

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

А. А. Косарева, С. С. Стебунов

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ В БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве пособия
для специальности 1-39 02 03 «Медицинская электроника»*

Минск БГУИР 2022

УДК 681.5:606(076)
ББК 32.965+28я73
К71

Рецензенты:

кафедра конструирования и производства приборов
Белорусского национального технического университета
(протокол № 10 от 18.05.2021);

ведущий научный сотрудник лаборатории математической кибернетики
государственного научного учреждения
«Объединённый институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси»
кандидат технических наук Э. В. Снежко

Косарева, А. А.

К71 Автоматическое управление в биотехнических системах : пособие /
А. А. Косарева, С. С. Стебунов. – Минск : БГУИР, 2022. – 84 с. : ил.
ISBN 978-985-543-667-7.

Излагается теоретический материал, приводятся примеры решения задач, а также варианты задач для самостоятельного решения и тесты по пройденному материалу. Пособие охватывает темы практических занятий дисциплины «Биотехнические системы программного управления».

УДК 681.5:606(076)
ББК 32.965+28я73

ISBN 978-985-543-667-7

© Косарева А. А., Стебунов С. С., 2022
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиозлектроники», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Практическое занятие № 1. Построение функциональных схем систем автоматического управления	4
Практическое занятие № 2. Математическое описание функций систем управления	11
Практическое занятие № 3. Элементы структурных схем, основные и дополнительные правила преобразования структурных схем.....	27
Практическое занятие № 4. Алгебраические и частотные критерии устойчивости систем управления.....	41
Практическое занятие № 5. Методы оценки качества переходного процесса управления	56
Практическое занятие № 6. Основы проектирования биотехнических систем программного управления	64
Список использованных источников	84

Практическое занятие № 1

ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Цель практического занятия: ознакомиться с терминологией биотехнических систем автоматического управления, научиться классифицировать и составлять структурные и функциональные схемы.

Краткие теоретические сведения

Система управления – совокупность функциональных элементов, каждый из которых влияет на выходное значение.

Системы автоматического регулирования (САР) применяются для регулирования отдельных параметров (температура, давление, уровень жидкости и т. д.) в объекте управления.

Система автоматического управления (САУ) поддерживает или улучшает функционирование управляемого объекта автоматически с помощью заложенных в неё свойств и алгоритмов. При проектировании биотехнической системы программного управления используются биологические и технические элементы (звенья), связанные между собой для выполнения заданной целевой функции.

В качестве требований к САУ принято выделять следующие:

1 Точность. Отражает в себе погрешность параметров работы устройства, определяет пределы ошибок, допущенных при использовании устройства в нормальных условиях эксплуатации. Точность может быть улучшена с помощью элементов обратной связи, для повышения точности любой системы управления в ней должен присутствовать детектор ошибок. При проектировании биотехнических систем программного управления точность играет важную роль, так как терапевтическое устройство влияет на биологическое звено, а измерительное устройство измеряет его параметры. Часто под биологическим звеном подразумеваются человеческие ткани, органы.

2 Чувствительность. Параметры системы управления всегда меняются при изменении условий окружающей среды, внутренних помех или любых других параметров. Чувствительность отражает в себе степень влияния внешних параметров на внутреннюю работу системы. При проектировании САУ следует учитывать режимы работы устройств и воздействие внешних параметров, способных повлиять на выходное значение. При этом САУ должна быть чувствительна к сигналам на входе и нечувствительна к внешним воздействиям.

3 Устойчивость. Важная характеристика системы управления, отражает способность системы возвращаться в исходное состояние при возникновении и подавлении возмущающего внешнего воздействия.

4 *Полоса пропускания.* Диапазон рабочих частот определяет полосу пропускания системы управления. Ширина полосы должна быть максимально возможной для частотной характеристики системы управления определённой задачи. Например, при проектировании систем измерения ЭКГ-сигналов выделяют три частотных диапазона: до 20 Гц; 20–70 Гц; свыше 70 Гц.

5 *Быстродействие системы.* Это время, необходимое для достижения стабильной производительности. Хорошая система управления обладает высоким уровнем быстродействия. Переходный период для такой системы очень мал.

6 *Колебательность.* Уровень и число колебаний на выходе САУ определяют качество такой системы. При проектировании биотехнических САУ требуется уделять отдельное внимание амплитуде и длительности возникающих колебаний, так как они могут негативно повлиять на биологическое звено.

Выделяют два типа САУ: замкнутые и разомкнутые. В *замкнутых* системах управления присутствует звено обратной связи, позволяющее регулировать изменение выходного параметра при отклонении входного значения от заданной величины. *Разомкнутая* система отличается тем, что при изменении заданной входной величины система не контролирует и не компенсирует данное изменение.

По принципу управления САУ можно разделить на следующие типы:

1 *Программное управление* – управление происходит с помощью заранее заложенного алгоритма.

2 *Управление по возмущению* (или принцип компенсации) – система, в которой передаваемое возмущение способно повлиять на алгоритм работы программы.

3 *Управление по отклонению* (или управление с помощью обратной связи) – система, в которой корректирующее воздействие зависит от выходного параметра, а не от передаваемого на систему возмущения.

4 *Комбинированное управление* – сочетание предыдущих типов управления, наиболее часто встречается на практике.

Каждая САУ может быть представлена в виде схемы. Это позволяет облегчить изучение и математический анализ САУ, так как взаимосвязь между функциональными блоками системы представлена графически.

Схема является основным документом, поясняющим принцип действия и взаимодействия различных элементов, модулей, устройств биотехнических САУ. Наиболее часто используют структурные, функциональные и принципиальные схемы.

Структурная схема описывает базовые составные части САУ с отображением динамических и статических звеньев, математическими правилами связей между ними и внутренними алгоритмами преобразования информации.

Функциональной схемой называется схема, отражающая функции, выполняемые отдельными элементами биотехнической автоматической системы. Связи между элементами обозначают линиями со стрелками, указывающими направление действия сигналов. Звенья отображаются в виде прямоугольников,

внутри которых обычно указывают переходные функции графически или в виде математических выражений. Примером функциональной схемы является схема работы аппарата ИВЛ с указанием движения газов по воздухопроводам при работе устройства.

Принципиальной схемой САУ называют схему с детальным изображением электрических, электронных, электромеханических и других элементов, входящих в САУ.

Каждая САУ имеет в своём составе управляющее устройство и объект управления [4–6] (рисунок 1.1).

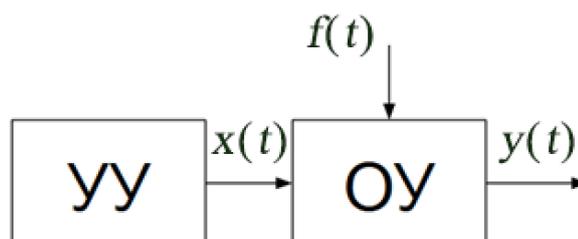


Рисунок 1.1 – Принцип действия САУ

На рисунке 1.1 УУ – управляющее устройство; ОУ – объект управления; $x(t)$ – управляющее (входное) воздействие; $f(t)$ – возмущающее (внешнее) воздействие; $y(t)$ – управляемая (выходная) величина.

Первостепенно при проектировании САУ необходимо подумать о том, что будет являться объектом управления, а что – управляющим устройством.

Разберём пример. Представим, что необходимо составить структурную, функциональную и принципиальную схемы для дозатора лекарственных средств, например инсулиновой помпы. В данном случае в качестве объекта управления выступает поршень насоса, а в качестве управляющего устройства – программа микроконтроллера, отвечающая за скорость и периодичность введения инсулина.

На рисунках 1.2 и 1.3 представлены структурная и функциональная схемы инсулиновой помпы. В данном случае система реализована с использованием комбинированного принципа управления. Устройство управления представляет собой микроконтроллер (МК) с заложенной программой подачи лекарства и измерения уровня сахара в крови. При отклонении уровня сахара от нормы помпа издаёт звуковой сигнал, оповещая владельца о необходимости снизить или повысить количество подаваемого инсулина. Существуют также помпы замкнутой петли (системы с обратной связью), которые дополнительно включают отдельный датчик, с заданной периодичностью считывающий значение сахара. С помощью модуля передачи данных значение сахара поступает на основной модуль устройства, и количество подаваемого инсулина в биологическую ткань (БТ) регулируется автоматически.

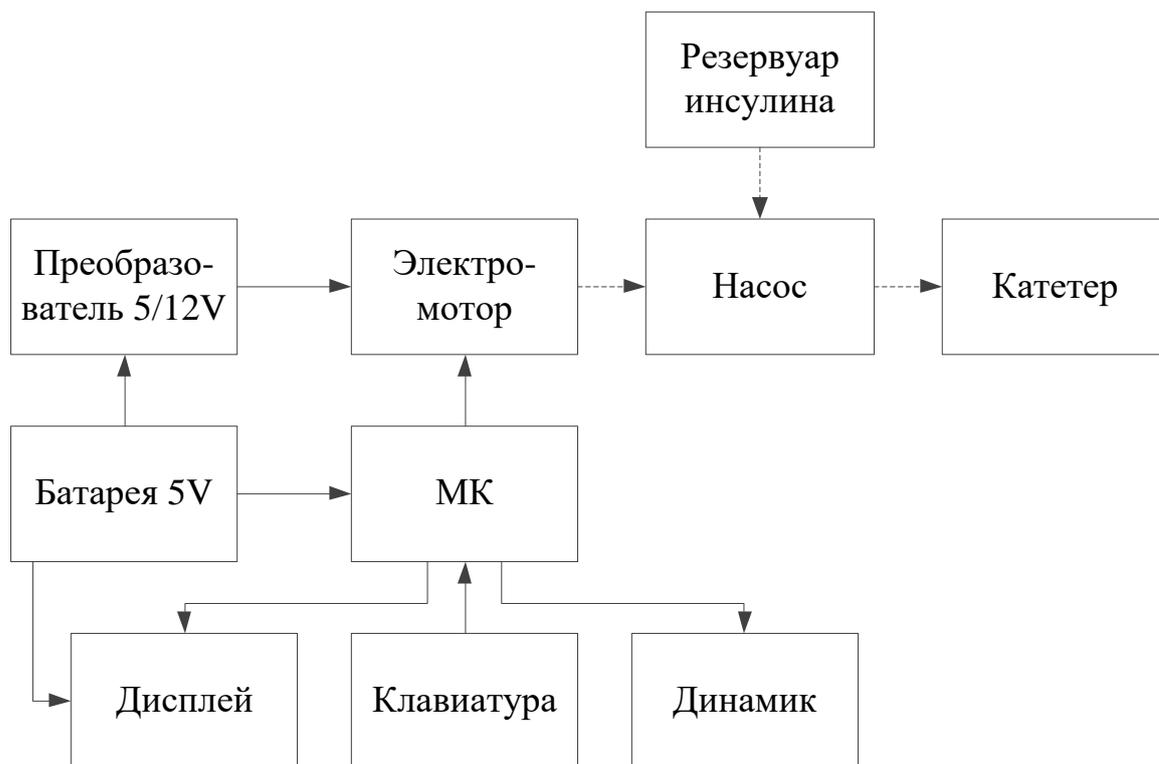


Рисунок 1.2 – Структурная схема инсулиновой помпы

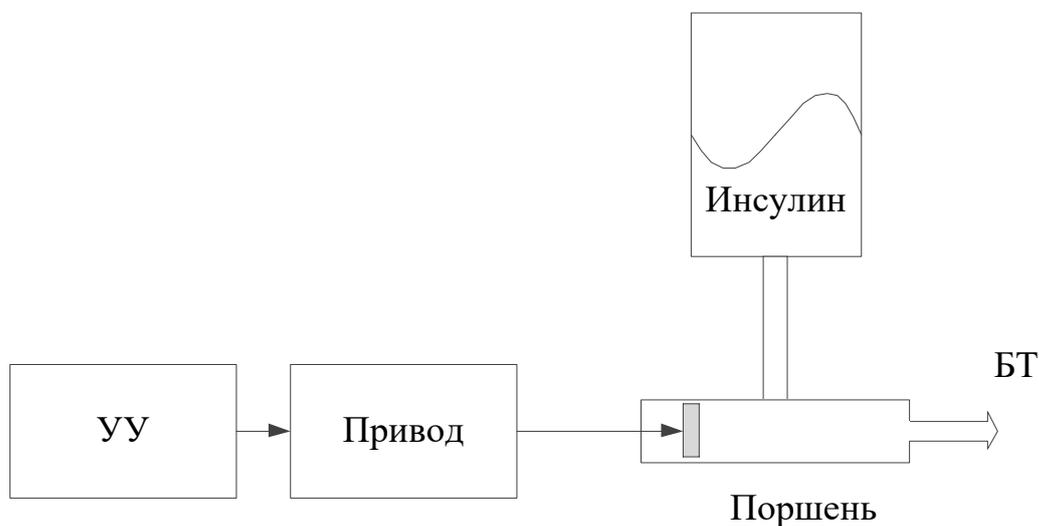


Рисунок 1.3 – Функциональная схема инсулиновой помпы

Функциональная схема отображает протекающие процессы в отдельных функциональных узлах, в нашем случае это движение инсулина.

При проектировании структурных схем количество и состав блоков будут зависеть от поставленной разработчиком задачи. На начальном этапе разработчику необходимо определиться с основными характеристиками и требованиями к устройству. Отдельное внимание уделяется питанию устройства (от сети, от

батареи и т. д.), входным и выходным каскадам (какие используются датчики, есть ли потребность аналого-цифрового преобразования и т. д.).

Порядок выполнения задания

- 1 Придумать пример биотехнической САУ.
- 2 Разработать структурную и функциональную схемы биотехнической САУ, пояснить принцип её работы.
- 3 Определить управляющее устройство и объект управления в предлагаемой биотехнической САУ.
- 4 Определить принцип управления данной САУ.

Содержание отчёта

- 1 Цель практического занятия и краткие теоретические сведения по изученной теме.
- 2 Описание предложенного примера биотехнической САУ.
- 3 Структурная и функциональная схемы устройства с описанием основных блоков и процессов.
- 4 Пояснения согласно пунктов 3 и 4 порядка выполнения задания.
- 5 Выводы по проделанной работе.

Вопросы для самопроверки

- 1 Что такое объект управления и управляющее воздействие?
- 2 Какие принципы управления вы знаете?
- 3 Какие примеры САУ вам известны?
- 4 Чем отличаются структурная, функциональная и принципиальная схемы?
- 5 Какие требования к САУ можно выделить?
- 6 В чём отличие замкнутой и разомкнутой системы управления?
- 7 В чём отличие системы управления от системы регулирования?

Тест по пройденной теме

- 1 Что является основным объектом управления в автоматической системе дозированной подачи лекарств?
- А. Микроконтроллер.
Б. Резервуар с жидкостью.
В. Поршень-дозатор.
Г. Дисплей.
Д. Кнопки устройства.

- 2 Что является управляющим устройством в автоматической системе дозированной подачи лекарств?
- А. Микроконтроллер.
 - Б. Резервуар с жидкостью.
 - В. Поршень-дозатор.
 - Г. Дисплей.
 - Д. Кнопки устройства.
- 3 Структурная схема (выберите верное утверждение)...
- А. Отображает электрические связи в устройстве.
 - Б. Отображает основные электрические компоненты схемы (на уровне элементной базы).
 - В. Отображает алгоритм работы устройства.
 - Г. Описывает функциональные узлы САУ.
 - Д. Является упрощённой принципиальной схемой.
- 4 Что является объектами управления в медицинском термометре?
- А. Контроллер.
 - Б. Датчик температуры.
 - В. Источник питания.
 - Г. Снимаемое значение температуры.
 - Д. Дисплей.
- 5 Что является основным объектом управления в аппарате УЗИ?
- А. Корпус устройства.
 - Б. Контроллер.
 - В. Ультразвуковой излучатель.
 - Г. Выходные каскады устройства.
 - Д. Нет правильного ответа.
- 6 Определите понятие «биотехническая САУ».
- А. Система автоматического управления, которая содержит в своём составе биологический объект.
 - Б. Система, которая управляется оператором (человеком).
 - В. Система, которая способна оказывать воздействие на человека.
 - Г. Нет правильного ответа.
 - Д. Все ответы верны.

7 Замкнутая система — это...

- А. Система, располагающаяся в механически закрытом корпусе.
- Б. Система, которая имеет столько же входов, сколько и выходов.
- В. Система, которая не имеет выхода, а только входы.
- Г. Система, которая состоит из конечных устройств.
- Д. Система, которая имеет в своём составе обратную связь.

8 Что относится к биотехническим САУ?

- А. Томограф.
- Б. Лампа для маникюра.
- В. ИК-термометр.
- Г. Миостимулятор.
- Д. Все перечисленные варианты.

9 Системой, для которой критично важен параметр быстродействия, является...

- А. Термометр.
- Б. Аппарат УЗИ.
- В. Стационарный электрокардиограф.
- Г. Система автоматической подачи инсулина.
- Д. Аппарат магнитотерапии.

10 Почему биотехнические САУ обладают повышенными требованиями к точности, чувствительности, быстродействию и т. д.?

- А. Они используются для работы с биологическими тканями, живыми организмами, в том числе с людьми, и могут влиять на жизненно важные показатели.
- Б. Они имеют в своём составе много сложных блоков.
- В. Они дорого стоят, соответственно, необходимо следить за качеством выпускаемой продукции.
- Г. Они необходимы для одновременного мониторинга показателей.
- Д. Биотехнические САУ ничем не отличаются от обычных и не имеют повышенных требований к показателям точности, чувствительности, быстродействию.

Практическое занятие № 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФУНКЦИЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Цель практического занятия: получить навыки составления дифференциальных уравнений функциональных звеньев систем управления, расчёта передаточных функций замкнутых и разомкнутых систем.

Краткие теоретические сведения

При проектировании САУ следует принять каждое звено за чёрный ящик, поведение которого описывается математической функцией. Не зная внутреннего устройства звена, мы способны оценить его параметры. Это даст возможность предугадать поведение сигнала на выходе звена в зависимости от его формы на входе. Данный способ позволяет работать с передаточными функциями системы на начальном этапе проектирования САУ. Однако при переходе от начального этапа к этапу разработки принципиальной схемы устройства важно уметь сопоставить математическое описание с реальным устройством. В данном практическом занятии рассмотрим основы составления дифференциальных уравнений функциональных звеньев САУ (рисунок 2.1).

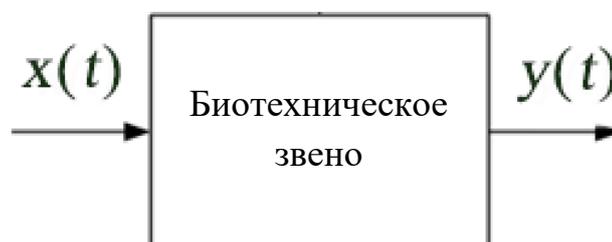


Рисунок 2.1 – Обозначение биотехнического звена на структурной схеме

В общем виде объекты и системы описываются нелинейным дифференциальным уравнением, связывающим входное воздействие $x(t)$ на систему и его производные по времени с реакцией $y(t)$ системы и ее производными:

$$F(y, \dot{y}, \ddot{y}, x, \dot{x}) = 0, \quad (2.1)$$

где \dot{y} , \ddot{y} – производные от выходного сигнала; \dot{x} – производная от входного воздействия.

Для решения уравнения необходимо задать начальные условия (значения переменных до начала воздействия при $t = 0$). При работе с САУ обычно приращения управляющих воздействий не учитываются, так как их значения малы по сравнению со стационарными значениями исходной функции. Это объясняется тем, что для корректной работы устройства выходное значение не должно сильно

отклоняться от определяемого разработчиком, иначе САУ становится нерегулируемой (неуправляемой) и теряется смысл её проектирования. На основании этого система может быть линеаризована, т. е. нелинейное дифференциальное уравнение может быть заменено линейным относительно этих приращений [1–3]:

$$-b_1x(t) - b_0x'(t) + a_0y''(t) + a_1y'(t) + a_2y(t) = 0, \quad (2.2)$$

где b_1, b_0, a_0, a_1, a_2 – коэффициенты, которые выражаются следующим образом:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial x'}\right)^0 = b_0; \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^0 = b_1; \left(\frac{\partial F}{\partial y''}\right)^0 = a_0; \left(\frac{\partial F}{\partial y'}\right)^0 = a_1; \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^0 = a_2. \quad (2.3)$$

Запишем данное уравнение в операторной форме:

$$\left(a_0 \frac{d^2}{dt^2} + a_1 \frac{d}{dt} + a_2\right)y(t) = \left(b_0 \frac{d}{dt} + b_1\right)x(t). \quad (2.4)$$

Переведём выражение в операторную форму, принимая, что $p \equiv \frac{d}{dt}$:

$$(a_0p^2 + a_1p + a_2y)Y(p) = (b_0p + b_1)X(p), \quad (2.5)$$

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_0p + b_1}{a_0p^2 + a_1p + a_2}. \quad (2.6)$$

Выражение $W(p)$ называется *передаточной функцией* системы и отражает в себе отношение изображения выходной величины $Y(p)$ к входной величине $X(p)$. С помощью передаточной функции можно представить работу любого звена.

В теории автоматического управления широко применяется операторный метод, поэтому подробнее остановимся на основных понятиях интегрального преобразования Лапласа (L -преобразование). Преобразование Лапласа связывает функцию комплексного переменного (изображение) и функцию вещественного переменного (оригинал). Прямое преобразование Лапласа имеет вид

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt = L|f(t)|, \quad (2.7)$$

где p – оператор Лапласа.

При работе с преобразованием Лапласа решение задач сводится к использованию таблиц, в которых указаны основные соотношения (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Таблица перехода от оригинала к изображению

Оригинал $x(t)$	Изображение $X(p)$
$\delta(1)$	1
$1(t)$	$\frac{1}{p}$
$1(t - \tau)$	$\frac{1}{p} e^{-\tau p}$
t^n	$\frac{n!}{p^{n+1}}$
$e^{-\alpha p}$	$\frac{1}{p + \alpha}$
$t^n e^{-\alpha p}$	$\frac{n!}{(p + \alpha)^{n+1}}$
$\sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
$\cos(\omega t)$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$
$e^{-\alpha p} \sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{(p + \alpha)^2 + \omega^2}$
$e^{-\alpha p} \cos(\omega t)$	$\frac{p + \alpha}{(p + \alpha)^2 + \omega^2}$

Преобразование Лапласа позволяет получить переходную, импульсную и частотные характеристики звена.

Переходная характеристика ($h(t)$) представляет собой отклик звена на единичное ступенчатое воздействие (рисунок 2.2).

Импульсная характеристика – ответ системы при подаче на вход единичного импульса $\delta(t)$. Амплитуда единичного импульса стремится к бесконечности, тогда как время импульса стремится к 0 (рисунок 2.3). Импульс называется единичным, так как его площадь на графике принимают за единицу.

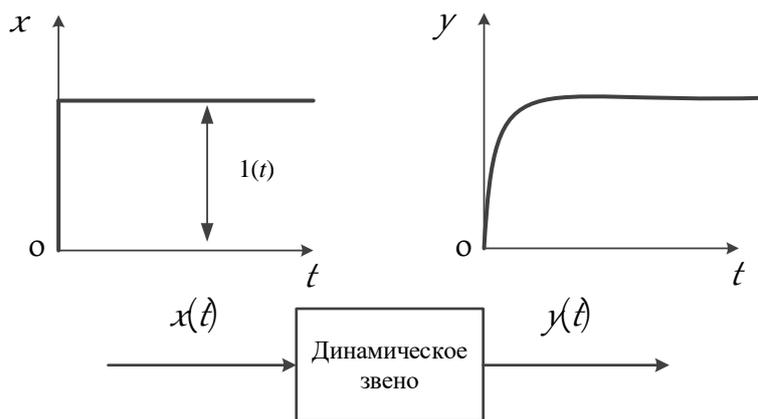


Рисунок 2.2 – Переходная характеристика звена

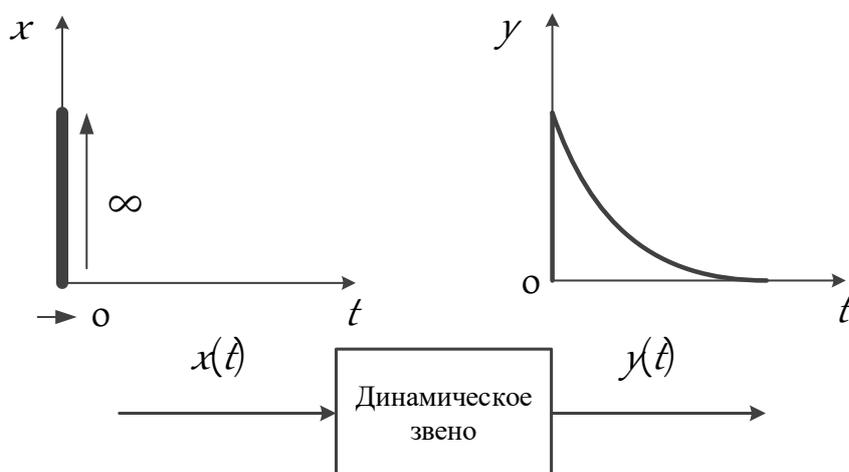


Рисунок 2.3 – Импульсная характеристика звена

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) отображает изменение амплитуды сигнала на выходе звена в зависимости от частоты сигнала на входе.

Фазовая частотная характеристика (ФЧХ) показывает сдвиг фазы между входным и выходным сигналом.

Амплитудно-фазовая частотная характеристика объединяет в себе ФЧХ и АЧХ. Математически представим её в виде функции от комплексной переменной:

$$W(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \quad (2.8)$$

где $A(\omega)$ – АЧХ звена; $\varphi(\omega)$ – ФЧХ звена.

Разложим вектор $W(j\omega)$ на мнимую $jQ(\omega)$ и действительную части $P(\omega)$:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega). \quad (2.9)$$

АЧХ и ФЧХ находятся следующим образом:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2}, \quad (2.10)$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (2.11)$$

При этом можно перейти от функции вида $W(j\omega)$ к функции вида $W(p)$, произведя замену мнимого оператора, $j\omega$ заменяют на оператор p .

Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика (ЛАФЧХ) отображает АЧХ и ФЧХ, построенные в логарифмической системе координат. ЛАФЧХ позволяет рассматривать характеристики звеньев, которые сильно изменяют свои параметры при увеличении частот на несколько порядков, упрощает анализ в частотной области, даёт возможность оперировать с разным порядком частот и допускает линеаризацию отдельных участков частотных характеристик.

Более подробно частотные характеристики рассматриваются при выполнении первой лабораторной работы.

Рассмотрим задачи, применимые к изученной теории.

Задача 1. Определить передаточную функцию по исходному дифференциальному уравнению

$$\ddot{y} + 5\dot{y} = 10\dot{x}.$$

Дифференциальные уравнения согласно вариантам указаны в таблице 2.2.

Решение:

1 Запишем уравнение в более развернутой форме:

$$y(t) \left(\frac{d^2}{dt^2} + 5 \frac{d}{dt} \right) = \left(10 \frac{d}{dt} \right) x(t).$$

2 Перейдём от оригинала к изображению:

$$Y(p)(p^2 + 5p) = 10pX(p).$$

3 Найдём передаточную функцию:

$$W(p) = \frac{10p}{p^2 + 5p}.$$

Таблица 2.2 – Варианты дифференциальных уравнений к задаче 1

Вариант	Дифференциальное уравнение
1	$\ddot{y} - 15\dot{y} + 2y = \ddot{x} + 4x$
2	$\dot{y} + 2y = 6\ddot{x}$
3	$\ddot{y} = \ddot{x} - 4\dot{x} + 4x$
4	$\ddot{y} + 6\dot{y} + 9y = \ddot{x} + 7x$
5	$10\ddot{y} - 4\dot{y} + 3y = 2\ddot{x} + x$
6	$3\dot{y} + y = \ddot{x}$
7	$11\ddot{y} = -\ddot{x} - x$
8	$\dot{y} + 18y = \ddot{x} - 9x$

Задача 2. Записать дифференциальное уравнение звеньев, заданное передаточной функцией

$$W(p) = \frac{p + 4}{5p + 1}.$$

Передаточные функции согласно вариантам указаны в таблице 2.3.

Решение:

1 Раскроем выражение, пользуясь определением передаточной функции:

$$Y(p)(5p + 1) = (p + 4)X(p).$$

2 Произведём обратную замену и перейдём от изображения к оригиналу:

$$y(t) \left(5 \frac{d}{dt} + 1 \right) = \left(\frac{d}{dt} + 4 \right) x(t).$$

3 Получим дифференциальное уравнение:

$$5y'(t) + y(t) - x'(t) - 4x(t) = 0.$$

Таблица 2.3 – Варианты передаточных функций к задаче 2

Вариант	Передаточная функция
1	$W(p) = \frac{3p + 9}{6p^2 + 4p + 1}$
2	$W(p) = \frac{2 + p}{1 + p^2}$
3	$W(p) = \frac{5}{10p^3 + 3p}$
4	$W(p) = \frac{2p^2}{p^2 + p + 2}$
5	$W(p) = \frac{4p + 8}{5p^2 + p + 1}$
6	$W(p) = \frac{1 + p}{1 + p^2}$
7	$W(p) = \frac{10}{p^3 + p}$
8	$W(p) = \frac{6p^2 + 2}{3p^2 + p}$

Задача 3. Составить дифференциальное уравнение по принципиальной схеме и получить передаточную функцию звена (рисунок 2.4).

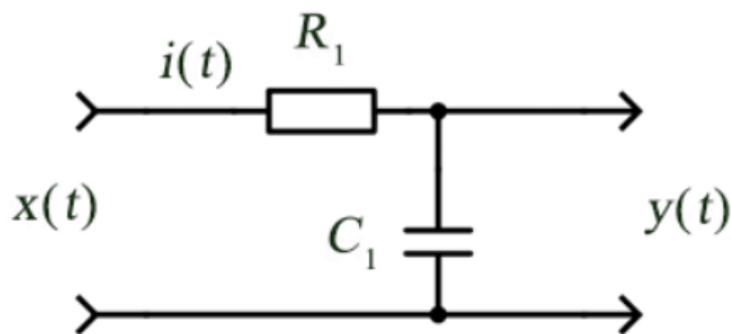


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема четырёхполюсника

Решение:

1 На рисунке к задаче представлен четырёхполюсник, состоящий из пассивного и активного элементов. Чтобы получить дифференциальное уравнение такого четырёхполюсника, необходимо вспомнить основы электротехники. Ток,

протекающий через конденсатор, можно выразить через напряжение $y(t)$ следующим образом:

$$i(t) = C_1 \frac{dy(t)}{dt}.$$

2 Используя закон Ома, можно выразить ток другим способом:

$$i(t) = \frac{x(t) - y(t)}{R_1}.$$

3 Приравниваем выражения:

$$C_1 \frac{dy(t)}{dt} = \frac{x(t) - y(t)}{R_1}.$$

4 Перейдём от оригинала к изображению:

$$C_1 R_1 p Y(p) = X(p) - Y(p),$$

$$(C_1 R_1 p + 1) Y(p) = X(p),$$

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{C_1 R_1 p + 1}.$$

5 Соответственно, передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{1}{C_1 R_1 p + 1}.$$

Такое звено называется интегрирующим, данная RC -цепочка представляет собой простой фильтр нижних частот. Более подробно познакомимся с ним в рамках следующих практических занятий. Варианты принципиальных схем к задаче 3 представлены на рисунке 2.5.

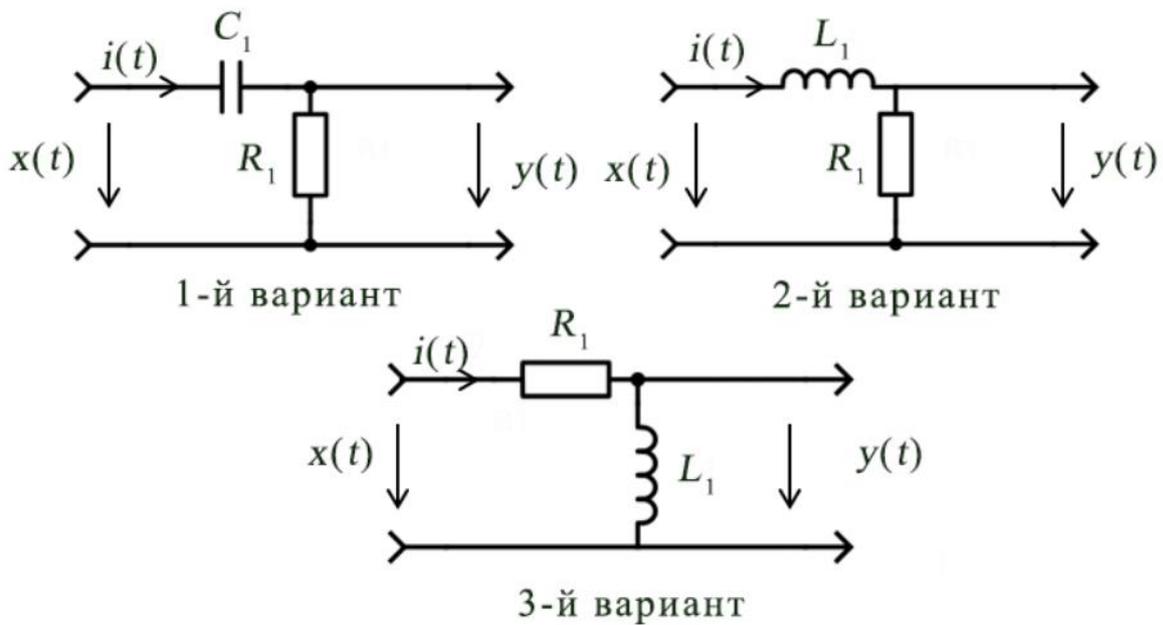


Рисунок 2.5 – Варианты принципиальных схем

Задача 4. Составить дифференциальное уравнение по принципиальной схеме и получить передаточную функцию звена (работа со звеньями n -порядка) (рисунок 2.6).

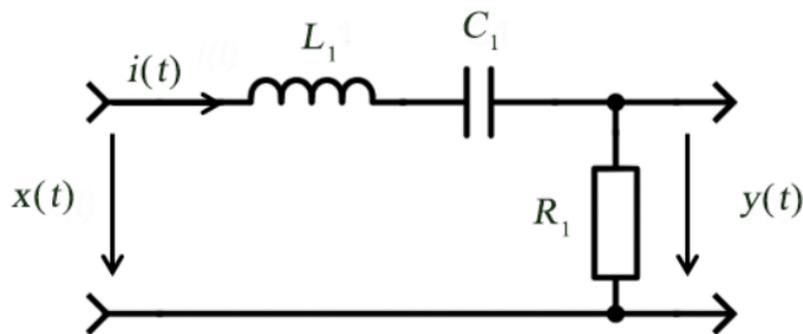


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема четырёхполюсника для расчёта

Решение:

1 Для начала составим уравнение Кирхгофа для данного четырёхполюсника:

$$\begin{cases} x(t) = u(t)_{L_1} + u(t)_{C_1} + u(t)_{R_1}, \\ y(t) = u(t)_{R_1}. \end{cases}$$

2 Определим уравнение напряжения и тока для каждого элемента цепи:

$$i(t) = C_1 \frac{du(t)_{C_1}}{dt} \Rightarrow u(t)_{C_1} = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt;$$

$$u(t)_{R_1} = i(t)R = \frac{R}{C} \int_0^t i(t) dt;$$

$$u(t)_{L_1} = L \frac{di(t)}{dt}.$$

3 Подставим всё в систему уравнений:

$$\begin{cases} x(t) = L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + y(t), \\ y(t) = i(t)R. \end{cases}$$

4 Перейдём от изображения к оригиналу:

$$\begin{cases} X(p) = LpI(p) + \frac{1}{Cp} I(p) + Y(P), \\ Y(p) = RI(p). \end{cases}$$

5 Соответственно, выразим значение $I(p)$:

$$I(p) = \frac{Y(p)}{R}.$$

6 Подставим в первое уравнение системы:

$$X(p) = Lp \frac{Y(p)}{R} + \frac{1}{Cp} \frac{Y(p)}{R} + Y(P).$$

7 Найдём передаточную характеристику:

$$\begin{aligned} X(p) &= \left(Lp \frac{1}{R} + \frac{1}{RCp} + 1 \right) Y(P); \\ W(p) &= \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{\left(Lp \frac{1}{R} + \frac{1}{RCp} + 1 \right)} = \frac{1}{\left(\frac{Lp^2C + 1 + RCp}{RCp} \right)} = \frac{RCp}{Lp^2C + 1 + RCp}. \end{aligned}$$

8 Таким образом, мы получаем передаточную характеристику и дифференциальное уравнение для звена второго порядка.

Варианты принципиальных схем представлены на рисунке 2.7.

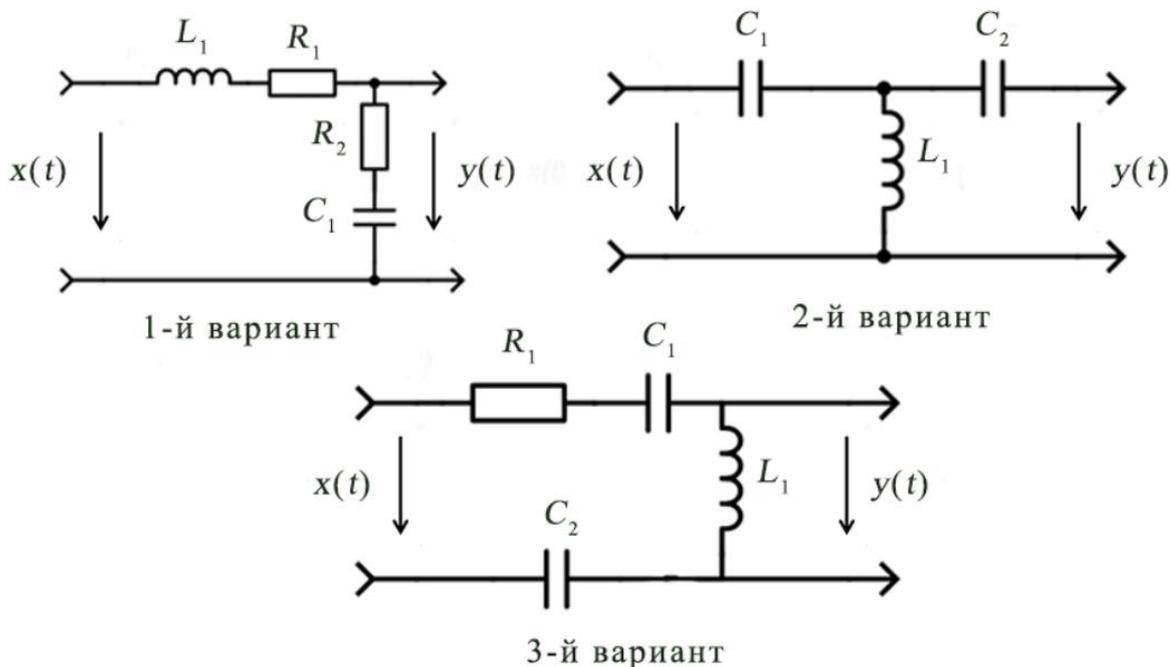


Рисунок 2.7 – Принципиальная схема четырёхполюсника для расчёта

Задача 5. Построить частотные и переходную характеристики звена (АЧХ, ФЧХ), используя передаточную функцию

$$W(p) = \frac{1}{1 + 3p}.$$

Решение:

1 Произведём замену $p = j\omega$:

$$W(j\omega) = \frac{1}{1 + 3j\omega}.$$

2 Разложим на мнимую и действительную части, умножив и числитель, и знаменатель на сопряженное (по формуле разности квадратов):

$$W(j\omega) = \frac{1}{1 + 3j\omega} = \frac{1 - 3j\omega}{(1 + 3j\omega)(1 - 3j\omega)} = \frac{1 - 3j\omega}{1 + 3j\omega - 3j\omega + 9\omega^2} = \frac{1 - 3j\omega}{1 + 9\omega^2}.$$

3 Таким образом, мы смогли избавиться от мнимой части в знаменателе. Определим мнимую и действительную части функции $W(j\omega)$:

$$W(j\omega) = \frac{1}{1 + 9\omega^2} - \frac{3\omega}{1 + 9\omega^2} \cdot j.$$

4 Найдём выражение для АЧХ и ФЧХ:

$$\begin{aligned} A(j\omega) = |W(j\omega)| &= \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{1 + 9\omega^2}\right)^2 + \left(\frac{-3\omega}{1 + 9\omega^2}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1 + 9\omega^2}{(1 + 9\omega^2)^2}} = \frac{\sqrt{1 + 9\omega^2}}{|1 + 9\omega^2|}; \end{aligned}$$

$$\varphi(j\omega) = \arg W(j\omega) = \operatorname{arctg} \frac{-\frac{3\omega}{1 + 9\omega^2}}{\frac{1}{1 + 9\omega^2}} = \operatorname{arctg}(-3\omega).$$

5 Построим АЧХ и ФЧХ, откладывая по оси абсцисс частоты, а по оси ординат значения амплитуд и фазы. Полученные графики (рисунок 2.8) описывают работу устройства в зависимости от частот входных сигналов.

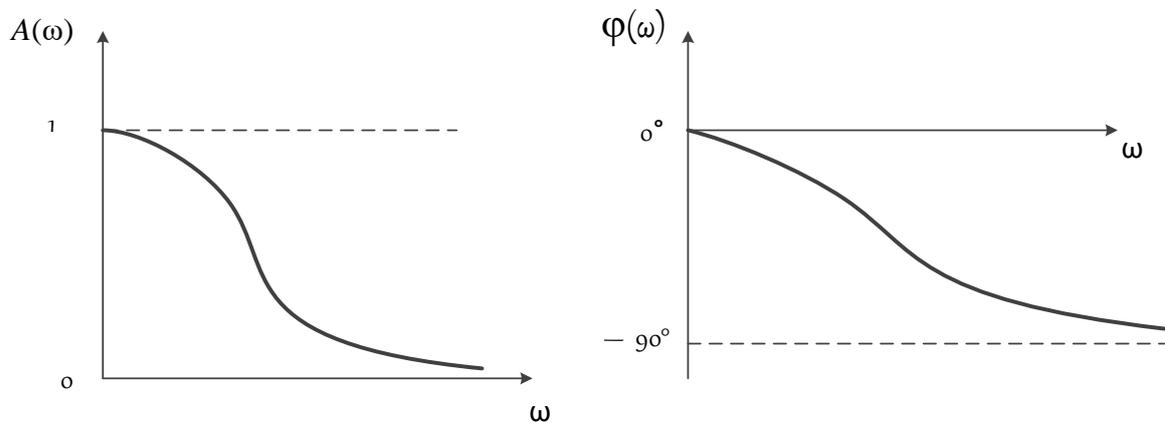


Рисунок 2.8 – Построенные графики для АЧХ и ФЧХ

В таблице 2.4 указаны варианты передаточных функций для самостоятельного решения.

Таблица 2.4 – Варианты передаточных функций к задаче 5

Вариант	Передаточная функция
1	$W(p) = 15p$

Вариант	Передаточная функция
2	$W(p) = \frac{4}{3p}$
3	$W(p) = 6p + 2$
4	$W(p) = \frac{2}{1 + 2p}$
5	$W(p) = p + 5$
6	$W(p) = \frac{1}{2p}$
7	$W(p) = 7p + 14$
8	$W(p) = \frac{1}{1 + p}$

Задача 6. Найти переходную характеристику звена с передаточной функцией

$$W(p) = 5p .$$

Решение:

1 При переходной функции входное воздействие $x(t) = 1(t)$ является единичным. Перейдём к изображению:

$$L[x(t)] = L[1(t)] = \frac{1}{p} .$$

2 Из определения передаточной функции можно получить зависимость для переходной функции:

$$H(p) = W(p) \frac{1}{p} ;$$

$$H(p) = 5p \frac{1}{p} ;$$

$$H(p) = 5 .$$

3 Найдём оригинал переходной функции, обратившись к таблице 2.1:

$$h(t) = 5 \cdot \delta(t) .$$

Варианты передаточных функций для самостоятельного решения представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Варианты передаточных функций к задаче 6

Вариант	Передаточная функция
1	$W(p) = \frac{p}{1+p}$
2	$W(p) = \frac{1}{2p}$
3	$W(p) = 15$
4	$W(p) = \frac{1}{1+5p}$
5	$W(p) = \frac{2p}{1+3p}$
6	$W(p) = \frac{1}{p}$
7	$W(p) = 28$
8	$W(p) = \frac{2}{1+3p}$

Порядок выполнения задания

- 1 Получить варианты заданий для расчёта у преподавателя.
- 2 Получить уравнение в операторной форме и передаточную характеристику для задачи 1 (см. таблицу 2.2).
- 3 Найти коэффициенты дифференциального уравнения в задаче 2 (см. таблицу 2.3).
- 4 Составить дифференциальное уравнение и определить передаточную функцию системы по принципиальной схеме в задачах 3 и 4 (см. рисунки 2.5, 2.7).
- 5 Построить частотные характеристики звена (АЧХ, ФЧХ) по варианту задания для задачи 5 (см. таблицу 2.4).
- 6 Получить выражение для переходной характеристики по передаточной функции в задаче 6 (см. таблицу 2.5).

Содержание отчёта

- 1 Цель практического занятия и краткие теоретические сведения по изученной теме.

2 Решение задач 1–6 согласно представленным примерам.

3 Выводы по проделанной работе.

Вопросы для самопроверки

1 Что такое переходная и импульсная характеристики?

2 Как найти ЛАФЧХ динамического звена?

3 Как получить математическое описание динамического звена?

4 Какую функцию выполняет преобразование Лапласа в САУ?

5 Какую функцию выполняют частотные и временные характеристики при проектировании биотехнических САУ?

Тест по пройденной теме

1 Определите понятие «переходная характеристика».

А. Временная характеристика.

Б. Частотная характеристика.

В. Фазовая характеристика.

Г. Фазово-частотная характеристика.

Д. Амплитудно-частотная характеристика.

2 Определите понятие «динамическое звено».

А. Звено, которое способно совершать движение между блоками системы.

Б. Звено, которое не изменяет поступающий на него сигнал.

В. Звено, которое преобразует поступающий в него сигнал.

Г. Звено обратной связи.

Д. Замкнутое звено.

3 Чему равно изображение по Лапласу $5(t)$?

А. $\frac{1}{p}$.

Б. $\frac{1}{5p}$.

В. $\frac{1}{p} + 5$.

Г. $\frac{5}{p}$.

Д. Невозможно определить.

4 Что такое p ?

А. Переменная.

Б. Оператор Лапласа.

В. Обозначение частоты.

Г. Обозначение функции комплексной переменной.

Д. Нет правильных ответов.

5 Что такое передаточная функция?

- А. Ответ системы на единичный импульс.
- Б. Ответ системы на ступенчатое воздействие.
- В. Функция, равная отношению выхода ко входу.
- Г. Изображение по Лапласу.
- Д. Нет правильного ответа.

6 Какая функция является передаточной по дифференциальному уравнению $3\dot{y} + 5y = 3\ddot{x} + 10x$?

- А. $W(p) = \frac{3p^2+10}{3p^2+5}$.
- Б. $W(p) = \frac{3p^2+5}{3p^2+10}$.
- В. $W(p) = \frac{3p^2-10}{3p^2-5}$.
- Г. $W(p) = \frac{3p^2-5}{3p^2-10}$.
- Д. $W(p) = \frac{10p^2+3}{5p^2+3}$.

7 Какая функция является передаточной по дифференциальному уравнению $\dot{y} + 4y = 2\dot{x}$?

- А. $W(p) = \frac{2p}{4p^2+p}$.
- Б. $W(p) = \frac{4p}{p^2+2p}$.
- В. $W(p) = \frac{4p}{2p^2+p}$.
- Г. $W(p) = \frac{p}{8p^2+2p}$.
- Д. $W(p) = \frac{2p}{p^2+4p}$.

8 Какое уравнение является дифференциальным по передаточной функции $W(p) = \frac{p}{p^2+3}$?

- А. $\dot{y} + 3y = \dot{x}$.
- Б. $\ddot{y} + 3 = \dot{x}$.
- В. $\ddot{y} + 3\dot{y} = 3x$.
- Г. $3\ddot{y} + \dot{y} = x$.
- Д. $3\ddot{y} + \dot{y} = \dot{x}$.

9 По какой формуле находится АЧХ?

- А. $A(\omega) = \sqrt{P(\omega) + Q(\omega)}$.
- Б. $A(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}$.
- В. $A(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{P(\omega)}{Q(\omega)}$.
- Г. $A(\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$.
- Д. $A(\omega) = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2}$.

10 Что позволяет ФЧХ?

- А. Определить разброс амплитуды системы.
- Б. Определить разность фаз между входными и выходными сигналами.
- В. Определить временные параметры исследуемого сигнала.
- Г. Определить изображение по Лапласу передаточной функции.
- Д. Нет правильных ответов.

Практическое занятие № 3 ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ, ОСНОВНЫЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРАВИЛА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

Цель практического занятия: ознакомиться с основными структурными элементами САУ, изучить основные правила проектирования и законы преобразования структурных схем.

Краткие теоретические сведения

Любую систему автоматического управления можно представить в виде совокупности входящих в неё звеньев. *Структурной схемой* в САУ называют графическое представление, в котором математическая модель отображается с помощью звеньев и элементов.

Базовыми элементами при проектировании структурных схем являются динамическое звено, содержащее в себе передаточную функцию, и сумматор, реализующий суммирование и вычитание. Динамическое звено отображается в виде прямоугольника, а сумматор – в виде круга (рисунок 3.1).

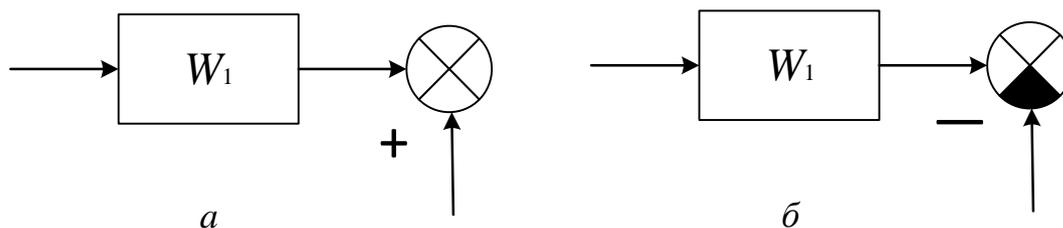


Рисунок 3.1 – Динамическое звено с передаточной функцией W_1 и сумматор, реализующий сложение (а), вычитание (б)

Существует несколько видов соединения динамических звеньев:

1 Последовательное соединение (рисунок 3.2).

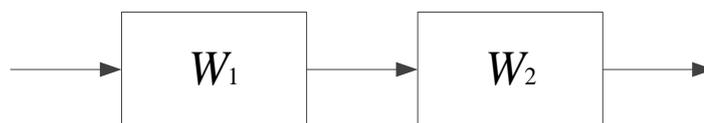


Рисунок 3.2 – Последовательное соединение звеньев W_1 и W_2

При таком соединении звеньев общая передаточная функция рассчитывается как произведение передаточных функций входящих в соединение звеньев:

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p). \quad (3.1)$$

2 Параллельное соединение (рисунок 3.3).

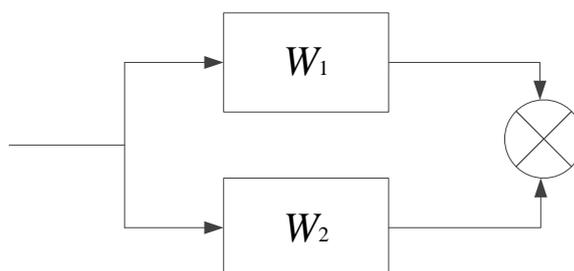


Рисунок 3.3 – Параллельное соединение звеньев W_1 и W_2

При таком соединении звеньев общая передаточная функция рассчитывается как сумма передаточных функций входящих в соединение звеньев:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p). \quad (3.2)$$

3 Замкнутый контур с отрицательной обратной связью.

Отрицательная обратная связь – вид обратной связи, при котором изменение выходного сигнала компенсируется изменением входного сигнала (рисунок 3.4).

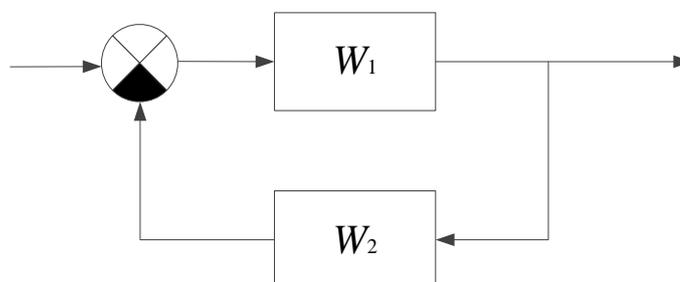


Рисунок 3.4 – Отрицательная обратная связь звеньев W_1 и W_2

Передаточная функция такого звена находится по формуле

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)}. \quad (3.3)$$

При этом существуют системы с единичной отрицательной обратной связью (рисунок 3.5).

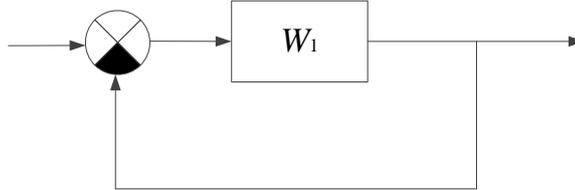


Рисунок 3.5 – Единичная отрицательная обратная связь

Передаточную функцию в таком случае можно найти по формуле

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)}. \quad (3.4)$$

4 Замкнутый контур с положительной обратной связью.

Положительная обратная связь – вид обратной связи, при котором изменение выходного сигнала увеличивается за счёт изменения входного сигнала (рисунок 3.6).

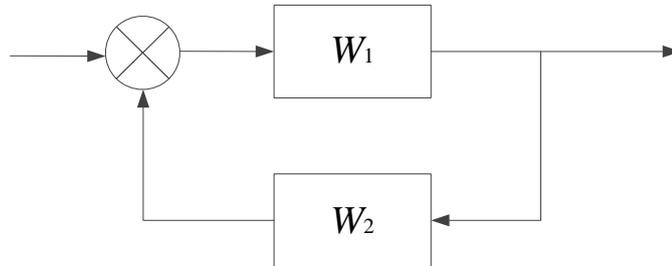


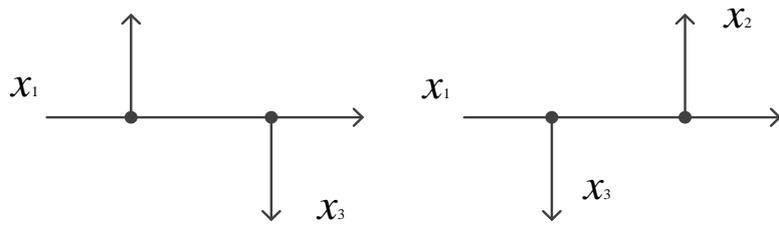
Рисунок 3.6 – Положительная обратная связь звеньев W_1 и W_2

Формула для нахождения передаточной функции звеньев, соединённых положительной обратной связью:

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 - W_1(p)W_2(p)}. \quad (3.5)$$

Выделяют несколько правил структурных преобразований:

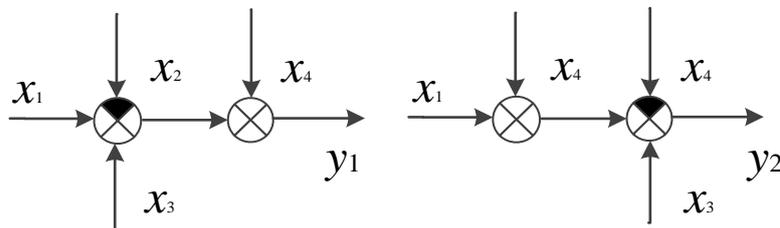
1 Правило перестановки узлов (рисунок 3.7).



$$x_1 = x_2 = x_3$$

Рисунок 3.7 – Правило перестановки узлов

2 Правило перестановки сумматоров (рисунок 3.8).



$$y_1 = y_2 = x_1 - x_2 + x_3 + x_4$$

Рисунок 3.8 – Правило перестановки сумматоров

3 Правило перестановки звена через узел и узла через звено (рисунки 3.9, 3.10).

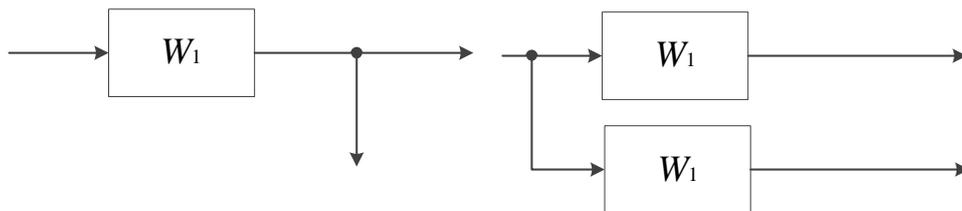


Рисунок 3.9 – Правило перестановки звена через узел

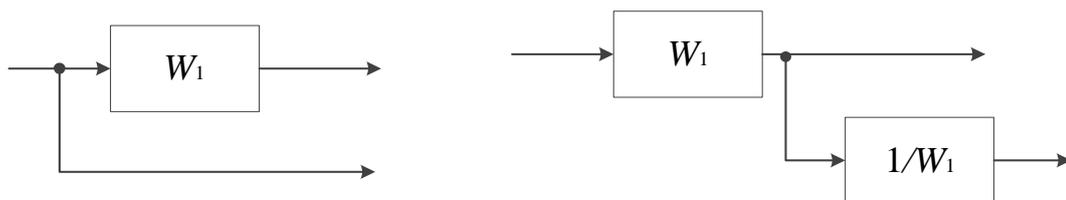


Рисунок 3.10 – Правило перестановки узла через звено

4 Правило перестановки сумматора с выхода на вход (рисунок 3.11).

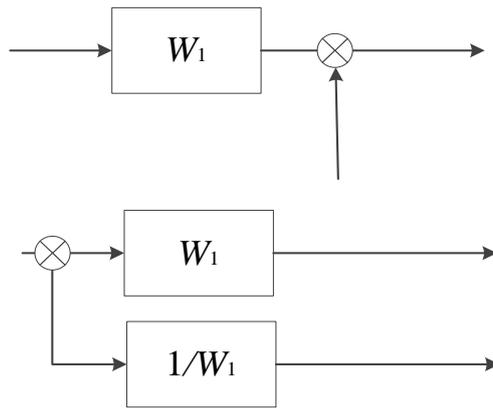


Рисунок 3.11 – Правило перестановки сумматора с выхода на вход

5 Правило перестановки сумматора с входа на выход (рисунок 3.12).

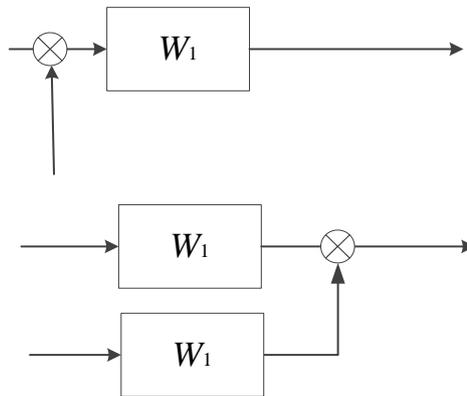


Рисунок 3.12 – Правило перестановки сумматора с входа на выход

Перейдём к решению задач.

Задача 1. Преобразовать структурную схему, представленную на рисунке 3.13.

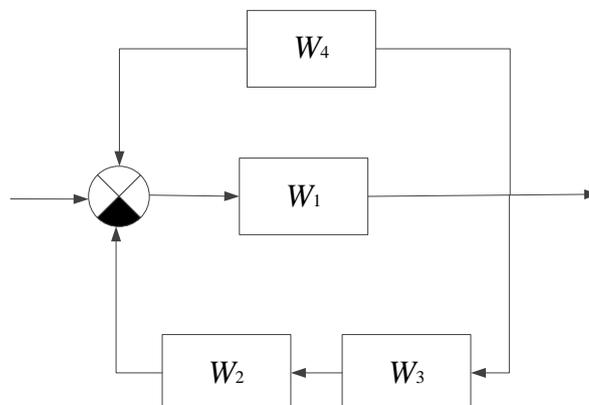


Рисунок 3.13 – Структурная схема для преобразования

Решение:

1 Звенья W_2 и W_3 соединены последовательно, общая передаточная функция образованного ими звена записывается следующим образом (рисунок 3.14).

$$W_{23} = W_2 \cdot W_3 .$$

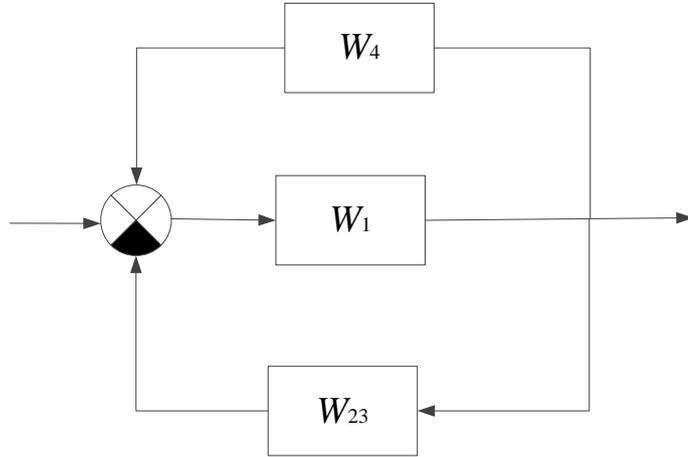


Рисунок 3.14 – Структурная схема после объединения звеньев

2 Звенья W_{23} и W_4 образуют отрицательную и положительную обратную связь по отношению к звену W_1 . Объединим два звена, сохраняя знаки (рисунок 3.15):

$$W_{423} = -W_{23} + W_4 = -W_2 \cdot W_3 + W_4 .$$

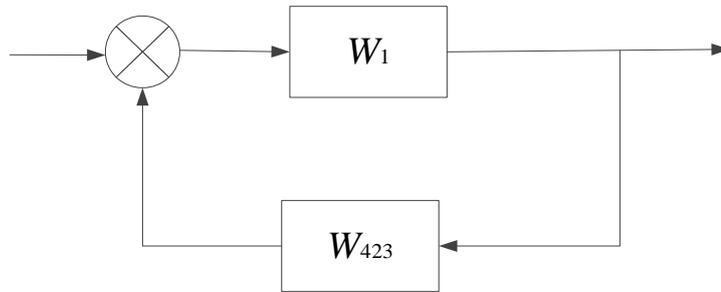


Рисунок 3.15 – Получившаяся положительная обратная связь

3 Теперь звенья W_{234} и W_1 соединены положительной обратной связью, найдём общую передаточную функцию:

$$W_{4231} = \frac{W_1}{1 - W_1 W_{423}} = \frac{W_1}{1 - W_1 (-W_2 \cdot W_3 + W_4)} .$$

Задача 2. Преобразовать структурную схему, представленную на рисунке 3.16.

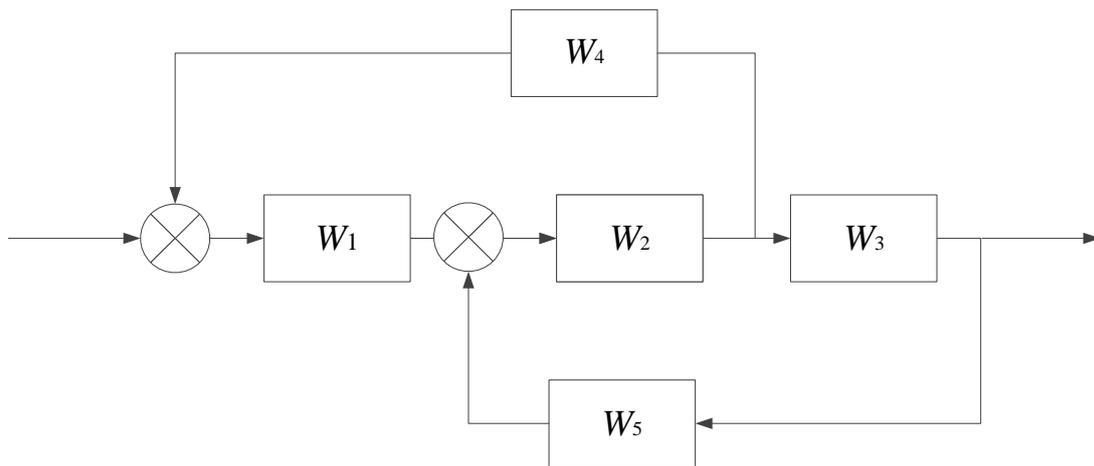


Рисунок 3.16 – Структурная схема для преобразования

Решение:

1 В данной структурной схеме возникает необходимость использовать правило переноса сумматора и узла. Перенесём узел через звено W_3 (рисунок 3.17).

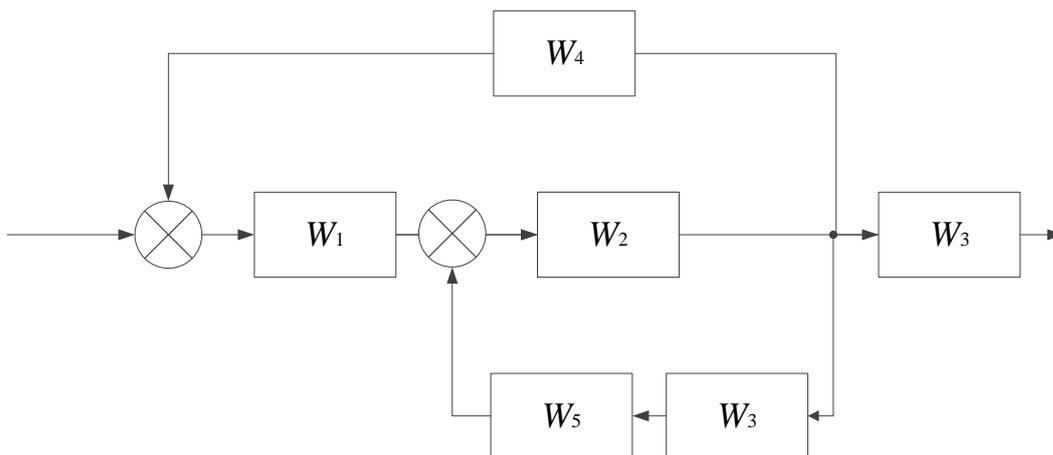


Рисунок 3.17 – Перенос узла через звено

2 Объединим последовательно соединённые звенья:

$$W_{53} = W_5 \cdot W_3 .$$

3 Воспользуемся правилом перестановки сумматора (рисунок 3.18).

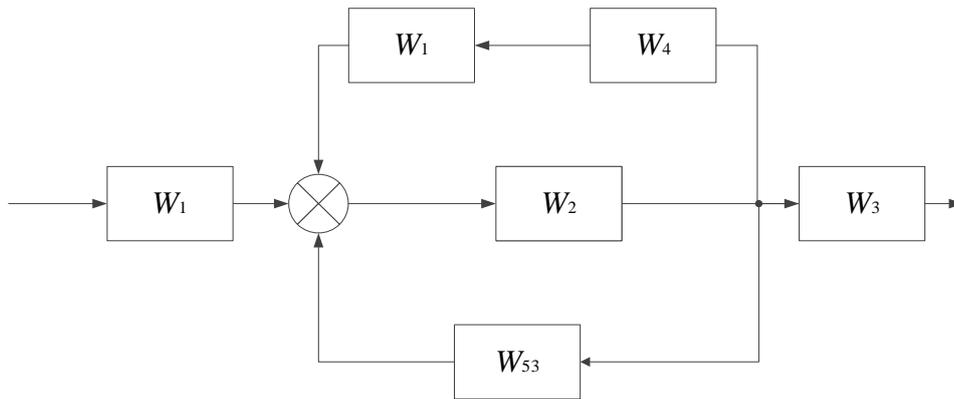


Рисунок 3.18 – Перестановка сумматора

4 Объединим последовательно соединённые звенья:

$$W_{14} = W_1 \cdot W_4.$$

5 Звенья W_{14} и W_{53} образуют положительную обратную связь по отношению к звену W_2 . Объединим два звена, сохраняя знаки (рисунок 3.19):

$$W_{1453} = W_{14} + W_{53} = W_1 \cdot W_4 + W_5 \cdot W_3.$$

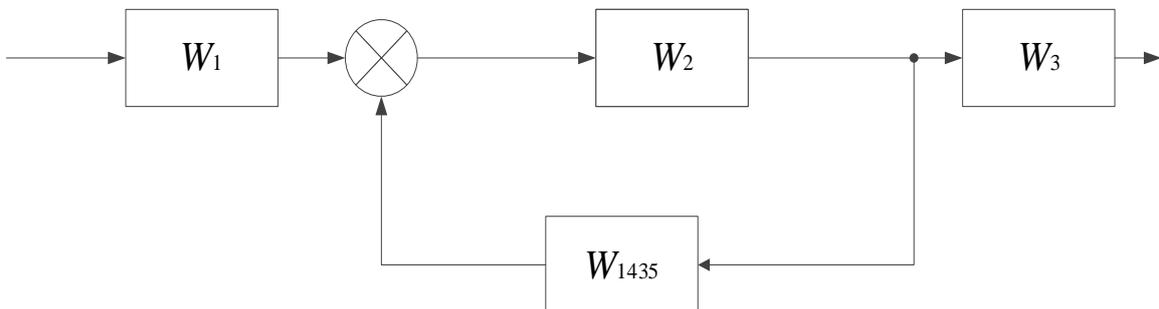


Рисунок 3.19 – Переход к обратной связи с одним звеном

6 Воспользуемся формулой нахождения обратной связи (рисунок 3.20).

$$W_{2\text{пос}} = \frac{W_2}{1 - W_2 W_{1453}} = \frac{W_2}{1 - W_2 (W_1 \cdot W_4 + W_5 \cdot W_3)}.$$

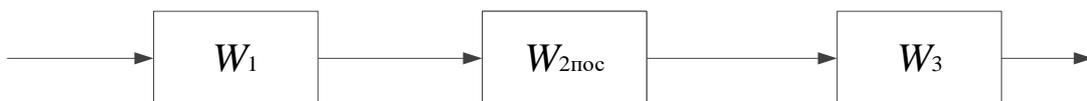


Рисунок 3.20 – Последовательные звенья после преобразования

После преобразования звена с обратной связью осталось последовательное соединение. Рассчитаем итоговую передаточную функцию:

$$W_{\text{итог}} = W_1 \cdot W_{2\text{пос}} \cdot W_3 = W_1 \cdot W_3 \cdot \frac{W_2}{1 - W_2(W_1 \cdot W_4 + W_5 \cdot W_3)}$$

Зная передаточную функцию для каждого звена, можем рассчитать общую передаточную функцию.

Порядок выполнения задания

- 1 Получить вариант структурной схемы (рисунки 3.21–3.28) и передаточных функций (таблица 3.1) у преподавателя.
- 2 Упростить структурную схему согласно правилам преобразования.
- 3 Найти общую передаточную функцию схемы в виде соединения входящих звеньев.
- 4 Зная выражение передаточной функции каждого звена, определить общую передаточную функцию схемы.

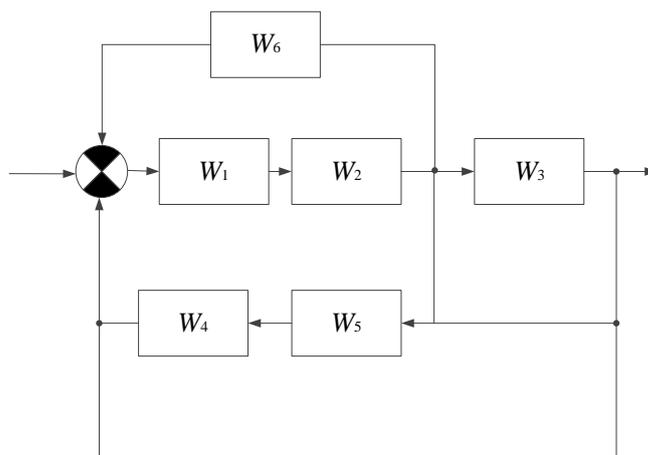


Рисунок 3.21 – Структурная схема для варианта 1

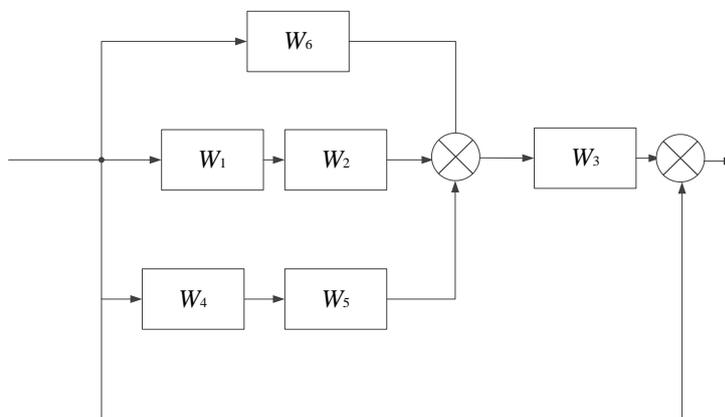


Рисунок 3.22 – Структурная схема для варианта 2

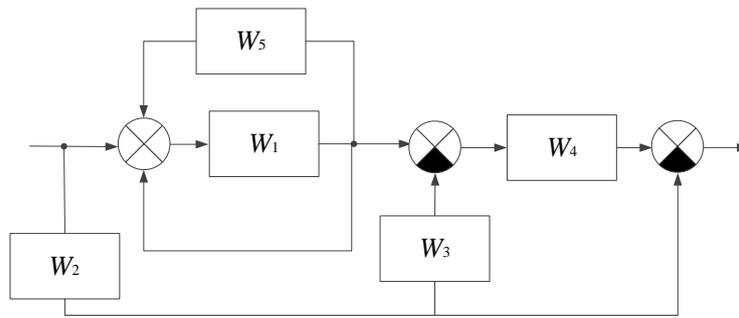


Рисунок 3.23 – Структурная схема для варианта 3

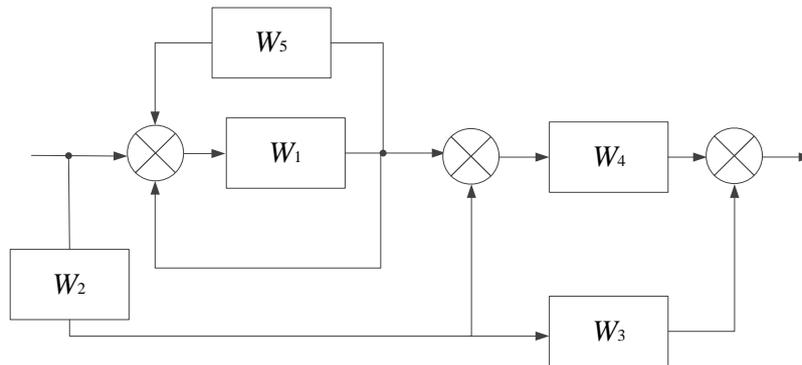


Рисунок 3.24 – Структурная схема для варианта 4

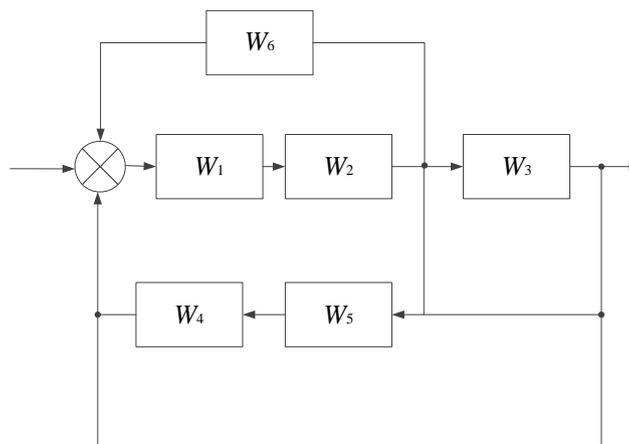


Рисунок 3.25 – Структурная схема для варианта 5

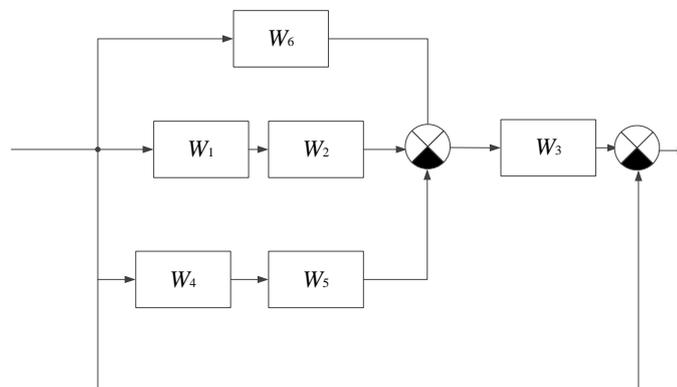


Рисунок 3.26 – Структурная схема для варианта 6

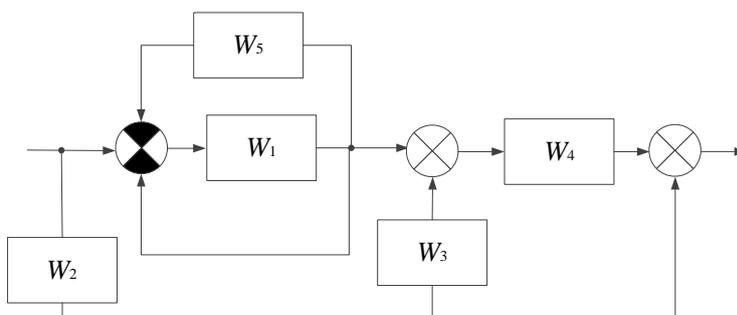


Рисунок 3.27 – Структурная схема для варианта 7

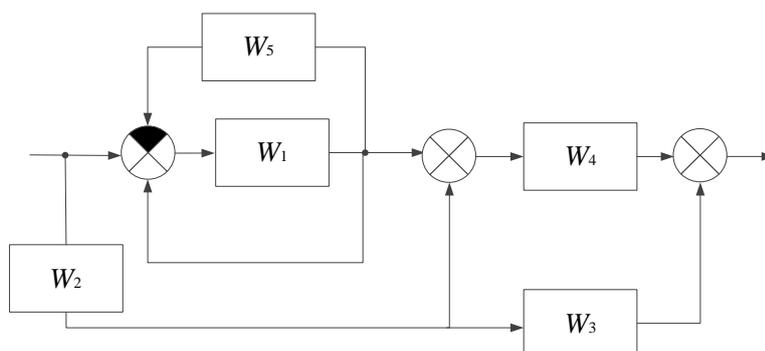


Рисунок 3.28 – Структурная схема для варианта 8

Таблица 3.1 – Варианты передаточных характеристик звеньев

Звено	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
W_1	$\frac{4p}{1+5p}$	$\frac{1}{6p}$	$1+2p$	$3-p$
W_2	$\frac{1}{2p}$	$\frac{p}{5+p}$	1	$\frac{1}{1-p^2}$
W_3	$11+p$	14	$\frac{3p}{4+p}$	$\frac{2}{1+p}$
W_4	9	$\frac{1}{1+p^2}$	$\frac{8}{p}$	$\frac{p}{1+p}$
W_5	$\frac{4p}{1+p^2}$	$7-2p$	$\frac{4}{1+4p^2}$	$\frac{15}{p}$
W_6	$\frac{1}{1+5p}$	11	$4p$	7

Содержание отчёта

- 1 Цель практического занятия и краткие теоретические сведения по изученной теме.
- 2 Исходная структурная схема для преобразования.
- 3 Рисунки, поясняющие каждый шаг преобразования структурной схемы.

- 4 Передаточные функции каждого этапа преобразования.
- 5 Итоговый расчёт общей передаточной функции системы.
- 6 Выводы по проделанной работе.

Вопросы для самопроверки

- 1 Какие правила преобразования структурных схем вы знаете?
- 2 Какое влияние оказывает положительная и отрицательная обратная связь?
- 3 В чём заключается алгоритм упрощения структурных схем?
- 4 Какие способы соединения структурных звеньев существуют для замкнутых и разомкнутых систем?
- 5 Какую роль играет введение обратной связи в биотехнических САУ?

Тест по пройденной теме

- | | |
|---|--|
| <p>1 Как найти передаточную функцию при параллельном соединении динамических звеньев?</p> | <p>А. $W = W_1 \cdot W_2$.</p> <p>Б. $W = W_1 + W_2$.</p> <p>В. $W = W_1 - W_2$.</p> <p>Г. $W = \frac{W_1}{W_2}$.</p> <p>Д. $W = \frac{W_2}{W_1}$.</p> |
| <p>2 Как найти передаточную функцию при последовательном соединении динамических звеньев?</p> | <p>А. $W = W_1 \cdot W_2$.</p> <p>Б. $W = W_1 + W_2$.</p> <p>В. $W = W_1 - W_2$.</p> <p>Г. $W = \frac{W_1}{W_2}$.</p> <p>Д. $W = \frac{W_2}{W_1}$.</p> |
| <p>3 Чего позволяет добиться положительная обратная связь?</p> | <p>А. Компенсации помех в сигнале.</p> <p>Б. Усиления изменения входного сигнала.</p> <p>В. Увеличения временных задержек.</p> <p>Г. Уменьшения амплитуды выходного сигнала.</p> <p>Д. Упрощения реализации системы.</p> |

4 Что происходит при переносе узла с выхода динамического звена на вход?

А. Передаточная характеристика звена дублируется на линию связи узла.

Б. Обратная передаточная характеристика звена дублируется на линию связи узла.

В. Всё остаётся без изменений.

Г. Значение передаточной характеристики звена инвертируется.

Д. Нет правильного ответа.

5 Что происходит при переносе сумматора с выхода динамического звена на вход?

А. Передаточная характеристика звена дублируется на линию связи, входящую в сумматор.

Б. Обратная передаточная характеристика звена дублируется на линию связи, входящую в сумматор.

В. Всё остаётся без изменений.

Г. Значение передаточной характеристики звена инвертируется.

Д. Нет правильного ответа.

6 Что происходит при перестановке суммирующих звеньев?

А. Левое звено меняет знак.

Б. Правое звено меняет знак.

В. Всё остаётся без изменений.

Г. Оба звена меняют знак.

Д. Нет правильного ответа.

7 Какого правила преобразования структурных схем не существует?

А. Введение обратной связи.

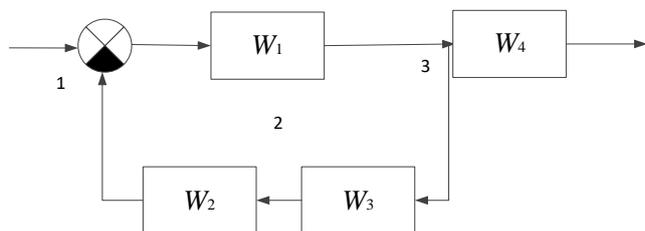
Б. Перенос точки ветвления с входа на выход суммирующего звена.

В. Правила параллельного соединения звеньев.

Г. Правила объединения точки ветвления и сумматора.

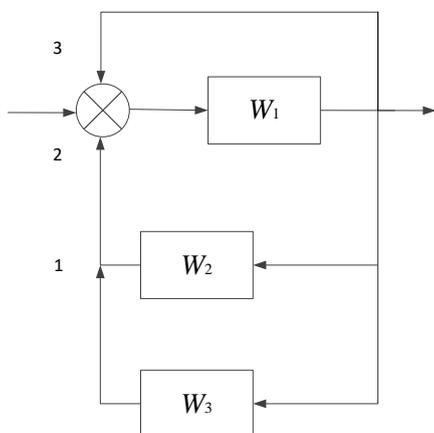
Д. Правила последовательного соединения звеньев.

8 В какой последовательности стоит выполнять преобразование структурной схемы на рисунке?



- А. 123.
- Б. 231.
- В. 132.
- Г. 312.
- Д. 213.

9 В какой последовательности стоит выполнять преобразование структурной схемы на рисунке?



- А. 123.
- Б. 213.
- В. 312.
- Г. 132.
- Д. 321.

10 Что означает закрашенный сегмент сумматора на структурной схеме?

- А. Параллельное сложение.
- Б. Положительную обратную связь.
- В. Отрицательную обратную связь.
- Г. Значение входит в сегмент сумматора со знаком «минус».
- Д. Значение входит в сегмент сумматора со знаком «плюс».

Практическое занятие № 4

АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ И ЧАСТОТНЫЕ КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Цель практического занятия: получить навыки определения устойчивости систем управления, изучить критерии устойчивости Гурвица, Льенара – Шипара, Найквиста и Михайлова.

Краткие теоретические сведения

Понятие *устойчивости системы* связано со способностью системы возвращаться в состояние равновесия после действия внешних сил, которые вывели её из этого состояния. Устойчивая система возвращается в начальное положение с допустимой погрешностью. Любая САУ создаётся таким образом, чтобы её основной режим работы был устойчивым. При проектировании биотехнических САУ устойчивости уделяется отдельное внимание, так как при выходе системы из основного режима работы существует опасность повредить не только оборудование, но и биологическое звено, входящее в систему.

САУ бывают устойчивыми, неустойчивыми, а также могут находиться на границе устойчивости.

Существуют алгебраические и частотные критерии устойчивости.

К алгебраическим критериям устойчивости относятся критерий Гурвица, критерий Рауса, критерий Льенара – Шипара. К частотным критериям устойчивости относятся критерий Михайлова и критерий Найквиста.

Для исследования системы на устойчивость необходимо составить характеристическое уравнение. Характеристический полином получается из собственного оператора простой заменой оператора p на переменную λ .

Если известная передаточная функция разомкнутой системы $Y(p)/X(p)$, то её собственный оператор $Q(p)$ равен сумме полиномов числителя и знаменателя передаточной функции разомкнутой системы:

$$Q(p) = Y(p) + X(p). \quad (4.1)$$

Характеристическое уравнение имеет вид

$$Q(\lambda) = a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1}\lambda^1 + a_n. \quad (4.2)$$

При этом для того чтобы найти уравнение замкнутой системы, необходимо ввести жёсткую единичную обратную связь и пересчитать характеристическое уравнение.

Сформулируем критерии устойчивости и рассмотрим задачи, решаемые с их использованием.

По критерию Гурвица система устойчива, если определители Гурвица, составленные из коэффициентов её характеристического уравнения, при $a_0 > 0$ были больше 0.

Определителем Гурвица называется определитель, составленный из коэффициентов характеристического уравнения системы

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & a_n \end{vmatrix}. \quad (4.3)$$

При составлении определителя Гурвица коэффициенты с порядковыми номерами от 1 до n размещаются по диагонали. При заполнении столбцов коэффициенты уменьшают свой порядковый номер при движении вниз по столбцу и увеличивают при движении вверх.

Задача 1. Исследовать устойчивость системы с характеристическим уравнением

$$Q(\lambda) = \lambda^4 + 4\lambda^3 + \lambda^2 + 3\lambda^1 + 6.$$

Решение:

1 Выпишем коэффициенты:

$$a_0 = 1, \quad a_1 = 4, \quad a_2 = 1, \quad a_3 = 3, \quad a_4 = 6.$$

2 Составим определитель Гурвица, пользуясь правилом расположения коэффициентов:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix}.$$

3 Подставим значения коэффициентов:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 4 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 6 & 0 \\ 0 & 4 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 6 \end{vmatrix}.$$

4 Так как $a_0 > 0$, рассчитаем все определители Гурвица. Определитель второго порядка равен

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 4 & 3 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = 4 - 3 = 1.$$

5 Определитель третьего порядка равен

$$\begin{aligned} \Delta_3 &= \begin{vmatrix} 4 & 3 & 0 \\ 1 & 1 & 6 \\ 0 & 4 & 3 \end{vmatrix} = \\ &= 4 \cdot 1 \cdot 3 + 3 \cdot 6 \cdot 0 + 0 \cdot 1 \cdot 4 - 0 \cdot 1 \cdot 0 - 4 \cdot 6 \cdot 4 - 3 \cdot 1 \times \\ &\quad \times 3 = 12 + 0 + 0 - 0 - 96 - 9 = -93. \end{aligned}$$

Соответственно, нет смысла считать определитель четвертого порядка, так как значение определителя третьего порядка меньше 0 и, следовательно, система неустойчива.

Задача 2. Исследовать устойчивость системы с характеристическим уравнением:

$$Q(\lambda) = -\lambda^4 + 2\lambda^3 + 1.$$

Решение:

1 Выпишем коэффициенты:

$$a_0 = -1, \quad a_1 = 2, \quad a_2 = 0, \quad a_3 = 0, \quad a_4 = 1.$$

2 Так как $a_0 < 0$, не выполняется требование критерия Гурвица, а следовательно, система неустойчива.

Варианты характеристических уравнений к задачам 1 и 2 представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Варианты характеристических уравнений к задачам 1 и 2

Вариант	Характеристическое уравнение
1	$Q(\lambda) = \lambda^4 + \lambda^3 + 3\lambda^2 + 6\lambda^1$
2	$Q(\lambda) = 2\lambda^4 + 8$
3	$Q(\lambda) = 3\lambda^4 + \lambda^2 + \lambda^1 + 7$
4	$Q(\lambda) = \lambda^5 + 4\lambda^3 + 1$
5	$Q(\lambda) = \lambda^2 + 6\lambda^3 + 10$
6	$Q(\lambda) = 4\lambda^4 + 3\lambda^3$

Вариант	Характеристическое уравнение
7	$Q(\lambda) = \lambda^5 + 5\lambda^3 + 3\lambda^2$
8	$Q(\lambda) = -\lambda^6 + \lambda^3 + \lambda$

По критерию Лъенара – Шипара САУ устойчива, если выполняются следующие неравенства:

$$\begin{cases} a_0 > 0, a_1 > 0 \dots a_n > 0; \\ \Delta_1 > 0, \Delta_3 > 0, \Delta_5 > 0 \dots \end{cases} \quad (4.4)$$

или

$$\begin{cases} a_0 > 0, a_1 > 0 \dots a_n > 0; \\ \Delta_2 > 0, \Delta_4 > 0, \Delta_6 > 0 \dots \end{cases} \quad (4.5)$$

Данный критерий позволяет определять устойчивость системы алгебраически, но упрощённо, без расчёта всех определителей системы.

Задача 3. Исследовать устойчивость системы с характеристическим уравнением

$$Q(\lambda) = \lambda^3 + \lambda^2 + 3\lambda + 5.$$

Решение:

1 Выпишем коэффициенты:

$$a_0 = 1, \quad a_1 = 1, \quad a_2 = 3, \quad a_3 = 5.$$

2 Так как все коэффициенты характеристического уравнения больше 0, можем воспользоваться критерием Лъенара – Шипара и посчитать либо чётные, либо нечётные определители. В нашем случае уравнение имеет третий порядок, следовательно, выгоднее посчитать только чётный, второй определитель.

3 Составим определитель Гурвица второго порядка, пользуясь правилом расположения коэффициентов:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}.$$

4 Подставим значения коэффициентов:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 5 \end{vmatrix} = 5 - 3 = 2.$$

Соответственно, согласно критерию Лъенара – Шипара система устойчива.

Варианты характеристических уравнений к задаче 3 представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Варианты характеристических уравнений к задаче 3

Вариант	Характеристическое уравнение
1	$Q(\lambda) = 3\lambda^4 + 2\lambda^3 + 2\lambda^2 + \lambda$
2	$Q(\lambda) = 5\lambda^7 + 2\lambda^4 + 4\lambda^2 + 1$
3	$Q(\lambda) = 4\lambda^6 + \lambda^4 + 7\lambda^3 + 9$
4	$Q(\lambda) = \lambda^6 + 4\lambda^5 + 10\lambda^4 + 6\lambda^3 + 1$
5	$Q(\lambda) = 3\lambda^6 + \lambda^5 + \lambda^4 + \lambda^3$
6	$Q(\lambda) = \lambda^4 + \lambda^3 + 3\lambda^2 + 6\lambda^1$
7	$Q(\lambda) = 3\lambda^5 + \lambda^4 + 4\lambda^3 + 1$
8	$Q(\lambda) = 5\lambda^5 + \lambda^3 + 4\lambda^2 + 17$

Критерий устойчивости Михайлова является частотным критерием и позволяет оценивать устойчивость замкнутой системы по виду кривой Михайлова. Для того чтобы построить годограф Михайлова, необходимо выделить мнимую и действительную часть комплексного полинома. Запишем характеристическое уравнение:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0. \quad (4.6)$$

Комплексный полином равен

$$N(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0. \quad (4.7)$$

Подставив $p = j\omega$, получим уравнение комплексной переменной:

$$N(j\omega) = a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 (j\omega) + a_0. \quad (4.8)$$

Выделим мнимую и действительную часть:

$$N(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega). \quad (4.9)$$

Построим кривую Михайлова в координатах $Q(\omega)/P(\omega)$, подставляя значение частоты от 0 до ∞ . По поведению кривой можно сделать выводы об устойчивости системы.

Сформулируем критерий Михайлова: замкнутая система является устойчивой, если её кривая Михайлова, начинаясь на действительной положительной полуоси, огибает против часовой стрелки начало координат, проходя последовательно n квадрантов комплексной плоскости, где n – порядок системы.

На рисунке 4.1 представлены примеры кривой Михайлова для устойчивых систем первого, второго и третьего, четвертого и пятого порядка.

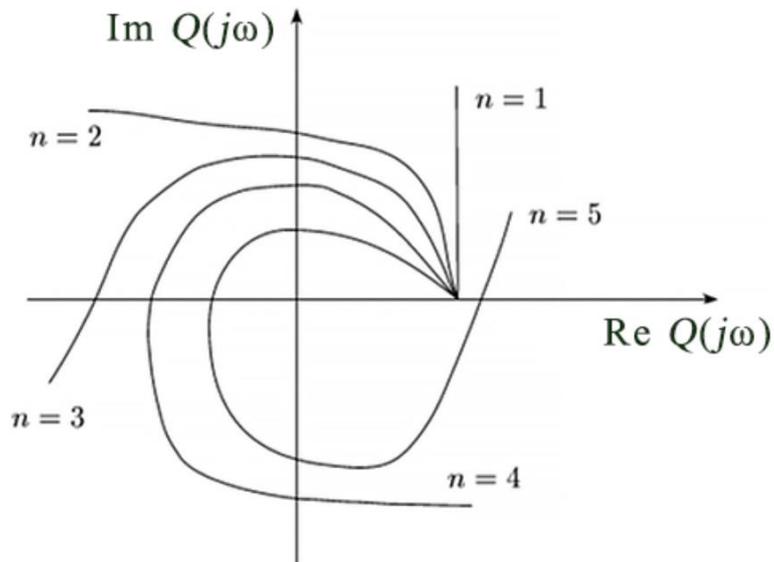


Рисунок 4.1 – Примеры кривой Михайлова разных порядков для устойчивых систем

Задача 4. Исследовать устойчивость системы с помощью критерия Михайлова

$$N(p) = p^3 + p^2 + 5 \cdot p + 7.$$

Решение:

1 Произведём замену:

$$N(p) = (j\omega)^3 + (j\omega)^2 + 5 \cdot j\omega + 7;$$

$$N(p) = -2j\omega^3 - \omega^2 + 5j\omega + 7.$$

2 Выделим мнимую и действительную часть:

$$Q(\omega) = -\omega^3 + 5\omega, P(\omega) = -\omega^2 + 7.$$

3 Построим кривую Михайлова для заданной системы. Для этого составим таблицу значений точек (таблица 4.3). Удобнее всего выбирать такие значения частоты в пределах от 0 до ∞ , при которых мнимая и действительная часть уходят в 0.

Таблица 4.3 – Значения точек для построения кривой Михайлова

ω	0	1	2	$\sqrt{5}$	$\sqrt{7}$	∞
$Q(\omega)$	0	4	2	0	$\approx -5,2917$	$-\infty$
$P(\omega)$	7	6	3	2	0	$-\infty$

4 Построим кривую по полученным точкам (рисунок 4.2):

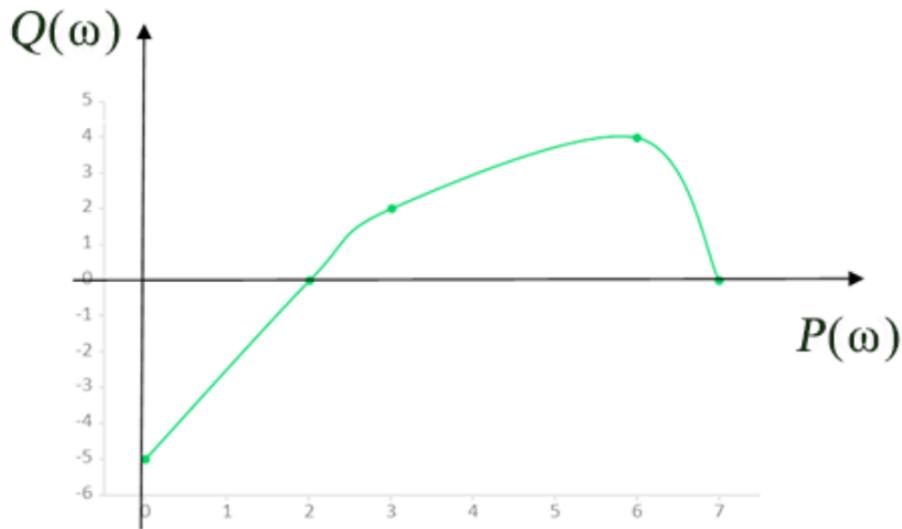


Рисунок 4.2 – Построенная кривая Михайлова

Так как кривая Михайлова, двигаясь против часовой стрелки, последовательно не огибает три квадранта, можно сделать вывод о том, что система неустойчива.

5 Данную задачу можно решить другим способом, воспользовавшись программным пакетом MATLAB. Необходимо написать следующий код:

```
w = 0:0.01:10; % здесь мы задаём шаг, с которым будет выбираться частота
при построении графика
p = 1i*w; % вводим комплексную переменную
K = p.^3 + p.*5 + p.^2 + 7; % записываем нашу передаточную
plot(K) % строим график, выводим его на экран в отдельное окно
grid on %включаем сетку
```

Результатом работы программы будет являться вывод графика кривой Михайлова на экран (рисунок 4.3).

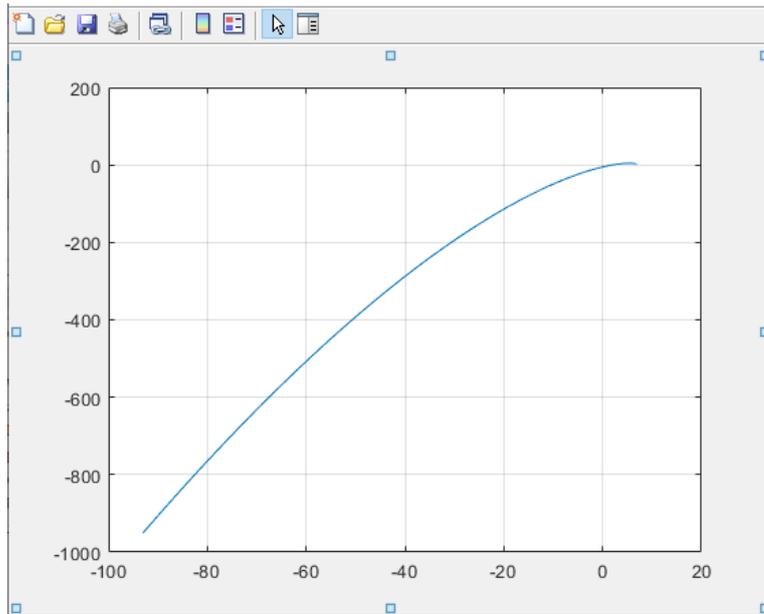


Рисунок 4.3 – Результат работы программы MATLAB

Заметим, что и при ручном расчёте, и при выводе кривой через возможности программного пакета MATLAB результат получается одинаковым.

В таблице 4.4 представлены результаты комплексных полиномов к задаче 4.

Таблица 4.4 – Варианты комплексных полиномов к задаче 4

Вариант	Комплексный полином
1	$N(p) = p^2 + 5$
2	$N(p) = 4p^2 + 15$
3	$N(p) = 3p^3 + 2p^2 + p + 9$
4	$N(p) = p^3 + 10p + 1$
5	$N(p) = \frac{1}{5 + p}$
6	$N(p) = \frac{3}{3 + 3p}$
7	$N(p) = \frac{1}{5 - 2p}$
8	$N(p) = \frac{1}{1 - p}$

Задача 5. Самостоятельно исследовать устойчивость системы по кривым Михайлова, представленным на рисунке 4.4.

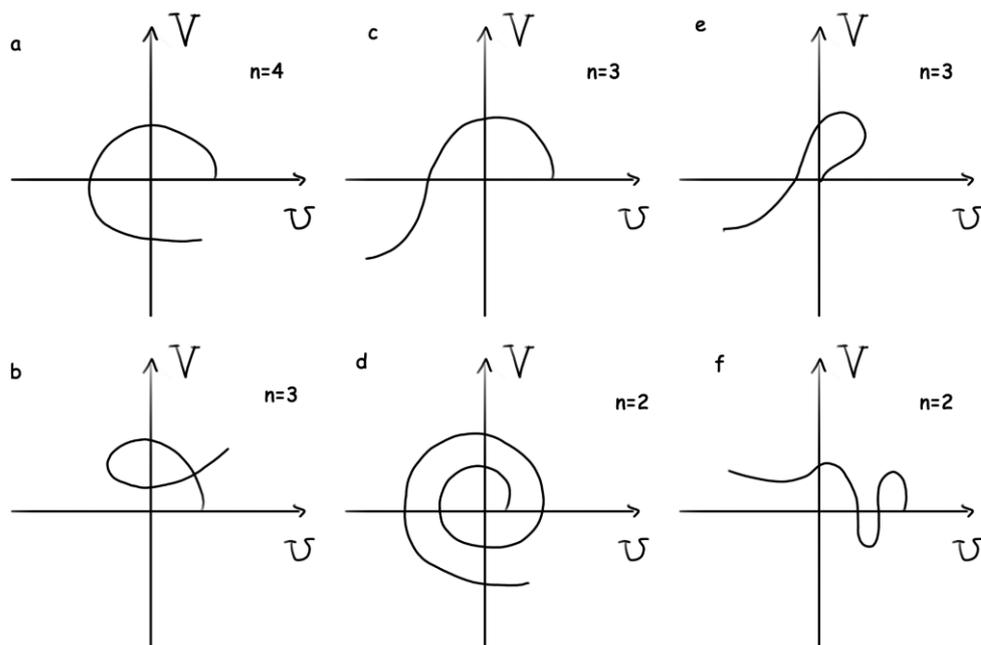


Рисунок 4.4 – Графические примеры к задаче 5

Критерий устойчивости Найквиста позволяет судить об устойчивости замкнутой системы по амплитудно-фазовой частотной характеристике (АФЧХ) разомкнутой системы. Критерий формулируется следующим образом: для того чтобы автоматическая система, устойчивая или нейтральная в разомкнутом состоянии, была устойчива в замкнутом состоянии, необходимо и достаточно, чтобы годограф АФЧХ разомкнутой системы *не охватывал* точку $(-1, j0)$ на комплексной плоскости при изменении частоты ω от нуля до ∞ и повороте вектора АФЧХ по часовой стрелке. Пример использования критерия Найквиста отображен на рисунке 4.5.

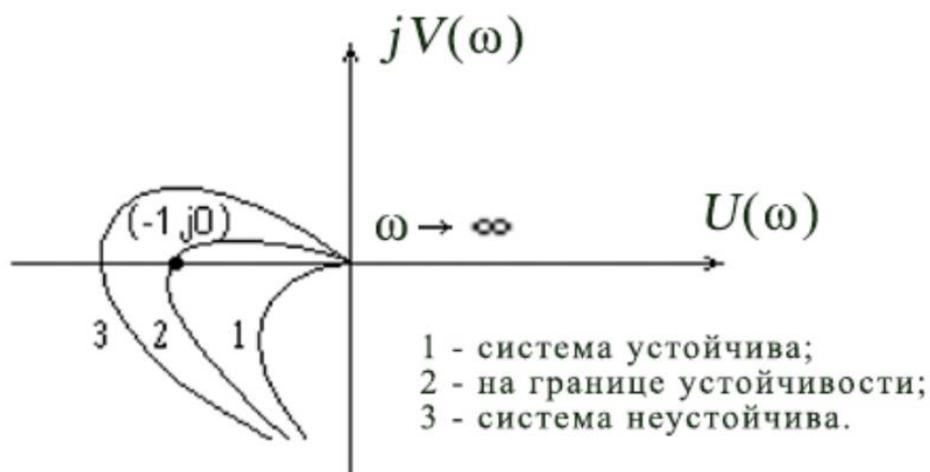


Рисунок 4.5 – Пример определения устойчивости системы по критерию Найквиста

Существуют три способа применения критерия Найквиста, формулировка которого меняется в зависимости от исходных условий задачи:

1 При устойчивости разомкнутой системы если годограф устойчивой разомкнутой системы при изменении ω от 0 до ∞ не охватывает точку -1 на оси абсцисс, то замкнутая система будет устойчивой.

2 При неустойчивости разомкнутой системы если годограф неустойчивой разомкнутой системы при изменении ω от 0 до ∞ охватывает точку -1 на оси абсцисс в положительном направлении $m/2$ раз, где m – число корней характеристического уравнения разомкнутой системы с положительной действительной частью, то замкнутая система будет устойчивой.

3 Разомкнутая система астатическая. Годограф зеркально отражается и кривые «замыкаются» на бесконечности. Тогда, если точка -1 на оси абсцисс оказалась вне замкнутой кривой, замкнутая система устойчивая. Если охватывается кривой – неустойчивая.

Задача 6. Исследовать устойчивость системы, пользуясь критерием Найквиста. Исходно дана передаточная функция разомкнутой системы, необходимо определить устойчивость замкнутой:

$$W(p) = \frac{1}{p^3 + p^2 + 5}.$$

Решение:

1 Первоначально необходимо оценить устойчивость разомкнутой системы. Можем воспользоваться любым методом, описанным ранее. Данная разомкнутая система неустойчива. Произведём замену оператора на комплексную переменную:

$$W(p) = \frac{1}{(j\omega)^3 + (j\omega)^2 + 5} = \frac{1}{-j\omega^3 - \omega^2 + 5}.$$

2 Выделим мнимую и действительную часть, умножив на сопряжённое в числителе и знаменателе:

$$W(p) = \frac{1}{(j\omega)^3 + (j\omega)^2 + 5} = \frac{(j\omega^3 - \omega^2 + 5)}{(-j\omega^3 - \omega^2 + 5)(j\omega^3 - \omega^2 + 5)};$$

$$W(p) = \frac{j\omega^3 - \omega^2 + 5}{\omega^6 - j\omega^5 + 5j\omega^3 + j\omega^5 + \omega^4 - 5\omega^2 + 5j\omega^3 - 5\omega^2 + 25};$$

$$W(p) = \frac{j\omega^3 - \omega^2 + 5}{\omega^6 + \omega^4 - 10\omega^2 + 25}.$$

$$Q(\omega) = \frac{\omega^3}{\omega^6 + \omega^4 - 10\omega^2 + 25}, P(\omega) = \frac{-\omega^2 + 5}{\omega^6 + \omega^4 - 10\omega^2 + 25}.$$

3 Построим годограф разомкнутой системы, пользуясь методикой построения из задачи 4.

Результат построения представлен на рисунке 4.6.

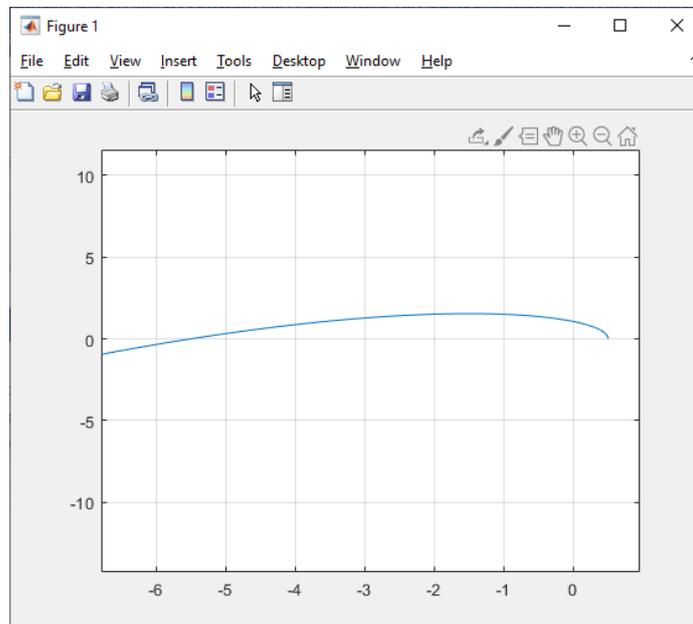


Рисунок 4.6 – Годограф системы, полученный с помощью программного пакета MATLAB

Заметим, что годограф охватывает точку $(-1, j0)$. Разомкнутая система неустойчива, а её годограф охватывает точку $\frac{1}{2}$ раз.

4 Для оценки устойчивости системы необходимо определить количество корней характеристического уравнения разомкнутой системы. Её характеристическое уравнение $Q(\lambda) = p^3 + p^2 + 5$. Найти корни можно с помощью средств программного пакета MATLAB, используя следующий код:

```
p = [1 1 0 5]; % создаем вектор с коэффициентами нашего уравнения
r = roots(p) % находим корни уравнения
```

Получим результат вычисления:

```
r =
-2.1163 + 0.0000i
 0.5582 + 1.4321i
 0.5582 - 1.4321i
```

Соответственно, уравнение имеет три мнимых корня. Тогда для устойчивости системы кривая годографа должна охватывать точку $(-1, j0)$ полтора раза, но в нашем случае это условие не выполняется. Следовательно, система неустойчива.

Порядок выполнения задания

1 Получить варианты к задачам 1 и 2 из таблицы 4.1, исследовать систему на устойчивость, используя критерий Гурвица.

2 Получить вариант к задаче 3 из таблицы 4.2, определить устойчивость системы, используя критерий Лъенара – Шипара.

3 Получить вариант к задаче 4 из таблицы 4.4, определить устойчивость системы, пользуясь критерием Михайлова. Рекомендуется использовать два метода определения – ручной и программный расчёт для сравнения результатов.

4 Получить вариант к задаче 6 из таблицы 4.5, определить устойчивость системы, пользуясь критерием Найквиста.

Таблица 4.5 – Варианты передаточных функций к задаче 6

Вариант	Передаточная функция
1	$W(p) = \frac{1}{p^2 + 5}$
2	$W(p) = \frac{1}{p + 3}$
3	$W(p) = \frac{1}{p^3 + 2p^2 + p}$
4	$W(p) = \frac{1}{p^4 + 16}$
5	$W(p) = \frac{1}{5 + p}$
6	$W(p) = \frac{10}{p^3 + p^2 + p + 1}$
7	$W(p) = \frac{1}{3p^3 + 2p^2 + p}$
8	$W(p) = \frac{1}{2p^3 + p + 8}$

Содержание отчёта

1 Цель практического занятия и краткие теоретические сведения по изученной теме.

2 Варианты, выданные преподавателем.

3 Подробное решение задач 1–6 с построением графиков (для задач 4, 5 и 6).

4 Выводы по проделанной работе.

Вопросы для самопроверки

1 Что такое устойчивость системы и почему необходимо её оценивать при проектировании САУ, в частности биотехнических?

2 Какие примеры негативного влияния неустойчивости биотехнических САУ вы можете привести?

3 Какие критерии устойчивости САУ вам известны и какова их классификация?

4 Каков алгоритм определения устойчивости системы при использовании алгебраических критериев?

5 Каков алгоритм определения устойчивости системы при использовании частотных критериев?

Тест по пройденной теме

1 Что такое устойчивость системы?

А. Способность системы управлять выходными параметрами.

Б. Способность системы изменять свои параметры.

В. Способность системы к саморегулированию.

Г. Способность системы возвращаться в исходное состояние.

Д. Нет правильных ответов.

2 Какой критерий устойчивости является алгебраическим?

А. Критерий Найквиста.

Б. Критерий Михайлова.

В. Критерий определения устойчивости по диаграммам Боде.

Г. Корневой критерий устойчивости.

Д. Критерий Гурвица.

3 Как можно определить устойчивость системы, пользуясь частотными критериями?

А. Устойчивость определяется графически по частотным характеристикам.

Б. Устойчивость рассчитывается с помощью матриц.

В. Устойчивость определяется по переходной характеристике.

Г. Частотные критерии определяют не устойчивость, а качество системы.

Д. Нет правильного ответа.

4 По какому правилу составляется определитель Гурвица?

А. Коэффициенты с порядковыми номерами от 0 до n размещаются по диагонали слева направо.

Б. Коэффициенты с порядковыми номерами от 0 до n размещаются по диагонали справа налево.

В. Коэффициенты с порядковыми номерами от n до 0 размещаются по диагонали справа налево.

Г. Коэффициенты с порядковыми номерами от 1 до n размещаются по диагонали справа налево.

Д. Коэффициенты с порядковыми номерами от 1 до n размещаются по диагонали слева направо.

5 Какое утверждение является верным?

А. Критерий Лъенара – Шипара является частотным критерием устойчивости.

Б. Критерий Лъенара – Шипара основан на построении кривой Лъенара – Шипара и оценке количества полюсов и нулей системы.

В. Критерий Лъенара – Шипара является частным случаем критерия Гурвица.

Г. Критерий Лъенара – Шипара основан на построении кривой Лъенара – Шипара и оценке количества пересекаемых четвертей.

Д. Критерий Лъенара – Шипара позволяет определить качество переходного процесса системы.

6 Устойчива ли замкнутая система на рисунке и по какому критерию это можно определить?

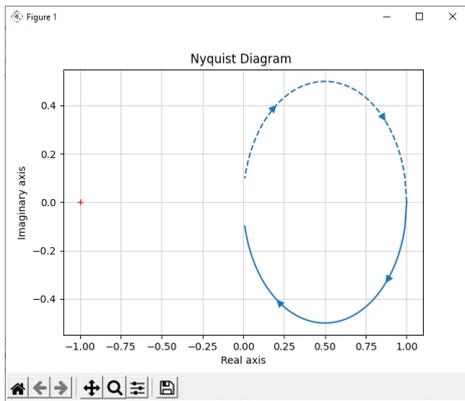
А. Устойчива по критерию Найквиста.

Б. Неустойчива по критерию Найквиста.

В. Устойчива по критерию Михайлова.

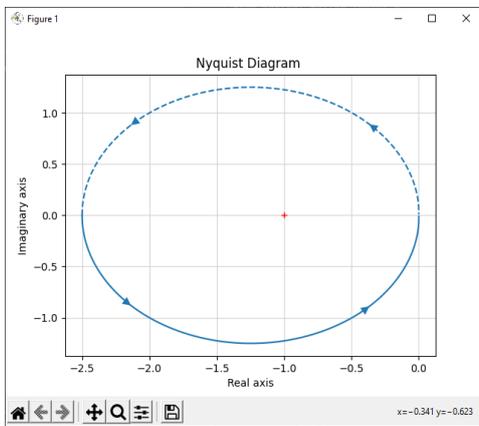
Г. Неустойчива по критерию Михайлова.

Д. Невозможно определить.



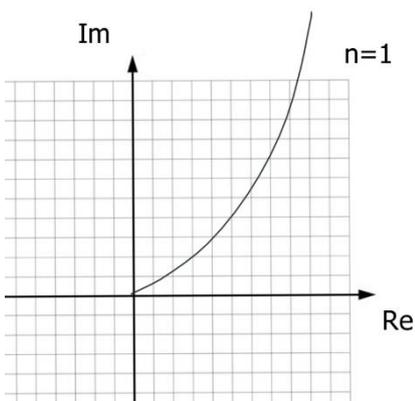
7 Устойчива ли замкнутая система на рисунке и по какому критерию это можно определить?

- А. Устойчива по критерию Найквиста.
- Б. Неустойчива по критерию Найквиста.
- В. Устойчива по критерию Михайлова.
- Г. Неустойчива по критерию Михайлова.
- Д. Невозможно определить.

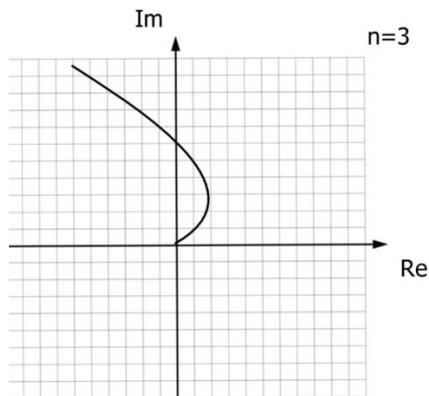


8 Устойчива ли замкнутая система на рисунке и по какому критерию это можно определить?

- А. Устойчива по критерию Найквиста.
- Б. Неустойчива по критерию Найквиста.
- В. Устойчива по критерию Михайлова.
- Г. Неустойчива по критерию Михайлова.
- Д. Невозможно определить.



9 Устойчива ли замкнутая система на рисунке и по какому критерию это можно определить?



- А. Устойчива по критерию Найквиста.
- Б. Неустойчива по критерию Найквиста.
- В. Устойчива по критерию Михайлова.
- Г. Неустойчива по критерию Михайлова.
- Д. Невозможно определить.

10 Устойчив ли идеальный колебательный контур?

- А. Устойчив.
- Б. Неустойчив.
- В. На границе устойчивости.
- Г. Невозможно определить.
- Д. Нет правильного ответа.

Практическое занятие № 5 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ

Цель практического занятия: освоить прямые методы оценки качества переходного процесса САУ, приобрести навыки расчёта прямых показателей качества переходного процесса.

Краткие теоретические сведения

Качество переходного процесса – характеристика, позволяющая комплексно оценить работу системы управления в зависимости от её назначения.

Выделяют следующие показатели качества переходного процесса:

- статическая ошибка регулирования;
- динамическая ошибка регулирования;
- время регулирования;
- степень устойчивости;
- степень колебательности;
- интегральные критерии качества.

Качество переходного процесса определяется по графику переходной характеристики системы, которая отображает изменение выходной величины во времени при подаче в систему скачкообразного (ступенчатого) возмущения. В понятие качества переходного процесса входят быстродействие, колебательность, перерегулирование.

Разберём основные прямые показатели качества переходного процесса САУ. Для того чтобы правильно оценить показатели качества системы, следует обозначить необходимые начальные условия. САУ разного профиля придерживаются разных требований. Говоря о биотехнических САУ, важно понимать, что такие системы априори обладают повышенными требованиями к показателям качества по сравнению, например, с бытовой аппаратурой. Выделим следующие условные группы биомедицинских САУ, отличающихся уровнем требований к их качеству:

1 Системы с повышенными требованиями к качеству переходного процесса (высокоточные медицинские устройства, например роботизированный лазерный комплекс типа «робот-хирург»). Повышенные требования к устройствам данного типа ограничивают временные задержки отклика системы, задержки на управление, переходные процессы и т. д. Величина отклонения управляемого параметра в таких системах обычно не должна превышать долей процента от установившегося значения.

2 Системы с умеренными требованиями к качеству переходного процесса (терапевтическое оборудование, не требующее высокой точности исполнения, например аппарат транскраниальной стимуляции, миостимулятор и т. д., часть диагностического оборудования, например электрокардиографы). Величина отклонения может быть больше, порядка $\pm 1-2\%$ от установившегося значения.

3 Системы с упрощёнными требованиями к качеству переходного процесса. Как правило, это простые системы или системы, в которых роль автоматического управления невелика (некоторые устройства скрининга, например пульсоксиметры, термометры и т. д.). Величина отклонения управляемого параметра в таких системах может достигать $\pm 5\%$ от установившегося значения.

Выбрав величину допустимого отклонения, можно рассчитать время регулирования переходного процесса.

К показателям качества переходного процесса относятся:

1 Время регулирования t_p – время от момента приложения к системе единичного ступенчатого воздействия до момента окончания переходного процесса. Окончанием переходного процесса называется момент, когда управляемая величина достигает значения, не выходящего за выбранную величину допустимого отклонения (рисунок 5.1).

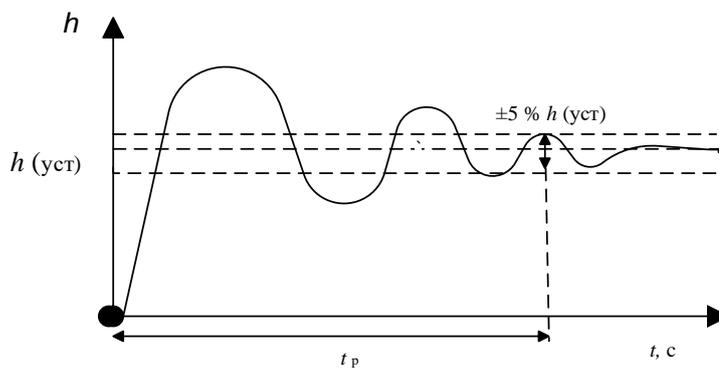


Рисунок 5.1 – Определение времени регулирования переходного процесса

2 Перерегулирование (σ) – максимальное отклонение переходной характеристики h_{\max} от установившегося значения $h(\text{уст})$ выходной величины, выраженное в относительных единицах или процентах:

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h(\text{уст})}{h(\text{уст})} 100 \% . \quad (5.1)$$

Качество управления считается удовлетворительным, если перерегулирование не превышает 30...40 %. При этом за $h(\text{уст})$ при наличии большого числа малоамплитудных колебаний можно принимать значение $\pm 5\%$ от установившегося значения (в зависимости от требуемого отклонения) (рисунок 5.2).

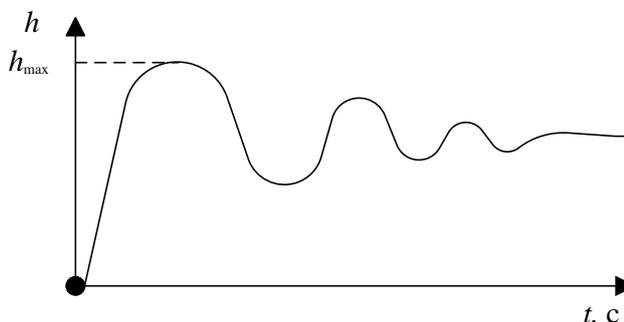


Рисунок 5.2 – Параметры для определения перерегулирования переходного процесса

3 Колебательность (N) – число переходов управляемой величины через ее установившееся значение $h(\text{уст})$ за время переходного процесса. Чем меньше число колебаний, тем более качественный переходный процесс. У некоторых систем число колебаний высоко, но их амплитуда не превышает требуемого отклонения, тогда такой процесс тоже можно назвать качественным.

4 Степень затухания переходного процесса (Ψ) показывает, во сколько раз уменьшается амплитуда второго колебания по сравнению с первым, и определяется относительным уменьшением соседних амплитуд переходной характеристики (рисунок 5.3).

$$\Psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \cdot 100 \%. \quad (5.2)$$

Интенсивность затухания колебаний в системе считается удовлетворительной, если $\Psi = 0,75 \dots 0,95$.

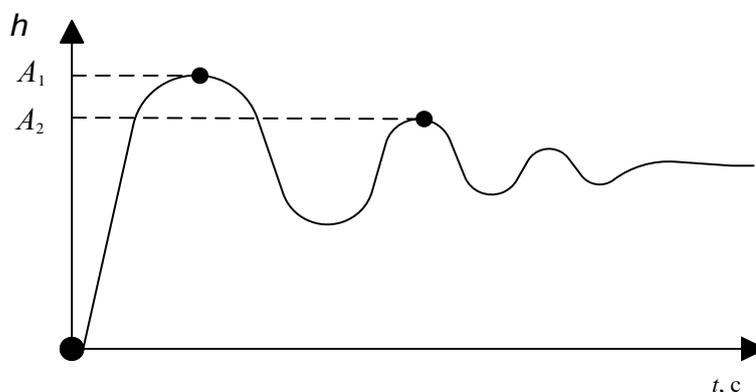


Рисунок 5.3 – Параметры для определения степени затухания переходного процесса

5 Собственная частота колебаний (ω):

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (5.3)$$

где T – период собственных колебаний.

Перечисленные выше показатели могут быть дополнены и другими, если этого требуют специфические технические задания на разработку или исследование систем управления.

Применим знания на практике путём решения задач.

Задача 1. Построить переходную характеристику для двух типов звеньев (апериодическое и колебательное звено), зная передаточную функцию системы, и определить показатели качества переходного процесса. Исходя из показателей, сделать вывод о качестве САУ (таблицы 5.1, 5.2).

Таблица 5.1 – Варианты передаточных функций к задаче 1 для апериодического звена

Вариант	Передаточная функция
1	$W(p) = \frac{1}{p + 1}$
2	$W(p) = \frac{4}{2p + 1}$

Вариант	Передаточная функция
3	$W(p) = \frac{-3}{p+1}$
4	$W(p) = \frac{5}{4p+1}$
5	$W(p) = \frac{1}{3p+1}$
6	$W(p) = \frac{-2}{p+1}$
7	$W(p) = \frac{6}{2p+2}$
8	$W(p) = \frac{-5}{p+1}$

Таблица 5.2 – Варианты передаточных функций к задаче 1 для колебательного звена

Вариант	Передаточная функция
1	$W(p) = \frac{1}{4p^2 + 5p + 1}$
2	$W(p) = \frac{1}{4p^2 + 2p + 1}$
3	$W(p) = \frac{1}{3p^2 + 4p + 1}$
4	$W(p) = \frac{1}{9p^2 + 3p + 1}$
5	$W(p) = \frac{1}{2p^2 + 4p + 1}$
6	$W(p) = \frac{1}{3p^2 + 9p + 1}$
7	$W(p) = \frac{1}{p^2 + 2p + 1}$
8	$W(p) = \frac{1}{p^2 + 4p + 1}$

Задача 2. Определить показатели качества переходного процесса для колебательного звена до и после введения единичной отрицательной обратной связи (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Варианты передаточных функций к задаче 2 для колебательного звена

Вариант	Передаточная функция
1	$W(p) = \frac{1}{p + 1}$
2	$W(p) = p + 5$
3	$W(p) = 3p^2 + 1$
4	$W(p) = \frac{1}{p^2 + 1}$
5	$W(p) = \frac{2}{2p + 1}$
6	$W(p) = 4p$
7	$W(p) = p^2 + 1$
8	$W(p) = \frac{1}{2p^2 + p}$

Порядок выполнения задания

1 Получить варианты к задаче 1 из таблиц 5.1 и 5.2, построить переходную характеристику и определить показатели качества переходного процесса.

2 Получить вариант к задаче 2 из таблицы 5.3, построить переходную характеристику, определить показатели качества переходного процесса.

3 Ввести отрицательную единичную обратную связь в систему из задачи 2, построить переходный процесс, определить показатели качества.

4 Сделать выводы о влиянии обратной связи на качество переходного процесса.

Содержание отчёта

1 Цель практического занятия и краткие теоретические сведения по изученной теме.

2 Варианты, выданные преподавателем.

3 Подробное решение задач 1 и 2 с построением переходных характеристик (можно с помощью математических программных пакетов).

4 Выводы по проделанной работе.

Вопросы для самопроверки

- 1 Что такое качество переходного процесса? Какие требования предъявляются к биотехническим САУ и почему?
- 2 Что относится к прямым показателям качества переходного процесса?
- 3 По какому алгоритму определяются прямые показатели качества переходного процесса?
- 4 Какие можно привести примеры биотехнических САУ, к которым предъявляются повышенные, умеренные и упрощенные требования при разработке? Почему к тому или иному типу устройства предъявляются такие требования?

Тест по пройденной теме

- | | |
|---|--|
| 1 Какой параметр не относится к показателям качества? | А. Колебательность.
Б. Перерегулирование.
В. Собственная частота системы.
Г. Время регулирования.
Д. Точность. |
| 2 Что определяет время регулирования t_p ? | А. Время переходного процесса от первой амплитуды до установившегося значения.
Б. Время переходного процесса от начала до времени, когда амплитуда сигнала обратится в ноль.
В. Время между двумя соседними амплитудами.
Г. Время переходного процесса от начала до установившегося значения.
Д. Время нарастания амплитуды сигнала. |
| 3 Чем определяется колебательность? | А. Количеством положительных пиков амплитуды.
Б. Количеством отрицательных пиков амплитуды.
В. Количеством переходов через управляющую величину.
Г. Отношением амплитуды ко времени.
Д. Отношением частоты и времени. |
| 4 Что является системой с упрощёнными требованиями к качеству переходного процесса? | А. Хирургический лазер.
Б. Аппарат ИВЛ.
В. Устройство автоматической подачи лекарств. |

Г. Стоматологический микроскоп.
Д. Нет правильного ответа.

5 Чему равна степень затухания апериодического процесса?

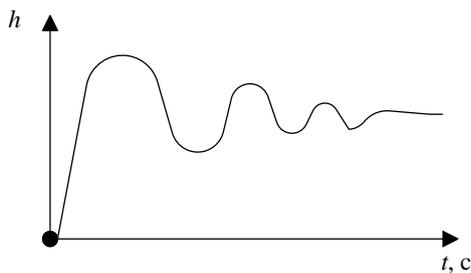
- А. 0.
- Б. 1.
- В. 0,2.
- Г. 0,5.
- Д. 0,8.

6 Чему равна степень затухания колебательного звена?

- А. 0.
- Б. 1.
- В. 0,2.
- Г. 0,5.
- Д. 0,8.

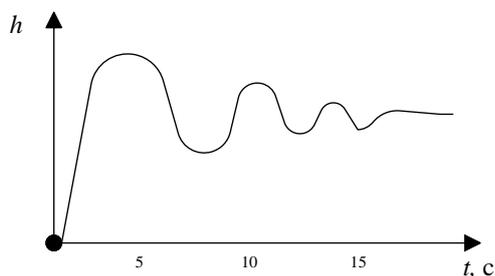
7 Чему равна колебательность системы на рисунке при отклонении $\pm 5\%$?

- А. 6.
- Б. 4.
- В. 7.
- Г. 3.
- Д. Невозможно определить.



8 Чему примерно равно время регулирования системы на рисунке при отклонении $\pm 5\%$?

- А. 15.
- Б. 10.
- В. 17.
- Г. 20.
- Д. Невозможно определить.



9 Что такое качество переходного процесса?

- А. Материальная реализация системы.
- Б. Критерий, который необходимо оценивать комплексно, в зависимости от ряда необходимых при разработке параметров.

В. Параметр, объединяющий точность и устойчивость системы.

Г. Способность системы возвращаться в исходное состояние после завершения воздействия.

Д. Характеристика, получаемая путём подачи на вход единичного импульса.

10 Какое утверждение является неверным?

А. Собственная частота колебаний – показатель качества.

Б. Для медицинских систем предъявляют требования отклонения управляемой величины от 0 до 5 %.

В. Для медицинских систем предъявляют требования отклонения управляемой величины от 12 до 10 %.

Г. Качество системы определяется совокупностью нескольких параметров.

Д. К разным системам предъявляют разные критерии качества.

Практическое занятие № 6 ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Цель практического занятия: получить базовые навыки написания вычислительных и управляющих программ на языке программирования Python.

Краткие теоретические сведения

Современные медицинские системы не обходятся без программирования. Исследователям крайне важно понимать, как использовать инструменты программирования в своей работе. Особое место при проектировании и исследовании медицинских систем отводится языку программирования Python. Это интерпретируемый объектно-ориентированный язык программирования высокого уровня с динамической семантикой. Благодаря широкой математической базе и наличию множества дополнительных библиотек Python зарекомендовал себя как хороший инструмент для анализа и программирования медицинских САУ.

Для того чтобы начать работу с языком программирования Python, следует скачать установочный файл необходимой версии с официального сайта по адресу: <https://www.python.org/downloads>. Понадобится также среда разработки, в качестве которой можно использовать PyCharm, скачав её свободную

версию с сайта по ссылке: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/pycharm/download/#section=windows>. Для этого в окне загрузки нужно выбрать вариант **Community** (рисунок 6.1).

Скачать PyCharm

[Windows](#) [macOS](#) [Linux](#)

Professional

Для научной и веб-разработки на Python.
Поддерживает HTML, JS и SQL.

Скачать

Бесплатная пробная версия

Community

Для разработки только на Python

Скачать

Бесплатная, с открытым кодом

Рисунок 6.1 – Выбор варианта реализации программы с открытым исходным кодом

Установив Python и среду разработки, необходимо настроить рабочее пространство.

Для того чтобы создать новый проект, в открывшемся окне PyCharm применяем комбинацию **Projects** → **New Project** (рисунок 6.2).

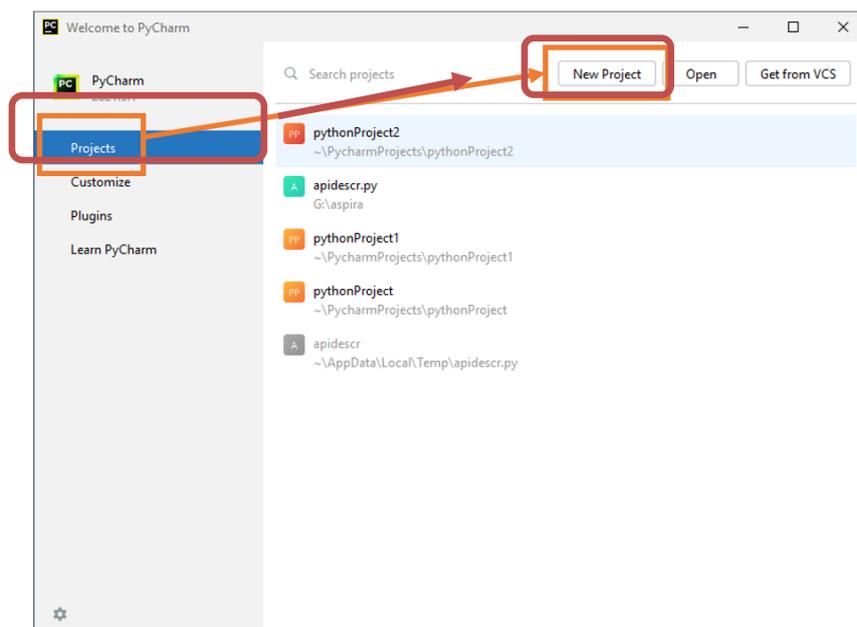


Рисунок 6.2 – Создание нового проекта PyCharm

Создаём проект с параметрами, указанными на рисунке 6.3. Для проекта будем использовать виртуальное пространство, куда позже установим необходимые библиотеки и модули.

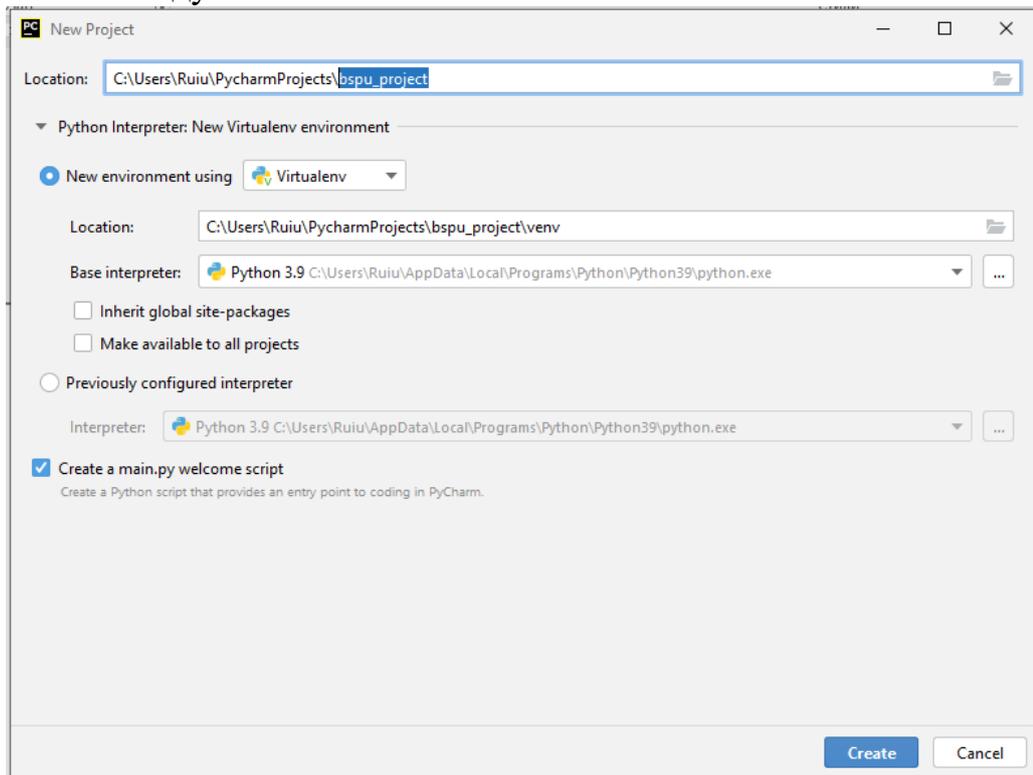


Рисунок 6.3 – Параметры проекта

Нажимаем кнопку **Create**. Открывшееся окно содержит поле для размещения кода и поле навигации проекта (рисунок 6.4).

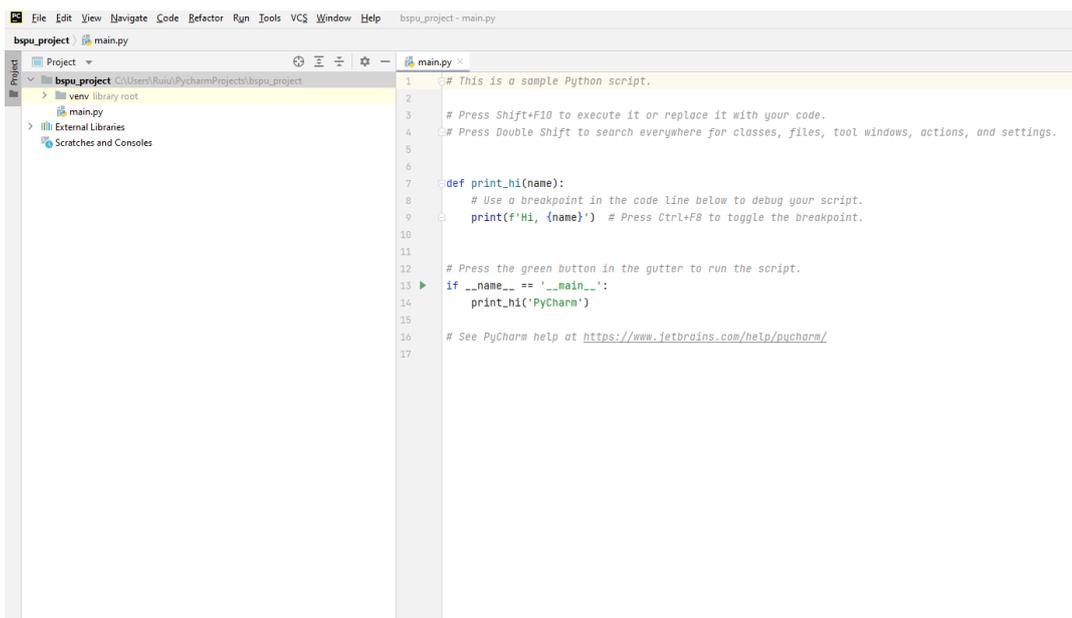


Рисунок 6.4 – Окно проекта

Скомпилируем стандартный проект, нажав кнопку **Run** (Shift + F10). Убедимся, что консоль выдала следующее сообщение:

```
Hi, PyCharm
```

```
Process finished with exit code 0
```

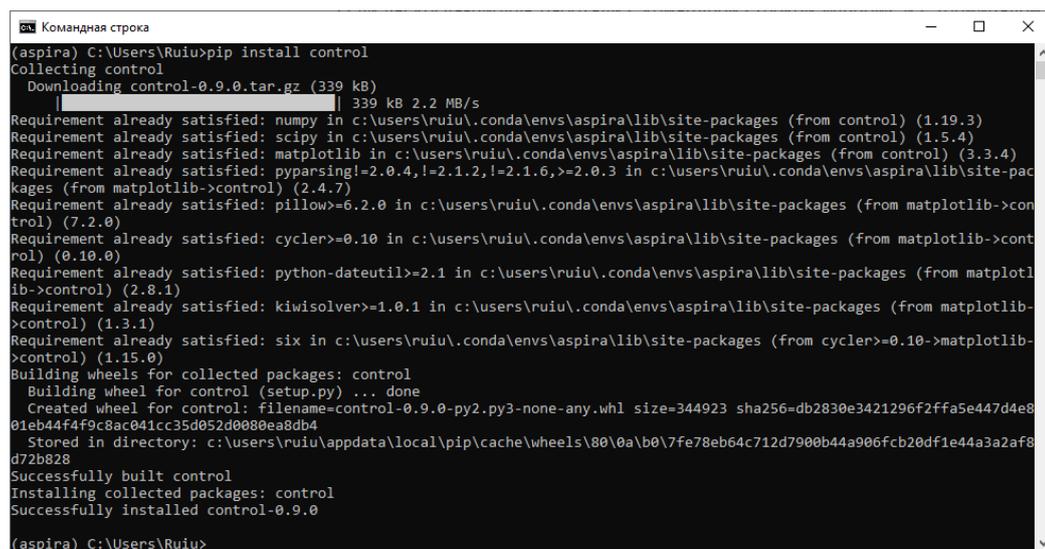
Для проектирования систем автоматического управления будем использовать специальную библиотеку Python Control Systems Library. Библиотека реализует основные операции для анализа и проектирования замкнутых систем управления и позволяет [7]:

- проектировать системы линейного ввода/вывода в пространстве состояний и частотной области;
- моделировать и анализировать нелинейные системы ввода/вывода;
- рассчитывать структурные схемы: последовательные, параллельные с обратной связью;
- строить временные характеристики: исходную характеристику системы, переходную, импульсную;
- строить амплитудно-частотные характеристики: графики Боде и Найквиста;
- анализировать устойчивость системы, качество переходного процесса, точность САУ, стабильность, оценивать запас устойчивости и многое другое.

Для того чтобы подключить библиотеку, необходимо её скачать. Для этого откроем командную строку (cmd) и пропишем следующие строчки:

```
pip install control
```

Убедимся, что библиотека установлена (рисунок 6.5).



```
cmd - Командная строка
(aspira) C:\Users\Ruiu>pip install control
Collecting control
  Downloading control-0.9.0.tar.gz (339 kB)
    339 kB 2.2 MB/s
Requirement already satisfied: numpy in c:\users\ruiu\.conda\envs\aspira\lib\site-packages (from control) (1.19.3)
Requirement already satisfied: scipy in c:\users\ruiu\.conda\envs\aspira\lib\site-packages (from control) (1.5.4)
Requirement already satisfied: matplotlib in c:\users\ruiu\.conda\envs\aspira\lib\site-packages (from control) (3.3.4)
Requirement already satisfied: pyparsing!=2.0.4,!=2.1.2,!=2.1.6,>=2.0.3 in c:\users\ruiu\.conda\envs\aspira\lib\site-packages (from matplotlib->control) (2.4.7)
Requirement already satisfied: pillow>=6.2.0 in c:\users\ruiu\.conda\envs\aspira\lib\site-packages (from matplotlib->control) (7.2.0)
Requirement already satisfied: cycler>=0.10 in c:\users\ruiu\.conda\envs\aspira\lib\site-packages (from matplotlib->control) (0.10.0)
Requirement already satisfied: python-dateutil>=2.1 in c:\users\ruiu\.conda\envs\aspira\lib\site-packages (from matplotlib->control) (2.8.1)
Requirement already satisfied: kiwisolver>=1.0.1 in c:\users\ruiu\.conda\envs\aspira\lib\site-packages (from matplotlib->control) (1.3.1)
Requirement already satisfied: six in c:\users\ruiu\.conda\envs\aspira\lib\site-packages (from cycler>=0.10->matplotlib->control) (1.15.0)
Building wheels for collected packages: control
  Building wheel for control (setup.py) ... done
  Created wheel for control: filename=control-0.9.0-py2.py3-none-any.whl size=344923 sha256=db2830e3421296f2ffa5e447d4e801eb44f4f9c8ac041cc35d052d0080ea8db4
  Stored in directory: c:\users\ruiu\AppData\Local\pip\cache\wheels\80\0a\b0\7fe78eb6c712d7900b44a906fcb20df1e44a3a2af8d72b828
Successfully built control
Installing collected packages: control
Successfully installed control-0.9.0
(aspira) C:\Users\Ruiu>
```

Рисунок 6.5 – Установка модуля control

Теперь необходимо добавить модуль в виртуальное пространство, с которым мы работаем. Для этого применим комбинацию **File** → **Settings**. В открывшемся окне переходим во вкладку **Project:**, которая содержит имя созданного проекта. Далее выбираем **Project Interpreter**. В открывшемся поле отображаются все модули, подключённые к проекту. Стандартными модулями являются модули **pip** и **setuptools**. Для добавления модуля необходимо нажать «+» и в открывшейся строке ввести имя необходимого модуля (**control**) (рисунок 6.6).

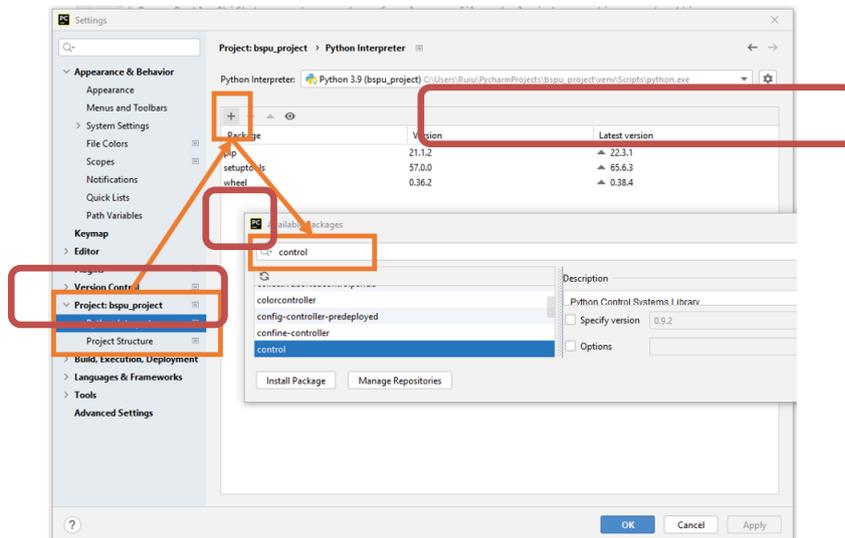


Рисунок 6.6 – Окно создания проекта

После установки модуль появится в списке модулей проекта. Проверим работоспособность модуля, прописав в заголовочной части проекта следующую строчку:

```
from control.matlab import *
```

Запустим проект. Успешная компиляция проекта свидетельствует о том, что модуль установлен правильно.

Перейдём к решению задач.

Задача 1. Преобразовать заданную структурную схему, получить её конечную передаточную функцию, построить диаграммы Боде, кривую Найквиста, переходную и импульсную характеристику системы, сделать выводы о её устойчивости и качестве переходного процесса, пользуясь знаниями, полученными на прошлых практических занятиях.

Решение:

1 Для работы с передаточными функциями системы будем использовать функцию **tf(...)**. Её синтаксис аналогичен синтаксису в MATLAB. Создадим основную функцию, интерпретатор выполнит её первой:

```

if __name__ == '__main__':
    W = tf(1, [2, -3]);
    print (W)

```

2 Запустим проект, убедимся, что в консоли высветилось следующее:

```

1
-----
2 s - 3

```

Process finished with exit code 0

3 Реализуем параллельное и последовательное соединение динамических звеньев. Для этого пропишем следующий код:

```

W1 = tf(1, [2, -3]);
W2 = tf([1, 2], [1, 0]);
Wout1 = W1 + W2
Wout2 = W1 * W2
print (W1)
print (W2)

```

Результат в консоли:

```

1
-----
2 s - 3

```

```

s + 2
-----
s

```

Process finished with exit code 0

Результат для W_{out1} будет соответствовать параллельному соединению двух звеньев (рисунок 6.7), а W_{out2} – последовательному (рисунок 6.8).

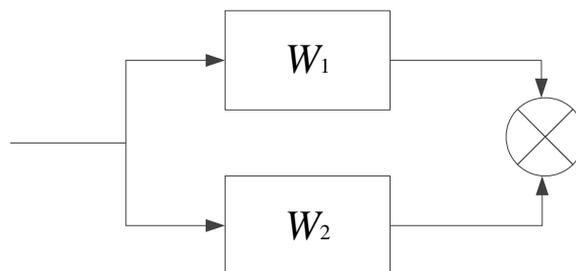


Рисунок 6.7 – Параллельное соединение звеньев

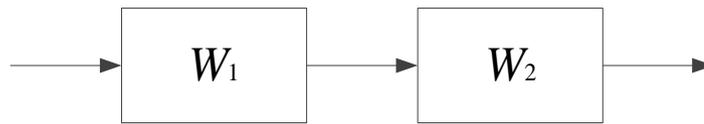


Рисунок 6.8 – Последовательное соединение звеньев

Для реализации отрицательной обратной связи между звеньями будем использовать функцию

```
Wout3 = feedback(W1, W2,+1)
```

Для положительной обратной связи функция выглядит так:

```
Wout4 = feedback(W1, W2,-1)
```

В результате введения положительной обратной связи получим

$$\frac{s}{2s^2 - 4s - 2}$$

Для отрицательной обратной связи:

$$\frac{s}{2s^2 - 2s + 2}$$

5 Для построения характеристик системы следует добавить в проект библиотеку **Matplotlib**. Эта библиотека необходима для создания объектов визуализации. Модуль **pyplot** позволяет работать с графическими объектами и настраивать их параметры.

Пропишем строчку:

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

Функция вывода переходной характеристики прописывается следующим образом:

```
y, x=step(w)
```

Здесь y – параметр времени, x – амплитуда переходной характеристики. Для вывода графика используем функции, представленные в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Функции для построения графиков

Функция	Действие
<code>plt.plot(x,y,"r")</code>	Передаёт функцию для построения двумерного графика, в нашем случае это зависимость x от y . Параметр r означает, что график будет нарисован красным цветом. Дополнительные настройки можно посмотреть в документации к библиотеке
<code>plt.title('Title')</code>	Выводит заголовок графика
<code>plt.ylabel('LabelX')</code>	Выводит подпись оси X
<code>plt.xlabel('LabelY')</code>	Выводит подпись оси Y
<code>plt.grid(True)</code>	Строит график с сеткой
<code>plt.show()</code>	Выводит настроенный график

6 Построим переходную характеристику для последовательного соединения звеньев W_1 и W_2 . Для этого исполним код

```
if __name__ == '__main__':
    W1 = tf(1, [2, -3]);
    W2 = tf([1, 2], [1, 0]);
    Wout1 = W1 + W2
    Wout2 = W1 * W2
    Wout3 = feedback(W1,W2,-1)
    Wout4 = feedback(W1,W2,+1)
    y, x = step(Wout2)
    plt.plot(x, y, "r")
    plt.title('Step')
    plt.ylabel('Amplitude')
    plt.xlabel('Time(sec)')
    plt.grid(True)
    plt.show()
```

В результате исполнения кода выведется график переходной функции системы (рисунок 6.9).

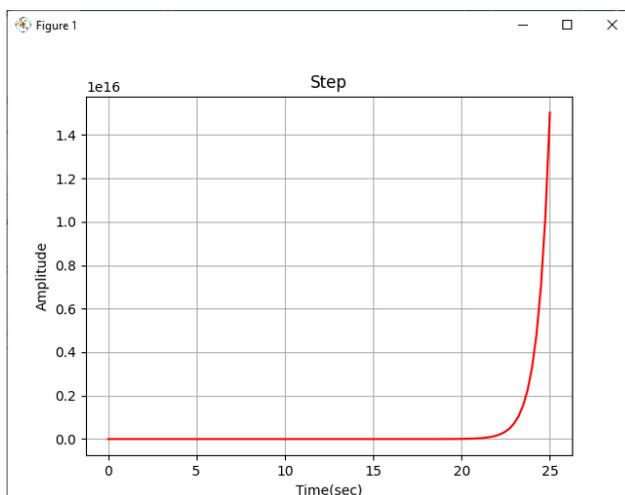


Рисунок 6.9 – Результат исполнения кода

7 Аналогично построим импульсную характеристику системы с обратной связью, используя функцию

```
y, x=impz(Wout3)
```

На рисунке 6.10 представлен результат.

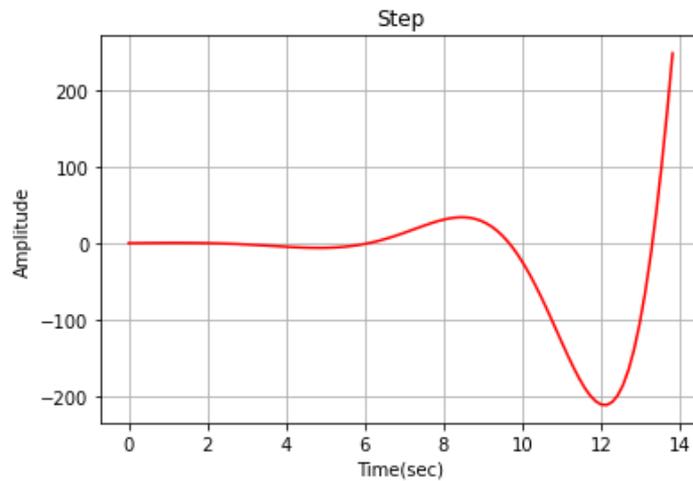


Рисунок 6.10 – Импульсная характеристика системы с введённой обратной связью

8 Для построения диаграмм Боде используется следующий синтаксис:

```
mag, phase, omega = bode(Wout1, dB=True)
```

Результат работы функции представлен на рисунке 6.11.

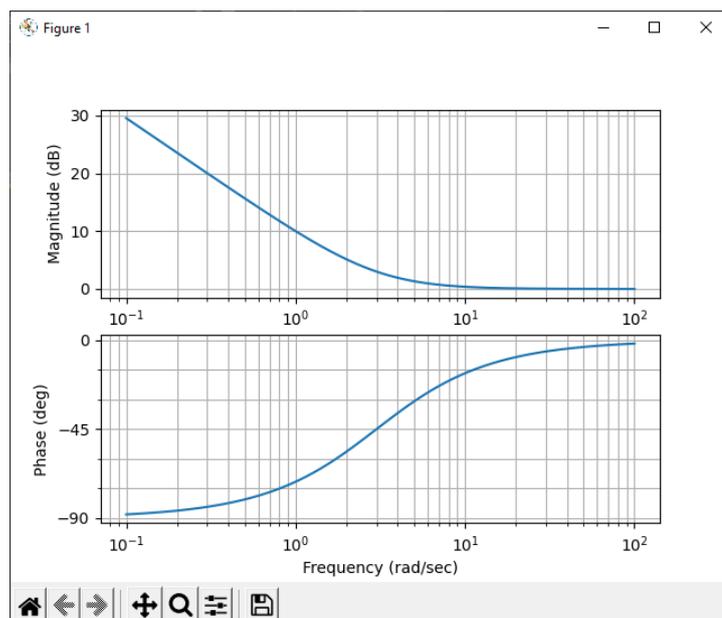


Рисунок 6.11 – Полученные диаграммы Боде

9 Для построения кривой Найквиста используется следующая функция:

```
nyquist(Wout2)
```

Для вывода графика исполним следующий код:

```
plt.title('Nyquist Diagram ')
plt.ylabel('Imaginary Axis')
plt.xlabel('Real Axis')
nyquist(w)
plt.grid(True)
plt.plot()
plt.show()
```

Результатом работы программы станет вывод диаграмм, представленных на рисунке 6.12.

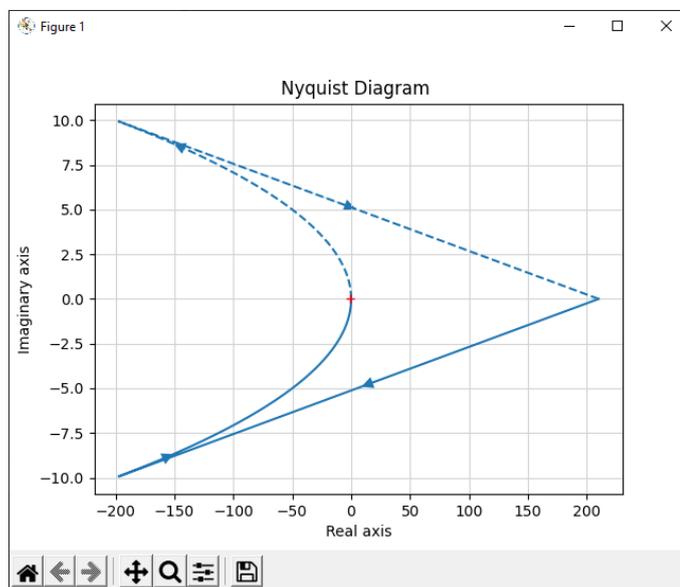


Рисунок 6.12 – Вывод диаграмм Найквиста

Задача 2. Смоделировать поведение простейшей электрической цепи, получить её переходные характеристики. В зависимости от полученных характеристик подумать, почему RC -цепочку называют интегрирующей и что произойдёт, если подать на вход такой цепи последовательность прямоугольных импульсов.

Решение:

В качестве примера рассмотрим RC -цепочку, представленную на рисунке 6.13. Пусть $R_1 = 1$ кОм, $C_1 = 100$ пФ.

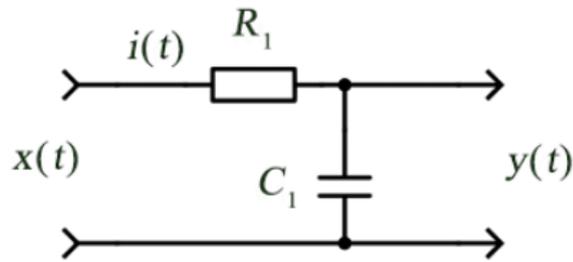


Рисунок 6.13 – Цепь для моделирования

2 Воспользуемся расчётами, полученными в практическом занятии № 2. Передаточная функция равна

$$W(p) = \frac{1}{C_1 R_1 p + 1}.$$

3 Подставим наши значения в формулу:

$$W(p) = \frac{1}{10^{-12} \cdot 1000p + 1}.$$

4 Внесём коэффициенты в функцию **tf(...)**, чтобы можно было использовать её для дальнейших расчётов и построений:

```
from control.matlab import *
import matplotlib.pyplot as plt

if __name__ == '__main__':
    W = tf(1, [0.0000000000001*1000, 1]);
    print(W)
```

5 Построим переходную характеристику системы функцией **step(...)** (рисунок 6.14).

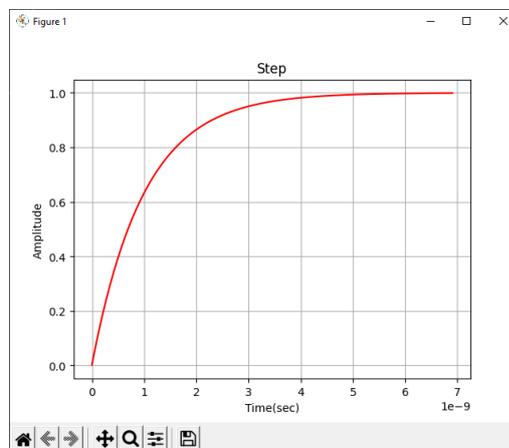


Рисунок 6.14 – Переходная характеристика RC-цепочки

6 Зная физический принцип работы RC -цепочки, понимаем, что время переходного процесса обусловлено временем заряда конденсатора. Как только конденсатор заряжен, управляющая величина переходит в установившийся режим. Данная особенность используется, например, при проектировании схем сброса микроконтроллеров для того, чтобы достигнуть уровня цифровой единицы за время, необходимое для инициализации всей периферии контроллера.

Воспользуемся функцией **bode(...)** и получим логарифмические частотные характеристики системы (рисунок 6.15).

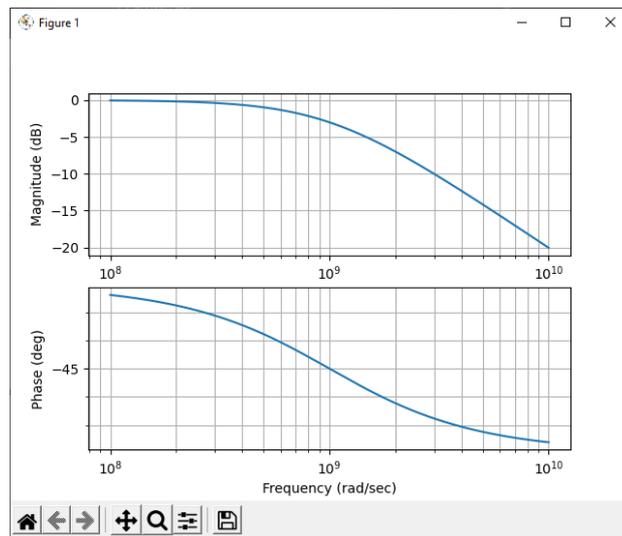


Рисунок 6.15 – ЛАФЧХ системы

7 Как известно, RC -цепочка представляет собой фильтр нижних частот. Такие фильтры хорошо использовать при оцифровке медицинских данных, например пульсовых волн.

Получим импульсную характеристику системы с помощью функции **impulse()** (рисунок 6.16).

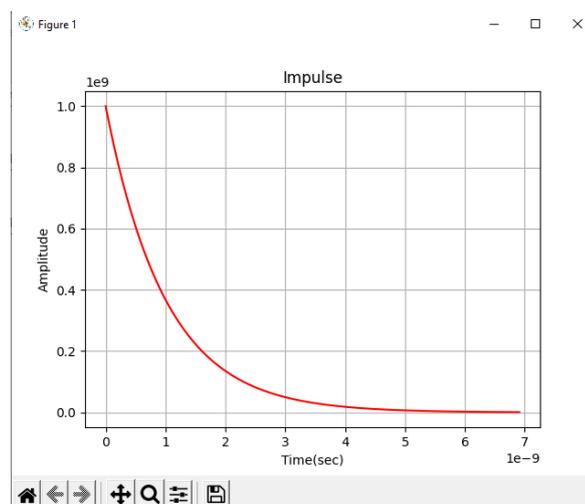


Рисунок 6.16 – Импульсная характеристика системы

Задача 3. С помощью библиотеки BioSPPy обработать биомедицинские сигналы в соответствии с выбранным вариантом задания (таблица 6.2). Объяснить, что происходит на рисунке 6.17.

Таблица 6.2 – Варианты типов обрабатываемого сигнала к задаче 3

Вариант	Тип обрабатываемого сигнала
1	ЭДА
2	ЭМГ
3	Сигнал фотоплетизмографии
4	Дыхание (<i>RESP</i>)

Решение:

1 Для установки библиотеки исполним строчку кода:

```
pip install biosppy
```

BioSPPy – это набор инструментов, предназначенный для обработки биомедицинских сигналов, написанный на Python. Он объединяет различные методы обработки сигналов и распознавания образов, служащие для анализа биомедицинских сигналов [8].

Особенности:

- поддержка различных биомедицинских сигналов: ВVP, ЭКГ, ЭДА, ЭЭГ, ЭМГ, Дыхание;
- базовые возможности анализа сигналов: фильтрация, частотный анализ;
- кластеризация;
- биометрия.

2 Скачаем из репозитория библиотеки пример ЭКГ-сигнала и обработаем его. Для этого исполним код:

```
from biosppy import storage
from biosppy.signals import ecg

# load raw ECG signal
signal, mdata = storage.load_txt('./examples/ecg.txt')

# process it and plot
out = ecg.ecg(signal=signal, sampling_rate=1000., show=True)
```

Результат работы программы – всплывающее окно с фильтрацией и обработкой сигнала (рисунок 6.17).

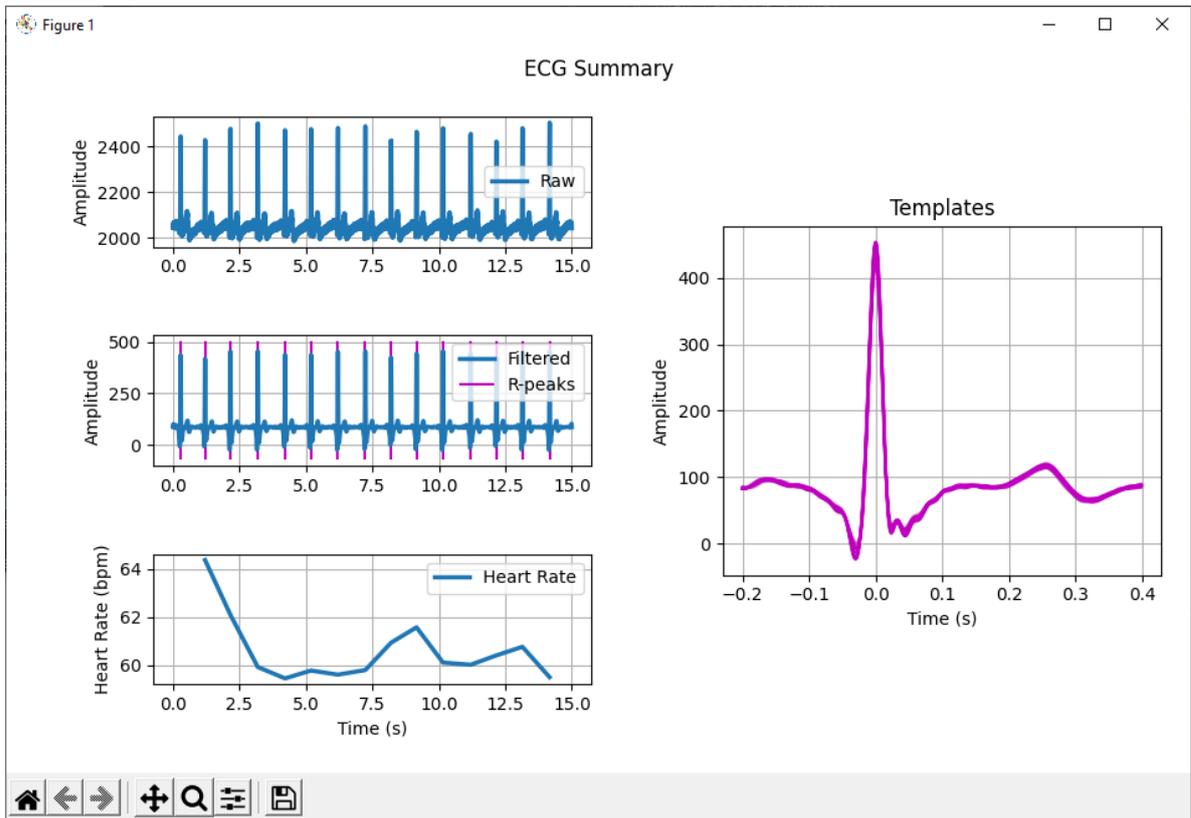


Рисунок 6.17 – Обработка ЭКГ-сигнала

Порядок выполнения задания

- 1 Получить вариант структурной схемы (рисунки 6.18–6.25) и вариант передаточных функций звеньев (таблица 6.3) к задаче 1.
- 2 Преобразовать структурную схему.
- 3 Получить необходимые в задаче характеристики.
- 4 Сделать выводы об устойчивости системы и качестве переходного процесса.
- 5 Получить вариант принципиальной схемы (рисунок 6.26) и значение параметров цепи (таблица 6.4) к задаче 2.
- 6 Смоделировать представленную в варианте электрическую цепь, получить её переходные, частотные, импульсные характеристики.
- 7 Сформулировать выводы о каждом из графиков и о практическом применении такой цепи.

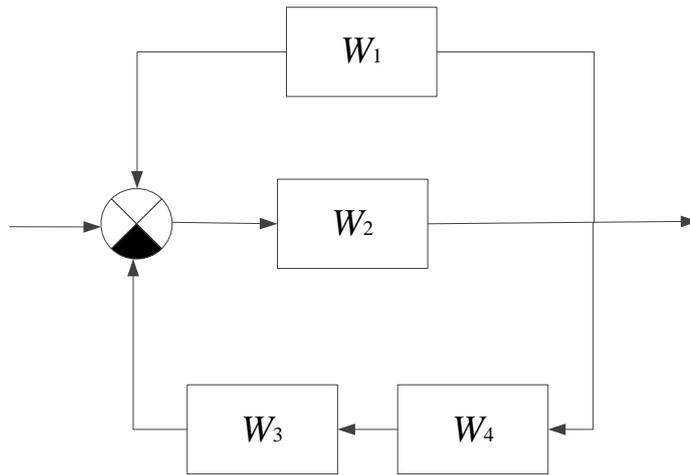


Рисунок 6.18 – Структурная схема для варианта 1 к задаче 1

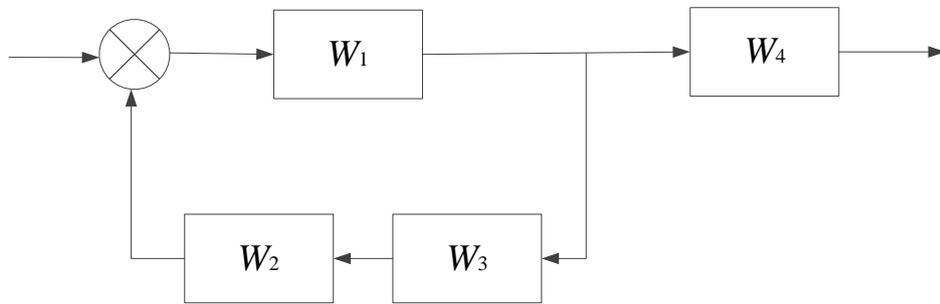


Рисунок 6.19 – Структурная схема для варианта 2 к задаче 1

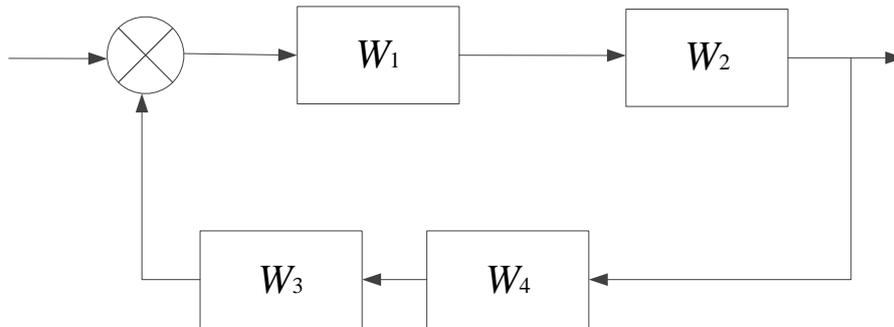


Рисунок 6.20 – Структурная схема для варианта 3 к задаче 1

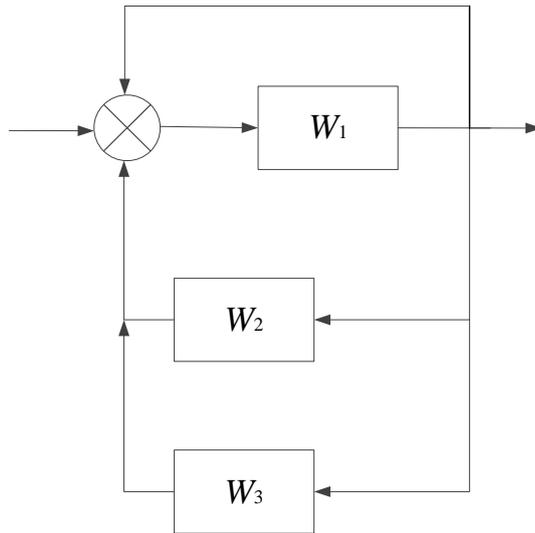


Рисунок 6.21 – Структурная схема для варианта 4 к задаче 1

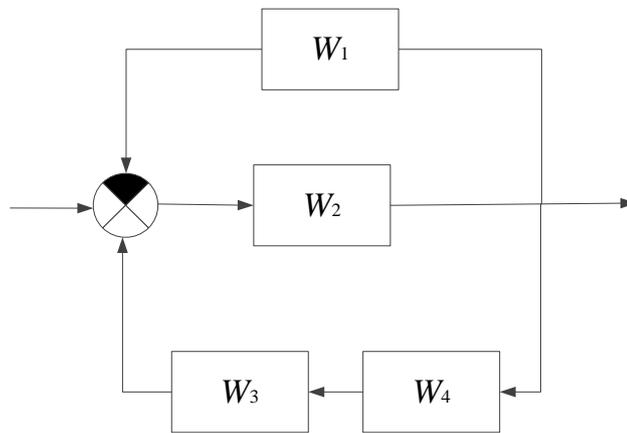


Рисунок 6.22 – Структурная схема для варианта 5 к задаче 1

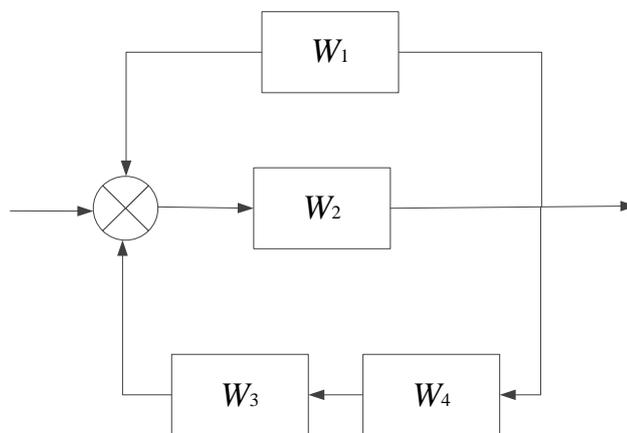


Рисунок 6.23 – Структурная схема для варианта 6 к задаче 1

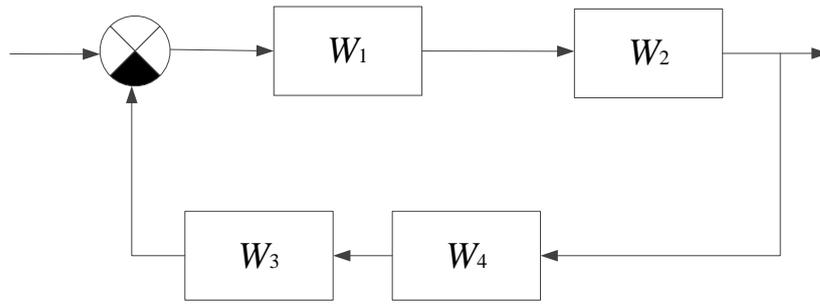


Рисунок 6.24 – Структурная схема для варианта 7 к задаче 1

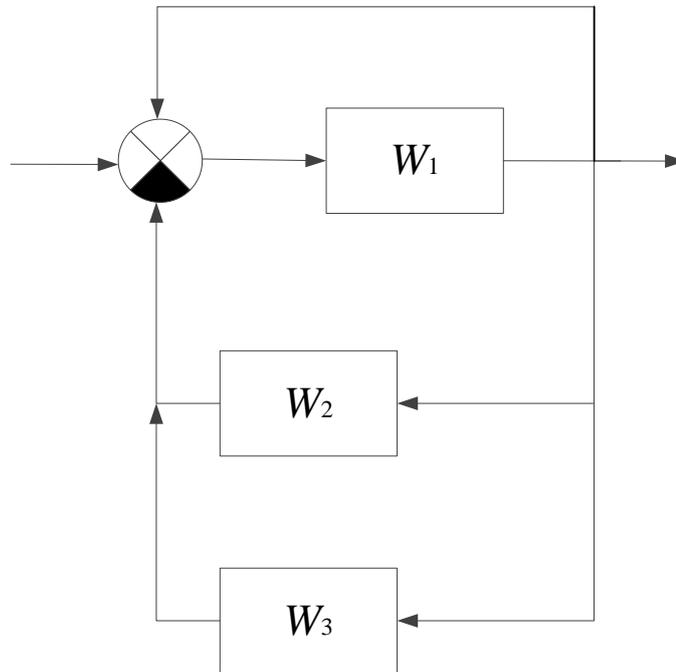


Рисунок 6.25 – Структурная схема для варианта 8 к задаче 1

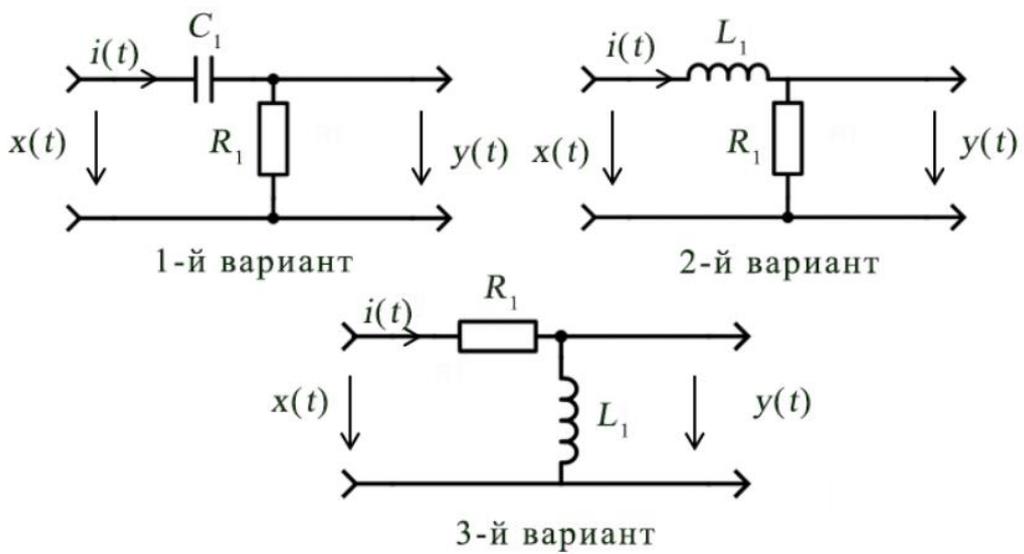


Рисунок 6.26 – Варианты принципиальных схем к задаче 2

Таблица 6.3 – Варианты передаточных функций звеньев к задаче 1

Звено	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
W_1	10	9	22	13
W_2	$\frac{1}{2p}$	$\frac{2}{p}$	$\frac{1}{3p}$	$\frac{4}{p}$
W_3	$\frac{1}{2+p^2}$	$\frac{3}{1-p^2}$	$\frac{2}{1+2p^2}$	$\frac{1}{p^2}$
W_4	$4p$	$10p$	$3p$	$2p$

Таблица 6.4 – Варианты параметров цепи к задаче 2

Вариант	R	L	C
1	10 кОм	350 мкГн	10 пФ
2	1 кОм	100 мкГн	1 пФ
3	2 кОм	200 мкГн	3 пФ
4	100 Ом	50 мкГн	1 нФ
5	510 Ом	10 мкГн	15 нФ
6	1 Ом	5 мкГн	1,5 пФ
7	10 Ом	300 мкГн	1 мкФ
8	270 Ом	240 мкГн	0,1 пФ

Содержание отчёта

- 1 Цель практического занятия и краткие теоретические сведения по изученной теме.
- 2 Варианты, выданные преподавателем.
- 3 Подробное решение задач 1 и 2 с приведением листинга кода.
- 4 Графики и расчёты, необходимые по заданию.
- 5 Выводы по проделанной работе.

Вопросы для самопроверки

- 1 Как начать работу с САУ, используя язык программирования Python?
- 2 Каковы возможности библиотек Control и Matplotlib?
- 3 Какие функции использовались в данном практическом занятии и какое у них предназначение?
- 4 В чём отличие языка программирования Python от других языков?
- 5 Как организовать виртуальное пространство и зачем оно нужно?
- 6 Как подключить дополнительные модули в PyCharm?

Тест по пройденной теме

1 Для чего используется библиотека Control?

- А. Для организации рабочего пространства при программировании.
- Б. Для построения графиков.
- В. Для подключения возможности использовать математические операнды.
- Г. Для работы с САУ.
- Д. Для контроля состояния кода.

2 Что сделает строка представленного ниже кода?

```
plt.xlabel('Radian(8)')
```

- А. Подпишет ось X как 'Radian(8)'.
- Б. Умножит значение шкалы деления оси X на 8.
- В. Переведёт значение частоты на АЧХ в радианы.
- Г. Построит график частоты.
- Д. Построит точку, соответствующую восьмой координате графика.

3 Зачем нужна строка следующего кода?

```
if __name__ == '__main__':
```

- А. Это условие, при котором мы будем выводить график.
- Б. Это условие задания заголовка.
- В. Можно обойтись и без этой строки.
- Г. С помощью неё мы можем задать начало исполняемого кода.
- Д. Нет верных ответов.

4 За что отвечает параметр «b» в строке кода ниже?

```
plt.plot(x, y, "b")
```

- А. За маркировку заголовка графика.
- Б. За синий цвет линии графика.
- В. За вывод координатной сетки.
- Г. За организацию связи между координатами.
- Д. За вывод графика точками.

5 Что отобразится в консоли при исполнении следующего кода?

```
from control.matlab import *
import matplotlib.pyplot as plt

if __name__ == '__main__':
    W1 = tf([1, -10], [1,
0]);
    print(W1)
```

- А.
$$\frac{s - 10}{s}$$
- Б.
$$\frac{10 - s}{s}$$
- В.
$$\frac{s}{10 - s}$$

$$\text{Г. } \frac{s}{s - 10}$$

$$\text{Д. } \frac{s}{s + 10}$$

6 Какая функция позволяет построить частотные характеристики системы?

- А. Функция **step()**.
- Б. Функция **bode()**.
- В. Функция **impulse()**.
- Г. Функция **ampl.characteristics()**.
- Д. Вопрос не рассматривался в данном практическом занятии.

7 Как смоделировать систему с помощью модуля **control**?

- А. Сконфигурировать систему с помощью соединения блоков.
- Б. В библиотеке есть модули, позволяющие добавить номиналы для автоматического расчёта.
- В. Необходимо получить дифференциальное уравнение системы, исходя из него найти передаточную и использовать её для моделирования системы.
- Г. Необходимо составить матрицу значений номиналов элементов и пропустить её через фильтр нижних частот.
- Д. Нет возможности моделирования.

8 Для чего предназначена библиотека BioSPPy?

- А. Для моделирования медицинских сигналов.
- Б. Для обработки медицинских сигналов.
- В. Для конструирования медицинской техники.
- Г. Для проведения лабораторных анализов.
- Д. Для всего вышеперечисленного.

9 Что такое BVP?

- А. ЭОГ-сигнал.
- Б. ЭКГ-сигнал.
- В. «Объем лёгких».
- Г. «Дыхание».
- Д. «Пульс».

10 Какую обработку ЭКГ-сигнала проводит базовая функция **ecg.ecg()**?

- А. Фильтрация, выделение пиков.
- Б. Кластеризация.
- В. Выделение пиков.
- Г. Фильтрация, частотное преобразование.
- Д. Выделение пиков, кластеризация.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ким, П. Д. Теория автоматического управления : учеб. пособие : в 2 ч. / П. Д. Ким. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – Ч. 1 : Линейные системы. – 288 с.
- 2 Ерофеев, А. А. Теория автоматического управления : учебник / А. А. Ерофеев. – СПб. : Политехника, 2008. – 302 с.
- 3 Юревич, Е. И. Теория автоматического управления : учебник / Е. И. Юревич. – 3-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – 560 с.
- 4 Биотехнические системы: теория и проектирование : учеб. пособие / В. М. Ахутин [и др.]. – СПб. : Фолиант, 2008. – 204 с.
- 5 Акулов, С. А. Основы теории биотехнических систем / С. А. Акулов, А. А. Федотов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 259 с.
- 6 Строев, В. М. Проектирование измерительных медицинских приборов с микропроцессорным управлением / В. М. Строев, А. Ю. Куликов, С. В. Фролов. – Тамбов : ТГТУ, 2012. – 96 с.
- 7 Python Control Systems Library [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://python-control.readthedocs.io/en/0.9.0/>.
- 8 Biosignal processing in Python [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://biosppy.readthedocs.io/en/stable/#>.
- 9 Теория линейных систем автоматического регулирования двигателей летательных аппаратов : учеб. пособие / А. Г. Гимадиев [и др.]. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 184 с.

Учебное издание

Косарева Александра Андреевна
Стебунов Сергей Степанович

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
В БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

ПОСОБИЕ

Редактор *А. С. Мигно*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 28.11.2022. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 5,0. Тираж 30 экз. Заказ 222.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск