

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО"

О Т Ч Ё Т

по результатам выполнения комплексной лабораторной работы по
дисциплине «Динамика электромеханических систем»

Руководитель: доцент факультета СУиР Быстров С.В.

Исполнитель: студент группы R33423 Евстигнеев Дмитрий

Санкт-Петербург

2022

Содержание

Часть 1.	4
1. Техническое задание:	4
2. Ход работы:	4
2.1. Расчет номинальной мощности двигателя	4
2.2. Выбор двигателя	4
2.3. Дополнительное задание: Тепловой расчёт (нагрев обмоток)	5
2.4. Расчёт оптимального передаточного числа редуктора	6
2.5. Выбор редуктора	6
2.6. Проверка на перегрузочную способность	6
Вывод.....	7
Часть 2	8
1. Техническое задание:	8
2. Ход работы:	8
2.1. Выбор задающего устройства и устройства управления:	8
2.2. Выбор датчика обратной связи по положению:	9
2.3. Выбор источники питания:	9
2.4. Разработаем функциональную схему привода:	9
Дополнительное задание: Система электронных соединений	10
Вывод.....	10
Часть 3.	11
1. Техническое задание:	11
2. Ход работы:	11
2.1. Расчет параметров передаточных функций	11
2.2. Коэффициент передачи системы:	11
2.3. Коэффициент передачи УУ:	11
2.4. Синтез регулятора и моделирование вместе с ним	12

2.5. Найдем эквивалентное гармоническое воздействие системы по заданным её характеристикам	13
2.6. Проведем моделирование системы с регулятором в среде Simulink	14
2.7. Исследуем влияние изменения момента инерции нагрузки на динамические характеристики системы с регулятором.	15
Вывод.....	16

Часть 1.

1. Техническое задание:

По заданным характеристикам механической нагрузки (объекта управления ОУ) 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.

Таблица 1 – Исходные данные варианта №5

№ варианта	M_H , Нм	J_H , кг*м ²	Ω_M , об/мин	ε_M , рад/с ²	α_{\max} , град	M	δ , %	Тип двигателя
5	35	90	1,8	0,8	180	1,0	1	АД

2. Ход работы:

2.1. Расчет номинальной мощности двигателя

Рассчитаем требуемую минимальную мощность двигателя

$$P_{\text{дв.}min} = 2(M'_H + J_H \varepsilon_M) \omega_m, \quad (1.1)$$

$$\text{где } M'_H = \frac{M_H}{\eta_P}; \eta_P \approx 0,9 - \text{КПД редуктора}; \omega_m = \frac{2\pi}{T} = 0,1885 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$$

$$M'_H = \frac{35}{0,9} = 38,9 \text{ (Нм)}$$

$$P_{\text{дв.}min} = 2(38,9 + 90 * 0,8) * 0,1885 = 41,81 \text{ (Вт)}$$

2.2. Выбор двигателя

Выбор двигателя производился в каталоге [\[6\]](#)

Был выбран следующий двигатель: **ABE 051 4M**

Мощность двигателя: 0,04 (кВт)

Из каталога возьмем необходимые для дальнейших расчётов параметры:

Момент инерции ротора двигателя: $J_{\text{дв}} = 36 * 10^{-9} \text{ (кг/м}^2\text{)}$

Номинальный момент: $M_{\text{ном}} = 0,28 \text{ (Нм)}$

Номинальная скорость: $\omega_{\text{ном}} = 141,37 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$

Потребляемый ток $I_n = 0,4$ (А).

2.3. Дополнительное задание: Тепловой расчёт (нагрев обмоток)

Нагрев двигателя происходит из-за потерь, которые напрямую зависят от величины тока в обмотках, а он, в свою очередь, определяет момент, который при постоянной скорости напрямую связан с мощностью. Поэтому **потери, момент, ток и мощность** являются **косвенными характеристиками нагрева обмоток** и для выполнения поставленной задачи достаточно рассчитать их для основных режимов работы двигателя и сравнить их с номинальными (паспортными) значениями двигателя.

Периодически-кратковременный:

Важной характеристикой режима является продолжительность включения:

$$\theta = \frac{t_p}{t_p + t_{\pi}} = \frac{0.5}{1.5 + 0.5} = 4 \quad (1.2.1)$$

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_i^2 t_{pi} \theta_{\phi}}{\sum t_{pi} \theta_n}} < M_n ,$$

где θ_{ϕ} – фактическая продолжительность включения;

θ_n – номинальная продолжительность включения.

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_i^2 t_{pi} \theta_{\phi}}{\sum t_{pi} \theta_n}} = \sqrt{\frac{0.2^2 * 1.51}{(1.51 + 1.5 + 1.51)} \frac{4.2}{4}} = 0,014 \text{ (Нм)} \quad (1.2.2)$$

$$I_{\text{экв}} = 0.33 \text{ (А)}$$

Особенностью теплового расчета асинхронных двигателей из-за больших пусковых токов является необходимость в дополнительной проверке ограничение на допустимое количество пусков час, оно определяется по формуле

$$h_{\text{доп}} = \frac{36(100 - \theta_{\phi})}{t_{\pi}(I_{\pi}/I_n)^2} = \frac{36(100 - 4.2)}{0.5(1.5)^2} = 3\,065,6 \quad (1.2.3)$$

А фактическое число пусков определяется по формуле

$$h_{\phi} = \frac{3600}{t_p + t_{\pi}} = 1800 \quad (1.2.4)$$

Условием годности двигателя по нагреву является $h_{\phi} < h_{\text{доп}}$.

Таблица 2 – Сравнение косвенных характеристик нагрева обмоток

Режим работы	Число пусков	Момент	Ток	Мощность
Паспортные значения	3066	0.28 (Нм)	0.4 (А)	0,04 (кВт)
Периодически-кратковременный	1800	0,014 (Нм)	0.33 (А)	0,0418 (кВт)

2.4. Расчёт оптимального передаточного числа редуктора

$$i_{po} = \sqrt{\frac{M'_H + J_H \varepsilon_m}{1.2 J_{дв} \varepsilon_m}} = \sqrt{\frac{38.9 + 90 * 0.8}{1.2 * 36 * 10^{-9} * 0.8}} \approx 56647 \quad (1.3)$$

Так как передаточное число получилось слишком большим, посчитаем его другим способом:

$$i_p = \frac{\omega_{ном}}{\omega_m} = \frac{141,37}{0.1885} = 750$$

2.5. Выбор редуктора

Выбор редуктора производился в каталоге: [\[8\]](#)

Был выбран следующий редуктор: **M1LA4** с передаточным числом $i_p = 736$.

КПД редуктора: $\eta_p = 0.9$

Момент инерции редуктора можно посчитаем по данной формуле:

$$J_p = 0,2 * 36 * 10^{-9} = 7.2 * 10^{-9} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right) \quad (1.4)$$

2.6. Проверка на перегрузочную способность

Произведем проверочный расчёт $M_{тр}$ и $P_{дв}$

Динамический момент определяется из выражения:

$$M_{дин} = \left(J_{дв} + J_p + \frac{J_H}{i_p^2} \right) i_p \varepsilon_m = \left(36 * 10^{-9} + 7.2 * 10^{-9} + \frac{90}{736^2} \right) * 736 * 0.8 = 0.098 \text{ (Нм)} \quad (1.5)$$

Так как мы рассчитываем для реактивной нагрузки, то статистический момент будет равен:

$$M_c = \frac{M_H}{\eta_P i_p} = \frac{35}{0.9 * 736} = 0.053 \text{ (Нм)} \quad (1.6)$$

Теперь можно рассчитать суммарный требуемый момент от двигателя:

$$M_{тр} = \left(J_{дв} + J_p + \frac{J_H}{i_p^2} \right) i_p \varepsilon_m + \frac{M_H}{\eta_P i_p} = 0.098 + 0.053 = 0.151 \text{ (Нм)} \quad (1.7)$$

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

$$P_{тр} = M_{тр} * i_p * \omega_m = 0.151 * 736 * 0.1885 = 20.95 \text{ (Вт)} \quad (1.8)$$

Таким образом, условие $P_{дв} > P_{тр}$ удовлетворяется: $41.81 \text{ Вт} > 20.95 \text{ Вт}$.

Определение перегрузочной способности по моменту

$$\gamma_M = \frac{M_{тр.с}}{M_{дв.н}} = \frac{0.151}{0.28} \approx 0.54 \quad (1.9)$$

где $M_{тр.с}$ – скорректированное значение требуемого момента (с учетом $J_{дв}$);

$M_{дв.н}$ – номинальный момент выбранного двигателя.

Определение перегрузочной способности по скорости

$$\alpha = \frac{i_p * \omega_m}{\omega_{дв.н}} = \frac{736 * 0.1885}{141.37} \approx 0.981368 \quad (1.9)$$

где ω_m – максимальная угловая скорость нагрузки

$\omega_{дв.н}$ – номинальная скорость вращения двигателя,

i_p – передаточное число редуктора.

Вывод: в итоге выполнения первой части работы, мы выбрали двигатель по данной нам информации и выяснили, что выбранный двигатель практически полностью подходит нам по перегрузке.

Часть 2

1. Техническое задание:

Для заданного типа двигателя разработать функциональную схему привода. Выбрать по каталогам все технические средства системы, включая источники питания, обеспечивая возможность их подключения в соответствии с функциональной схемой.

2. Ход работы:

2.1. Выбор задающего устройства и устройства управления:

В качестве управляющего устройства был выбран **Delta VFD40WL21B 40Вт**, выбранный в каталоге [\[7\]](#)

Проверим, выполняются ли общие требования для всех типов приводов:

- Номинальная мощность (ток) устройства управления должна быть больше или равен номинальной мощности (току) двигателя

Номинальная мощность двигателя: $P_{н.д} = 40 \text{ Вт}$

Номинальная мощность преобразователя: $P_{н.п} = 40 \text{ Вт}$

- Напряжение питания должно соответствовать параметрам общего источника энергии.

Напряжение питания преобразователя: $V_k = 220 \text{ В}$

- Диапазон изменения выходного напряжения должен соответствовать возможным изменениям напряжения управления двигателя.

Диапазон изменения выходного напряжения преобразователя: $V_{out} < 325 \text{ В}$
постоянного тока

Номинальное напряжение двигателя: $V_{н.д} = 220 \text{ В}$

- Наличие стандартных интерфейсов:

Интерфейс RS-485 – универсальный порт, через который можно настроить взаимодействие практически любым удобным методом.

- Микроконтроллер устройства управления, должен иметь достаточное количество входов и выходов:

В предусмотрены 4 дискретных и 2 аналоговых входа и 2 программируемых релейных выхода

Выбранный прибор может работать на основе программного кода, поэтому задающее устройство было реализовано в цифровом виде.

2.2. Выбор датчика обратной связи по положению:

В качестве датчика обратной связи по положению был выбран **Абсолютный энкодер AC220V 2.39N.M**, который имеет следующие характеристики:

- Диапазон измерения угла неограничен
- Разрешение 3000 импульсов/об
- Питающее напряжение 208–240 В переменного тока
- Выходной сигнал: кабель

Как видно из характеристик, выбранный датчик обратной связи по положению подходит для привода углового позиционирования, в котором максимальное угловое перемещение объекта управления $\alpha = 180^\circ$.

2.3. Выбор источники питания:

Электродвигатель имеет мощность 40Вт, а энкодер 750Вт. Суммарная мощность всех элементов привода $P_{sum} \approx 790\text{Вт}$, поэтому устройство управления и датчик обратной связи по положению запитаем блоком питания с мощностью $P_{бп} > 2 * P_{sum} \rightarrow P_{бп} > 1.6 \text{ кВт}$ и выходным напряжением $V_{бп.out} = 220 \text{ В}$ переменного тока.

Был выбран блок питания-розетка.

2.4. Разработаем функциональную схему привода:

Рисунок 2 – Обобщенная функциональная схема автоматизированного электропривода:

ИЭ – источник энергии (розетка), ПК – персональный компьютер (задающее устройство), УУ – управляющее устройство, Д – двигатель, Р – механическое преобразовательное устройство (редуктор), ДУП – датчик углового движения, ОУ – объект управления

2.5. Дополнительное задание: Схема электронных соединений

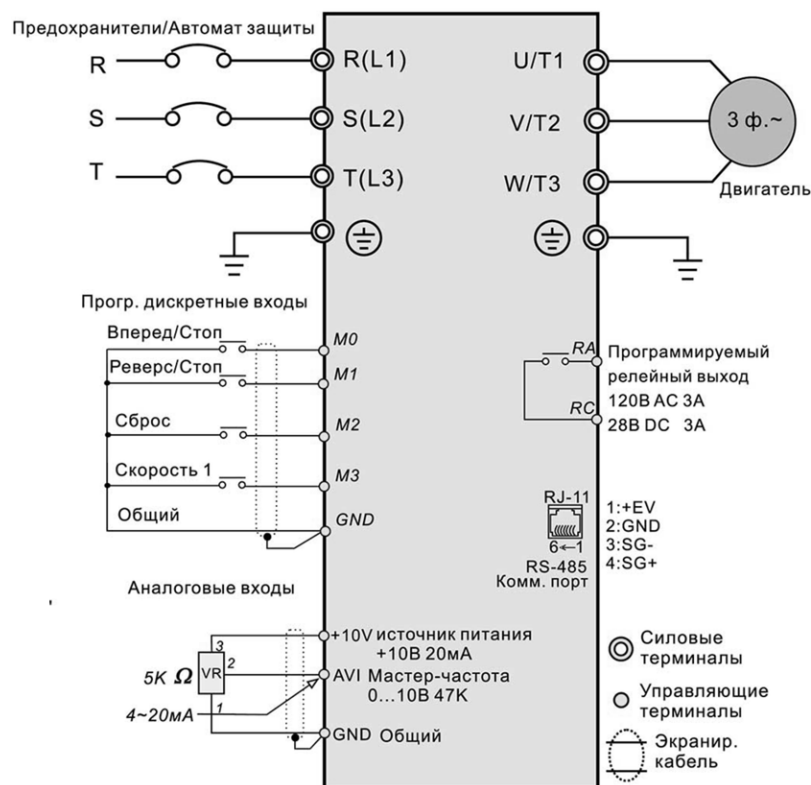


Рисунок 1 – Схема электронных соединений, выполненная по ГОСТ 2.702-2011

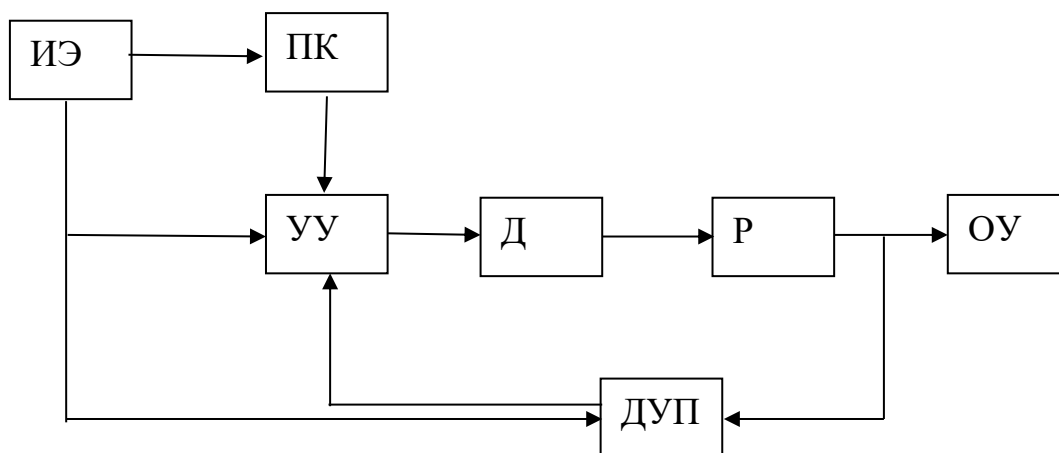


Рисунок 2 – Обобщенная функциональная схема автоматизированного электропривода

Вывод: для заданного типа двигателя разработали функциональную схему привода и выбрали технические средства системы.

Часть 3.

1. Техническое задание:

Определиться с видом передаточных функций всех устройств, входящих в состав привода. Рассчитать все параметры передаточных функций.

Математическое моделирование системы без регулятора.

Синтез регулятора и моделирование системы с ним.

2. Ход работы:

2.1. Расчет параметров передаточных функций

Двигатель:

$$k_u = \frac{M_H}{U_{yH}} = \frac{35}{220} = 0.16(\text{с}) \quad (3.1)$$

$$k_w = \frac{M_p - M_n}{w_H} = 0.00099 \quad (3.2)$$

$$T_m = \frac{J}{k_w} = 36.4 * 10^{-6} (\text{с}) \quad (3.3)$$

$$k_{дв} = \frac{k_u}{k_w} = 161.1 \quad (3.4)$$

$$W_{дв}(p) = \frac{k_{дв}}{T_m p^2 + T_m p} = \frac{161.1}{36.4 * 10^{-6} p^2 + 36.4 * 10^{-6} p} \quad (3.5)$$

Редуктор:

$$W_p(p) = k_p = \frac{1}{i} = \frac{1}{736} = 0.00136 \quad (3.6)$$

Энкодер:

$$W_э(p) = k_э = \frac{U_{вых}}{\Omega_{дв.н}} = 0.013 \quad (3.7)$$

2.2. Коэффициент передачи системы:

$$k = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{0.01} = 100 \quad (3.8)$$

2.3. Коэффициент передачи УУ:

$$k_u = \frac{k}{k_{дв} k_p k_э} = \frac{100}{161.6 \cdot 0.00136 \cdot 0.013} = 35000 \quad (3.9)$$

Математическое моделирование привода без регулятора

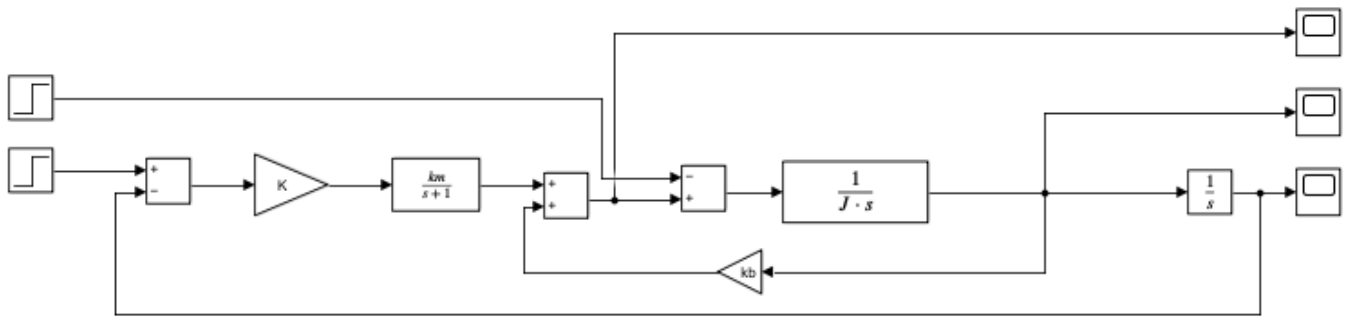
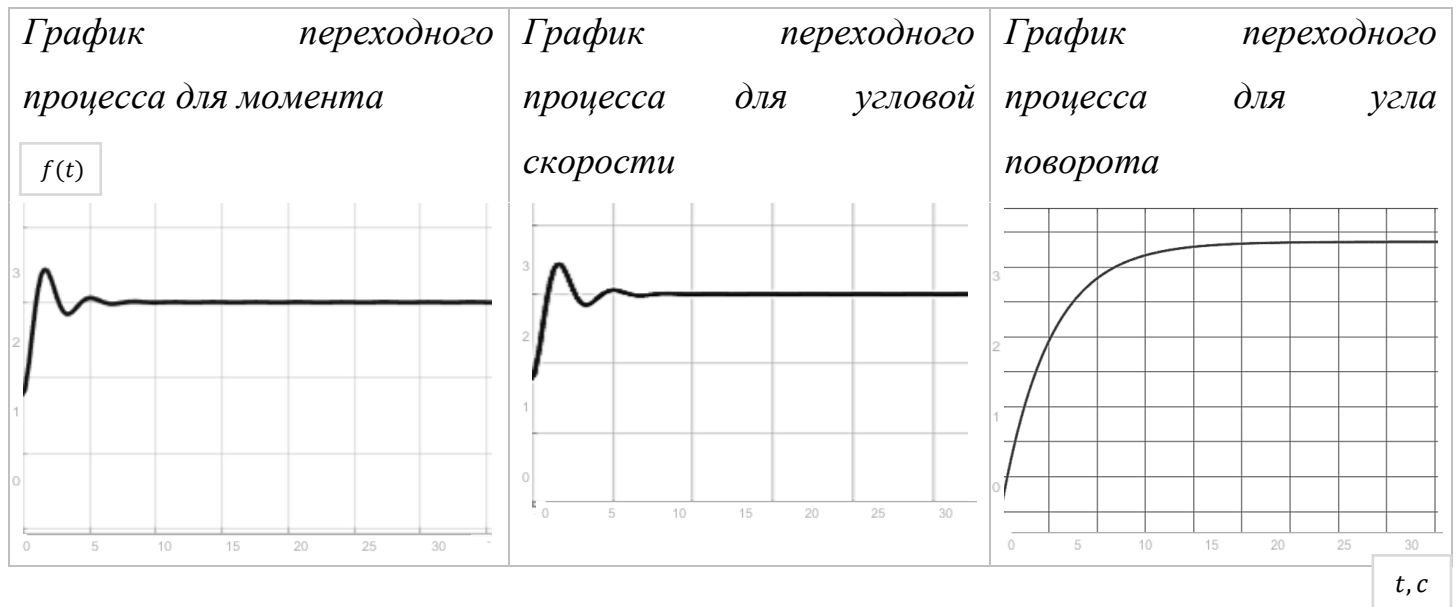


Рисунок 2 – Схема моделирования без регулятора в Simulink

Таблица 3 – Графики процессов в разомкнутом состоянии



Таблица 4 – Графики процессов в замкнутом состоянии



2.4. Синтез регулятора и моделирование вместе с ним

Синтезируем регулятор, который будет подходить заданным значениям:

Таблица 5 – Данные значения для синтеза регулятора

α max, град	M	$\delta, \%$
180	1,0	1

Произведем расчет при помощи полинома Ньютона, благодаря такому способу возможно добиться минимального перерегулирования системы.

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{161.1}{36.4 * 10^{-6} p^2 + 36.4 * 10^{-6} p}$$

$$W_{\text{замкн}}(p) = \frac{161.1}{36.4 * 10^{-6} p^2 + 36.4 * 10^{-6} p + 161.1}$$

Формула 9 – Формула полинома Ньютона 3 порядка:

$$p^3 + 3\omega p^2 + 3\omega^2 p + \omega^3 \quad (9)$$

Пусть желаемое время переходного процесса $t_n = 6.1$ (с)

Тогда: $\omega = \frac{t_n^*}{t_n} = \frac{6.1}{6.1} = 1$

$$W_{\text{ж}}(p) = \frac{1}{p^3 + 3p^2 + 3p + 1} - \text{желаемая}$$

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{W_{\text{ж}}(p)}{W_{\text{раз}}(p) - W_{\text{раз}}(p) \cdot W_{\text{т}}(p)}$$

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{2.23464 \times 10^{-10} (1 + p)}{3 + 3p + p^2}$$

2.5. Найдем эквивалентное гармоническое воздействие системы по заданным её характеристикам

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

$$\omega(t) = \frac{\varepsilon_{\text{м}}}{\Omega_{\text{м}}} = \frac{0.8}{1.8} = 0.44 \text{ [с}^{-1}\text{]};$$

$$A = \frac{\Omega_{\text{м}}^2}{\varepsilon_{\text{м}}} = \frac{1.8^2}{0.8} = 4.05 \text{ [рад]}$$

Тогда эквивалентное значение равняется:

$$g(t) = 4.05 \sin(0.44 t)$$

2.6. Проведем моделирование системы с регулятором в среде Simulink

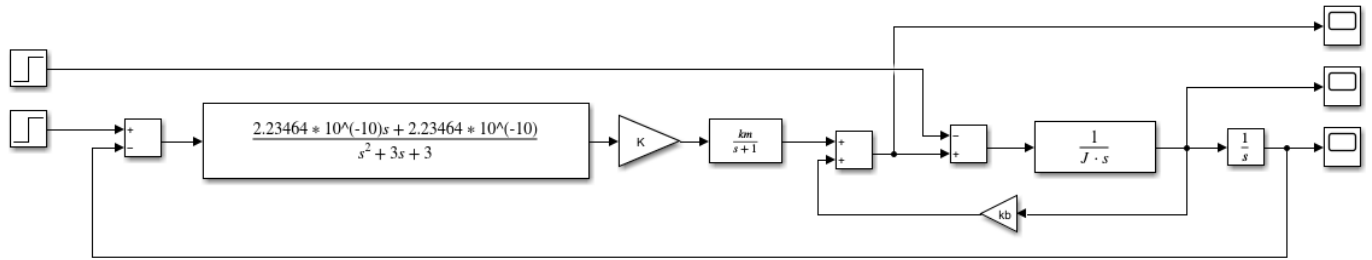


Рисунок 3 – Схема моделирования с регулятором в Matlab Simulink

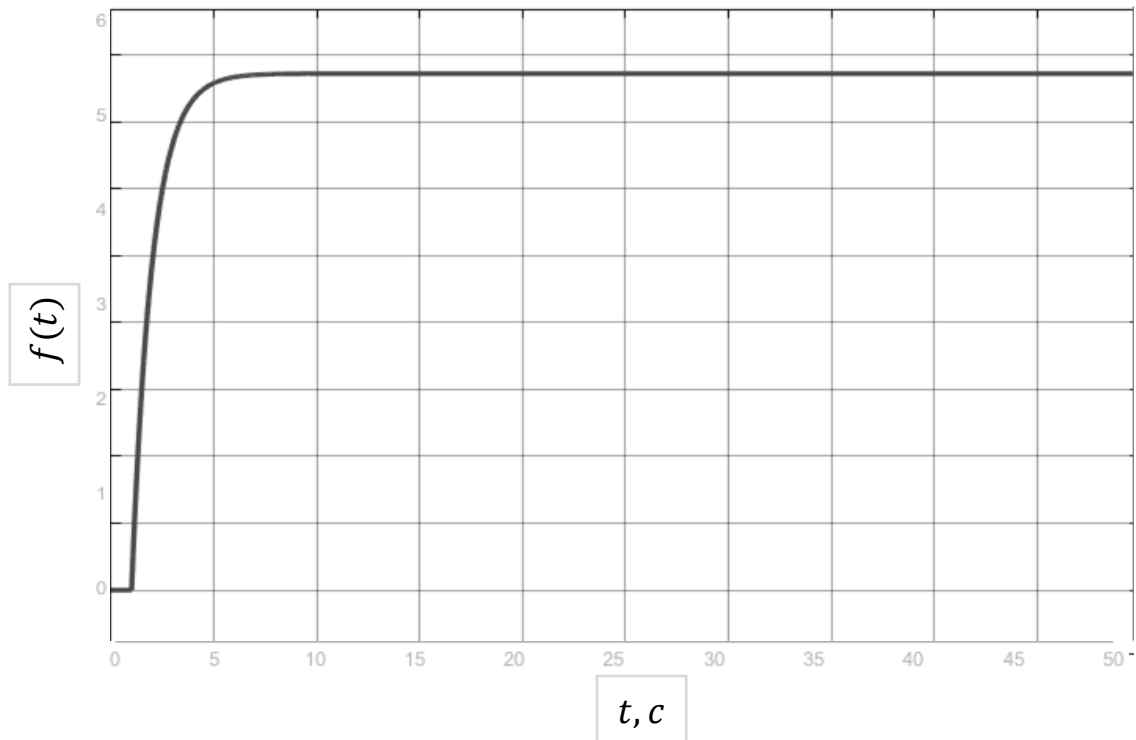


Рисунок 3 – График переходного процесса для угла поворота

Перерегулирование примерно равно 0.

Время переходного процесса соответствует заданному ранее и составляет примерно 6.1 сек.

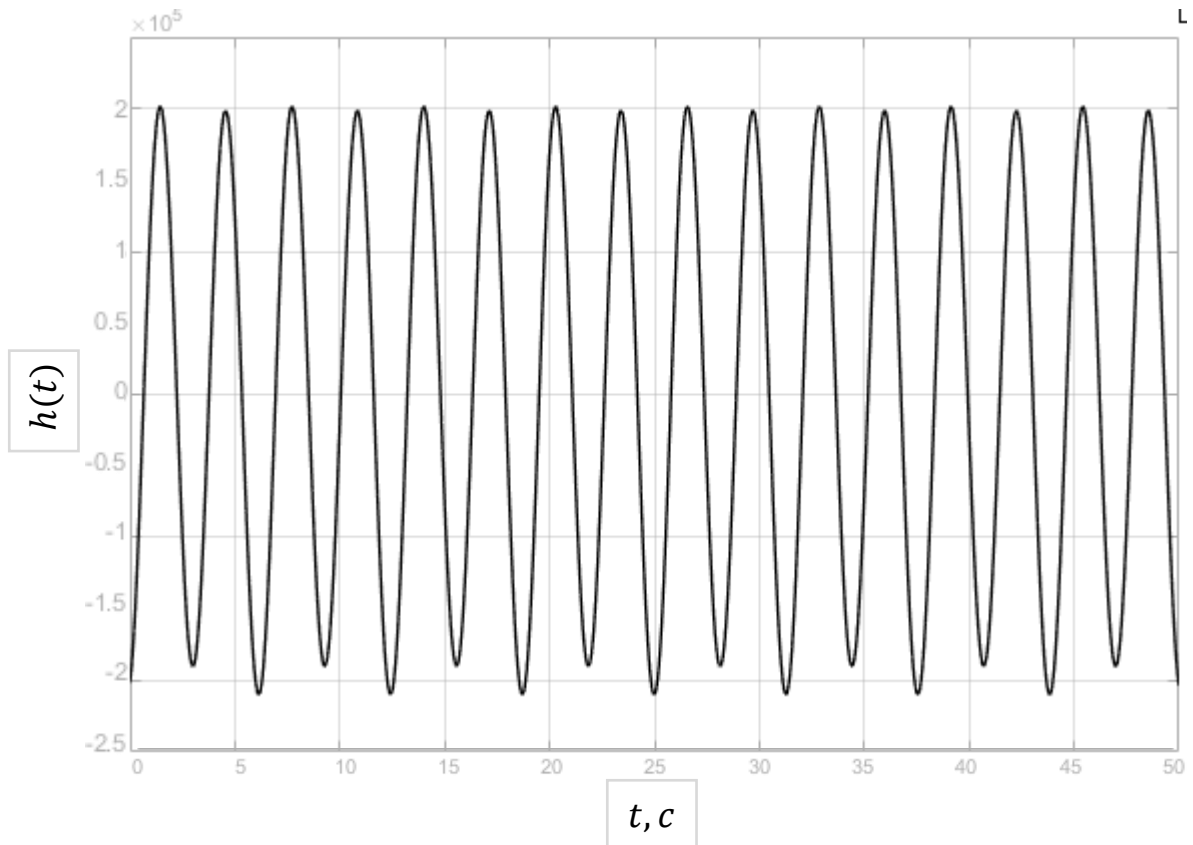


Рисунок 4 – График ошибки

Максимальное значение ошибки достигает 0.0002.

2.7. Исследуем влияние изменения момента инерции нагрузки на динамические характеристики системы с регулятором.

Проведем моделирование для двух новых значений момента инерции на 25% меньше и больше заданного значения.

$$J_{H1} = 90 \cdot 0.75 = 67,5 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}$$

$$J_{дв} = 36 \cdot 10^{-9} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}$$

$$J_p = 0,2 \cdot 36 \cdot 10^{-9} = 7.2 \cdot 10^{-9} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}$$

$$J_{\Sigma 1} = (7,2 + 36) \cdot 10^{-9} + \frac{67,5}{750^2} = 0.00012 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}$$

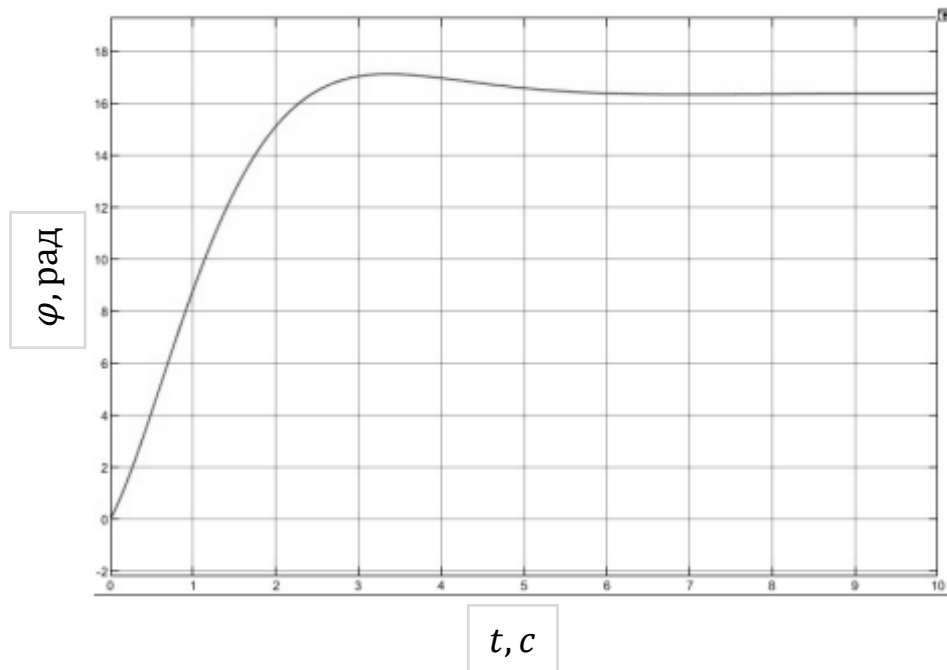


Рисунок 5 – График угла поворота при $J_H = 67,5$ (кг * м²)

$$J_{H2} = J_H \cdot 1.25 = 112,5 \text{ (кг * м}^2\text{)}$$

$$J_{\Sigma 2} = J_p + J_{дв} + \frac{J_{H2}}{i^2} = (7,2 + 36) * 10^{-9} + \frac{112,5}{750^2} = 0.0002 \text{ (кг * м}^2\text{)}$$

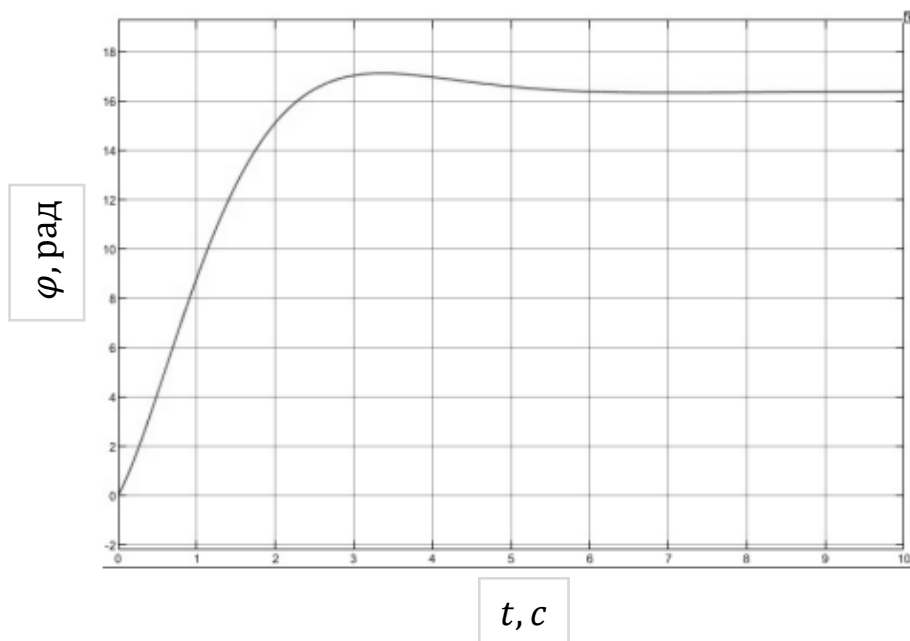


Рисунок 6 – График угла поворота при $J_H = 112.5$ (кг * м²)

Вывод: в итоге выполнения последней части работы была составлена схема моделирования и проведена симуляция системы в программной среде Simulink. Симуляция показала соответствие требованиям технических элементов, входящих в электропривод

Список использованных источников

1. Григорьев В.В., Бойков В.И., Парамонов А.В., Быстров С.В. Проектирование регуляторов систем управления – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 94 с.
2. Григорьев В.В., Быстров С.В., Бойков В.И., Болтунов Г.И., Мансурова О.К. Цифровые системы управления: Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 133 с.
3. Блинников А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Николаев Н.А., Нуйя О.С. Правила оформления пояснительной записки и конструкторской документации. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 55с.
5. Усольцев А.А. Электрические машины автоматических устройств /Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011, – 213 с.
6. https://eds-msk.ru/?site_page=motors_catalog
7. <https://www.электродвигатели-редукторы.рф/product/delta-vfd40wl21b/>
8. <https://fam-drive.ru/calc/>