МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
СТАРООСКОЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.А. УГАРОВА
(филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ОСКОЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ

УТВЕРЖДЕНО НМС ОПК
_____
ПРОТОКОЛ №1
от «01» СЕНТЯБРЯ 2016 г.

Рукавицын Кирилл Олегович

ПМ. 01 МДК.01.04. РАЗДЕЛ 4.3 АВТОМАТИКА

Методические указания для студентов очной формы обучения по выполнению практических работ

Специальность

13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям)

Старый Оскол 2016

Рассмотрены на заседании П(Ц)К спец. 13.02.11 и 15.02.07
Протокол № 1
от «01» сентября 2016 г

Методические указания составлены в соответствии с рабочей программой по МДК 01.04. Техническое регулирование и контроль качества электрического и электромеханического оборудования

Специальности 13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям)

Председатель П(Ц)К

_____*М. В. Горюнова*

Рецензент:
Внутренний

М. В. Горюнова преподаватель ОПК СТИ НИТУ МИСиС

Рукавицын К.О.

Автоматика: методические указания по выполнению практических работ – Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 2017. – 43 с.

Учебное пособие разработано на основе Федерального государственного стандарта (далее – ФГОС) по специальности среднего профессионального образования (далее – СПО) 13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям) и с учетом соответствующей примерной основной образовательной программы (Базисного учебного плана).

В учебном пособии также даны необходимый теоретический материал и методические рекомендации для успешного освоения практической формы обучения.

Содержание

Введение 4
Правила выполнения практических заданий 6
Практическая работа № 1 7
«Составление структурных схем САУ» 7
Практическая работа № 2 13
«Преобразование структурных схем САУ» 13
Практическая работа № 3 24
«Расчет временных характеристик» 24
Практическая работа № 4 34
«Расчет частотных характеристик» 34
Список рекомендуемых источников 43

Введение

При изучении дисциплины «Автоматика» важно уже в начальной части курса сформировать умения математического описания линейных объектов и систем управления, преобразования математических моделей. Этому в значительной степени должны содействовать практические и лабораторные занятия.

В ходе дальнейшего изучения дисциплины специалист должен получить глубокую подготовку по общетеоретическим основам автоматического регулирования и управления и прочные практические навыки выполнения расчетных работ по расчету автоматических систем, уметь:

- применять математические методы для анализа общих свойств линейных систем, на этой основе владеть методами анализа и синтеза линейных систем автоматического управления;

- выполнять расчетные работы по анализу устойчивости и качества систем, синтезу параметров и корректирующих звеньев по заданным требованиям к качеству функционирования систем.

Рекомендуемая точность расчетов – три знака после запятой.

Правила выполнения практических заданий

Практические работы являются обязательными и выполняются студентами в аудитории, на специально отведенном занятии (при необходимости, завершение работы выполняется дома).

Задание выдается индивидуально. Номер задания соответствует порядковому номеру студента в групповом журнале.

Практическая работа выполняется после изучения теоретического материала и носит закрепительный характер.

Перед выполнением практической работы, студенту необходимо самостоятельно повторить общие теоретические сведения, ответить на контрольные вопросы.

После выполнения черновых расчетов, студент должен оформить и сдать преподавателю отчет по выполнению практической работы.

Отчет должен содержать:

- ответы на контрольные вопросы;
- цели и задачи которые требуется решить;
- расчетную часть: исходные данные, составление схемы, выполнение расчетов с соответствующим выводом и обоснованием расчетов;
- заключение: основные выводы по решению поставленной задачи.

Итоговая оценка выставляется после защиты студентом практической работы.

Практическая работа № 1

«Составление структурных схем САУ»

Цель работы: Сформировать практические навыки в составлении структурных схем по известному уравнению динамики объекта.

Студент должен

уметь:

- составлять структурные схемы систем автоматического уравнения на основании приведенных передаточных функций или дифференциальных уравнений системы;
- составлять передаточную функцию объекта управления при заданном дифференциальном уравнении;
- пользоваться преобразованием Лапласа;

знать:

- понятия передаточной функции, оператора дифференцирования;
- типовые соединения звеньев и их эквивалентные передаточные функции;

Теоретическая часть:

Динамические звенья – это технические устройства разнообразной физической природы, поведение которых описывается линейными или нелинейными *дифференциальными уравнениями*.

Линейные дифференциальные уравнения – наиболее общая и полная форма описания динамики поведения системы. Все реальные объекты являются нелинейными, но в ТАУ рассматриваются приближенно линейные уравнения. Пусть $x_1(t)$ – входной сигнал, $x_2(t)$ – выходной сигнал. Рассмотрим линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами.

Предположим, что динамическое поведение звена описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка вида

$$a_2\frac{dx_2^2}{dt^2}+a_1\frac{dx_2}{dt}+a_0x_2(t)=b_1\frac{dx_1}{dt}+b_0x_1 \text{ или } a_2\ddot{x}_2+a_1\dot{x}_2+a_0x_2(t)=b_1\dot{x}_1+b_0x_1(t). \quad (1.1)$$

В *операторной форме при нулевых начальных условиях*, с учетом оператора дифференцирования $p=\frac{d}{dt}$ дифференциальное уравнение (1.1) примет вид

$$a_2p^2x_2(p)+a_1px_2(p)+a_0x_2(p)=b_1px_1(p)+b_0x_1(p). \quad (1.2)$$

Если ввести обозначения $T_2^2=\frac{a_2}{a_0}\left[cek^2\right]$, $T_1=\frac{a_1}{a_0}\left[cek\right]$, $\tau_1=\frac{b_1}{b_0}\left[cek\right]$, $k_1=\frac{b_0}{a_0}\left[\frac{размерность\ x_2(t)}{размерность\ x_1(t)}\right]$, то уравнение (1.2) можно переписать в стандартной символьной записи, принятой в ТАУ в виде

$$(T_2^2p^2+T_1p+1)x_2(p)=k_1(\tau_1p+1)x_1(p) \quad (1.3)$$

В линейной теории автоматического управления применяется способ математического описания, основанный на использовании понятия *передаточной функции*.

Передаточная функция $W(p)$ *– это отношение выходной величины к входной величине, взятые в изображениях Лапласа при нулевых начальных условиях.*

Если вернуться к рассмотрению уравнения (1.3), то передаточная функция звена будет иметь вид

$$W(p) = \frac{x_2(p)}{x_1(p)} = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}. \qquad (1.4)$$

Передаточную функцию звена $W(p)$ можно вывести из дифференциального уравнения (4.2) и наоборот. В общем случае передаточную функцию представляют в виде отношения двух полиномов, то есть $W(p)$ является дробно-рациональной функцией вида

$$W(p) = \frac{\kappa B(p)}{A(p)}. \qquad (1.5)$$

Полином числителя $B(p)$ имеет степень m, а полином знаменателя – имеет степень n. Причем, $n \geq m$ – условие физической реализуемости.

Передаточная функция полностью характеризует *динамические* и *статические* свойства звена. Зная *передаточную функцию* и вид *входного воздействия* можно определить *переходной процесс* на выходе звена и его *статическую характеристику*.

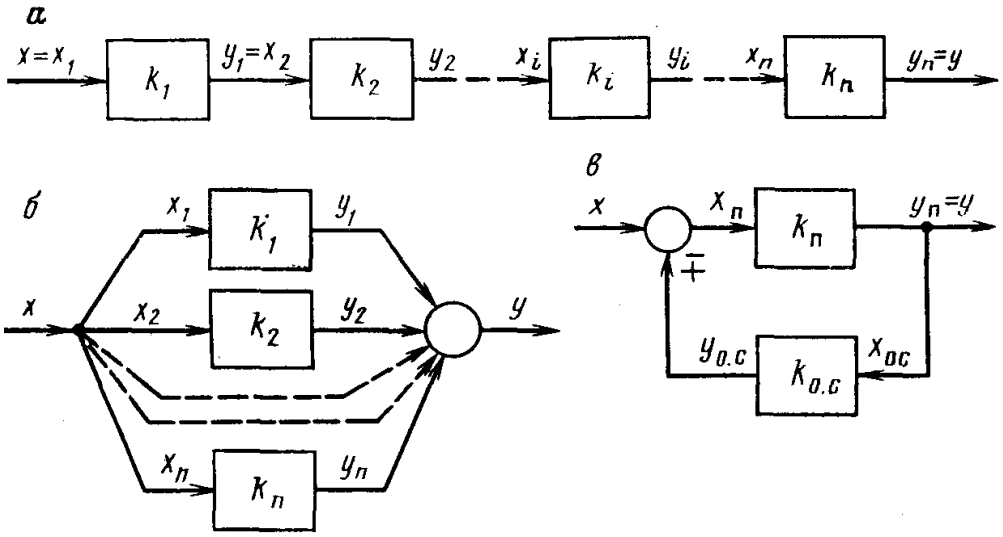


Рис. 1.1. Типовые соединения звеньев

Алгоритмическая структура любой САУ представляет собой комбинацию трех типовых соединений звеньев; последовательного, паралельного и встречно-паралельного (охват обратной связью), как показано на рисунке.

<u>Последовательным соединением</u> называют такое соединение, в котором выходная величина каждого предыдущего элемента является входным воздействием для последующего элемента. Поскольку для каждого i-го элемента уравнения статики запишется

$$y_i = k_i\, y_{i-1}, \qquad (1.6)$$

то ***общий коэффициент передачи последовательно соединенных звеньев равен произведению их передаточных коэффициентов***

$$k_э = \prod_{i=1}^{n} k_i . \qquad (1.7)$$

Соответственно эквивалентная передаточная функция последовательного соединения из n звеньев равна произведению n передаточных функций звеньев

$$W_э(p) = \prod_{i=1}^{n} W_i(p) . \qquad (1.8)$$

<u>Параллельным соединением</u> называют такое соединение, при котором на вход всех звеньев поступает одно и то же воздействие, а их выходные величины суммируются. Согласно этому определению

$$x = x_1 = \ldots = x_i = \ldots = x_n , \qquad (1.9)$$

$$y = y_1 + \ldots + y_i + \ldots + y_n , \qquad (1.10)$$

$$y_i = k_i x_i, \qquad (1.11)$$

то ***общий коэффициент передачи параллельно соединенных звеньев равен сумме их передаточных коэффициентов***

$$k_э = \sum_{i=1}^{n} k_i . \qquad (1.12)$$

Соответственно эквивалентная передаточная функция параллельного соединения из n звеньев равна сумме n передаточных функций звеньев

$$W_э(p) = \sum_{i=1}^{n} W_i(p) . \qquad (1.13)$$

<u>Встречно-параллельным соединением</u> двух звеньев (соединением с обратной связью) называют такое соединение, при котором выходной сигнал первого звена поступает на вход второго, а выходной сигнал второго элемента суммируется с общим входным сигналом. Первое звено называется звеном прямой цепи, а второй элемент – звеном обратной связи. В зависимости от знака сигнала обратной различают положительные и отрицательные обратные связи. Согласно определению понятия обратной связи можно записать уравнения:

прямой связи

$$y_П = k_П x_П, \qquad (1.14)$$

обратной связи

$$y_{о.с.} = k_{о.с} y, \qquad (1.15)$$

и узла суммирования

$$x_П = x \mp y_{о.с.} . \qquad (1.16)$$

Подставляя, получаем уравнение статики соединений с обратной связью

$$y = x \frac{k_П}{1 \pm k_П k_{о.с.}} . \qquad (1.17)$$

Отсюда получим

$$k_Э = \frac{k_П}{1 \pm k_П k_{О.С.}}. \qquad (1.18)$$

общий коэффициент передачи звена, охваченного обратной связью, равен коэффициенту прямой цепи, разделенному на единицу плюс произведение коэффициентов прямой и обратной связи.

Причем знак «+» соответствует отрицательной обратной связи, а знак «-» – положительной.

Соответственно эквивалентная передаточная функция соединения с обратной связью равна

$$W_э(p) = \frac{W_П(p)}{1 \pm W_П(p) W_{О.С.}(p)} \qquad (1.19)$$

Где знак «+» соответствует отрицательной обратной связи, а знак «-» – положительной.

При структурных преобразованиях часто используются различные преобразования. Если известна структурная схема и параметры системы, то можно, пользуясь аппаратом структурных преобразований, найти передаточную функцию замкнутой САУ, а затем ее дифференциальное уравнение.

Задание

По заданным дифференциальным уравнениям (Таблица 1.1) определить передаточные функции и структурные схемы звеньев.

Пример решения задания

Дано дифференциальное уравнение, характеризующее динамику технологического объекта,

$$6{,}25\frac{d^2y}{d\ t^2} + 4\frac{dy}{dt} + y = 9x - 1{,}2\frac{dx}{dt} - 5\frac{du}{dt}.$$

Если ввести оператор дифференцирования p = d/dt, то операторное уравнение (при нулевых начальных условиях) в данном случае примет вид:

$$6{,}25p^2y(p) + 4py(p) + y(p) = 9x(p) - 1{,}2px(p) - 5pu(p).$$

Данное уравнение можно преобразовать, вынеся y(p) и x(p) за скобки:

$$y(p)\cdot(6{,}25p^2 + 4p + 1) = x(p)\cdot(9 - 1{,}2p) - 5pu(p).$$

Разделим обе части уравнения на $6{,}25p^2 + 4p + 1$:

$$y(p) = \frac{9 - 1{,}2p}{6{,}25p^2 + 4p + 1}x(p) - \frac{5p}{6{,}25p^2 + 4p + 1}u(p).$$

Если выделить передаточные функции объекта по переменной x(p) и по переменной u(p)

$$W_x(p) = \frac{9 - 1{,}2p}{6{,}25p^2 + 4p + 1} \quad и \quad W_u(p) = -\frac{5p}{6{,}25p^2 + 4p + 1},$$

то получается уравнение $y(p) = W_x(p)\cdot x(p) + W_u(p)\cdot u(p)$.

Структурная схема объекта приведена на рисунке 3.

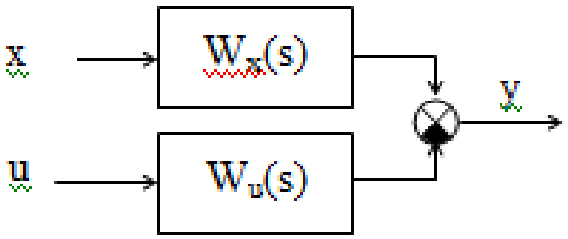


Рисунок 1.2

Таблица 1.1 Индивидуальное задание по вариантам

№ варианта	Дифференциальное уравнение	№ варианта	Дифференциальное уравнение
1	$6\frac{d^2y}{d\ t^2}+5\frac{dy}{dt}+y=2x+\frac{du}{dt}$	**17**	$\frac{d^2y}{dt^2}+y=\frac{dx}{dt}+3x-\frac{du}{dt}$
2	$\frac{d^2y}{dt^2}+\frac{dy}{dt}+y=2\frac{du}{dt}$	**18**	$6\frac{d^2y}{dt^2}+3\frac{dy}{dt}+y=\frac{du}{dt}+2u$
3	$6\frac{d^2y}{dt^2}+3\frac{dy}{dt}+2y=\frac{du}{dt}-3f$	**19**	$5\frac{d^2y}{dt^2}+3\frac{dy}{dt}+0{,}5\cdot y=2\frac{du}{dt}+4u+\frac{df}{dt}$
4	$y+\frac{dy}{dt}+3\frac{d^2y}{dt^2}=2\cdot u+3\frac{df}{dt}+f$	**20**	$3\frac{d^2y}{dt^2}+2\frac{dy}{dt}-x+\frac{df}{dt}=0$
5	$4\frac{d^2y}{dt^2}+2\frac{dy}{dt}-x+\frac{df}{dt}=0$	**21**	$4\frac{d^2y}{dt^2}+\frac{dy}{dt}=\frac{dx}{dt}+2\cdot x-10f$
6	$4\frac{d^2y}{dt^2}+\frac{dy}{dt}+y=6\frac{du}{dt}+u$	**22**	$16\frac{d^2y}{dt^2}+y+8\frac{dy}{dt}=5\frac{df}{dt}-7f-x$
7	$y-2\frac{d^2x}{dt^2}+\frac{d^2y}{dt^2}+\frac{dy}{dt}=3x+\frac{d^2f}{dt^2}$	**23**	$4\frac{d^2y}{dt^2}+5\frac{dy}{dt}+y=4\frac{dx}{dt}+u$
8	$4\frac{d^2y}{dt^2}+5\frac{dy}{dt}+\frac{df}{dt}-3f=0$	**24**	$10y+2\frac{d^2y}{dt^2}+4\frac{dy}{dt}-3x=5u$
9	$\frac{d^2y}{dt^2}+y=\frac{dx}{dt}+3\cdot x+2\cdot f$	**25**	$\frac{d^2y}{dt^2}+\frac{dy}{dt}+y=2\frac{du}{dt}$
10	$5\frac{d^2y}{dt^2}+3\frac{dy}{dt}+0.5y=2\frac{du}{dt}+4u+\frac{df}{dt}$	**26**	$16\frac{d^2y}{dt^2}+2\frac{dy}{dt}-x+\frac{df}{dt}=0$
11	$-2\frac{dy}{dt}+\frac{d^2y}{dt^2}-2\frac{dx}{dt}-x+4y=0$	**27**	$y+\frac{dy}{dt}+3\frac{d^2y}{dt^2}=2u+3\frac{df}{dt}+f$
12	$4\frac{d^2y}{dt^2}+2\frac{d^3y}{dt^3}+\frac{dy}{dt}=\frac{dx}{dt}+2x-10f$	**28**	$4\frac{d^2y}{dt^2}+\frac{dy}{dt}+y=6\frac{du}{dt}+u$
13	$16\frac{d^2y}{dt^2}+y+8\frac{dy}{dt}=5\frac{df}{dt}-7f-x$	**29**	$y-2\frac{d^2x}{dt^2}+\frac{d^2y}{dt^2}+\frac{dy}{dt}=3x+\frac{d^2f}{dt^2}$

14	$4\frac{d^2y}{dt^2}+5\frac{dy}{dt}+y=4\frac{dx}{dt}+u$	**30**	$3\frac{dy}{dt}+4\frac{d^2y}{dt^2}+10y=3\frac{df}{dt}-2f+x$
15	$3\frac{dy}{dt}-6y=\frac{dx}{dt}-x+8f$	**31**	$\frac{d^2y}{dt^2}+y=\frac{dx}{dt}+3x+2f$
16	$2\frac{d^2y}{dt^2}+2\frac{dy}{dt}-u=2\frac{d^2u}{dt^2}$	**32**	$6\frac{d^2y}{dt^2}+3\frac{dy}{dt}+2y=\frac{du}{dt}-3f$

Предварительно повторить тему «Структурные схемы САУ» и ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Что такое передаточная функция объекта?
2. Что такое структурная схема САУ?
3. Формула оператора дифференцирования.
4. Передаточная функция последовательно соединенных звеньев.
5. Передаточная функция параллельно-согласованно соединенных звеньев.

Литература

1. Методы классической и современной теории автоматического управления в 3-х т. Т.1: Анализ и статическая динамика систем автоматического управления/Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 748 с.
2. Ерофеев А.А. Теория автомтического управления: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб.и доп. – СПб.: Политехника, 2012. – 302 с.
3. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 288 с.

Практическая работа № 2

«Преобразование структурных схем САУ»

Цель работы: Сформировать практические навыки по определению передаточной функции замкнутой системы, используя правилам преобразования.

Студент должен

уметь:

- составлять и преобразовывать структурные схемы систем автоматического;
- составлять передаточную функцию объекта управления при заданном дифференциальном уравнении;

знать:

- понятия передаточной функции, оператора дифференцирования;
- типовые соединения звеньев и их эквивалентные передаточные функции;
- эквивалентные преобразования звеньев.

2.2.1. Пояснение к занятию:

Структурная схема САУ в простейшем случае строится из элементарных динамических звеньев. Но несколько элементарных звеньев могут быть заменены одним звеном со сложной передаточной функцией. Для этого существуют правила эквивалентного преобразования структурных схем. Рассмотрим возможные способы преобразований.

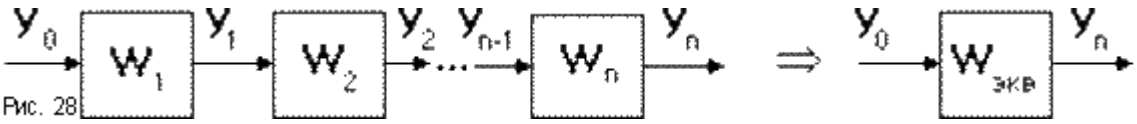


Рис. 2.1. Эквивалентное преобразование последовательного соединения

1. *Последовательное соединение* (рис.2.1) - выходная величина предшествующего звена подается на вход последующего.

При этом можно записать:

$y_1 = W_1 \cdot y_0;\ y_2 = W_2 \cdot y_1;\ ...;\ y_n = W_n \cdot y_{n-1} =>$

$y_n = W_1 \cdot W_2 ..... W_n . y_0 = W_{экв} \cdot y_0,$

где $W_{экв} = \prod_{i=1}^{n} W_i$.

То есть цепочка последовательно соединенных звеньев преобразуется в эквивалентное звено с передаточной функцией, равной произведению передаточных функций отдельных звеньев.

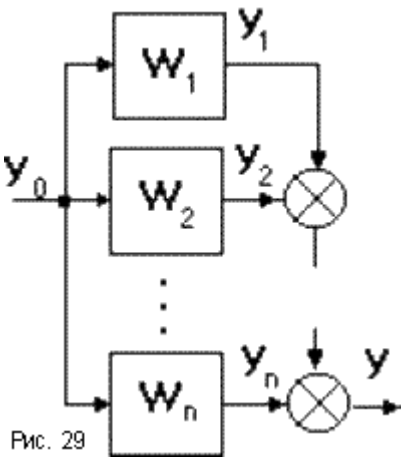


Рис. 2.2. Параллельное соединение

2. *Параллельно - согласное соединение* (рис.2.2) - на вход каждого звена подается один и тот же сигнал, а выходные сигналы складываются. Тогда:

$$\mathbf{y = y_1 + y_2 + ... + y_n = (W_1 + W_2 + ... + W3)y_o = W_{экв} \cdot y_o,}$$

где $\mathbf{W_{экв} = \sum_{i=1}^{n} W_i}$.

То есть цепочка звеньев, соединенных параллельно - согласно, преобразуется в звено с передаточной функцией, равной сумме передаточных функций отдельных звеньев.

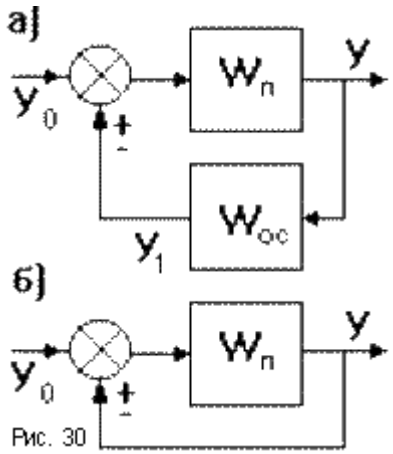


Рис.2.3. Встречно-параллельное соединение

3. *Прараллельно - встречное соединение* (рис. 2.3) - звено охвачено положительной или отрицательной обратной связью. Участок цепи, по которому сигнал идет в противоположном направлении по отношению к системе в целом (то есть с выхода на вход) называется *цепью обратной связи* с передаточной функцией $\mathbf{W_{oc}}$. При этом для отрицательной ОС:

$$\mathbf{y = W_п u;\ y_1 = W_{oc} y;\ u = y_o - y_1,}$$

следовательно

$$y = W_п y_o - W_п y_1 = W_п y_o - W_п W_{oc} y = >$$

$$y(1 + W_п W_{oc}) = W_п y_o = > y = W_{экв} y_o,$$

где $$W_{экв} = \frac{W_п}{1 + W_п W_{oc}}.$$

Аналогично: $$W_{экв} = \frac{W_п}{1 - W_п W_{oc}}$$ - для положительной ОС.

Если $W_{oc} = 1$, то обратная связь называется единичной (рис.2.3 б), тогда $W_{экв} = W_п /(1 \pm W_п)$.

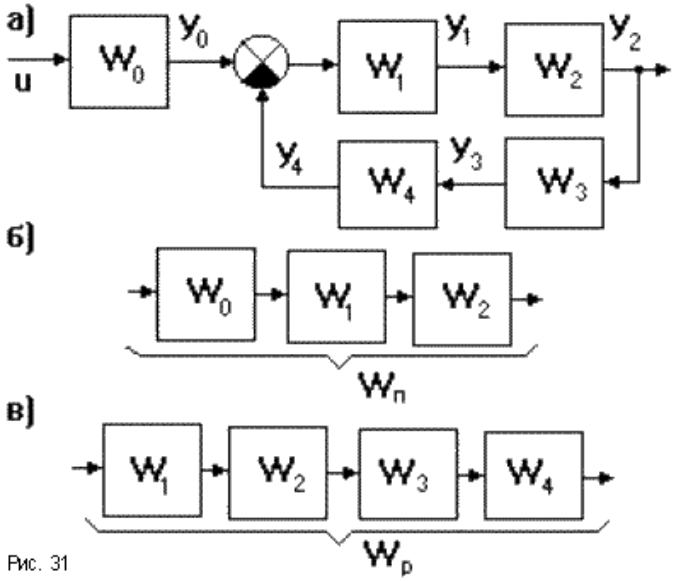


Рис.2.4. Примеры одноконтурных систем

Замкнутую систему называют *одноконтурной*, если при ее размыкании в какой либо точке получают цепочку из последовательно соединенных элементов (рис.2.4 а). Участок цепи, состоящий из последовательно соединенных звеньев, соединяющий точку приложения входного сигнала с точкой съема выходного сигнала называется *прямой* цепью (рис.2.4 б, передаточная функция прямой цепи $W_п = Wo \cdot W_1 \cdot W_2$). Цепь из последовательно соединенных звеньев, входящих в замкнутый контур называют *разомкнутой цепью* (рис.2.4 в, передаточная функция разомкнутой цепи $W_р = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4$). Исходя из приведенных выше способов эквивалентного преобразования структурных схем, одноконтурная система может быть представлена одним звеном с передаточной функцией: $W_{экв} = W_п/(1 \pm W_р)$ - передаточная функция одноконтурной замкнутой системы с отрицательной ОС равна передаточной функции прямой цепи, деленной на единицу плюс передаточная функция разомкнутой цепи. Для положительной ОС в знаменателе знак минус. Если сменить точку снятия выходного сигнала, то меняется вид прямой цепи. Так, если считать выходным сигнал y_1 на выходе звена W_1, то $W_р = Wo \cdot W_1$. Выражение для передаточной функции разомкнутой цепи не зависит от точки снятия выходного сигнала.

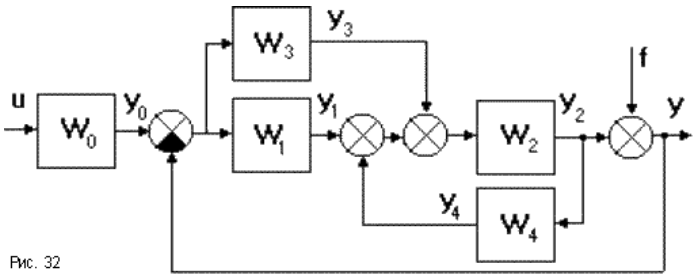


Рис. 2.5. Многоконтурная система

Замкнутые системы бывают *одноконтурными* и *многоконтурной* (рис.2.6).Чтобы найти эквивалентную передаточную функцию для данной схемы нужно сначала осуществить преобразование отдельных участков.

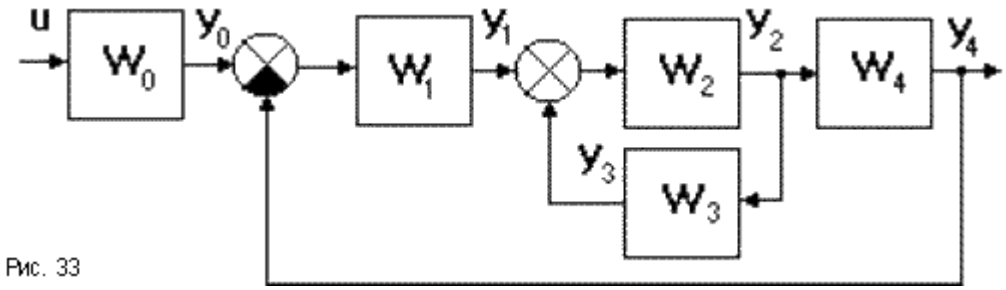


Рис.2.6. Система с перекрещивающимися связями

Если многоконтурная система имеет *перекрещивающиеся связи* (рис.2.6), то для вычисления эквивалентной передаточной функции нужны дополнительные правила:

4. При переносе сумматора через звено по ходу сигнала необходимо добавить звено с передаточной функцией того звена, через которое переносится сумматор. Если сумматор переносится против хода сигнала, то добавляется звено с передаточной функцией, обратной передаточной функции звена, через которое переносим сумматор (рис.2.7).

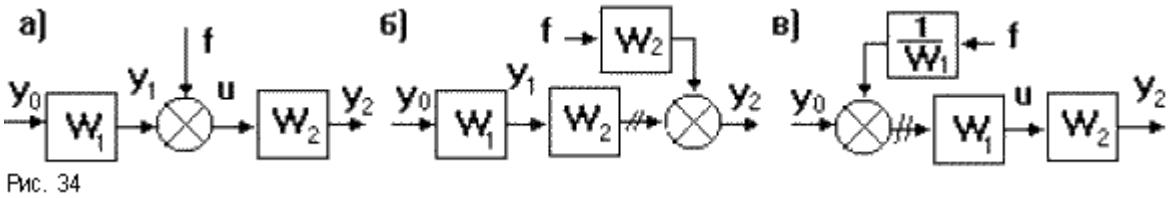


Рис. 2.7. Перенос через сумматор

Так с выхода системы на рис.34а снимается сигнал

$$y_2 = (f + y_0W_1)W_2.$$

Такой же сигнал должен сниматься с выходов систем на рис.34б:

$$y_2 = fW_2 + y_0W_1W_2 = (f + y_0W_1)W_2,$$

и на рис.34в:

$$y_2 = (f(1/W_1) + y_o)W_1W_2 = (f + y_oW_1)W_2.$$

При подобных преобразованиях могут возникать неэквивалентные участки линии связи (на рисунках они заштрихованы).

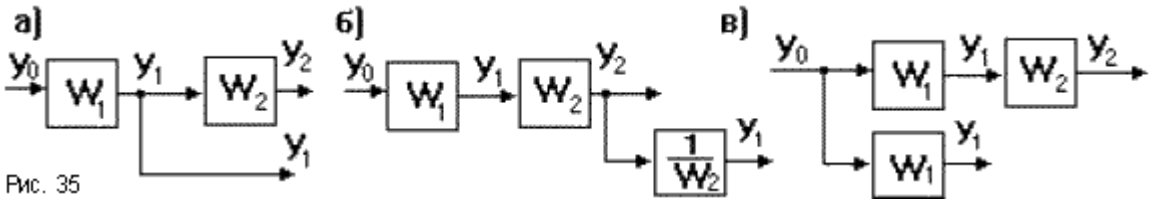


Рис.2.8. Перенос узла

5. При переносе узла через звено по ходу сигнала добавляется звено с передаточной функцией, обратной передаточной функции звена, через которое переносим узел. Если узел переносится против хода сигнала, то добавляется звено с передаточной функцией звена, через которое переносится узел (рис.2.8).

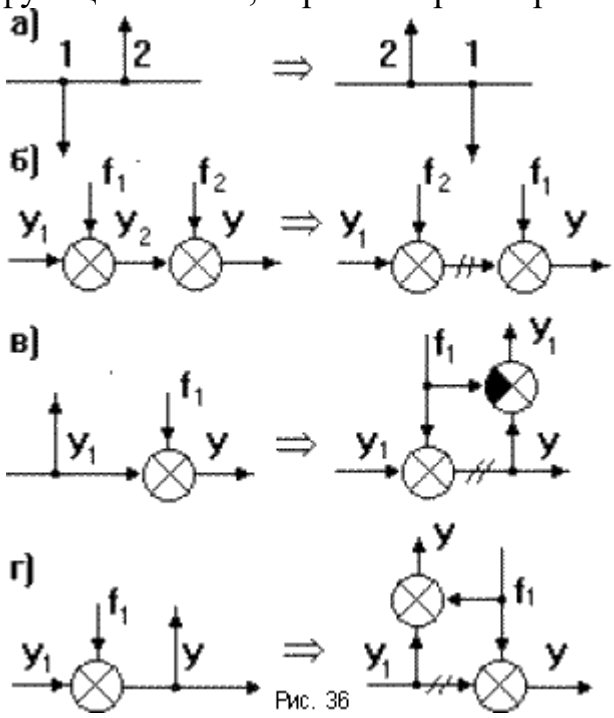


Рис.2.9. Перестановка узлов и сумматоров

Так с выхода системы на рис.2.8 а снимается сигнал

$$y_1 = y_oW_1.$$

Такой же сигнал снимается с выходов рис.2.8б:

$$y_1 = y_oW_1W_2/W_2 = y_oW_1$$

и рис.2.8 в:

$$y_1 = y_oW_1.$$

6. Возможны взаимные перестановки узлов и сумматоров: узлы можно менять местами (рис. 2.9а); сумматоры тоже можно менять местами (рис.2.9 б); при переносе узла через сумматор необходимо добавить сравнивающий элемент (рис.2.9 в: $\mathbf{y = y_1 + f_1 = > y_1 = y - f_1}$) или сумматор (рис.29 г: $\mathbf{y = y_1 + f_1}$).

Во всех случаях переноса элементов структурной схемы возникают *неэквивалентные участки* линии связи, поэтому надо быть осторожным в местах съема выходного сигнала.

При эквивалентных преобразованиях одной и той же структурной схемы могут быть получены различные передаточные функции системы по разным входам и выходам.

Задание

Задача 1.

Определить передаточную функцию структурной схемы по заданному варианту.

Пример решения задачи 1.

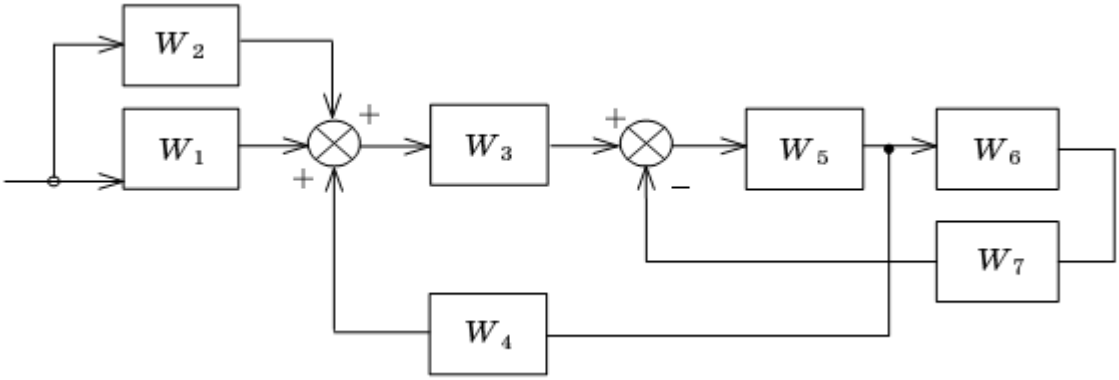


Рисунок 2.10. Исходная схема

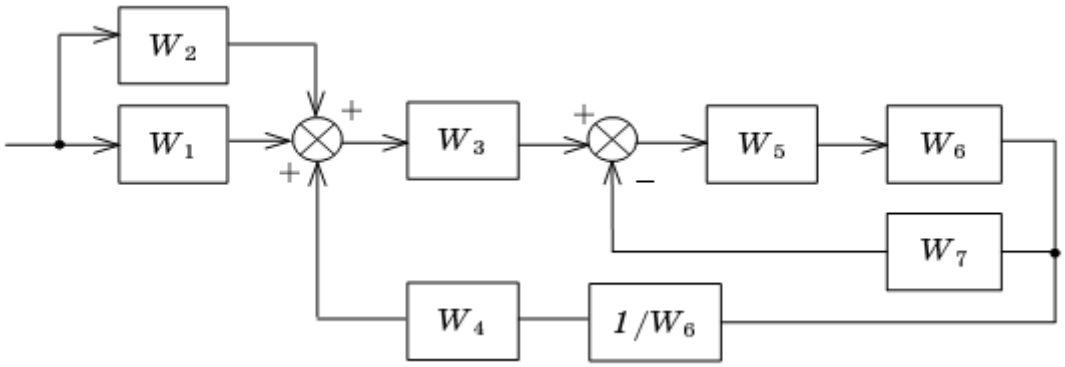
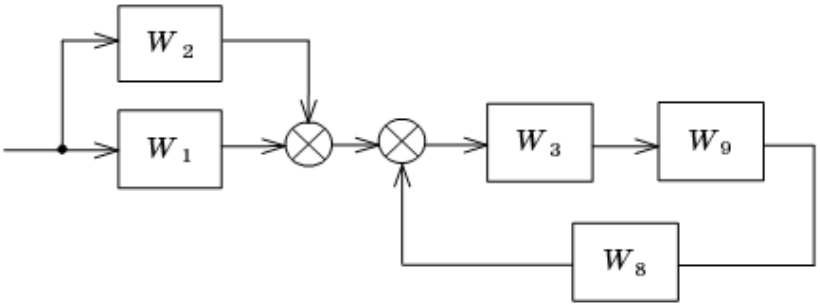


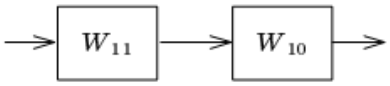
Рисунок 2.11. Перенос узла по ходу сигнала

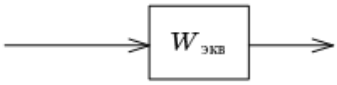


$$W_9 = \frac{W_5 W_6}{1 + W_7 W_6 W_5}$$

$$W_8 = \frac{W_4}{W_6}$$

Рисунок 2.12. Свертывание обратной связи и последовательного соединения



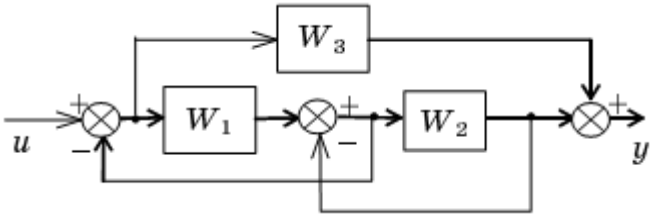


$$W_{10} = \frac{W_3 W_9}{1 - W_8 W_3 W_9}$$

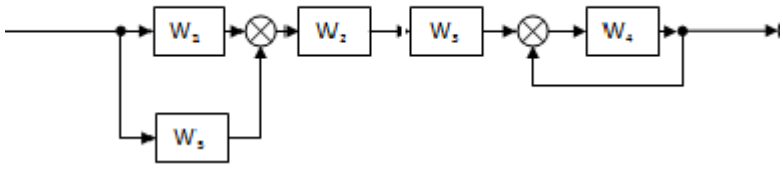
$$W_{11} = W_1 + W_2$$

$$W_{экв} = W_{10} W_{11} = \frac{W_1 W_3 W_5 W_6 + W_2 W_3 W_5 W_6}{1 - W_5 W_6 W_7 - W_3 W_4 W_5}$$

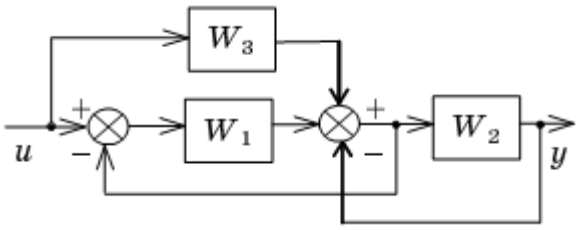
Рисунок 2.13. Свертывание обратной связи, свертывание последовательного соединения и параллельного соединения



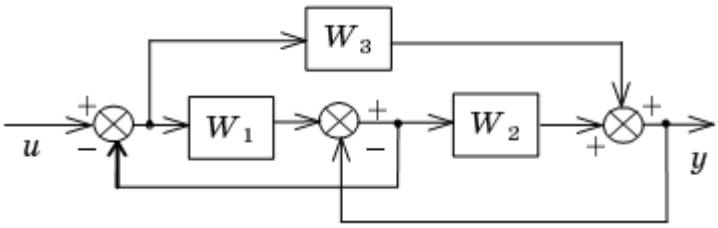
Вариант 1.



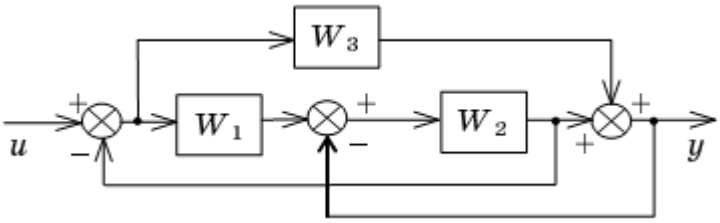
Вариант 2.



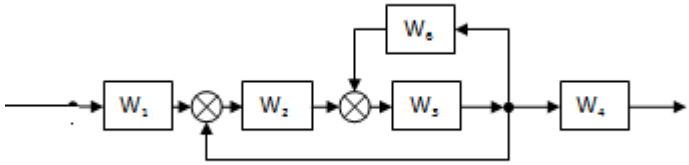
Вариант 3.



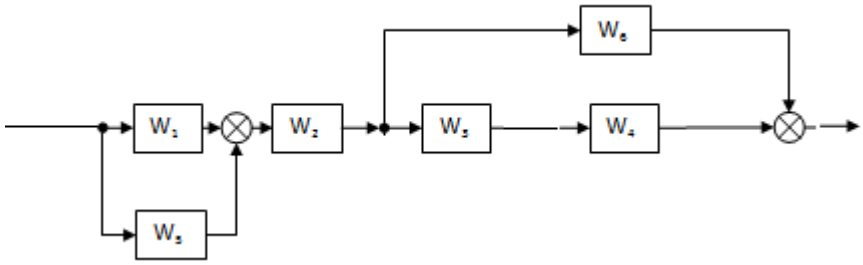
Вариант 4.



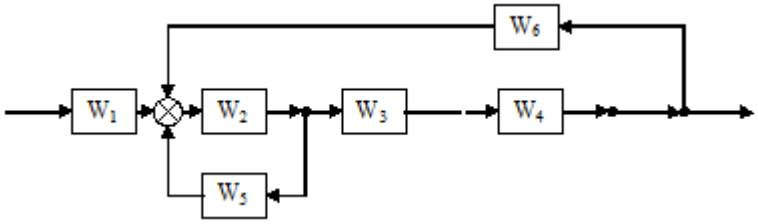
Вариант 5.



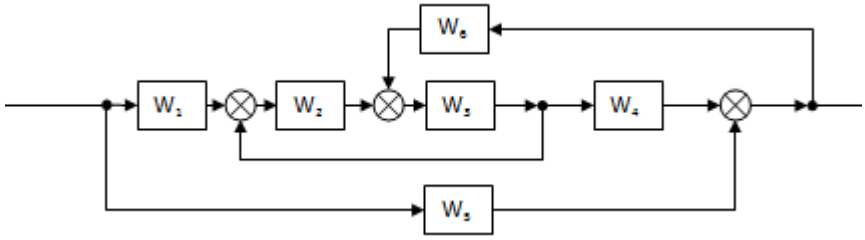
Вариант 6.



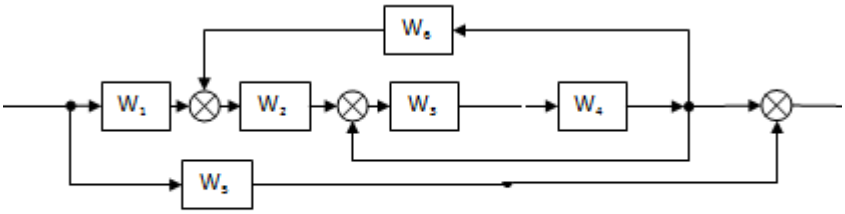
Вариант 7.



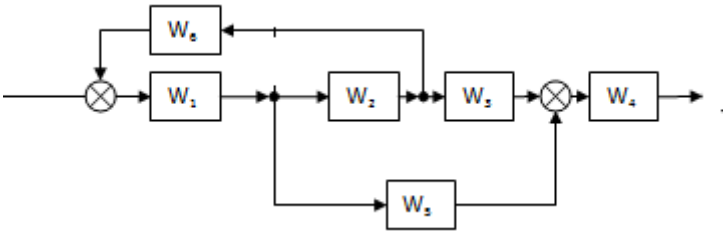
Вариант 8.



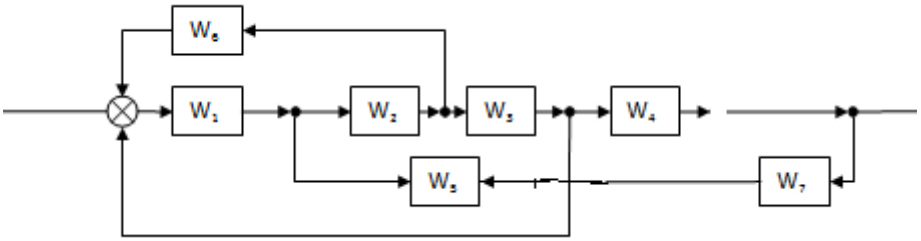
Вариант 9.



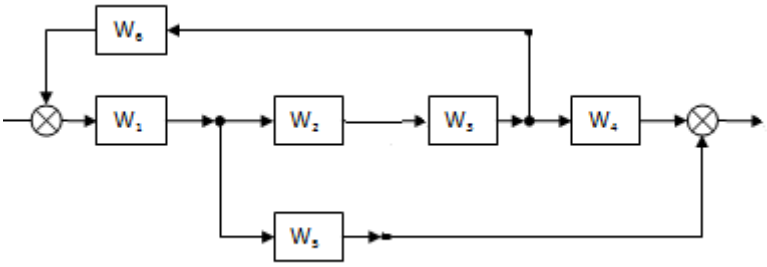
Вариант 10.



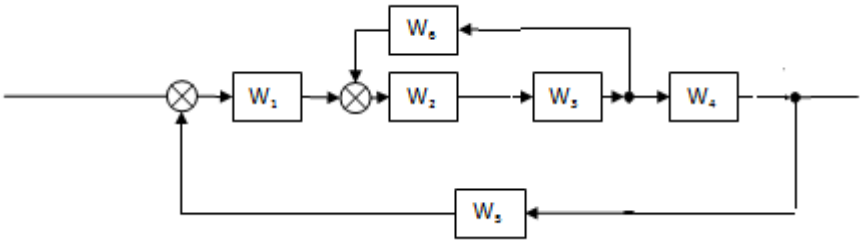
Вариант 11.



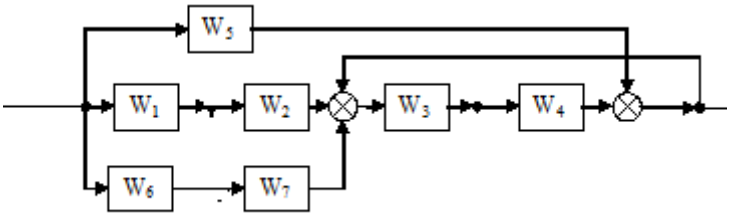
Вариант 12.



Вариант 13.



Вариант 14.



Вариант 15.

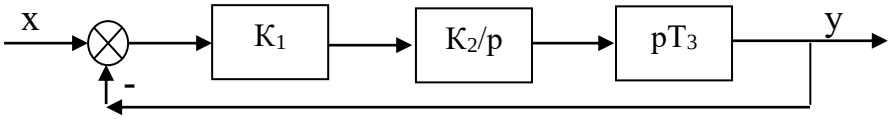
Задача 2.

Построить структурную схему и определить передаточную функцию, по индивидуальному заданию в таблице 2.2.1.

Пример решения задачи 2.

Задано: Пропорциональное, интегрирующее и идеально дифференцирующее звенья соединены последовательно, система замкнута по отклонению.

Решение:



$$W(p)=\frac{K_1*\frac{K_2}{p}*pT_3}{1+K_1*\frac{K_2}{p}*pT_3}=\frac{K_1*K_2*T_3}{1+K_1*K_2*T_3}$$

Таблица 2.1. Индивидуальное задание по вариантам

№ варианта	Типовые звенья	Описание системы
1	**2**	**3**
1	Пропорциональное, колебательное, Инерционное	Последовательное соединение звеньев. Система замкнута. ПОС
2	Пропорциональное, интегрирующее, Инерционное	Последовательное соединение звеньев. Система замкнута. ООС
3	Пропорциональное, реально дифференцирующее, инерционное	Параллельное соединение звеньев. Система замкнута. ПОС
4	Пропорциональное, идеально дифференцирующее, инерционное	Параллельное соединение звеньев. Система замкнута. ООС
5	Идеально дифференцирующее, колебательное, инерционное	Последовательное соединение звеньев, система разомкнута
6	Реально дифференцирующее, колебательное, инерционное	Параллельное соединение звеньев, система разомкнута
7	Интегрирующее, колебательное, инерционное	Последовательное соединение звеньев. Система замкнута. ПОС
8	Пропорциональное, колебательное, Инерционное	Последовательное соединение звеньев. Система замкнута. ООС
9	Пропорциональное, интегрирующее, Инерционное	Параллельное соединение звеньев. Система замкнута. ПОС
10	Пропорциональное, реально дифференцирующее, инерционное	Параллельное соединение звеньев. Система замкнута. ООС
11	Пропорциональное, идеально дифференцирующее, инерционное	Последовательное соединение звеньев, система разомкнута
12	Идеально дифференцирующее, колебательное, инерционное	Параллельное соединение звеньев, система разомкнута
13	Реально дифференцирующее, колебательное, инерционное	Последовательное соединение звеньев. Система замкнута. ПОС
14	Интегрирующее, колебательное, инерционное	Последовательное соединение звеньев. Система замкнута. ООС
15	Пропорциональное, колебательное, Инерционное	Параллельное соединение звеньев. Система замкнута. ПОС
16	Пропорциональное, интегрирующее, Инерционное	Параллельное соединение звеньев. Система замкнута. ООС
17	Пропорциональное, реально дифференцирующее, инерционное	Последовательное соединение звеньев, система разомкнута
18	Пропорциональное, идеально дифференцирующее, инерционное	Параллельное соединение звеньев, система разомкнута
19	Идеально дифференцирующее, колебательное, инерционное	Параллельное первых двух, система замкнута по разности третьего
20	Реально дифференцирующее, колебательное, инерционное	Последовательное соединение звеньев. Система замкнута. ПОС
21	Интегрирующее, колебательное,	Последовательное соединение звеньев.

	инерционное	Система замкнута. ООС
22	Пропорциональное, колебательное, Инерционное	Параллельное соединение звеньев. Система замкнута. ПОС
23	Пропорциональное, интегрирующее, Инерционное	Параллельное соединение звеньев. Система замкнута. ООС
24	Пропорциональное, реально дифференцирующее, инерционное	Последовательное соединение звеньев, система разомкнута
25	Пропорциональное, идеально дифференцирующее, инерционное	Параллельное соединение звеньев, система разомкнута
26	Идеально дифференцирующее, колебательное, инерционное	Последовательное соединение звеньев. Система замкнута. ПОС
27	Реально дифференцирующее, колебательное, инерционное	Последовательное соединение звеньев. Система замкнута. ООС
28	Интегрирующее, колебательное, инерционное	Параллельное соединение звеньев. Система замкнута. ПОС

Предварительно повторить тему «Структурные схемы САУ» и ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Назначение структурной схемы САУ?
2. Каковы основные рекомендации по использованию правил эквивалентного преобразования структурных схем?
3. Каковы правила переноса сумматора?
4. Каковы правила переноса узла разветвления?

Литература

1. Методы классической и современной теории автоматического управления в 3-х т. Т.1: Анализ и статическая динамика систем автоматического управления/Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 748 с.
2. Ерофеев А.А. Теория автомтического управления: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб.и доп. – СПб.: Политехника, 2012. – 302 с.
3. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 288 с.

Практическая работа № 3

«Расчет временных характеристик»

Цель работы: Сформировать практические навыки по построению временных характеристик по заданной передаточной функции и определению параметров системы по графику временной характеристики.

Студент должен

уметь:

- строить временные характеристики системы по заданному характеристическому уравнению;
- составлять передаточную функцию объекта управления при заданном дифференциальном уравнении;
- пользоваться преобразованием Лапласа;
- переходить от переходной характеристики к импульсной переходной характеристике;

знать:

- понятия передаточной функции, оператора дифференцирования;
- понятия переходной характеристики и импульсной переходной характеристики.

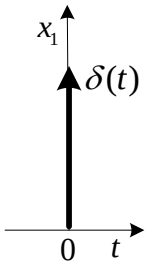
Теоретическое введение:

В ТАУ используются следующие математические описания систем автоматического управления:

1) временные характеристики;
2) дифференциальные уравнения;
3) частотные характеристики;
4) передаточные функции;
5) метод пространства состояний.

Наглядное представление о свойствах звена дает функция, являющаяся решением дифференциального уравнения. Но одно и то же дифференциальное уравнение может иметь множество решений, конкретный вид которых зависит от начальных условий и от характера функции, задающей воздействие. Поэтому принято динамические свойства элементов систем характеризовать решением, соответствующим нулевым начальным условиям и одному из типовых воздействий, рассмотренных выше. Наиболее наглядное представление о динамических свойствах элемента дает его переходная характеристика.

Вначале, введем понятие *единичного импульса* $\delta(t)$, называемого дельта-функцией. График дельта-функции $\delta(t)$ представлен на рис.3.1.



$$\begin{cases} \delta(t) = 0;\ \forall t > или < 0 \\ \delta(0) = 1;\ t = 0 \end{cases}$$

Рис.3.1. Дельта-функция

Весовая функция $\omega(t)$ – это *реакция* динамического звена на единичный импульс $\delta(t)$.

Поскольку, согласно выражению передаточной функции, выходная величина $x_2(p) = W(p)x_1(p)$, а изображение дельта-функции равно $x_1(t) = L\{\delta(\mathrm{t})\} = 1$, то весовая функция $\omega(t)$ определяется из передаточной функции $W(p)$ посредством обратного преобразования Лапласа следующим образом $x_2(t) = \omega(t) = L^{-1}\{W(p)\}$.

График весовой функции рассматриваемого звена представлен на рис.3.2.

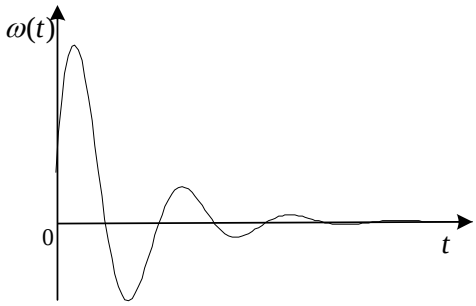


Рис.3.2. Весовая функция

Соответственно передаточная функция $W(p)$ будет изображением по Лапласу весовой функции $\omega(t)$

$$W(p) = L\{\omega(t)\}.$$

Переходная функция звена

Вначале введем понятие *единичного ступенчатого воздействия* $1(t)$. Графическое изображение единичного ступенчатого воздействия представлено на рис.3.3.

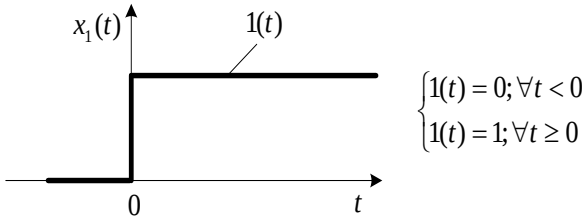


Рис.3.3. Единичное ступенчатое воздействие

Переходной функцией $h(t)$ называется реакция звена на *единичное ступенчатое воздействие* $1(t)$. Пример графика переходной функции $h(t)$ для звена представлен на рис.3.4

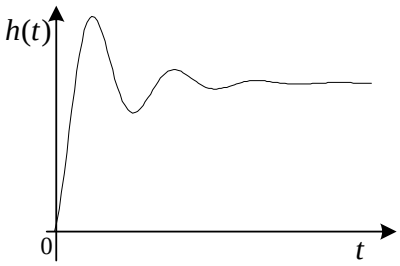


Рис.3.4. Переходная функция

Поскольку $x_2(p) = W(p)x_1(p)$, а изображение единичного ступенчатого воздействия равно $x_1 = L\{1(\mathrm{t})\} = \dfrac{1}{p}$, то переходная функция определяется из передаточной функции посредством обратного преобразования Лапласа следующим образом

$$x_2(t) = h(t) = L^{-1}\left\{W(p)\frac{1}{p}\right\}.$$

Задание

Задача 1. Построить временную характеристику по известной передаточной функции согласно индивидуальному заданию таблица 2.3.1.

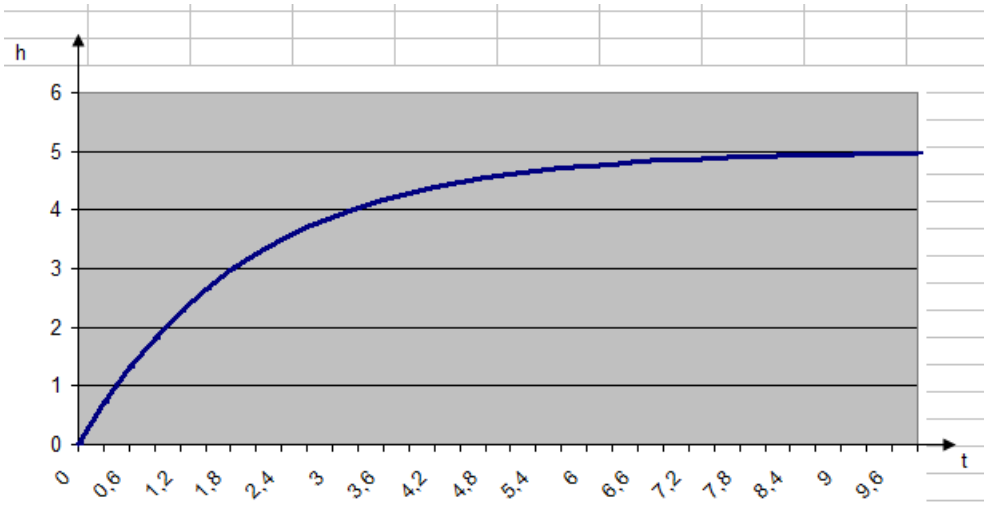
Таблица 2.3.1. Индивидуальное задание для задачи 1 по вариантам

Вариант	Передаточная функция	Тип временной характеристики	Вариант	Передаточная функция	Тип временной характеристики
1	$W(p) = 5p/(1+p)$	Переходная	16	$W(p) = p/(3p^2+p)$	Переходная
2	$W(p) = 6/p^2$	Весовая	17	$W(p) = 2/p^3$	Весовая
3	$W(p) = 3p/(1+3p)$	Переходная	18	$W(p) = 3p/p^2$	Переходная

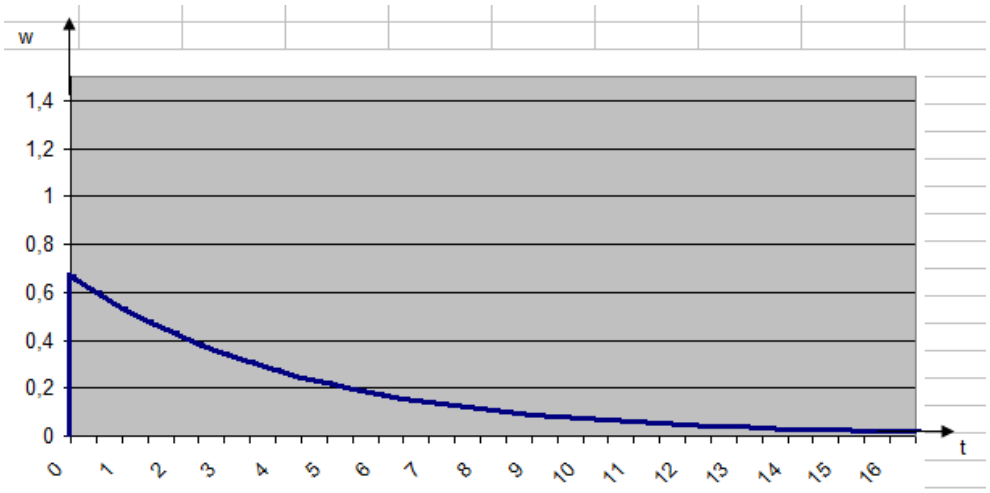
4	$W(p)=1/(3p^2+p)$	Весовая	19	$W(p)=2/(1+2p)$	Весовая
5	$W(p)=3pe^{-2p}$	Переходная	20	$W(p)=5p/p^2$	Переходная
6	$W(p)=1/(4p^2+p)$	Весовая	21	$W(p)=3/(1+p)$	Весовая
7	$W(p)=p/(2p^2+p)$	Переходная	22	$W(p)=p/(4p^2+p)$	Переходная
8	$W(p)=4e^{-2p}$	Весовая	23	$W(p)=2/p^2$	Весовая
9	$W(p)=2p/p^2$	Переходная	24	$W(p)=4pe^{-3p}$	Переходная
10	$W(p)=4/(1+4p)$	Весовая	25	$W(p)=1/(2p^2+p)$	Весовая
11	$W(p)=3p/(1+p)$	Переходная	26	$W(p)=4p/(1+4p)$	Переходная
12	$W(p)=4/(1+p)$	Весовая	27	$W(p)=3e^{-2p}$	Весовая
13	$W(p)=2p/(1+2p)$	Переходная	28	$W(p)=4p/(1+p)$	Переходная
14	$W(p)=10/p^2$	Весовая	29	$W(p)=3/(1+3p)$	Весовая
15	$W(p)=2pe^{-p}$	Переходная	30	$W(p)=8p/p^2$	Переходная
16	$W(p)=\frac{1}{p}(\frac{1}{p+2})$	Весовая	31	$W(p)=5/(1+p)$	Весовая

Задача 2. По заданному графику определить параметры системы.

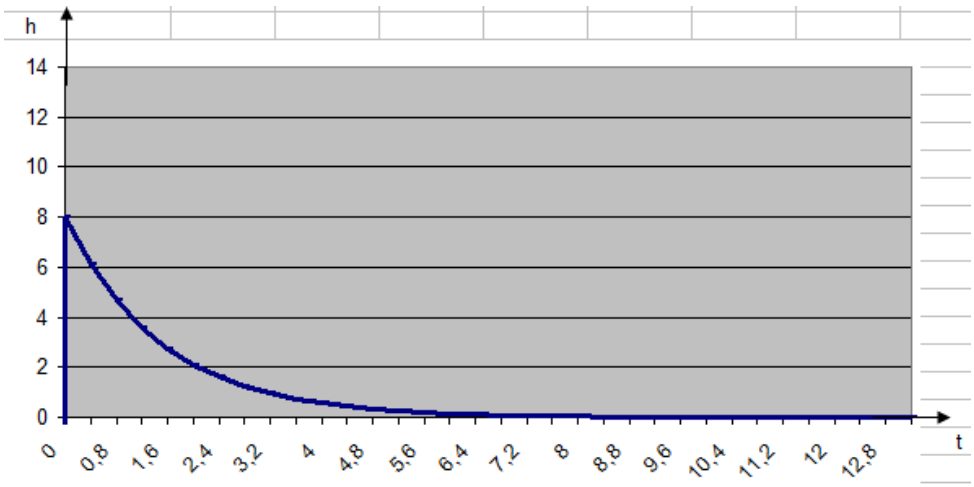
Вариант 1



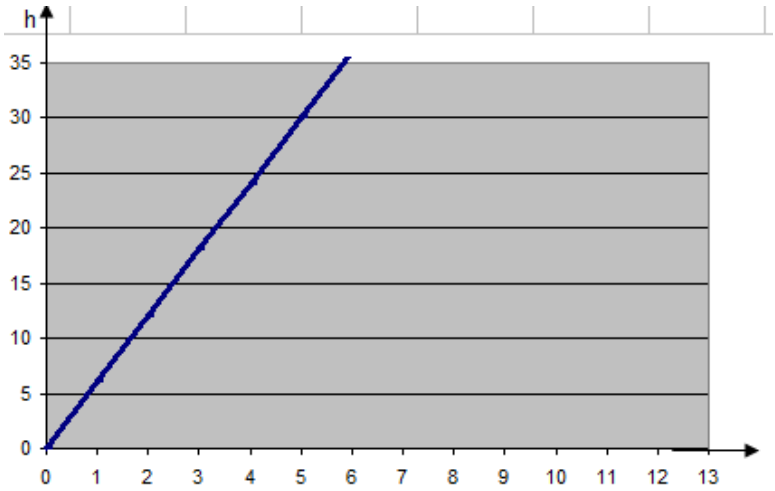
Вариант 2



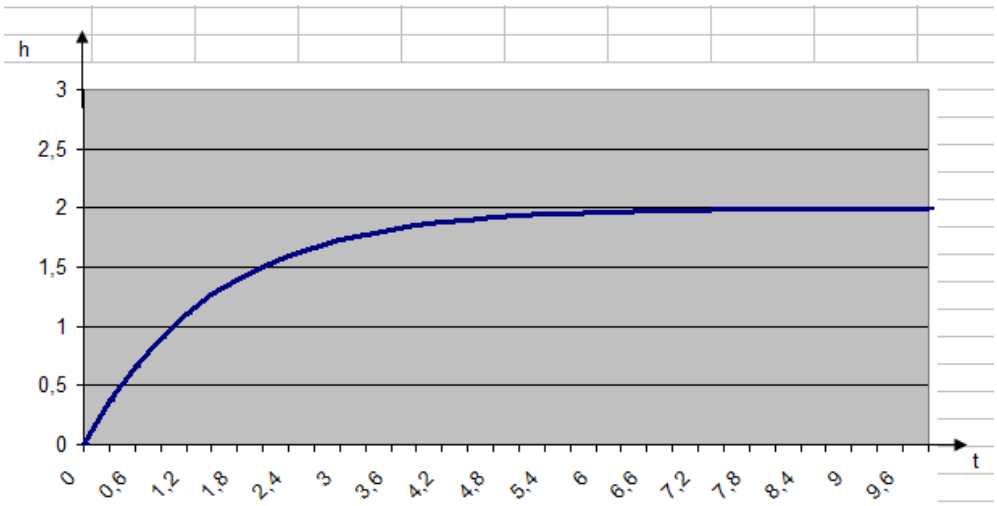
Вариант 3



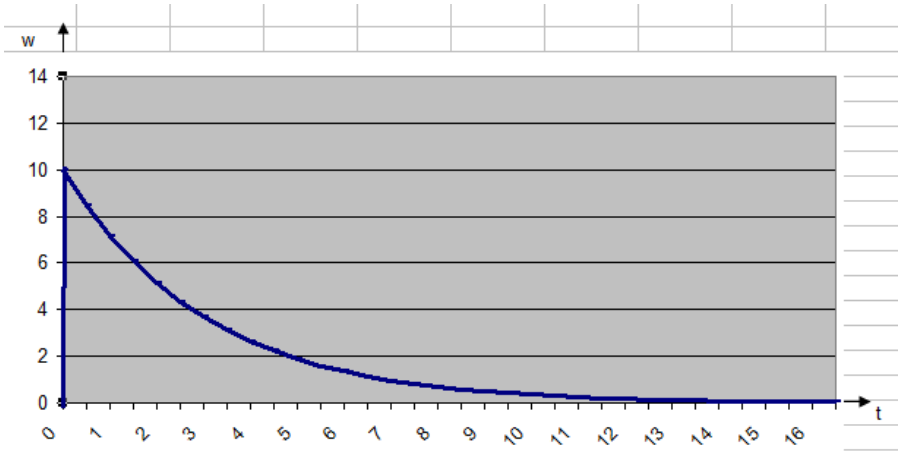
Вариант 4



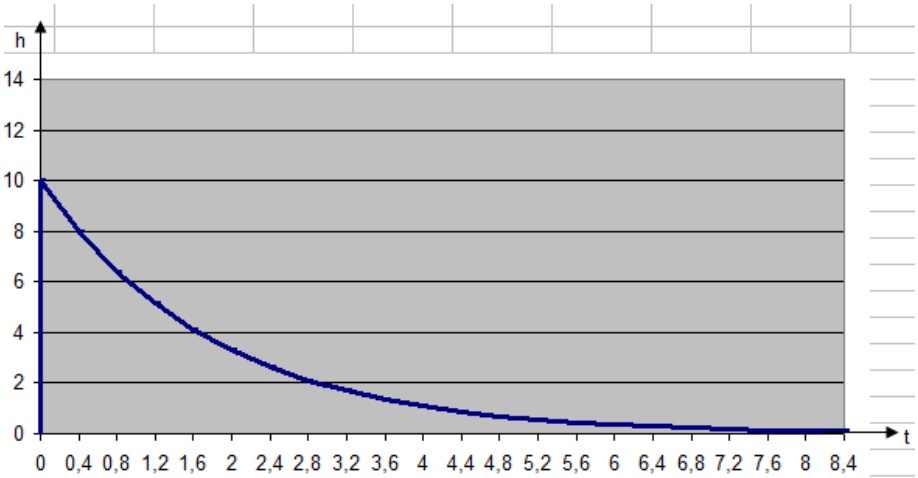
Вариант 5



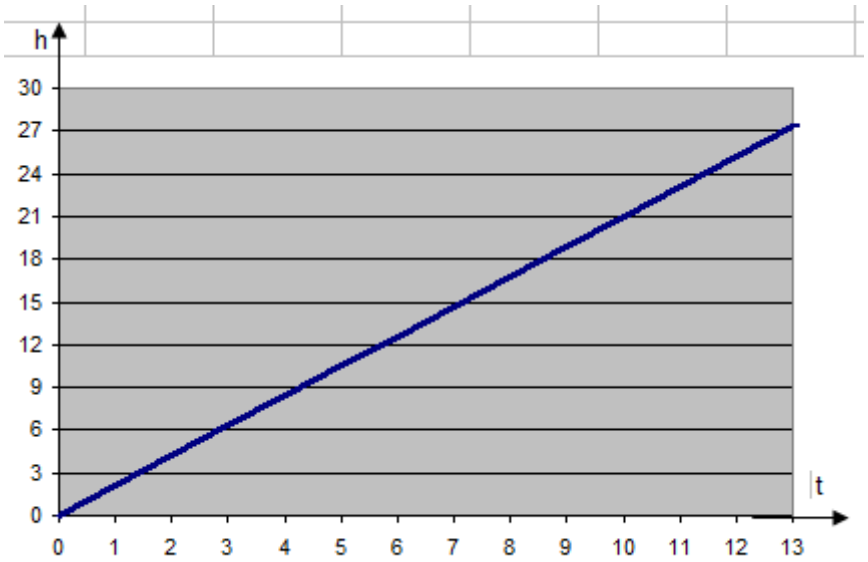
Вариант 6



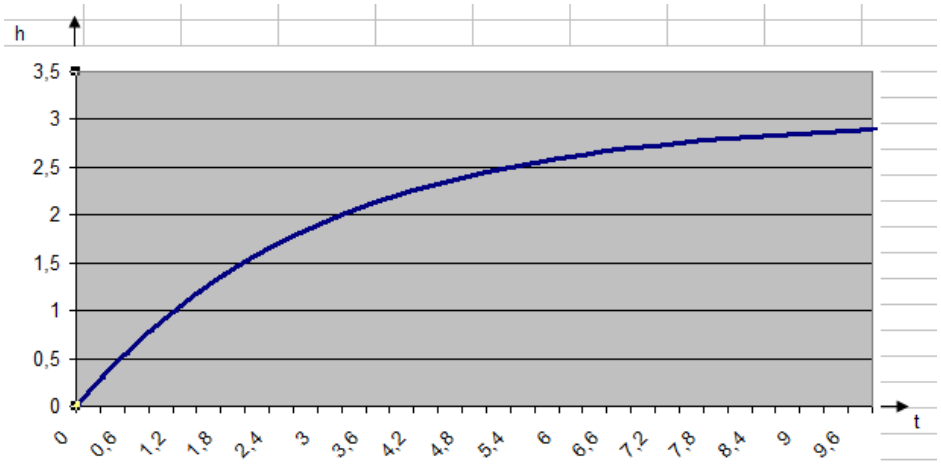
Вариант 7



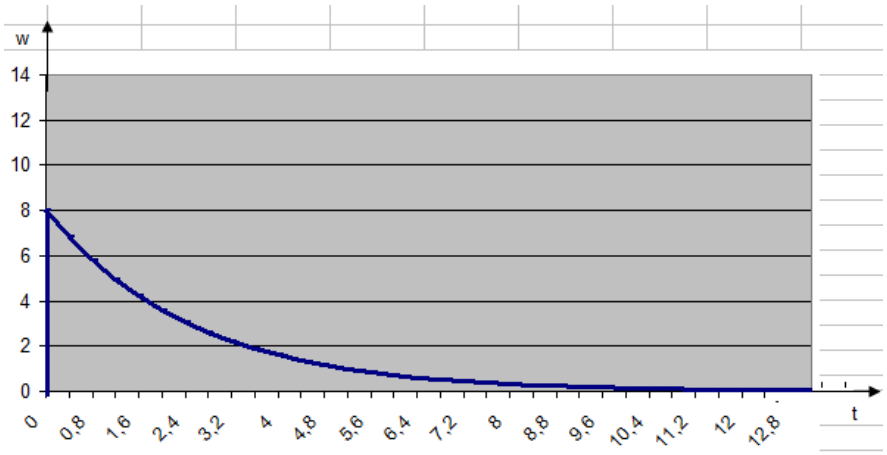
Вариант 8



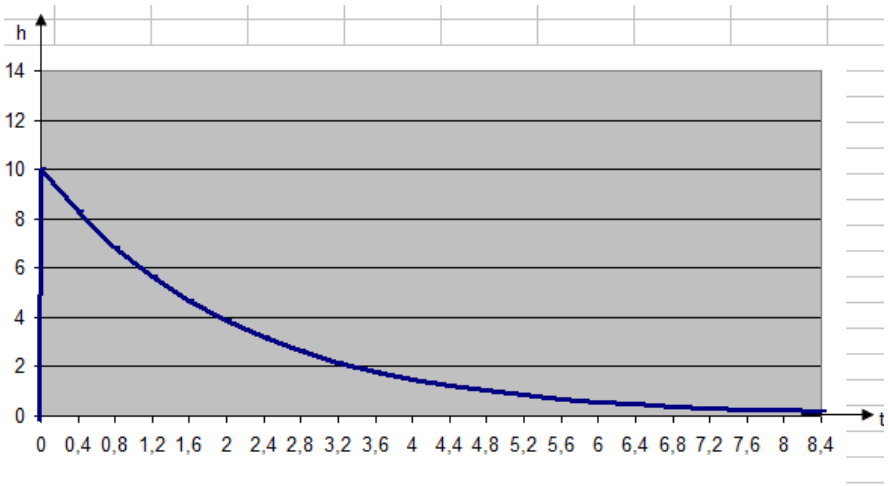
Вариант 9



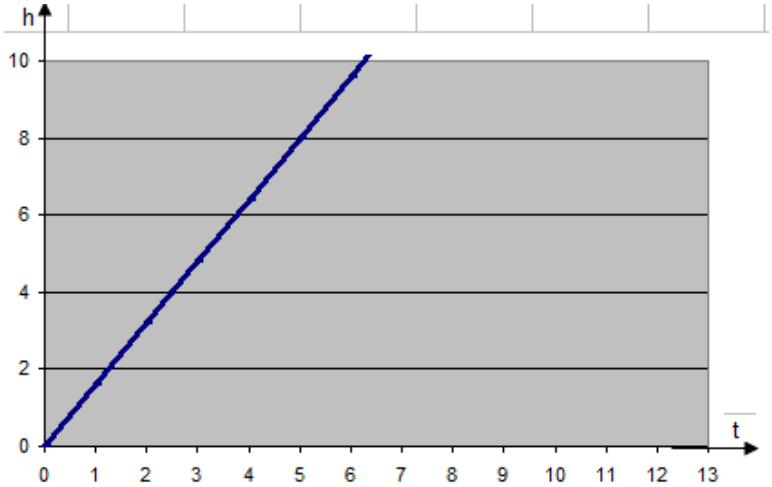
Вариант 10



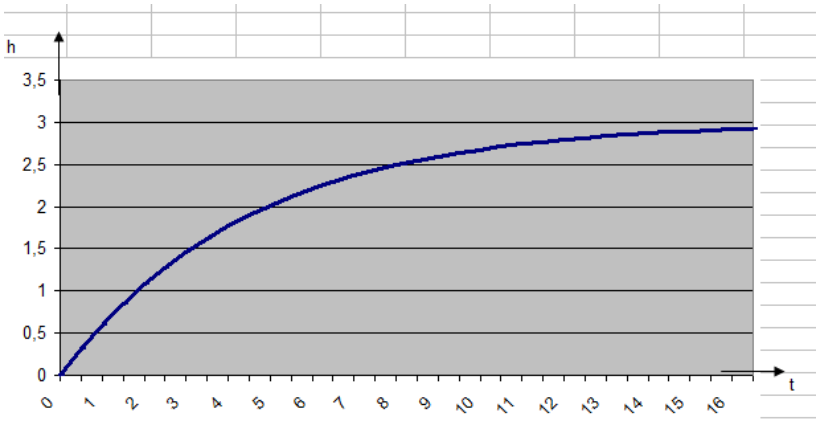
Вариант 11



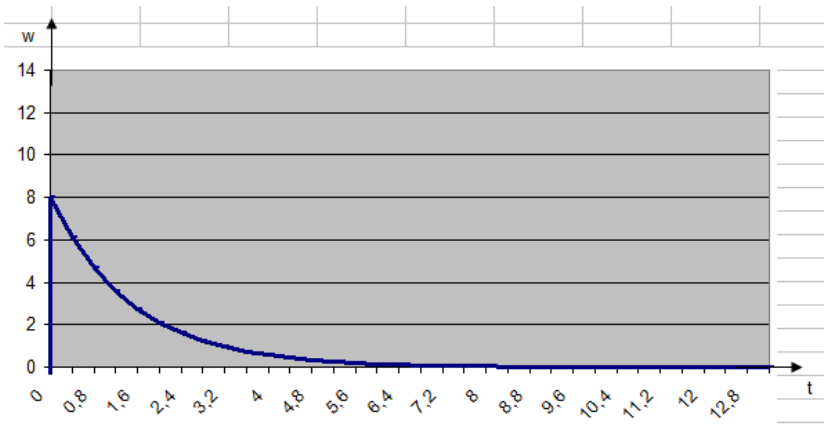
Вариант 12



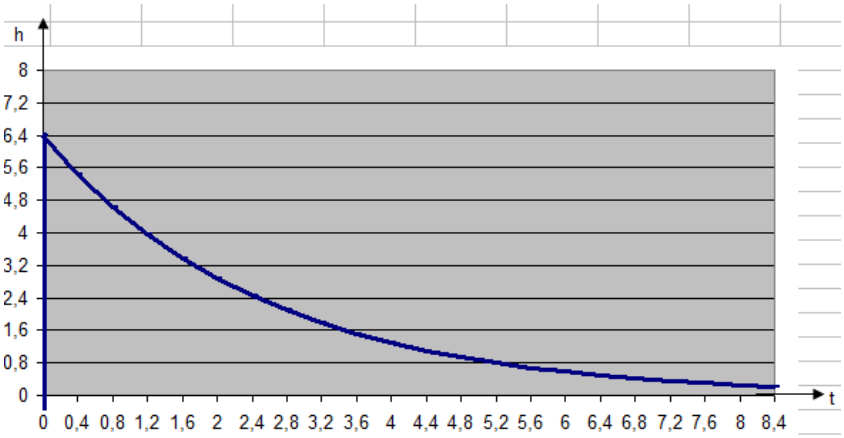
Вариант 13



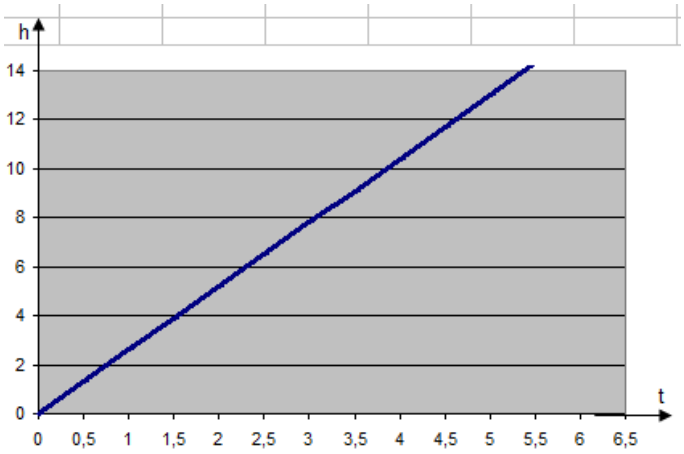
Вариант 14



Вариант 15



Вариант 16



Предварительно повторить тему «Временные характеристики» и ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Как определить коэффициент усиления?
2. Что такое единичное ступенчатое воздействие?
3. Что такое дельта-функция?
4. Что такое переходная характеристика звена?
5. Что такое весовая характеристика звена?
6. Что произойдет с временными характеристиками при изменении коэффициента усиления?

Литература

1. Методы классической и современной теории автоматического управления в 3-х т. Т.1: Анализ и статическая динамика систем автоматического управления/Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 748 с.

2. Ерофеев А.А. Теория автомтического управления: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб.и доп. – СПб.: Политехника, 2012. – 302 с.

3. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 288 с.

Практическая работа № 4

«Расчет частотных характеристик»

Цель работы: Сформировать практические навыки по построению заданных частотных характеристик по заданной передаточной функции замкнутой системы.

Студент должен

уметь:

- строить частотные характеристики систем;
- переходить от частотных характеристик к временным характеристикам, передаточным функциям и дифференциальным уравнениям системы;

знать:

- понятия частотных характеристик (АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ, АФЧХ);
- алгоритм построения частотных характеристик.

Теоретическое введение:

Частотные характеристики описывают передаточные свойства элементов и систем в режиме установившихся гармонических колебаний, вызванных внешним гармоническим воздействием. Зная частотную характеристику элемента, можно определить реакцию элемента на гармоническое воздействие любой частоты, а также на сумму гармонических воздействий различной частоты. Частотные характеристики широко используются в теории и практике автоматического управления, так как реальные возмущения, действующие на автоматические системы, могут быть представлены как сумма гармонических сигналов.

1. Передаточная функция звена (W(p)).
2. Амплитудная частотная характеристика (АЧХ).
3. Фазовая частотная характеристика (ФЧХ).
4. Амплитудно-фазовая характеристика (АФХ).
5. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ).

Передаточной функцией W(p) называют отношение изображения выходной величины к изображению входной величины при нулевых начальных условиях.

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{L\{y(t)\}}{L\{x(t)\}}$$

Допустим динамика описывается дифференциальным управлением:

$$a_0 \frac{d^n X(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} X(t)}{dt^{n-1}} + ... + a_{n-1} \frac{dX(t)}{dt} + a_n X(t) = b_0 \frac{d^m Y(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} Y(t)}{dt^{m-1}} + ...b_{m-1} \frac{dY(t)}{dt} + b_m Y(t)$$

Применим к данному уравнению прямое преобразование Лапласа:

$$a_0 p^n X(p) + a_1 p^{n-1} X(p) + ... + a_{n-1} p X(p) + a_n - X(0) =$$
$$= b_0 p^m Y(p) + b_1 p^{m-1} Y(p) + ... + b_{m-1} p Y(p) + b_m - Y(0);$$
$$X(p)\left(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + ... + a_{n-1} p + a_n\right) = Y(p)\left(b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + ... + b_{m-1} p + b_m\right);$$
$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + ... + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + ... + a_{n-1} p + a_n}.$$

Зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигнала от частоты называют ***амплитудной частотной характеристикой*** (сокращенно - АЧХ) и обозначают *A(ω)* (см. рис.а). Зависимость фазового сдвига между входным и выходным сигналами от частоты называют ***фазовой частотной характеристикой*** (ФЧХ) и обозначают *φ(ω)* (см. рис.б). Аналитические выражения *A(ω)* и *φ(ω)* называют соответственно амплитудной и фазовой частотными функциями.

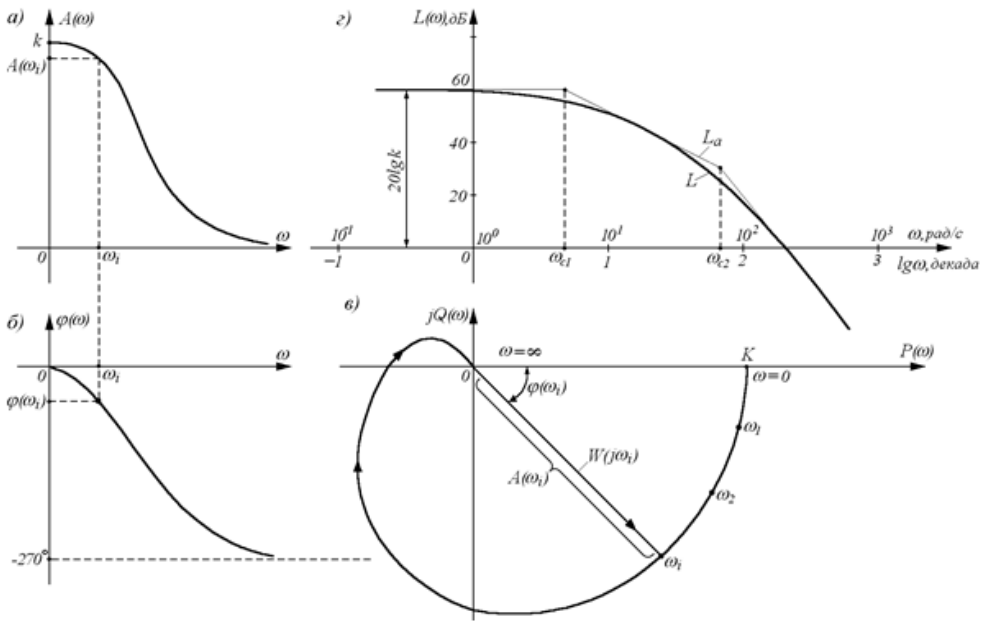


Рис. 4.1. Частотные характеристики

АЧХ показывает, как элемент пропускает сигналы различной частоты. Оценка пропускания производится по отношению амплитуд y_m / x_m в установившемся режиме. АЧХ имеет размерность, равную отношению

размерности выходной величины к размерности входной. ФЧХ показывает, какое отставание или опережение выходного сигнала по фазе создает элемент при различных частотах в установившемся режиме.

Амплитудную и фазовую частотные характеристики можно объединить в одну общую – амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ или АФХ). ***Амплитудно-фазовая частотная характеристика*** $\boldsymbol{W(j\omega)}$ представляет собой функцию комплексного переменного $j\omega$, модуль которой равен $A(\omega)$, а аргумент равен $\varphi(\omega)$. Каждому фиксированному значению частоты ω_i соответствует комплексное число $W(j\omega_i)$, которое на комплексной плоскости можно изобразить вектором, имеющим длину $A(\omega_i)$ и угол поворота $\varphi(\omega_i)$ (см. рис.в). Отрицательные значения $\varphi(\omega)$, соответствующие отставанию выходного сигнала от входного, принято отсчитывать по часовой стрелке от положительного направления действительной оси.

При изменении частоты от нуля до бесконечности вектор $W(j\omega)$ поворачивается вокруг начала координат, при этом одновременно увеличивается или уменьшается длина вектора. Кривая, которую при этом опишет конец вектора, называемая годографом, и есть АФХ. Каждой точке характеристики соответствует определенное значение частоты.

Проекции вектора $W(j\omega)$ на действительную и мнимую оси называют соответственно действительной и мнимой частотными характеристиками и обозначают

$$P(\omega) = \operatorname{Re} W(j\omega), \quad Q(\omega) = \operatorname{Im} W(j\omega).$$

При этом, действительная частотная характеристика $P(\omega)$ – всегда четная функция частоты, а мнимая характеристика $Q(\omega)$ – всегда нечетная функция.

Аналитическое выражение для АФХ конкретного элемента можно получить из его передаточной функции путем подстановки $p=j\omega$:

$$W(j\omega) = W(p)\big|_{p=j\omega}.$$

АФХ $W(j\omega)$, как и любая комплексная величина, может быть представлена в *показательной* форме

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

где $A(\omega)$ – модуль АФХ, а $\varphi(\omega)$ – угол сдвига по фазе;

алгебраической

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$$

или *тригонометрической*

$$W(j\omega) = A(\omega)\cos\varphi(\omega) + jA(\omega)\sin\varphi(\omega).$$

Связь между различными частотными функциями следующая:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)},$$
$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = arctg\left(Q(\omega)/P(\omega)\right).$$

Физический смысл замены $p=j\omega$: на вход звена мы подаем гармоническое воздействие $x = X_m \cos\omega t$, на выходе звена - $y = Y_m \cos(\omega t + \varphi)$, тоже имеем гармонический сигнал, но с другой амплитудой и со сдвигом по фазе.

При практических расчетах автоматических систем удобно использовать частотные характеристики, построенные в логарифмической системе координат. Такие характеристики называют ***логарифмическими***. Они имеют меньшую кривизну и поэтому могут быть приближенно заменены ломаными линиями, составленными из нескольких прямолинейных отрезков. Причем, эти отрезки в большинстве случаев удается построить без громоздких вычислений при помощи некоторых простых правил. Кроме того, в логарифмической системе координат легко находить характеристики различных соединений элементов, так как умножению и делению обычных характеристик соответствует сложение и вычитание ординат логарифмических характеристик.

За единицу длины по оси частот логарифмических характеристик принимают декаду. ***Декада*** – интервал частот, заключенный между произвольным значением ω_i и его десятикратным значением $10\omega_i$. Отрезок логарифмической оси частот, соответствующий одной декаде, равен 1.

Обычно в расчетах используют ***логарифмическую амплитудную частотную характеристику*** (ЛАЧХ)

$$L(\omega) = 20\lg A(\omega),$$

ординаты которой измеряют в логарифмических единицах – белах (Б) или децибелах (дБ).

При построении фазовой частотной характеристики логарифмический масштаб применяют только для оси абсцисс.

На рис.г показаны ЛАЧХ $L(\omega)$ (толстая линия) и соответствующая ей приближенная (асимптотическая) характеристика $L_a(\omega)$ в виде прямолинейных отрезков (тонкая линия). Частоты, соответствующие точкам стыковки отрезков, называют ***сопрягающими*** и обозначают ω_c.

Алгоритм построения частотных характеристик

1. Получить выражение для передаточной функции исследуемого объекта.
2. В передаточной функции заменить p на $j\omega$.
3. Освободиться от старших степеней j, используя следующие правила:

$j = j$; $j^2 = -1$; $j^3 = j^2 \cdot j = -j$; $j^4 = 1$; $j^5 = j^4 \cdot j = j$ и т.д.

4. В знаменателе передаточной функции сгруппировать члены содержащие и не содержащие j.
5. Освободиться от иррациональности в знаменателе. Для этого числитель и знаменатель домножить на выражение, сопряженное выражению в знаменателе относительно j.
6. В числителе передаточной функции сгруппировать члены содержащие и не содержащие j.
7. Выделить $Re(\omega)$ и $Im(\omega)$.
8. Рассчитать все частотные характеристики и построить их графики.

2.3.2. Задание

Задача 1

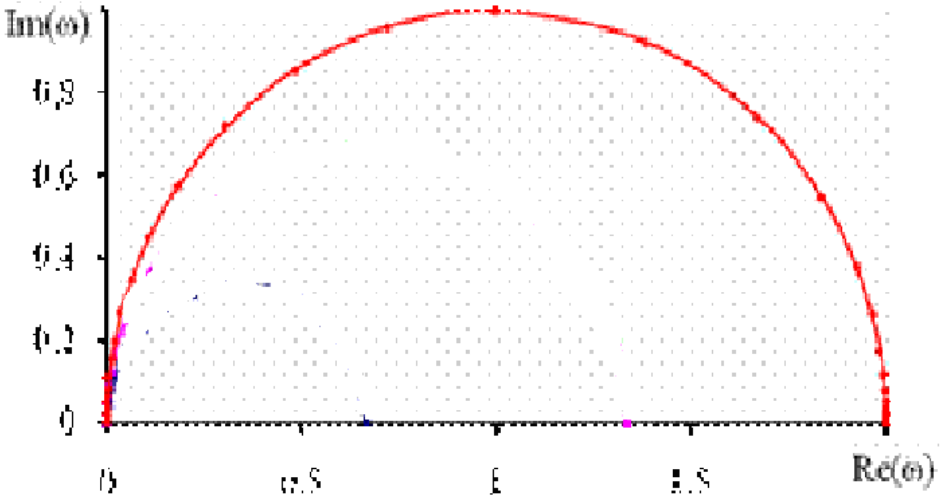
№ варианта	**Передаточная функция**	**Тип характеристики**	**№ варианта**	**Передаточная функция**	**Тип характеристики**
1	W(p) = 2 / (5p + 1)	ФЧХ системы	**17**	W(p) = 5 / (3p + 1)	АЧХ системы
2	W(p) = 1 / (4p + 1)	АЧХ системы	**18**	W(p) = 100/(0,1p +1) (10p +1)	ЛАЧХ системы
3	W(p) = 10 / (100p + 1)	ЛАЧХ системы	**19**	W(p) = 3 / (5p + 1)	ФЧХ системы

4	W(p) = 4 / (2p + 1)	ФЧХ системы	**20**	W(p) =1 / (5p + 1)	АЧХ системы
5	W(p) = 3 / (4p + 1)	АЧХ системы	**21**	W(p) = 10/(0,1p +1) (100p +1)	ЛАЧХ системы
6	W(p) = 1 / (100p + 1)	ЛАЧХ системы	**22**	W(p) = 3 / (5p + 1)	ФЧХ системы
7	W(p) = 5 / (3p + 1)	ФЧХ системы	**23**	W(p) = 2/ (4p + 1)	АЧХ системы
8	W(p) = 2 / (p + 1)	АЧХ системы	**24**	W(p) = 100 / (100p + 1)	ЛАЧХ системы
9	W(p) = 10 / (100p + 1)	ЛАЧХ системы	**25**	W(p) = 3/ (2p + 1)	ФЧХ системы
10	W(p) = 4 / (p + 1)	ФЧХ системы	**26**	W(p) = 1 / (4p + 1)	АЧХ системы
11	W(p) = 2 / (5p + 1)	АЧХ системы	**27**	W(p) = 10/ (10 p + 1)	ЛАЧХ системы
12	W(p) = 10/ (10p+1)	ЛАЧХ системы	**28**	W(p) = 4 / (3p + 1)	ФЧХ системы
13	W(p) = 3 / (4p + 1)	ФЧХ системы	**29**	W(p) = 3/ (2p + 1)	АЧХ системы
14	W(p) = 4 / (5p + 1)	АЧХ системы	**30**	W(p) = 10 / (0,1p + 1)	ЛАЧХ системы
15	W(p) = 100/(100p +1)	ЛАЧХ системы	**31**	W(p) = 1 / (p + 1)	АЧХ системы
16	W(p) = 2 / (p + 1)	ФЧХ системы	**32**	W(p) = 2 / (3p + 1)	ЛАЧХ системы

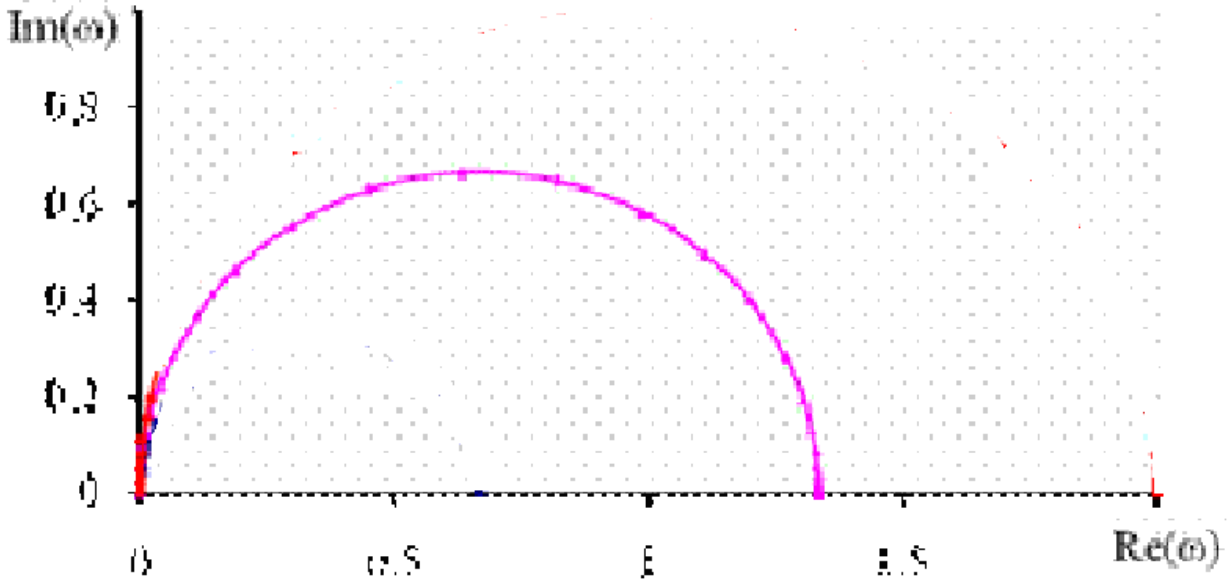
Задача 2

По графику определить параметры реально дифференцирующего звена.

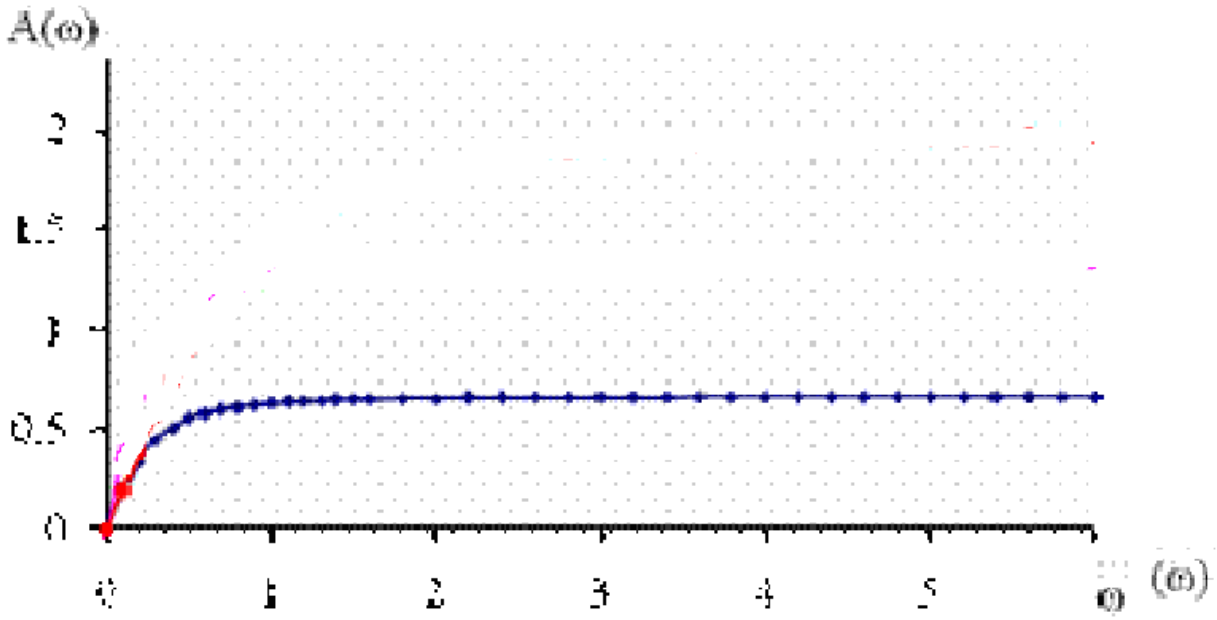
Вариант 1



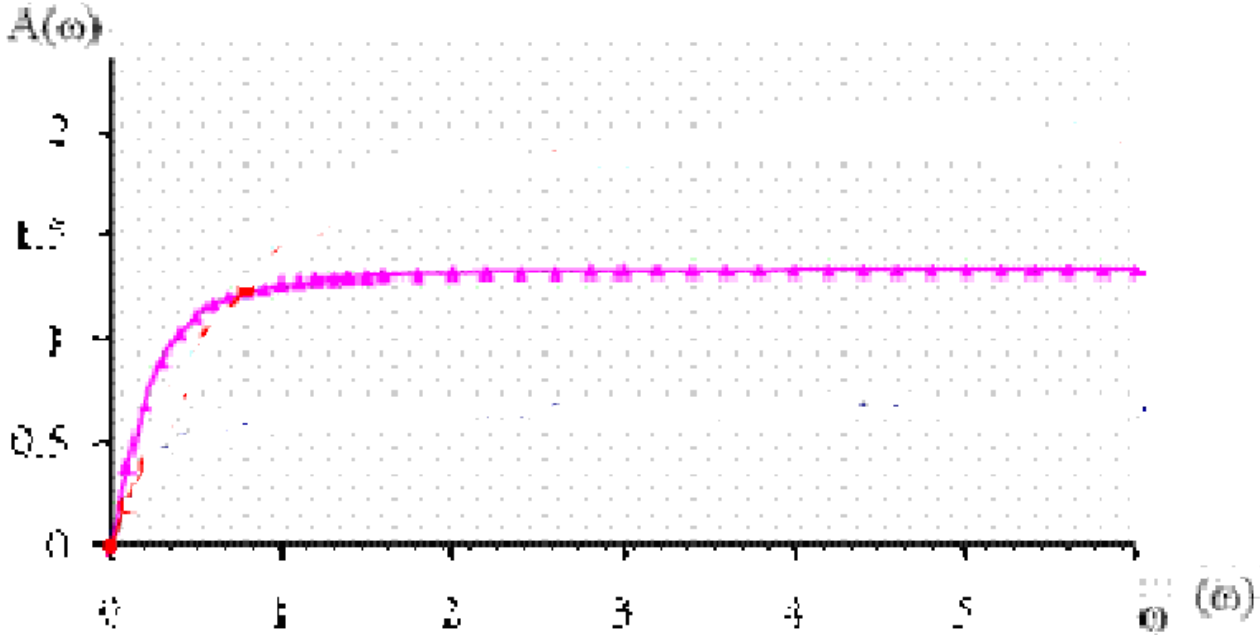
Вариант 2



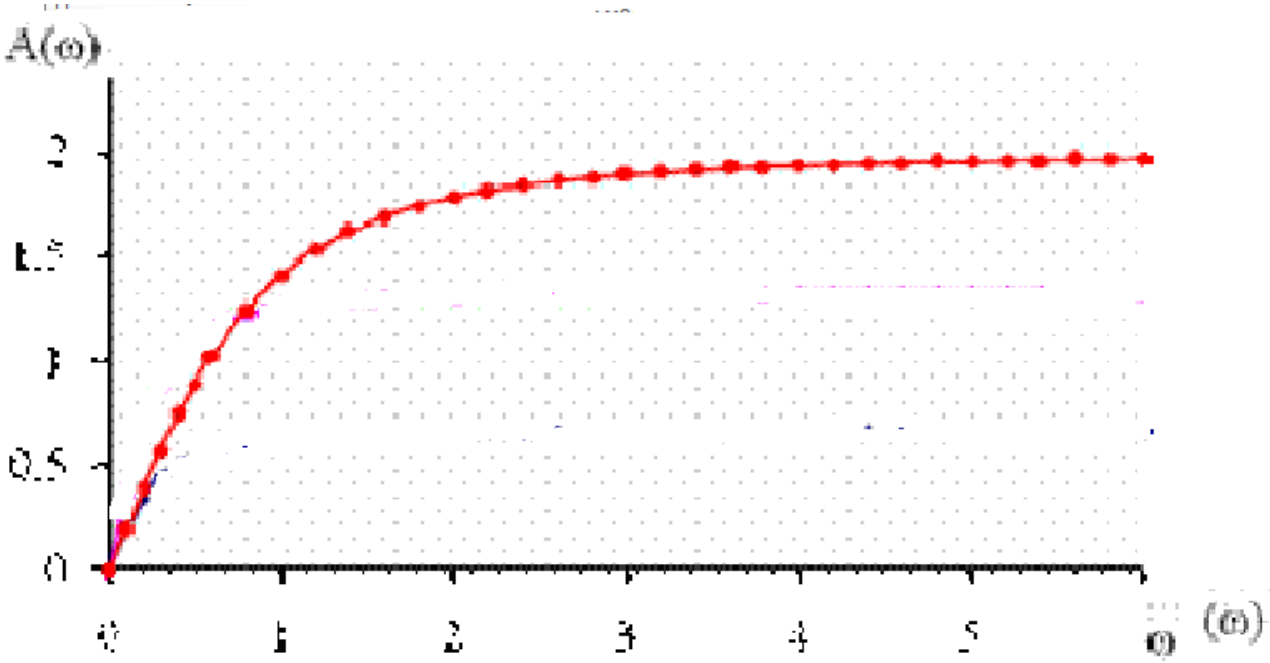
Вариант 3



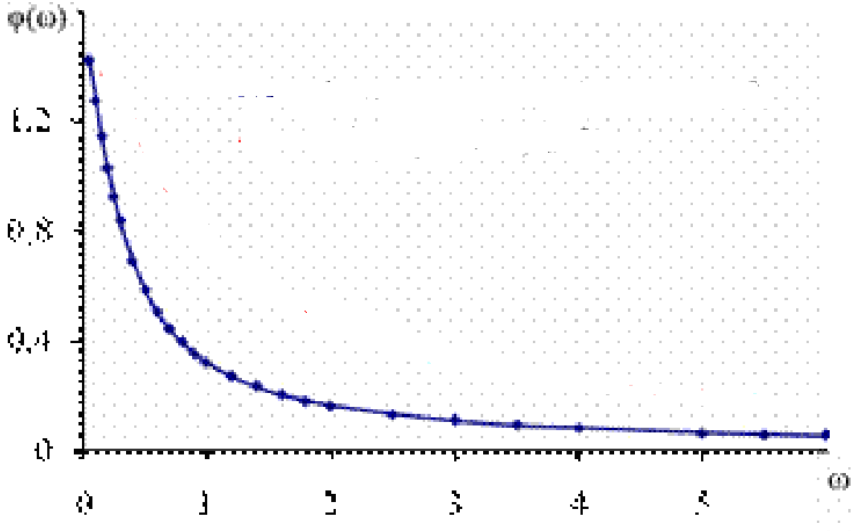
Вариант 4



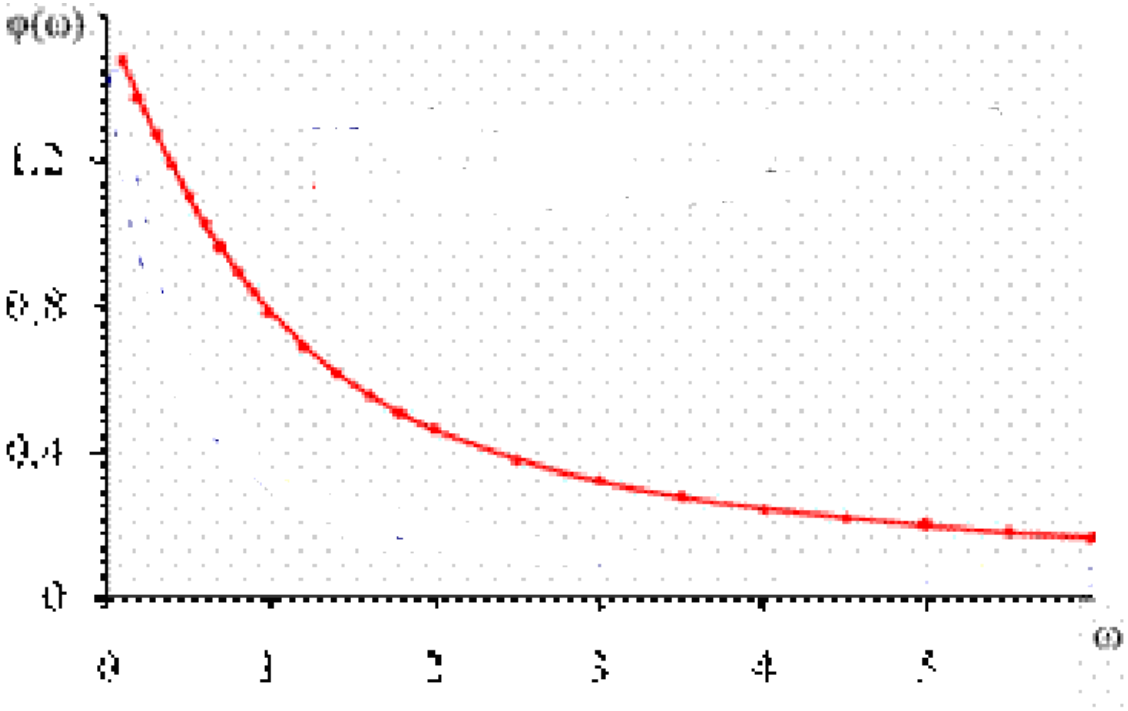
Вариант 5



Вариант 6



Вариант 7



24.3. Предварительно повторить тему «Частотные характеристики» и ответить на контрольные вопросы.

2.4.4. Контрольные вопросы:

1. Что такое АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ?
2. Чем отличаются логарифмические частотные характеристики?
3. Как построить частотные характеристики системы, зная ее передаточную функцию?
4. Как влияют параметры системы на вид ее частотных характеристик?
5. Как представляется частотная передаточная функции на комплексной плоскости?
6. Каков алгоритм построения частотных характеристик?

Литература

1. Методы классической и современной теории автоматического управления в 3-х т. Т.1: Анализ и статическая динамика систем автоматического управления/Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 748 с.
2. Ерофеев А.А. Теория автомтического управления: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб.и доп. – СПб.: Политехника, 2012. – 302 с.
3. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 288 с.

Список рекомендуемых источников

1. Методы классической и современной теории автоматического управления в 3-х т. Т.1: Анализ и статическая динамика систем автоматического управления/Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 748 с.

2. Ерофеев А.А. Теория автомтического управления: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб.и доп. – СПб.: Политехника, 2012. – 302 с.

3. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 288 с.