Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ»
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Институт № 2 «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки»
Кафедра 202 «Ракетные двигатели»

КУРСОВАЯ РАБОТА
по дисциплине «Автоматика и регулирование ЖРДУ»

Анализ динамики процессов в гидромагистрали с учетом внешних колебаний и работы демпфера

Выполнил	____________	студент 5 курса группы М2О-504С-19	Гунин Филипп Алексеевич
Проверил	____________	Доктор технических наук Профессор	Мартиросов Давид Суренович

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дана расчетная схема гидромагистрали, представленная на рисунке 1.1. Гидромагистраль представляет собой три трубопровода, по которым течет жидкость, и соединяющую их полость с установленным в ней демпфером. За демпфер принимается полость с газом, отделенным от жидкости идеальной мембраной.

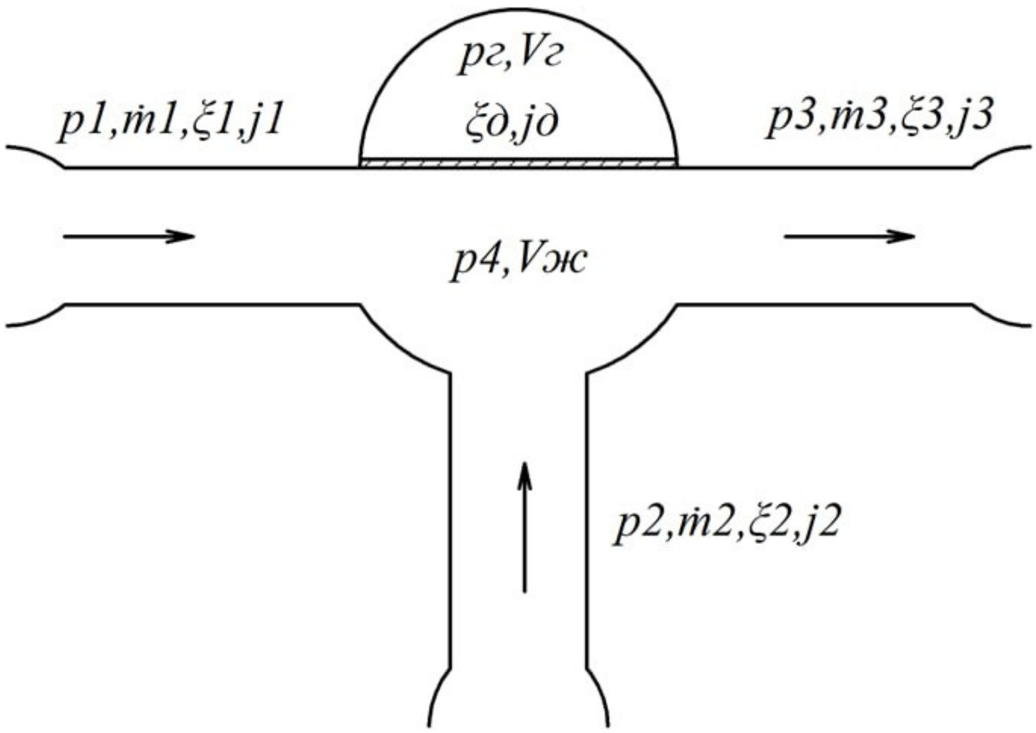

Рис. 1.1 – Расчетная схема гидромагистрали

1.1 Задание

Необходимо составить математическую модель работы гидромагистрали, и на ее основе решить следующие задачи:

а) задавшись возмущением p_2, изучить его влияние в гидромагистрали с демпфером на величины p_4, $V_д$, $\dot{m}_1$, $\dot{m}_2$, $\dot{m}_3$ и $\dot{m}_д$;

б) задавшись возмущением p_2, изучить его влияние в гидромагистрали без демпфера на величины p_4, $V_д$, $\dot{m}_1$, $\dot{m}_2$, $\dot{m}_3$ и $\dot{m}_д$;

в) построить амплитудно-частотную характеристику $W = \frac{p_4}{p_2}$.

1.2 Исходные данные

Исходные данные представлены в таблице 1.1, а в таблице 1.2 представлены значения параметров системы.

Таблица 1.1 – Исходные установки

Параметр	**Значение**
Рабочая жидкость	Керосин
Демпфирующий газ	Гелий
Возмущение	Импульсное

Таблица 1.2 – Параметры системы

Группа параметров	**Параметр**	**Значение**	**Размерность**
Давления в трубопроводах	p_1	0.4	МПа
	p_{2_0}	0.3	
	p_3	0.1	
Коэффициенты инерционности	$j_{1,2,3}$	400	$\frac{1}{\text{м}}$
	$j_{\text{д}}$	20	
Коэффициенты гидросопротивления	$\xi_{1,2,3,\text{д}}$	1000	$\frac{1}{\text{кг}\cdot\text{м}}$
Объём проточной области	$V_{\text{ж}_0}$	0.004	м^3
Объём газа	$V_{\text{г}_0}$	0.003	м^3
Температура газа	$T_{\text{г}_0}$	293	K

2 РЕШЕНИЕ

2.1 Решение стационарной задачи

Для решения динамической задачи необходимо получить некоторые параметры потока на стационарном режиме. Для этого нужно решить стационарную задачу. Запишем её в виде системы уравнений

$$\begin{cases} \dot{m}_{1_0} + \dot{m}_{2_0} - \dot{m}_{3_0} = 0, \\ p_{4_0} - p_{\text{г}_0} = 0, \\ p_{1_0} - p_{4_0} - \xi_1 \dot{m}_{1_0}^2 = 0, \\ p_2 - p_{4_0} - \xi_2 \dot{m}_{2_0}^2 = 0, \\ p_{4_0} - p_3 - \xi_3 \dot{m}_{3_0}^2 = 0. \end{cases} \tag{2.1}$$

Решив систему уравнений, получим

$$\begin{cases} \dot{m}_{1_0} = 10.515, \\ \dot{m}_{2_0} = 3.249, \\ \dot{m}_{3_0} = 13.764, \\ p_{4_0} = 289442.719, \\ p_{\text{г}_0} = 289442.719. \end{cases} \tag{2.2}$$

Посчитаем массу газа по уравнению состояния. Запишем уравнение состояния газа

$$\rho_{\text{г}} = \frac{p_{\text{г}_0}}{R_{\text{г}} \cdot T_{\text{г}}} = 0.476, \tag{2.3}$$

где $R_{\text{г}} = \frac{R}{M_{\text{г}}} = \frac{8.314}{0.004026} = 2077.149$, а масса газа тогда будет равна

$$m_{\text{г}} = \rho_{\text{г}} \cdot V_{\text{г}_0} = 0.001 \text{ кг}. \tag{2.4}$$

Решение стационарной задачи было произведено численным методом. Программный код расчета, написанный на языке программирования python, представлен в приложении.

2.2 Решение динамической задачи с демпфером

2.2.1 Определение математической модели

Запишем математическую модель для динамической системы с демпфером в виде следующей системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}p_4 = \frac{(\dot{m}_1+\dot{m}_2-\dot{m}_3-\dot{m}_д)}{\frac{V_{ж0}+V_д}{c^2}}, \\ \frac{d}{dt}V_д = \frac{\dot{m}_д}{\rho_ж}, \\ \frac{d}{dt}m_д = \frac{\left[p_4-\frac{m_г}{V_{г0}-V_д}\cdot R\cdot\left[T_{г0}\cdot\left(\frac{p_4}{p_{40}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]-\xi_д\cdot\dot{m}_д\cdot|\dot{m}_д|\right]}{j_д}, \\ \frac{d}{dt}m_1 = \frac{(p_1-p_4-\xi_1\cdot\dot{m}_1\cdot|\dot{m}_1|)}{j_1}, \\ \frac{d}{dt}m_2 = \frac{(p_2-p_4-\xi_2\cdot\dot{m}_2\cdot|\dot{m}_2|)}{j_2}, \\ \frac{d}{dt}m_3 = \frac{(p_4-p_3-\xi_3\cdot\dot{m}_3\cdot|\dot{m}_3|)}{j_3}. \end{cases} \tag{2.5}$$

Зададим закон импульсного возмущения для давления во второй магистрали p_2 такого вида

$$p_2(t) = \begin{bmatrix} A\sin\left(z(t)-\frac{\pi}{2}\right)+A+x_0 & \text{если} \quad 0 \le t \le T, \\ x_0 & \text{если} \quad t > T, \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

где $z(t) = 2\cdot t\cdot\frac{\pi}{T}$, $A = 0.1$ МПа - амплитуда возмущения, $T = 0.1$ секунды - период колебаний, $t = 0..1$ с шагом $h = 10^{-6}$ секунд - временная область, в которой исследуется система.

Подставляя (2.6) в систему дифференциальных уравнений (2.5), решаем ее численным методом во временной области t. По получившимся результатам вычислений строим отображающие переходный процесс графики изменения величин p_4, $V_д$, $\dot{m}_1$, $\dot{m}_2$, $\dot{m}_3$ и $\dot{m}_д$ от времени t. Графики представлены ниже, а программный код расчета, написанный на языке программирования python, представлен в приложении.

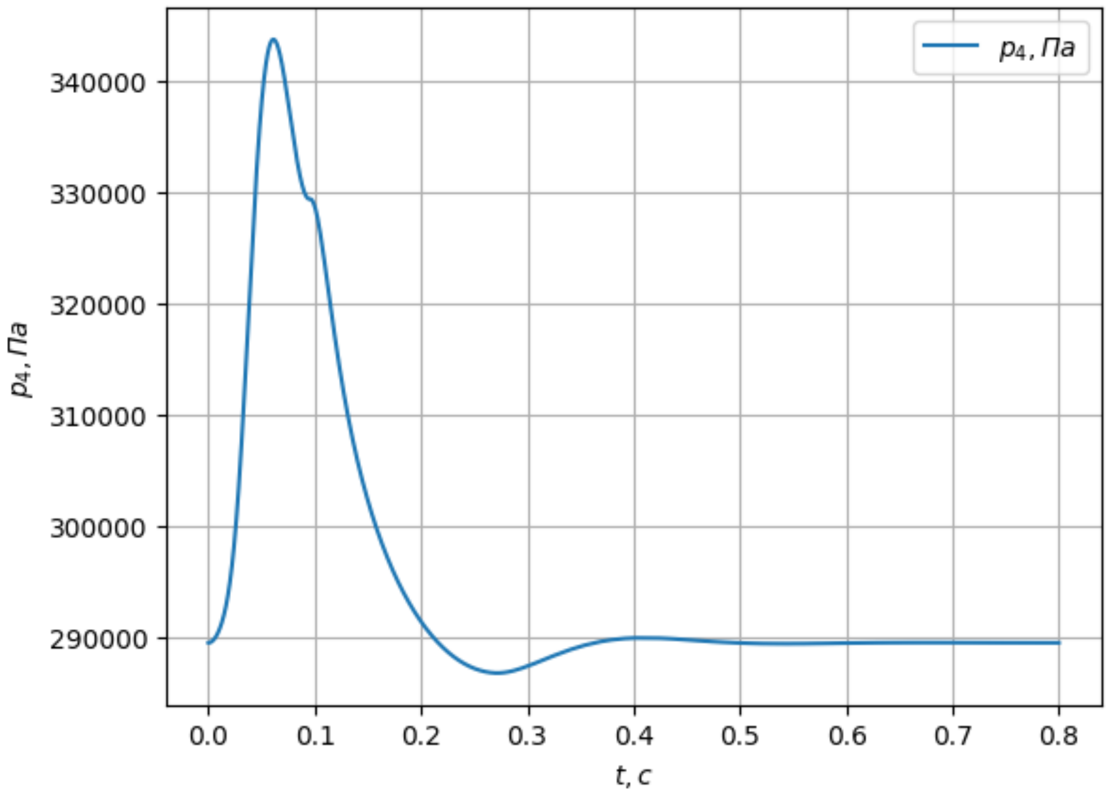

Рис. 2.1 – График зависимости $p_4(t)$

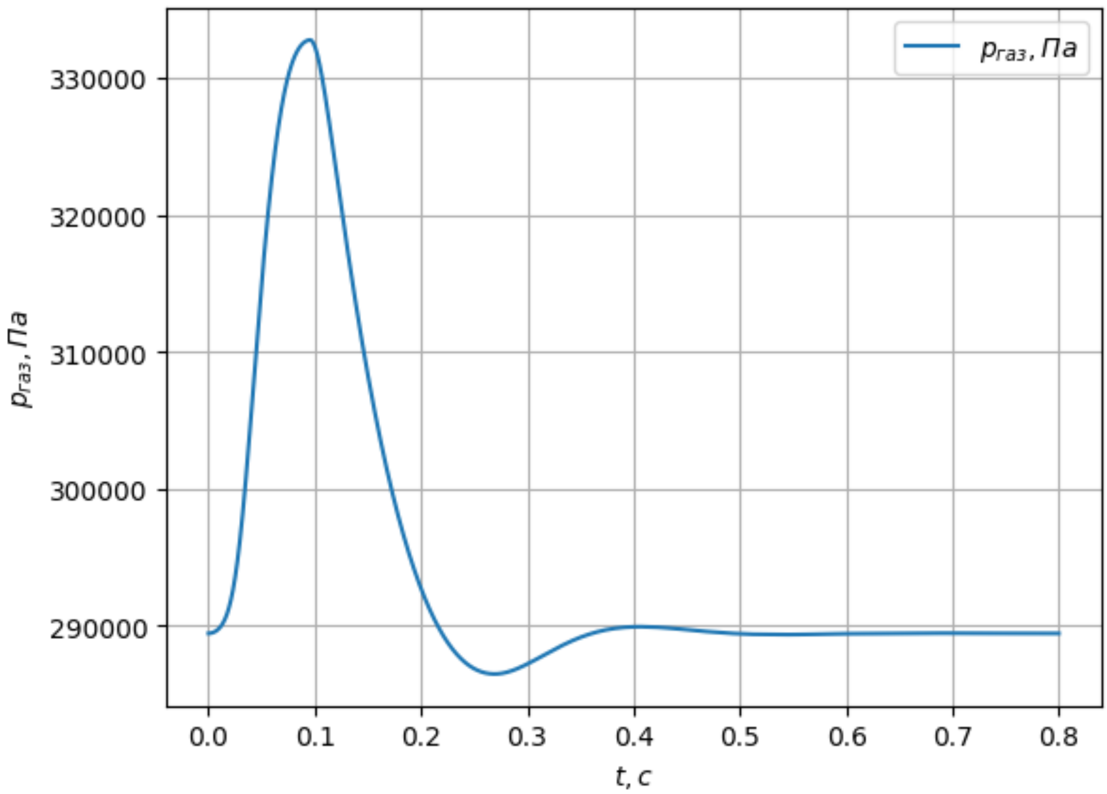

Рис. 2.2 – График зависимости $p_{\text{г}}(t)$

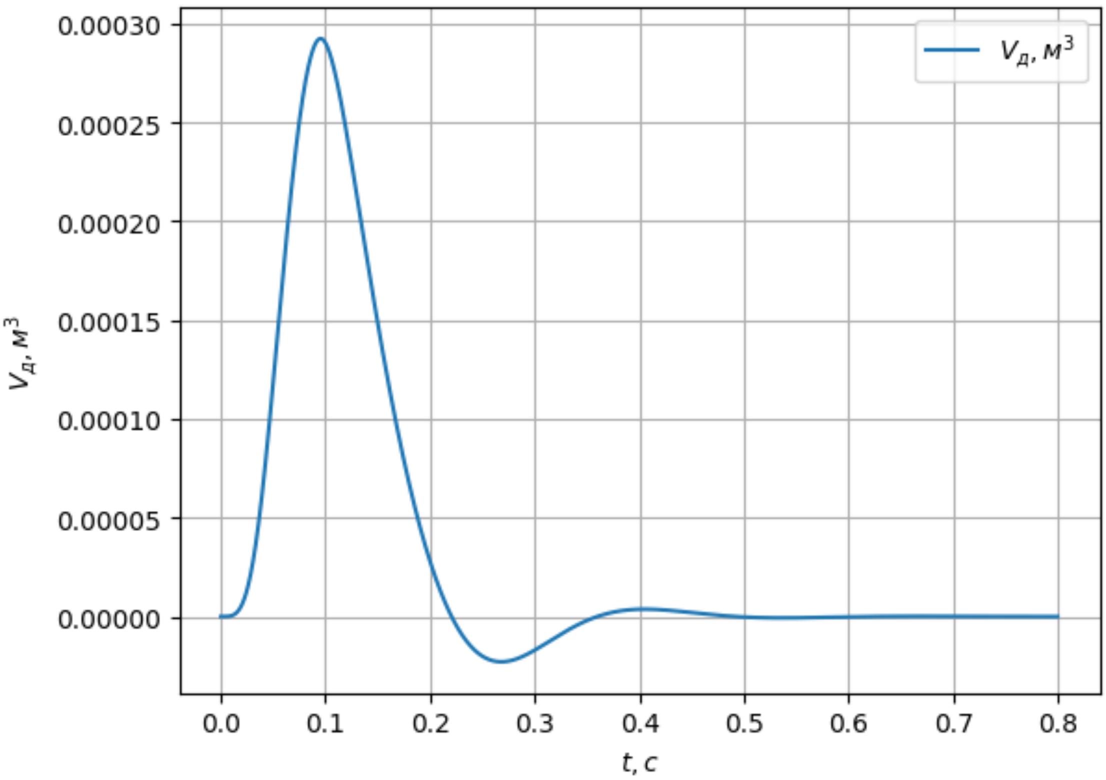

Рис. 2.3 – График зависимости $V_д(t)$

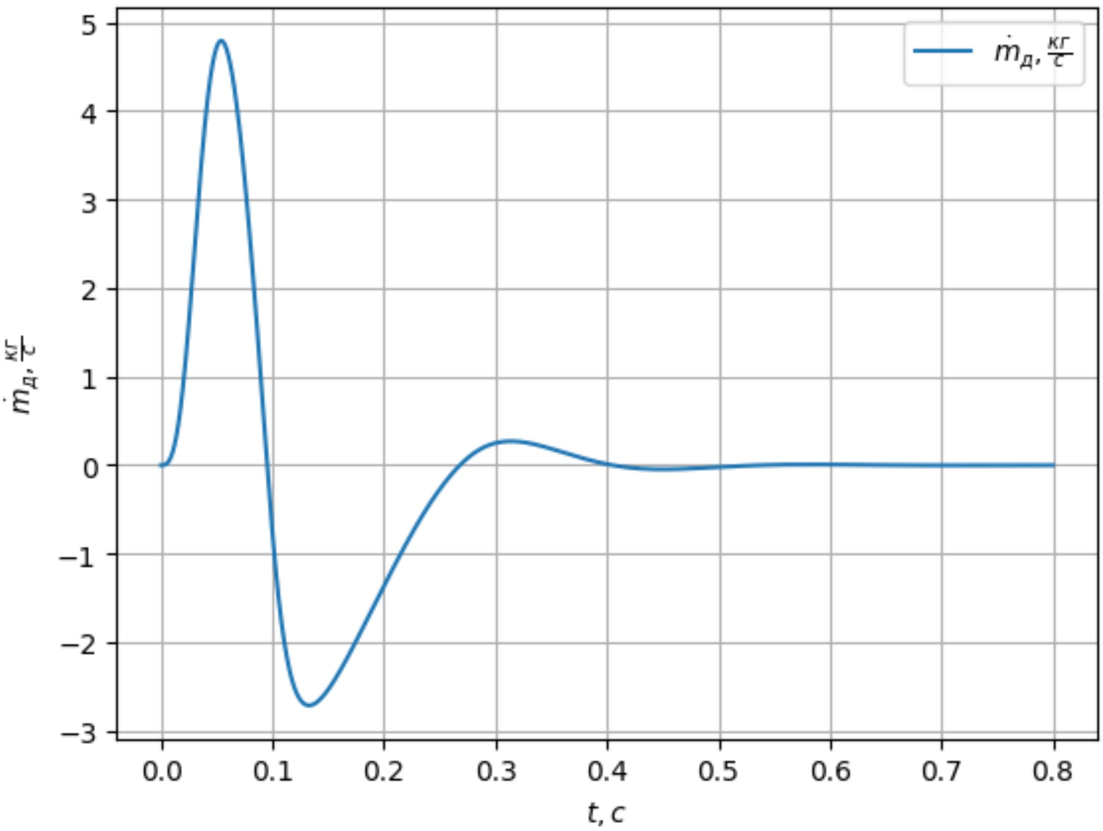

Рис. 2.4 – График зависимости $\dot{m}_д(t)$

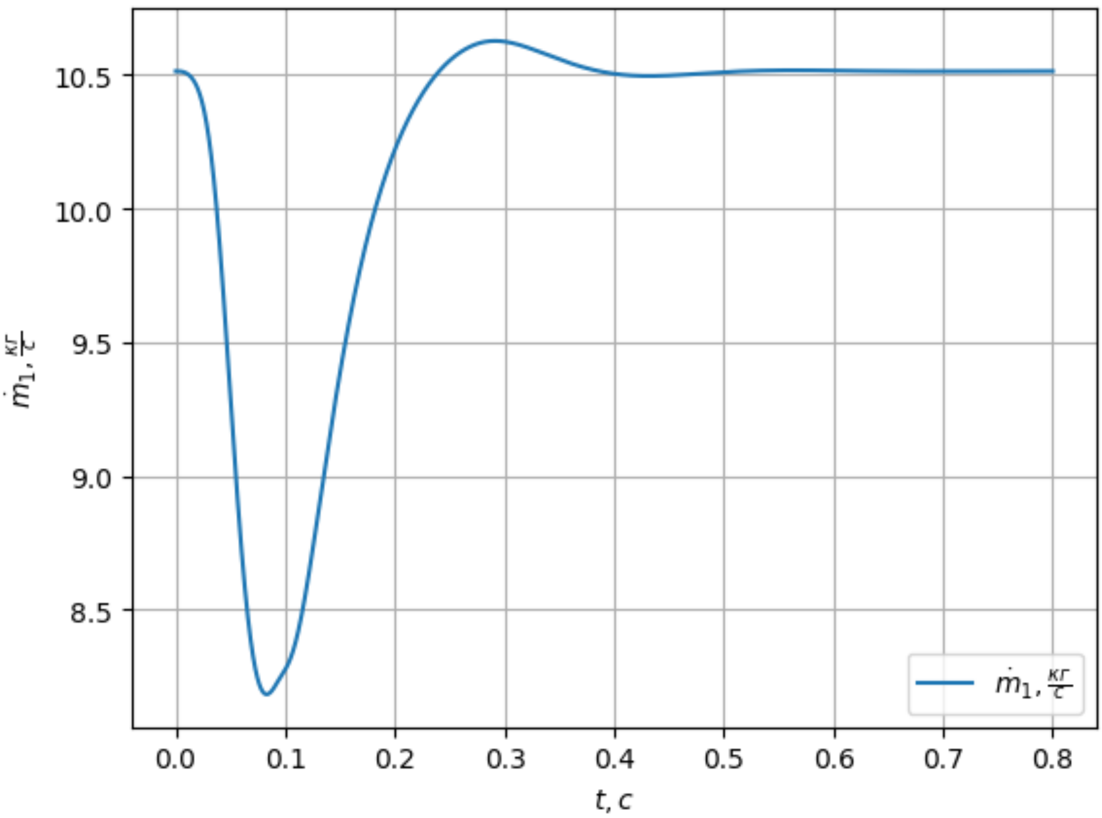

Рис. 2.5 – График зависимости $\dot{m}_1(t)$

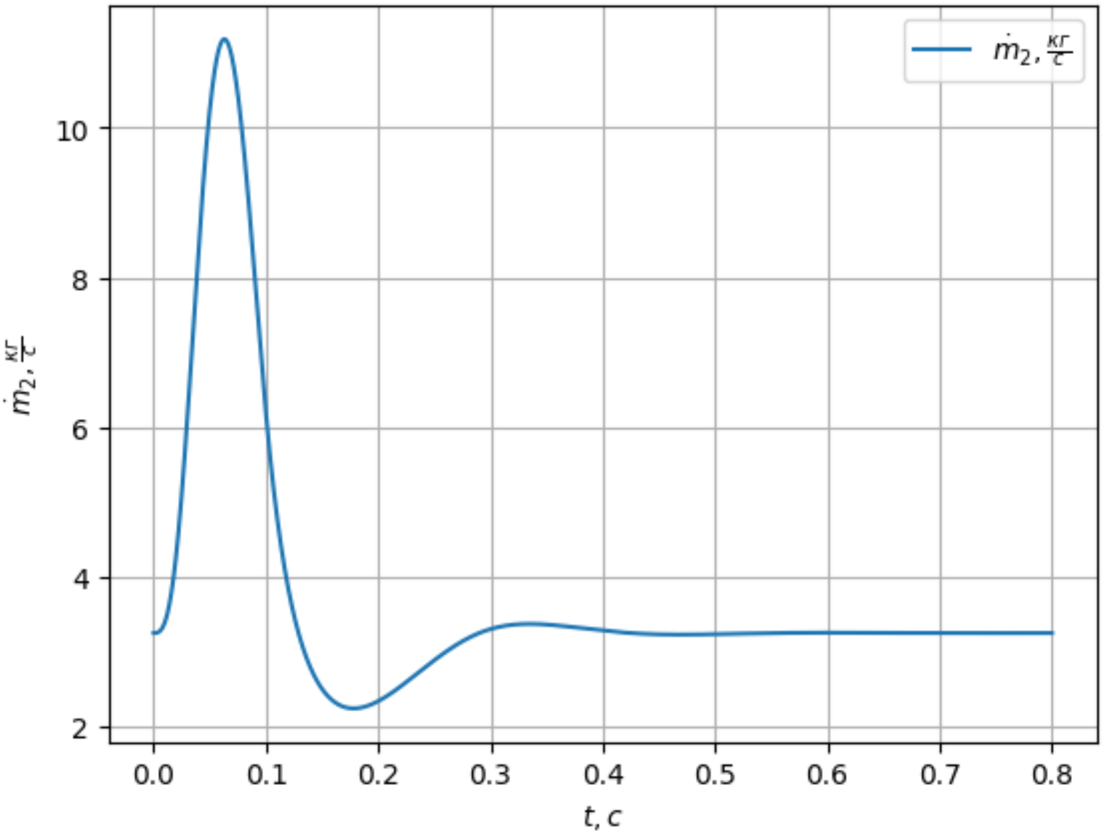

Рис. 2.6 – График зависимости $\dot{m}_2(t)$

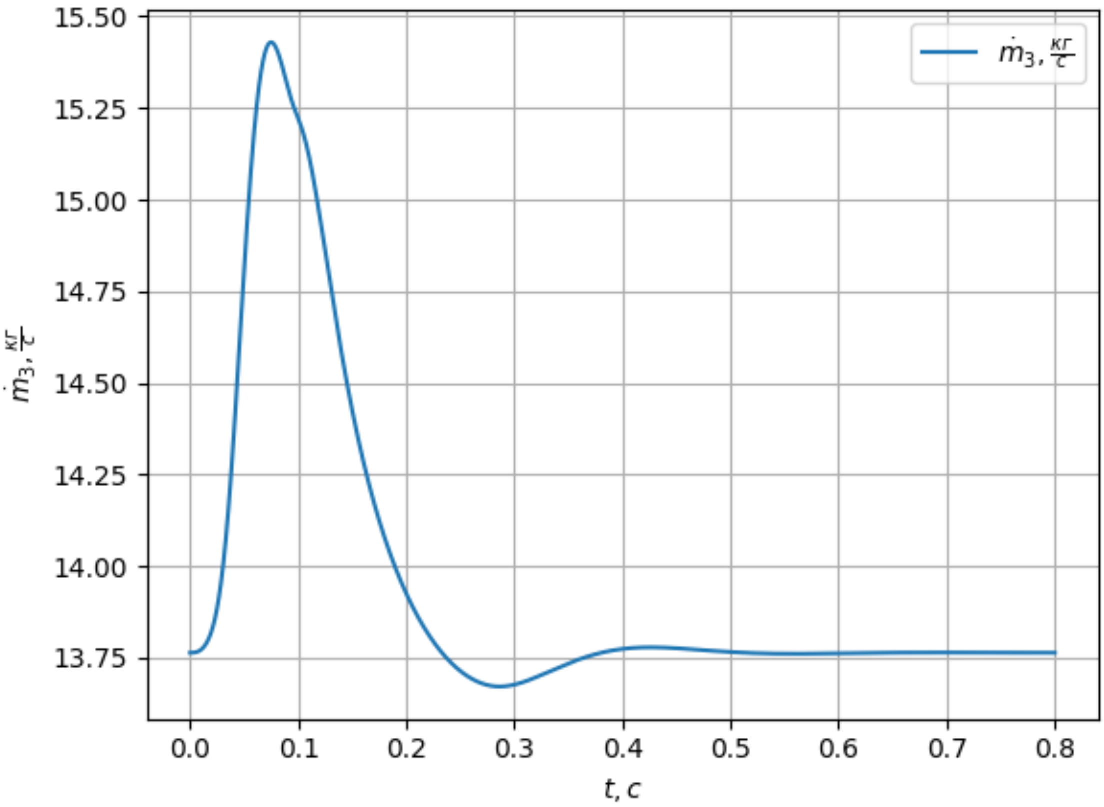

Рис. 2.7 – График зависимости $\dot{m}_3(t)$

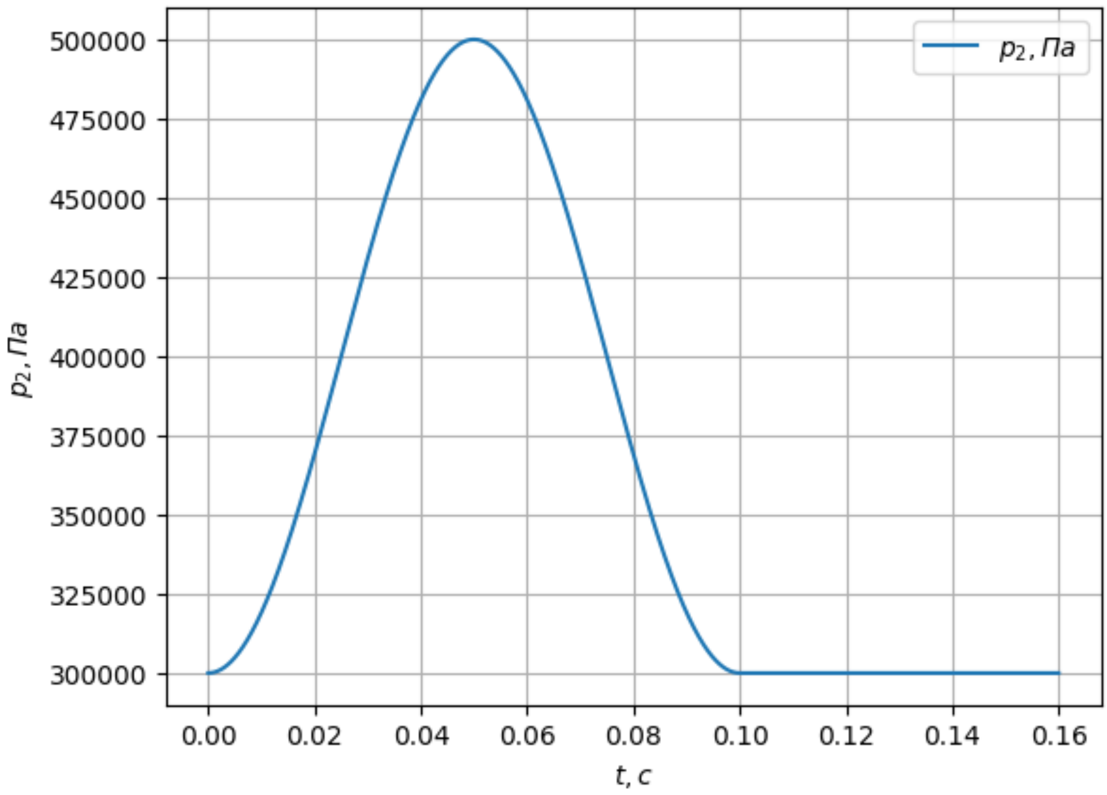

Рис. 2.8 – График зависимости $p_2(t)$

2.2.2 Определение АЧХ системы

Для построения амплитудно-частотной характеристики необходимо знать амплитуду колебаний системы при различных частотах возмущения. Зададим синусоидальное возмущение $p_2(t, f)$ таким образом

$$p_2(t, f) = f \cdot 2\pi \cdot t, \tag{2.7}$$

где f - частота колебаний p_2.

Тогда АЧХ будем искать в виде

$$АЧХ = \frac{\frac{max(p_4) - min(p_4)}{2}}{A}, \tag{2.8}$$

где максимальные и минимальные значения будем искать на утсановившемся режиме в диапазоне времени от 0.7 до 0.8 секунд.

Подставляя (2.7) в систему уравнений (2.5), находим решения для каждого значения частоты $f = 0..1000$ Гц с увеличивающимся шагом.

График реакции p_4 на синусоидальное возмущение p_2, заданное в (2.7), при частоте $f = 15$ и возмущения p_2 показаны на рисунке (2.9) и (2.10) соответственно. Амплитудно-частотная характеристика системы показана на рисунке (2.11). Программный код расчета, написанный на языке программирования python, представлен в приложении.

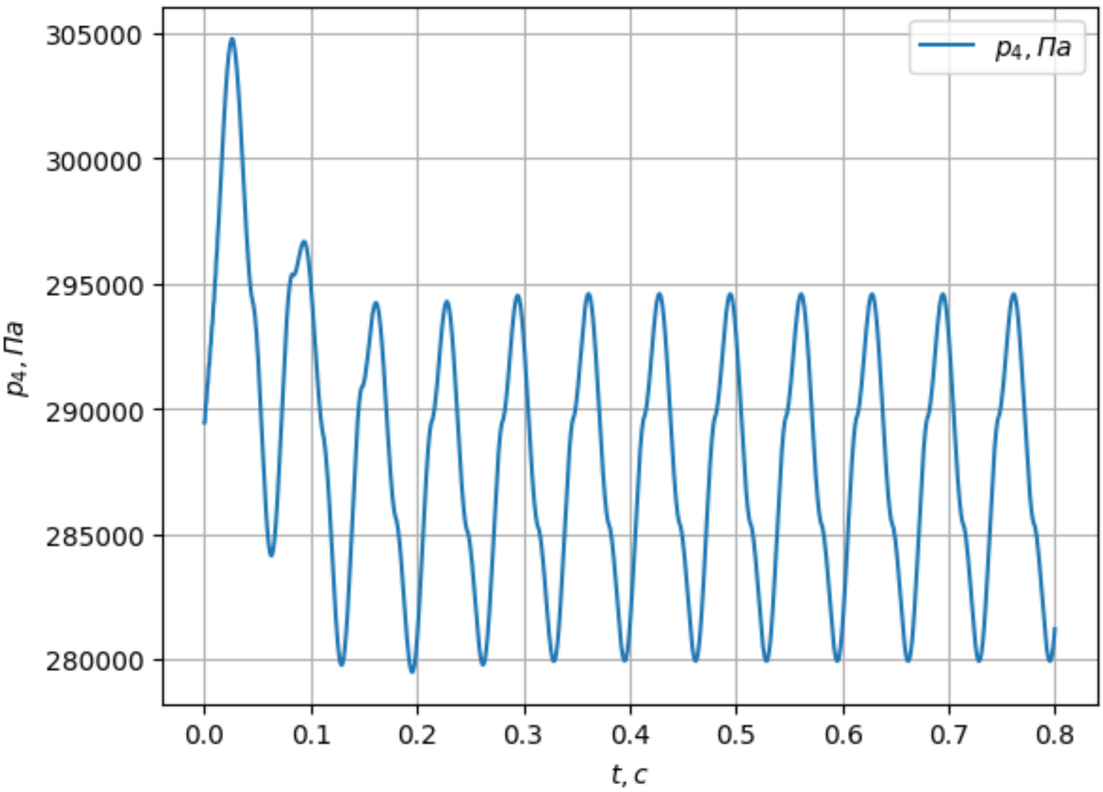

Рис. 2.9 – График зависимости $p_4(t)$ при $f = 15$ Гц

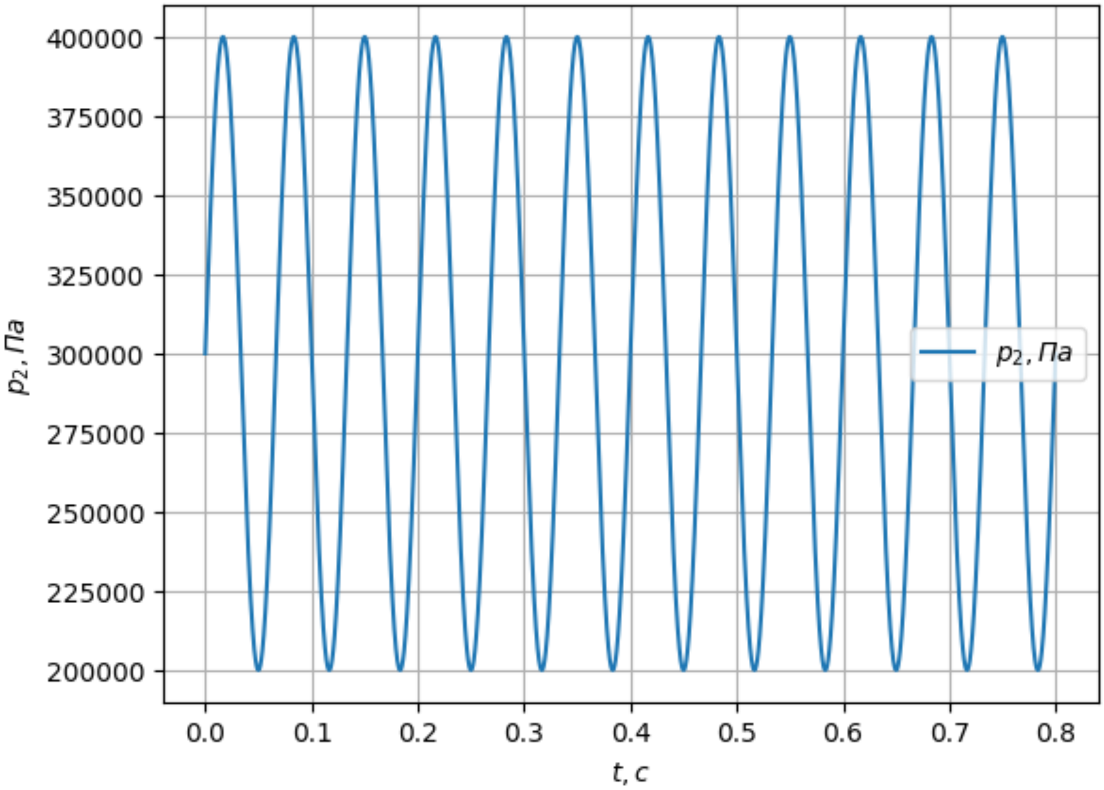

Рис. 2.10 – График зависимости $p_2(t)$ при $f = 15$ Гц

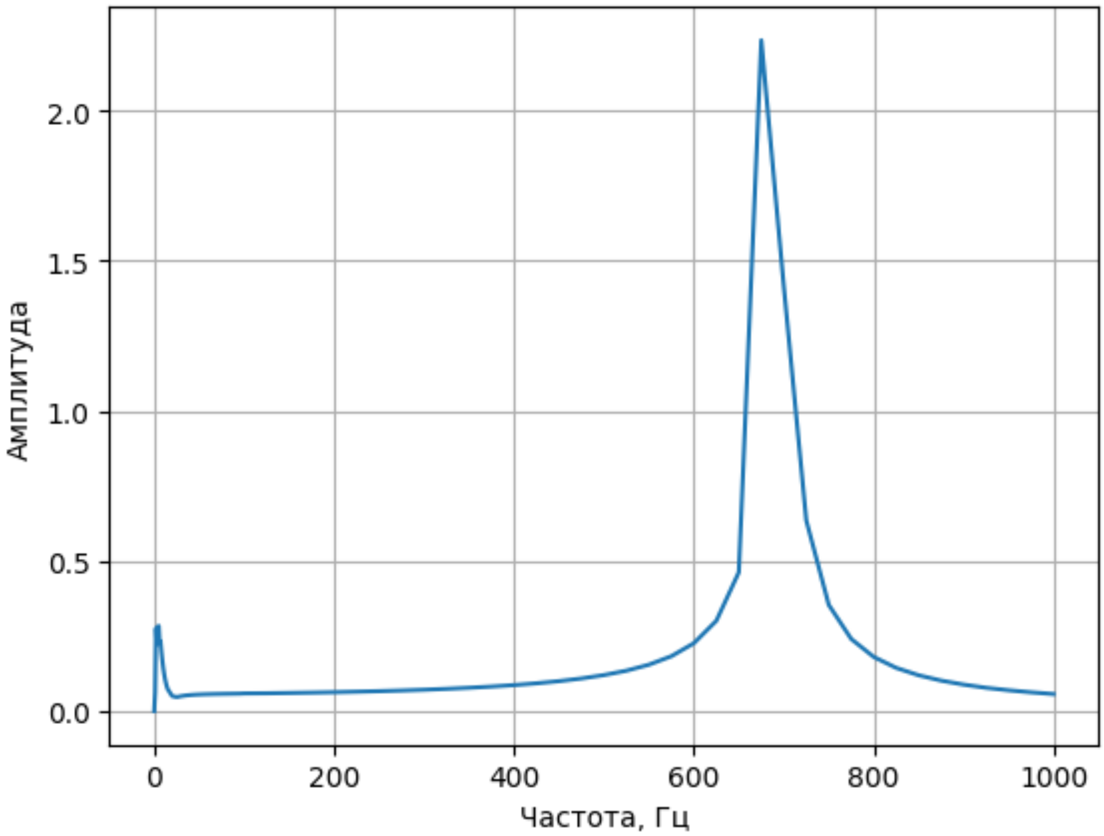

Рис. 2.11 – Амплитудно-частотная характеристика

2.3 Решение динамической задачи без демпфера

2.3.1 Определение математической модели

Запишем математическую модель для динамической системы без демпфера в виде следующей системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}p_4 = \frac{(\dot{m}_1+\dot{m}_2-\dot{m}_3)}{\frac{V_{ж0}}{c^2}}, \\ \frac{d}{dt}m_1 = \frac{(p_1-p_4-\xi_1\cdot\dot{m}_1\cdot|\dot{m}_1|)}{j_1}, \\ \frac{d}{dt}m_2 = \frac{(p_2-p_4-\xi_2\cdot\dot{m}_2\cdot|\dot{m}_2|)}{j_2}, \\ \frac{d}{dt}m_3 = \frac{(p_4-p_3-\xi_3\cdot\dot{m}_3\cdot|\dot{m}_3|)}{j_3}. \end{cases} \tag{2.9}$$

Зададим закон импульсного возмущения для давления во второй магистрали p_2 такого же вида, как (2.6).

Подставляя (2.6) в систему дифференциальных уравнений (2.9), решаем ее численным методом во временной области t. По получившимся результатам вычислений строим отображающие переходный процесс графики изменения величин p_4, $V_д$, $\dot{m}_1$, $\dot{m}_2$, $\dot{m}_3$ и $\dot{m}_д$ от времени t. Графики представлены ниже, а программный код расчета, написанный на языке программирования python, представлен в приложении.

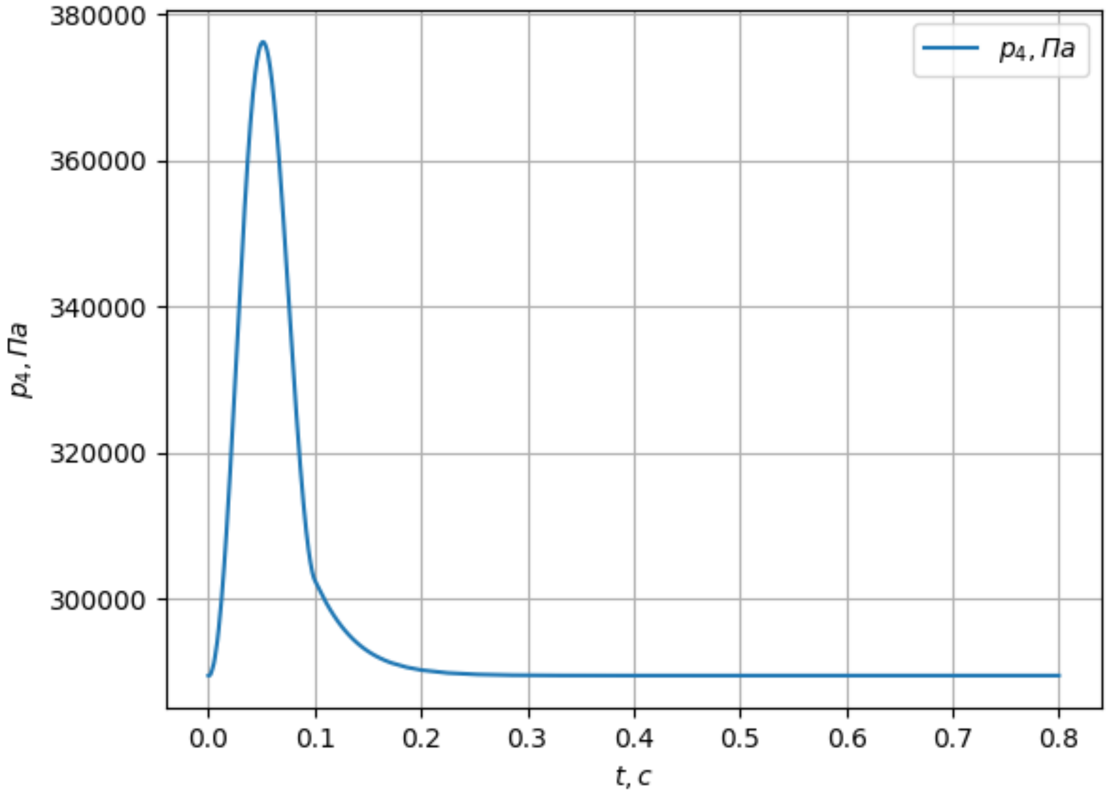

Рис. 2.12 – График зависимости $p_4(t)$

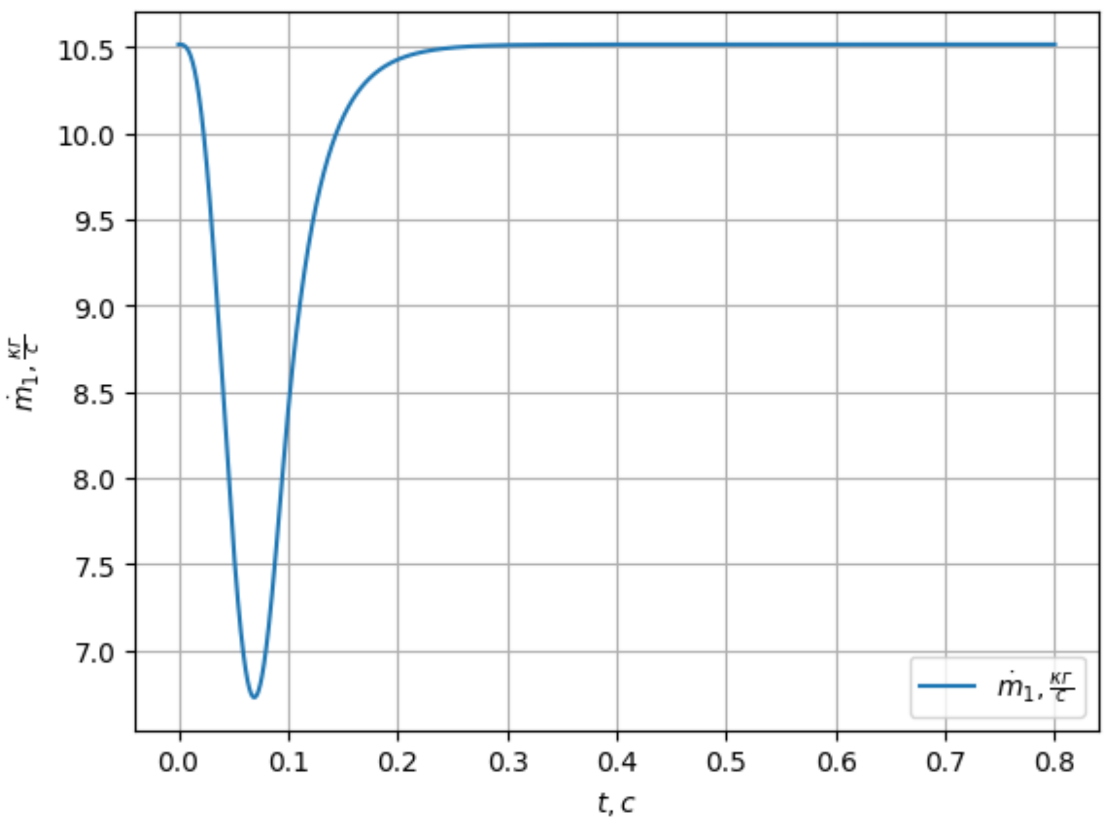

Рис. 2.13 – График зависимости $\dot{m}_1(t)$

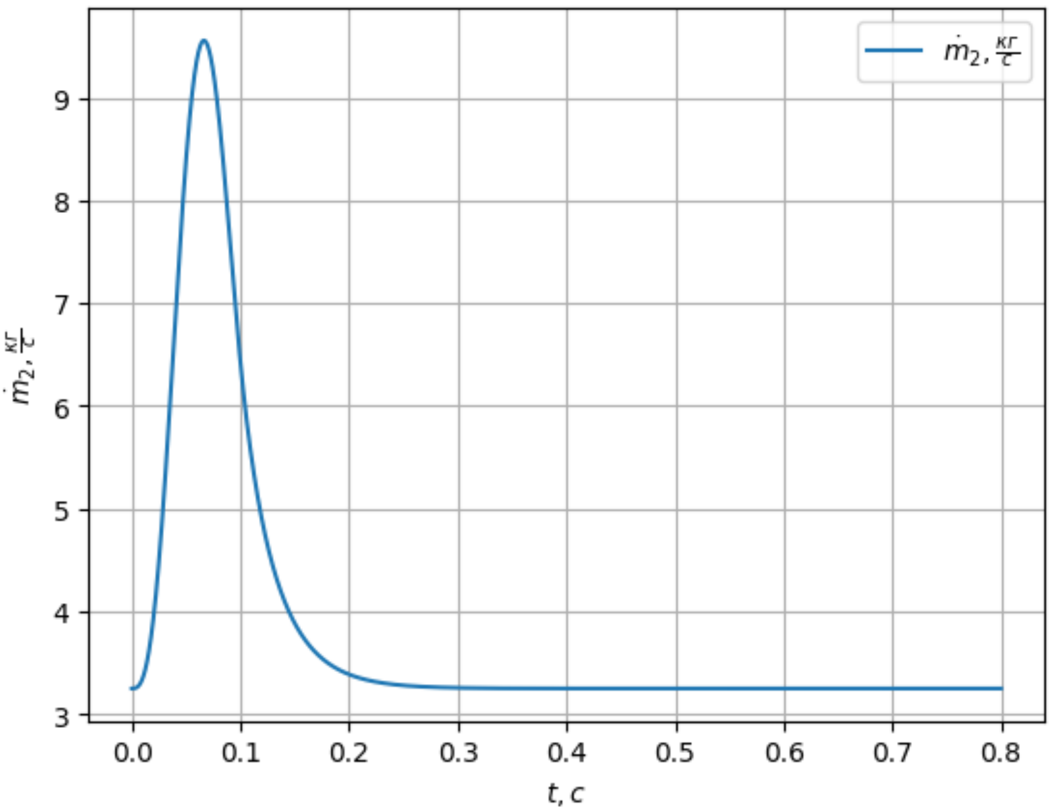

Рис. 2.14 – График зависимости $\dot{m}_2(t)$

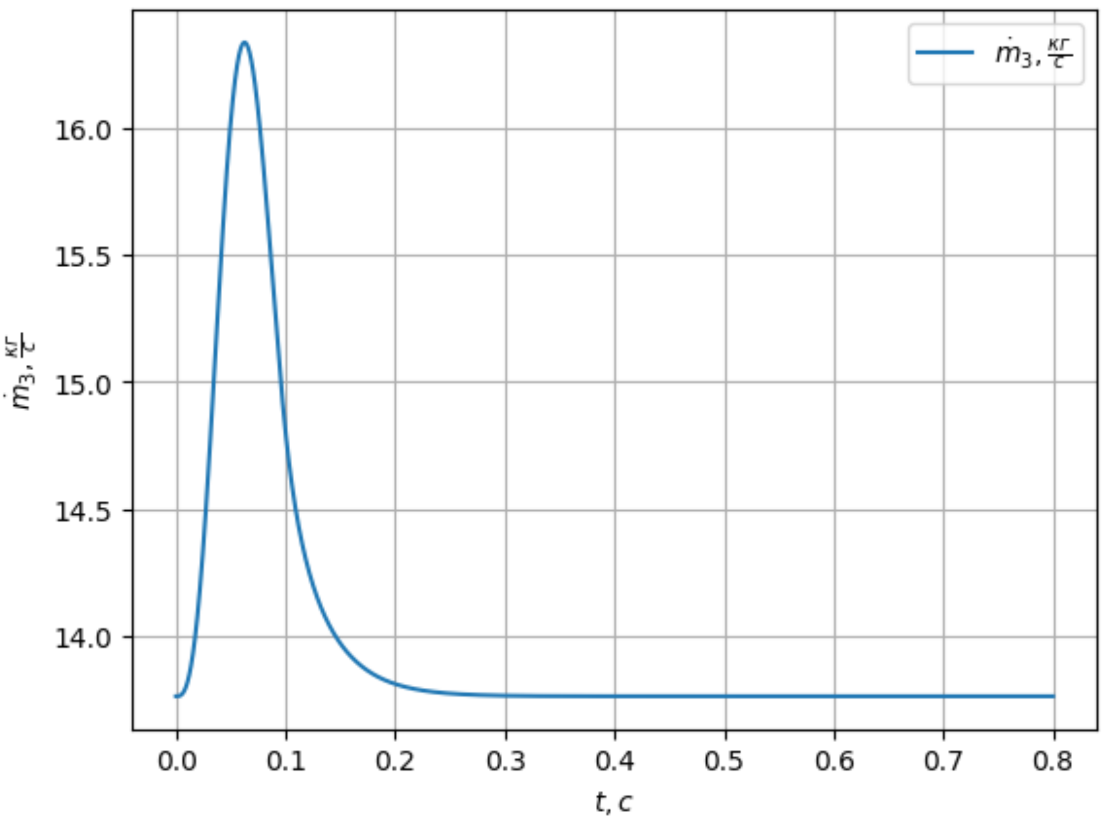

Рис. 2.15 – График зависимости $\dot{m}_3(t)$

2.3.2 Определение АЧХ системы

Для построения амплитудно-частотной характеристики необходимо знать амплитуду колебаний системы при различных частотах возмущения. Зададим синусоидальное возмущение $p_2(t, f)$ таким же образом, как и в (2.7). АЧХ будем искать в виде (2.8), где максимальные и минимальные значения будем искать на утсановившемся режиме в диапазоне времени от 0.7 до 0.8 секунд.

Подставляя (2.7) в систему уравнений (2.9), находим решения для каждого значения частоты $f = 0..1000$ Гц с увеличивающимся шагом.

График реакции p_4 на синусоидальное возмущение p_2, заданное в (2.7), при частоте $f = 15$ и возмущения p_2 показаны на рисунке (2.16) и (2.17) соответственно. Амплитудно-частотная характеристика системы показана на рисунке (2.18). Программный код расчета, написанный на языке программирования python, представлен в приложении.

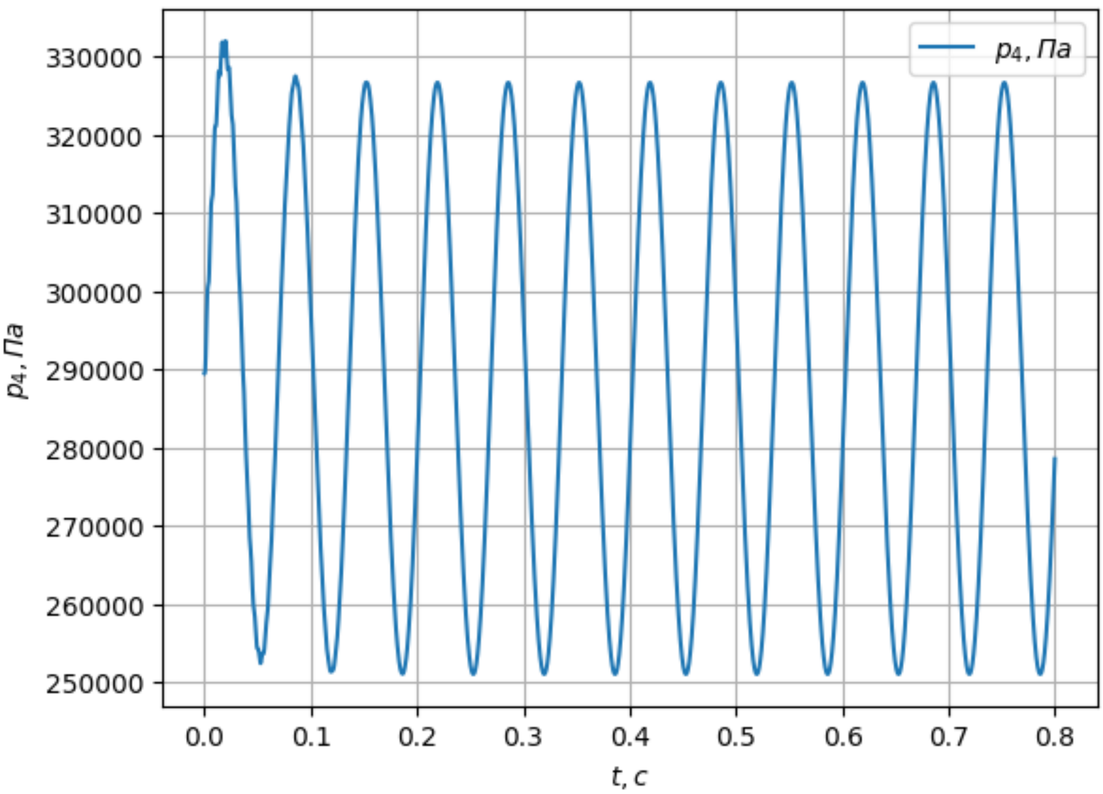

Рис. 2.16 – График зависимости $p_4(t)$ при $f = 15$ Гц

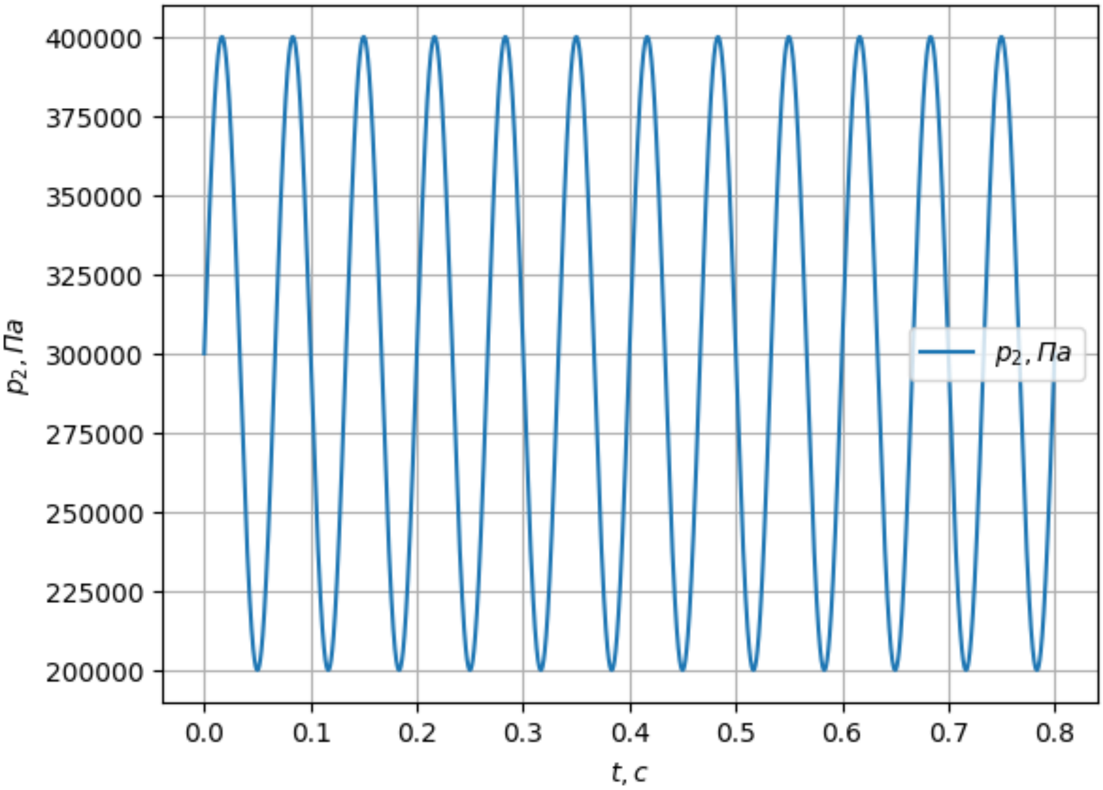

Рис. 2.17 – График зависимости $p_2(t)$ при $f = 15$ Гц

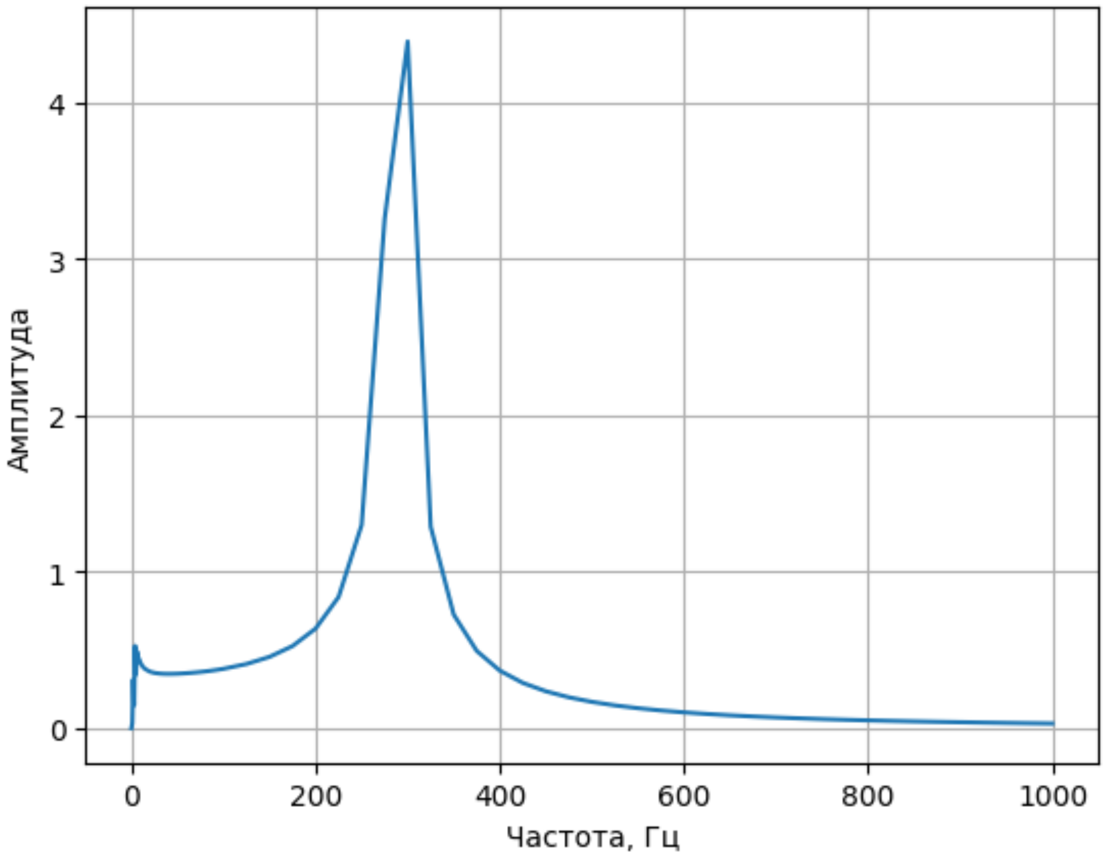

Рис. 2.18 – Амплитудно-частотная характеристика

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была составлена математическая модель гидромагистрали с демпфером и без демпфера, произведен расчет системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в колебательной системе мат. модели, с помощью численных методов и получены решения для искомых по заданию величин p_4, $V_д$, $\dot{m}_1$, $\dot{m}_2$, $\dot{m}_3$ и $\dot{m}_д$ и др. Так же были построены амплитудно-частотные характеристики для систем.

Взглянув на полученные графики, отображающие переходные процессы в системе с демпфером и без него (рисунки (2.1), (2.12) соответственно), можно заметить, что демпфер сработал как и ожидалось, то есть уменьшил амплитуду вынужденных колебаний системы.

Все вычисления производились на ЭВМ, программный код на языке программирования python прилагается. Для расчета систем дифференциальных уравнений использовался модуль scipy, метод решения - LSODA [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления [Текст] : учеб. пособие для втузов / Е.П. Попов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Наука, 1989. - 301 с.

2. SciPy v1.11.4 Manual [Электронный ресурс] // URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.integrate.odeint.html (дата обращения: 10.декабря.2023)

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРОГРАМНЫЙ КОД РЕШЕНИЯ

1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

[1]:
```
from scipy.integrate import odeint
from scipy.optimize import fsolve
from matplotlib import pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
from numpy import pi, sin
import warnings as w

w.filterwarnings("ignore")

# Давления в каналах
p1 = 400e3
p2_0 = 300e3
p3 = 100e3

# Параметры демпфирующей жидкости
Vд_0 = 0
mд_0 = 0

# Параметры жидкости -> керосин
c = 1330
Vж0 = 0.004
ρж = 820

# Параметры газа -> гелий
```

```
k = 1.4
R = 8.314
M = 0.0040026
R_газ = R / M
Tгаз_0 = 293
Vгаз_0 = 0.003

# Коэффициенты инерционности
j1 = j2 = j3 = 400
jд = 20

# Коэффициенты сопротивления
ξ1 = ξ2 = ξ3 = 1000
ξд = 1000
```

2 РЕШЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ

[2]:

```
def system_static(vars):
    """ Система уравнений стационарной системы """
    m1_0, m2_0, m3_0, p4_0, pgas_0 = vars

    return [m1_0 + m2_0 - m3_0,
            p4_0 - pgas_0,
            p1 - p4_0 - ξ1*m1_0**2,
            p4_0 - p3 - ξ3*m3_0**2,
            p2_0 - p4_0 - ξ2*m2_0**2]


# Вводим начальные приближения
```

```
initial_guess = [5, 5, 5, 3e5, 3e5]

# Решение системы
sol_static = fsolve(system_static, initial_guess)

m1_0 = sol_static[0]
m2_0 = sol_static[1]
m3_0 = sol_static[2]
p4_0 = sol_static[3]
pgas_0 = sol_static[4]

rho_газ = pgas_0 / (R_газ * Tгаз_0)
m_газ = rho_газ * Vгаз_0

# Вывод переменных
print("  m1_0 = {:.3f}".format(m1_0))
print("  m2_0 = {:.3f}".format(m2_0))
print("  m3_0 = {:.3f}".format(m3_0))
print("  p4_0 = {:.3f}".format(p4_0))
print("pgas_0 = {:.3f}".format(pgas_0))
print("rho_gas = {:.3f}".format(rho_газ))
print(" m_газ = {:.3f}".format(m_газ))
```

```
  m1_0 = 10.515
  m2_0 = 3.249
  m3_0 = 13.764
  p4_0 = 289442.719
pgas_0 = 289442.719
rho_gas = 0.476
 m_газ = 0.001
```

3 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ И КОНСТАНТЫ

[3]:
```python
# Функции возмущения
def p2(t):
    """ Функция импульсного возмущения """
    if t <= T:
        z = 2 * t * pi/T
        insin = z - pi/2
        p2 = p2_0 + A*sin(insin) + A
    else:
        p2 = p2_0
    return p2



def p2_sin(t):
    """ Функция возмущения, изменяющаяся по синусу """
    z = 2 * t * pi/T
    insin = z - pi/2
    p2 = p2_0 + A*sin(insin)
    return p2



def p2_sin_afc(t, freq):
    """ Функция возмущения, зависящая от частоты """
    insin = freq * 2*pi * t
    p2 = p2_0 + A*sin(insin)
    return p2
```

```
# Функция построения графиков
def plot(t, y, label):
    plt.plot(t, y, label=label)
    plt.grid(True)
    plt.xlabel("$t, c$")
    plt.ylabel(label)
    plt.legend()
    plt.show()


A = 100000  # Амплитуда возмущения
T = 0.1  # Период возмущения

# Временной отрезок моделирования
t_end = .8
h = 1e-6
t = np.arange(0, t_end, h)

# Наборы начальных значений
y0 = [p4_0, Vд_0, m1_0, m2_0, m3_0, mд_0]
y0_n_d = [p4_0, m1_0, m2_0, m3_0]

# Частотный диапазон
frequancy = []
for freq in np.arange(0, 16, 1):
    frequancy.append(freq)
for freq in np.arange(20, 105, 5):
    frequancy.append(freq)
```

```
for freq in np.arange(125, 1025, 25):
    frequancy.append(freq)
```

4 РЕШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ С ДЕМПФЕРОМ

4.1 Решение СДУ

[4]:
```
def system(y, t):
    """ Система дифференциальных уравнений """
    p4, Vд, m1, m2, m3, mд = y

    d_p4 = (m1 + m2 - m3 - mд) / ((Vж0 + Vд) / c**2)
    d_Vд = mд / ρж
    d_m1 = (p1 - p4 - ξ1 * m1 * abs(m1)) / j1
    d_m2 = (p2(t) - p4 - ξ2 * m2 * abs(m2)) / j2
    d_m3 = (p4 - p3 - ξ3 * m3 * abs(m3)) / j3
    d_mд = (p4 - (m_газ / (Vгаз_0 - Vд)) * R_газ *
             (Tгаз_0 * ((p4 / p4_0)**((k-1)/k))) -
                 ξд * mд * abs(mд)) / jд

    return [d_p4, d_Vд, d_m1, d_m2, d_m3, d_mд]


# Решение
sol = odeint(system, y0, t)

p_газ = (m_газ / (Vгаз_0 - sol[:, 1])) * R_газ * \
    (Tгаз_0 * ((sol[:, 0] / p4_0)**((k-1)/k)))
```

[5]:
```
max(sol[:, 0])
```

[5]: 343719.8998417112

4.2 Построение графиков

[ ]:
```
plot(t, sol[:, 0], r"$p_4, Па$")
plot(t, p_газ, r"$p_{газ}, Па$")
plot(t, sol[:, 1], r"$V_д, м^3$")
plot(t, sol[:, 2], r"$\dot{m}_1, \frac{кг}{с}$")
plot(t, sol[:, 3], r"$\dot{m}_2, \frac{кг}{с}$")
plot(t, sol[:, 4], r"$\dot{m}_3, \frac{кг}{с}$")
plot(t, sol[:, 5], r"$\dot{m}_д, \frac{кг}{с}$")
plot(t[:int(t_end//h//5)], [p2(t) for t in t][:
  int(t_end//h//5)], "$p_2, Па$")
```

5 ПОСТРОЕНИЕ АЧХ СИСТЕМЫ С ДЕМПФЕРОМ

5.1 Решение

[ ]:
```
def system_afc(y, t, freq):
    """ Система дифференциальных уравнений,
  зависящая от частоты """
    p4, Vд, m1, m2, m3, mд = y

    d_p4 = (m1 + m2 - m3 - mд) / ((Vж0 + Vд) / c**2)
    d_Vд = mд / ρж
    d_m1 = (p1 - p4 - ξ1 * m1 * abs(m1)) / j1
```

```
    d_m2 = (p2_sin_afc(t, freq) - p4 - ξ2 * m2 *
  abs(m2)) / j2
    d_m3 = (p4 - p3 - ξ3 * m3 * abs(m3)) / j3
    d_мд = (p4 - (m_газ / (Vгаз_0 - Vд)) * R_газ *
            (Tгаз_0 * ((p4 / p4_0)**((k-1)/k))) -
                ξд * мд * abs(мд)) / jд

    return [d_p4, d_Vд, d_m1, d_m2, d_m3, d_мд]



sol_afc = []
amplitude = []
for i, freq in enumerate(frequancy):
    sol_afc = odeint(system_afc, y0, t, (freq,))
    if i == 15:
        sol_afc_p4_15 = sol_afc[:, 0]
    amplitude.append(
        (max(sol_afc[700000:800000, 0]) -
         min(sol_afc[700000:800000, 0])) / 2 / A)
    del sol_afc

print(amplitude)
```

5.2 График АЧХ

```
[ ]: plot(t[:], sol_afc_p4_15[:], "$p_4, Па$")
```

```
[ ]: plot(t[:], [p2_sin_afc(t, frequancy[15]) for t in
  t][:], "$p_2, Па$")
```

```
[ ]: plt.plot(frequancy, amplitude)
     plt.grid()
     plt.xlabel("Частота, Гц")
     plt.ylabel("Амплитуда")
     plt.show()
```

6 РЕШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ БЕЗ ДЕМПФЕРА

6.1 Решение СДУ

```
[11]: def system_no_damper(y, t):
          """ Система дифференциальных уравнений """
          p4, m1, m2, m3 = y

          d_p4 = (m1 + m2 - m3) / ((Vж0) / c**2)
          d_m1 = (p1 - p4 - ξ1 * m1 * abs(m1)) / j1
          d_m2 = (p2(t) - p4 - ξ2 * m2 * abs(m2)) / j2
          d_m3 = (p4 - p3 - ξ3 * m3 * abs(m3)) / j3

          return [d_p4, d_m1, d_m2, d_m3]


      sol_no_damper = odeint(system_no_damper, y0_n_d, t)
```

```
[12]: max(sol_no_damper[:, 0])
```

```
[12]: 376204.8683575951
```

6.2 Построение графиков

```
[ ]: plot(t, sol_no_damper[:, 0], r"$p_4, Па$")
     plot(t, sol_no_damper[:, 1], r"$\dot{m}_1, \frac{кг}{с}$")
     plot(t, sol_no_damper[:, 2], r"$\dot{m}_2, \frac{кг}{с}$")
     plot(t, sol_no_damper[:, 3], r"$\dot{m}_3, \frac{кг}{с}$")
```

7 ПОСТРОЕНИЕ АЧХ СИСТЕМЫ БЕЗ ДЕМПФЕРА

7.1 Решение

```
[ ]: def system_afc_no_damper(y, t, freq):
         """ Система дифференциальных уравнений """
         p4, m1, m2, m3 = y

         d_p4 = (m1 + m2 - m3) / ((Vж0) / c**2)
         d_m1 = (p1 - p4 - ξ1 * m1 * abs(m1)) / j1
         d_m2 = (p2_sin_afc(t, freq) - p4 - ξ2 * m2 * abs(m2)) / j2
         d_m3 = (p4 - p3 - ξ3 * m3 * abs(m3)) / j3

         return [d_p4, d_m1, d_m2, d_m3]



     sol_afc_no_damper = []
     amplitude_nodamper = []
     for i, freq in enumerate(frequancy):
         sol_afc_no_damper = odeint(system_afc_no_damper, y0_n_d, t, (freq,))
         if i == 15:
```

```
        sol_afc_nd_p4_15 = sol_afc_no_damper[:, 0]
    amplitude_nodamper.append(
        (max(sol_afc_no_damper[700000:800000, 0]) -
        min(sol_afc_no_damper[700000:800000, 0])) /
   2 / A)
    del sol_afc_no_damper

print(amplitude_nodamper)
```

7.2 График АЧХ

```
[ ]: plot(t[:], sol_afc_nd_p4_15[:], "$p_4, Па$")
```

```
[ ]: plot(t[:], [p2_sin_afc(t, frequancy[15]) for t in
       t][:], "$p_2, Па$")
```

```
[ ]: plt.plot(frequancy, amplitude_nodamper)
     plt.grid()
     plt.xlabel("Частота, Гц")
     plt.ylabel("Амплитуда")
     plt.show()
```