

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»

Кафедра системного анализа и управления  
в медицинских системах

**171-2016**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
"Управление в биотехнических системах"  
для студентов направления 12.03.04  
"Биотехнические системы и технологии"  
(профили «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»,  
«Менеджмент и управление качеством в здравоохранении»)  
очной формы обучения



Воронеж 2016

Составители:      д-р техн. наук      Е.Н. Коровин,  
                         ассистент              М.А. Сергеева

УДК 681.327.8

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине "Управление в биотехнических системах" для студентов направления 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» (профили «Биотехнические и медицинские аппараты и системы», «Менеджмент и управление качеством в здравоохранении») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Е.Н. Коровин, М.А. Сергеева. Воронеж, 2016. 25 с.

Данные методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Управление в биотехнических системах».

Предназначены для студентов 4 курса.

Табл. 5. Ил. 21. Библиогр.: 3 назв.

Рецензент д-р техн. наук, проф. И.Я. Львович

Ответственный за выпуск зав. кафедрой

д-р техн. наук, проф. О.В. Родионов

Печатается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический  
университет», 2016

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Целью лабораторных работ является приобретение навыков по теории автоматического управления.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны уметь:

- определять передаточные функции;
- находить переходные и импульсные характеристики по заданными передаточным функциям;
- определять типовые динамические звенья;
- рассчитывать амплитудно-фазовые частотные характеристики;
- определять устойчивость линейной системы автоматического регулирования по различным критериям;
- рассчитывать запас устойчивости по фазе и по амплитуде при помощи АФЧХ и логарифмическим характеристикам.

Используемые программно-аппаратные средства: ПЭВМ класса IBM PC стандартной конфигурации, пакет MathCad.

Перед выполнением лабораторных работ каждый студент должен:

- изучить правила техники безопасности и пожарной безопасности при работе с ПЭВМ в лаборатории кафедры;
- ознакомиться с методическими рекомендациями по лабораторным работам.

### **Лабораторная работа № 1 «Передаточная функция и динамические характеристики»**

1.1. Определите передаточную функцию цепи в общем виде, а затем в числовых значениях, изображенной на рис. 1, параметры цепи приведены в табл. 1.



Рис. 1.

Таблица 1

Вариант	1 элемент	2 элемент	3 элемент	4 элемент
1	$R_1 = 2 \text{ Ом}$	$R_2 = 1 \text{ Ом}$	$R_3 = 4 \text{ Ом}$	$C = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
2	$R_1 = 1 \text{ Ом}$	$R_2 = 3 \text{ Ом}$	$C = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L = 4 \cdot 10^6 \text{ Гн}$
3	$R_1 = 1 \text{ Ом}$	$R_2 = 5 \text{ Ом}$	$L = 4 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$C = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
4	$R_1 = 3 \text{ Ом}$	$C = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$R_2 = 3 \text{ Ом}$	$L = 4 \cdot 10^6 \text{ Гн}$
5	$R = 4 \text{ Ом}$	$C_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$C_2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L = 5 \cdot 10^6 \text{ Гн}$
6	$R_1 = 2 \text{ Ом}$	$C = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L = 4 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$R_2 = 8 \text{ Ом}$
7	$R_1 = 6 \text{ Ом}$	$L = 2 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$R_2 = 5 \text{ Ом}$	$C = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
8	$R = 4 \text{ Ом}$	$L = 3 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$C_1 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$C_2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
9	$R = 2 \text{ Ом}$	$L_1 = 5 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$L_2 = 4 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$C = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
10	$C_1 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$R_1 = 6 \text{ Ом}$	$R_2 = 4 \text{ Ом}$	$C_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
11	$C_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$R = 3 \text{ Ом}$	$L = 3 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$C_2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
12	$C_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$C_2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$R = 2 \text{ Ом}$	$C_3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
13	$C_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$C_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$C_3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L = 5 \cdot 10^6 \text{ Гн}$
14	$C_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L = 2 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$C_2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$R = 3 \text{ Ом}$
15	$L_1 = 1 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$R_1 = 2 \text{ Ом}$	$R_2 = 4 \text{ Ом}$	$L_2 = 1 \cdot 10^6 \text{ Гн}$
16	$C = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L_1 = 4 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$L_2 = 3 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$R = 2 \text{ Ом}$
17	$L_1 = 4 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$R = 6 \text{ Ом}$	$L_2 = 3 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$C = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
18	$L_1 = 7 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$C_1 = 7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$C_2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L_2 = 6 \cdot 10^6 \text{ Гн}$
19	$L_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$C = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L_1 = 1 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$R = 4 \text{ Ом}$
20	$L_1 = 6 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$L_2 = 5 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$R = 3 \text{ Ом}$	$L_3 = 2 \cdot 10^6 \text{ Гн}$
21	$L_1 = 8 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$L_2 = 4 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$L_3 = 4 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$C = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
22	$R_1 = 1 \text{ Ом}$	$C_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$R_2 = 5 \text{ Ом}$	$C_2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
23	$R_1 = 4 \text{ Ом}$	$L_1 = 5 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$R_2 = 6 \text{ Ом}$	$L_2 = 3 \cdot 10^6 \text{ Гн}$
24	$C_1 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$R_1 = 4 \text{ Ом}$	$C_2 = 7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$R_2 = 4 \text{ Ом}$
25	$C_1 = 7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$C_2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$C_3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$R = 2 \text{ Ом}$
26	$L_1 = 5 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$L_2 = 5 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$L_3 = 5 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$R = 1 \text{ Ом}$
27	$C_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L_1 = 1 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$C_1 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L_2 = 5 \cdot 10^6 \text{ Гн}$
28	$L_1 = 7 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$R = 3 \text{ Ом}$	$C = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L_2 = 8 \cdot 10^6 \text{ Гн}$
29	$C_1 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$C_2 = 7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$L = 2 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$R = 5 \text{ Ом}$
30	$L_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ Гн}$	$C = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	$R = 5 \text{ Ом}$	$L_2 = 3 \cdot 10^6 \text{ Гн}$

1.2. Найдите переходную и импульсную (весовую) функции для заданной передаточной функции:

$$W(s) = \frac{As + B}{s^2 + Cs + D}. \quad (1)$$

Параметры передаточной функции приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вариант	A	B	C	D
1	65	9	10	9
2	42	192	14	48
3	16	168	13	42
4	32	0	8	0
5	-9	6	7	6
6	-8	54	11	18
7	26	144	17	72
8	32	56	11	28
9	25	360	13	36
10	-8	70	8	7
11	-13	35	12	35
12	10	90	8	15
13	28	168	13	42
14	-26	16	9	8
15	-42	54	10	9
16	24	256	12	32
17	20	80	8	16
18	39	432	17	72
19	-21	21	8	7
20	7	24	5	6
21	22	8	9	8
22	30	0	2	0
23	-3	6	3	2
24	19	15	8	15
25	22	36	5	6
26	30	0	6	0
27	33	252	13	42
28	19	105	8	15
29	39	108	9	18
30	-70	0	10	0

## Пример выполнения лабораторной работы № 1

Параметры звена:  $R_1=3$  Ом;  $R_2=3$  Ом;  $L=4 \cdot 10^4$  Гн;  $C=6 \cdot 10^{-6}$  Ф.

Передаточная функция равна отношению выходного напряжения к входному:

$$W(s) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \quad (2)$$

Входное и выходное напряжения равны:

$$\begin{aligned} U_2 &= I \cdot Z_{\text{ВЫХ}} \\ U_1 &= I \cdot Z_{\text{ОБ}} \end{aligned} \quad (3)$$

то есть

$$W(s) = \frac{Z_{\text{ВЫХ}}}{Z_{\text{ОБ}}} \quad (4)$$

Рассчитаем  $Z_{\text{ОБ}}$ :

$$Z_{\text{ОБ}} = R_1 + L \cdot s + \frac{1}{C \cdot s} + R_2 \quad (5)$$

Таким образом получаем  $W(s)$ :

$$W(s) = \frac{1}{C \cdot L \cdot s^2 + s \cdot C \cdot (R_1 + R_2) + 1} \quad (6)$$

Выразим передаточную функцию  $W(s)$  в численном виде:

$$W(s) = \frac{1}{24 \cdot s^2 + 36 \cdot 10^{-6} \cdot s + 1} \quad (7)$$

В пакете MathCad построим график полученной передаточной функции (рис 2).

Определим переходную и импульсную характеристики цепи по известной переходной функции.

Переходная характеристика цепи представляет собой обратное преобразование Лапласа передаточной функции

$$h(t) = L^{-1}\{W(S)/S\}, \quad (8)$$

используя функцию «invlaplace» пакета MathCad получим:

$$h(t) = 4 - 4 \cdot e^{-8 \cdot t} \quad (9)$$

Построим график переходной характеристики  $h(t)$  (рис. 3).

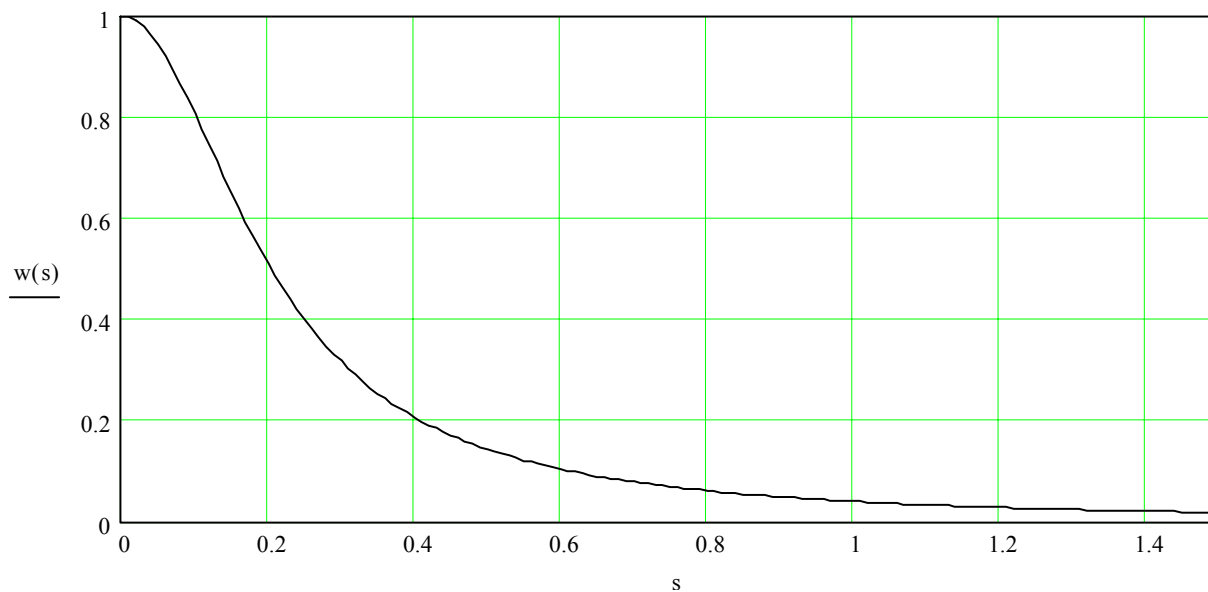


Рис. 2. Передаточная функция  $W(s)$

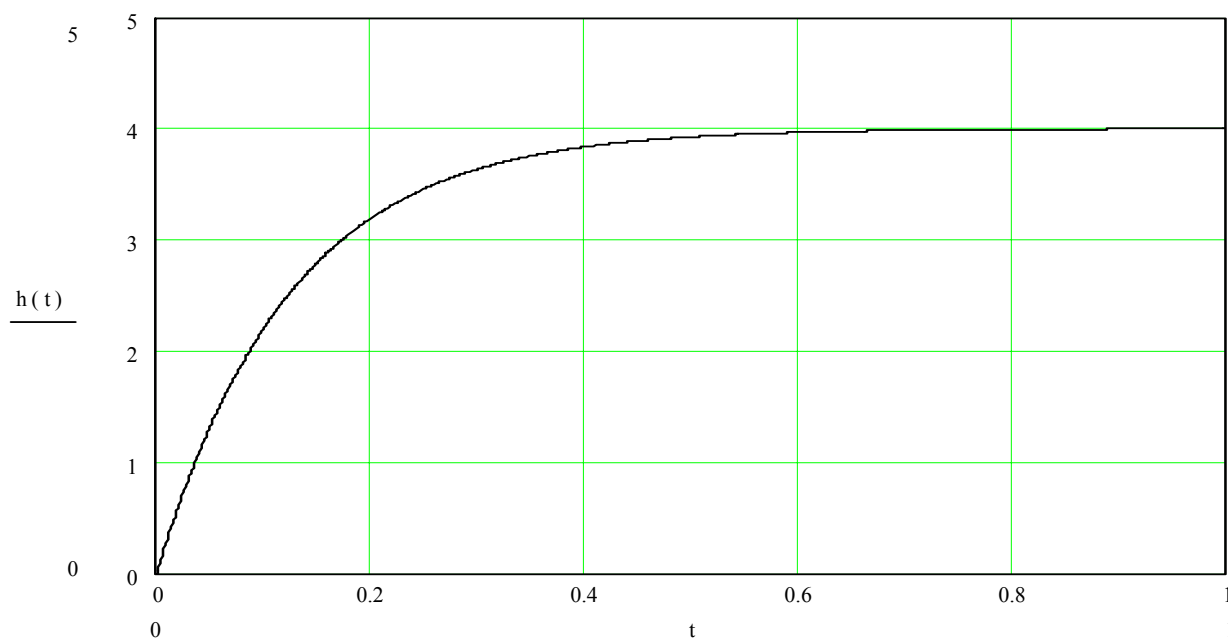


Рис. 3. Переходная характеристика

Найдем импульсную характеристику  $k(t)$

$$k(t) = \frac{d(h(t))}{dt} \quad (10)$$

$$k(t) = 32 \cdot e^{-8 \cdot t} \quad (11)$$

Построим график импульсной характеристики  $k(t)$  (рис. 4):

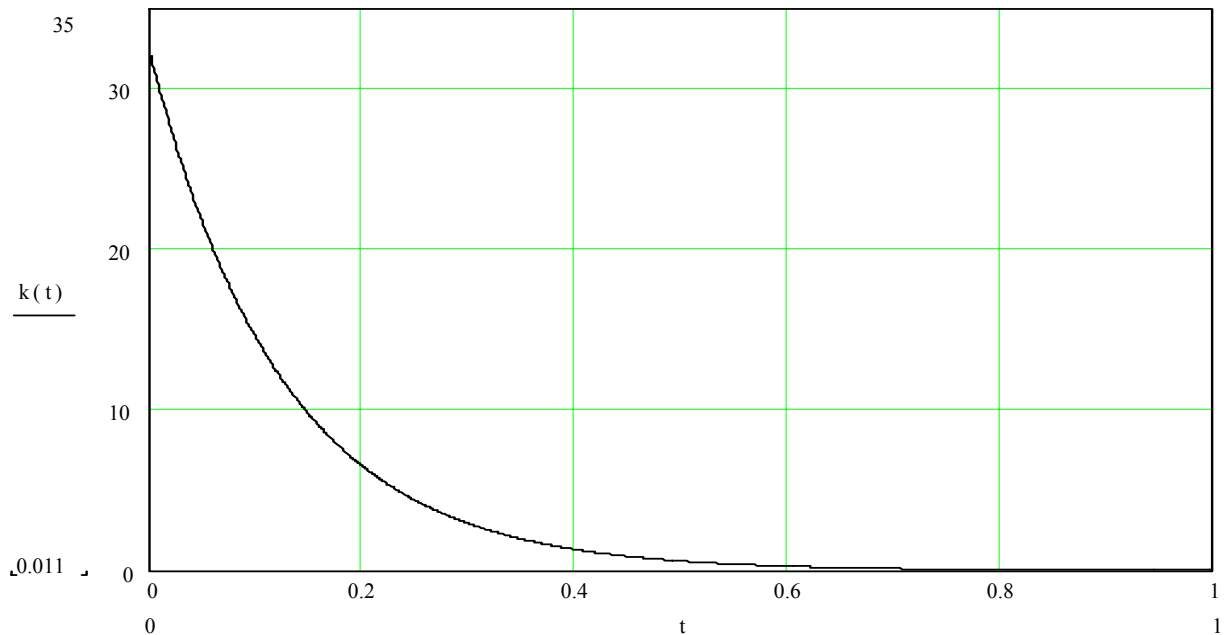


Рис. 4. График импульсной характеристики

## Лабораторная работа № 2 «Типовые звенья САУ»

2.1. Определите передаточную функцию цепи в общем виде, а затем в числовых значениях, изображенной на рис. 5, параметры цепи приведены в табл. 3.



Рис. 5

2.2. Определите, какому типовому динамическому звену соответствует передаточная функция. Получите в общем виде параметры  $K$  и  $T$ , а затем в числовом виде.



Таблица 3

Вариант	1 элемент	2 элемент	3 элемент
1	$R_1 = 1 \text{ Ом}$	$R_2 = 5 \text{ Ом}$	$C = 2 \text{ Ф}$
2	$L = 4 \text{ Гн}$	$R_1 = 4 \text{ Ом}$	$R_2 = 2 \text{ Ом}$
3	$R = 6 \text{ Ом}$	$L_1 = 3 \text{ Гн}$	$L_2 = 4 \text{ Гн}$
4	$R_1 = 2 \text{ Ом}$	$C = 6 \text{ Ф}$	$R_2 = 3 \text{ Ом}$
5	$L_1 = 3 \text{ Гн}$	$R = 5 \text{ Ом}$	$L_2 = 2 \text{ Гн}$
6	$R_1 = 4 \text{ Ом}$	$L = 4 \text{ Гн}$	$R_2 = 2 \text{ Ом}$
7	$C_1 = 6 \text{ Ф}$	$R = 8 \text{ Ом}$	$C_2 = 4 \text{ Ф}$
8	$R = 3 \text{ Ом}$	$C_1 = 5 \text{ Ф}$	$C_2 = 3 \text{ Ф}$
9	$L = 4 \text{ Гн}$	$R = 3 \text{ Ом}$	-
10	$R = 6 \text{ Ом}$	$L = 3 \text{ Гн}$	-
11	$C = 6 \text{ Ф}$	$R = 4 \text{ Ом}$	-
12	$R = 2 \text{ Ом}$	$C = 2 \text{ Ф}$	-
13	$L = 3 \text{ Гн}$	$R = 4 \text{ Ом}$	-
14	$R = 4 \text{ Ом}$	$L = 2 \text{ Гн}$	-
15	$C = 4 \text{ Ф}$	$R = 3 \text{ Ом}$	-
16	$R = 1 \text{ Ом}$	$C = 4 \text{ Ф}$	-
17	$R_1 = 2 \text{ Ом}$	$R_2 = 4 \text{ Ом}$	$C = 1 \text{ Ф}$
18	$L = 5 \text{ Гн}$	$R_1 = 5 \text{ Ом}$	$R_2 = 3 \text{ Ом}$
19	$R = 5 \text{ Ом}$	$L_1 = 2 \text{ Гн}$	$L_2 = 3 \text{ Гн}$
20	$R_1 = 3 \text{ Ом}$	$C = 7 \text{ Ф}$	$R_2 = 4 \text{ Ом}$
21	$L_1 = 2 \text{ Гн}$	$R = 4 \text{ Ом}$	$L_2 = 1 \text{ Гн}$
22	$R_1 = 5 \text{ Ом}$	$L = 5 \text{ Гн}$	$R_2 = 3 \text{ Ом}$
23	$C_1 = 5 \text{ Ф}$	$R = 7 \text{ Ом}$	$C_2 = 3 \text{ Ф}$
24	$R = 2 \text{ Ом}$	$C_1 = 4 \text{ Ф}$	$C_2 = 2 \text{ Ф}$
25	$L = 5 \text{ Гн}$	$R = 4 \text{ Ом}$	-
26	$R = 7 \text{ Ом}$	$L = 4 \text{ Гн}$	-
27	$C = 7 \text{ Ф}$	$R = 5 \text{ Ом}$	-
28	$R = 3 \text{ Ом}$	$C = 3 \text{ Ф}$	-
29	$L = 4 \text{ Гн}$	$R = 5 \text{ Ом}$	-
30	$R = 5 \text{ Ом}$	$L = 3 \text{ Гн}$	-

2.3. Найдите переходную и импульсную характеристики на основе полученной передаточной функции. Постройте соответствующие графики.

2.4. Проанализируйте, как меняются переходная и импульсная функции, если значения исходных элементов увеличить в 2 раза. Построить соответствующие графики.

2.5. Сделайте соответствующие выводы

### Пример выполнения лабораторной работы № 2

Схема цепи, если первый элемент  $R_1 = 1$  Ом, второй элемент  $R_2 = 5$  Ом, третий элемент  $C = 2$  Ф представлена на рис. 6.

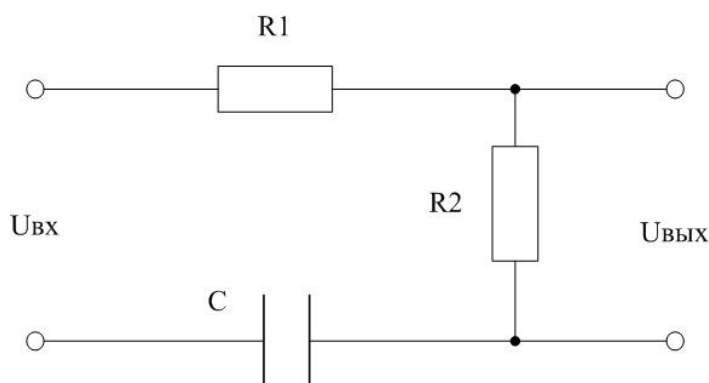


Рис. 6. Цепь с заданными параметрами

В общем виде передаточная функция  $W(S)$  будет иметь следующий вид:

$$W(S) = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + \frac{1}{\tilde{N} \cdot S}} = \frac{R_2 \cdot \tilde{N} \cdot S}{\tilde{N} \cdot S \cdot (R_1 + R_2) + 1} \quad (12)$$

Подставляя в выражение (12) значение параметров цепи согласно варианту 1, получим:

$$W(S) = \frac{10 \cdot S}{12 \cdot S + 1} \quad (13)$$

Определим, какому типовому динамическому звену соответствует передаточная функция. Получим в общем виде параметры  $K$  и  $T$ , а затем в числовом.

$$W(s) = \frac{R_2 \cdot \tilde{N} \cdot S}{(R_1 + R_2) \cdot \tilde{N} \cdot S + 1} = \frac{K \cdot S}{0 \cdot S + 1}, \quad (14)$$

где,  $K=R_2 \cdot C=10$ , а  $T=C \cdot (R_1+R_2)=12$ .

Передаточная функция представленной схемы, соответствует инерционно-дифференцирующему звену.

Определим переходную и импульсную характеристики цепи по известной передаточной функции (13):

$$h(t) = \frac{5}{6} \cdot \exp\left(-\frac{1}{12} \cdot t\right), \quad (15)$$

$$k(t) = -\frac{5}{72} \cdot \exp\left(-\frac{1}{12} \cdot t\right). \quad (16)$$

Построим графики переходной характеристики  $h(t)$  (рис. 7) и импульсной характеристики  $k(t)$ (рис. 8).

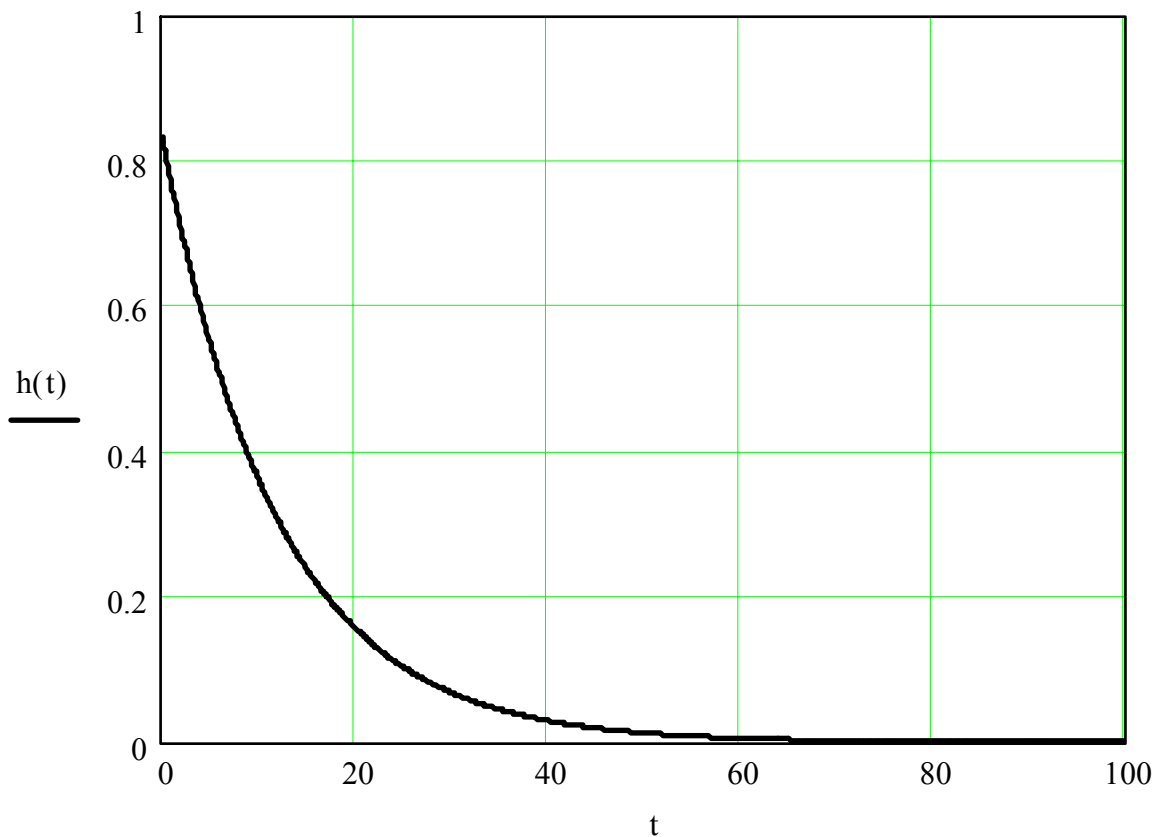


Рис. 7. Переходная характеристика инерционно-дифференцирующему звену

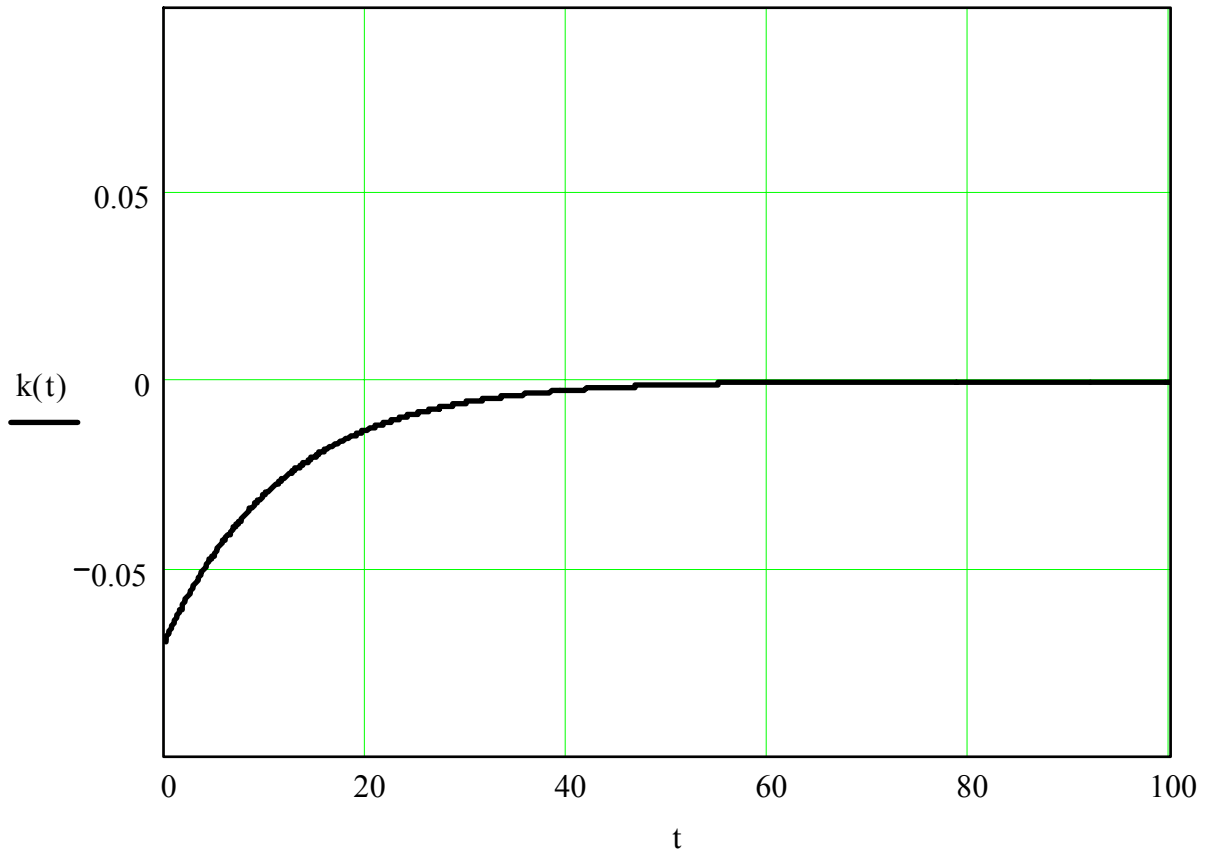


Рис. 8. Импульсная характеристика инерционно-дифференцирующему звену

Проанализируем, как меняется переходная функция, если значения исходных элементов увеличить в 2 раза.

Значение элемента R1 увеличим в 2 раза. При R1=2 Ом, передаточная функция имеет вид:

$$W1(s) = \frac{10 \cdot s}{14 \cdot s + 1}, \quad (17)$$

а переходная характеристика:

$$h1(t) = \frac{5}{7} \cdot \exp\left(-\frac{1}{14} \cdot t\right), \quad (18)$$

Построим графики соответствующих переходных характеристик (рис. 9). Как видно из представленного рис. 9, переходная характеристика немного уменьшится, так как при увеличении R1 в 2 раза по-

стоянная времени  $T$  увеличивается, а коэффициент передачи  $K$  не меняется.

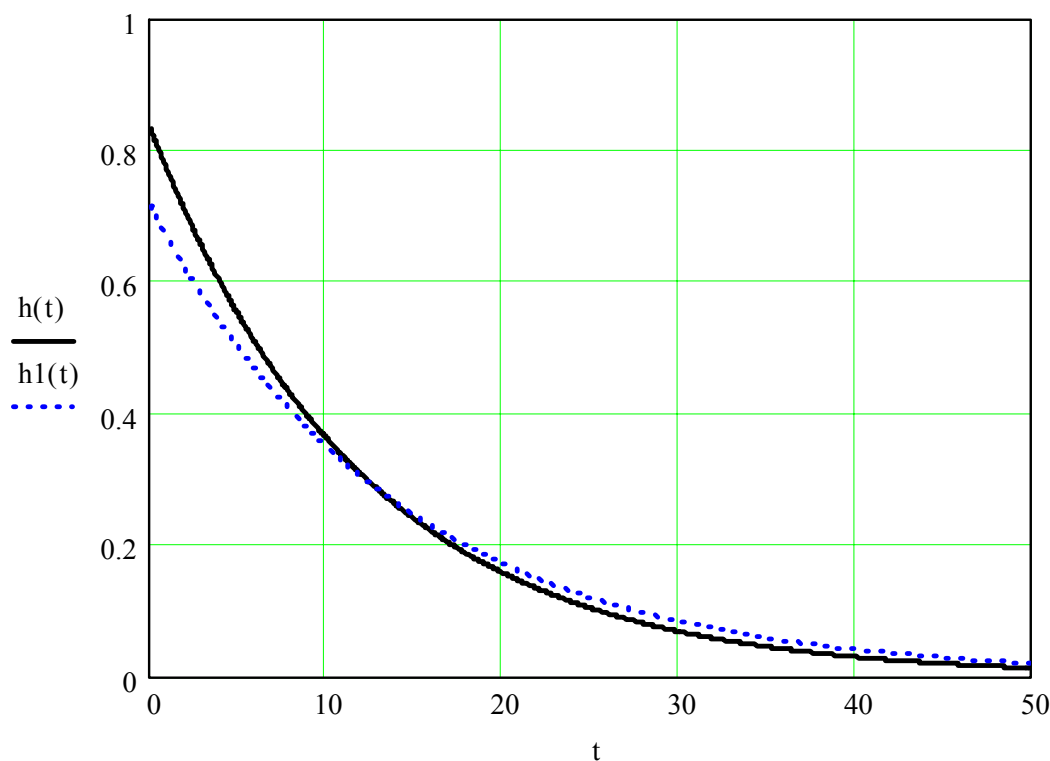


Рис. 9. Переходные характеристики инерционно-дифференцирующему звену при изменении  $R1$

Значение элемента  $R2$  увеличим в 2 раза. При  $R2=10$  Ом, передаточная функция имеет вид:

$$W2(s) = \frac{20 \cdot s}{22 \cdot s + 1}, \quad (19)$$

а переходная характеристика:

$$h2(t) = \frac{10}{11} \cdot \exp\left(-\frac{1}{22} \cdot t\right), \quad (20)$$

Построим график соответствующих переходных характеристик (рис. 10). Как видно из представленного рис. 10 переходная характеристика увеличивается и сдвигается, так как при увеличении  $R2$  в 2 раза коэффициент передачи  $K$  и постоянная времени  $T$  увеличиваются.

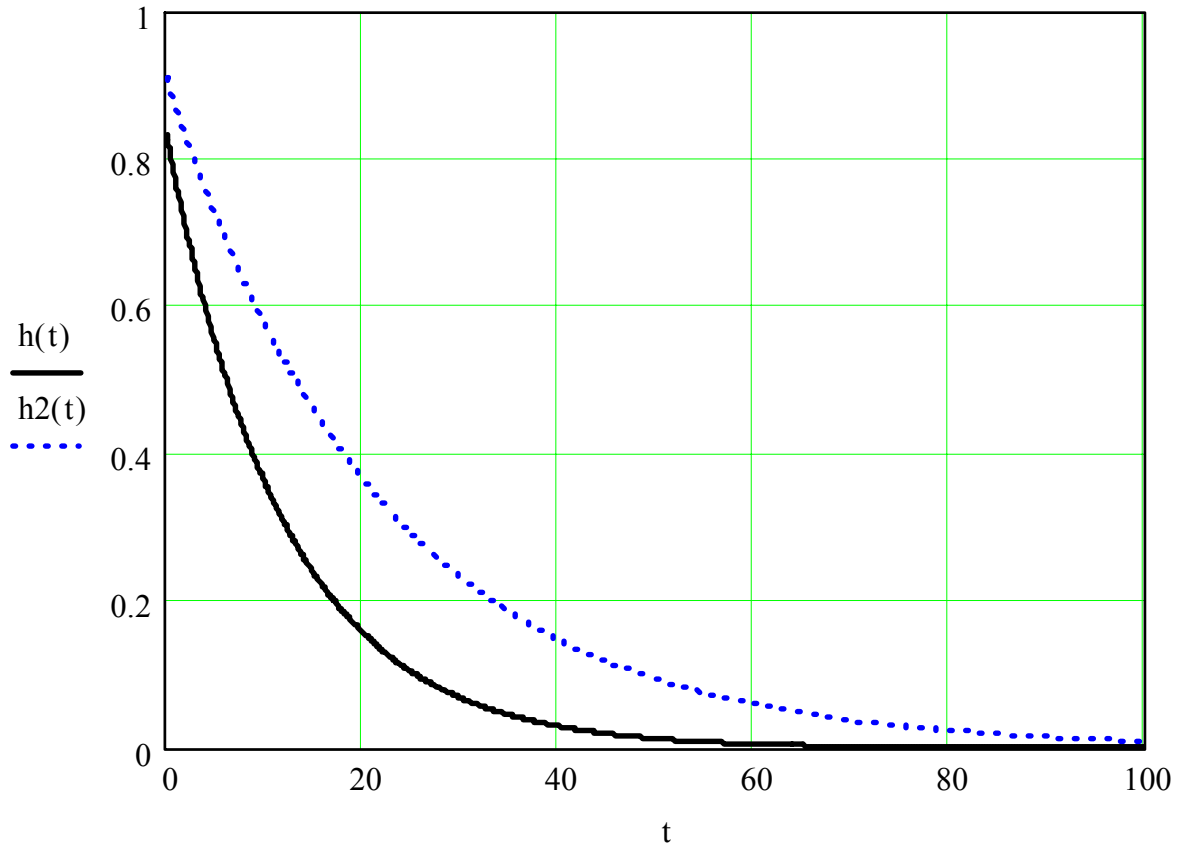


Рис. 10. Переходные характеристики инерционно-дифференцирующему звену при изменении R2

Значение элемента С увеличим в 2 раза. При  $C=4 \Phi$ , передаточная функция имеет вид:

$$W3(s) = \frac{20 \cdot S}{24 \cdot S + 1}, \quad (21)$$

а переходная характеристика:

$$h3(t) = \frac{5}{6} \cdot \exp\left(-\frac{1}{24} \cdot t\right), \quad (22)$$

Построим график соответствующих переходных характеристик (рис. 11). Как видно из представленного рис. 11 переходная характеристика увеличивается, так как при увеличении С в 2 раза коэффициент передачи К и постоянная времени Т увеличиваются.

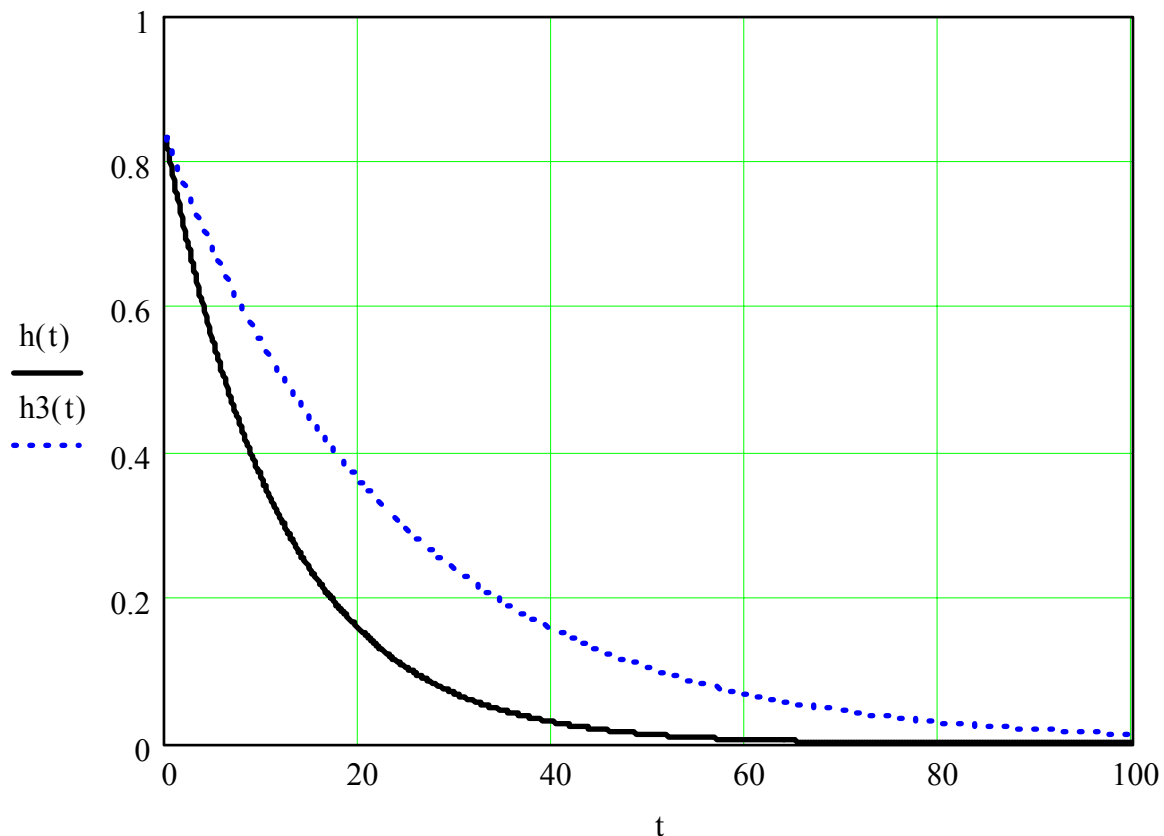


Рис. 11. Переходные характеристики инерционно-дифференцирующему звену при изменении  $C$

### Лабораторная работа № 3 «Амплитудно-фазовые частотные характеристики САУ»

3.1. Рассчитайте АФЧХ (логограф) и постройте график соответствующей функции по заданной передаточной функции (23):

$$W(s) = \frac{A + Bs}{C + Ds}, \quad (23)$$

параметры которой приведены в табл. 4.

3.2. Определите АЧХ (амплитудно-частотная характеристика) и ФЧХ (фазово-частотная характеристика) и постройте графики соответствующих функций.

Таблица 4

Вариант	A	B	C	D
1	3	-1	4	2
2	4	-4	4	8
3	5	-4	3	7
4	1	-2	2	5
5	8	-1	4	7
6	3	-3	2	7
7	4	-9	8	18
8	9	-2	2	9
9	4	-10	2	7
10	5	-10	4	9
11	10	-1	2	8
12	7	-6	2	2
13	8	-4	2	7
14	4	-2	2	1
15	5	-6	4	1
16	2	-8	2	5
17	2	-5	2	5
18	6	-6	4	2
19	5	-3	4	3
20	8	-4	4	7
21	10	-1	4	9
22	2	-7	2	7
23	4	-3	4	2
24	6	-1	2	4
25	9	-6	4	6
26	6	-1	4	5
27	1	-6	4	7
28	5	-7	2	6
29	3	-6	2	9
30	3	-2	2	2

3.3. Определите передаточную функцию замкнутой системы  $\Phi(S)$  по заданной передаточной функции разомкнутой системы  $W(S)$  (23). Рассчитайте АФЧХ  $\Phi(j\omega)$ , АЧХ  $A_3(\omega)$  и ФЧХ  $\Theta_3(\omega)$  и построите соответствующие графики функций замкнутой системы:  $A_3(\omega)$ ,  $\Theta_3(\omega)$  и  $P(\omega)$ .



### Пример выполнения лабораторной работы № 3

Передаточная функция имеет вид:

$$W(s) = \frac{9 - 4s}{4 + 8s}, \quad (24)$$

Чтобы получить АФЧХ, надо в передаточной функции  $W(S)$ , заменить  $S$  на  $j\omega$ :

$$W(j\omega) = \frac{9 - 4j\omega}{4 + 8j\omega}. \quad (25)$$

Для расчета АЧХ и ФЧХ необходимо выделить действительную и мнимую части:

$$W(j\omega) = \frac{(9 - 4j\omega) \cdot (4 - 8j\omega)}{(4 + 8j\omega) \cdot (4 - 8j\omega)} = \frac{36 - 72j\omega - 16j\omega - 32\omega^2}{16 + 64\omega^2}. \quad (26)$$

После некоторых преобразований получим:

$$W(j\omega) = \frac{9 - 8\omega^2}{4 + 16\omega^2} - j \frac{22\omega}{4 + 16\omega^2}, \quad (27)$$

где

$$U(\omega) = \frac{9 - 8\omega^2}{4 + 16\omega^2}, \quad V(\omega) = -\frac{22\omega}{4 + 16\omega^2} \quad (28)$$

Годограф  $W(j\omega)$  (АФЧХ) представлен на рис. 12.

Амплитудно-фазовая характеристика ( модуль  $W(j\omega)$  )  $A(\omega)$  находятся по формуле:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}. \quad (29)$$

В результате преобразований, получим:

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{81 + 340 \cdot \omega^2 + 64 \cdot \omega^4}}{4 + 16 \cdot \omega^2}. \quad (30)$$

График данной функции представлен на рис. 13.

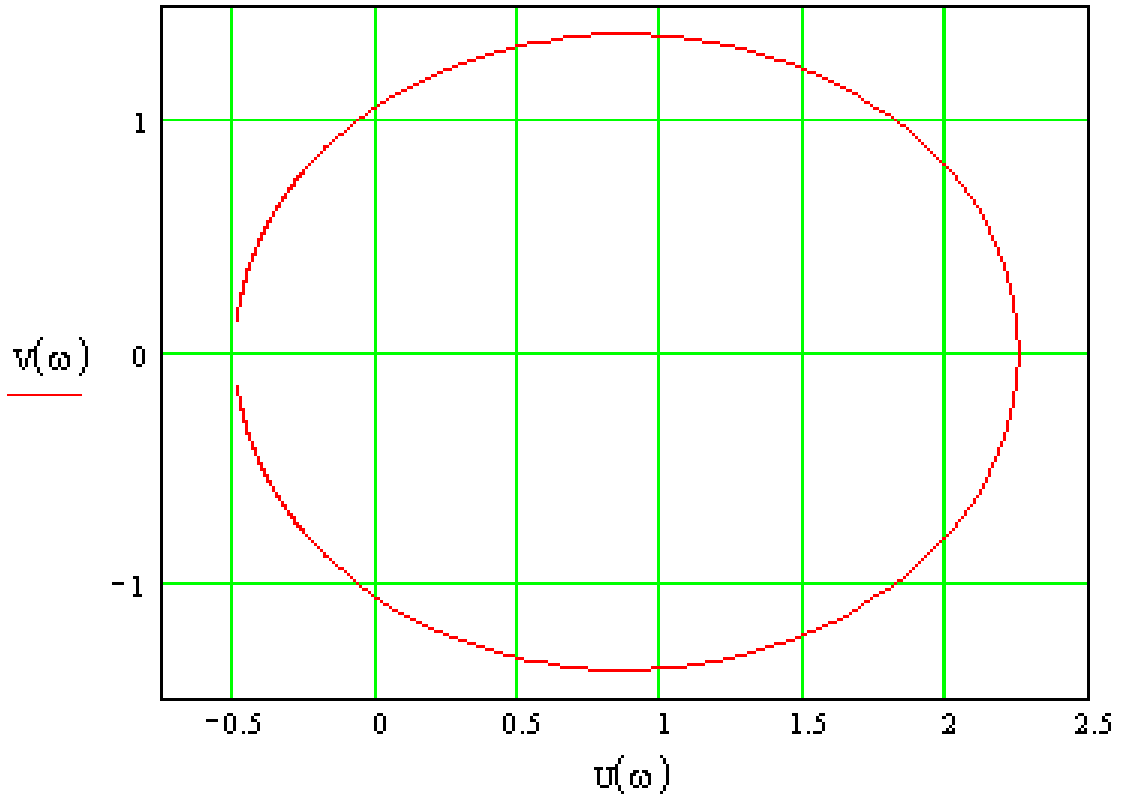


Рис. 12. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (годограф)

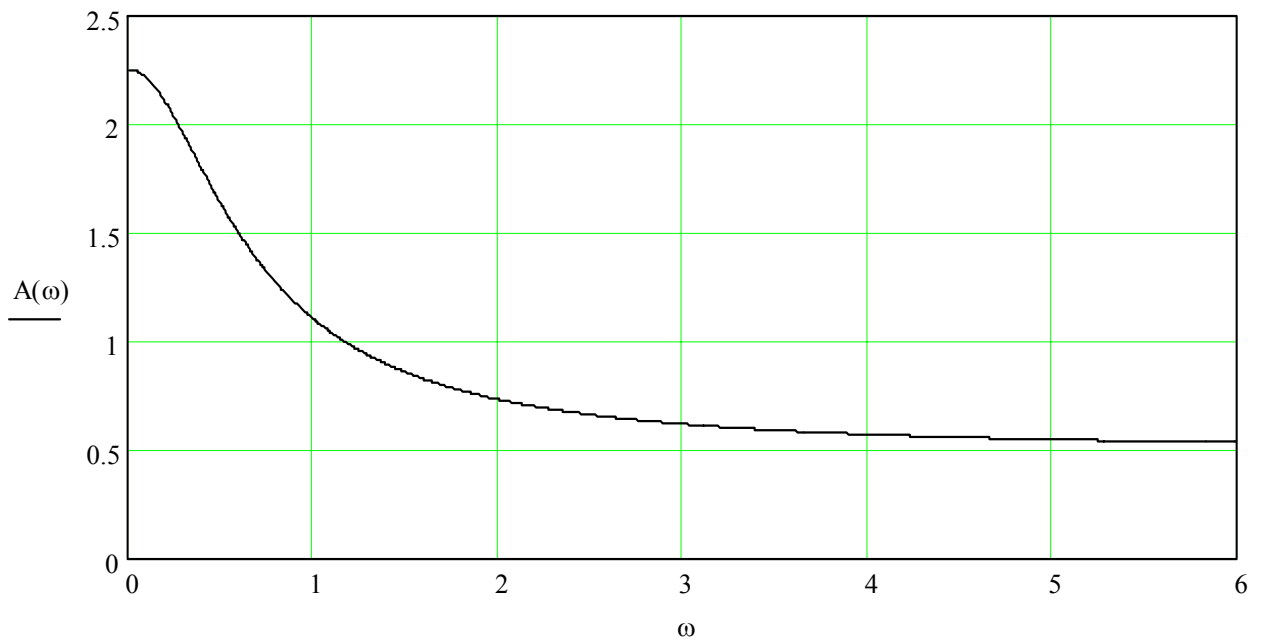


Рис. 13. Амплитудная частотная характеристика

Фазовая частотная характеристика (ФЧХ)  $\phi(\omega)$  рассчитывается по формуле:

$$\phi(\omega) = \arg(W(\omega)) = \operatorname{arctg}\left(\frac{V(\omega)}{U(\omega)}\right). \quad (31)$$

После преобразований получим:

$$\phi(\omega) = \operatorname{arctg}\left(\frac{-22 \cdot \omega}{9 - 8 \cdot \omega^2}\right). \quad (32)$$

График ФЧХ представлен на рис. 14.

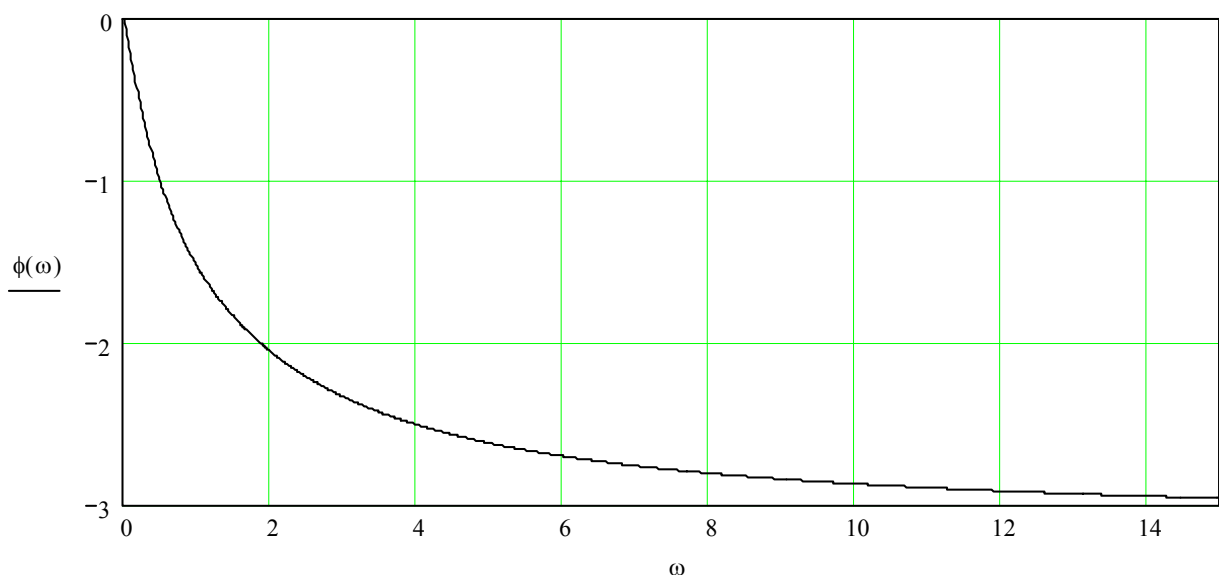


Рис. 14. Фазовая частотная характеристика

Чтобы получить передаточную функцию замкнутой системы воспользуемся формулой

$$\Phi(j\omega) = \frac{W(j\omega)}{1 + W(j\omega)}, \quad (33)$$

где  $W(j\omega)$  – передаточная функция разомкнутой системы.

После некоторых преобразований получим:

$$\Phi(j\omega) = \frac{9 - 4 \cdot j\omega}{13 + 4 \cdot j\omega}, \quad (34)$$

выделив действительную и мнимую части, получим

$$\Phi(j\omega) = \frac{117 - 16 \cdot \omega^2}{169 + 16 \cdot \omega^2} - j \frac{88 \cdot \omega}{169 + 16 \cdot \omega^2}, \quad (35)$$

Амплитудно-частотную характеристику  $Az(\omega)$  найдем по формуле:

$$Az(\omega) = |\Phi(\omega)|. \quad (36)$$

В пакете MathCad получим:

$$Az(\omega) = \frac{\sqrt{13689 + 4000 \cdot \omega^2 + 256 \cdot \omega^4}}{169 + 16 \cdot \omega^2}. \quad (37)$$

График  $Az(\omega)$  представлен на рис. 15.

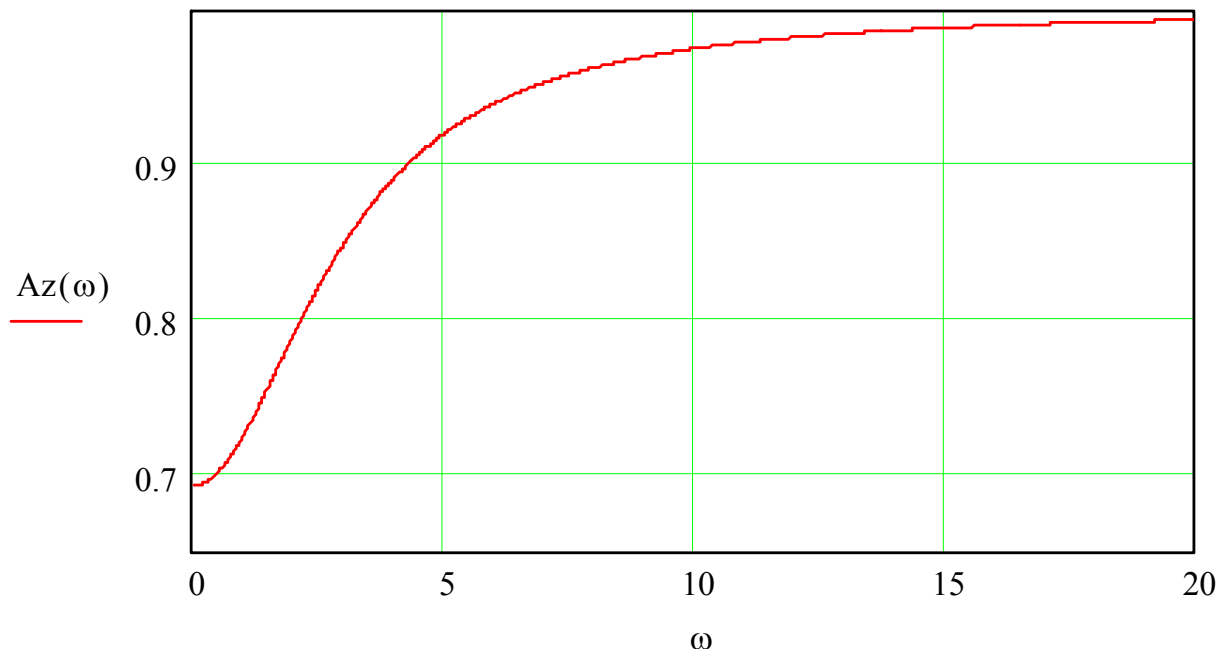


Рис. 15. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

Фазово-частотную характеристику  $\Theta Z(\omega)$  найдем по формуле:

$$\Theta Z(\omega) = \arg(\Phi(\omega)) \quad (38)$$

В пакете MathCad получим:

$$\Theta Z(\omega) = \operatorname{arctg} \left( \frac{-88 \cdot \omega}{117 - 16 \cdot \omega^2} \right) \quad (39)$$

Построим график ФЧХ (рис. 16).

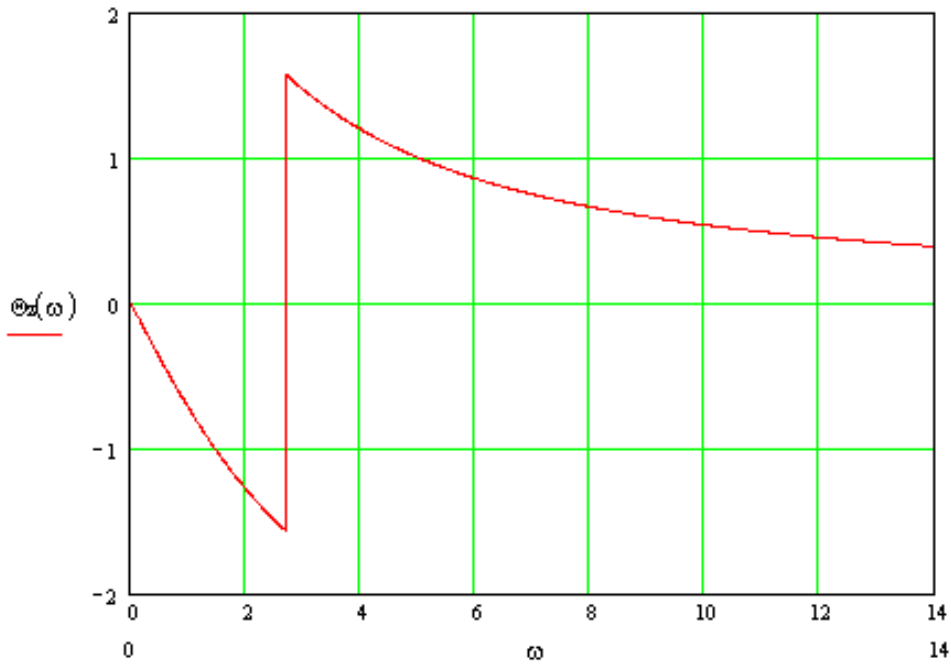


Рис. 16. Фазово-частотная характеристика (ФЧХ)

Определим вещественную часть передаточной функции:

$$P(\omega) = \frac{117 - 16 \cdot \omega^2}{169 + 16 \cdot \omega^2}. \quad (40)$$

Построим график вещественной части передаточной функции (рис. 17).

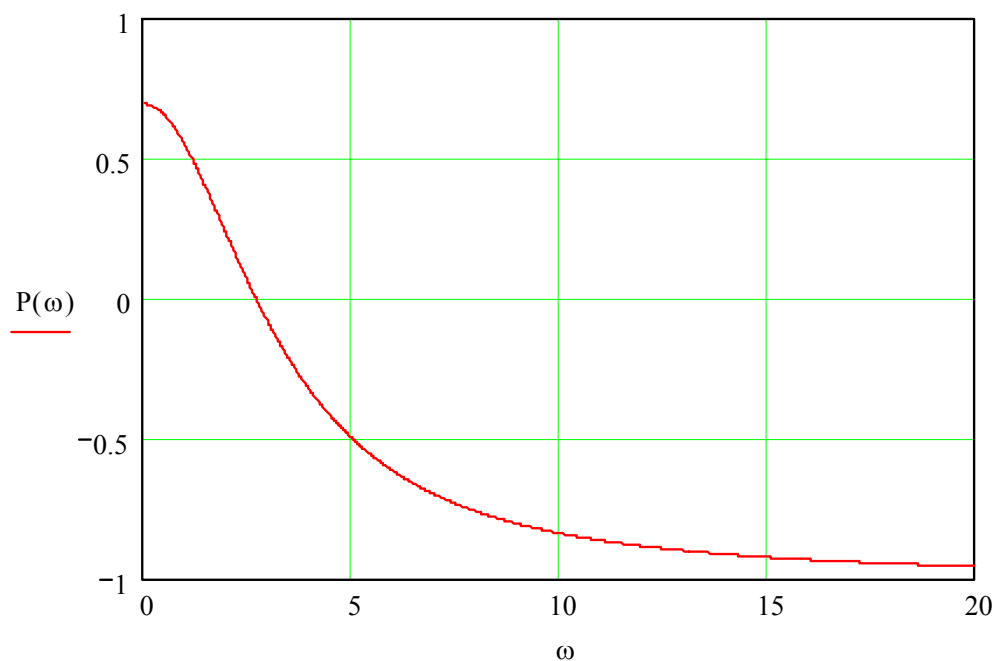


Рис. 17. Действительная часть передаточной функции замкнутой системы

## Лабораторная работа № 4 «Критерий Найквиста»

4.1. Определить устойчивость системы автоматического регулирования (рис. 18) по критерию Найквиста, определить запас устойчивости по фазе и по амплитуде при помощи АФЧХ по логарифмическим характеристикам. Параметры системы приведены в табл. 5.

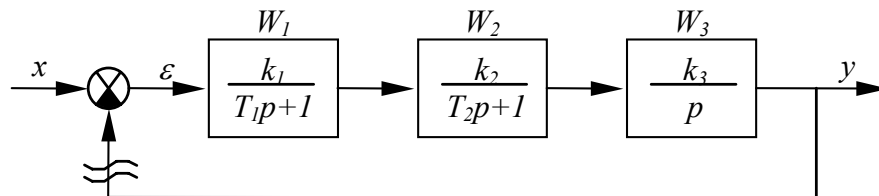


Рис. 18

Таблица 5

№ варианта	Параметры уравнения				
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$T_1, c$	$T_2, c$
1	5	1	10	0,2	0,1
2	2	10	0,2	0,01	1
3	0,5	20	1	0,1	0,1
4	10	10	0,2	0,2	0,1
5	0,5	1	30	0,02	0,1
6	0,2	2	4	0,05	0,1
7	0,1	3	5	0,1	0,1
8	5	4	0,2	0,2	0,1
9	2	10	0,1	0,02	1
10	1	1	2	0,2	0,1
11	1	2	1	0,5	0,1
12	5	1	5	0,1	1
13	10	2	0,4	0,2	1
14	1	1	3	0,5	0,1
15	2	1	2	0,5	1
16	3	1	2	0,2	0,1
17	0,5	1	10	0,1	0,2
18	0,2	10	2	0,3	0,1
19	0,3	20	1	0,2	0,1

№ варианта	Параметры уравнения				
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$T_1, с$	$T_2, с$
20	10	10	0,2	0,2	0,1
21	0,3	1	30	0,02	0,1
22	0,2	2	40	0,05	0,1
23	0,1	3	50	0,1	0,1
24	5	4	0,2	0,2	0,1
25	10	2	0,1	0,2	0,1
26	2	10	0,2	0,01	1
27	0,5	20	1	0,1	0,1
28	1	10	0,2	0,2	0,5
29	1	1	3	0,02	0,1
30	5	2	0,4	0,05	0,1

#### Пример выполнения лабораторной работы № 4

Согласно заданию к лабораторной работе необходимо оценить устойчивость системы по критерию Найквиста. Для суждения об устойчивости замкнутой системы необходимо определить передаточную функцию разомкнутой системы, поэтому необходимо преобразовать исходную систему к общему виду, то есть произвести преобразование цепи.

Преобразование производилось по следующему принципу: так как элементы исходно цепи соединены последовательно, то их заменяем одним элементом, имеющим передаточную функцию равной произведению всех трех передаточных функций исходной цепи, то есть:  $W=W_1*W_2*W_3$ . Если использовать математический вид полученной передаточной функции, то он выглядит так:

$$W = \frac{10}{0.02 \cdot p^3 + 0.3 \cdot p^2 + p} \quad (41)$$

Для того, чтобы применить критерий Найквиста необходимо построить амплитудно-фазовую частотную характеристику. Это можно реализовать, заменив в формуле для передаточной функции преобразо-

ванной системы  $p$  на  $j\omega$ . Далее разделим на действительную и мнимую части передаточную функцию преобразованной системы:  
 $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ ,

$$\text{где } U(\omega) = \frac{-3 \cdot \omega^2}{0.09 \cdot \omega^4 + (0.02 \cdot \omega^3 - \omega)^2}, \quad V(\omega) = \frac{0.2 \cdot \omega^3 - 10 \cdot \omega}{0.09 \cdot \omega^4 + (0.02 \cdot \omega^3 - \omega)^2}. \quad (42)$$

Теперь можно построить график амплитудно-фазовой частотной характеристики. Полученная зависимость представлена на рис. 19.

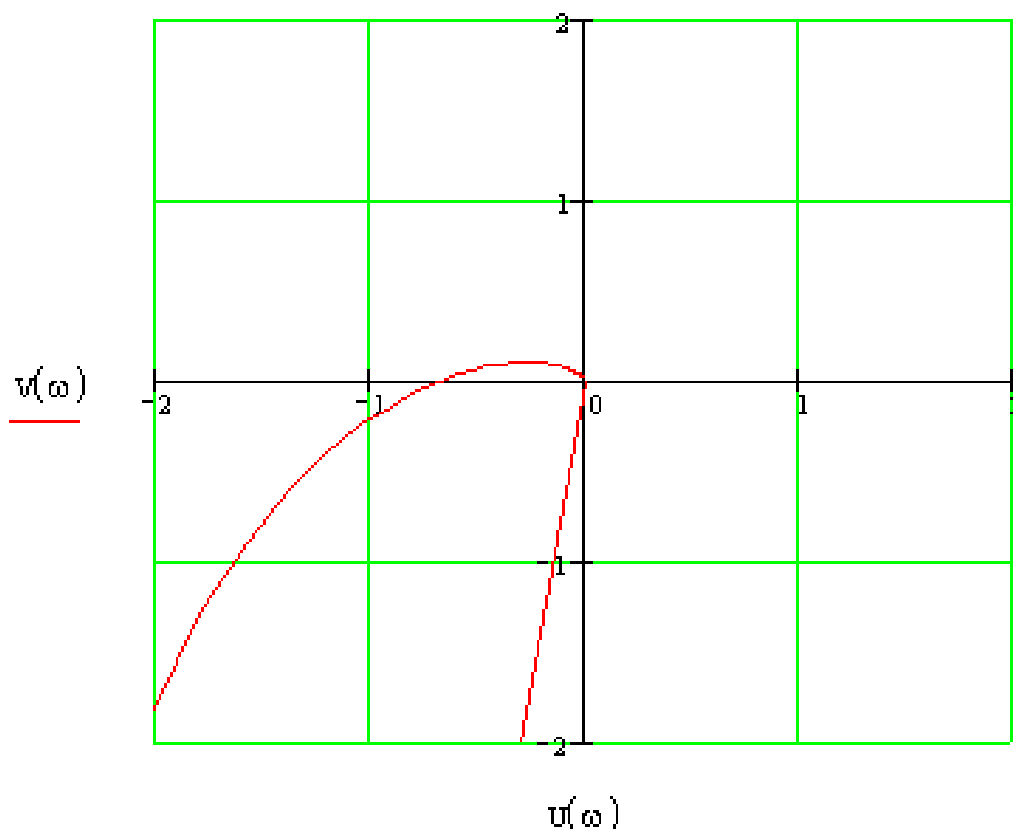


Рис. 19. Амплитудно-фазовая частотная характеристика.

Согласно критерию Найквиста, замкнутая система будет устойчива, если амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы не охватывает точку  $(-1, 0)$ . Анализируя полученный результат, устанавливаем, что полученная нами кривая не охватывает точку  $(-1, 0)$ , следовательно, система устойчива.

Далее определим запас устойчивости, используя график представленный на рис. 19. Запасом по модулю  $|M|$  является отрезок, начало которого находится в точке пересечения кривой с осью абсцисс, а конец –



точка  $(-1,0)$ . Длина этого отрезка и будет являться запасом по модулю. В нашем случае  $M=0,31$ . Запас по фазе  $\Delta\varphi$  равен:  $\Delta\varphi=\pi-|\varphi(w_i)|$ . В нашем случае запас по фазе составляет примерно  $-11^\circ$  (рис. 20).

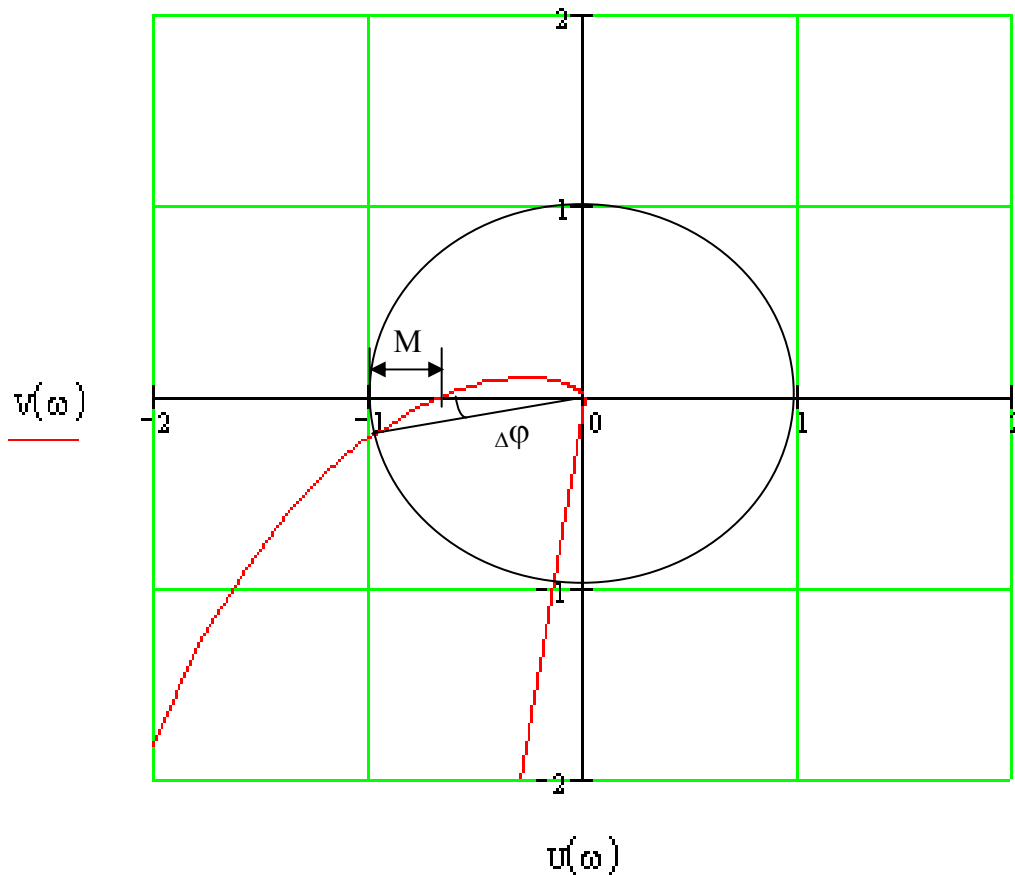


Рис. 20. Запасы устойчивости по критерию Найквиста

Далее необходимо провести расчет запасов по амплитуде и по фазе, используя логарифмическую зависимость амплитуды от частоты и фазовую зависимость (рис. 21). Система является устойчивой, так как при  $\theta(\omega)=0$ ,  $20\log(A(\omega))<0$ , а при  $20\log(A(\omega))=0$ ,  $\theta(\omega)>0$ .

Для анализа запасов устойчивости, определим точку пересечения логарифмической амплитудной зависимости с нулевым уровнем. При  $\omega=5,716$ ,  $20\log(A(\omega))=0$ . Далее подставив найденное значение в формулу описывающую фазовую зависимость, получим, что запас по фазе составляет  $0,199$  рад. или  $11,4^\circ$ .

Для нахождения запаса по амплитуде, необходимо определить точку пересечения фазовой зависимости с уровнем  $0$ , т.е. определить  $\omega$  при которой  $\theta(\omega)=0$ , в данном случае  $\omega=7,07$ . Далее подставив найденное зна-

чение в формулу для логарифмической амплитудной характеристики, получим значение запаса устойчивости по амплитуде в децибелах:  $20\log(A(7,07)) = -3,519$ .

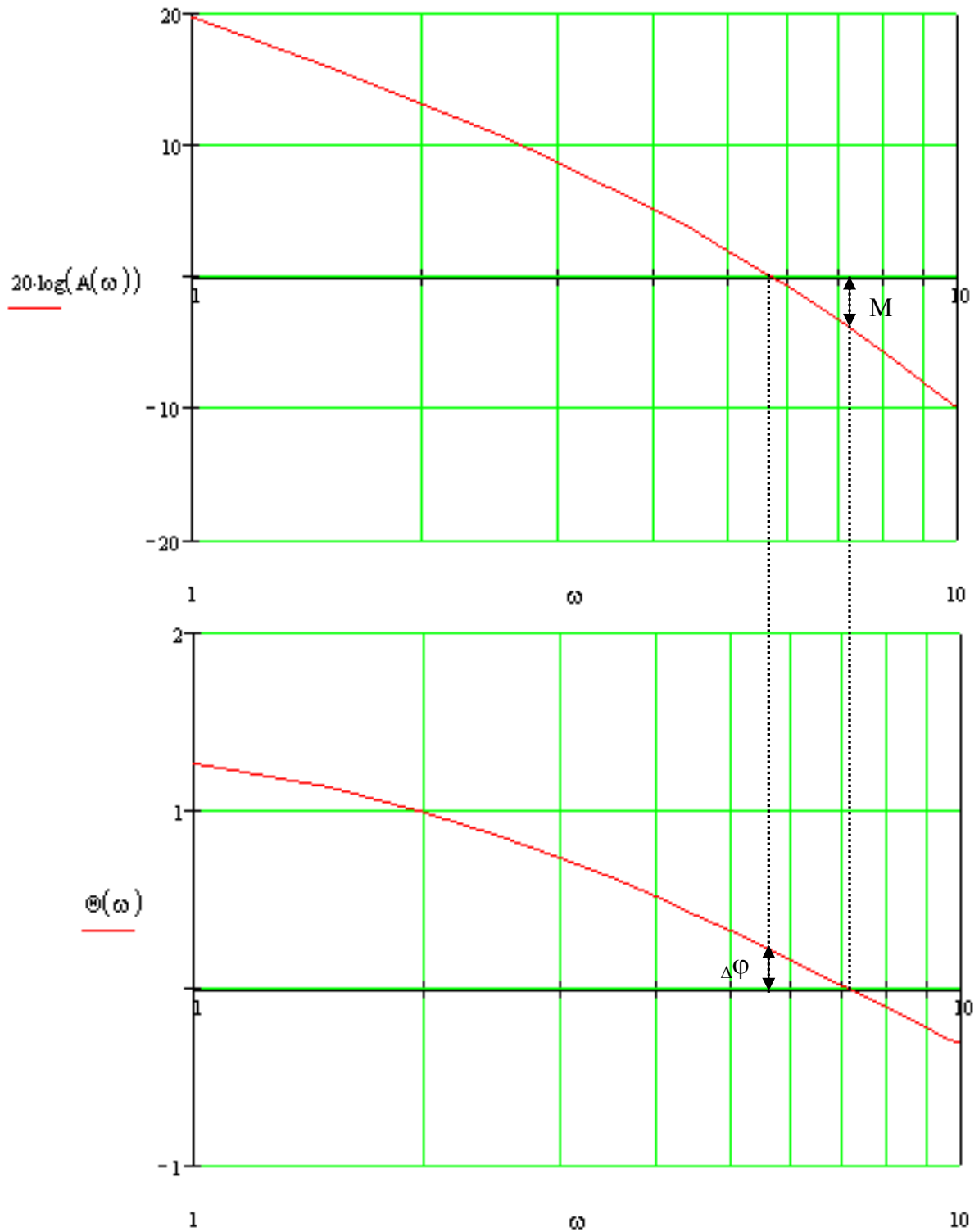


Рис. 21. Логарифмическая амплитудная и фазовая частотные характеристики

## Библиографический список

1. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: учебное пособие для ВТУЗов / Е.П. Попов. М.:Наука, 1989. 304 с.
2. Зацепина С.А. Теория управления: учебное пособие / С.А. Зацепина, Я.Е. Львович, В.Н. Фролов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1989. 200 с.
3. Фролов В.Н. Управление в биологических и медицинских системах: учебное пособие для ВУЗов / В.Н. Фролов. Воронеж: ВГТУ, 2001. 327 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие методические указания по выполнению лабораторных работ....	1
2. Лабораторная работа № 1.....	1
3. Лабораторная работа № 2.....	6
4. Лабораторная работа № 3.....	13
5. Лабораторная работа № 4.....	20
6. Библиографический список.....	25

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
"Управление в биотехнических системах"  
для студентов направления 12.03.04  
«Биотехнические системы и технологии»  
(профили "Биотехнические и медицинские аппараты и системы",  
"Менеджмент и управление качеством в здравоохранении")  
очной формы обучения

Составители: Коровин Евгений Николаевич  
Сергеева Маргарита Анатольевна

В авторской редакции

Подписано в печать 22.09.2016.

Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,8. Уч.-изд. л. 1,6. Тираж 50 экз. «С»

Зак. №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14