



НИУ ИТМО

## ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №6

По дисциплине "Линейные системы автоматического управления"

"Критерий Найквиста и системы с запаздыванием"

Вариант 17

Выполнил:

**Александр Иванов, R3338**

Преподаватели:

**Перегудин А.А.**

**Пашенко А.В.**

Санкт-Петербург, 2024

# **Содержание**

<b>1. Годограф Найквиста</b>	<b>3</b>
1.1. Система 1 . . . . .	4
1.2. Система 2 . . . . .	7
1.3. Система 3 . . . . .	12
1.4. Вывод . . . . .	14
<b>2. Коэффициент усиления</b>	<b>15</b>
2.1. Система 1 . . . . .	15
2.2. Система 2 . . . . .	18
2.3. Вывод . . . . .	23
<b>3. Система с запаздыванием</b>	<b>26</b>
3.1. Система 1 . . . . .	26
3.2. Система 2 . . . . .	30
3.3. Вывод . . . . .	32
<b>4. Вывод</b>	<b>33</b>

# 1. Годограф Найквиста

Рассмотрим передаточную функцию физически реализуемой разомкнутой системы вида:

$$W_o(s) = \frac{s^5 + b_4s^4 + b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^5 + a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (1)$$

и передаточную функцию замкнутой системы:

$$W_c(s) = \frac{s^5 + b_4s^4 + b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0}{2s^5 + (a_4 + b_4)s^4 + (a_3 + b_3)s^3 + (a_2 + b_2)s^2 + (a_1 + b_1)s + (a_0 + b_0)} \quad (2)$$

исходя из того, что все полюса объекта вещественные, можно переписать 1 в виде:

$$W_o(s) = \frac{(s - z_1)(s - z_2)(s - z_3)(s - z_4)(s - z_5)}{(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)(s - p_4)(s - p_5)} \quad (3)$$

Перепишем передаточную функцию замкнутой системы в виде:

$$W_c(s) = \frac{(s - z_1)(s - z_2)(s - z_3)(s - z_4)(s - z_5)}{2(s - k_1)(s - k_2)(s - k_3)(s - k_4)(s - k_5)} \quad (4)$$

Введем функцию  $C(Z) : R^5 \rightarrow R^5$ , аргумент которой – вектор корней полинома пятой степени, а значение – вектор коэффициентов соответствующего полинома. Тогда можно записать:

$$C(Z) = \begin{bmatrix} -z_1z_2z_3z_4z_5 \\ -z_1 - z_2 - z_3 - z_4 - z_5 \\ z_1z_2 + z_1z_3 + z_1z_4 + z_1z_5 + z_2z_3 + z_2z_4 + z_2z_5 + z_3z_4 + z_3z_5 + z_4z_5 \\ -z_1z_2z_3 - z_1z_2z_4 - z_1z_2z_5 - z_1z_3z_4 - z_1z_3z_5 - z_1z_4z_5 - z_2z_3z_4 - z_2z_3z_5 - z_2z_4z_5 - z_3z_4z_5 \\ z_1z_2z_3z_4 + z_1z_2z_3z_5 + z_1z_2z_4z_5 + z_1z_3z_4z_5 + z_2z_3z_4z_5 \end{bmatrix}$$

Задавшись полюсами  $P$  разомкнутой системы и полюсами  $K$  замкнутой системы, найдем передаточные функции замкнутой и разомкнутой системы:

$$A = C(P) \quad B = C(K) - A \quad (5)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 1.1. Система 1

Зададимся системой с полюсами  $P$ :

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1.5 & 2 & -1 & -2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

И полюсами замкнутой системы  $K$ :

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 1.5 & -2.5 & -1 & -2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Запишем передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы:

$$W_o = \frac{s^5 + 4.50s^4 + 2.25s^3 - 18.00s^2 - 2.25s + 13.50}{s^5 - 1.50s^4 - 5.00s^3 + 7.50s^2 + 4.00s - 6.00} \quad (9)$$

$$W_c = \frac{s^5 + 4.50s^4 + 2.25s^3 - 18.00s^2 - 2.25s + 13.50}{2s^5 + 3.00s^4 - 2.75s^3 - 10.50s^2 + 1.75s + 7.50} \quad (10)$$

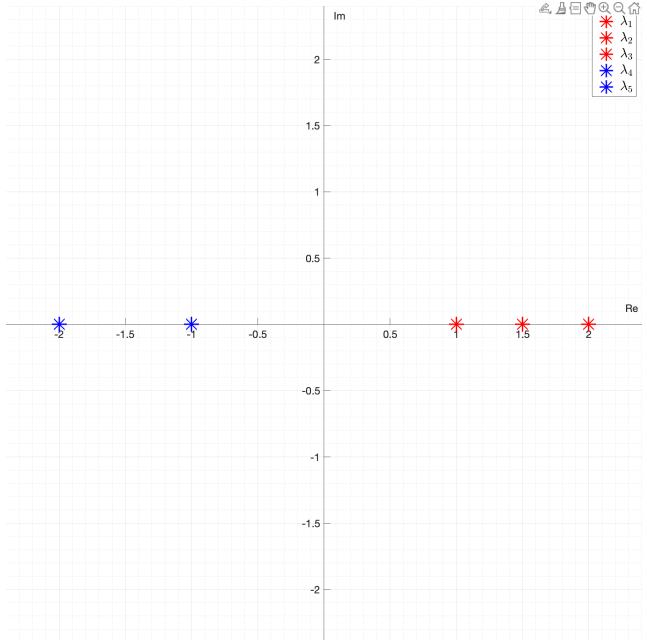
Карты расположения полюсов передаточных функций приведены на рисунках 1а и 1б соответственно.

Переходные характеристики систем приведены на рисунке 2.

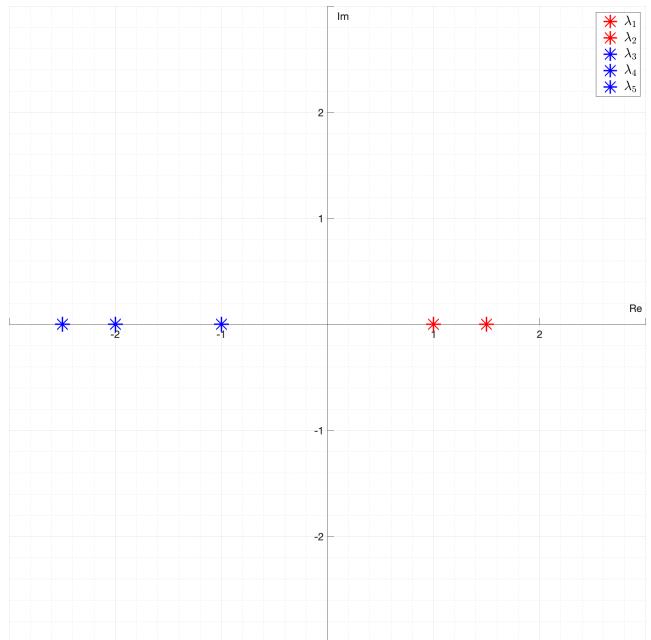
Годограф Найквиста приведен на рисунке 3. Найдем количество оборотов годографа вокруг точки  $(-1, 0)$  согласно формуле:

$$M - N = Z \quad (11)$$

где  $Z$  – количество оборотов годографа вокруг точки  $(-1, 0)$  по часовой стрелке,  $M$  – количество неустойчивых полюсов замкнутой системы,  $N$  – количество неустойчивых

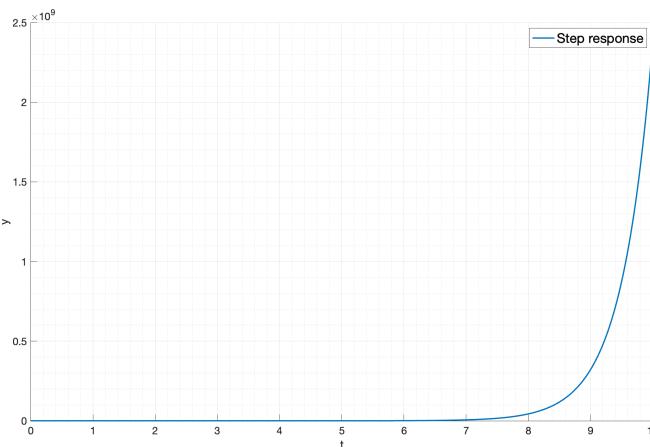


(a) Разомкнутая система

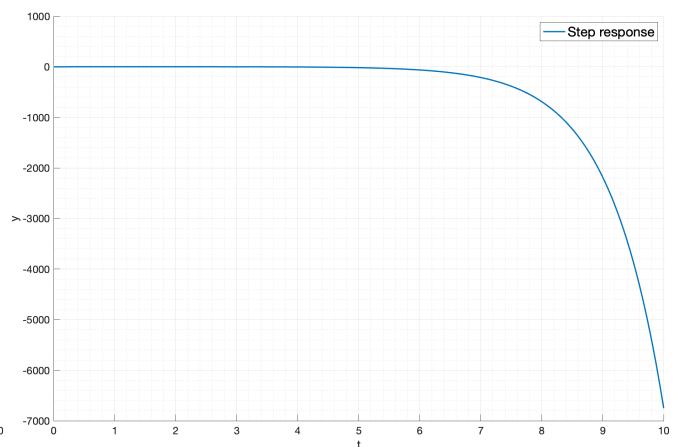


(b) Замкнутая система

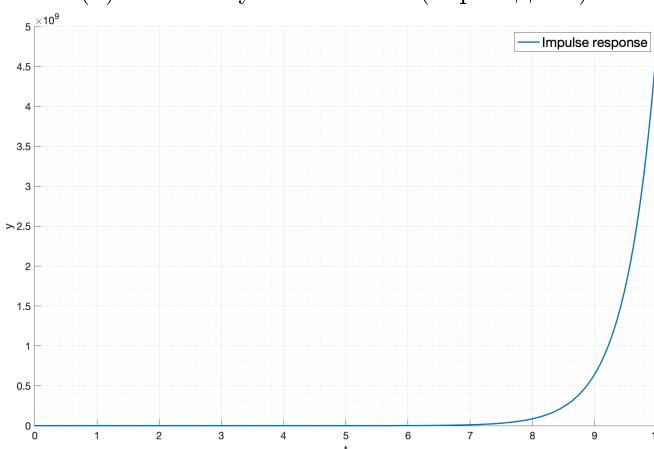
Рис. 1: Карты расположения полюсов



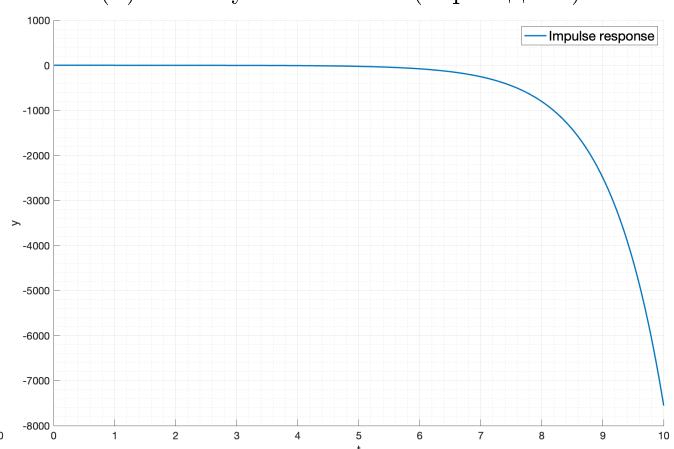
(a) Разомкнутая система (переходная)



(b) Замкнутая система (переходная)



(c) Замкнутая система (весовая)



(d) Замкнутая система (весовая)

Рис. 2: Переходные характеристики

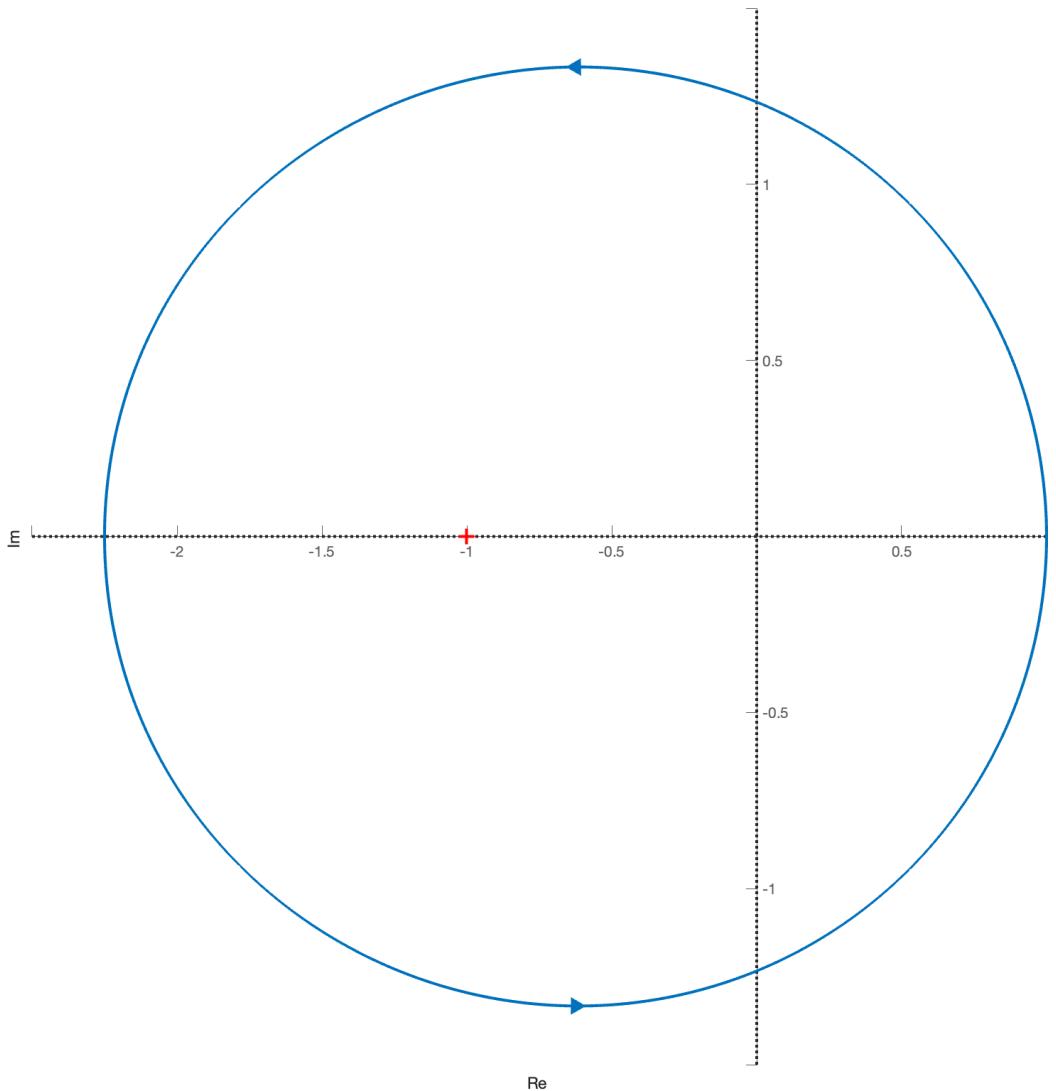


Рис. 3: Годограф Найквиста

полюсов разомкнутой системы. В данном случае  $M = 2$ ,  $N = 3$ , следовательно  $Z = -1$ , что подтверждает график на рисунке 3.

Проведем анализ устойчивости на основе логарифмического критерия Найквиста, построим ЛАФЧХ разомкнутой системы (см. рис. 4).

Так как разомкнутая система имела 3 неустойчивых полюса, нужно, чтобы число переходов через критические точки было равно 1.5. На графике видно, что это условие не выполняется, переходы через прямую отсутствуют, но ЛАФЧХ начинается на критическом отрезке, значит, сумма переходов будет равна 0.5, что подтверждает **неустойчивость** системы.

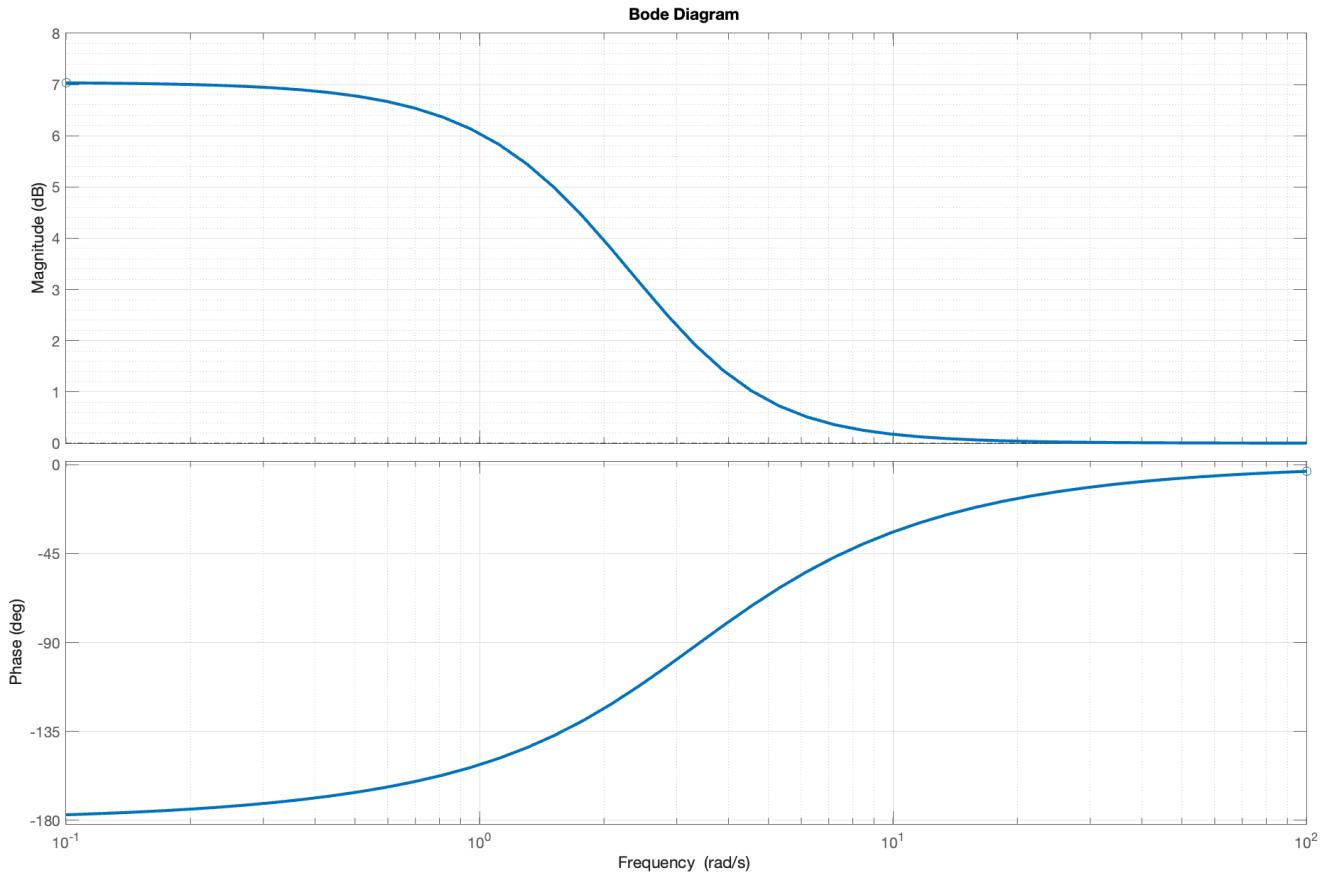


Рис. 4: ЛАФЧХ разомкнутой системы

## 1.2. Система 2

Зададимся системой с полюсами  $P$ :

$$P = \begin{bmatrix} -1 & -1.5 & -2.5 & -3 & -3.5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

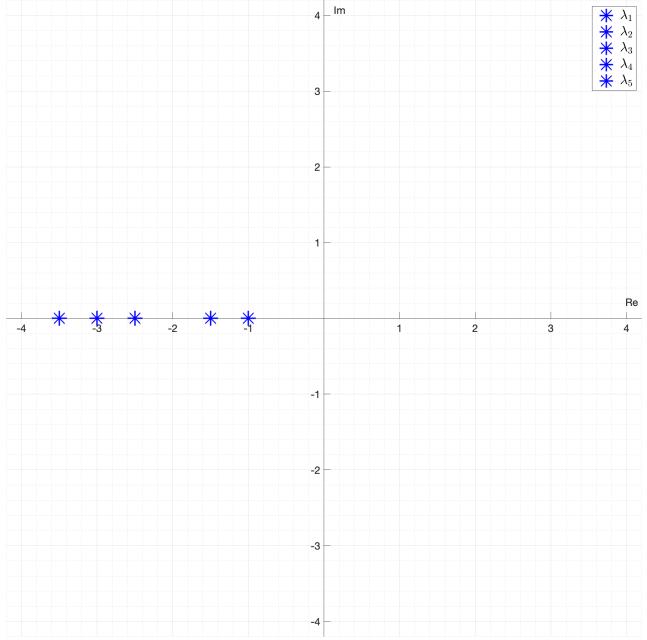
И полюсами замкнутой системы  $K$ :

$$K = \begin{bmatrix} -1 & -1.5 & -2.5 & 3 & 3.5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

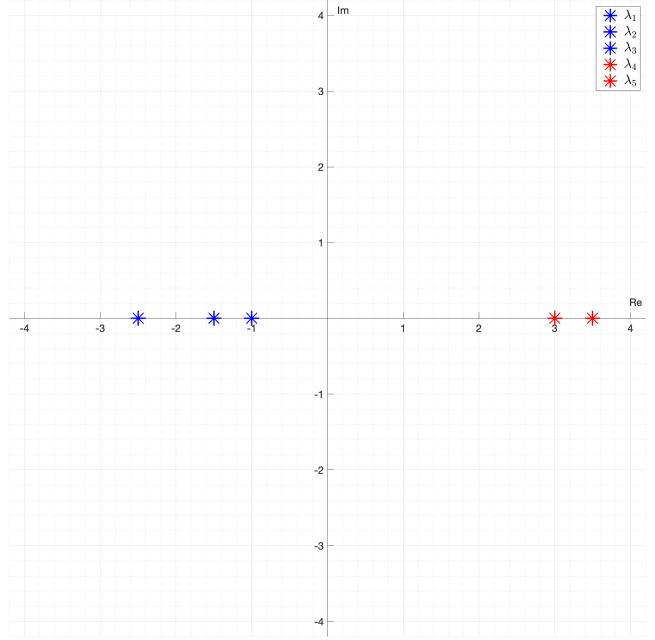
Запишем передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы:

$$W_o = \frac{s^5 - 13.00s^4 - 65.00s^3 - 100.75s^2 - 48.75s + 0.00}{s^5 + 11.50s^4 + 50.75s^3 + 106.62s^2 + 105.75s + 39.38} \quad (14)$$

$$W_c = \frac{s^5 - 13.00s^4 - 65.00s^3 - 100.75s^2 - 48.75s + 0.00}{2s^5 - 1.50s^4 - 14.25s^3 + 5.88s^2 + 57.00s + 39.38} \quad (15)$$



(a) Разомкнутая система



(b) Замкнутая система

Рис. 5: Карты расположения полюсов

Карты расположения полюсов передаточных функций приведены на рисунках 5а и 5б соответственно.

Переходные характеристики систем приведены на рисунке 6.

Годограф Найквиста приведен на рисунке 7. Годограф делает 2 оборота вокруг точки  $(-1, 0)$ , количество неустойчивых полюсов замкнутой системы – 0, количество неустойчивых полюсов разомкнутой системы – 2, следовательно,  $Z = 2$ , что подтверждает график на рисунке 7.

Проведем анализ устойчивости на основе логарифмического критерия Найквиста, построим ЛАФЧХ разомкнутой системы (см. рис. 8).

Так как разомкнутая система имела 0 неустойчивых полюсов, нужно, чтобы число переходов через критические точки было равно 0. На графике же видим один отрицательный переход через критическую точку, что подтверждает неустойчивость системы.

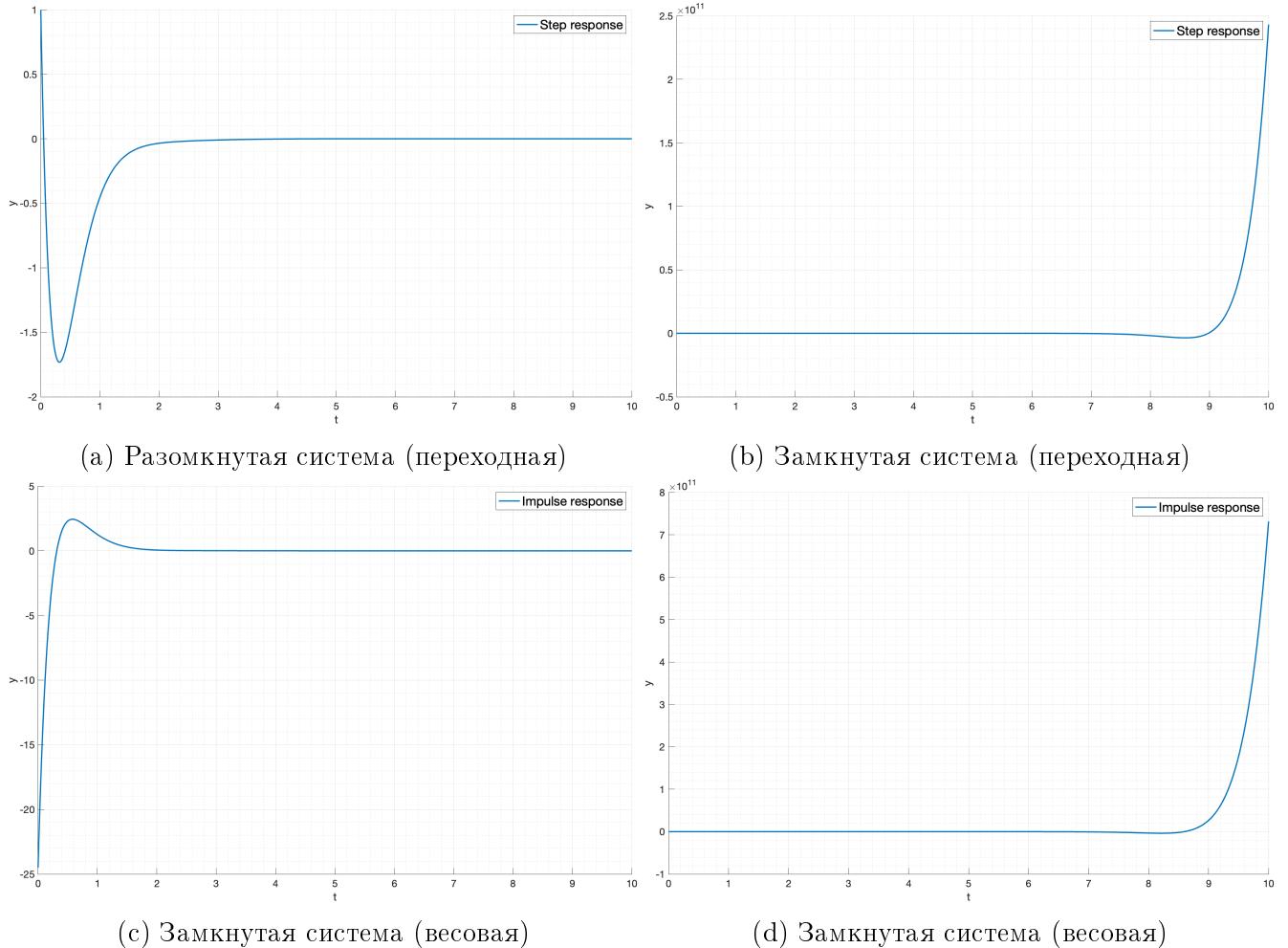


Рис. 6: Переходные характеристики

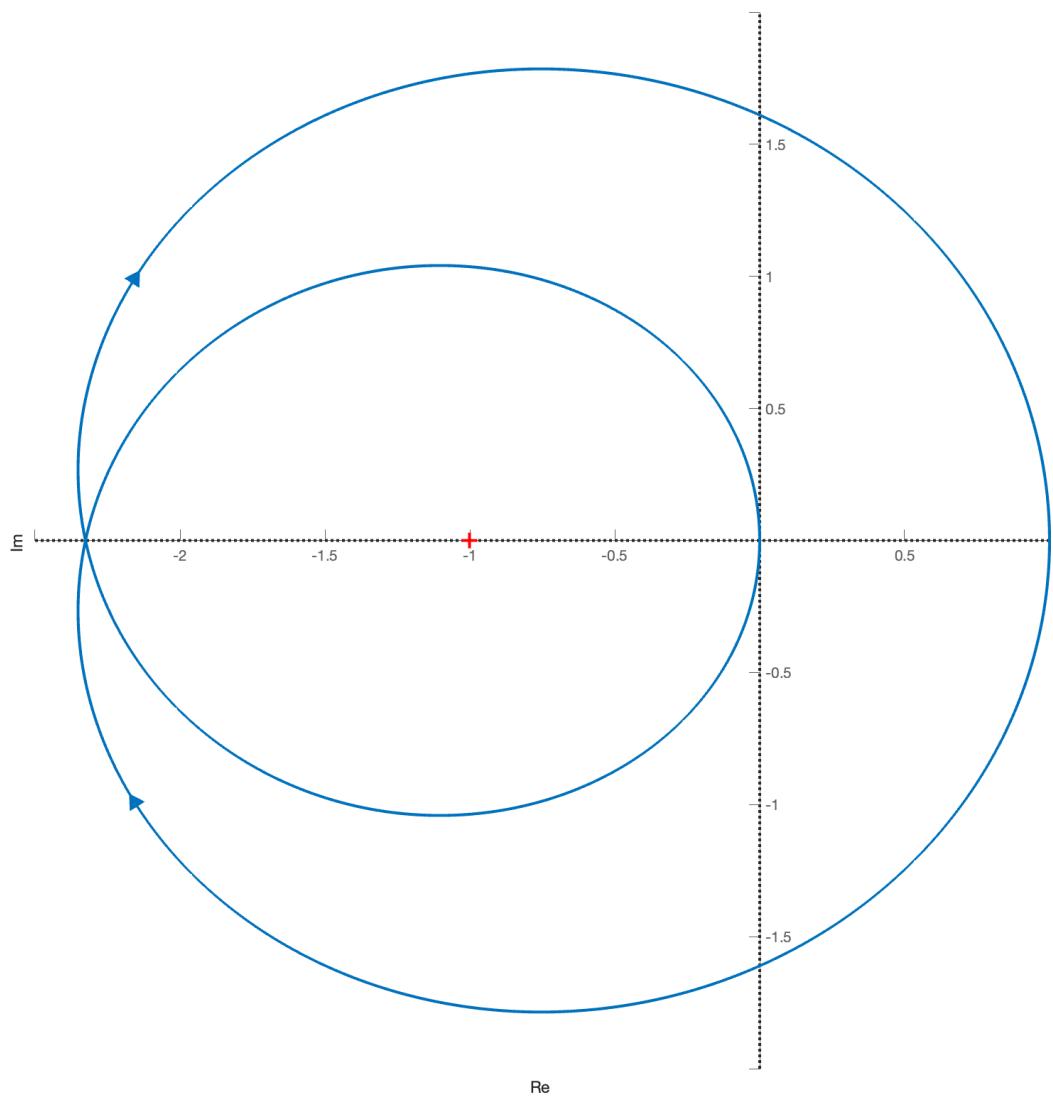


Рис. 7: Годограф Найквиста

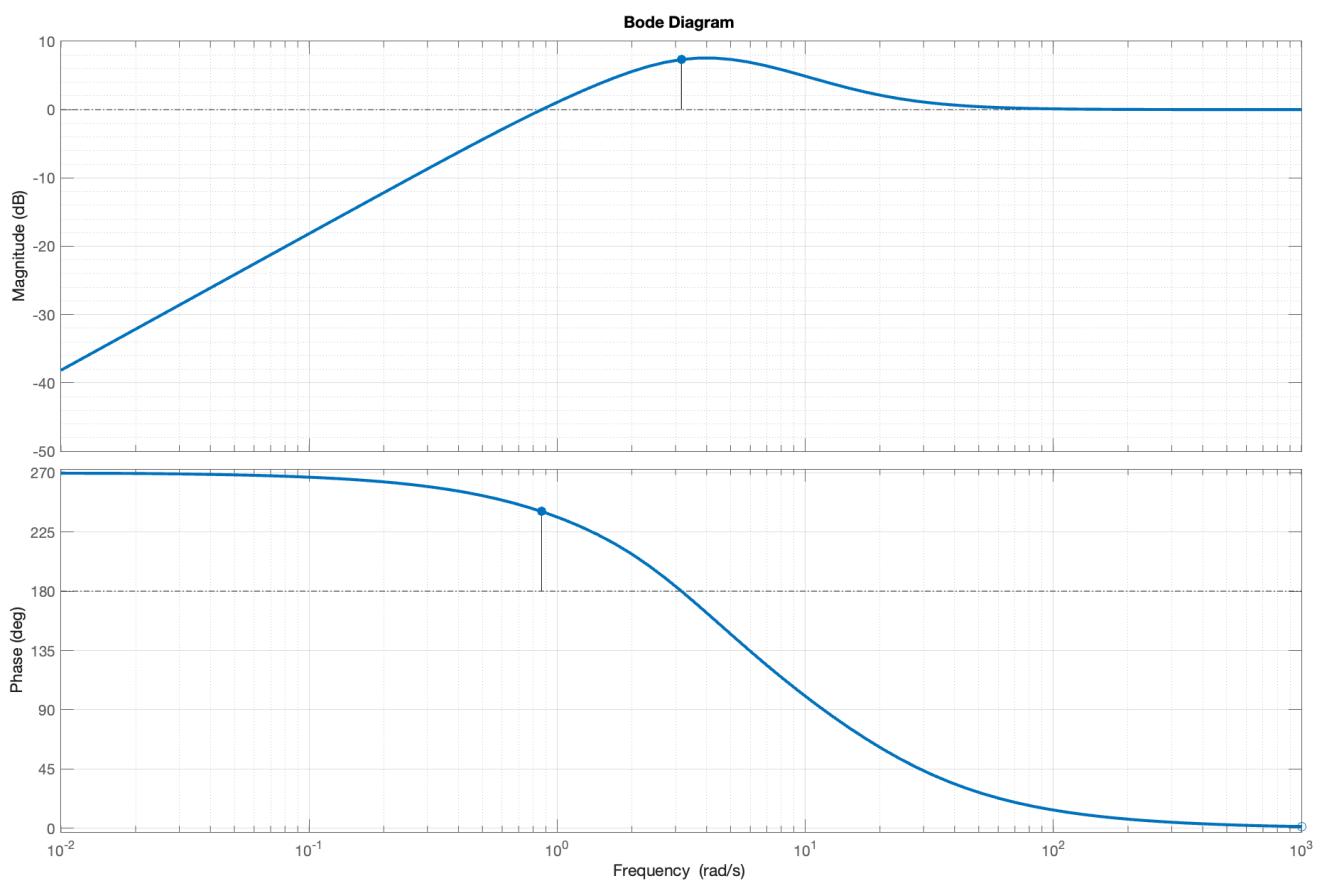


Рис. 8: ЛАФЧХ разомкнутой системы

### 1.3. Система 3

Зададимся системой с полюсами  $P$ :

$$P = \begin{bmatrix} -1 & -1.5 & 2.5 & 3 & 3.5 \end{bmatrix} \quad (16)$$

И полюсами замкнутой системы  $K$ :

$$K = \begin{bmatrix} -1 & -1.5 & -2.5 & -3 & -3.5 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Запишем передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы:

$$W_o = \frac{s^5 + 18.00s^4 + 45.00s^3 + 79.50s^2 + 131.25s + 78.75}{s^5 - 6.50s^4 + 5.75s^3 + 27.12s^2 - 25.50s - 39.38} \quad (18)$$

$$W_c = \frac{s^5 + 18.00s^4 + 45.00s^3 + 79.50s^2 + 131.25s + 78.75}{2s^5 + 11.50s^4 + 50.75s^3 + 106.62s^2 + 105.75s + 39.38} \quad (19)$$

Карты расположения полюсов передаточных функций приведены на рисунках 9а и 9б соответственно.

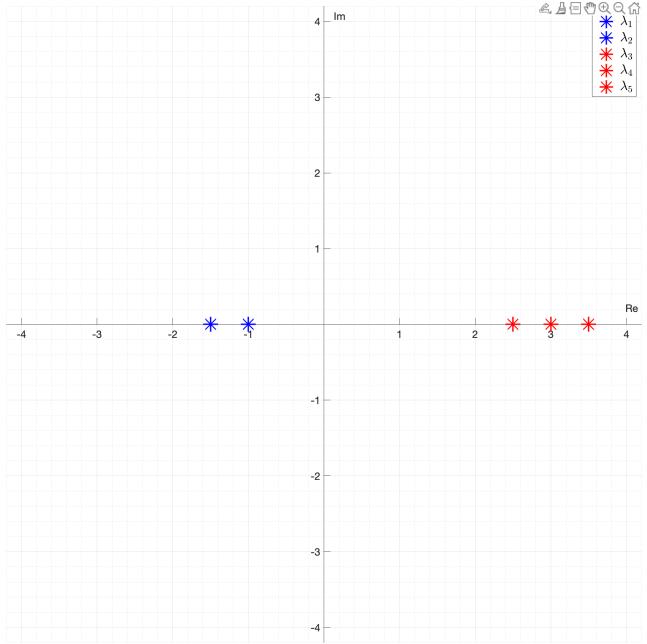
Переходные характеристики систем приведены на рисунке 10.

Годограф Найквиста приведен на рисунке 11.

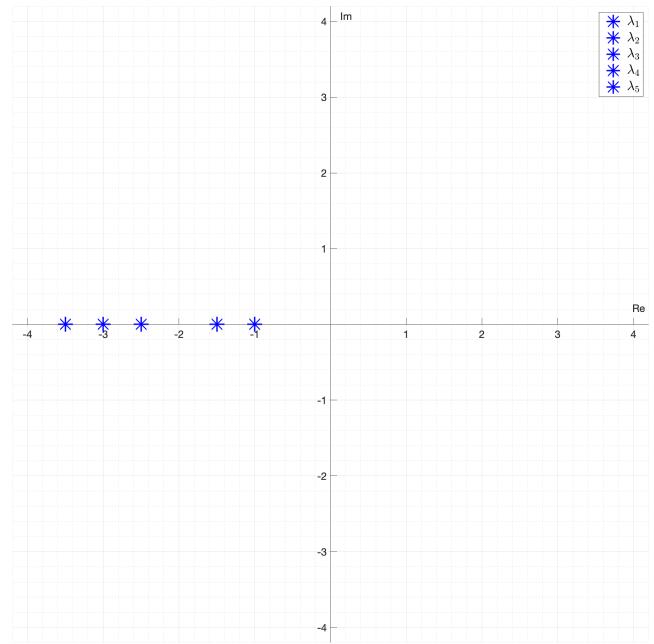
Количество неустойчивых полюсов замкнутой системы – 0, количество неустойчивых полюсов разомкнутой системы – 3, следовательно,  $Z = -3$ , что подтверждает график на рисунке 11.

Проведем анализ устойчивости на основе логарифмического критерия Найквиста, построим ЛАФЧХ разомкнутой системы (см. рис. 12).

Так как разомкнутая система имела 3 неустойчивых полюса, нужно, чтобы число переходов через критические точки было равно 1.5. ЛАФЧХ начинается с критического отрезка и делает один положительный переход через критическую точку, что дает сумму переходов равную 1.5, что подтверждает устойчивость системы.

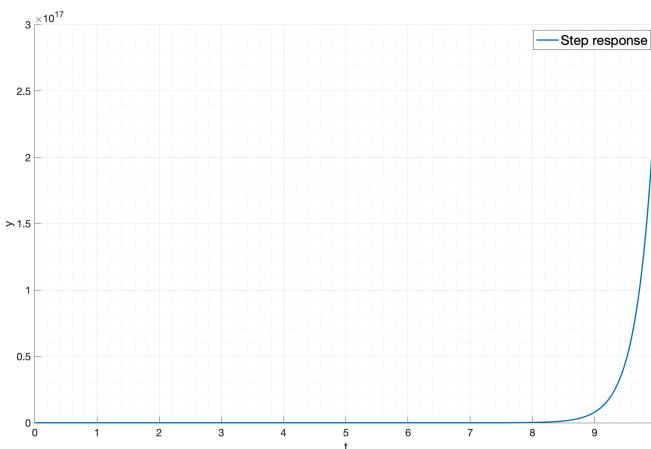


(a) Разомкнутая система

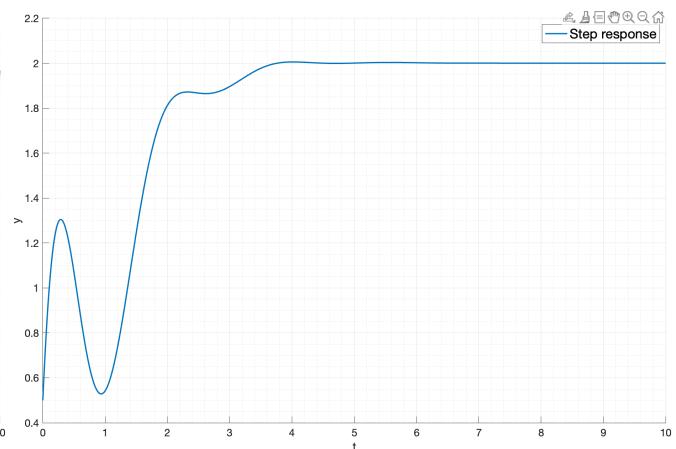


(b) Замкнутая система

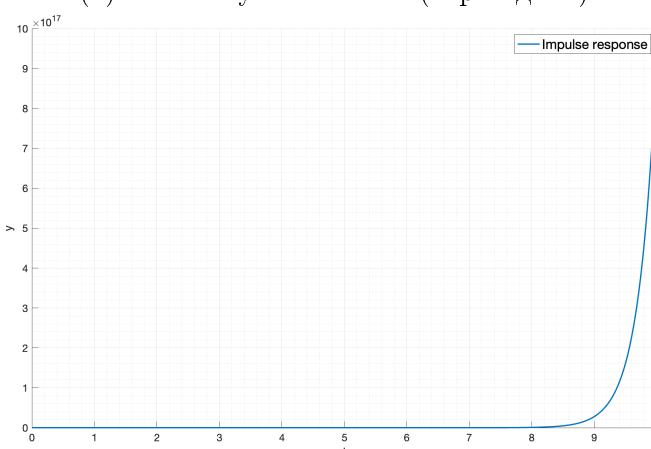
Рис. 9: Карты расположения полюсов



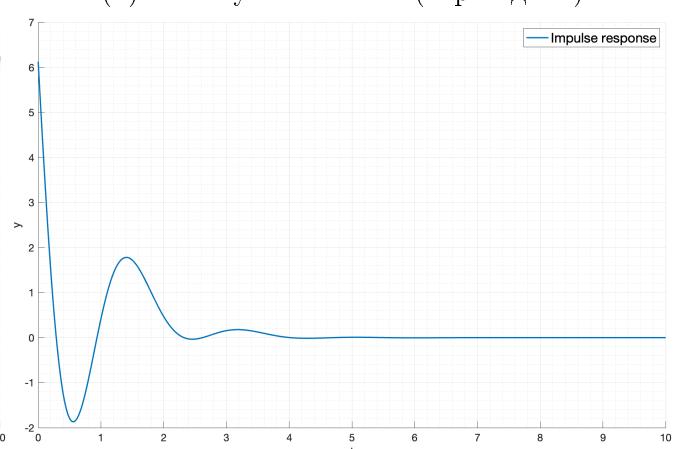
(a) Разомкнутая система (переходная)



(b) Замкнутая система (переходная)



(c) Замкнутая система (весовая)



(d) Замкнутая система (весовая)

Рис. 10: Переходные характеристики

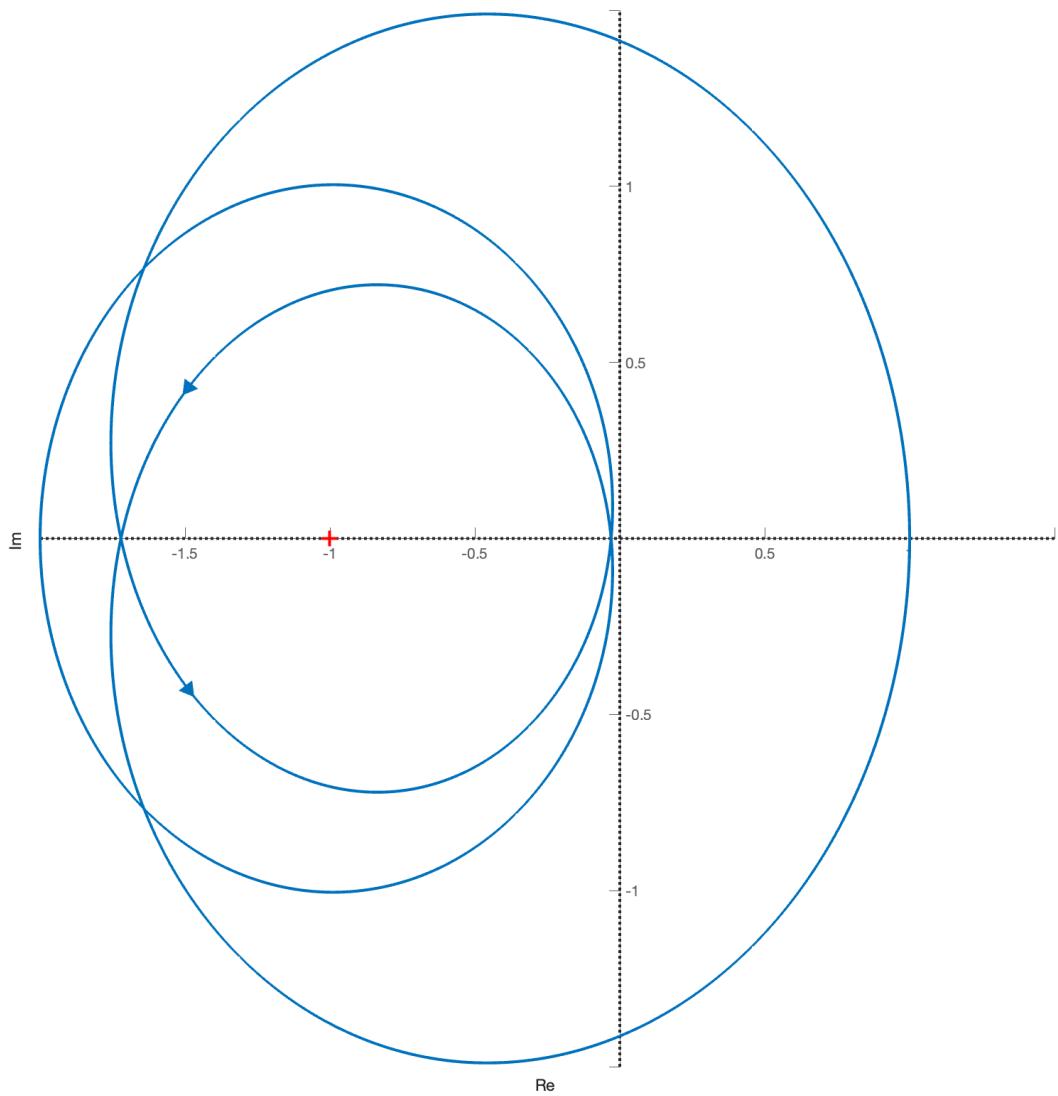


Рис. 11: Годограф Найквиста

#### 1.4. Вывод

Критерий Найквиста позволяет оценить устойчивость замкнутой системы, зная полюса разомкнутой системы и ее годограф или частотные характеристики, что было показано на примере трех систем.

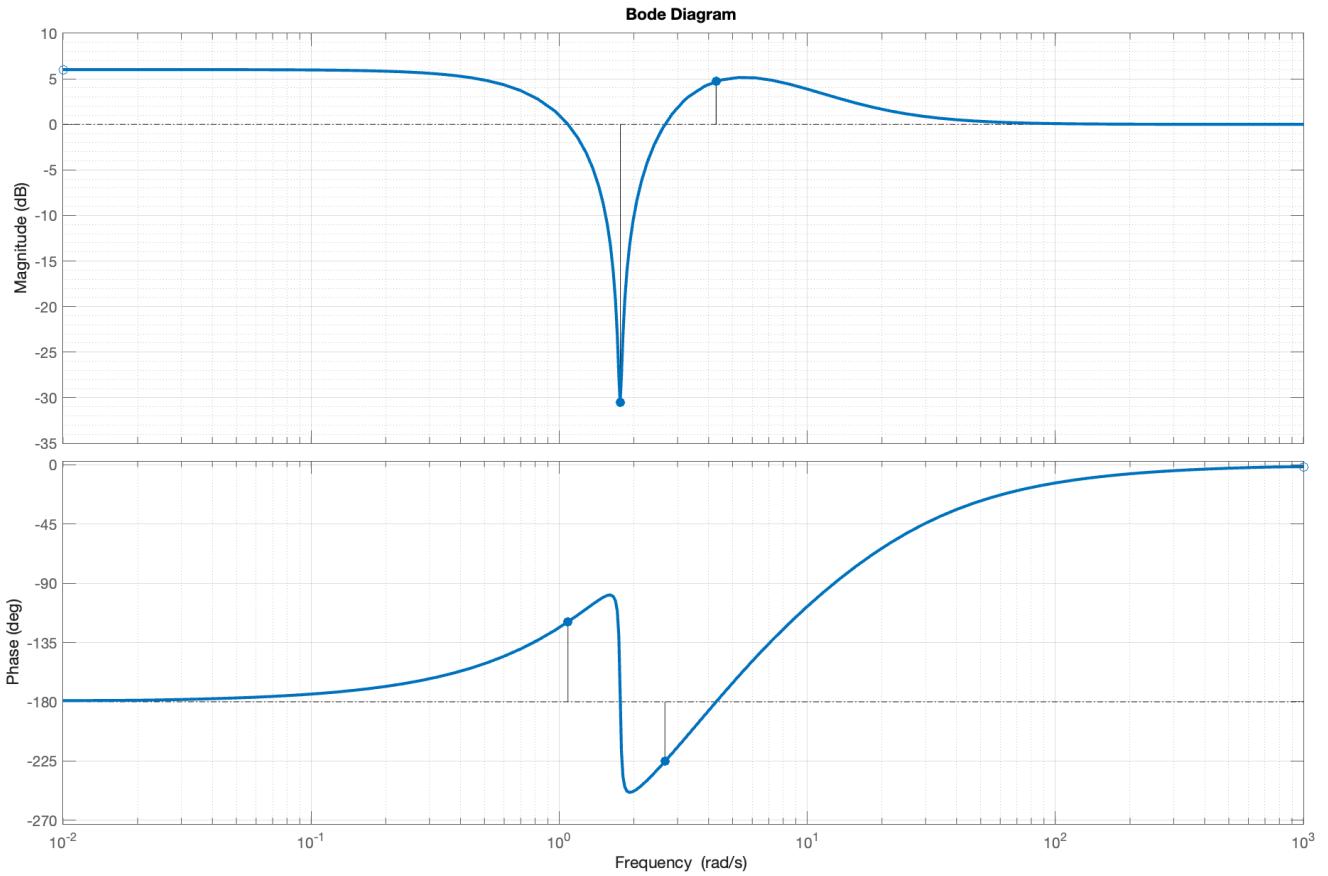


Рис. 12: ЛАФЧХ разомкнутой системы

## 2. Коэффициент усиления

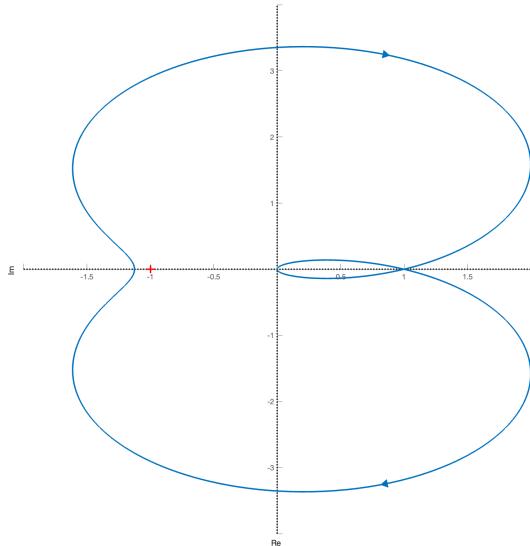
### 2.1. Система 1

Рассмотрим объект, заданный передаточной функцией:

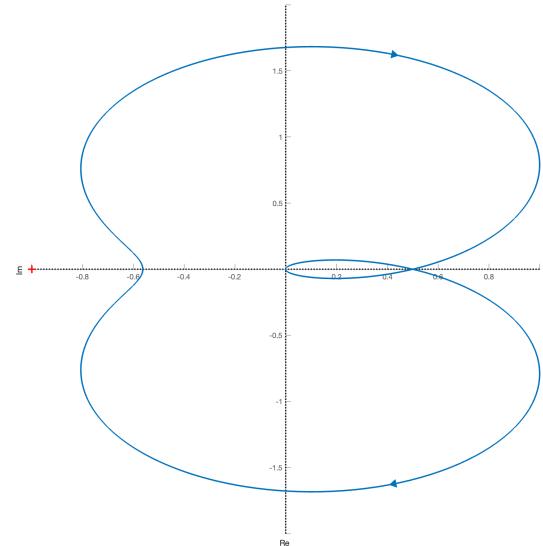
$$W_1(s) = \frac{K(s - 9)}{s^2 + s + 8} \quad (20)$$

Посмотрим годограф Найквиста для этой системы при различных значениях коэффициента усиления  $K$  (см. рис. 13).

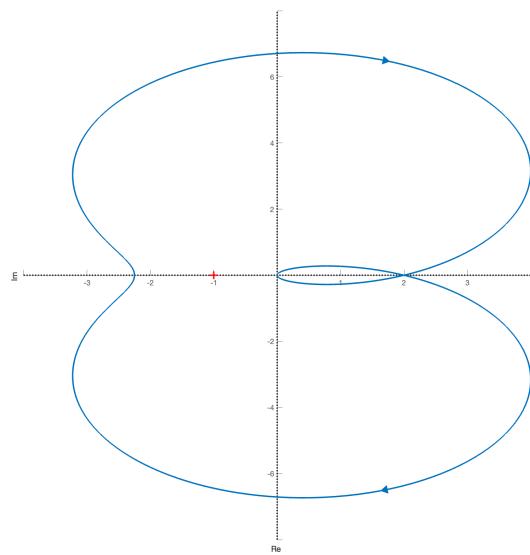
Видно, что при увеличении  $K$  годограф *растягивается* по горизонтали и вертикали, в какой-то момент задевая точку  $(-1, 0)$ . Отсюда можно сделать вывод, что значение коэффициента усиления  $K$  влияет на устойчивость системы.



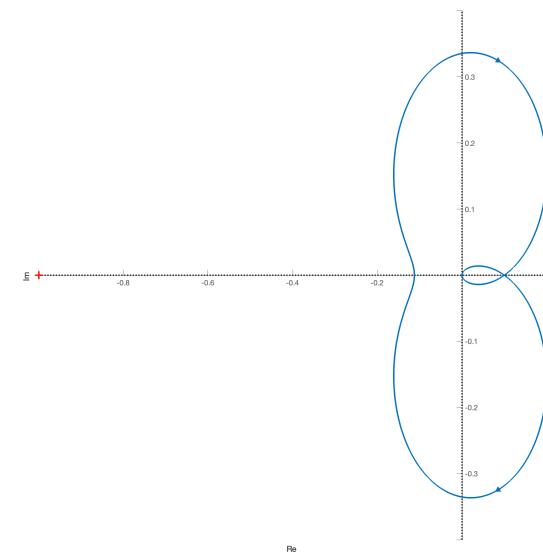
(a)  $K = 1$



(b)  $K = 0.5$



(c)  $K = 2$



(d)  $K = 0.1$

Рис. 13: Годограф Найквиста для различных значений коэффициента усиления  $K$

Разомкнутая система имеет полюса:

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{31}}{2}i \quad (21)$$

Таким образом, разомкнутая система является устойчивой.

Найдем передаточную функцию замкнутой системы:

$$W_{1c}(s) = \frac{K(s-9)}{s^2 + s + 8 + K(s-9)} = \frac{K(s-9)}{s^2 + (1+K)s + 8 - 9K} \quad (22)$$

Найдем полюса замкнутой системы:

$$s^2 + (1+K)s + 8 - 9K = 0 \\ s_{1,2} = \frac{-(1+K) \pm \sqrt{(1+K)^2 - 4(8-9K)}}{2} \quad (23)$$

При  $(1+K)^2 - 4(8-9K) <= 0$  в системе будут только устойчивые полюса, рассмотрим обратный случай: Данная система может иметь только один неустойчивый полюс:

$$(1+K)^2 - 4(8-9K) > 0 \\ (1+K) < \sqrt{(1+K)^2 - 4(8-9K)} \\ (1+K)^2 < (1+K)^2 - 4(8-9K) \\ (8-9K) < 0 \\ \Rightarrow K \in \left(\frac{8}{9}, +\infty\right) \quad (24)$$

Так как по условию  $K > 0$ , то замкнутая система будет устойчивой при  $K \in \left(0, \frac{8}{9}\right)$ .

Для нахождения запаса устойчивости по амплитуде построим АФЧХ замкнутой системы при  $K = 1$  (см. рис. 14).

График ФЧХ пересекает критический отрезок  $3\pi$  при частоте  $\omega_c = 0.55$ , при этом амплитуда при этой частоте равна 1.125. Таким образом, запас устойчивости по амплитуде равен

$$A_c = \frac{1}{A(\omega_c)} = \frac{1}{1.125} = \frac{8}{9} \quad (25)$$

что равно критическому значению коэффициента усиления. Так как полученное значение меньше единицы, запаса устойчивости нет.

Проведем моделирование замкнутой системы при различных значениях коэффициента усиления  $K$  (см. рис. 15 и 16).

При значениях  $K$  меньше критического значения  $8/9$  выход системы сходится к постоянной величине, при значениях  $K$  больше критического значения  $8/9$  выход системы расходится, а при значениях  $K$  равных критическому значению  $8/9$  выход убывает пропорционально времени.

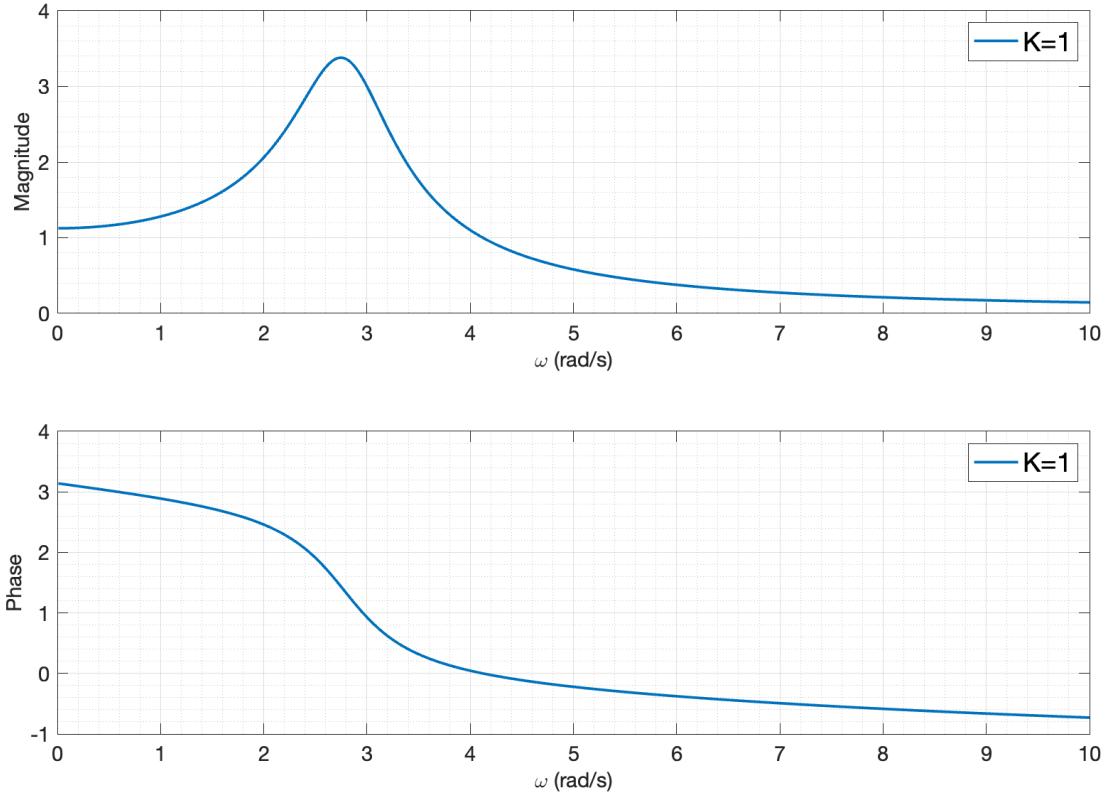


Рис. 14: АФЧХ замкнутой системы при  $K = 1$

## 2.2. Система 2

Рассмотрим объект, заданный передаточной функцией:

$$W_2(s) = \frac{K(-80s^3 + 80s^2 + 3s - 0.04)}{100s^3 - 20s^2 - 2s + 0.3} \quad (26)$$

Построим годограф Найквиста для этой системы при различных значениях коэффициента усиления  $K$  (см. рис. 21).

Как и в прошлом случае, видно, что при увеличении значения коэффициента усиления  $K$  годограф *растягивается* по горизонтали и вертикали, при  $K$  больших 0.75 задевая точку  $(-1, 0)$ , делая два оборота против часовой стрелки вокруг нее, таким образом, компенсируя неустойчивость разомкнутой системы. При значениях  $K$  более 1.25, где другая часть годографа задевает точку  $(-1, 0)$ , в итоге оставляя только один оборот против часовой стрелки вокруг нее. Таким образом, при  $K > 1.25$  система становится неустойчивой с одним полюсом с положительной вещественной частью. При значениях  $K$  более 7.5 годограф вновь перестает задевать точку  $(-1, 0)$ , в системе снова появляются два неустойчивых полюса.

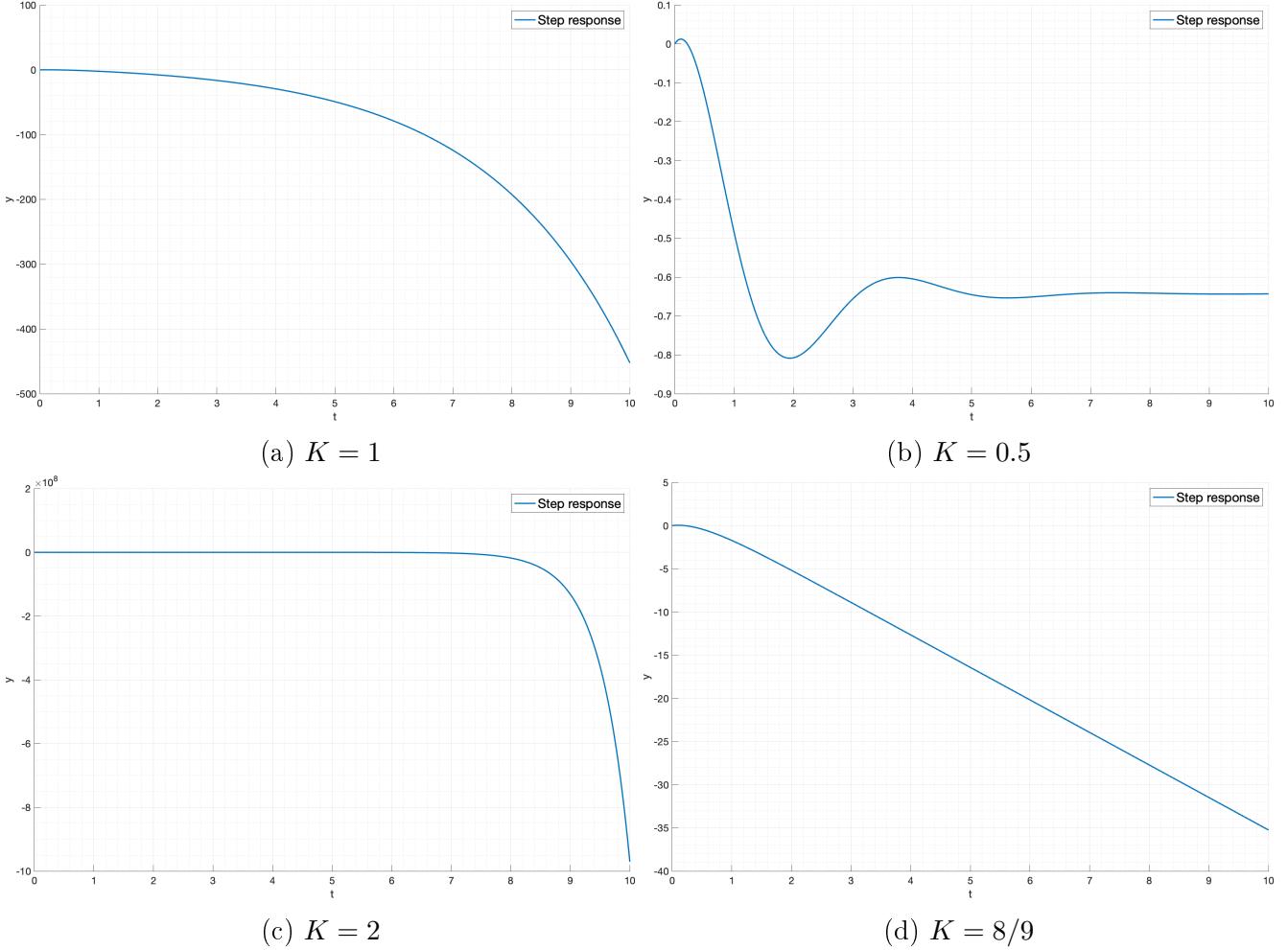


Рис. 15: Переходная характеристика замкнутой системы при различных значениях коэффициента усиления  $K$

Разомкнутая система имеет полюса:

$$s_1 \approx -0.13 \quad s_2 \approx 0.1 \quad s_3 \approx 0.23 \quad (27)$$

Разомкнутая система не является устойчивой, так как имеет два полюса с положительной вещественной частью.

Передаточная функция замкнутой системы:

$$W_{2c}(s) = \frac{K(-80s^3 + 80s^2 + 3s - 0.04)}{(100 - 80K)s^3 + (-20 + 80K)s^2 + (-2 + 3K)s + 0.3 - 0.04K} \quad (28)$$

Найдем значения коэффициента усиления  $K$ , при которых замкнутая система будет

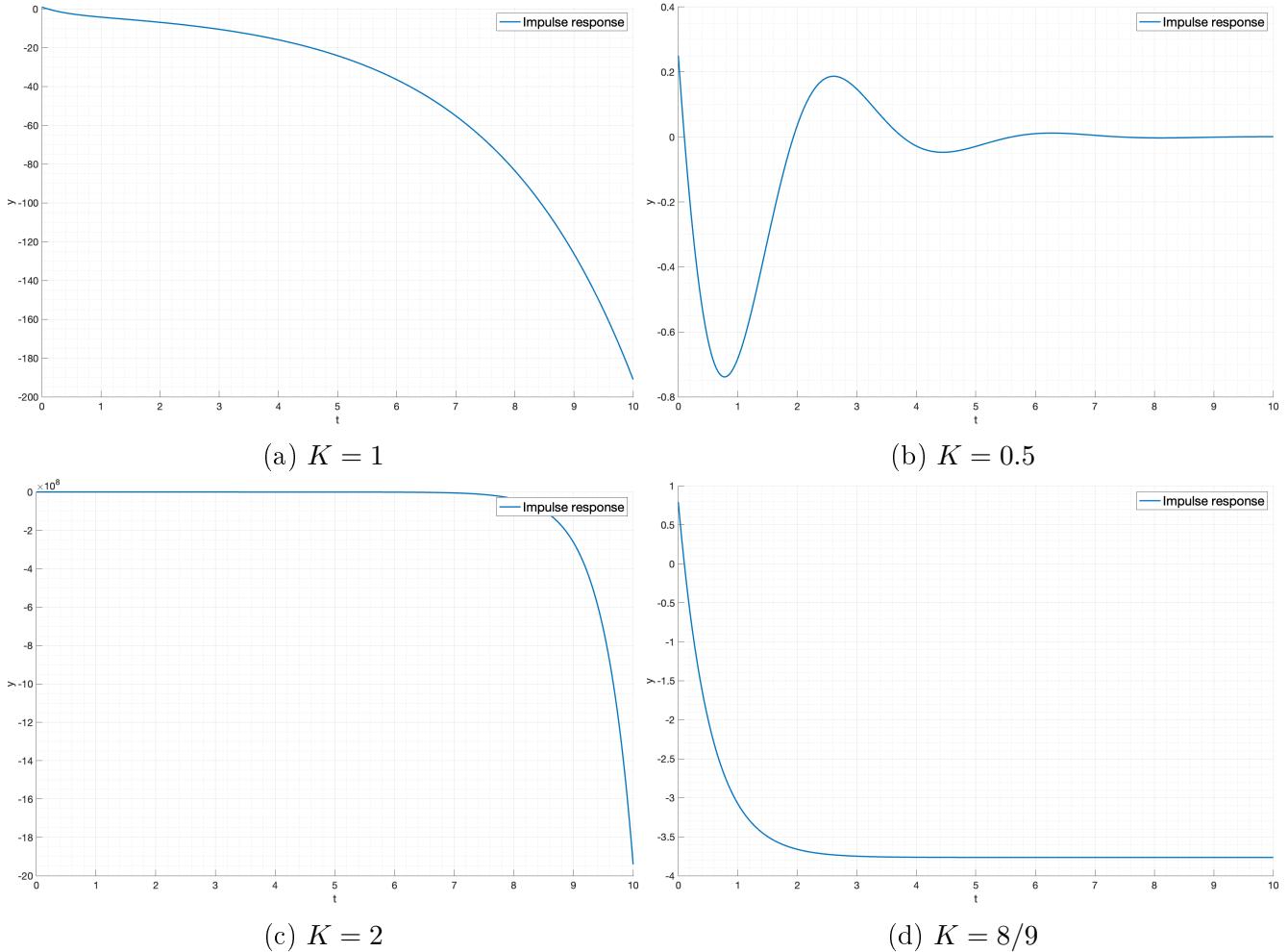


Рис. 16: Импульсная характеристика замкнутой системы при различных значениях коэффициента усиления  $K$

устойчивой согласно следствию из критерия Гурвица для систем третьего порядка:

$$\begin{cases} 100 - 80K > 0 \\ -20 + 80K > 0 \\ -2 + 3K > 0 \\ 0.3 - 0.04K > 0 \\ (-20 + 80K)(-2 + 3K) - (100 - 80K)(0.3 - 0.04K) > 0 \end{cases} \Rightarrow K \in \left( \frac{1}{148}(60 - 5\sqrt{107}), \frac{5}{4} \right) \approx (0.75, 1.25) \quad (29)$$

Таким образом, замкнутая система будет устойчивой при  $K \in (0.75, 1.25)$ . Годограф

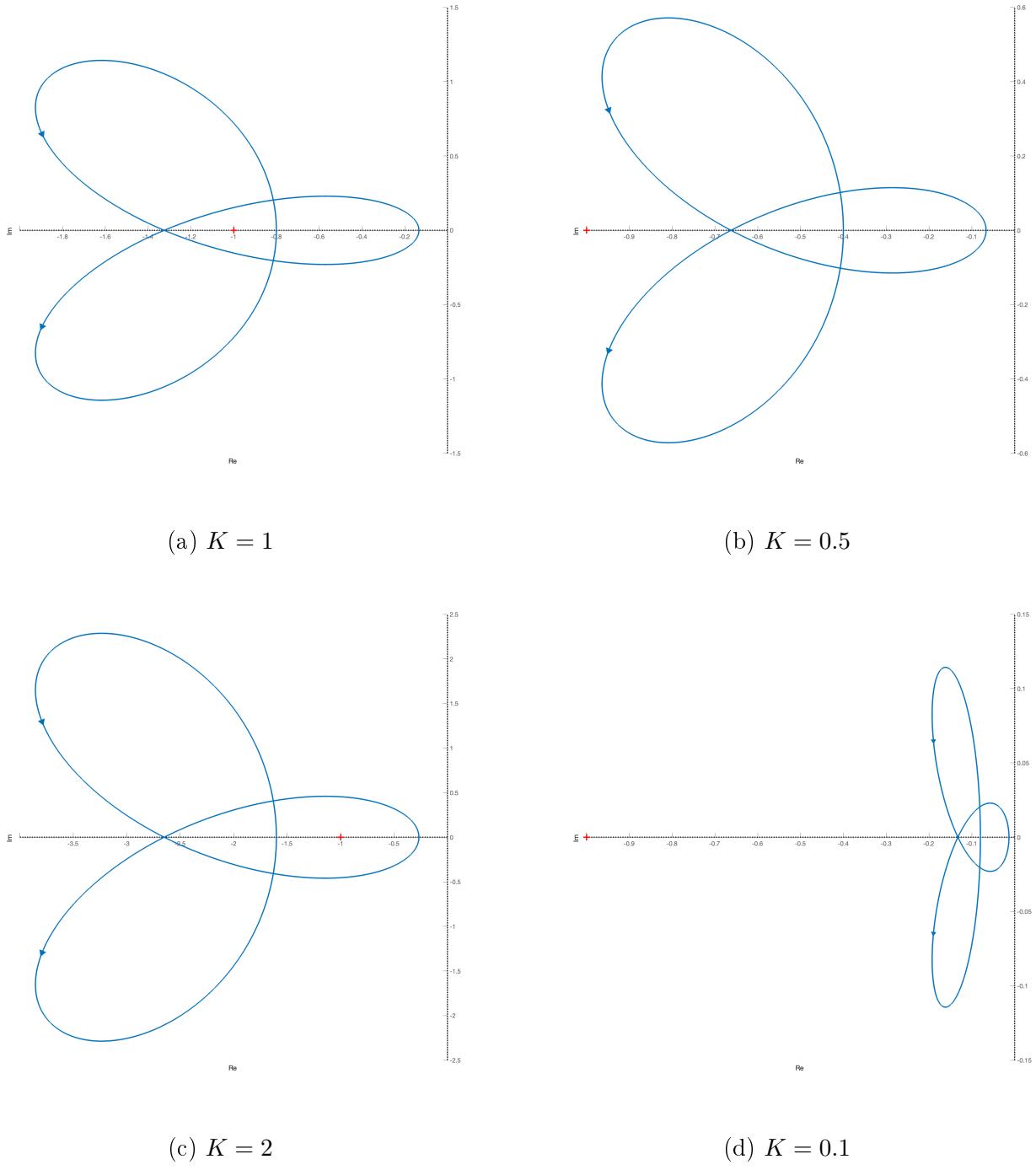


Рис. 17: Годограф Найквиста для различных значений коэффициента усиления  $K$

Найквиста при критических значениях коэффициента усиления  $K = 0.75$ ,  $K = 1.25$  и  $K = 7.5$  представлен на рис. 18.

Проведем моделирование замкнутой системы при различных значениях коэффициента усиления  $K$  (см. рис. 19 и 20).

Теоретические результаты совпадают с результатами моделирования: система устойчива при  $K \in (0.75, 1.25)$ ,

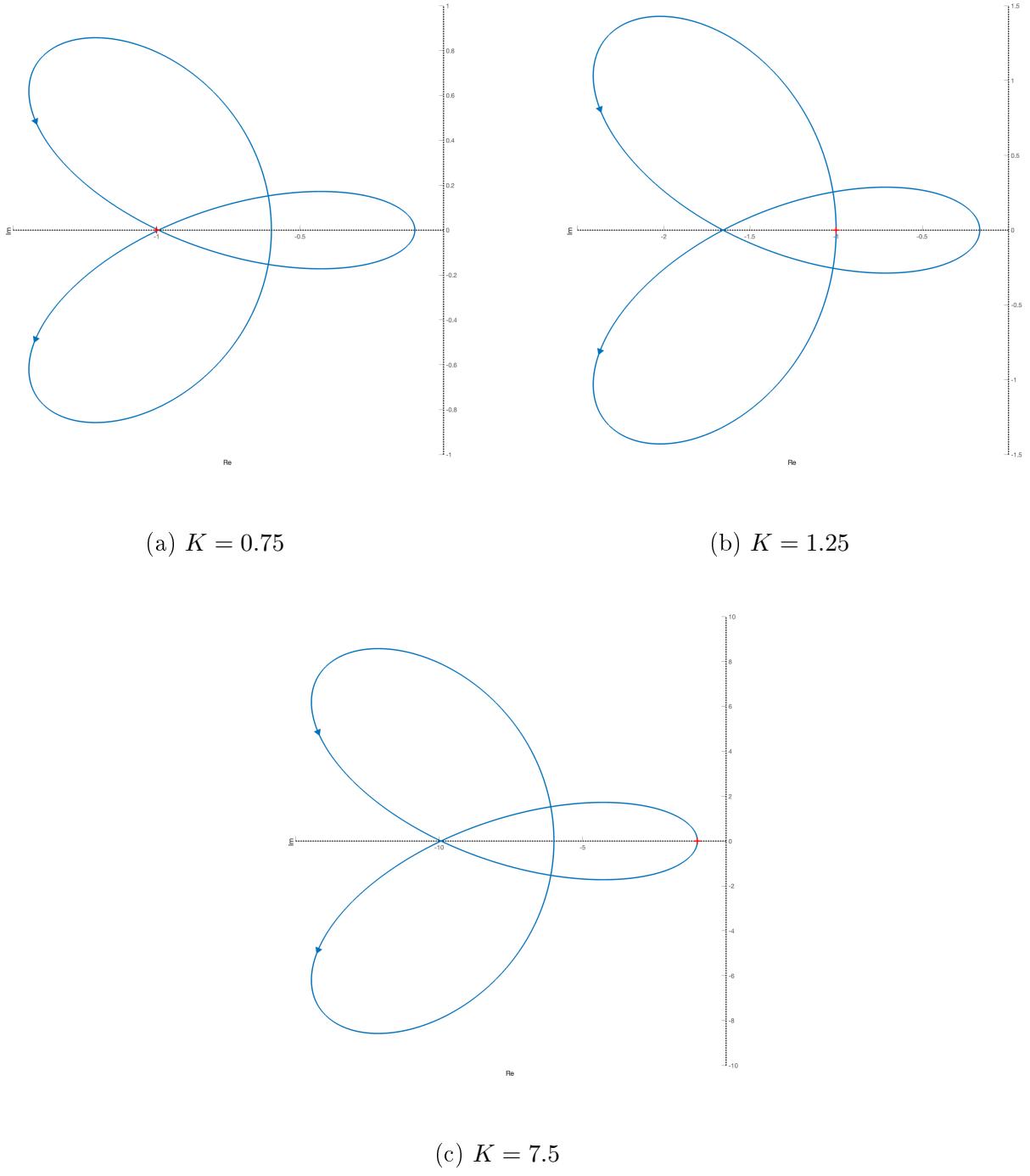


Рис. 18: Годограф Найквиста для критических значений коэффициента усиления  $K$

Найдем запас устойчивости по амплитуде для системы при  $K = 1$ . Для этого воспользуемся годографом Найквиста (см. рис. 21). Исходя из предыдущих вычислений и симуляции, можно понять, что система будет устойчива тогда, когда годограф делает ровно два оборота вокруг точки  $(-1, 0)$  против часовой стрелки. Таким образом, есть две критические зоны:

$$A_1 = 0.8 \quad A_2 \approx 1.33 \quad (30)$$

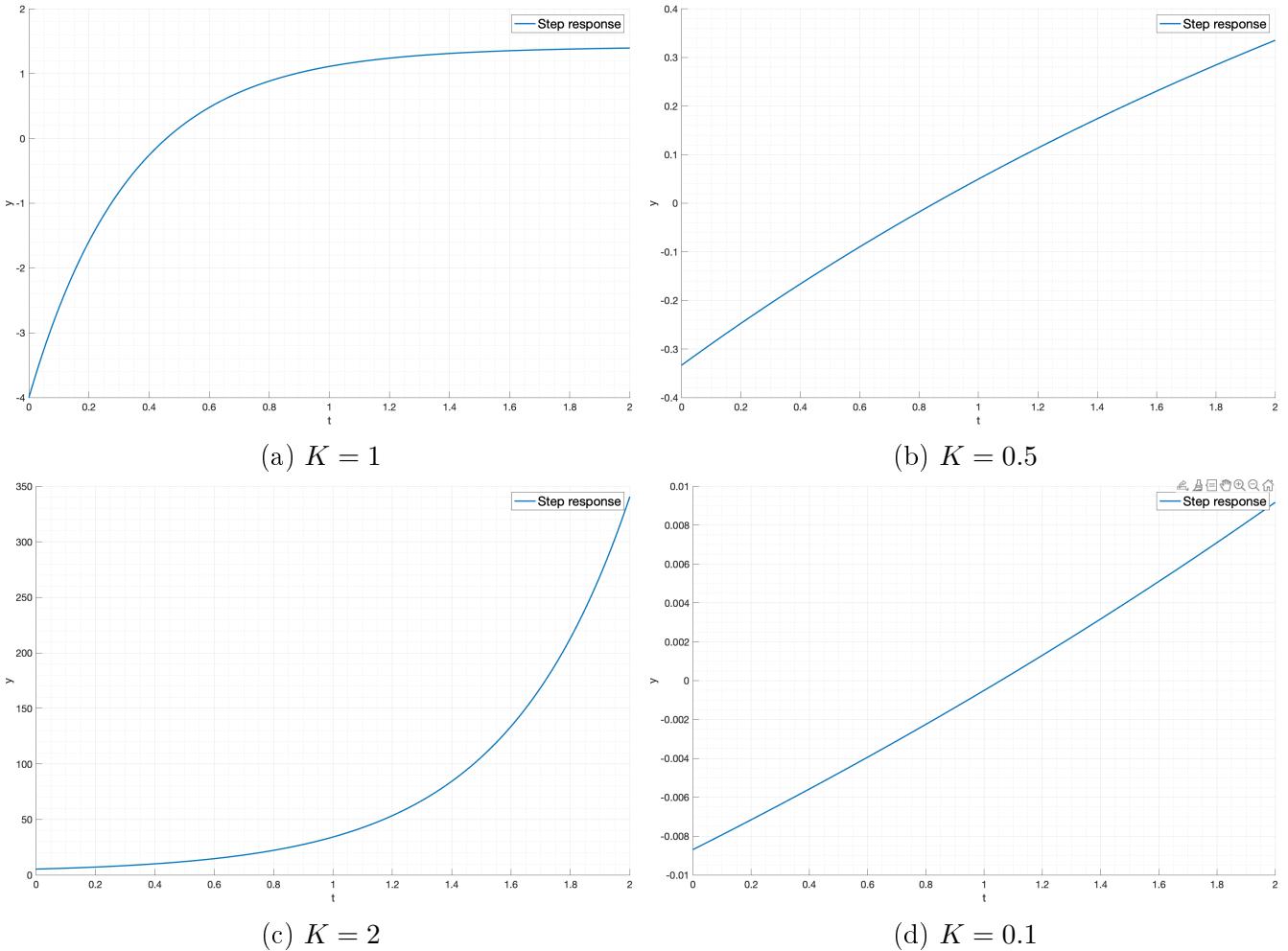


Рис. 19: Переходная характеристика замкнутой системы при различных значениях коэффициента усиления  $K$

Согласно этому:

$$A_{c1} = \frac{1}{A_1} = \frac{1}{0.8} = 1.25 \quad A_{c2} = \frac{1}{A_2} = \frac{1}{1.33} \approx 0.75 \quad (31)$$

Таким образом, запас устойчивости по амплитуде равен 1.25. Что совпадает с результатами, полученными ранее.

### 2.3. Вывод

В данном разделе были рассмотрены две системы, заданные передаточными функциями. Были построены голографы Найквиста для различных значений коэффициента усиления  $K$ . Были найдены значения коэффициента усиления, при которых замкнутая система будет устойчивой с помощью анализа полюсов передаточной функции. Были найдены запасы устойчивости по амплитуде для каждой системы при помощи голографа Найквиста и АФЧХ. Критические значения для обоих способов совпали.

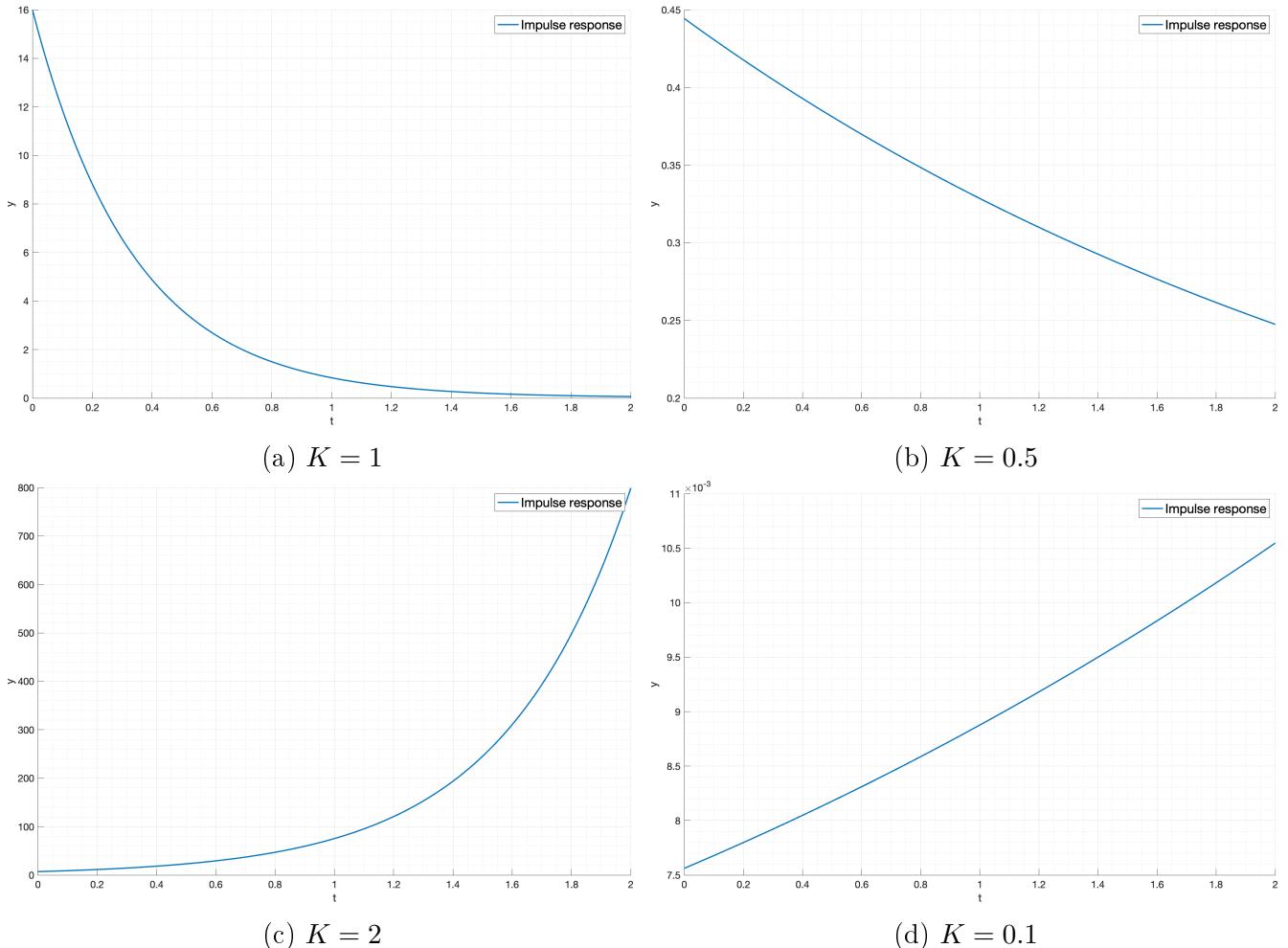


Рис. 20: Импульсная характеристика замкнутой системы при различных значениях коэффициента усиления  $K$

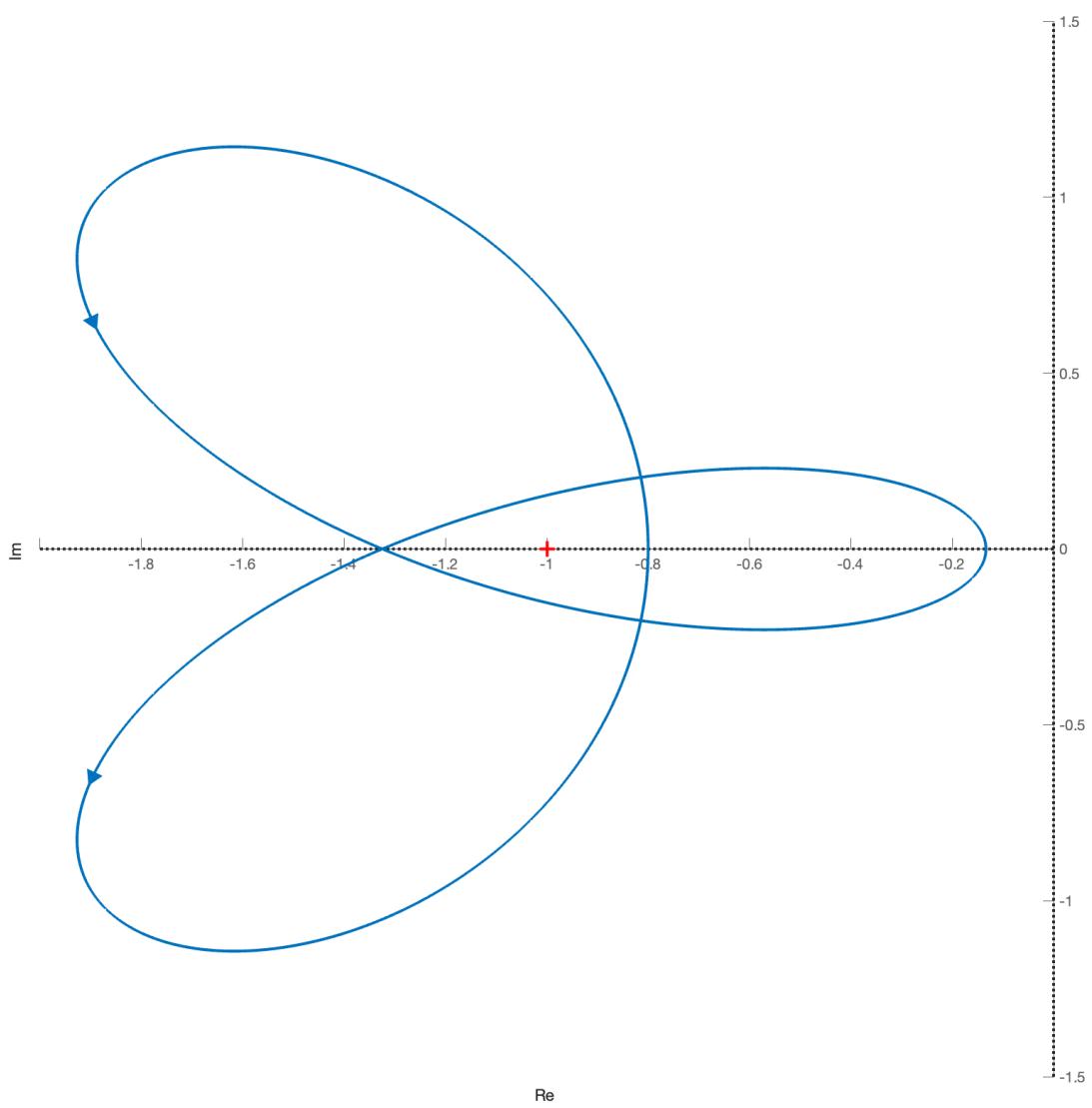


Рис. 21: Годограф Найквиста для  $K = 1$

### 3. Система с запаздыванием

#### 3.1. Система 1

Рассмотрим систему, заданную передаточной функцией:

$$W_1(s) = \frac{9s + 2}{s^2 + 6s + 1} e^{-\tau s} \quad (32)$$

Разомкнутая система умеет два устойчивых полюса:

$$s_{1,2} = -3 \pm 2\sqrt{2} \quad (33)$$

Построим годограф Найквиста для системы при различных значениях  $\tau$  (рис. 22). Видно, что при увеличении запаздывания  $\tau$  годограф закручивается вокруг начала координат сильнее. Начиная с какого-то значения  $\tau$  годограф начинает оборачиваться вокруг точки  $(-1, 0)$  по часовой стрелке, делая тем самым систему неустойчивой. Число оборотов растет с увеличением  $\tau$ .

Найдем передаточную функцию замкнутой системы:

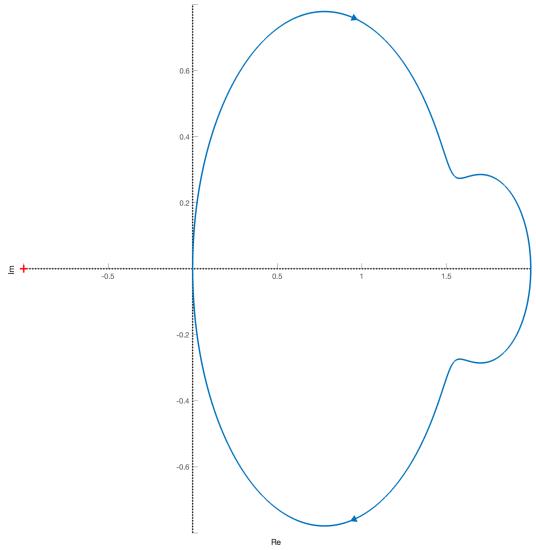
$$W_{1c}(s) = \frac{9s + 2}{s^2 + 6s + 1 + (9s + 2)e^{-\tau s}} e^{-\tau s} = \frac{9s + 2}{s^2 + (6 + 9e^{-\tau s})s + 1 + 2e^{-\tau s}} e^{-\tau s} \quad (34)$$

Построим ЛАФЧХ разомкнутой системы при  $\tau = 0$  (рис. 23). АЧХ равно единице при частоте  $\omega_A = 6.86$ , при этом фаза  $\approx -50^\circ$ . Таким образом, запас устойчивости по фазе будет равен  $130^\circ = \frac{13}{18}\pi$ . Найдем критическое значение  $\tau$  при котором система станет неустойчивой:

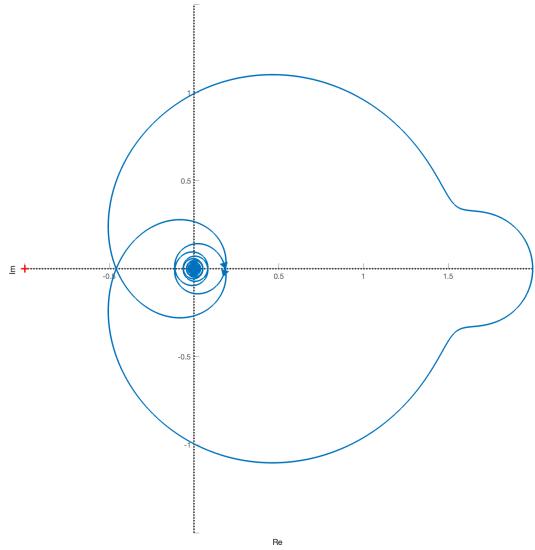
$$\tau_c = \frac{13\pi}{18 \cdot 6.86} \approx 0.33s \quad (35)$$

Графики переходных процессов замкнутой системы для различных значений  $\tau$  представлены на рис. 24.

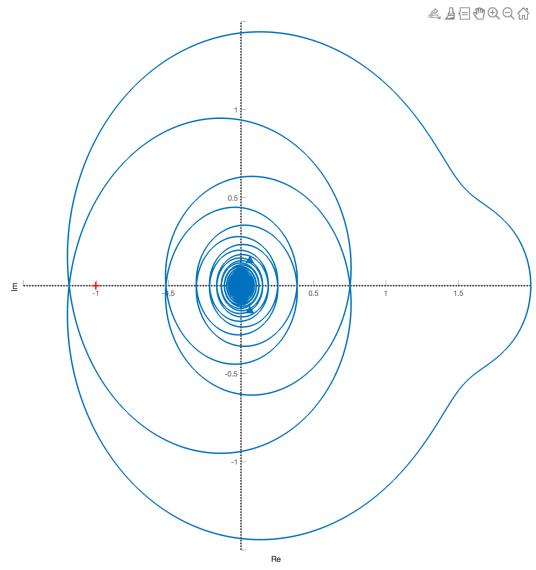
Видно, что при запаздывании более  $0.33s$  система становится неустойчивой.



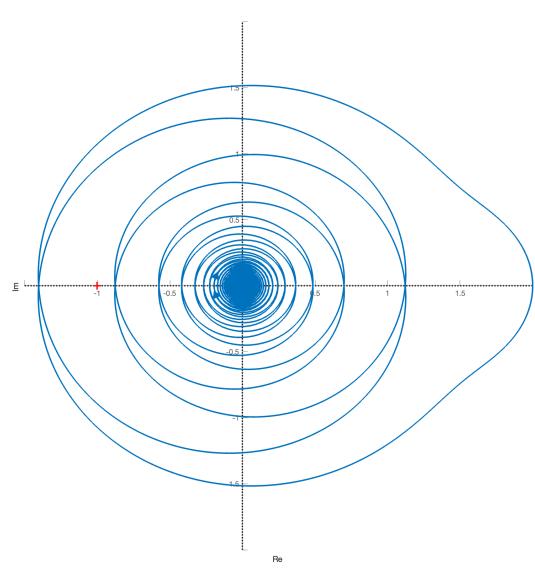
(a)  $\tau = 0$



(b)  $\tau = 0.1$



(c)  $\tau = 0.5$



(d)  $\tau = 1$

Рис. 22: Годограф Найквиста для системы 1

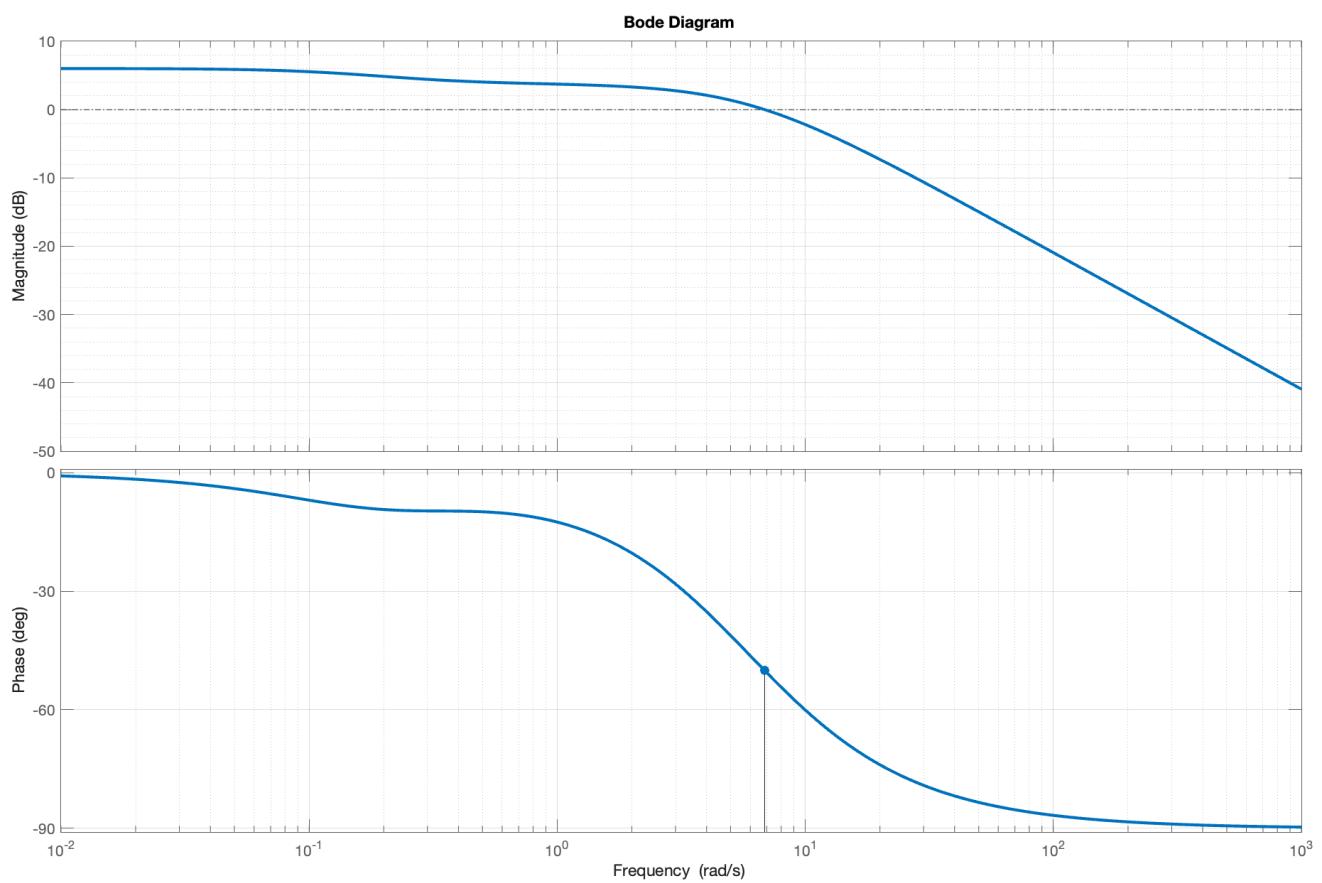


Рис. 23: ЛАФЧХ разомкнутой системы 1 при  $\tau = 0$

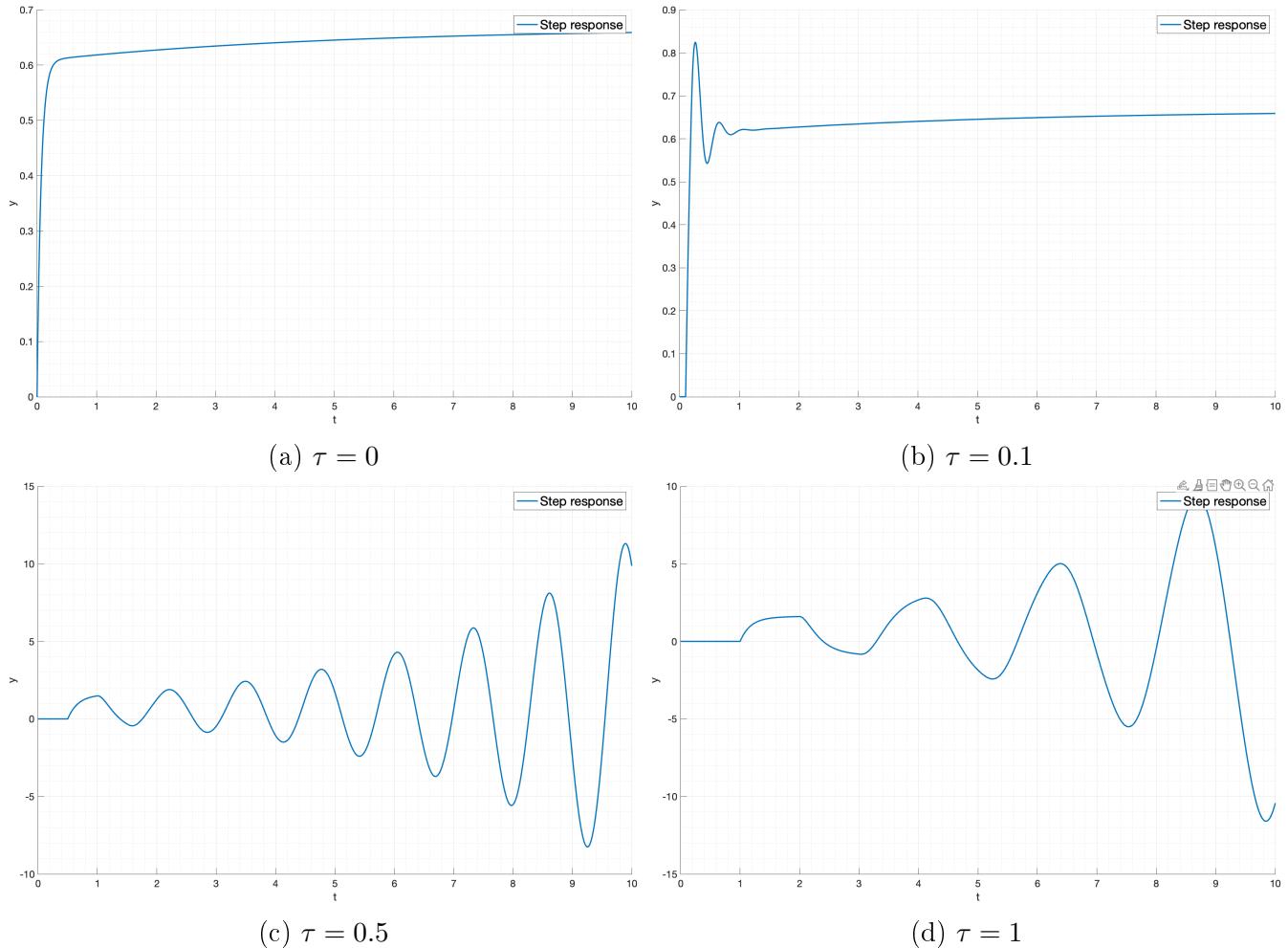


Рис. 24: Переходные процессы для системы 1

### 3.2. Система 2

Рассмотрим систему, заданную передаточной функцией:

$$W_2(s) = \frac{8s^2 + 4s + 2.4}{10s^2 - 5s + 11} e^{-\tau s} \quad (36)$$

Разомкнутая система имеет два неустойчивых полюса:

$$s_{1,2} = \frac{1}{4} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\frac{83}{5}} i \quad (37)$$

Построим годограф Найквиста для системы при различных значениях  $\tau$  (рис. 25). Как и в предыдущем случае, при увеличении запаздывания  $\tau$  годограф закручивается вокруг начала координат сильнее.

Найдем передаточную функцию замкнутой системы:

$$W_{2c}(s) = \frac{8s^2 + 4s + 2.4}{(10 + 8e^{-\tau s})s^2 + (-5 + 4e^{-\tau s})s + 11 + 2.4e^{-\tau s}} e^{-\tau s} \quad (38)$$

Построим ЛАФЧХ разомкнутой системы при  $\tau = 0$  (рис. 26).

Так как разомкнутая система имеет два неустойчивых полюса, нам нужно, чтобы сумма положительных и отрицательных переходов через критический отрезок была равна 1. На графике видно, что нужных (при  $A > 0$ ) переходов нет. Таким образом, замкнутая система будет неустойчивой. У системы нет запаса устойчивости по фазе.

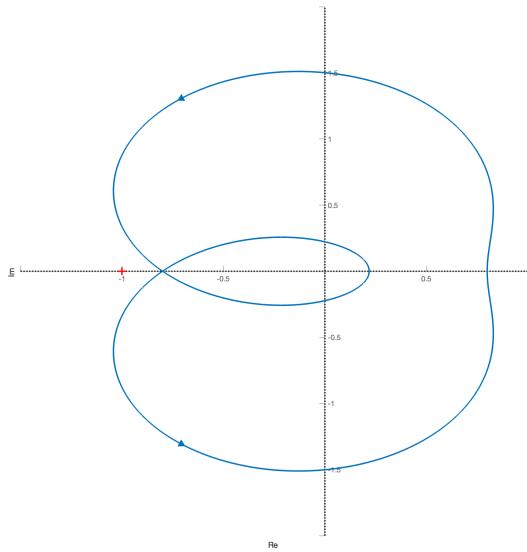
Найдем критическое запаздывание:

$$w_{c1} = 0.89 \quad w_{c2} = 2 \quad (39)$$

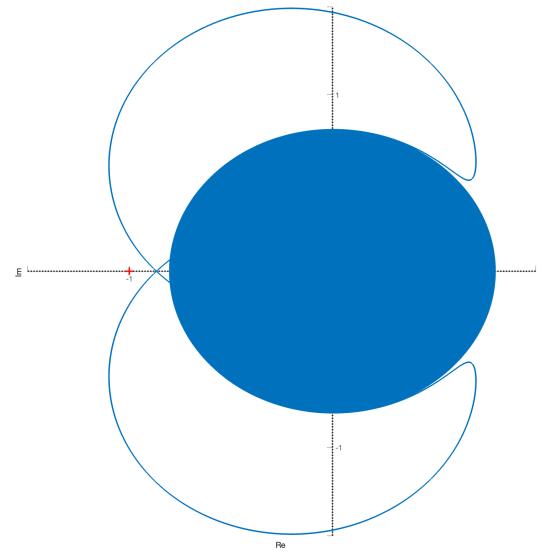
При этом запасы по фазе будут равны  $14.6^\circ = \frac{73}{900}\pi$  и  $146^\circ = \frac{73}{90}\pi$  соответственно. Найдем критические значение  $\tau$ :

$$\tau_{c1} = \frac{73\pi}{900 \cdot 0.89} \approx 0.29s \quad \tau_{c2} = \frac{73\pi}{90 \cdot 2} \approx 1.28s \quad (40)$$

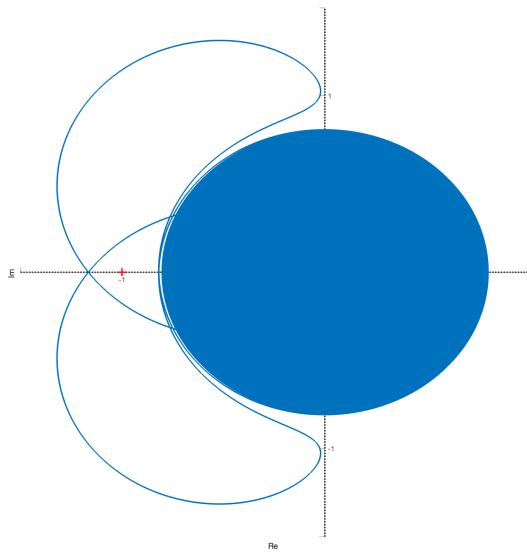
Отсюда следует, что система будет устойчива при  $\tau \in (0.29, 1.28)$ .



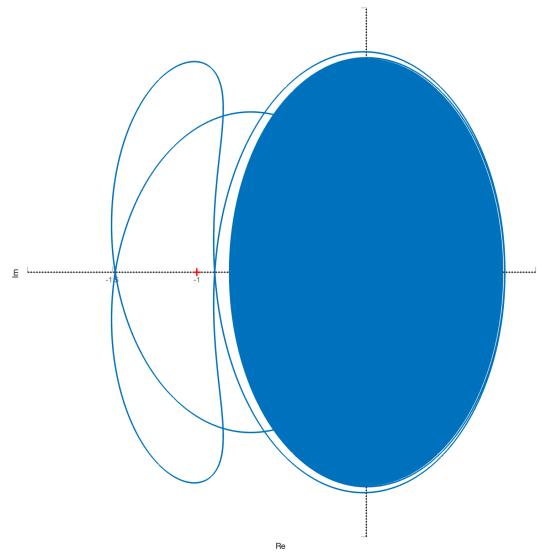
(a)  $\tau = 0$



(b)  $\tau = 0.1$



(c)  $\tau = 0.5$



(d)  $\tau = 1$

Рис. 25: Годограф Найквиста для системы 2

Графики переходных процессов замкнутой системы для различных значений  $\tau$  представлены на рис. 27.

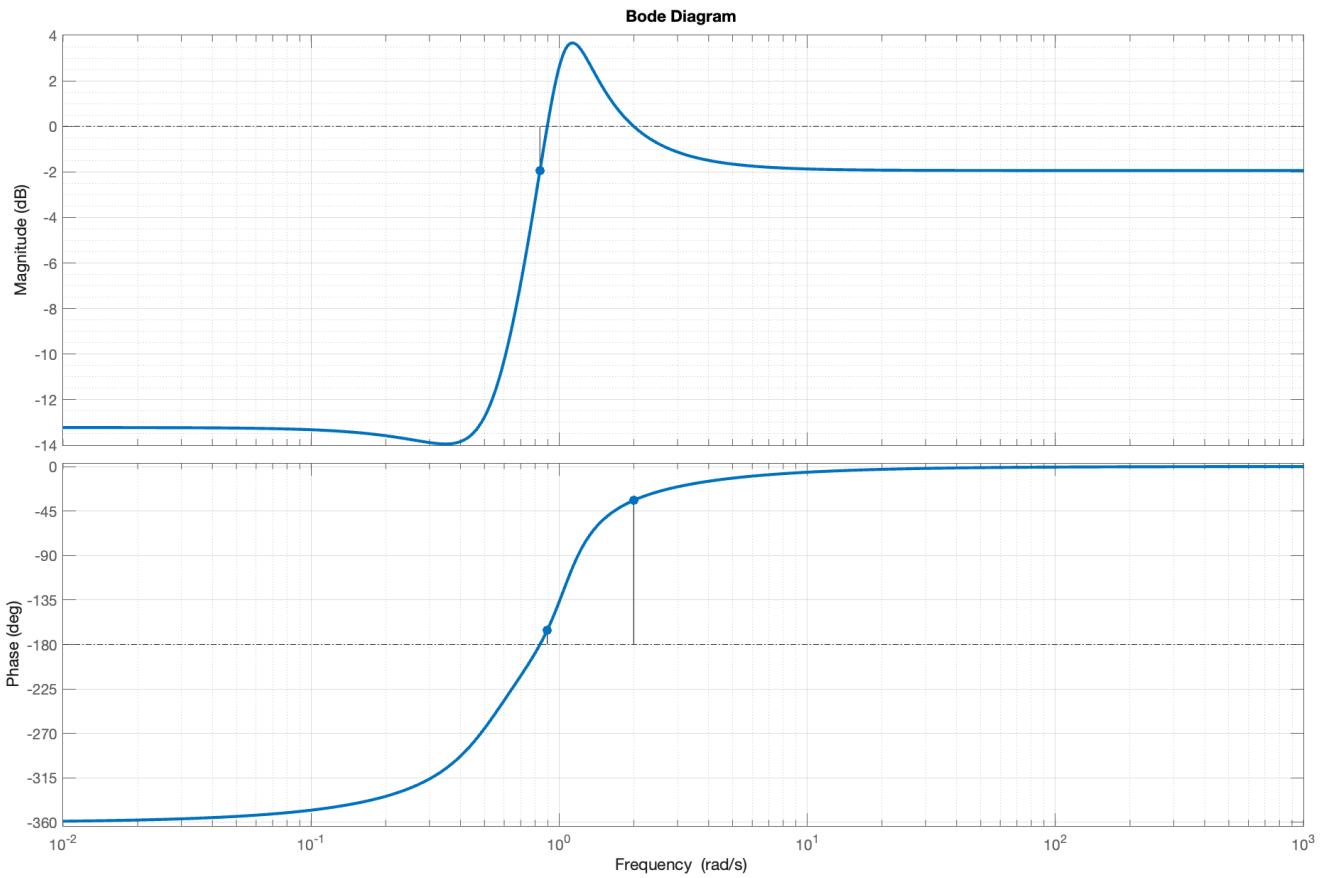


Рис. 26: ЛАФЧХ разомкнутой системы 2 при  $\tau = 0$

### 3.3. Вывод

В данном разделе были рассмотрены системы с запаздыванием. Теоретические рассуждения о критических значениях запаздывания подтвердились на практике, полученных с помощью логарифмических частотных характеристик и годографа Найквиста критические значения запаздывания совпали с практическими.

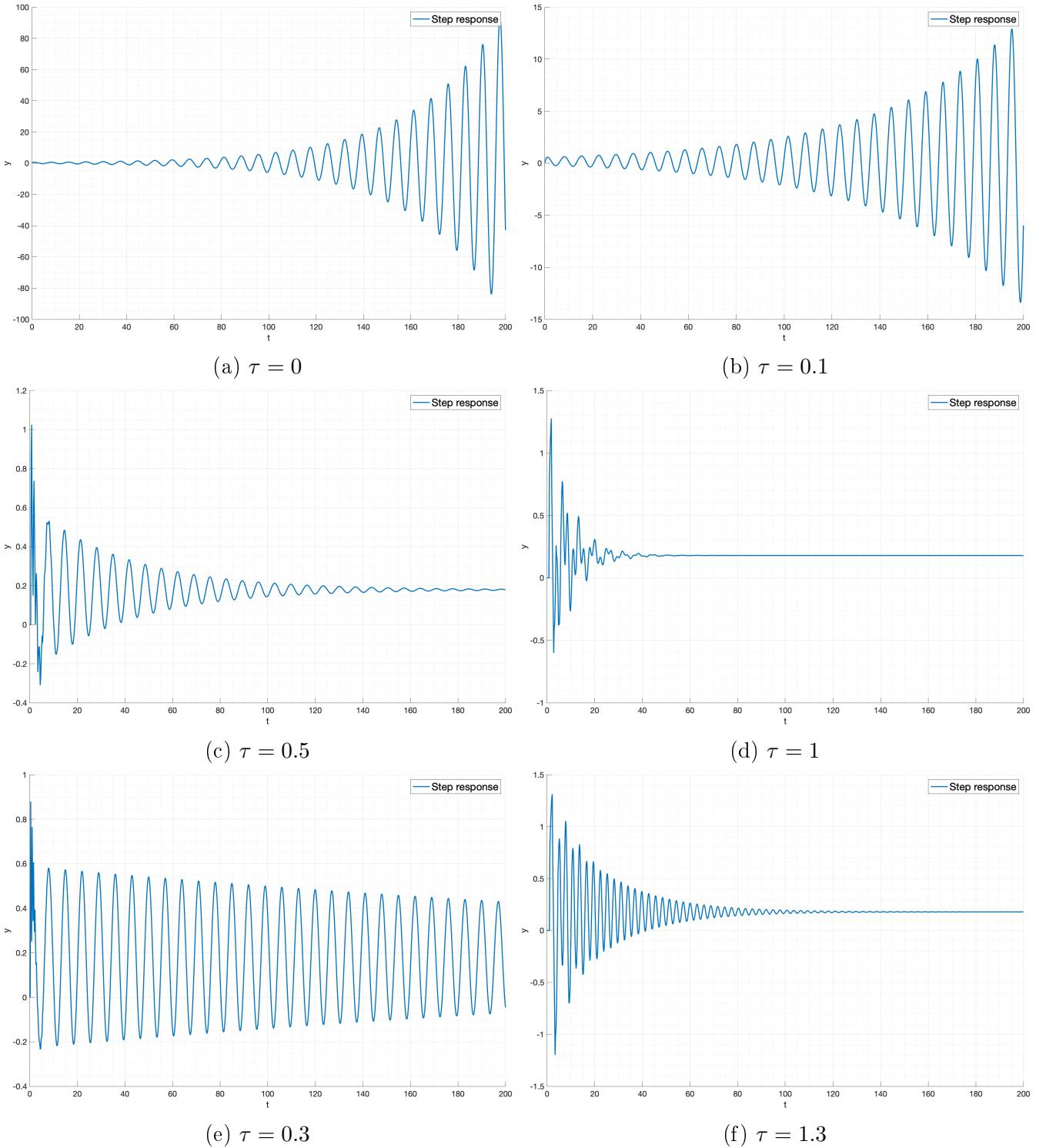


Рис. 27: Переходные процессы для системы 2

## 4. Вывод

В данной работе были исследованы критерий Найквиста и логарифмический критерий Найквиста. В первых двух заданиях ожидания о устойчивости системы исходя из аналитического анализа ее передаточных функций совпали с результатами, полученными с помощью критерия Найквиста и подтвердились моделированием. В третьем задании

проанализировать устойчивость системы с запаздыванием удалось с помощью логарифмического критерия Найквиста. Все результаты совпали с ожиданиями.