

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Факультет систем управления и робототехники



Динамика электромеханических систем

Лабораторная работа

**«Разработка электромеханической системы углового
позиционирования и исследование её динамики»**

Выполнил студент:

Мысов М.С. (В-10)

Группа № R33372

Руководитель:

Быстров С.В.

г. Санкт-Петербург

2023

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Разработка электромеханической системы углового позиционирования и исследование её динамики.

1. По заданным характеристикам механической нагрузки рассчитать требуемый от двигателя момент и номинальную мощность. Предварительно выбрать двигатель заданного типа по каталогам и определить оптимальное значение передаточного числа редуктора. С учетом всех полученных расчетных значений окончательно выбрать двигатель с редуктором или мотор-редуктор для системы позиционирования. Характеристики нагрузки приведены в таблице 1 где исходными данными для расчета являются:

- момент сопротивления нагрузки (M_d);
- момент инерции нагрузки (J_n);
- максимальная угловая скорость вращения нагрузки (Ω_m);
- максимальное ускорение нагрузки (ε_m).

2. Для заданного типа двигателя разработать функциональную схему привода. В состав схемы должны войти:

- задающее устройство (ЗУ);
- устройство управление (УУ);
- исполнительный двигатель (ИД);
- редуктор (Р);
- объект управления (ОУ)
- датчики скорости (при необходимости) и положения (ДС и ДП).

Выбрать по каталогам все технические средства системы, включая источники питания, обеспечивая возможность их подключения в соответствии с функциональной схемой.

3. Разработка структурной схемы привода (в передаточных функциях):

1. Определиться с видом передаточных функций всех устройств, входящих в состав привода. Рассчитать все параметры передаточных функций.
2. Математическое моделирование системы без регулятора.
3. Синтез регулятора и моделирование системы с ним.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Основная часть.....	4
Задание 1.....	4
Задание 2.....	6
Задание 3.1.....	7
Задание 3.2.....	9
Задание 3.3.....	13
Заключение.....	18
ПРИЛОЖЕНИЕ	19

Введение

В этой лабораторной работе необходимо, используя некоторые начальные данные, разработать электромеханическую систему углового позиционирования и исследовать ее динамику, используя конкретные, реальные составляющие в ходе работы.

Основная часть

Таблица 1 – Вариант технического задания

№ варианта	M_n , Нм	J_n , кг·м ²	Ω_m , об/мин	ε_m , рад/с ²	α max, град	M	δ , %	Тип двигателя
10	0.12	0.21	65	2.0	45	1.1	1	ДПТ

Задание 1

Для этапа выбора марки двигателя мы воспользовались формулами определения требуемой мощности двигателя на основании второго закона Ньютона:

$$M_{тр} = M_{дин} + M_c \quad (1)$$

где $M_{дин}$ и M_c – соответственно динамический и статический моменты сопротивления, приведенные к валу двигателя.

$$M_{тр} = \left(J_{дв} + J_p + \frac{J_n}{i_p^2} \right) i_p \varepsilon_m + \frac{M_n}{\eta_p \cdot i_p} \quad (2)$$

По найденному требуемому моменту $M_{тр}$ и заданной максимальной скорости нагрузки находим максимальную требуемую мощность на валу двигателя.

$$P_{тр} = M_{тр} \cdot i_p \cdot \omega_m \quad (3)$$

Изначально был выбран ДПТ **Maxon F2140**, который обладал подходящими, как мне казалось, характеристиками. После проведения расчетов я выяснил, что перегрузочные способности данного двигателя по моменту и скорости очень высокие. Они не попадали в диапазон. В нашем случае это неэффективно, что непосредственно влияет на оптимальность использования данного двигателя в предложенных условиях.

После перебора вариантов, был найден ДПТ **Maxon DC motor A-max 16 (110046)**.

Таблица 2 – Данные двигателя

Номинальное напряжение	15 В
Скорость холостого хода	1382 рад/с
Ток холостого хода	$8.57 \cdot 10^{-3}$ А
Номинальная скорость	795 рад/с
Номинальный момент	$2.17 \cdot 10^{-3}$ Нм
Пусковой момент	$5.16 \cdot 10^{-3}$ Нм
Пусковой ток	0.482 А
Макс. КПД	76%
Механическая постоянная времени	$23.4 \cdot 10^{-3}$ с
Момент инерции ротора	$8.59 \cdot 10^{-8}$ кг·м ²
Вес	$21 \cdot 10^{-3}$ кг

$$y_m = \frac{M_{тр}}{M_{двиг_ном}} = 3.45,$$

$$\text{где } M_{тр} = \left(J_{дв} + J_p + \frac{J_H}{i_p^2} \right) i_p \varepsilon_m + \frac{M_H}{\eta_p \cdot i_p} = 0.0077 \text{ Нм}$$

$$a = \frac{i_p \cdot \Omega_M}{\omega_{ном}} = 0.77$$

Мне удалось подобрать двигатель, который подходит по перегрузочной способности по моменту (y_m) и по скорости (a).

ДПТ оснащен мощными постоянными магнитами из сплава AlNiCo. Его щетки выполнены из благородных металлов, что позволило повысить КПД на 20% в сравнении с графитовыми щетками. Используются шарикоподшипники вместо спеченных подшипников скольжения.

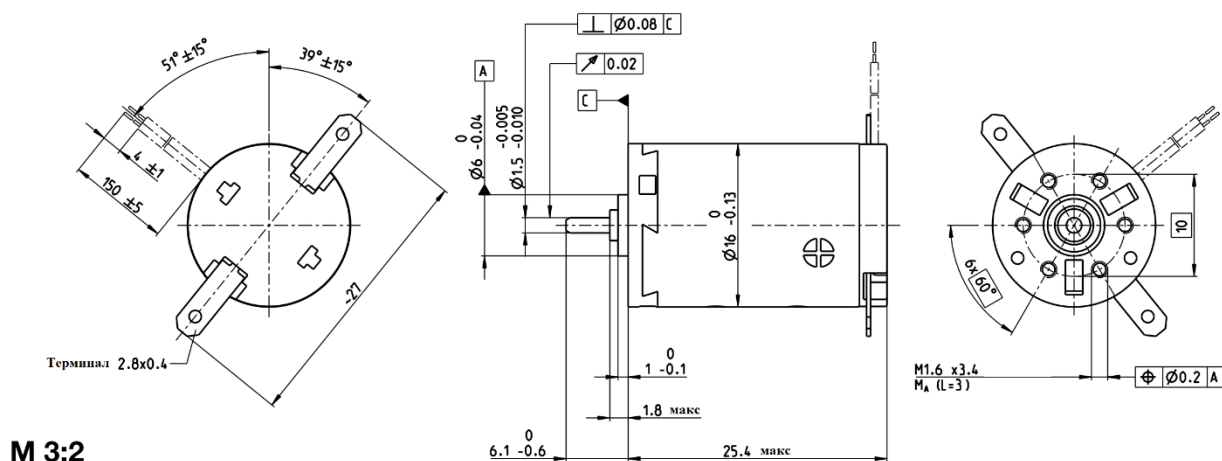


Рисунок 1 – Чертеж ДПТ

Перейдем к выбору редуктора. Выбран **рядный редуктор Maxon GS 16 A**.

Это рядный прямозубый редуктор из нержавеющей стали, выходной вал закаленный. Для вращения в пределах номинального момента и скорости было выбрано передаточное число **76:1**.

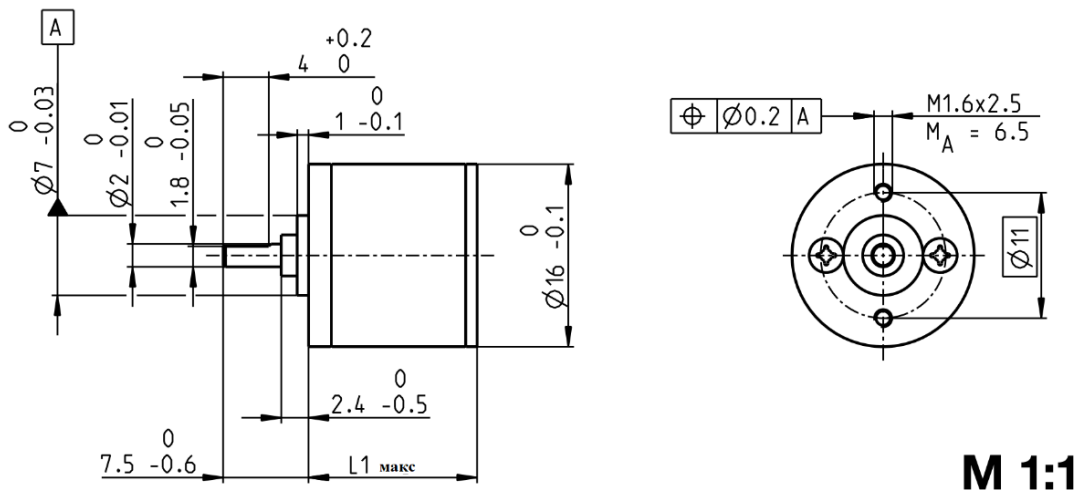


Рисунок 2 – Чертеж редуктора Maxon GS 16

Таблица 3 – данные редуктора

Число степеней	4
Максимальный длительный момент	0.035 Н
Кратковременно допустимый момент	0.1 Н
КПД	66 %
Момент инерции ротора	$3.1 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Вес	$10.2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$

Задание 2

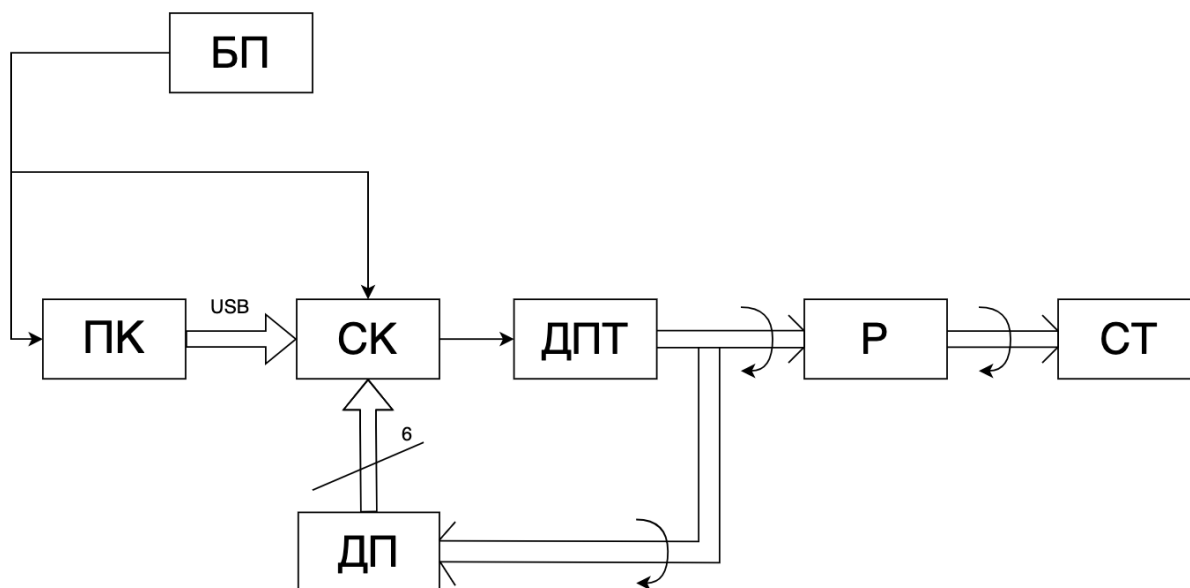


Рисунок 3 – Функциональная схема привода

:БП - блок питания; ПК - персональный компьютер; СК - сервоконтроллер; ДПТ - двигатель постоянного тока; Р - редуктор, ДП - датчик положения; СТ - стеклышко телескопа

Как выше описано, в качестве (ИД) был выбран коллекторный ДПТ **Maxon DC motor A-max 16 (110046)**, далее к нему был подобран рядный редуктор **Maxon GS 16 A (P)**.

После в качестве (УУ) решено взять **ESCON Servo Controller 36/2 DC**. Его выбор происходил осознано, он рекомендуется к двигателю **A-max 16**, а также имеет необходимые коннекторы.

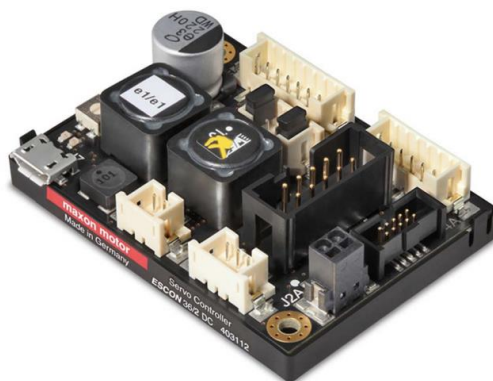


Рисунок 4 – Сервоконтроллер ESCON 36/2 DC

Задающим устройством (ЗУ) в схеме служит некий абстрактный персональный компьютер, а в роли источника энергии (ИЭ) схемы служит его блок питания, по сути, мы можем использовать любой стандартный современный БП для ПК.

Так как по заданию двигатель должен повернуться на 45° , было решено выбрать объектом управления (ОУ) механизм, требующий от двигателя небольшого, но быстрого и точного поворота, например: механизм поворота стеклышка телескопа.

На схеме также указан датчик положения, это энкодер **Maxon Sensor MR тип M**, интегрированный в двигатель еще на предприятии-изготовителе.



Рисунок 5 – Энкодер Maxon Sensor MR

Задание 3.1

Определимся с видом передаточных функций всех устройств, входящих в состав привода, и рассчитаем их параметры.

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{k_{дв}}{T_m T_{я} s^2 + T_m s + 1} \quad (4)$$

где:

$\frac{R_{я} J}{k_{эм}^2} = T_m$ – электромеханическая постоянная времени двигателя, с

$\frac{L_{я}}{R_{я}} = T_{я}$ – электромагнитная постоянная времени якоря двигателя, с

$k_{дв} = \frac{1}{k_{эм}}$ – коэффициент передачи двигателя, $1/\text{с} \cdot \text{В}$

Так как в данном анализе системы мы пренебрегаем электромагнитной постоянной ввиду ее малости ($T_{я} \rightarrow 0$) по сравнению с другими постоянными времени, то используем передаточную функцию вида

$$W(s) = \frac{k_{дв}}{T_m s + 1} \quad (5)$$

где:

$T_m = \frac{J R_{я} \omega_{ном}^2}{(U_{ном} - I_{яном} R_{я})^2}$ – электромеханическая постоянная времени двигателя, с

Расчет параметр передаточной функции:

$$k_{эм} = 0.1036, 1/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$k_{дв} = 9.6482, 1/\text{с} \cdot \text{В}$$

$$T_M = 12667, \text{с}$$

$$T_я = 0.0264, \text{с}$$

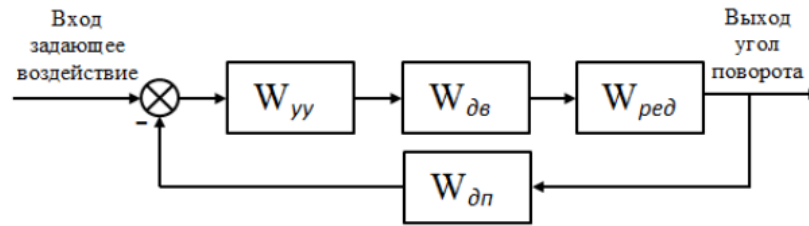


Рисунок 6 – Структурная схема системы управления общего вида

Проведя расчет всей системы управления, получили данную передаточную функцию для разомкнутой системы по углу поворота вала двигателя:

$$W_{os}(s) = \frac{16.5}{0.0005s^2 + s}$$

И для замкнутой системы:

$$W_{cs}(s) = \frac{0.008s^2 + 16.5s}{0.001s^3 + s^2 + 16.5s}$$

Определение минимального допустимого коэффициента передачи системы.

Найдём минимальное значение коэффициента усиления разомкнутой системы, при котором выполняется требуемый показатель качества 4.5 градуса, при скорости вращения двигателя 390 град/с. Определим угол, на который повернётся входной вал за 1 с.

Тогда

$$k_{min} = \frac{65}{4.5} = 14 \frac{1}{с}$$

$$k_n = \frac{k_{дв} \cdot k_{yy}}{k_{ред}} = 16.5$$

Т.к. $k_{min} < k_n$, то подключение дополнительного усилителя не требуется.

Задание 3.2

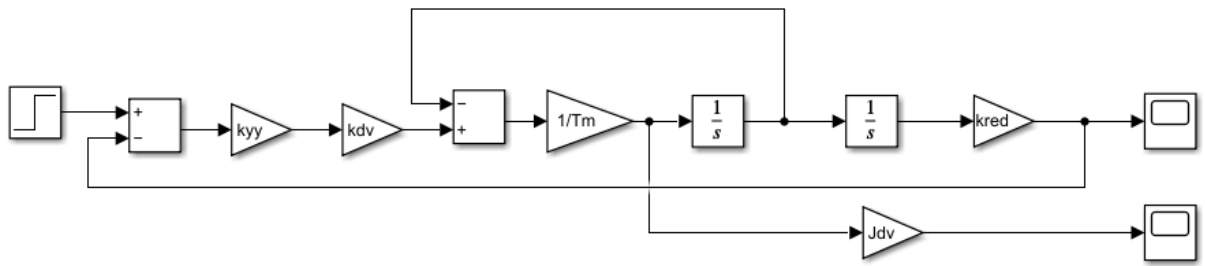


Рисунок 7 – Схема привода в замкнутом состоянии

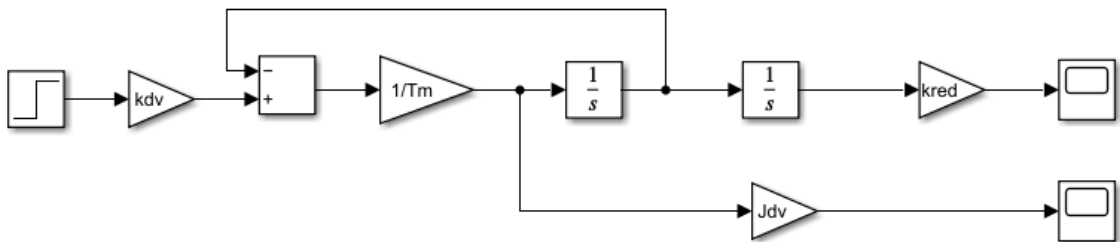


Рисунок 8 – Схема привода в замкнутом состоянии

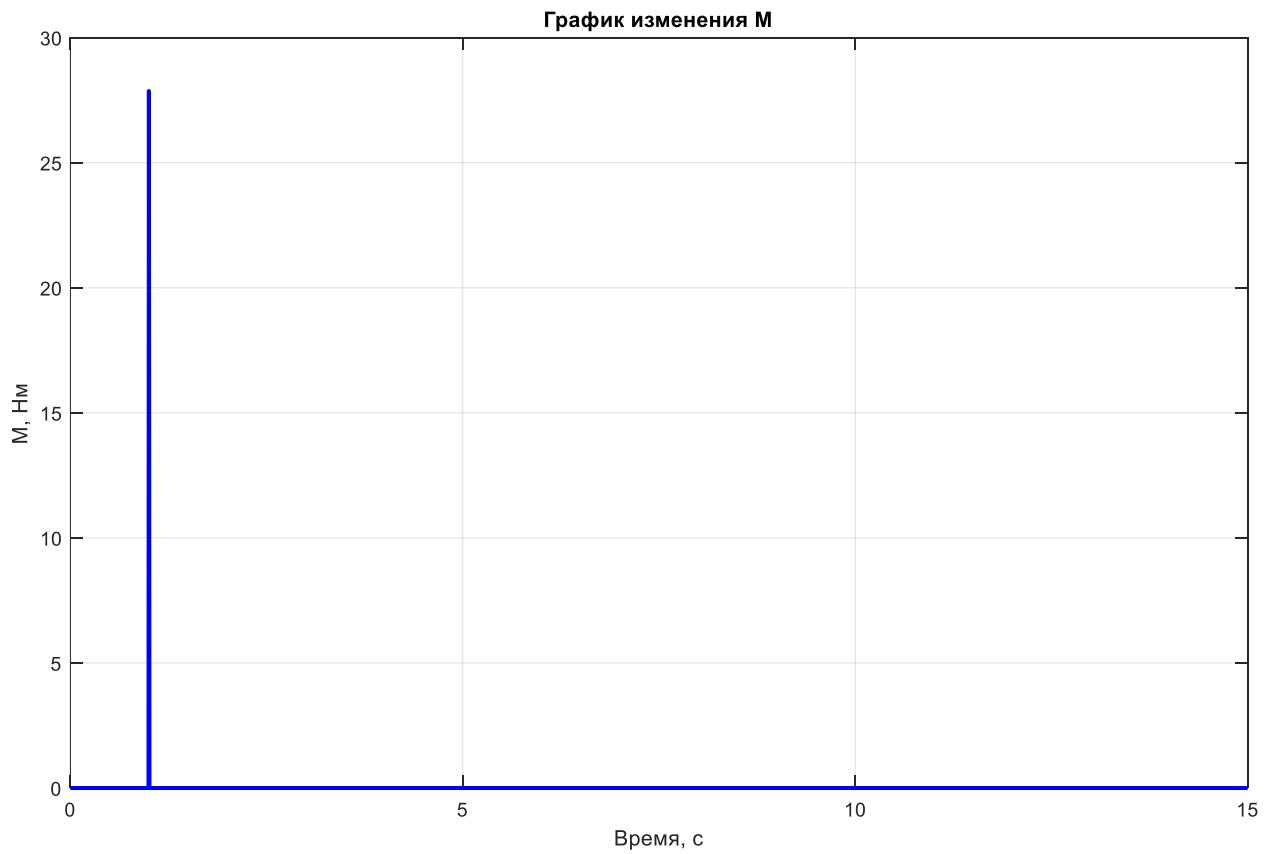


Рисунок 9 – График изменения М разомкнутой системы

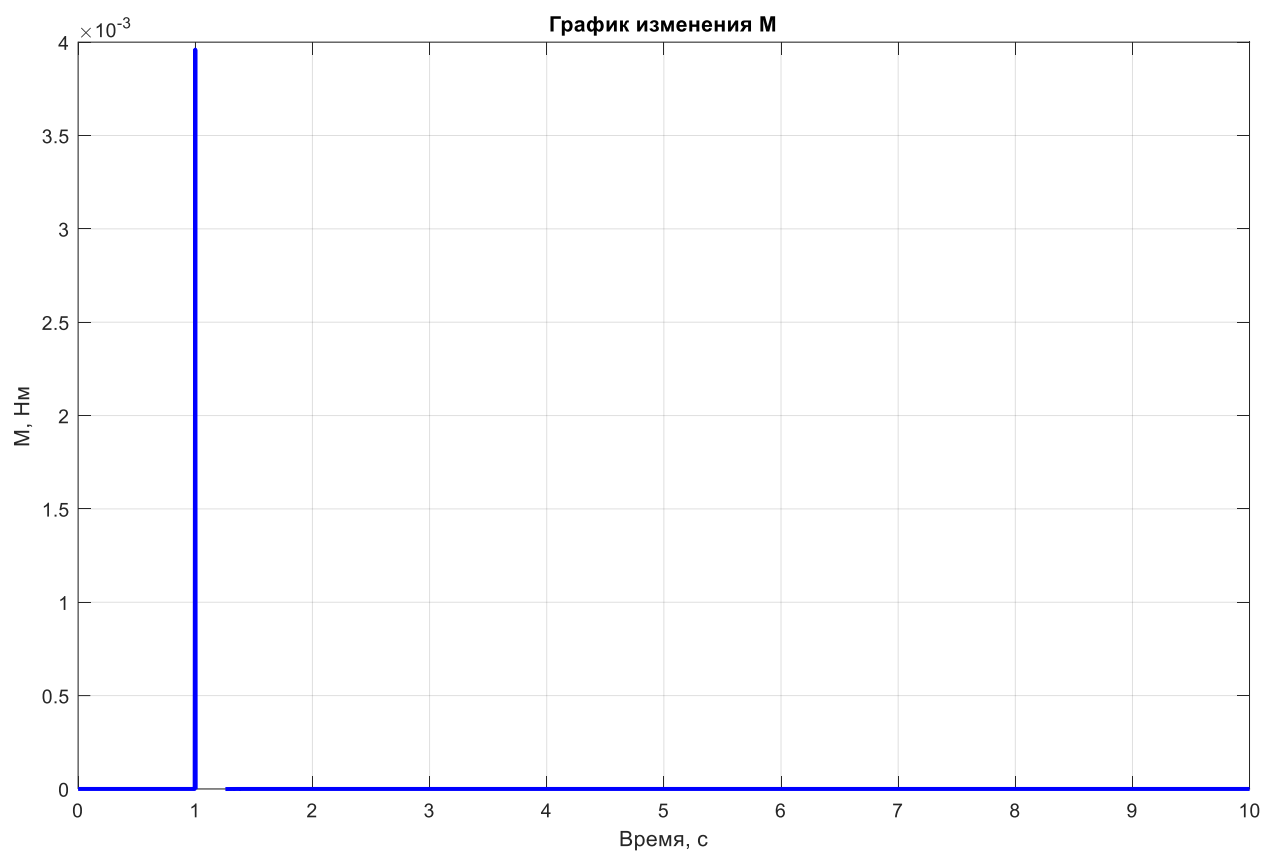


Рисунок 10 – График изменения M замкнутой системы

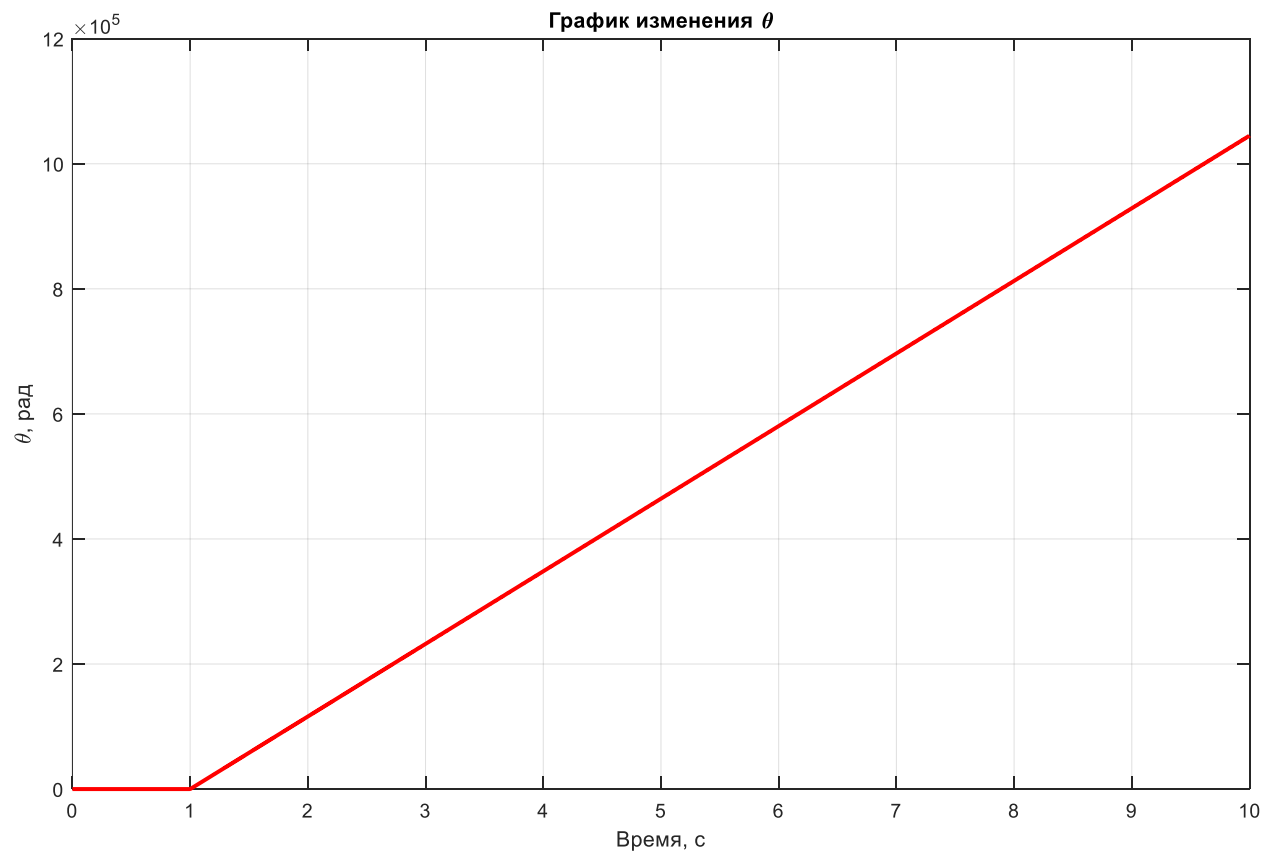


Рисунок 11 – График изменения θ разомкнутой системы

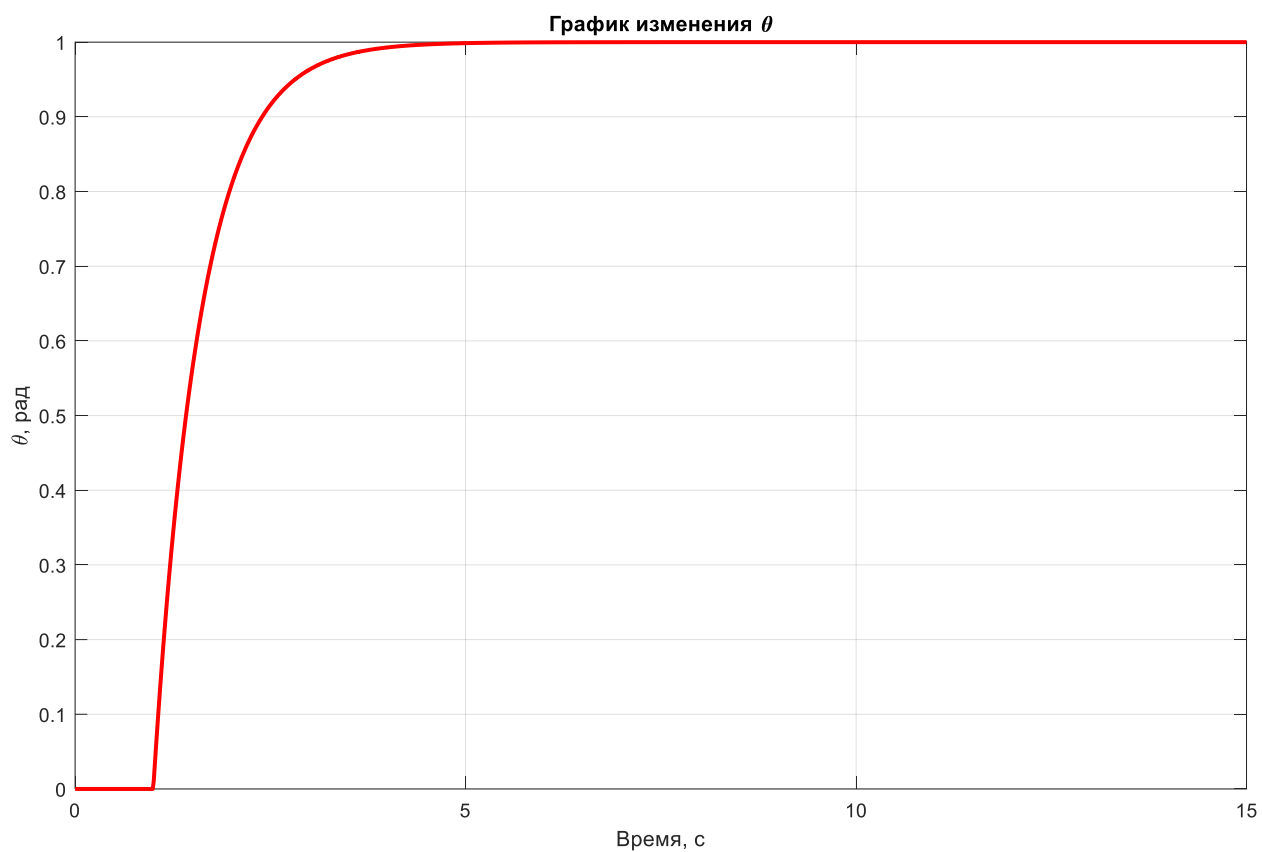


Рисунок 12 – График изменения θ замкнутой системы

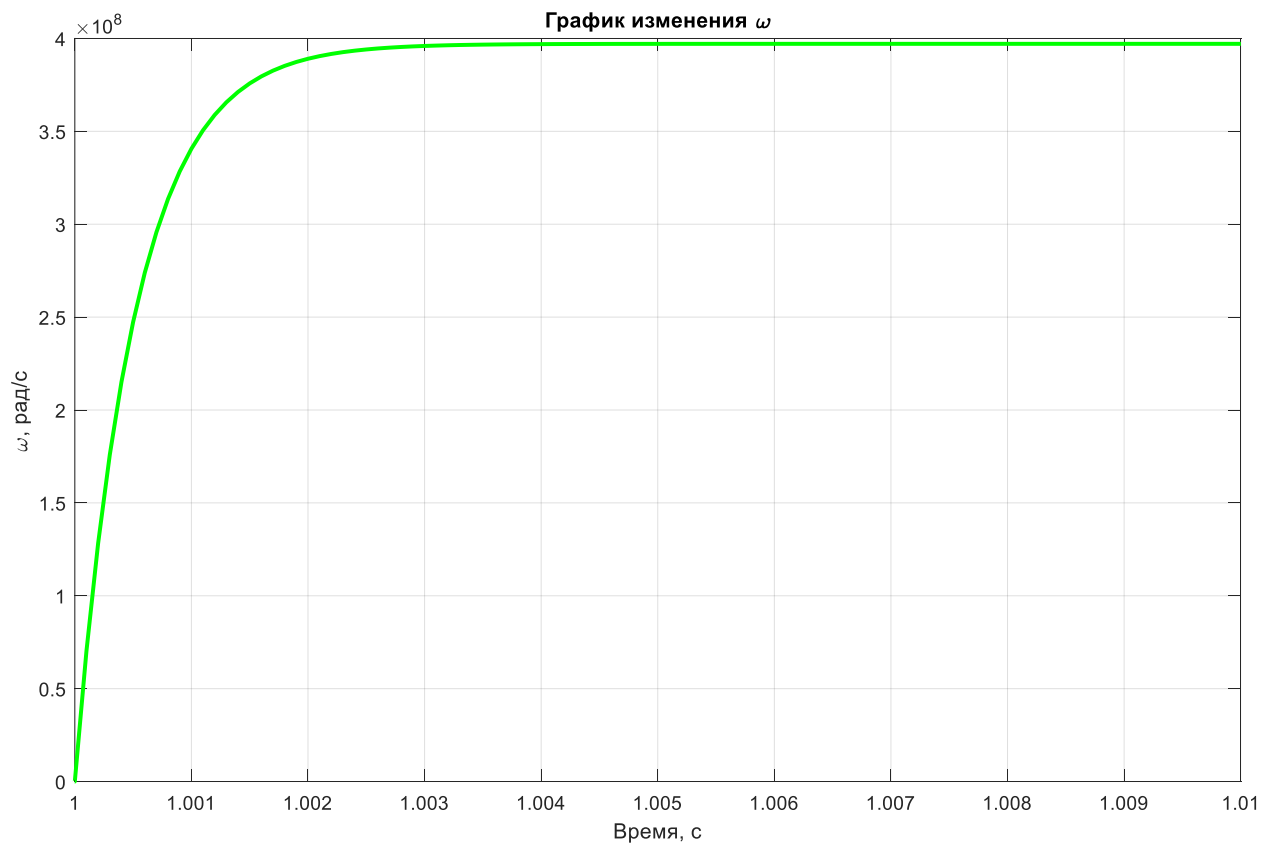


Рисунок 13 – График изменения ω разомкнутой системы

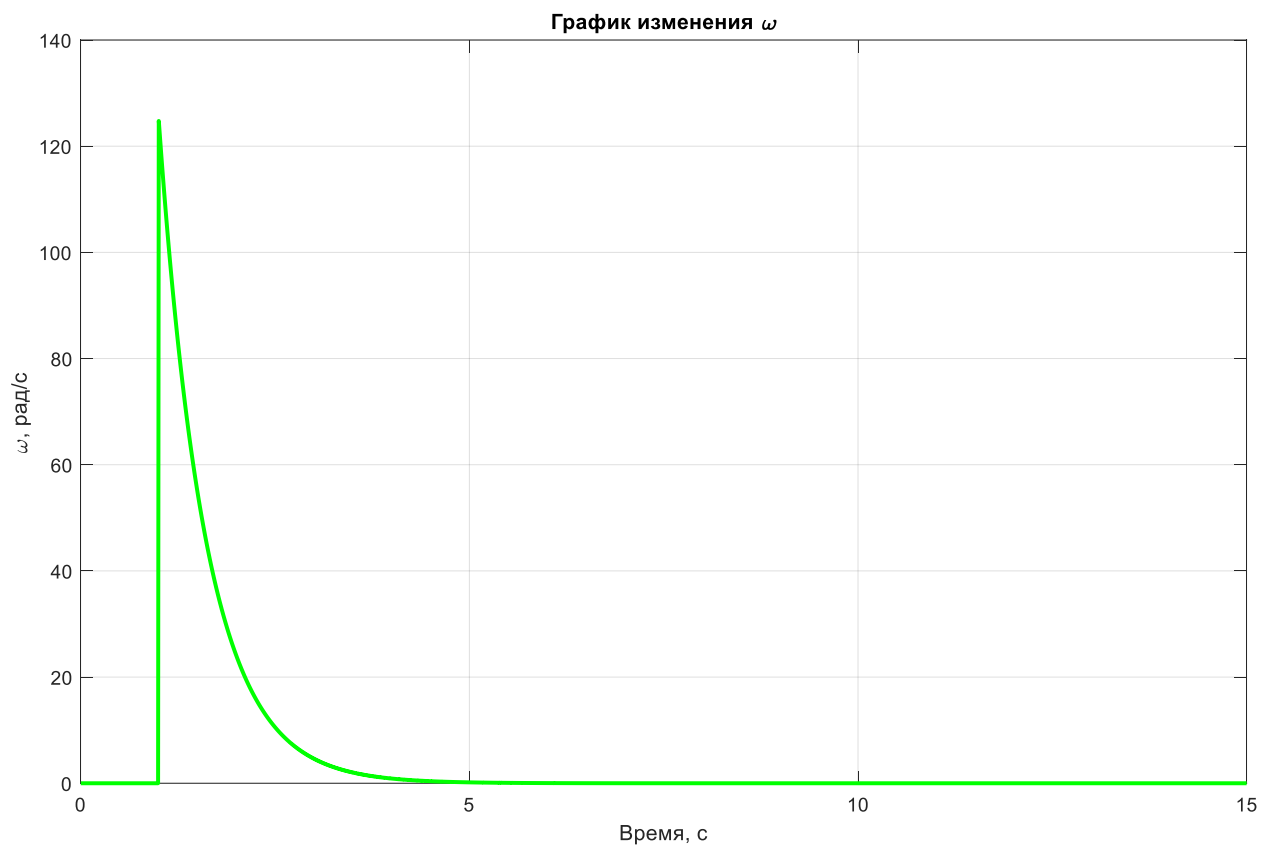


Рисунок 14 – График изменения ω замкнутой системы

Определим показатель колебательности системы

Этот параметр используется для определения запаса устойчивости. Его можно вычислить по значению модуля частотной передаточной функции замкнутой системы

$$|\Phi(j\omega)| = M$$

$$W_{cs}(j\omega) = \frac{0.008(j\omega)^2 + 16.5j\omega}{0.001(j\omega)^3 + (j\omega)^2 + 16.5j\omega}$$

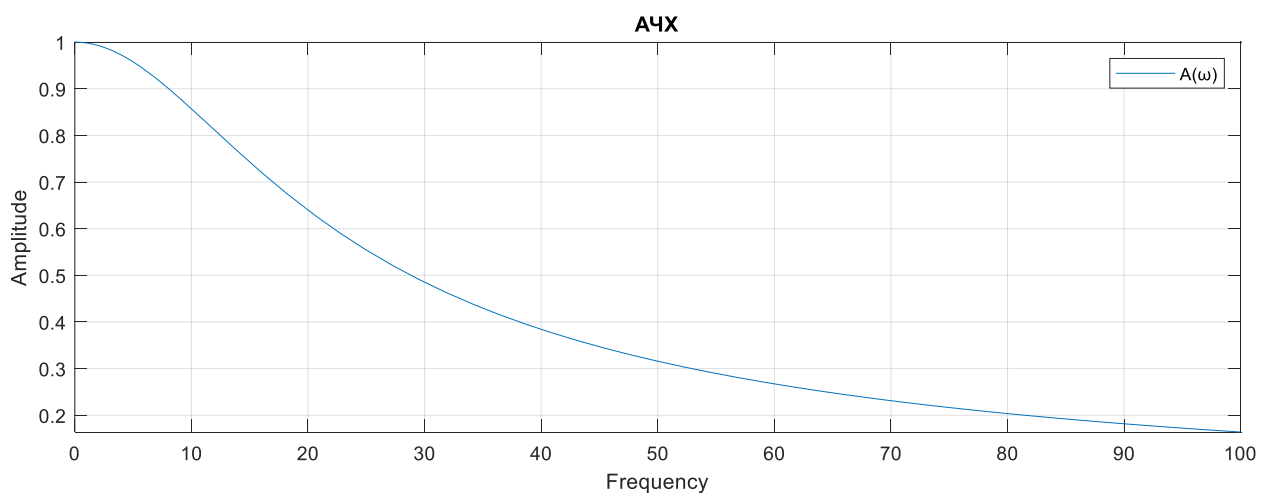


Рисунок 15 – График АЧХ замкнутой системы

В нашем случае показатель колебательности системы ≤ 1 , т.к. резонансные пики не наблюдаются на графиках АЧХ и ФЧХ. Физический смысл этой оценки заключается в том, что она показывает максимально возможное отношение амплитуды регулируемой величины к амплитуде гармонического задающего воздействия. Косвенным показателем колебательности является также запас устойчивости, при уменьшении которого колебательность системы увеличивается.

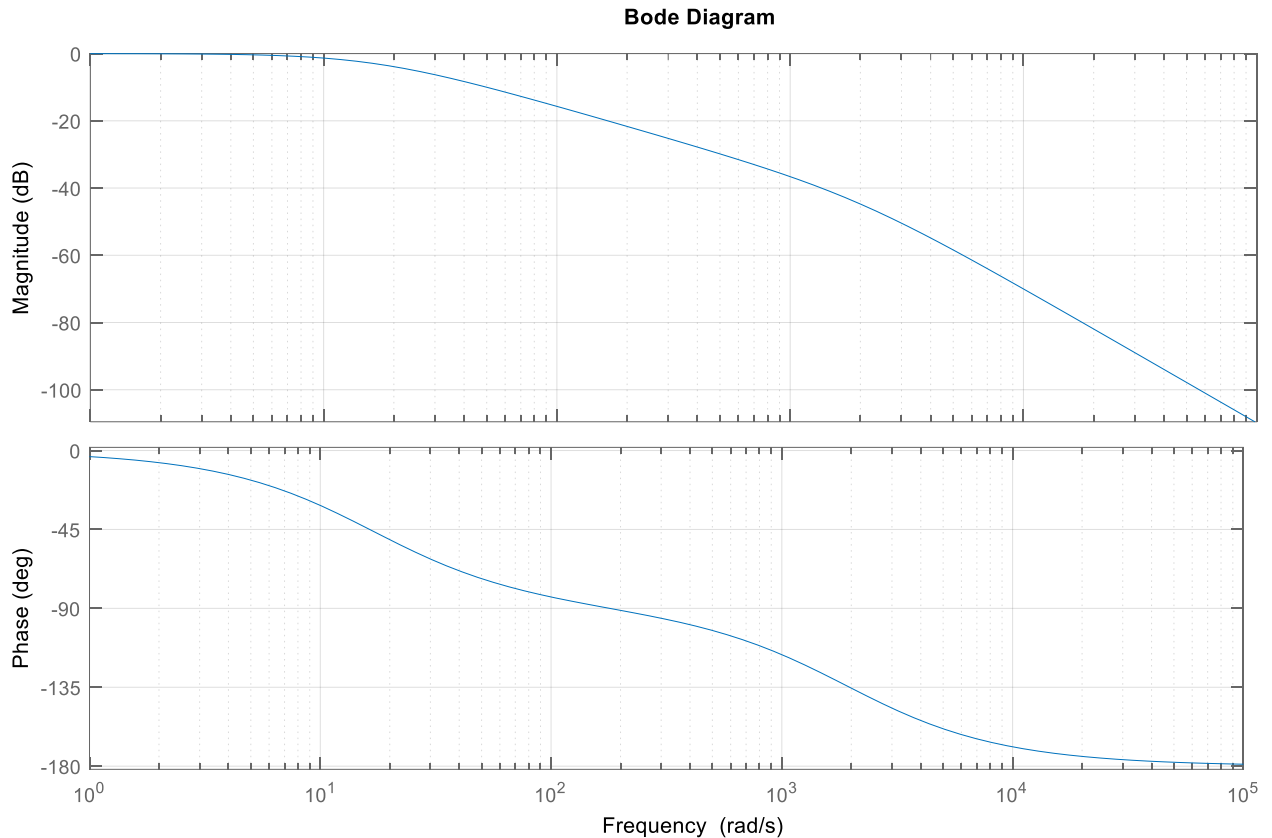


Рисунок 16 – ЛАФЧХ системы

Задание 3.3

Проведем синтеза регулятора с использованием полинома Ньютона. Запишем желаемую передаточную функцию:

$$W_j(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

Далее для нее рассчитаем регулятор, который при замыкании нашей $W_{os}(s)$ системы будет давать $W_j(s)$. После проведем моделирование системы с синтезированным регулятором.

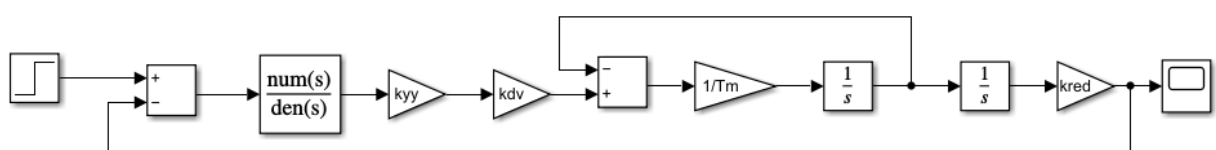


Рисунок 17 – Схема привода с рассчитанной передаточной функцией регулятора

Обоснование необходимости регулятора

На основании заданных передаточных функций мы построили схему привода без регулятора. По виду переходной характеристики, а также графику изменения w замкнутой системы (рисунок 14) можно сказать, что не все имеющиеся показатели качества удовлетворяют заданным: максимальная угловая скорость вращения нагрузки во много раз превышает скорость по техническому заданию. Однако показатель колебательности системы находится дает понять, что система не колеблется, значит, регулятору не придется исправлять эту проблему.

После введения в систему передаточной функции регулятора параметры системы стали удовлетворять заданным: скорость вращения находится в пределах допуска.

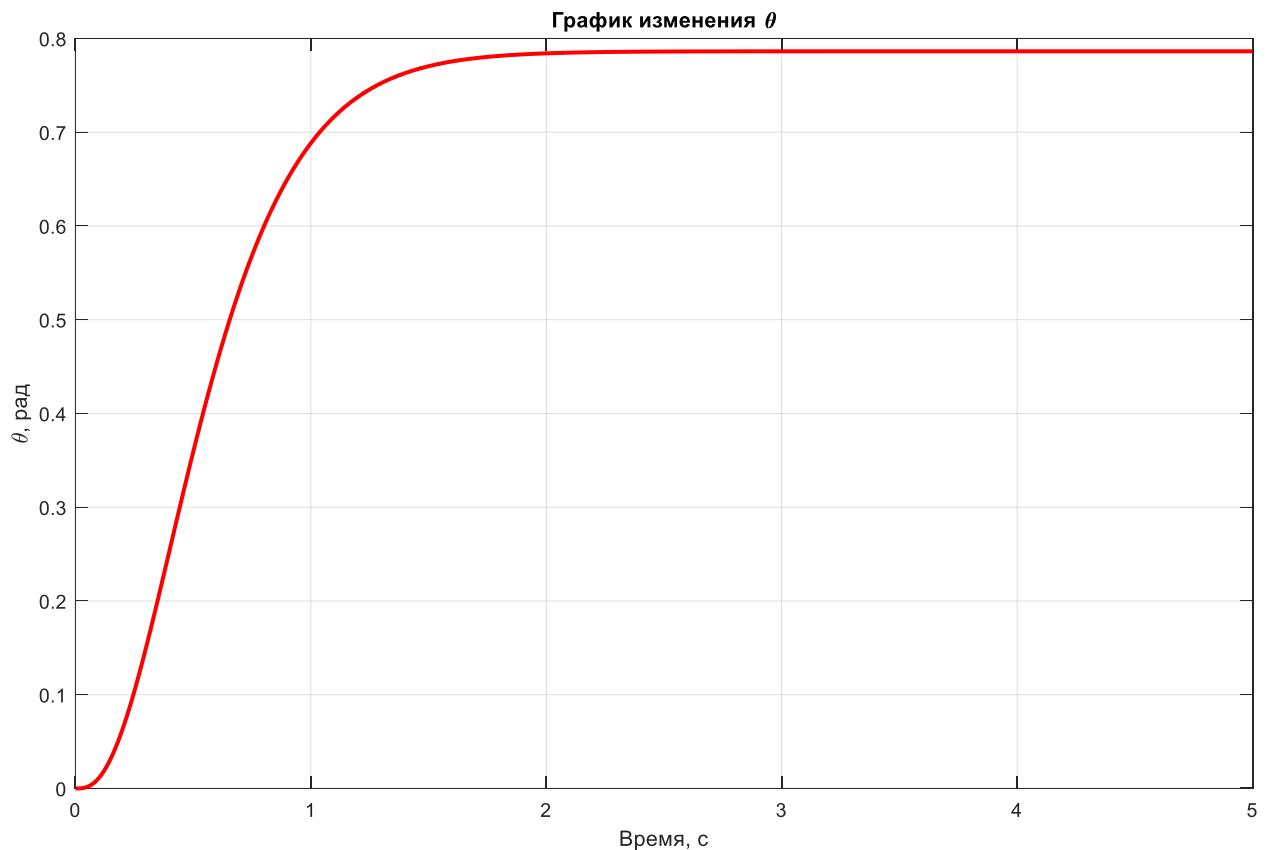


Рисунок 18 – График изменения θ замкнутой системы с регулятором

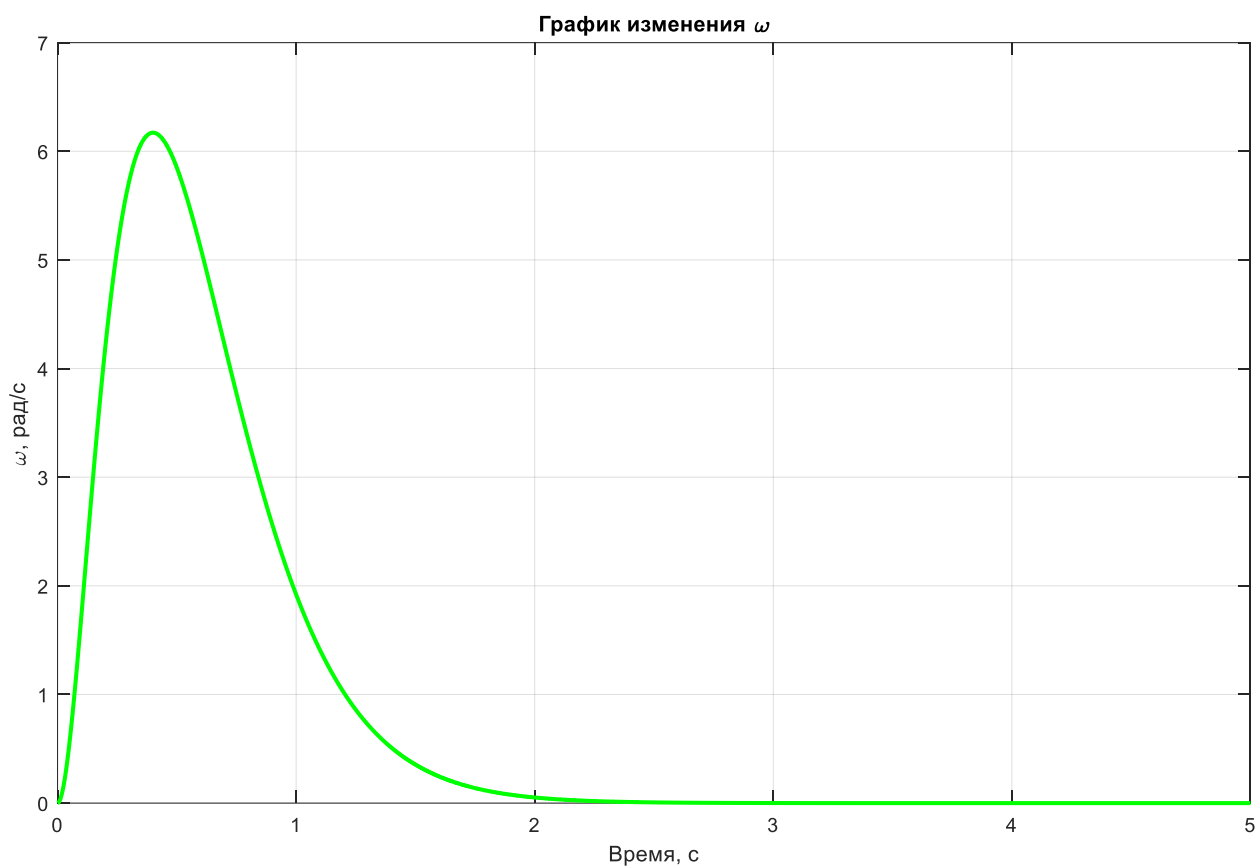


Рисунок 19 – График изменения ω замкнутой системы

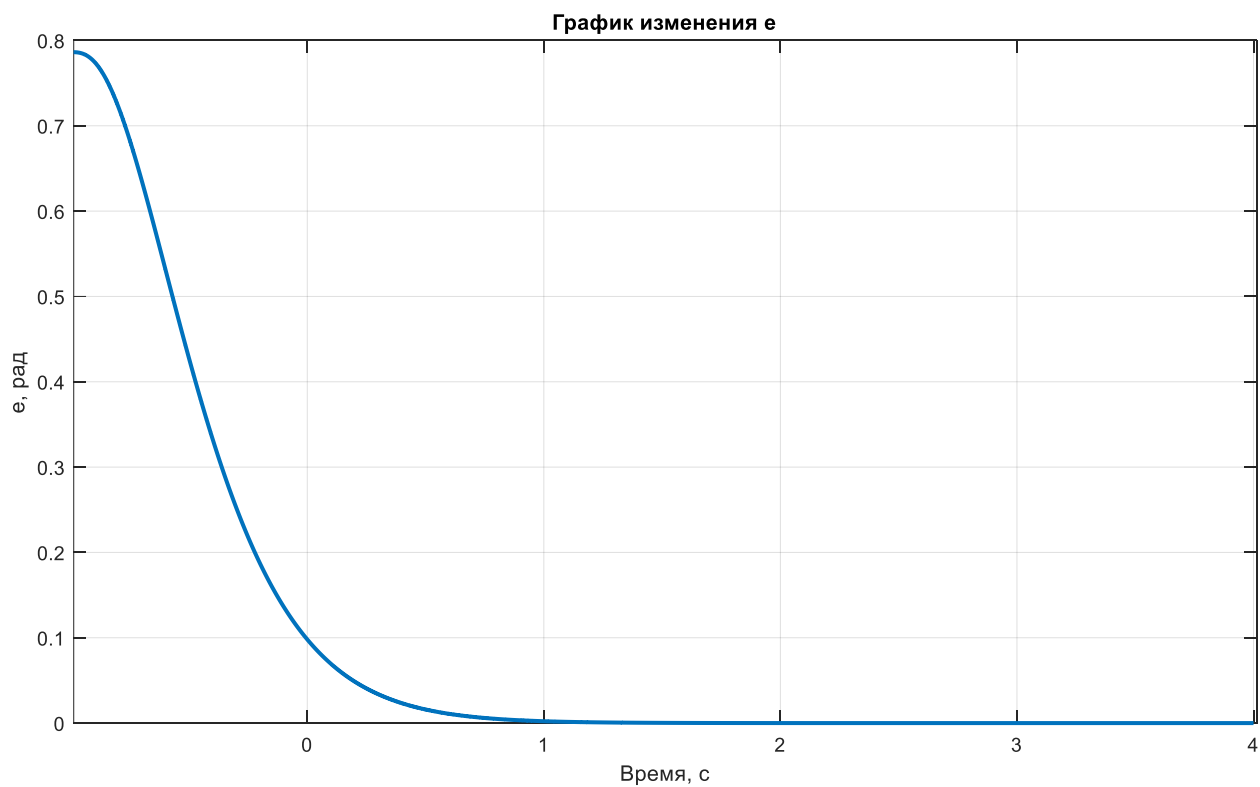


Рисунок 20 – График изменения ошибки замкнутой системы

Максимальное угловое перемещение ОУ не превышает границ, система не колеблется, а ошибка сходится к нулю.

Рассчитаем эквивалентное гармоническое воздействие:

$$g(t) = A \sin(\omega t)$$

Где коэффициенты равны:

$$\omega = \frac{\varepsilon_M}{\Omega_M} = 0.29 \text{ с}^{-1} \quad A = \frac{\Omega_M^2}{\varepsilon_M} = 23.12$$

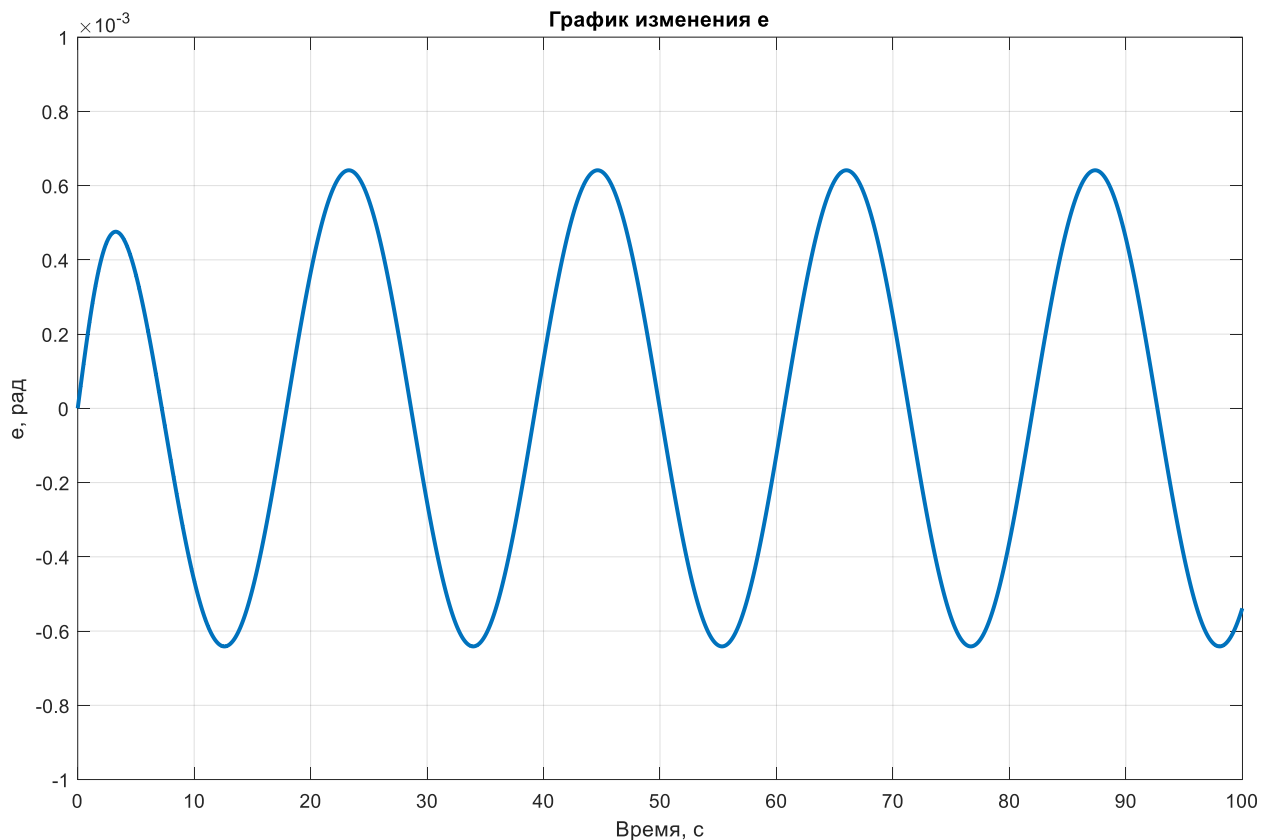


Рисунок 21 – График изменения ошибки замкнутой системы при гармоническом сигнале

График ошибки меньше $7 \cdot 10^{-4}$ радиан ≈ 0.004 градусов, следовательно, требования по допустимому показателю колебательной системы и допустимой динамической ошибке выполнены.

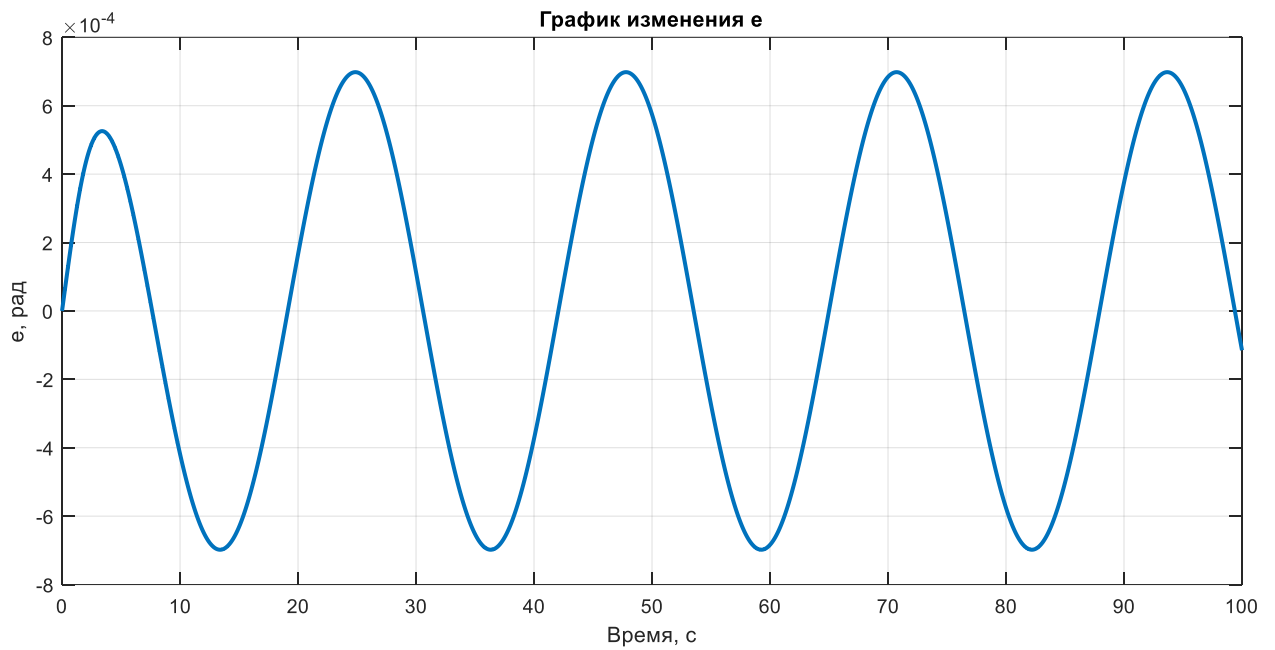


Рисунок 22 – График изменения ошибки замкнутой системы при гармоническом сигнале и увеличенном моменте инерции

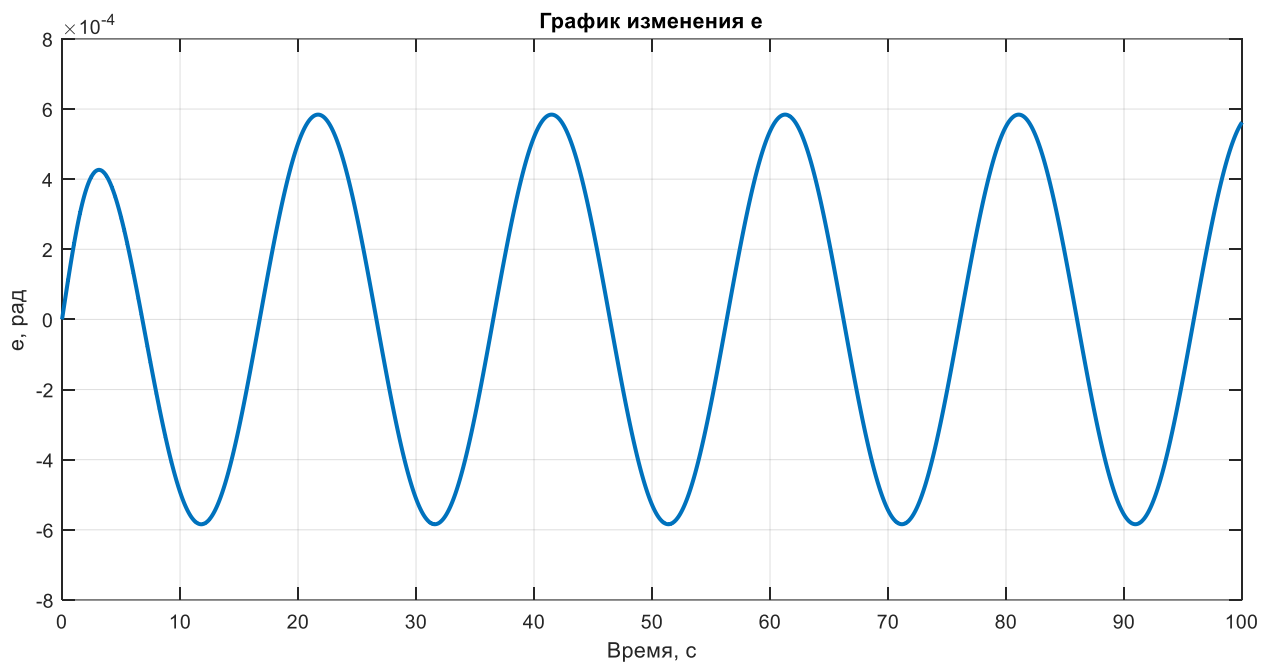


Рисунок 23 – График изменения ошибки замкнутой системы при гармоническом сигнале и уменьшенном моменте инерции

В ходе данного задания получилось синтезировать регулятор. Как можно наблюдать, система управляется быстрее с данным регулятором, чем без него (а именно за время меньшее, чем 3 секунд). Перерегулирования не было, что означает, что показатель колебательности близок к 1. Ошибка по углу показала, что погрешность составляет около 0.7%, что входит в изначальный диапазон равный 1%. Также изменения в моменте инерции не дали значительных изменений в результирующих графиках

Заключение

В ходе выполнения лабораторной работы были рассчитаны и подобраны параметры двигателя постоянного тока и редуктора на компонентах Матрон, соответствующие заданным требованиям к нагрузке, устойчивости и колебательности системы.

Во второй части работы была создана функциональная схема, включающая все элементы электрического привода. Были подобраны все необходимые технические средства системы по каталогам, проверена их совместимость и соответствие требованиям. В результате была спроектирована электромеханическая система углового позиционирования, удовлетворяющая техническому заданию.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. ДПТ Maxon DC motor A-max 16 (110046)
2. Рядный редуктор Maxon GS 16 A
3. Энкодер Maxon Sensor MR тип M
4. Сервоконтроллер ESCON Servo Controller 36/2 DC
5. Плотников С.А., Семенов Д.М., Фрадков А.Л., Математическое моделирование систем управления. – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 193 с.
6. В.И. Бойков, А.Б. Бушуев, С.В. Быстров, В.В. Григорьев, Н.А. Дударенко. Исследование динамических характеристик электромеханических систем. Учебно-методическое пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2022. – 70с.