac{k_2}{(T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1)}$$

С учётом передаточной функции (10), структурную схему преобразователя сигналов можно представить в виде, показанном на рис. 8.

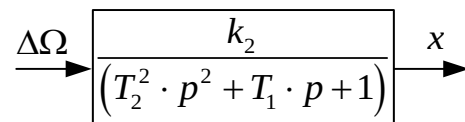


Рис. 8. Структурная схема центробежного измерителя скорости

Передаточная функция гидравлического двигателя будет:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \cdot y(t) &= k_3 \cdot x(t) \\ \Downarrow \left\{ \frac{d}{dt} \rightarrow p \right\} \\ p \cdot y(p) &= k_3 \cdot x(p) \\ \Downarrow \{ \text{определяем } y(p) \} \\ y(p) &= \frac{k_3 \cdot x(p)}{p} \Rightarrow W_{\text{ио}}(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{k_3}{p} \end{aligned} \quad (11)$$

С учётом передаточной функции (11), структурную схему исполнительного органа можно представить в виде, показанном на 9.

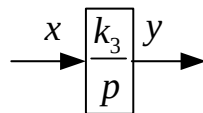


Рис. 9. Структурная схема центробежного измерителя скорости

На основе функциональной схемы САР (рис. 6) и найденных передаточных функций, путём замены объекта регулирования в этой схеме его

структурной схемой (рис. 7) и замещением функциональных обозначений элементов соответствующими им передаточными функциями (10) и (11), составим структурную схему системы (рис. 10).

2.5. Структурная схема исходной САР

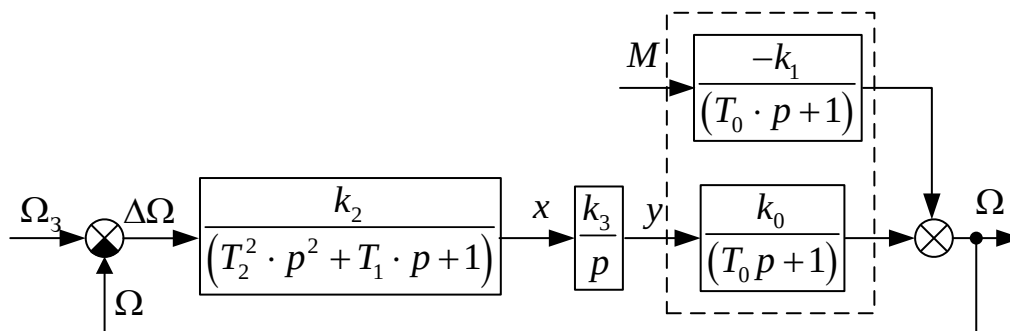


Рис. 10. Структурная схема САР напряжения синхронного генератора

Структурная схема САР (рис. 10) является математической моделью, на основе которой выполняется компьютерное моделирование системы.

2.6. Проведение исследования исходной САР на устойчивость

Проявлением, по которому можно судить об устойчивости или неустойчивости системы, является характер изменения ее сигналов во времени, например управляемой величины $x(t)$. Если управляемая величина $x(t)$ после прекращения изменения, например задающего воздействия $x_3(t)$, становится с течением времени постоянной, то система ведет себя устойчиво. Если же управляемая величина $x(t)$ — возрастает, то система ведет себя неустойчиво (рис. 11) [4].

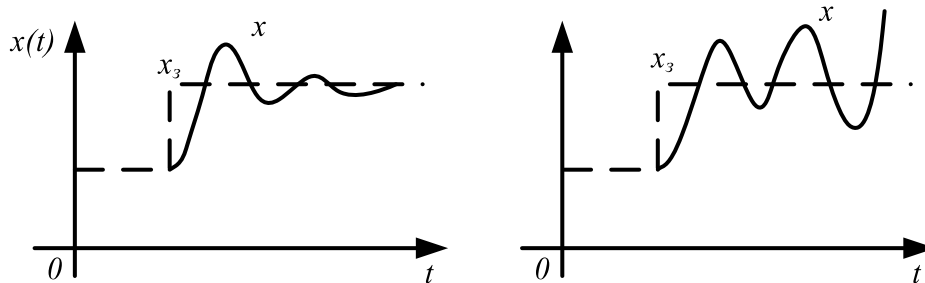


Рис. 11. Графики изменения сигналов АСУ во времени;

a – устойчивая САР; *б* – неустойчивая САР

2.6.1. Корневой критерий устойчивости

Для устойчивости линейной САР необходимо и достаточно, чтобы действительные части всех корней характеристического уравнения системы были отрицательными (или чтобы все корни характеристического уравнения системы располагались в левой части комплексной плоскости) [1].

Для определения устойчивости полученной системы необходимо:

Определить передаточную функцию разомкнутой системы и замкнутой по управлению:

$$W_{\text{РАЗ}}(p) = \frac{2}{0,05^2 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,89}{p} \cdot \frac{30}{1,2 \cdot p + 1} ; \quad (12)$$

$$W_{\text{ЗАМ}}(p) = \frac{\frac{2}{0,05^2 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,89}{p} \cdot \frac{30}{1,2 \cdot p + 1}}{1 + \frac{2}{0,05^2 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,89}{p} \cdot \frac{30}{1,2 \cdot p + 1}} . \quad (13)$$

Полученную передаточную функцию замкнутой системы ввести в программу Mathcad (рис. 12).

\frac{\frac{2}{0.05^2 \cdot p^2 + 0.5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0.89}{p} \cdot \frac{30}{1.2p + 1}}{1 + \frac{2}{0.05^2 \cdot p^2 + 0.5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0.89}{p} \cdot \frac{30}{1.2p + 1}}

Рис. 12. Ввод в программу Mathcad передаточной функции

Как следует из корневого критерия устойчивости: для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического полинома находились в правой полуплоскости. Следовательно, надо найти корни характеристического полинома:

Знаменатель передаточной функции замкнутой системы (13) (рис. 12) приравниваем нулю, выделяем переменную p и выполняем команду «Символьные операции» / «Переменная» / «Решить» (рис. 13).

0 = 1 + \frac{2}{0.05^2 \cdot p^2 + 0.5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0.89}{p} \cdot \frac{30}{1.2 \cdot p + 1}

Рис. 13. Команда «Решить»

Результат выполнения команды представлен на рис. 14.

Так как содержатся корни с положительной вещественной частью, то в соответствии с корневым критерием устойчивости можно сделать вывод, что данная система неустойчива.

$$\begin{pmatrix} -5.5517032959179943358 \\ -197.97726236601044588 \\ 1.347816164297553442 + 3.7918726117237791599i \\ 1.347816164297553442 - 3.7918726117237791599i \end{pmatrix}$$

Рис. 14. Результат выполнения команды «Решить»

2.6.2. Критерий устойчивости Найквиста

Данный критерий позволяет судить об устойчивости замкнутой системы по амплитудно–фазовой частотной характеристике или по логарифмическим частотным характеристикам разомкнутой системы [1].

Если логарифмическая частотная характеристика (ЛЧХ) устойчивой разомкнутой системы имеет монотонный характер, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы на частоте среза $\omega_{\text{ср}}$ (т.е. при $L(\omega_{\text{ср}}) = 0$) ЛФХ разомкнутой САУ располагалась выше уровня $-\pi$.

В программе MatLab–Simulink ко входу системы подвести «мышку», нажать правую кнопку и выбрать: «Linear Analysis Points» / Open–loop Input (рис. 15).

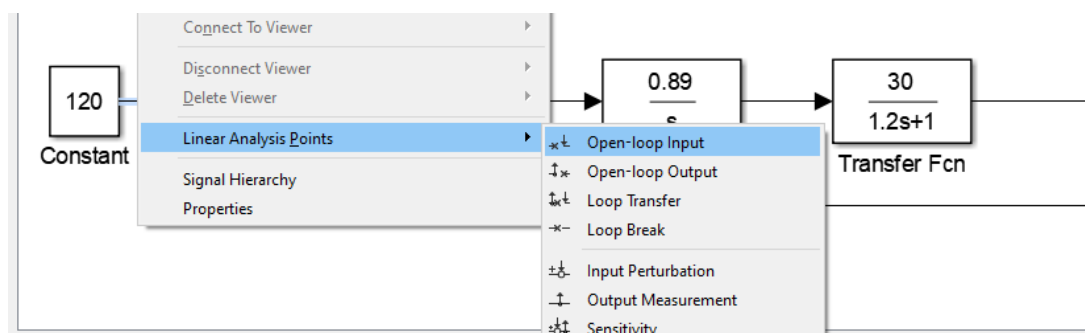


Рис. 15. Задание входной переменной

К выходу системы подвести «мышку», нажать правую кнопку и выбрать: «Linear Analysis Points» / Open-loop Output (рис. 16).

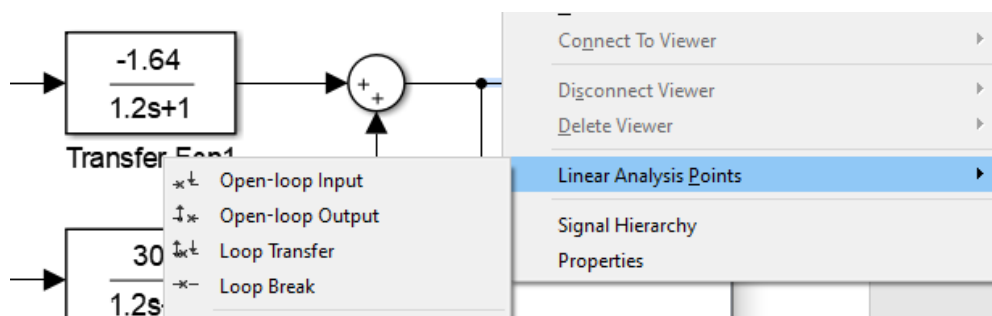


Рис. 16. Задание выходной переменной

Выполнить команду «Analysis» / «ControlDesign» / «LinearAnalysis...» (Рис. 17).

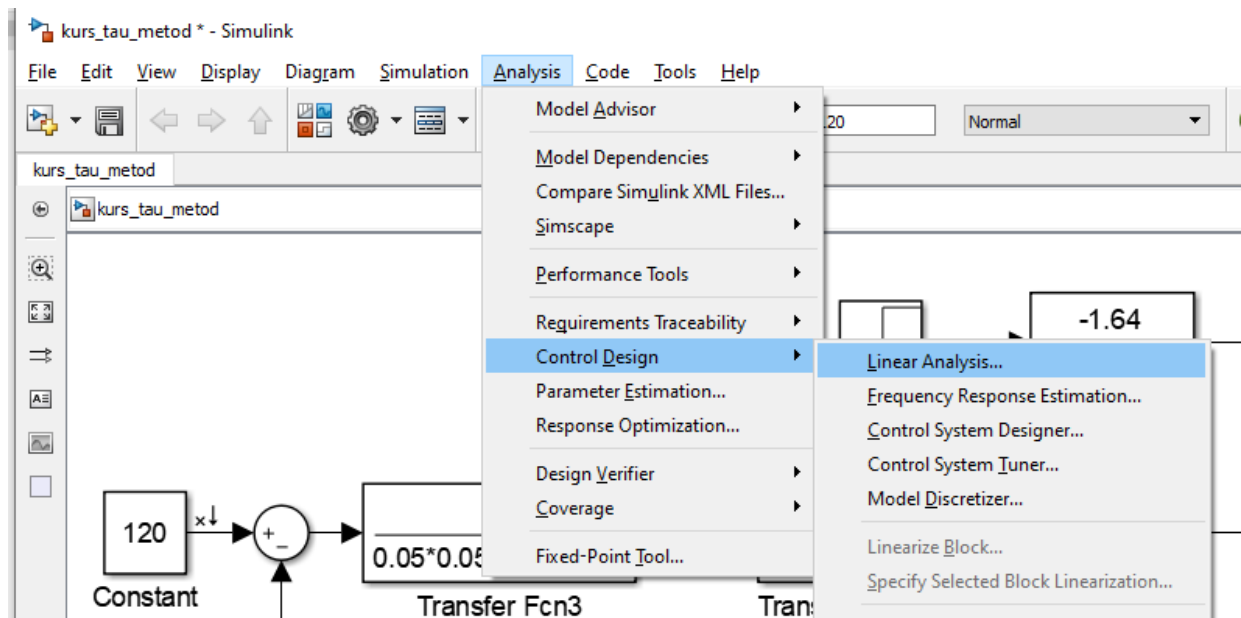


Рис. 17. Команда «Linear Analysis...»

В открывшемся окне «Linear Analysis Tool» выбрать команду «Bode» (построение логарифмических частотных характеристик) (рис. 18)

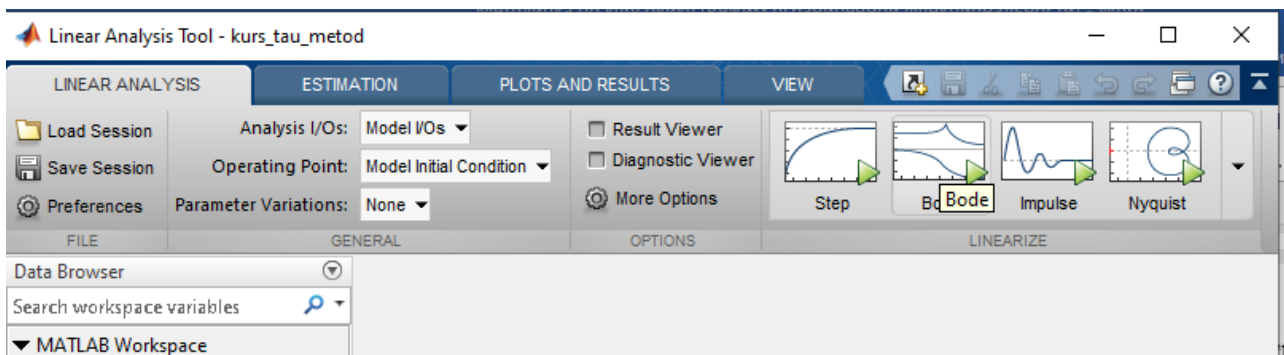


Рис. 18. Окно «Linear Analysis Tool» команда «Bode»

Результат выполнения команды «Bode» показан на рис.19.

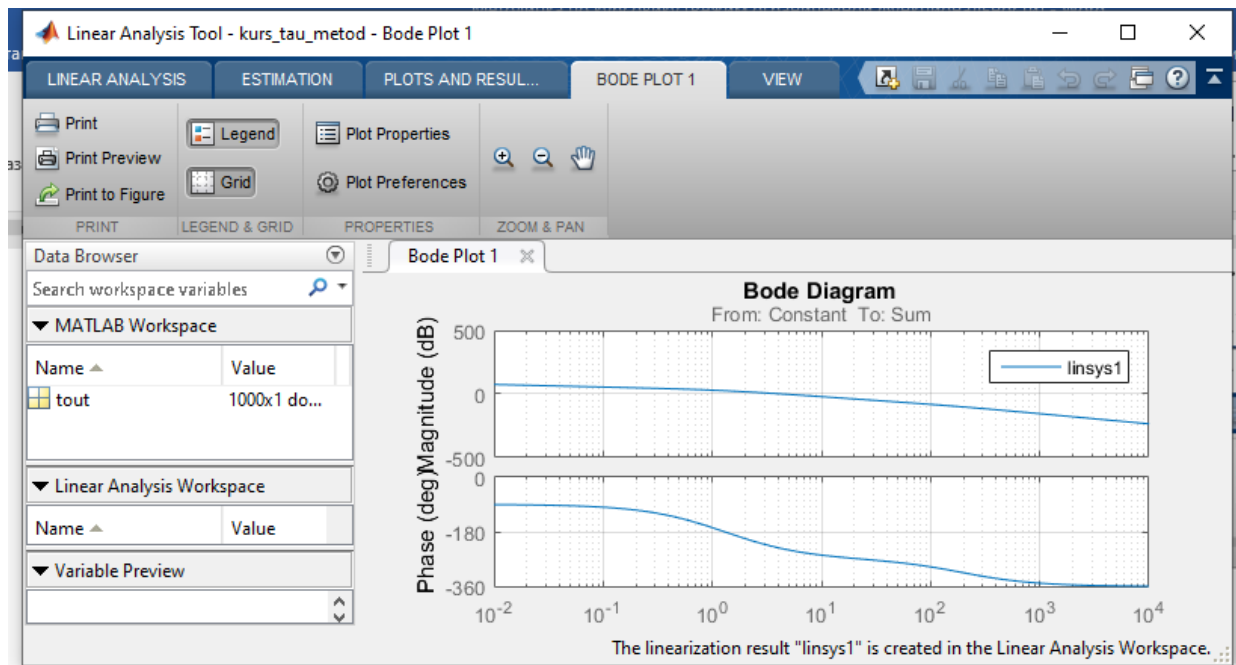


Рис. 19. Результат выполнения команды «Bode» на вкладке
«BODE PLOT 1»

Полученный график можно сохранить, выполнив команду «Print to Figure» (рис. 20)

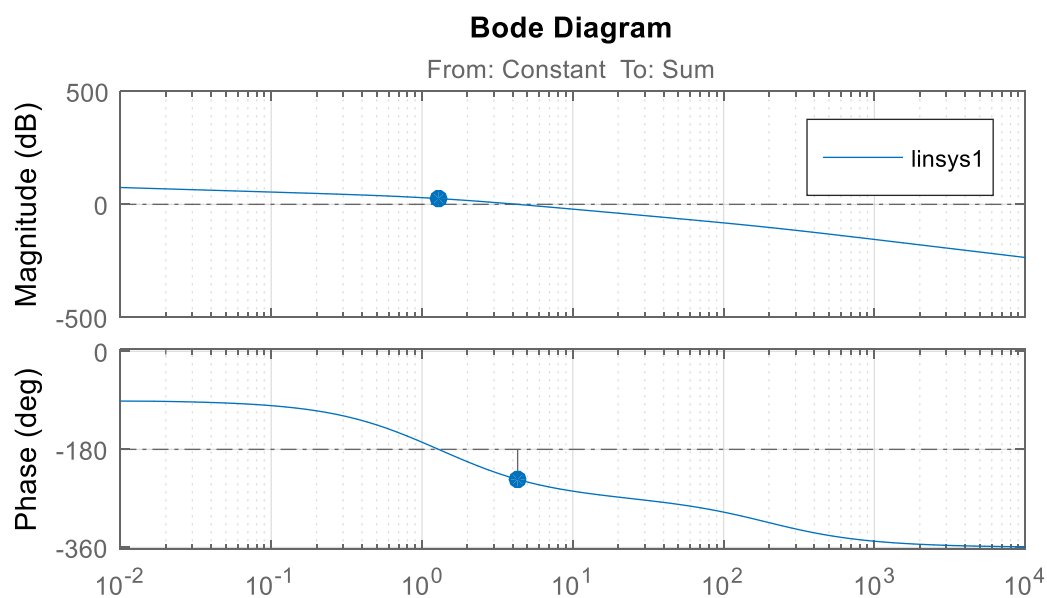


Рис. 20. Результат выполнения команды «Print to Figure»

Как видно из рис. 20, пересечение уровня $-\pi \cdot k$ произошло левее частоты среза, а значит, исследуемая система является неустойчивой.

2.6.3. Частотные показатели качества исходной САР

Учитывая, что исходная система является неустойчивой, определение частотных показателей качества невозможно.

2.7. Построение графиков переходного процесса

Для построения графиков переходного процесса необходимо выполнить моделирование работы исходной САР.

Моделирование САР выполним в среде программного комплекса «MATLAB–Simulink», в котором используется метод структурного моделирования, базирующийся на математических моделях САР в виде их структурных схем.

Для этого необходимо:

Запустить MATLAB, нажав на символ



В открывшемся окне выбрать меню – создать новую модель (рис. 21).

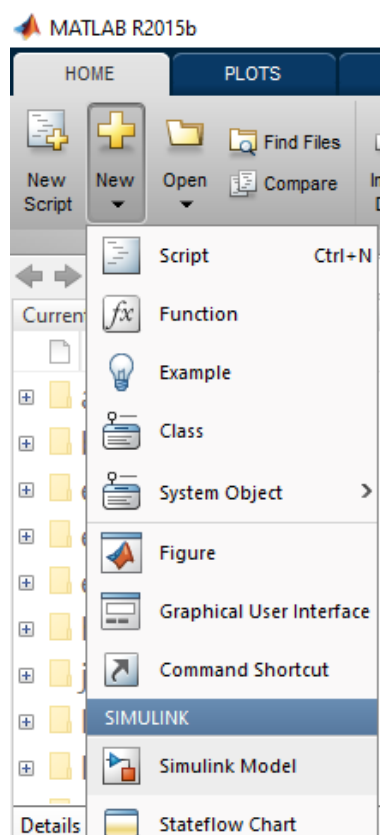


Рис. 21. Главное окно MATLAB – команда «Создать новую модель»

В открывшемся окне «Simulink» открыть библиотеки «LibraryBrowser» (рис. 22).

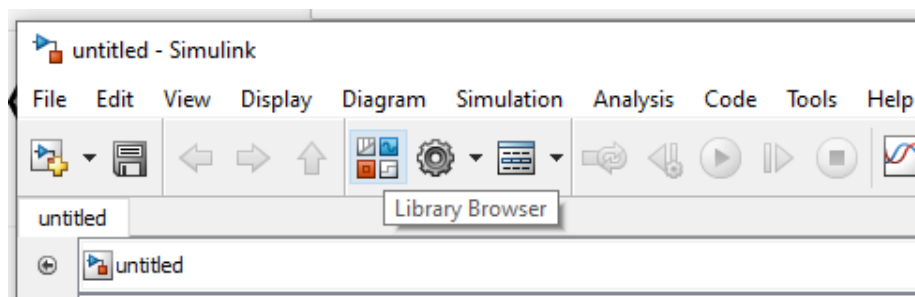


Рис. 22. Команда «открыть библиотеки «LibraryBrowser»

В открывшейся библиотеке будем использовать подбиблиотеки Simulink.

На основе структурной схемой исходной системы (рис. 10) составляем структурную схему моделирования, заменяя звенья САР соответствующими блоками из библиотеки «Simulink»:

Объект управления:

В библиотеке «Continuous»выбираем блок «Transfer Fcn» рис. 23.

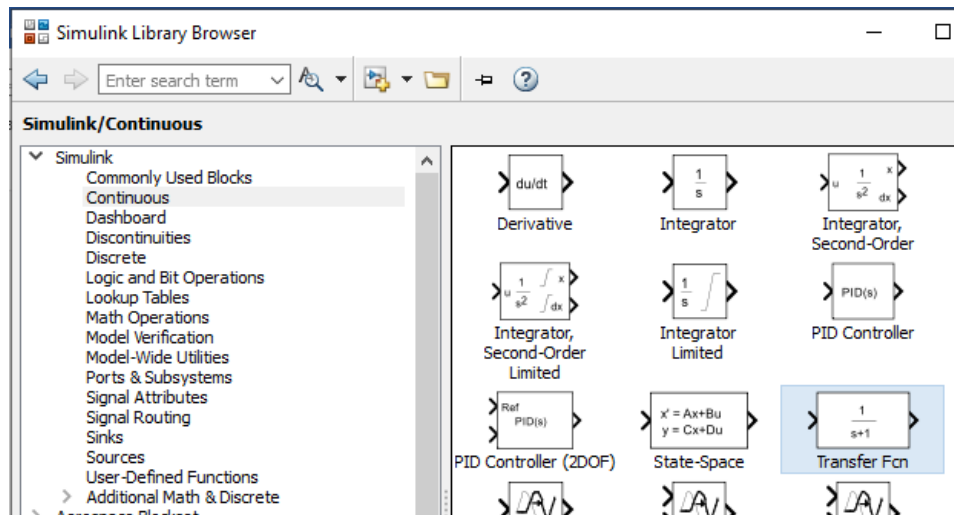


Рис. 23. Команда «выбираем блок «Transfer Fcn»»

И перетаскиваем его на свободное поле модели (рис. 24).

После двойного щелчка по левой кнопки «мыши» появляется окно настройки параметров блока (рис. 24). Данный блок позволяет задать передаточную функцию вида:

$$W(p) = \frac{b_m \cdot p^m + b_{m-1} \cdot p^{m-1} + \dots + b_3 \cdot p^3 + b_2 \cdot p^2 + b_1 \cdot p^1 + b_0 \cdot p^0}{a_n \cdot p^n + a_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p^1 + a_0 \cdot p^0}, \quad (9)$$

вводя в окно «Numerator coefficients» (числитель передаточной функции) в квадратных скобках через пробел значения коэффициентов $b_m \dots b_0$ и в окно «Denominator coefficients» (знаменатель передаточной функции) значения коэффициентов $a_m \dots a_0$.

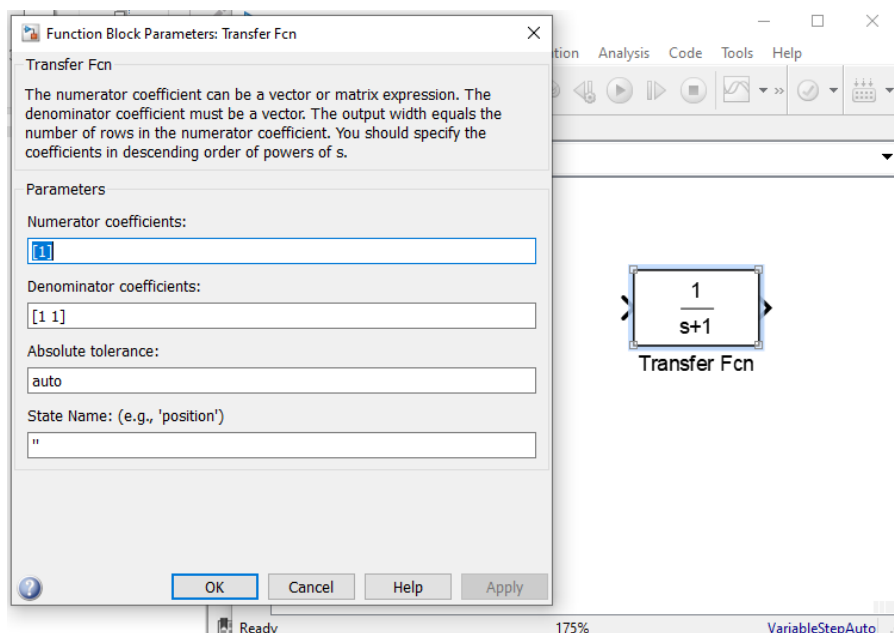


Рис. 24. Блок «Transfer Fcn» и окно его параметров

Учитывая, что постоянная времени объекта управления ($T_0=1,2$ с) и передаточный коэффициент по управляющему воздействию ($k_0=30$), передаточную функцию (8) можно записать в виде:

$$W_{\text{уп}}(p) = \frac{b_0 \cdot p^0}{a_1 \cdot p^1 + a_0 \cdot p^0} = \frac{30}{1,2 \cdot p + 1}, \quad (15)$$

где $b_0 = k_0 = 30$; $a_1 = T_0 = 1,2$; $a_0 = 1$.

Значение коэффициента b_0 запишем в окно «Numerator coefficients», а значения коэффициентов a_1 и a_0 запишем в окно «Denominator coefficients» (рис. 25).

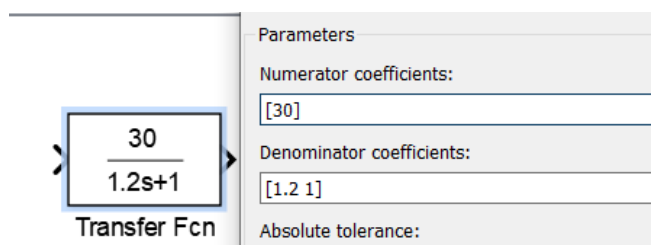


Рис. 25. Ввод значений коэффициентов передаточной функции

Аналогично строится передаточная функция объекта управления по возмущению (рис. 26).

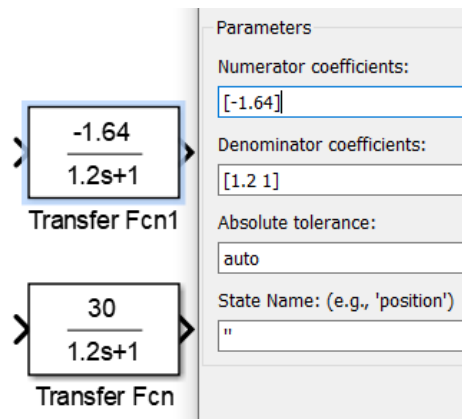


Рис. 26. Ввод значений коэффициентов передаточной функции

Блок сумматор (Sum) находится в библиотеке «Math Operations» (рис. 27).

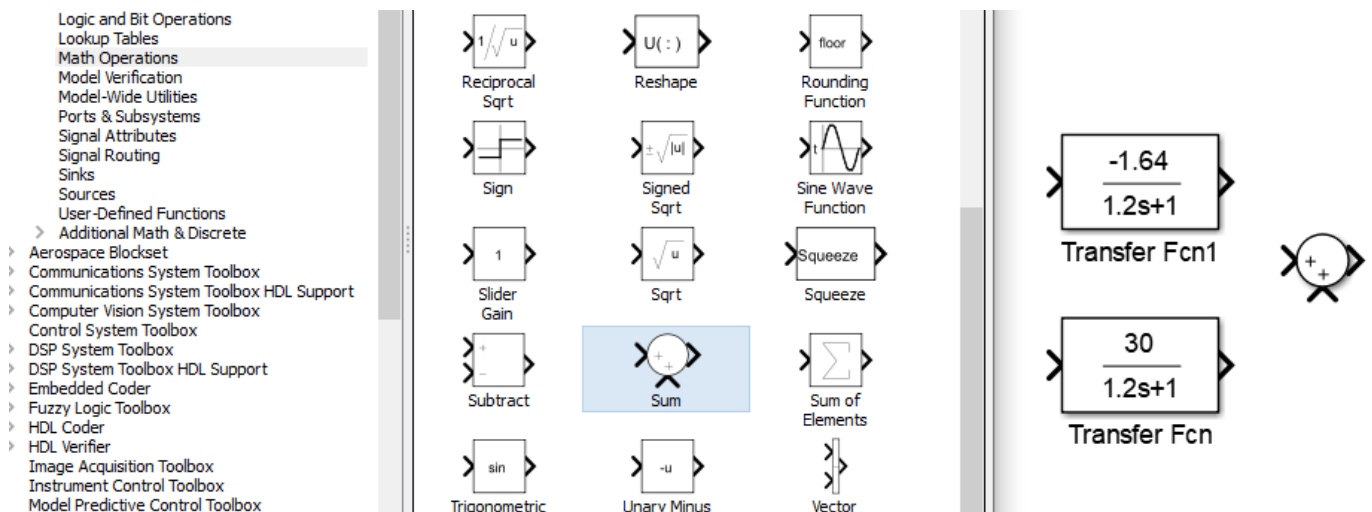


Рис. 27. Команда выбора блока сумматор

Действия, осуществляемые в блоке, определяются числом знаков «+» и «-», введенных в окно параметры.

Передаточная функция гидравлического двигателя (11) может быть представлена:

$$W_{\text{гид}}(p) = \frac{b_0 \cdot p^0}{a_0 \cdot p^0} = \frac{0,89}{1 \cdot p + 0}, \quad (16)$$

где $b_0 = k_3 = 0,89$; $a_1 = 1$; $a_0 = 0$.

Значение коэффициента b_0 запишем в окно «Numerator coefficients», а значения коэффициентов a_1 и a_0 запишем в окно «Denominator coefficients» (рис. 28).

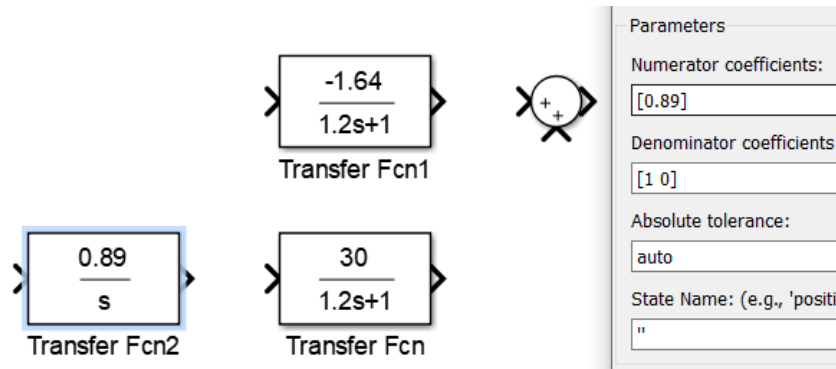


Рис. 28. Ввод значений коэффициентов передаточной функции

Передаточная функция центробежного измерителя скорости (9) может быть представлена:

$$W(p) = \frac{b_0 \cdot p^0}{a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p^1 + a_0 \cdot p^0} = \frac{2 \cdot p^0}{0,05^2 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p^1 + 1 \cdot p^0}, \quad (10)$$

где $b_0 = k_2 = 2$; $a_2 = 0,05$; $a_1 = 0,5$; $a_0 = 1$.

Значение коэффициента b_0 запишем в окно «Numerator coefficients», а значения коэффициентов a_1 и a_0 запишем в окно «Denominator coefficients» (рис. 29).

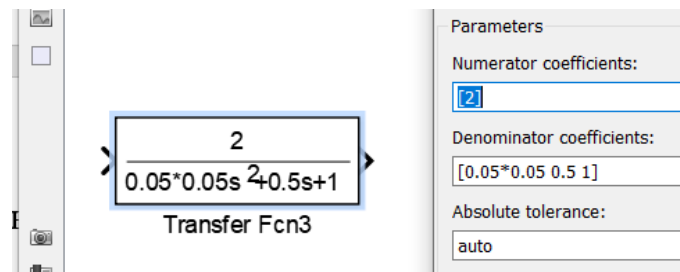


Рис. 29. Ввод значений коэффициентов передаточной функции

Для формирования задающего воздействия Ω_3 воспользуемся блоком «Constant» из библиотеки «Sources», а для создания возмущающего воздействия M используем блок «Step».

Для просмотра результатов моделирования воспользуемся блоком «Scope» из библиотеки «Sinks».

Структурная схема для моделирования будет иметь следующий вид (рис. 30).

Значение времени моделирования определим, как стократное увеличение максимальной постоянной времени, т.е.

$$t_{\text{мод}} = 100 \cdot T_{\text{MAX}} = 100 \cdot 1,2 = 120 \text{ с} \quad (18)$$

Полученное значение введем в окно «Simulation stop time» рис. 31.

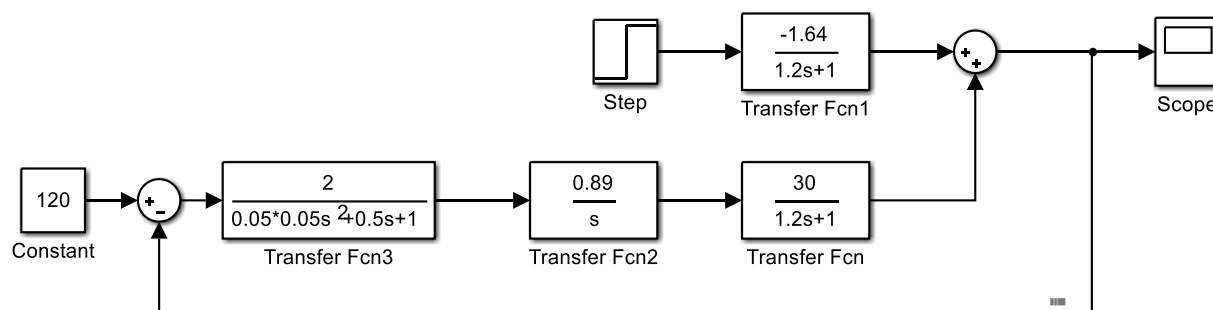


Рис. 30. Структурная схема для моделирования

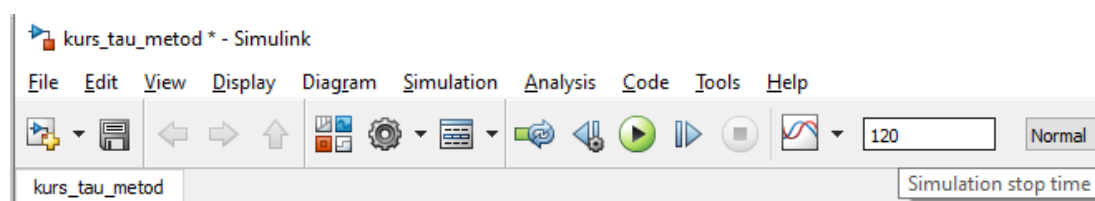


Рис. 31. Ввод времени моделирования

2.7.1. График переходного процесса по управляющему воздействию

Для получения графика переходного процесса необходимо запустить процесс моделирования, нажав на иконку «».

График переходного процесса можно увидеть после двойного нажатия левой кнопки «мыши» по блоку «Score».

Полученный график показан на рис. 32, из которого следует, что система также неустойчива.

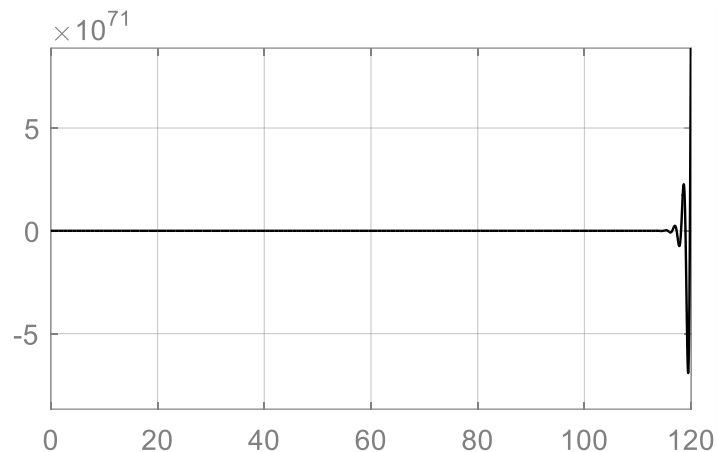


Рис. 32. График переходного процесса по управляющему воздействию

2.7.2. График переходного процесса по возмущающему воздействию

Построим график переходного процесса по возмущаю воздействию, для этого отключим блок «Constant» от входа системы. В окне настройки блока «Step» зададим:

- Step time – 0
- Initial value – 0
- Final value – $M = 30$

Полученный график показан на рис. 33, из которого следует, что система также неустойчива.

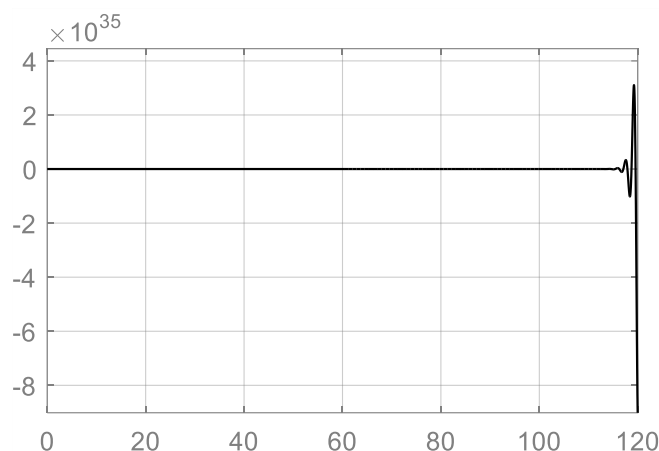


Рис. 33. График переходного процесса по возмущающему воздействию

2.8. Определение временных показателей исходной САР

Учитывая, что исходная система является неустойчивой, определение временных показателей качества невозможно.

2.9. Синтез САР с использованием типовых регуляторов

В ряде практических случаев реальные контуры регулирования могут быть сведены к простейшим контурам второго или третьего порядка, настройка которых осуществляется путем выбора по определенным правилам параметров регулятора.

В технологических системах из многих координат (температура, давление, расход, напряжение, ток, скорость, перемещение ИО и др.) обычно одна является основной регулируемой координатой, по которой осуществляется главная обратная связь. Силовая часть и управляющая часть в виде регулятора, на входе которого сравниваются предписанное и истинное значения регулируемой переменной, образуют контур регулирования одноконтурной системы, который может содержать несколько инерционных звеньев.

Однако по тем или иным причинам может оказаться целесообразным компенсировать лишь одну, большую из этого постоянного времени. Тогда

остальные относят к числу малых постоянных и для настройки контура на ОМ применяют ПИ–регулятор или ПИД–регулятор с параметрами, обеспечивающими компенсацию наибольшей постоянной времени, а остальные постоянные суммируются и используются как одна малая постоянная [6], такую постоянную времени называют в этом случае суммарной малой постоянной времени.

Произведем синтез системы, используя типовые регуляторы, типовые настройки которых [6], представлены в табл.1.

Таблица 1

Параметры типовых регуляторов, обеспечивающих настройку на оптимум по модулю

Тип	Передающая функция	Параметры регулятора
ПИ–регулятор	$W_p(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = k_{\Pi} = \beta$	$\beta = \frac{T_0}{2 \cdot \prod_{i=1}^m k_i \cdot T_{\Sigma\mu}}$
ПИ–регулятор	$W_p(p) = k_{\Pi} + k_{\text{И}} \cdot \frac{1}{p} = \frac{k_{\Pi} \cdot p + k_{\text{И}}}{p} = \beta \frac{(\tau \cdot p + 1)}{\tau \cdot p}$	$\beta = \frac{T_0}{2 \cdot \prod_{i=1}^m k_i \cdot T_{\Sigma\mu}}$ $\tau = T_0$
ПИД–регулятор	$W_p(p) = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{p} + k_{\text{Д}} \cdot p = \frac{\beta(\tau_1 \cdot p + 1)(\tau_2 \cdot p + 1)}{\tau_1 \cdot p(T_{\text{Д}} \cdot p + 1)}$	$\beta = \frac{T_{01}}{2 \cdot \prod_{i=1}^m k_i \cdot T_{\Sigma\mu}}$ $\tau_1 = T_{01}$ $\tau_2 = T_{02}$

k_i – коэффициент передачи звеньев, входящих в замкнутый контур,

$T_{\Sigma\mu} = \sum_{i=1}^m T_{\mu i}$ – суммарная малая постоянная времени, $T_0 \gg T_{\mu}$

При определении параметров ПИД–регулятора необходимо определить неравенство

$$T_0 \gg T_{\mu 1} \gg T_{\mu 2} > T_{\mu 3} \dots T_{\mu m}, \quad (19)$$

тогда

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_1 = T_0 \\ \tau_1 = T_{\mu 1} \\ T_{\Sigma \mu} = \sum_{i=2}^m T_{\mu i} \end{array} \right. . \quad (20)$$

$T_d = 0.001 \dots 0.002$ – постоянная времени, характеризующая инерционные свойства реального дифференцирующего звена.

Настройка на оптимум по модулю (ОМ) обеспечивает при ступенчатом управляющем воздействии достижение выходной координаты в первый раз установившегося значения через время $4,7T_{\mu}$ при перерегулировании $\sigma=4,3\%$, и запас устойчивости по фазе составляет $\Delta\varphi=63^\circ$.

Согласно (12) передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W_{\text{РАЗ}}(p) = \frac{2}{0,05^2 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,89}{p} \cdot \frac{30}{1,2 \cdot p + 1}. \quad (21)$$

Передаточная функция центробежного измерителя скорости является типовым звеном второго порядка – колебательное звено (22).

$$W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{k}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T \cdot \xi \cdot p + 1}. \quad (22)$$

Необходимо определить величину ξ

$$\xi = \frac{0.5}{2 \cdot 0.05} = 5. \quad (23)$$

Так как $\xi=5>1$, значит перед нами апериодическое звено второго порядка (24).

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 \cdot p + 1)} \cdot \frac{1}{(T_2 \cdot p + 1)} \quad (24)$$

Постоянные времени T_1 и T_2 определяются следующим образом:

$$\begin{cases} T_1 = \xi \cdot T + \sqrt{\frac{(\xi \cdot T)^2 - 4 \cdot T^2}{2}} \\ T_2 = \xi \cdot T - \sqrt{\frac{(\xi \cdot T)^2 - 4 \cdot T^2}{2}} \end{cases} \quad (25)$$

Определим параметры регуляторов:

Для определения параметров регуляторов необходимо расставить постоянные времени согласно (19).

Постоянные времени аperiodического звена будут:

$$\begin{cases} T_1 = 5 \cdot 0.05 + \sqrt{\frac{(5 \cdot 0.05)^2 - 4 \cdot 0.05^2}{2}} = 0.365 \\ T_2 = 5 \cdot 0.05 - \sqrt{\frac{(5 \cdot 0.05)^2 - 4 \cdot 0.05^2}{2}} = 0.135 \end{cases} \quad (26)$$

Тогда $T_0 = 1.2 > T_1 = 0.365 > T_2 = 0.135$.

$$\begin{aligned} \beta_{\Pi} = \beta_{\Pi\Pi} &= \frac{T_0}{2k_{\mu}k_0T_{\mu}} = \frac{T_0}{2 \cdot k_0 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (T_1 + T_2)} = \\ &= \frac{1,2}{2 \cdot 30 \cdot 2 \cdot 0,89 \cdot (0,365 + 0,135)} = 0,02 \quad ; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \beta_{\Pi\Pi\Pi} &= \frac{T_0}{2k_{\mu}k_0T_{\mu}} = \frac{T_0}{2 \cdot k_0 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot T_2} = \\ &= \frac{1,2}{2 \cdot 30 \cdot 2 \cdot 0,89 \cdot 0,135} = 0,08 \quad ; \end{aligned}$$

$$\tau = T_0 = 1,2;$$

$$\tau_1 = T_0 = 1,2;$$

$$\tau_2 = T_1 = 0,365.$$

(28)

2.10. Исследование синтезированной САР на устойчивость с регуляторами П–; ПИ–; ПИД– типа

2.10.1. Корневой критерий устойчивости

Проведем проверку на устойчивость синтезированной САР.

Передаточная функция замкнутой САР теперь будет иметь вид:

для П–регулятора:

$$W_{\text{ЗАМ}_\Pi}(p) = \frac{0,02 \cdot \frac{2}{0,05^2 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,89}{p} \cdot \frac{30}{1,2 \cdot p + 1}}{1 + 0,02 \cdot \frac{2}{0,05^2 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,89}{p} \cdot \frac{30}{1,2 \cdot p + 1}}; \quad (29)$$

для ПИ–регулятора:

$$W_{\text{ЗАМ}_{\text{ПИ}}}(p) = \frac{0,02 \cdot \frac{(1,2 \cdot p + 1)}{1,2 \cdot p} \cdot \frac{2}{0,05^2 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,89}{p} \cdot \frac{30}{1,2 \cdot p + 1}}{1 + 0,02 \cdot \frac{(1,2 \cdot p + 1)}{1,2 \cdot p} \cdot \frac{2}{0,05^2 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,89}{p} \cdot \frac{30}{1,2 \cdot p + 1}}; \quad (30)$$

для ПИД–регулятора:

$$\begin{aligned} W_{\text{ЗАМ}_{\text{ПИД}}}(p) = \\ = \frac{0,08 \cdot \frac{(1,2 \cdot p + 1)(0,365 \cdot p + 1)}{1,2 \cdot p \cdot (0,001 \cdot p + 1)} \cdot \frac{2}{0,05^2 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,89}{p} \cdot \frac{30}{1,2 \cdot p + 1}}{1 + 0,08 \cdot \frac{(1,2 \cdot p + 1)(0,365 \cdot p + 1)}{1,2 \cdot p \cdot (0,001 \cdot p + 1)} \cdot \frac{2}{0,05^2 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,89}{p} \cdot \frac{30}{1,2 \cdot p + 1}}. \end{aligned} \quad (31)$$

Для каждого характеристического полинома передаточных функций (29), (30), (31) определим значения корней, аналогично рис. 12 – 14.

Результат определения корней представлен на рис. 34– рис. 36.

$$\begin{pmatrix} -2.4705756643627793496 \\ -197.9795431660372816 \\ -0.19160725146663619029 + 0.83133584649816306783i \\ -0.19160725146663619029 - 0.83133584649816306783i \end{pmatrix}$$

Рис. 34. Результат определения корней характеристического полинома в САР с П–регулятором

$$\begin{pmatrix} -2.3499442693797653958 \\ -197.97954336195534592 \\ 0.16474381566755565662 + 0.85910096238721669239i \\ 0.16474381566755565662 - 0.85910096238721669239i \end{pmatrix}$$

Рис. 35. Результат определения корней характеристического полинома в САР с ПИ–регулятором

$$\begin{pmatrix} -2.0057574692791334142 \\ -198.04326144298694439 \\ -999.99750310944271301 \\ 0.023261010854395407601 - 3.1751986764601621816i \\ 0.023261010854395407601 + 3.1751986764601621816i \end{pmatrix}$$

Рис. 36. Результат определения корней характеристического полинома в САР с ПИД–регулятором

Как видно из рис. 35 и рис. 36, применение регуляторов с «чистым» интегрирующим звеном не сделало САР устойчивой, это объясняется тем, что исследуемая САР является астатической так как передаточной функцией гидравлического двигателя является интегрирующее звено, т.е. «чистый» интегратор.

Как видно из рис. 34, синтезированная САР с П–регулятором является устойчивой.

2.10.2. Критерий устойчивости Найквиста

Проверим синтезированную САР с П-регулятором (рис. 37) на устойчивость, используя частотный критерий (рис. 15 – рис. 20).

Логарифмическая частотная характеристика разомкнутой САР представлена на рис. 38.

Как видно из рис. 38, синтезированная САР с П-регулятором является устойчивой.

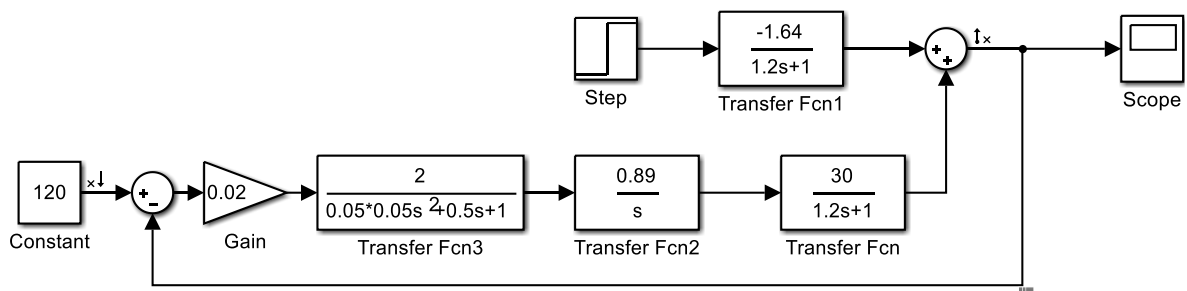


Рис. 37. Синтезированная САР с П-регулятором

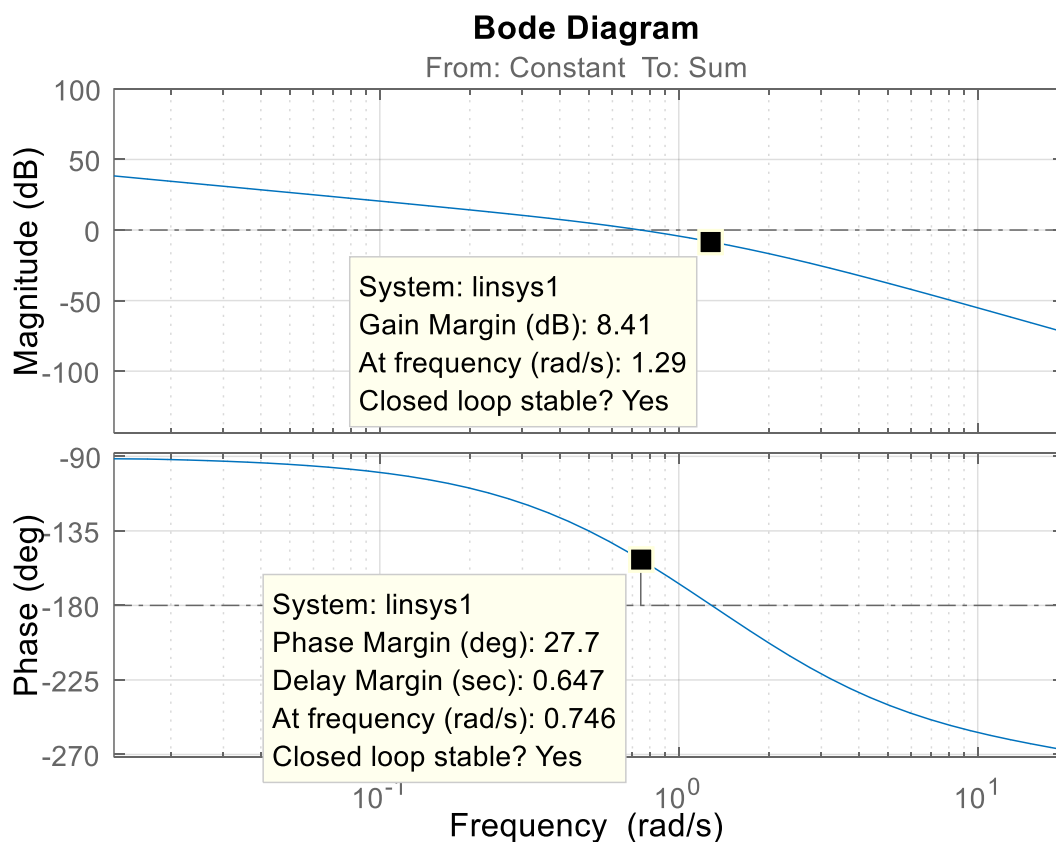


Рис. 38. Логарифмическая частотная характеристика разомкнутой САР

2.10.3. Определить частотные показатели качества синтезированной САР

По рис. 38 определим запасы устойчивости:

- запас устойчивости по амплитуде $\Delta A = 8,41$; дБ;
- запас устойчивости по фазе $\Delta \varphi = 27,7^\circ$.

2.11. Построение графиков переходного процесса

2.11.1. По управляющему воздействию

График переходного процесса по управляющему воздействию показан на рис. 39.

2.11.2. По возмущающему воздействию

График переходного процесса по возмущающему воздействию показан на рис. 40.

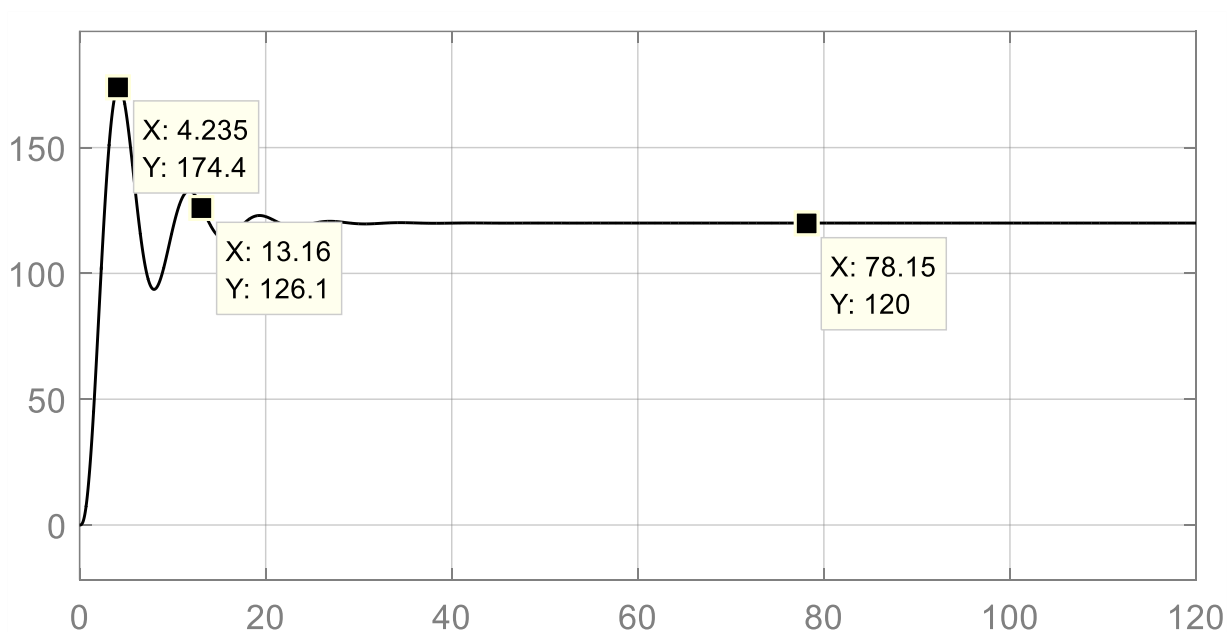


Рис. 39. График переходного процесса по управляющему воздействию

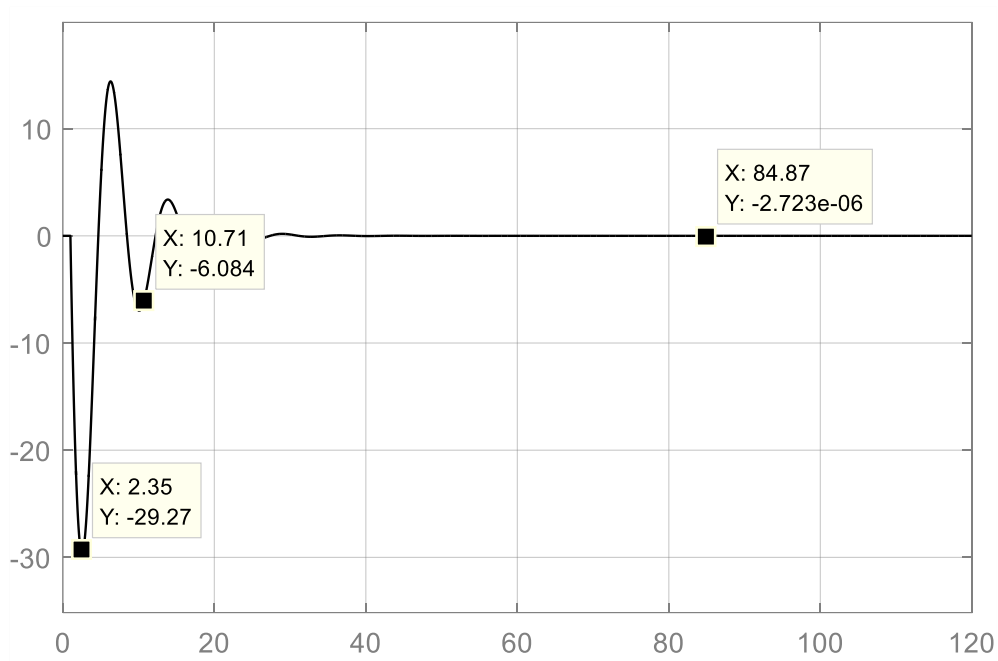


Рис. 40. График переходного процесса по возмущающему воздействию

2.11.3. Построение общего графика переходного процесса

Построим общий график, на котором будут показаны переходные процессы по управлению и возмущению, для этого снова подключим блок «Constant» к управляющему входу системы, а в блоке «Step» изменим параметр «Step time» на 60.

Общий график показан на рис. 41

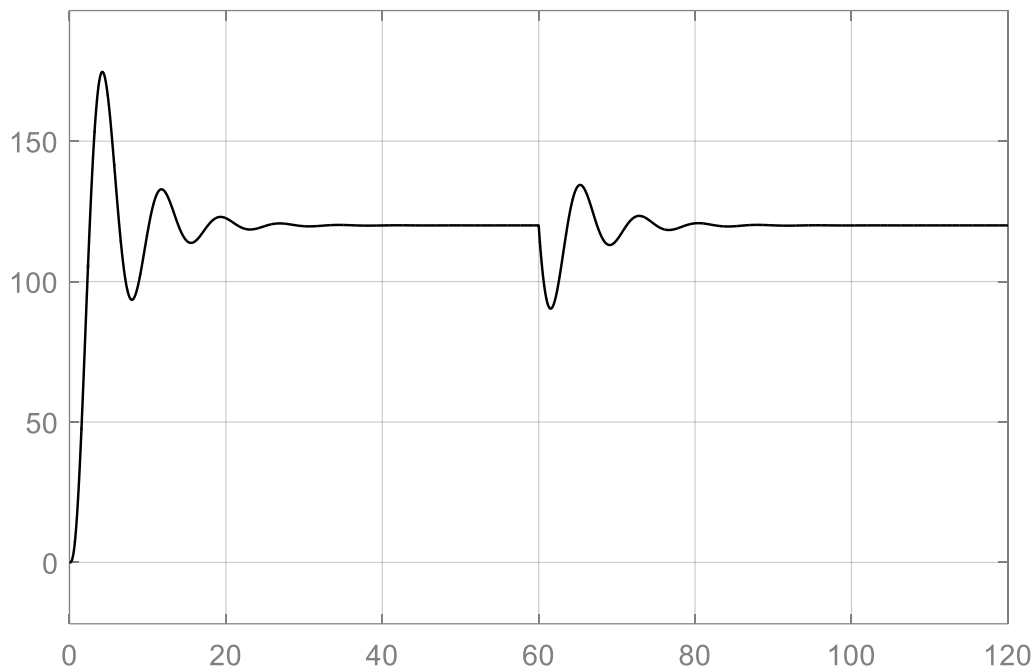


Рис. 41. Общий график

2.12. Определение временных показателей синтезированной САР

Определим временные показатели качества синтезированной САР.

Время переходного процесса по управлению составило $t_{\text{пн}} = 13,16$,
перерегулирование:

$$\sigma = \frac{\max |h(t) - y_{\text{уст}}|}{y_{\text{уст}}} \cdot 100 \% = \frac{174,4 - 120}{120} \cdot 100 \% = 45 \% \quad (32)$$

Время переходного процесса по возмущению составило $t_{\text{пн}} = 10,07$ с,
перерегулирование:

$$\sigma = \frac{\max |h(t) - y_{\text{уст}}|}{y_{\text{уст}}} \cdot 100 \% = \frac{29,27 - 0}{29,27} \cdot 100 \% = 29 \% \quad (33)$$

2.13. Сравнение частотных показателей качества исходной САР и синтезированной САР

После синтеза САР система стала устойчивой, сравнение частотных показателей при использовании регуляторов невозможно, так как только с П-регулятором синтезированная САР устойчива.

2.14. Сравнение временных показателей качества исходной САР и синтезированной САР

После синтеза САР система стала устойчивой, сравнение временных показателей при использовании регуляторов невозможно, так как только с П-регулятором синтезированная САР устойчива.

2.15. Выводы по работе

При выполнении курсовой работы получены следующие результаты:

- составлена функциональная схема САР;
- определены передаточные функции объекта регулирования и элементов системы;
- составлена структурная схема исходной САР, на основе которой выполнено её компьютерное моделирование;
- в результате исследования исходной САР на устойчивость по корневому критерию и критерию Найквиста выявлено, что исходная система не устойчива;
- произведен синтез САР с использованием типовых регуляторов.
- в результате исследования синтезированной САР на устойчивость по корневому критерию и критерию Найквиста выявлено, что синтезированная система устойчива может быть устойчива только при использовании П-регулятора. Это объясняется тем, что исходная САР является астатической.

3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

3.1. Система автоматического регулирования давления пара перед турбиной

Схема, показанная на рис. 42, представляет САР давления пара. Регулирование осуществляется изменением расхода топлива, подаваемого в топку, в зависимости от отклонения значения давления пара в магистрали от требуемого. Объектом регулирования (ОР) в данной системе служит котел с топкой, регулируемые величины которого давление пара на входе котла – $P_{\Pi}(t)$, расход топлива (природный газ или мазут) – $V_T(t), G_T(t)$, и возмущающее воздействие – расход пара, уходящего из котла $G_{\Pi}(t)$.

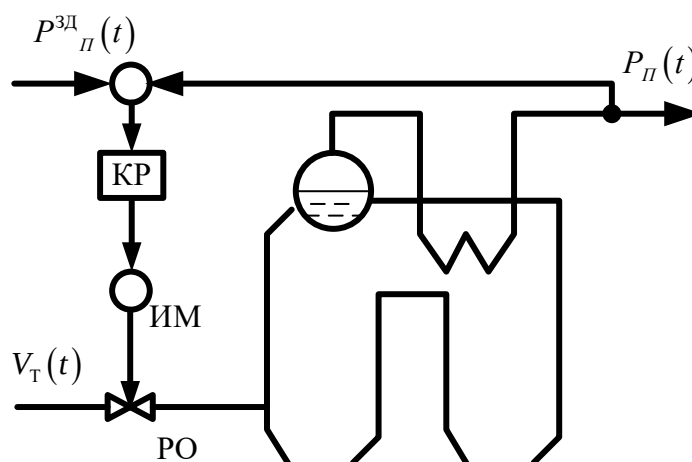


Рис. 42. Принципиальная схема регулирования давления пара перед турбиной

Датчик давления РЕ определяет величину давления пара $P_{\Pi}(t)$. Измеренное значение передается в сравнивающий орган – РС. Результат сравнения $e(t)$ (сигнала рассогласования) для управления исполнительным двигателем, который при своей работе изменяет величину перемещения клапана (заслонки) на трубопроводе подачи топлива в топку котла, чем достигается изменение давления воздуха на выходе котла – регулирующего

воздействия на объект регулирования.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов системы описываются следующими уравнениями:

$$T_0 \cdot \frac{d \cdot P_{\Pi}(t)}{dt} + P_{\Pi}(t) = k_0 \cdot V_T(t) + k \cdot G_{\Pi}(t) - \text{объект регулирования};$$

$$I_{\Delta}(t) = k_1 \cdot P_{\Pi}(t) - \text{датчик};$$

$$T_2 \frac{d^2 \cdot \mu(t)}{dt^2} + \frac{d \cdot \mu(t)}{dt} = k_2 \cdot I(t) - \text{двигатель совместно с клапаном};$$

$$V_T(t) = k_3 \cdot \mu(t) - \text{регулирующий орган};$$

$$\Delta I(t) = I_0(t) - I_{\Delta}(t) - \text{сравнивающий орган};$$

$$T_4 \frac{d \cdot I(t)}{dt} + I(t) = k_4 \cdot \Delta I(t) - \text{магнитный усилитель},$$

где T_0 , T_2 , T_4 – постоянные времени, с; $P_{\Pi}(t)$ – значение пара на выходе котла, МПа; k , k_1 , k_2 , k_3 , k_4 – коэффициенты передачи; $G_{\Pi}(t)$ – возмущающее воздействие на объект регулирования; I_{Δ} – выходной ток датчика давления, мА; ΔI – сигнал рассогласования, мА; μ – линейное перемещение клапана, %; I_0 – задающий сигнал, мА.

Значения параметров элементов САР по вариантам даны в табл. 2.

Таблица 2

Значения параметров элементов САР

Вариант	T_0 , с	T_2 , с	k	k_0	k_1	k_4	k_2	G_{Π} , т/ч	k_3
1	17	0,060	0,2	0,1	0,2	2	0,002	2,1	10
2	26	0,070	0,2	0,3	0,2	4	0,002	2	10
3	21	0,080	0,2	0,3	0,2	6	0,002	1,4	10
4	12	0,090	0,2	0,2	0,2	10	0,002	1	10
5	24	0,100	0,2	0,2	0,2	9	0,002	1,3	10
6	12	0,50	0,2	0,2	0,2	12	0,002	1,7	10

Вариант	T_0, c	T_2, c	k	k_0	k_1	k_4	k_2	$G_{II}, T/ч$	k_3
7	14	0,055	0,2	0,2	0,2	14	0,002	2,3	10
8	10	0,060	0,2	0,1	0,2	15	0,002	2	10
9	12	0,060	0,2	0,1	0,2	20	0,002	2,3	10
10	27	0,08	0,2	0,2	0,2	10	0,002	1,2	10

Примечание. Для всех вариантов $T_4 = 0,5 c$.

3.2. Система автоматического регулирования температуры в печи

На рис. 43 приведена схема САР температуры в печи для обжига кирпича. В данной системе печь представляет собой объект регулирования, регулируемой величиной которого является температура Θ в печи, а регулирующим (управляющим) воздействием – линейное перемещение клапана μ , от величины которого зависит количество топлива, подаваемого в форсунку, а следовательно, и количество теплоты, выделяемой при его сгорании.

Внешним возмущающим воздействием f является совокупность разнообразных факторов: исходной влажности, температуры обжигаемого кирпича, изменения температуры и влажности атмосферного воздуха. При исследовании системы можно ограничиться учетом влияния на объект регулирования исходной влажности кирпича, рассматривая ее как основное возмущающее воздействие.

Функции воспринимающего органа (ВО) в САР выполняет медный терморезистор R1, включенный в мостовую схему, обеспечивающую задание требуемого значения температуры в печи посредством резистора R2. Мостовая схема также сравнивает напряжение U , пропорциональное температуре в печи Θ , с задающим напряжением U_0 , т. е. она помимо функций задающего органа (ЗО) выполняет функции сравнивающего органа (элемента).

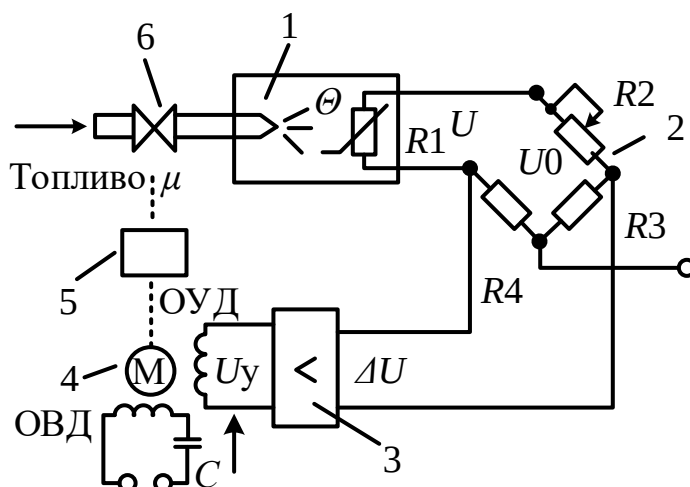


Рис. 43. Схема САР автоматического регулирования температуры в печи:

1 – печь; 2 – измерительная мостовая схема; 3 – дифференциальный магнитный усилитель; 4 – двухфазный электродвигатель; 5 – редуктор; 6 – клапан.

Напряжение разбаланса мостовой схемы ΔU (сигнала рассогласования) регулируется усилителем, выходное напряжение которого управляет исполнительным двигателем. Последний через редуктор перемещает клапан, т. е. изменяет регулирующее воздействие μ на входе объекта регулирования.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР описываются следующими уравнениями:

$$T_0 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = k_0 \mu - k_1 f - \text{объект управления};$$

$$U = k_2 \Theta - \text{датчик температуры};$$

$$\Delta U = U_0 - U - \text{сравнивающий орган};$$

$$T_1 \frac{dU_y}{dt} + U_4 = k_3 \Delta U - \text{дифференциальный магнитный усилитель};$$

$$T_2 \frac{d^2 \mu}{dt^2} + \frac{d\mu}{dt} = k_4 U_y - \text{исполнительный двигатель (с редуктором и клапаном)};$$

где T_0, T_1, T_2 – постоянные времени, с; Θ – значение температуры в печи, °С;

k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты передачи; μ – линейное перемещение клапана, см; f – возмущающее воздействие на объекте регулирования; U – падение напряжения на терморезисторе, В; U_0 – падение напряжения на задающем резисторе R_2 , В; ΔU – сигнал разбаланса мостовой схемы (сигнал рассогласования), В; U_y – напряжение на выходе усилителя, В.

Значения параметров САР по вариантам указаны в табл. 3.

Таблица 3

Значения параметров элементов САР

Вариант	T_0	k_0	k_1	k_2	k_3	T_2	k_4	f	T_1
1	2,0	50	12	0,8	5	0,05	0,02	50	0,06
2	1,8	50	15	0,9	4	0,04	0,03	60	0,06
3	1,7	50	20	1,0	3	0,03	0,01	70	0,06
4	1,6	50	9	0,5	5	0,02	0,1	60	0,06
5	1,5	50	10	0,4	6	0,015	0,08	60	0,06
6	1,4	50	7	0,3	7	0,016	0,09	50	0,06
7	1,3	50	8	0,1	5	0,017	0,07	50	0,06
8	1,2	50	13	1,2	4	0,022	0,01	45	0,06
9	5,0	50	14	1,3	2	0,024	0,02	50	0,06
10	4,5	50	15	1,4	2	0,026	0,01	45	0,06

Заданное значение температуры в печи 950 °С.

3.3. Система автоматического регулирования разрежения в топке барабанного котла

На рис. 44 показана схема САР разрежения в топке барабанного котла. Наличие небольшого (до 20...30 Па) постоянного разрежения $P_{вт}$ в верхней части топки необходимо по условиям нормального топочного режима. Это препятствует выбиванию газов из топки, способствует устойчивости факела и служит косвенным показателем материального баланса между подаваемым в топку воздухом и уходящими газами. Объект регулирования по разрежению –

топочная камера с включенными последовательно с нею газоходами от поворотной камеры до всасывающих патрубков дымососов. Входным регулирующим воздействием этого участка служит расход дымовых газов, определяемый подачей дымососов. К внешним возмущающим воздействиям относят изменение расхода воздуха в зависимости от тепловой нагрузки агрегата.

Давление в верхней части топки определяется датчиком давления, далее оно сравнивается с заданным значением $P_{BT} = 25$ Па.

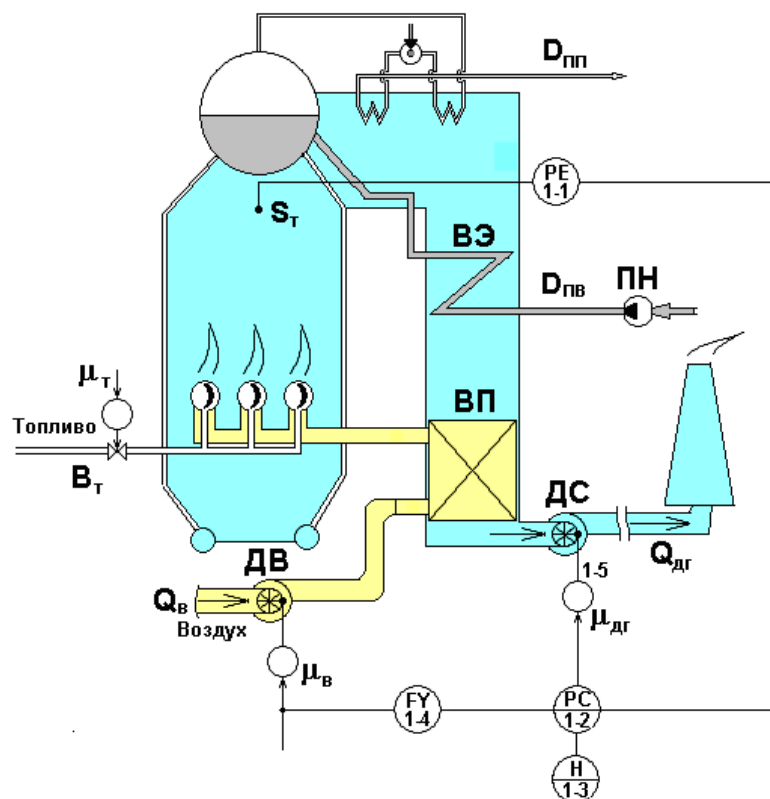


Рис. 44. Схема САР разряжения в топке барабанного котла

Сигнал разбаланса $\Delta I = I_0 - I_d$ регулируется усилителем, выходное значение которого I_y , управляет исполнительным двигателем.

Последний через редуктор поворачивает лопатки направляющего аппарата, тем самым изменяет величину потребляемого воздуха $G_{ПВ}$ на входе объекта регулирования.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР описываются следующими уравнениями:

$$T_C \frac{d \cdot P_{\text{ВТ}}(t)}{dt} + P_{\text{ВТ}}(t) = k_O \cdot \beta(t) - k_f \cdot G_{\text{ПВ}}(t) \text{— объект управления;}$$

$$T_D \frac{d \cdot I_D(t)}{dt} + I_D(t) = k_D \cdot P_{\text{ВТ}}(t) \text{— датчик давления;}$$

$$\Delta I = I_0 - I_D \text{—сравнивающий элемент;}$$

$$I_Y = k_Y \cdot \Delta I \text{— усилитель;}$$

$$T_M \cdot T_Y \frac{d^3 \cdot \beta(t)}{dt^3} + T_M \frac{d^2 \cdot \beta(t)}{dt^2} + \frac{d \cdot \beta(t)}{dt} = k_{\Sigma} \cdot I_Y \text{—электродвигатель}$$

совместно с редуктором (при условии, что момент сопротивления на валу двигателя $M_C = \text{const}$);

Размерности параметров и их числовые значения по вариантам заданий приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения параметров элементов САР

Вариант	T_0 , с	k_0	k_f	T_D , с	k_D	T_M , с	T_Y , с	k_Y	$G_{\text{ПВ}}$
1	31	0,42	0,32	2,0	0,015	0,015	0,002	50	62
2	13	0,44	0,46	1,5	0,015	0,016	0,005	60	62
3	27	0,31	0,29	3,0	0,015	0,018	0,003	70	92
4	10	0,43	0,34	2,5	0,015	0,02	0,004	80	76
5	20	0,37	0,39	4,0	0,015	0,015	0,005	90	61
6	21	0,4	0,24	1,3	0,015	0,018	0,002	100	94
7	39	0,2	0,25	1,1	0,015	0,02	0,003	80	84
8	18	0,44	0,34	1,7	0,015	0,01	0,004	85	64
9	38	0,23	0,42	1,8	0,015	0,012	0,005	70	76
10	19	0,42	0,27	1,9	0,015	0,014	0,002	75	64

3.4. Система автоматического регулирования температуры воздуха, подаваемого в топку котла

На рис. 45 показана схема САР питания барабанного котла. Принято, что максимально допустимые отклонения уровня воды в барабане составляют ± 100 мм от среднего значения, установленного заводом-изготовителем. Среднее значение уровня может не совпадать с геометрической осью барабана. Максимально допустимые отклонения уточняют в процессе эксплуатации. Снижение уровня за пределы водомерного стекла, устанавливаемого на барабане, считается «упуском» воды, а превышение его верхней видимой части – «перепиткой». Расстояние между этими критическими отметками 400 мм. В переходных режимах изменение уровня происходит довольно быстро, поэтому регулятор питания для обеспечения малых отклонений уровня должен поддерживать постоянство соотношения расходов питательной воды и пара. Эту задачу выполняет регулятор, который перемещает клапан при появлении сигнала небаланса между расходами питательной воды $G_{пв}$ и пара $G_{пп}$.

В качестве объекта регулирования в данной системе целесообразно рассматривать барабан. В таком случае регулирующим воздействием на входе объекта будет расход топлива (природный газ или жидкое топливо – мазут) $G_T(p)$, посредством изменения которого обеспечивается компенсация отклонений уровня в барабане котла $H(p)$, возникающих вследствие изменения внешних возмущающих воздействий (изменения расхода питательной воды в барабане котла $G_{пв}(p)$ и расход пара, уходящего из котла $G_{п}(p)$). При исследовании САР в качестве главного возмущения следует рассматривать изменения расхода питательной воды в барабане, приняв условно, что все остальные возмущающие факторы постоянны.

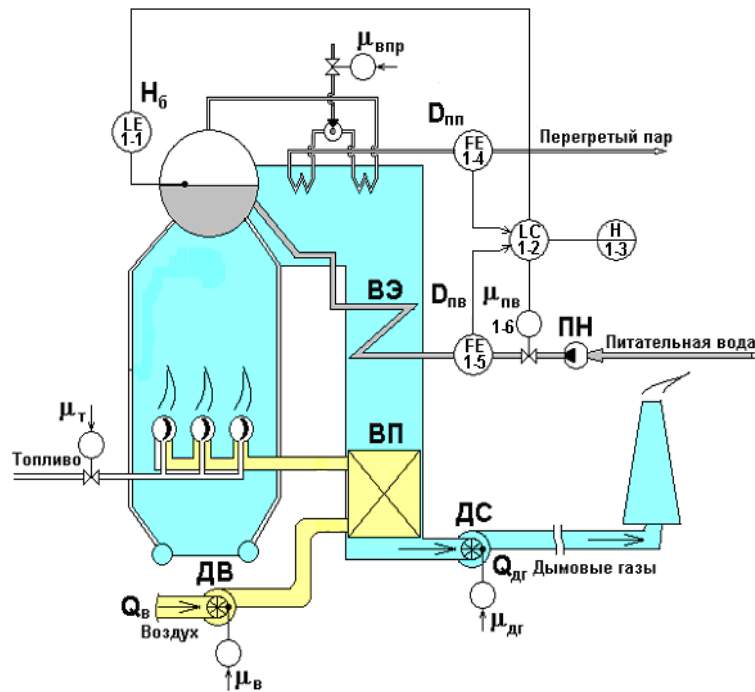


Рис. 45. Схема САР питания барабанного котла

Динамика САР описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{d \cdot H(t)}{dt} = k_{Ou} \cdot G_T + k_{Of} \cdot G_{П} - \text{объект регулирования};$$

$I = k_d \cdot H(t)$ – упрощенное уравнение датчика уровня (без учета его постоянной времени, так как она на два порядка меньше постоянной времени объекта регулирования);

$$\Delta I = I_0 - I - \text{уравнение сравнения сигналов};$$

$$I_y = k_y \cdot \Delta I - \text{уравнение электронного усилителя};$$

$X = k_{\varepsilon} \cdot I_y$ – упрощенное уравнение электроуправляемого клапана (без учета электромеханических переходных процессов в клапане);

$$G_T = k_C X - \text{уравнение подачи питательной воды}.$$

Размерности параметров и их значения по вариантам даны в табл. 5.

Заданный уровень воды $H_3 = 200 \pm 1$ мм.

Значения параметров элементов САР

Вариант	k_{Ou}	k_{Of}	k_d	k_y	k_z	k_c	G_{II} , т/ч
1	0,00026	0,0362	0,02	90	2	0,8	4820
2	0,000238	0,0334	0,02	80	2	0,8	4653
3	0,000251	0,0374	0,02	70	2	0,8	4881
4	0,000229	0,0346	0,02	60	2	0,8	4624
5	0,00023	0,0344	0,02	50	2	0,8	4096
6	0,000211	0,0387	0,02	46	2	0,8	4607
7	0,000272	0,0387	0,02	110	2	0,8	4249
8	0,000226	0,0301	0,02	100	2	0,8	4574
9	0,000268	0,0369	0,02	55	2	0,8	4288
10	0,000206	0,0386	0,02	65	2	0,8	4413

3.5. Система автоматического регулирования температуры воздуха, подаваемого в зерносушилку

На рис. 46 приведена САР температуры Θ воздуха, подаваемого в зерносушилку из системы подогрева, включающей в себя теплогенератор 1 с форсункой 2 для распыления жидкого топлива и трубопроводы 3 и 4 для смешивания воздуха и топочных газов. Температура воздуха Θ контролируется датчиком температуры – терморезистором R_d , включенным в мостовую схему 5, которая с помощью резистора R_0 обеспечивает задание требуемого значения температуры воздуха, подаваемого в зерносушилку. Посредством мостовой схемы также сравнивается напряжение U , пропорциональное температуре Θ , с задающим напряжением U_0 (мостовая схема одновременно выполняет функции задающего и сравнивающего органов). Сигнал разбаланса мостовой схемы (сигнал рассогласования) $\Delta U = U_0 - U$ усиливается электронным усилителем 6, выходное напряжение которого U_y управляет заслонкой 7 с

помощью электромагнита 8. За счет соответствующего изменения перемещения X заслонки обеспечивается изменение количества топлива q , сжигаемого в камере сгорания 9 теплогенератора. Тем самым регулируется величина температуры воздуха.

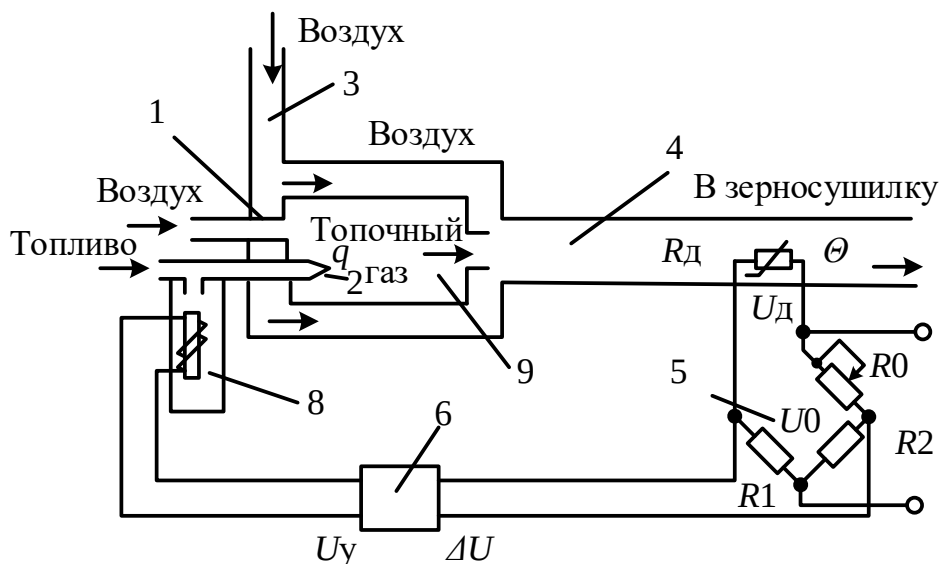


Рис. 46. Схема САР температуры воздуха, подаваемого в зерносушилку

Объектом регулирования в данной системе является теплогенератор, регулирующее воздействие которого – количество топлива q подаваемого в камеру сгорания, а возмущающее воздействие – изменение температуры и влажности атмосферного воздуха. При расчете САР в качестве возмущающего воздействия следует рассматривать изменения температуры атмосферного воздуха Θ_a , приняв условно, что его влажность постоянна.

Динамика САР описывается следующей системой уравнений:

$$T_0 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = k_0 q(t - \tau) + k_B \Theta_a - \text{объект регулирования};$$

$$T_d \frac{dU}{dt} + U = k_d \Theta - \text{датчик температуры};$$

– сравнивающий орган;

$$U_y = k_y \Delta U - \text{электронный усилитель};$$

$X = k_9 U_y$ – заслонка и электромагнит без учета электромеханических переходных процессов (упрощенное уравнение);

$q = k_\phi X$ – уравнение форсунки.

Размерности параметров и их значения по вариантам приведены в табл. 6.
Заданное значение температуры воздуха $\Theta = 120 \pm 2$ °С.

Таблица 6

Значения параметров элементов САР

Вариант	T_0 , с	k_o	τ , с	k_B	T_d , с	k_d , в/°С	k_y	k_z , мм/В	k_Φ , г/с·мм	Θ_a , °С
1	20	1,25	1	0,3	2	0,025	60	1,5	2	25
2	21	1,25	1,5	0,3	2,1	0,025	85	1,5	2	–30
3	22	1,25	1,6	0,3	2,2	0,025	70	1,5	2	20
4	23	1,25	1,7	0,3	2,3	0,025	80	1,5	2	–15
5	24	1,25	1,8	0,3	2,4	0,025	90	1,5	2	22
6	25	1,25	1,9	0,3	2,5	0,025	100	1,5	2	–27
7	20	1,25	1	0,3	2	0,025	105	1,5	2	18
8	23	1,25	2	0,3	2,3	0,025	90	1,5	2	–20
9	22	1,25	1,5	0,3	2,2	0,025	80	1,5	2	–25
10	21	1,25	17	0,3	2,1	0,025	110	1,5	2	19

3.6. Система автоматического регулирования температуры перегретого пара

Температура перегрева пара на выходе котла относится к важнейшим параметрам, определяющим экономичность и надежность работы паровой турбины и энергоблока в целом. В соответствии с требованиями ПТЭ допустимые длительные отклонения температуры перегрева пара от номинального значения, например, для параметров пара $P_{III} = 13$ и $T_{III} = 440$ °С

составляют в сторону увеличения $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в сторону уменьшения – $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Один из возможных вариантов такой системы показан на рис. 47.

Для барабанных котлов наиболее распространен способ регулирования температуры пара на выходе с помощью пароохладителей. Конструктивно участок регулирования первичного перегрева образует часть поверхности нагрева пароперегревателя, включая обогреваемые и необогреваемые трубы, от места ввода охлаждающего агента до выходного коллектора, в котором необходимо поддерживать заданную температуру $T_{\text{пп}}$.

Регулирующим воздействием служит расход охлаждающего агента $G_{\text{пв}}$.

К возмущающим воздействиям относят расход потребляемого пара $G_{\text{пп}}$ и количество теплоты, воспринимаемой от топочных газов $Q_{\text{т}}$.

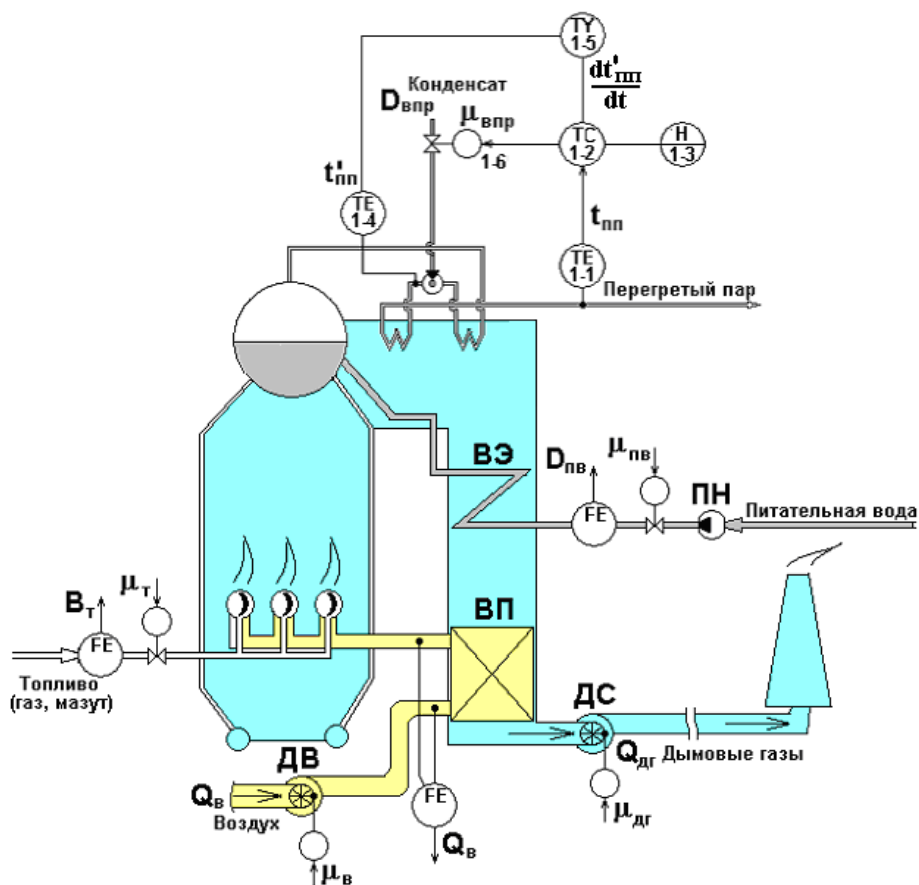


Рис. 47. Схема САР температуры перегретого пара

Динамические свойства объекта регулирования описываются уравнением

$$T_0 \cdot \frac{d}{dt} \cdot T_{\text{III}}(t) + T_{\text{III}}(t) = k_0 \cdot G_{\text{ПВ}}(t) + k_a \cdot G_{\text{T}}(t),$$

где T_0 – постоянная времени, с; k_0 – передаточный коэффициент по регулирующему воздействию; k_a – передаточный коэффициент по возмущающему воздействию.

Уравнения динамики элементов САР следующие:

$$T_{\text{д}} \frac{d \cdot I}{dt} + I = k_{\text{д}} \cdot T_{\text{III}} - \text{датчик};$$

$$\Delta I = I_0 - I - \text{схема сравнения сигналов};$$

$$I_{\text{у}} = k_{\text{у}} \cdot \Delta I - \text{усилитель};$$

$G_{\text{ПВ}} = k_{\Phi} U_{\text{у}}$ – регулирующий орган совместно с двигателем, редуктором и реечным механизмом.

Числовые значения параметров по вариантам заданий приведены в табл. 7. Заданное значение температуры перегретого пара $T_{\text{III}} = 440 \pm 1$ °С.

Таблица 7

Значения параметров элементов САР

Вариант	T_0 , с	k_0	k_a	$T_{\text{д}}$, с	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{у}}$	k_{Φ}	G_{T}
1	90.6	2.37	0.0338	12	0,02	20	0,003	5900
2	96.9	1.81	0.03	11	0,02	24	0,003	5900
3	97	1.55	0.0394	11	0,02	18	0,003	5700
4	91.4	2.62	0.0328	10	0,02	25	0,003	4800
5	95.1	1.9	0.0301	13	0,02	21	0,003	5900
6	94	2.17	0.0329	15	0,02	19	0,003	4700
7	86.8	1.94	0.033	16	0,02	16	0,003	5400
8	97.6	1.22	0.0319	10	0,02	17	0,003	5600
9	82	2.83	0.0303	11	0,02	19	0,003	4500
10	95.8	2.91	0.0348	12	0,02	18	0,003	4600

3.7. Система автоматического регулирования давления в ресивере

На рис. 48 приведена схема САР давления P в ресивере (воздухосборнике) 1, который является в данной системе объектом регулирования. Давление в ресивере регулируется посредством изменения количества воздуха Q , зависящего от положения заслонки 2, то есть от ее линейного перемещения X_3 , которое можно рассматривать как регулирующее воздействие на входе объекта регулирования. Внешним возмущением, вызывающим отклонение регулируемой величины – давления P , является изменение расхода сжатого воздуха Q_c .

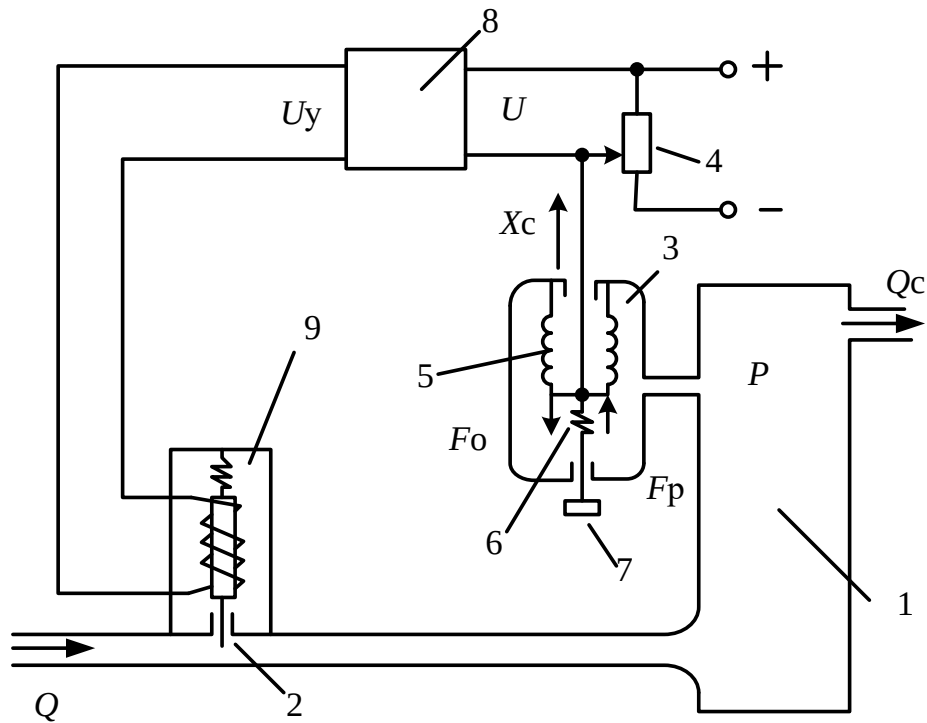


Рис. 48. Схема САР давления в ресивере

Давление в данной системе контролируется с помощью сильфонного датчика 3, выходная величина которого – перемещение X_c сильфона 5 однозначно зависит от разности сил $\Delta F = F_0 - F_p$ где F_p – сила, создаваемая давлением P ; F_0 – сила натяжения пружины 6, которую можно изменять винтом 7.

Перемещение сильфона X_C с помощью потенциометрического преобразователя 4 преобразуется в электрический сигнал – напряжение U , которое усиливается электронным усилителем 8. Выходной сигнал усилителя U_y управляет электромагнитным приводом 9, связанным с заслонкой 2.

В данной САР сильфонный датчик выполняет функции воспринимающего, задающего и сравнивающего органов. Как воспринимающий орган он контролирует давление P , преобразуя его в силу F_P . Задание требуемого давления в ресивере обеспечивается посредством силы F_0 . Как сравнивающий орган сильфон обеспечивает сравнение величин F_P и F_0 , в результате чего, как отмечалось ранее, получается $\Delta F = F_0 - F_P$ – сигнал рассогласования.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР описываются следующей системой уравнений:

$$T_0 \frac{dP}{dt} + P = k_0 X_3 - k_Q Q_C - \text{ресивер};$$

$$F_P = k_B P - \text{воспринимающий орган};$$

$$\Delta F = F_0 - F_P - \text{сравнивающий орган};$$

$$T_2^2 \frac{d^2 X_C}{dt^2} + T_1 \frac{dX_C}{dt} + X_C = k_C \Delta F - \text{сильфон};$$

$$U = k_H X_C - \text{потенциометрический преобразователь};$$

$$U_y = k_y U - \text{усилитель};$$

$$T_3 \frac{dX_3}{dt} + X_3 = k_3 U_y - \text{электромагнитный привод совместно с заслонкой}.$$

Размерности параметров и их числовые значения по вариантам заданий приведены в табл. 8.

Значения параметров элементов САР

Вариант	T_0, c	$k_0,$ кПа/мм	T_1, c	T_2, c	$k_c,$ мм/Н	$k_B,$ Н/кПа	$k_Q,$ кПа-с/м ³	$Q_C,$ м ³ /с	$k_H,$ В/мм	k_y	T_3, c	$k_3,$ мм/В
1	1,3	5	0,2	0,045	0,5	0,5	400	1	0,5	20	0,01	2
2	1,2	5	0,25	0,04	0,5	0,5	360	2	0,5	30	0,01	2
3	0,6	5	0,34	0,022	0,5	0,5	380	3	0,5	25	0,01	2
4	0,15	5	0,25	0,035	0,5	0,5	340	1,5	0,5	24	0,01	2
5	0,7	5	0,3	0,04	0,5	0,5	320	1,2	0,5	22	0,01	2
6	0,8	5	0,18	0,025	0,5	0,5	300	2	0,5	21	0,01	2
7	0,5	5	0,25	0,03	0,5	0,5	280	1,1	0,5	20	0,01	2
8	0,65	5	0,2	0,02	0,5	0,5	360	1,2	0,5	25	0,01	2
9	0,7	5	0,4	0,025	0,5	0,5	400	1,3	0,5	26	0,01	2
10	0,55	5	0,25	0,035	0,5	0,5	410	1,4	0,5	27	0,01	2

Требуемое значение давления $P = 400 \pm 10$ кПа.

3.8. Система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины

На электрических станциях при производстве электроэнергии предъявляются определенные требования к стабильности частоты f генерируемой ЭДС. Частота f однозначно определяется угловой скоростью ω рабочего колеса гидротурбины. В связи с этим гидротурбины на электростанциях оснащаются САР угловой скорости. На рис. 49 показана схема одного из вариантов такой САР.

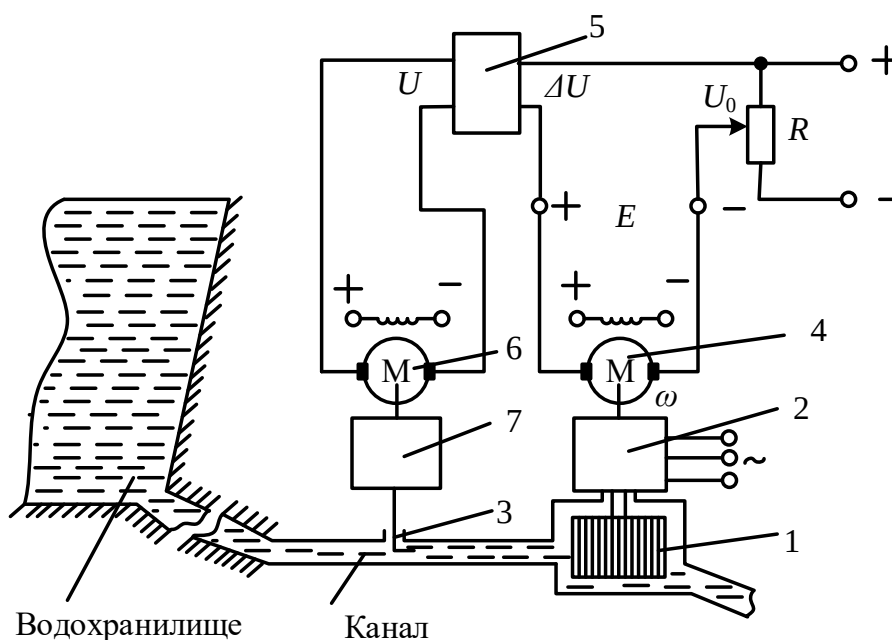


Рис. 49. Схема САР угловой скорости рабочего колеса гидротурбины

В данной системе объектом регулирования является гидротурбина 1, регулируемая величина которого – угловая скорость ω . Она при постоянном расходе воды изменяется в зависимости от нагрузки на валу турбины, т. е. от мощности P , которая потребляется от генератора 2 (с увеличением мощности угловая скорость снижается, а с уменьшением – возрастает). Таким образом, мощность P является внешним возмущающим воздействием на объект регулирования. Для регулирования угловой скорости имеется заслонка 3, с помощью которой изменяется расход воды через турбину. Он однозначно зависит от вертикального перемещения X заслонки. Следовательно, перемещение заслонки X можно рассматривать как регулирующее воздействие объекта регулирования. Угловая скорость ω контролируется посредством тахогенератора 4, ЭДС E которого сравнивается с задающим напряжением U_0 . Сигнал рассогласования ΔU через усилитель 5 управляет посредством электродвигателя 6 и редуктора 7 заслонкой 3.

Динамические свойства САР описываются следующей системой уравнений:

$$T_0 \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_0 X - k_1 P \text{—гидротурбина;}$$

$E = k_T \omega$ – тахогенератор;

$\Delta U = U_0 - E$ – сравнивающий орган;

$U = k_U \Delta U$ – электронный усилитель;

$$T_M T_J \frac{d^3 X}{dt^3} + T_M \frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{dX}{dt} = k_U U - \text{электродвигатель совместно с}$$

редуктором и заслонкой.

Размерности параметров и их числовые значения по вариантам заданий приведены в табл. 9.

Таблица 9

Значения параметров элементов САР

Вариант	T_0, c	$k_0,$ рад/с·см	$k_1,$ рад/с·кВт	$k_m,$ В·с рад	k_y	$P_M,$ кВт	T_M, c	T_J, c	$k_\omega,$ см/с·В
1	4	8	0,08	1,0	80	100	0,02	0,005	0,02
2	3,5	8	0,08	1,0	100	80	0,019	0,004	0,02
3	4,1	8	0,08	1,0	90	70	0,018	0,003	0,02
4	4,2	8	0,08	1,0	85	90	0,017	0,002	0,02
5	4,5	8	0,08	1,0	100	95	0,016	0,002	0,02
6	3,9	8	0,08	1,0	110	85	0,015	0,002	0,02
7	4	8	0,08	1,0	120	75	0,014	0,002	0,02
8	4,3	8	0,08	1,0	85	60	0,02	0,005	0,02
9	3,6	8	0,08	1,0	90	100	0,018	0,003	0,02
10	3,8	8	0,08	1,0	100	95	0,016	0,002	0,02

Заданное значение скорости $\omega = 30 \pm 0,3$ рад/с.

3.9. Система автоматического регулирования угловой скорости электродвигателя постоянного тока

Схема САР, приведенная на рис. 50, обеспечивает стабилизацию угловой скорости электродвигателя постоянного тока, который совместно с рабочим механизмом является объектом регулирования. Регулируемая величина объекта

– угловая скорость двигателя ω , регулирующее воздействие – напряжение U_{Γ} , подаваемое от генератора на якорь двигателя. Возмущающее воздействие на объекте регулирования – момент сопротивления M_c , создаваемый рабочим механизмом. Угловая скорость двигателя ω контролируется тахогенератором, сигнал которого $U_{ТГ}$, пропорциональный скорости, сравнивается с задающим сигналом U_3 . Сигнал рассогласования $\Delta U = U_3 - U_{ТГ}$ усиливается магнитным усилителем и воздействует на обмотку возбуждения генератора, выполняющего функции исполнительного органа (элемента).

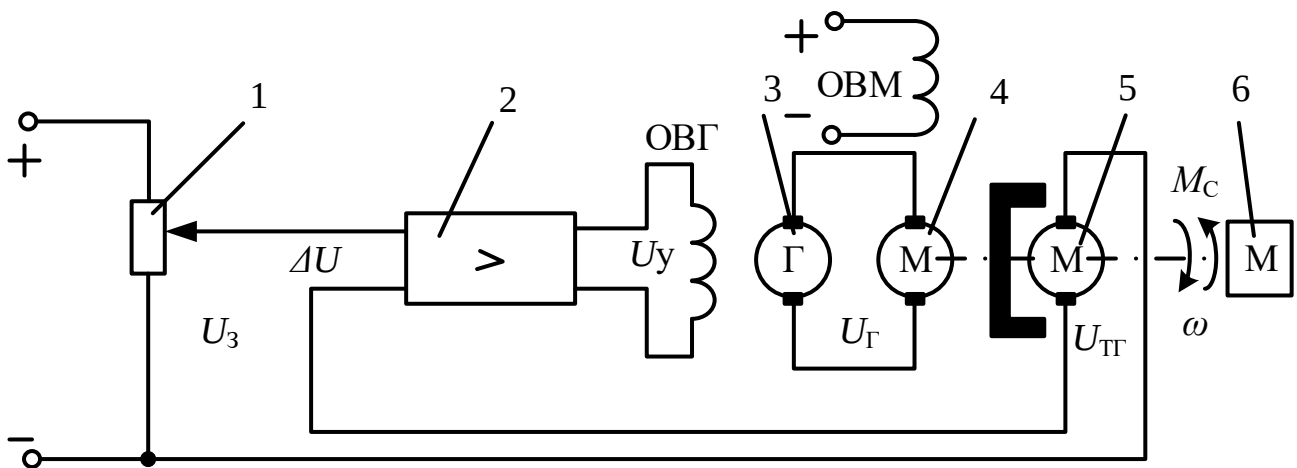


Рис. 50. Схема САР угловой скорости электродвигателя

1 – задающий потенциометр; 2 – магнитный усилитель; 3 – генератор;
4 – двигатель; 5 – тахогенератор; 6 – рабочий механизм.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР описываются следующими уравнениями:

$$T_d \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_d U_{\Gamma} - k_M M_c - \text{объект управления};$$

$$U_{ТГ} = k_{ТГ} \omega - \text{датчик};$$

$$\Delta U = U_3 - U_{ТГ} - \text{сравнивающий орган};$$

$$T_y \frac{dU}{dt} + U = k_y \Delta U - \text{магнитный усилитель};$$

$$T_{\Gamma} \frac{dU_{\Gamma}}{dt} + U_{\Gamma} = k_{\Gamma} U - \text{генератор}.$$

Размерности параметров и их числовые значения по вариантам заданий приведены в табл.10.

Таблица 10

Значения параметров элементов САР

Вариант	T_y	k_y	k_z	T_Γ	k_∂	T_d	k_m	M_C	k_{me}
1	0,02	4,0	2,0	0,1	1,0	0,5	0,02	50	1,0
2	0,015	5,0	1,8	0,12	0,95	0,6	0,03	60	0,9
3	0,018	4,5	1,7	0,15	0,85	0,7	0,04	70	0,8
4	0,022	6,0	1,5	0,2	0,8	0,8	0,05	80	0,7
5	0,02	5,8	1,6	0,16	1,5	0,65	0,06	90	0,6
6	0,025	4,2	2,0	0,25	1,4	0,75	0,07	100	0,5
7	0,02	3,5	2,7	0,22	1,3	0,8	0,08	80	0,4
8	,0028	6,2	2,1	0,3	1,2	0,75	0,02	90	0,5
9	0,018	6,5	2,3	0,16	1,0	0,5	0,013	60	0,6
10	0,014	7,0	2,5	0,2	1,25	0,8	0,015	70	0,7

Заданное значение угловой скорости $\omega = 40$ рад/с.

3.10. Система автоматического регулирования глубины пахоты

Задача такой САР (рис. 51) заключается в стабилизации глубины вспашки, отклонения которой в соответствии с агротехническими требованиями не должны превышать $\pm 1,5$ см и ± 3 см на ровных и на неровных участках.

Работа системы, построенной на принципе регулирования, по отклонению действительной глубины вспашки от заданной, происходит следующим образом. Глубина вспашки H измеряется качающейся планкой с ползком 4. Отклонение планки передается на золотниковый гидрораспределитель 1, который управляет работой гидроцилиндра 2. При отклонении глубины вспашки H в сторону увеличения планка с ползком поднимется и переместит плунжер золотникового гидрораспределителя в такое

положение, при котором масло от гидросистемы трактора начнет поступать в нижнюю полость гидроцилиндра. Поршень гидроцилиндра переместится вверх и тем самым уменьшит заглубление плуга. При уменьшении глубины вспашки система будет действовать в обратном направлении. Пружина 5 обеспечивает постоянный контакт ползка 4 с поверхностью почвы.

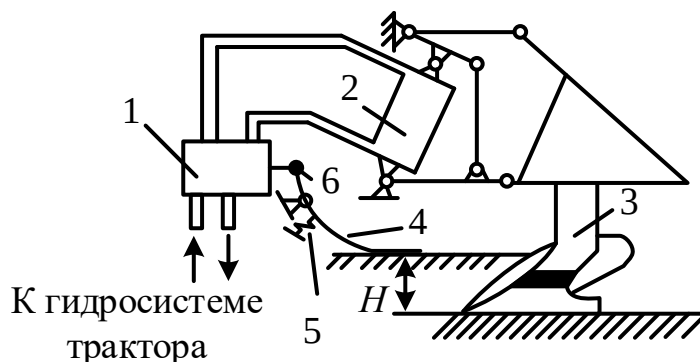


Рис. 51. Схемы САР глубины пахоты

- 1 – золотниковый гидрораспределитель; 2 – гидроцилиндр;
3 – плуг; 4 – качающаяся планка с ползком; 5 – пружина; 6 – винт.

Объект регулирования – плуг 3; выходная величина объекта – глубина вспашки H , входная – перемещение штока l гидроцилиндра. Воспринимающим органом (ВО) служит ползковый копир 4, на вход которого поступает сигнал ΔH об отклонениях величины H от $H_{зад}$, а выходом является пропорциональное отклонению перемещение плунжера золотникового гидрораспределителя y . Усилительный орган (УО) – золотниковый гидрораспределитель 1, на выходе которого появляется поток масла q , пропорциональный y . Исполнительный орган системы (ИО) – гидроцилиндр 2. Поток масла q , направленный в ту или иную полость гидроцилиндра, является входным сигналом исполнительного органа, а выходным сигналом – перемещение l штока гидроцилиндра, изменяющее положение объекта регулирования и его выходную величину H . С помощью винта 6 изменяется положение воспринимающего органа и задается

глубина вспашки $H_{\text{зад}}$. Сравнивающим органом является сам воспринимающий орган (положение основания копира относительно режущей кромки плуга). Только в случае соответствия действительной глубины вспашки H заданной $H_{\text{зад}}$ золотник гидрораспределителя будет устанавливаться в такое положение, при котором масло от гидросистемы не будет попадать в исполнительный орган.

Возмущающими воздействиями f на объект регулирования являются вертикальные колебания плуга, возникающие при движении пахотного агрегата по неровностям поверхности поля.

Исследования системы проведите при изменении задающего воздействия на САР с учетом ступенчато изменяющегося возмущающегося воздействия на объект регулирования.

Динамические свойства САР описываются системой уравнений:

$$\Delta H = H_{\text{зад}} - H \text{ — сравнивающий орган;}$$

$$y = k_{\text{в}} \cdot \Delta H \text{ — воспринимающий орган;}$$

$$q = k_{\text{у}} \cdot y \text{ — усилительный орган;}$$

$$\frac{d}{dt} \cdot l = k_{\text{и}} \cdot q \text{ — исполнительный орган;}$$

$$T_{\text{о}} \cdot \frac{d}{dt} \cdot H + H = k_{\text{о}} \cdot l \text{ — объект регулирования (без учета возмущающих воздействий).}$$

Параметры $k_{\text{у}}$, $k_{\text{в}}$, $k_{\text{и}}$, $k_{\text{о}}$ и $T_{\text{о}}$ — соответственно передаточные коэффициенты и постоянная времени. Их размерности и значения по вариантам указаны в табл. 11. Заданное значение глубины вспашки $H_{\text{зад}} = 0.25 \pm 0.015$ м.

Таблица 11

Значения параметров элементов САР

Вариант	k_B	k_y	$k_{и}$	k_o	T_o, C
1	0,4	1,9	1,1	3,5	0,1
2	0,5	1,8	1,05	3,5	0,09
3	0,6	1,71	1,0	3,5	0,08
4	0,8	1,6	0,95	3,5	0,07
5	1	1,5	0,9	3,5	0,06
6	3	1,4	0,85	3,5	0,06
7	5	1,3	0,8	3,5	0,07
8	7	1,2	0,75	3,5	0,08
9	9	1,1	0,7	3,5	0,09
10	4	1,0	0,65	3,5	0,1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалёв Д.А., Шаряков В.А., Шарякова О.Л. Теория автоматического управления: учеб. пособие/ ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2020. – 79 с.
2. Ковалёв Д.А., Томчина О.П., Шаряков В.А., Шарякова О.Л. Теория автоматического управления. Линейные системы: учебно–методическое пособие для выполнения лабораторных работ / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2019. – 84 с.
3. Определение параметров типового закона регулирования САР: методические указания к выполнению курсовой работы / сост.: А.Л. Ляшенко; – СПб., 2014. – 35 с.
4. Сенигов П.Н. Теория автоматического управления: Конспект лекций. – Челябинск: ЮУрГУ, 2000 – 93 с.
5. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления/ под ред. В. А. Бесекерского. Изд. 4-е – М.: Наука, 1972.
6. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат., 1982. – 392 с.

Учебное издание

Дмитрий Александрович Ковалёв
Владимир Анатольевич Шаряков
Ольга Леонидовна Шарякова
Ирина Александровна Труханова

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Учебно-методическое пособие
по курсовому проектированию**

Редактор и корректор В.А. Басова
Технический редактор Л.Я. Титова

Темплан 2020 г., поз. 119

Подп. к печати 24. 12. 20.

Формат 60x84/16.

Бумага тип. №1. Печать офсетная.

Печ. л. 4.0.

Уч. – изд. л. 4.0.

Тираж 100 экз. Изд. № 119.

Цена «С»

Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,
СПб., ул. И. Черных, 4.