



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

---

ФАКУЛЬТЕТ «Специальное машиностроение»

КАФЕДРА «Робототехнические системы и мехатроника»

# РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

## *К КУРСОВОЙ РАБОТЕ*

### *НА ТЕМУ:*

*Разработка двухосевого привода направленной  
антенны для установки на БПЛА*

Студент      СМ7-72Б  
(Группа)

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

**Санников А.К.**  
(И.О.Фамилия)

Руководитель

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

**Гуляев И.А.**  
(И.О.Фамилия)

Консультант

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

\_\_\_\_\_  
(И.О.Фамилия)

2024 г.

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

---

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(Индекс)

\_\_\_\_\_  
(И.О.Фамилия)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**З А Д А Н И Е  
на выполнение курсовой работы**

По теме: \_\_\_\_\_ Разработка двухосевого привода направленной антенны  
для установки на БПЛА

Студент группы \_\_\_\_\_ СМ7-726

\_\_\_\_\_ Санников Артём Константинович  
(Фамилия, имя, отчество)

Направленность КР (учебная, исследовательская, практическая, производственная, др.)  
\_\_\_\_\_ практическая

Источник тематики (кафедра, предприятие, НИР) \_\_\_\_\_ НИР

График выполнения КР: 25% к 5 нед., 50% к 7 нед., 75% к 10 нед., 100% к 14 нед.

**Техническое задание** \_\_\_\_\_ Разработать САУ двухосевого привода для встраивания в систему  
ретрансляции сигнала с возможностью установки на БПЛА для увеличения дальности  
передачи сигнала

**Оформление курсовой работы:**

Расчетно-пояснительная записка на \_\_\_\_\_ листах формата А4.

Перечень графического (иллюстративного) материала (чертежи, плакаты, слайды и т.п.)

Дата выдачи задания « 17 » сентября 2024 г.

**Руководитель НИР**

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

**Гуляев И.А.**  
(И.О.Фамилия)

**Студент**

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

**Санников А.К.**  
(И.О.Фамилия)

Примечание: Задание оформляется в двух экземплярах: один выдается студенту, второй хранится на кафедре.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ .....   | 4  |
| 1 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРИВОДА.....  | 6  |
| 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗМЕНЯЕМОЙ ЧАСТИ ПРИВОДА .....  | 13 |
| 2.1 Анализ нескорректированной системы .....  | 15 |
| 3 ПОСТРОЕНИЕ ЖЕЛАЕМОЙ ЛАЧХ И СИНТЕЗ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО<br>УСТРОЙСТВА .....                             | 18 |
| 4 УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ ПРИ ПОМОЩИ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ .....   | 22 |
| 5 АНАЛИЗ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ.....  | 25 |
| 6. ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ МОДЕЛИ VLDC ДВИГАТЕЛЯ И<br>СОЗДАНИЕ СТРУКТУРИРОВАННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ..... | 28 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....  | 33 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....  | 34 |

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

На этапе научно-исследовательской работы была разработана кинематическая схема двухосевого привода направленной антенны, а также сформулированы технические требования к САУ. В связи с этим, сформулируем цель курсовой работы.

Цель работы— разработать математическую модель двухосевого привода, построенного на основе синтезированной кинематической схемы (рис. 1). По построенной модели создать систему автоматического управления приводом. Для достижения приведенной цели необходимо решить следующие задачи:

- На основании поставленного технического задания и научно-исследовательской работы составить информационную модель привода с помощью MATLAB и Simulink, составить структурную схему.
- С помощью разработанной модели провести энергетический расчет привода, получить модель неизменяемой части системы автоматического управления (САУ).
- Провести анализ качества работы нескорректированной системы.
- Выбрать архитектуру корректирующего устройства, получить его математическую модель.
- Получить разностное уравнение для реализации корректирующего устройства в микроконтроллере
- Сформулировать выводы по проделанной работе и дать оценку спроектированной системы.

Конкретные числовые значения величин представлены в таблице ТЗ 1.

Таблица 1. Техническое задание на разработку привода

| Параметр    | Значение | Ед. измерения |
|-------------|----------|---------------|
| Общая масса | 2700     | г.            |

|  |                           |                    |
|--|---------------------------|--------------------|
| Предельные габариты                                  | 300x300x300               | мм                 |
| Напряжение питания                                   | 12                        | В                  |
| Диапазон вращения оси 1                              | $0 \leq \varphi \leq 360$ | °                  |
| Диапазон вращения оси 2                              | $-180 \leq \gamma \leq 0$ | °                  |
| Угловая скорость вращения осей                       | 87,26                     | рад/с              |
| Угловое ускорение вращения осей                      | 872,66                    | рад/с <sup>2</sup> |
| Время переборки на 360° (время переходного процесса) | 0.125                     | сек                |
| Ошибка слежения                                      | 1                         | °                  |
| Перерегулирование при переборке                      | 25                        | %                  |

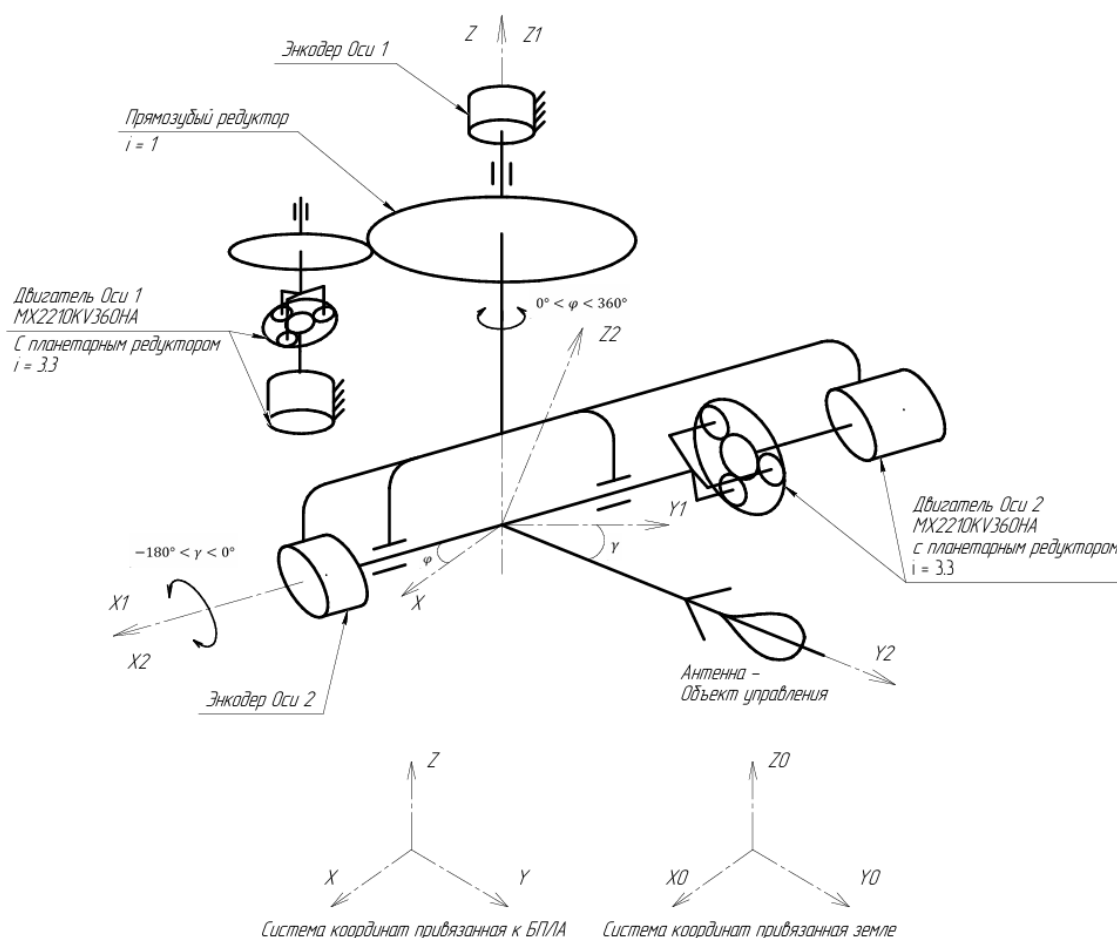


Рис. 1 Кинематическая схема привода

## 1 Энергетический расчет привода

В ходе научно-исследовательской работы были определены требуемые характеристики привода путем построения 3-д модели (рис. 2), получившиеся параметры, также-стоит сразу отметить, что для обеих осей привода было принято решение использовать одинаковые двигатели в соответствии с этим энергетический расчет будет проводится 1 раз для более нагруженной 1 оси, полученные данные после 3-д моделирования:

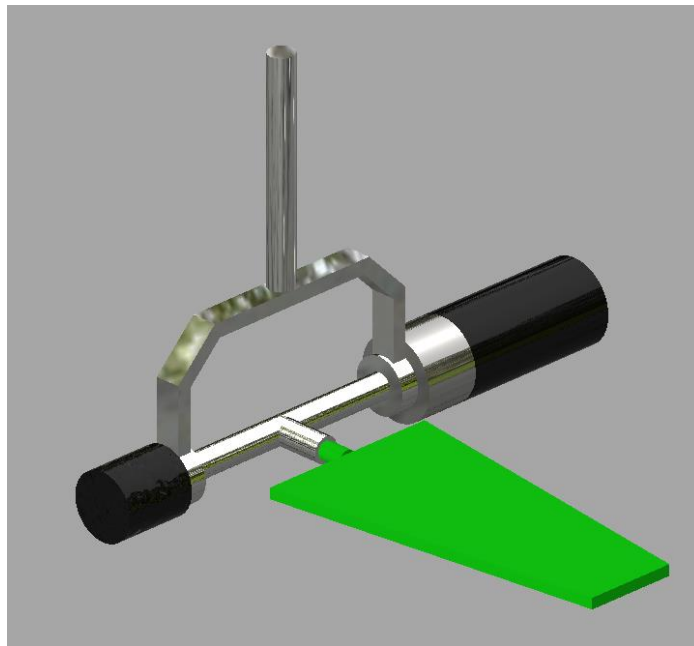


Рис. 2 Грубая 3Д модель привода для оценки моментов инерции.

Рассчитанный момент инерции конструкции:

$$I_{yy} = 748,534 \text{ кг мм}^2 = 7.48534 * 10^{-5} \text{ кг м}^2 \quad (1)$$

Тогда требуемый максимальный момент на выходном валу:

$$M_m = I_{yy} * \varepsilon = 872,66 * 7.48534 * 10^{-5} = 0.0653 \text{ Н * м} \quad (2)$$

Расчет эквивалентной скорости:

$$\Omega_{\text{экв}} = \tau_{\Omega\text{Д}} \cdot \varepsilon + \omega = 0,05 \cdot 872,66 + 87,26 = 130,89 \text{ рад/с} \quad (3)$$

$\tau_{\Omega\text{Д}}$  - постоянная времени разгона, для приводов с транз. УМ. Примем  $\tau_{\Omega\text{Д}} = 0,05 \text{ с}$

Расчет граничного значения макс. требуемой мощности привода:

$$P_{\text{М}} = \frac{\Omega_{\text{экв}} \cdot M_{\text{м}}}{\eta_{\text{пх}}} = \frac{130,89 \cdot 0,0653}{0,8} = 10,68 \text{ Вт} \quad (4)$$

Расчет ориентировочного значения требуемой номинальной мощности двигателя:

Примем, что макс. мощность привода равна макс. требуемой мощности

$$P_{\text{max}} = P_{\text{М}}.$$

Для двигателя с жесткой механической характеристикой  $\lambda_{\text{КД}} \geq 8..10$ :

$$\text{Требуемая мощность двигателя: } P_{\text{ДН1}} = \frac{P_{\text{max}}}{2..3,5}$$

Для двигателя с недостаточной жесткой механикой  $\lambda_{\text{КД}} = 2..5$ :

$$\text{Требуемая мощность двигателя: } P_{\text{ДН2}} = \frac{P_{\text{max}}}{1..1,56}$$

Получаем:

$$P_{\text{ДН1}} = \frac{P_{\text{max}}}{2,5} = \frac{10,68}{2,5} = 4,272 \text{ Вт} \quad (5)$$

$$P_{\text{ДН2}} = \frac{P_{\text{max}}}{1,5} = \frac{10,68}{1,5} = 7,12 \text{ Вт} \quad (6)$$

Также в ходе научно-исследовательской работы был выбран BLDC двигатель MX2210KV360HA с планетарным редуктором и передаточным отношением 3.3. Помимо мощности на выбор повлияло наличие планетарного редуктора и характеристики максимального момента.

Параметры двигателя приведены в таблице 1:

Таблица 2. Характеристики двигателя и редуктора

| Характеристика                        | Значение   | Ед. измерения     |
|---------------------------------------|------------|-------------------|
| Мощность                              | 15         | Вт                |
| Номинальные обороты                   | 3300       | Об/мин            |
| Номинальный момент                    | 0.033      | Н*м               |
| Момент страгивания                    | 0.105      | Н*м               |
| Момент инерции ротора                 | 0.00000076 | Кг м <sup>2</sup> |
| Индуктивность обмотки                 | 100        | мкГн              |
| Сопротивление обмотки                 | 750        | мОм               |
| Номинальное напряжение                | 12         | В                 |
| Передаточное отношение редуктора      | 3.3        | -                 |
| Количество полюсов                    | 7          | -                 |
| KV                                    | 360        | -                 |
| Постоянная момента К <sub>М</sub>     | 0.023      | Н*м/А             |
| Постоянная противо-ЭДС К <sub>Ω</sub> | 0.023      |                   |

Номинальная угловая скорость двигателя:

$$\Omega_{дн} = \frac{\pi \cdot N_H}{30} = \frac{\pi * 3300}{30} = 345,57 \text{ рад/с} \quad (7)$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{дн} = \frac{P_{дн}}{\Omega_{дн}} = \frac{15}{345,57} = 0,043 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (8)$$

Также необходимо пересчитать индуктивность и сопротивление обмоток, так как производитель указывает сопротивление и индуктивность одной обмотки и указывает схему подключения - звезда:



$$R_{\text{я}} = R_{1ph} + \frac{1}{\frac{1}{R_{1ph}} + \frac{1}{R_{1ph}}} = 1.125 \text{ Ом} \quad (9)$$

$$L_{\text{я}} = L_{1ph} + \frac{1}{\frac{1}{L_{1ph}} + \frac{1}{L_{1ph}}} = 0.00015 \text{ Гн} \quad (10)$$

Выбор усилителя мощности:

- Определяем сопротивление цепи:

$$R_{\text{д}} = R_{\text{ум}} + R_{\text{я}} \quad (11)$$

Для транзисторного УМ  $R_{\text{ум}} = 0$ , тогда  $R_{\text{д}} = R_{\text{я}} = 1,125 \text{ Ом}$  - назначим коэффициент форсирования двигателя по напряжению  $\lambda_{\text{СК.М}} = 1$  для транзисторных УМ  $\Rightarrow U_{\text{max}} = U_{\text{ян}}$

- определяем допустимое упр. напряжение ( $\lambda_{\text{СК}} = 0,8..0,9$ ):

$$U_{\text{яд}} = \lambda_{\text{СК}} \cdot U_{\text{ян}} = 0,9 \cdot 12 = 10,8 \text{ В} \quad (12)$$

- определяем доп. значение момента ( $\lambda_{\text{М}} = 1,5..2$ ):

$$M_{\text{дд}} = \lambda_{\text{М}} \cdot M_{\text{дн}} = 2 \cdot 0,043 = 0,086 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (13)$$

- определяем доп. макс. значение момента ( $\lambda_{\text{ММ}} = 4$ ):

$$M_{\text{дм}} = \lambda_{\text{ММ}} \cdot M_{\text{дн}} = 4 \cdot 0,043 = 0,172 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (14)$$

Расчет передаточного отношения:

а) Проверка условия по моменту:

$$M_{\text{дт}}(i) = \frac{M_m}{i \cdot \eta_{\text{пх}}} + J_{\text{д}} \cdot i \cdot \varepsilon \leq M_{\text{дд}} = \lambda_{\text{М}} \cdot M_{\text{дн}} \quad (15)$$

$$\frac{0.0653}{i \cdot 0,8} + 0,76 \cdot 10^{-6} \cdot i \cdot 872,66 = 0,086$$

Решаем квадратное уравнение и получим диапазон  $i$ :

$$\begin{aligned} i_1 &\approx 1 \text{ округлили в большую сторону} \\ i_2 &\approx 128 \text{ округлили в меньшую сторону} \end{aligned}$$

б) Проверка условия по напряжению:

$$U_{\text{яМ}}(i) = \frac{R_{\text{я}}}{K_{\text{М}}} \cdot \left( \frac{M_m}{i \cdot \eta_{\text{пх}}} + J_{\text{Д}} \cdot i \cdot \varepsilon \right) + K_{\Omega} \cdot i \cdot \omega \leq U_{\text{яД}} \quad (16)$$

$$\frac{1,125}{0,023} \left( \frac{0.0653}{x \cdot 0,8} + 0,76 \cdot 10^{-6} \cdot x \cdot 872,66 \right) + 0,023 \cdot x \cdot 87.26 = 10,8$$

Решаем квадратное уравнение и получим диапазон  $i$ :

$$\begin{aligned} i_1 &\approx 1 \text{ округлили в большую сторону} \\ i_2 &\approx 4 \text{ округлили в меньшую сторону} \end{aligned}$$

Скорость холостого хода:

$$\Omega_{\text{ДХ}} = \frac{U_{\text{яД}}}{K_{\Omega}} = \frac{10,8}{0,023} = 469,56 \text{ рад/с} \quad (17)$$

Постоянная времени для выбранного двигателя:

$$\tau_{\Omega\text{Д}}^* = \frac{R_{\text{я}} \cdot J_{\text{Д}}}{K_{\text{М}} \cdot K_{\Omega}} = \frac{1,125 \cdot 0,76 \cdot 10^{-6}}{0,023 \cdot 0,023} = 0,0016 \text{ с} \quad (18)$$

Эквивалентная скорость:

$$\Omega_{\text{Э}} = \tau_{\Omega\text{Д}}^* \cdot \varepsilon + \omega = 0,0016 \cdot 872,66 + 87.26 = 88,65 \text{ рад/с} \quad (19)$$

Граничное значение максимально требуемой мощности:

$$P_{\text{М}} = \frac{\Omega_{\text{Э}} \cdot M_m}{\eta_{\text{пх}}} = \frac{88,65 \cdot 0.0653}{0,8} = 7,23 \text{ Вт} \quad (20)$$

Пусковой момент (согласно документации):

$$M_{\Pi} = 0,105 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (21)$$

Максимальная мощность:

$$P_{max} = 0,25 \cdot M_{\Pi} \cdot \Omega_{\text{дх}} = 0,25 \cdot 0,105 \cdot 469,56 = 12,32 \text{ Вт} \quad (22)$$

$$P_{max} \geq P_{\text{М}} - \text{условие выполняется.}$$

Определяем общий диапазон передаточных отношений из условий а) и б):

Общий диапазон передаточных отношений: 1 ... 4

Выбираем передаточное отношение 3.3 так как производитель предлагает готовый планетарный редуктор с таким передаточным отношением (рис. 3)



Проверочный расчет:

Определяем требуемый момент на валу двигателя:

$$M_m^* = \frac{M_m}{i \cdot \eta_{\text{пх}}} = \frac{0.0653}{3.3 \cdot 0,8} = 0,024 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{ТД}} &= M_m^* + J_{\text{д}} \cdot i \cdot \varepsilon = 0,024 + 0,76 \cdot 10^{-6} \cdot 3.3 \cdot 872,66 \\ &= 0,026 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

$$0,086 \text{ Н} \cdot \text{м} = M_{\text{дд}} \geq M_{\text{тд}} - \text{условие выполняется.}$$

Определяем требуемую скорость вращения вала двигателя:

$$\Omega_{\text{тд}} = i \cdot \omega = 3.3 \cdot 87,26 = 287,95 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (24)$$

$$345,57 \text{ рад/с} = \Omega_{\text{дн}} \geq \Omega_{\text{тд}} - \text{условие выполняется.}$$

Определяем требуемое напряжение в цепи:

$$U_{\text{ят}} = \frac{R_{\text{я}}}{K_{\text{м}}} \cdot M_{\text{тд}} + K_{\Omega} \cdot \Omega_{\text{тд}} = \frac{1,125}{0,023} \cdot 0,026 + 0,023 \cdot 287,95 = 7,89 \text{ В} \quad (25)$$

$$U_{\text{яд}} < U_{\text{ят}} - \text{условие выполняется}$$

Таким образом – двигатель выбран верно так как все условия выполняются. Для обеих осей, в целях упрощения выбираем эту пару двигателя и редуктора, так как на вторую ось такие же требования, за исключением меньшего момента и момента инерции.

## 2 Моделирование неизменяемой части привода

Для начала создадим модель двигателя в среде Simulink. Модель представлена на рисунке 4. Двигатель является трехфазным бесколлекторным, однако в процессе моделирования использовалась эквивалентная модель по аналогии с ДПТ.

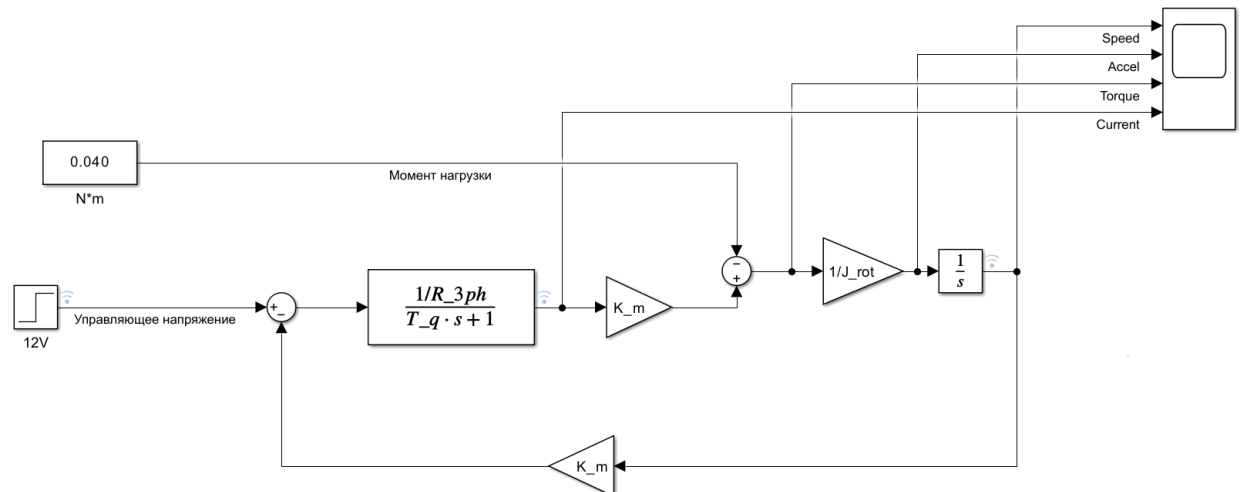


Рис. 4 Модель двигателя MX2210KV360HA

Листинг 1. Код matlab с параметрами двигателя

```
% Двигатель MX2210KV360HA

L_1ph = 0.0001; %Гн
R_1ph = 0.75; %Ом
W = 450; %рад/с без нагрузки
U_dvig = 12; %В
I_noload = 0.15; %А
J_rot = 0.00000075;
P_amt = 7;
nu = 0.84; %КПД
K_m = 0.023; %Н*м/А

L_3ph = L_1ph + 1/(1/L_1ph + 1/L_1ph)
R_3ph = R_1ph + 1/(1/R_1ph + 1/R_1ph)

K_w = 0.023;
K_omega = 0.023;

T_q = L_3ph/R_3ph;
T_m = 0.000098;
```

Добавляем в систему редуктор и собираем общую линейную модель неизменяемой части без коррекции, представлена на рис. 5:

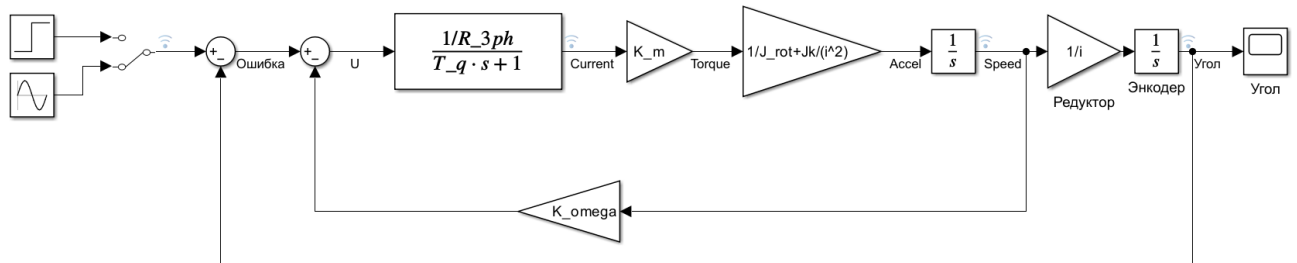


Рис. 5 Модель привода в Simulink

Определяем передаточную функцию неизменяемой части:

Параметры привода:

$$K_M = 0.023 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{А}; \quad (26)$$

$$K_\omega = 0.023 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}};$$

$$J_\Sigma = J_{\text{дв}} + \frac{J_{K \text{ MAX}}}{i^2} = 0.76 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 + \frac{7.48534 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2}{3.3^2} \\ \cong 7,633 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Рассмотрим электрическую и электромеханическую постоянные времени:

$$T_{\text{ЭМдв}} = \frac{J_{\text{дв}} R_\text{я}}{K_M K_\omega} = \frac{0,76 \cdot 10^{-6} \cdot 1,125}{0,023 \cdot 0,023} = 0,0016 \text{ с} \quad (27)$$

$T_\text{Э} \approx 0,1 T_{\text{ЭМ}}$  для двигателей мощностью до 100 Вт:

$$T_{\text{Эдв}} = 0,1 T_{\text{ЭМ}} = 0,00016 \text{ с}$$

$$L_\text{я} = 0,00015 \text{ Гн}$$

$$T_{\text{ЭМпр}} = \frac{J_\Sigma R_\text{я}}{K_M K_\omega} = \frac{7,633 \cdot 10^{-6} \cdot 1,125}{0,023 \cdot 0,023}$$

$$= 0,0162 \text{ с} \text{ для привода с учетом нагрузки}$$

Передаточная функция неизменяемой части привода будет иметь вид:

$$W_{\text{нч}}(s) = \frac{\frac{1}{K_{\omega} * i}}{s(T_{\text{ЭМпр}} * T_{\text{Эдв}} * s^2 + T_{\text{ЭМпр}} * s + 1)} =$$

$$= \frac{1}{0,023 * 3,3} \frac{1}{s(0,0162 * 0,00016 * s^2 + 0,0162 * s + 1)}$$

$$W_{\text{нч}}(s) = \frac{13.1752}{s(0.01603s + 1)(0.0001616s + 1)}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{0.01603} = 62.35 \text{ c}^{-1}; \omega_2 = \frac{1}{0.0001616} = 6187.65 \text{ c}^{-1}$$

## 2.1 Анализ нескорректированной системы

Проведем анализ работы системы без ввода корректирующих устройств, рассмотрим работу системы в режиме слежения:

$$g(t) = A \sin(\omega_p t) \quad (29)$$

$$\dot{g}(t) = A \omega_p \cos(\omega_p t)$$

$$\ddot{g}(t) = -A \omega_p^2 \sin(\omega_p t)$$

$$\max(\dot{g}(t)) = A \omega_p = 87,26 \left( \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right)$$

$$\max(\ddot{g}(t)) = A \omega_p^2 = 872,66 \left( \frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right)$$

Из системы двух уравнений получим рабочую частоту и амплитуду:

$$A = 8.72 \text{ (рад)} \quad (30)$$

$$\omega_p = 10 \left( \frac{1}{\text{с}} \right)$$

Допустимая ошибка по тз:

$$\varepsilon = 1^\circ = 0,017453 \text{ (рад)} \quad (31)$$

Реакция системы на режим слежения представлена на рис. 6. Как видно из графика, динамическая ошибка составляет порядка 5 рад, что значительно превышает заданную ошибку.

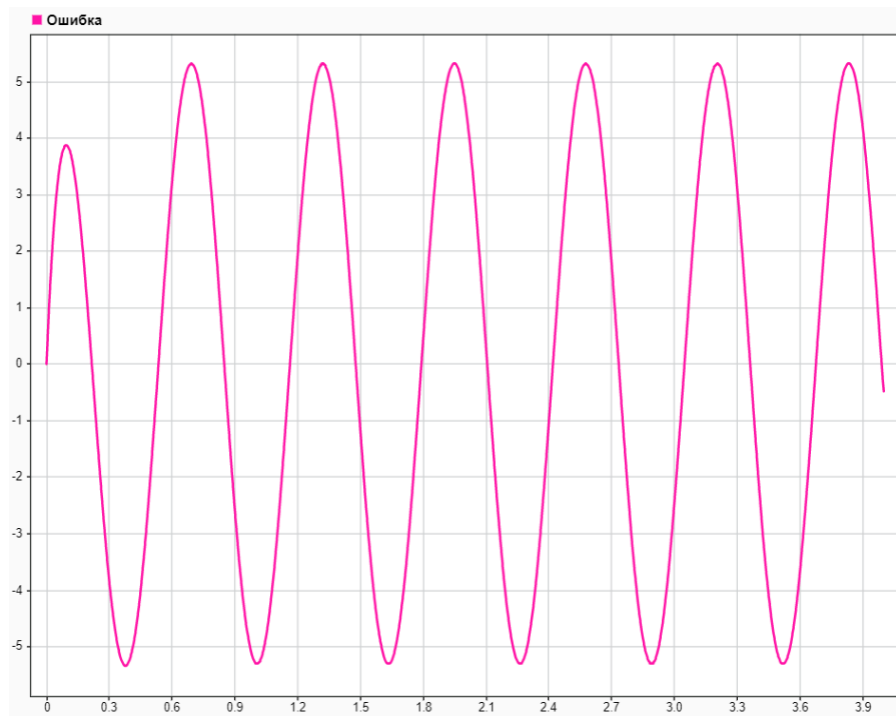


Рис. 6 Реакция нескорректированной системы на режим слежения

Рассмотрим реакцию системы на режим переброски (рис.7) , исходя из ТЗ переброска на 1 радиан должна занимать 0.02 сек :

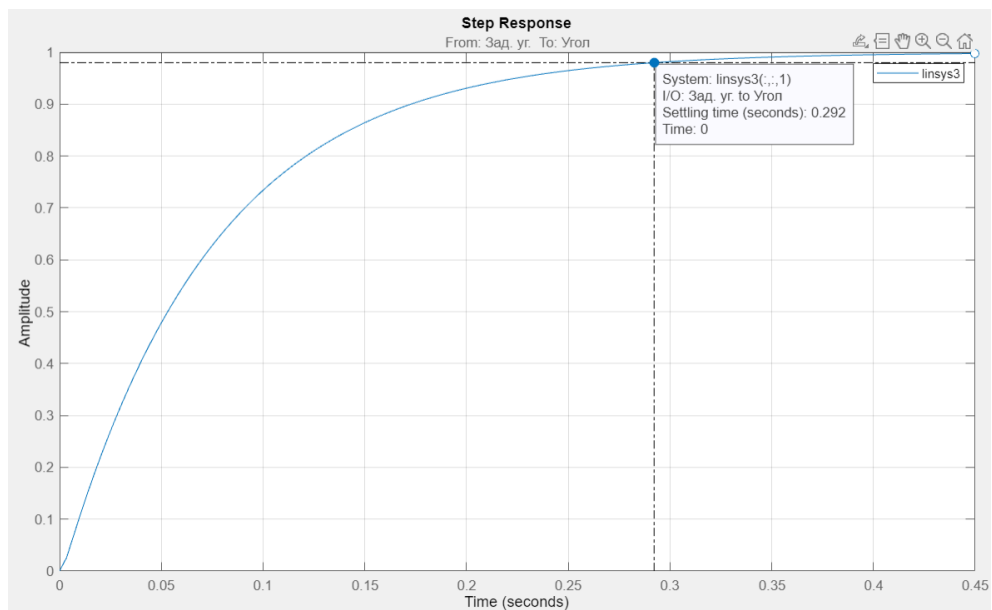


Рис. 7 Реакция на режим переброски



ЛАЧХ и ЛФЧХ системы представлены на рис. 8. Исходя из них можно сделать вывод об устойчивости исходной системы.

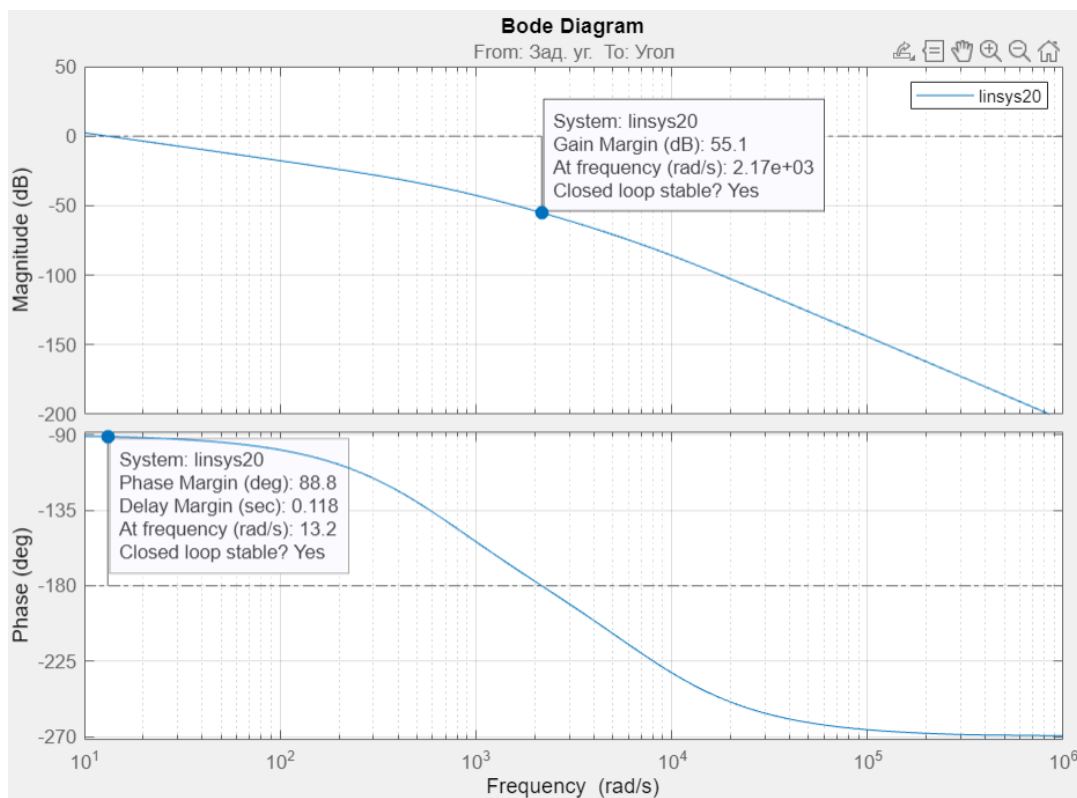


Рис. 8 ЛАЧХ и ЛФЧХ нескорректированной системы

По итогу проведенного анализа можно судить что система не удовлетворяет требованиям ТЗ и нуждается к корректировке.

### 3 Построение желаемой ЛАЧХ и синтез корректирующего устройства

Для обеспечения технических требований вводим корректирующие устройства, для начала попробуем внедрить последовательное корректирующее устройство. Воспользуемся частотным методом синтеза и построим желаемую ЛАЧХ и ЛАЧХ неизменяемой части. Поскольку система продолжительное время работает в режиме слежения, будем строить ЛАЧХ в режиме слежения.

$$W_{\text{нч}}(s) = \frac{13.1752}{s(0.01603s + 1)(0.0001616s + 1)} \quad (32)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{0.01603} = 62.35 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_2 = \frac{1}{0.0001616} = 6187.65 \text{ с}^{-1}$$

$$20 \lg(k) = 20 \lg(13.1752) = 22.39 \text{ дБ}$$

Для желаемой ЛАЧХ определим рабочую точку и частоту среза исходя из ТЗ:

$$W_{\text{жс}}(\omega_p) = 20 \lg \left( \frac{A}{\varepsilon} \right) + 3 = 20 \lg \left( \frac{8.72}{0.017453} \right) + 3 = 56.97 \text{ дБ} \quad (33)$$

$$\omega_p = 10 \left( \frac{1}{c} \right)$$

*Расчет частоты среза:*

Расчет будем производить из условий, накладываемых на время переходного процесса  $t_{\text{пп}} \leq 0,02 \text{ с}$  и перерегулирование  $\sigma \leq 10\%$ .

Выберем перерегулирование  $\sigma = 20\%$ , тогда по диаграмме Солодовникова  $t_{\text{пп}} = \frac{2.7\pi}{\omega_c}$ . Из условия для времени переходного процесса определяем частоту среза

$\omega_{\text{ср}} = 424.15 \text{ с}^{-1}$ , которой соответствует  $t_{\text{пп}} = 0,02 \text{ с}$ .

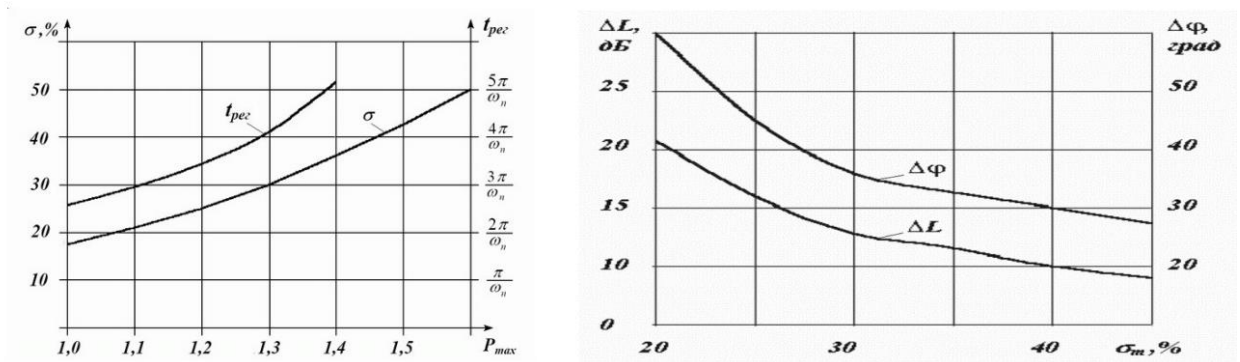


Рис. 9 Диаграммы Солодовникова

Построения желаемой ЛАЧХ и ЛАЧХ и неизменяемой части представлено на рисунке 10:

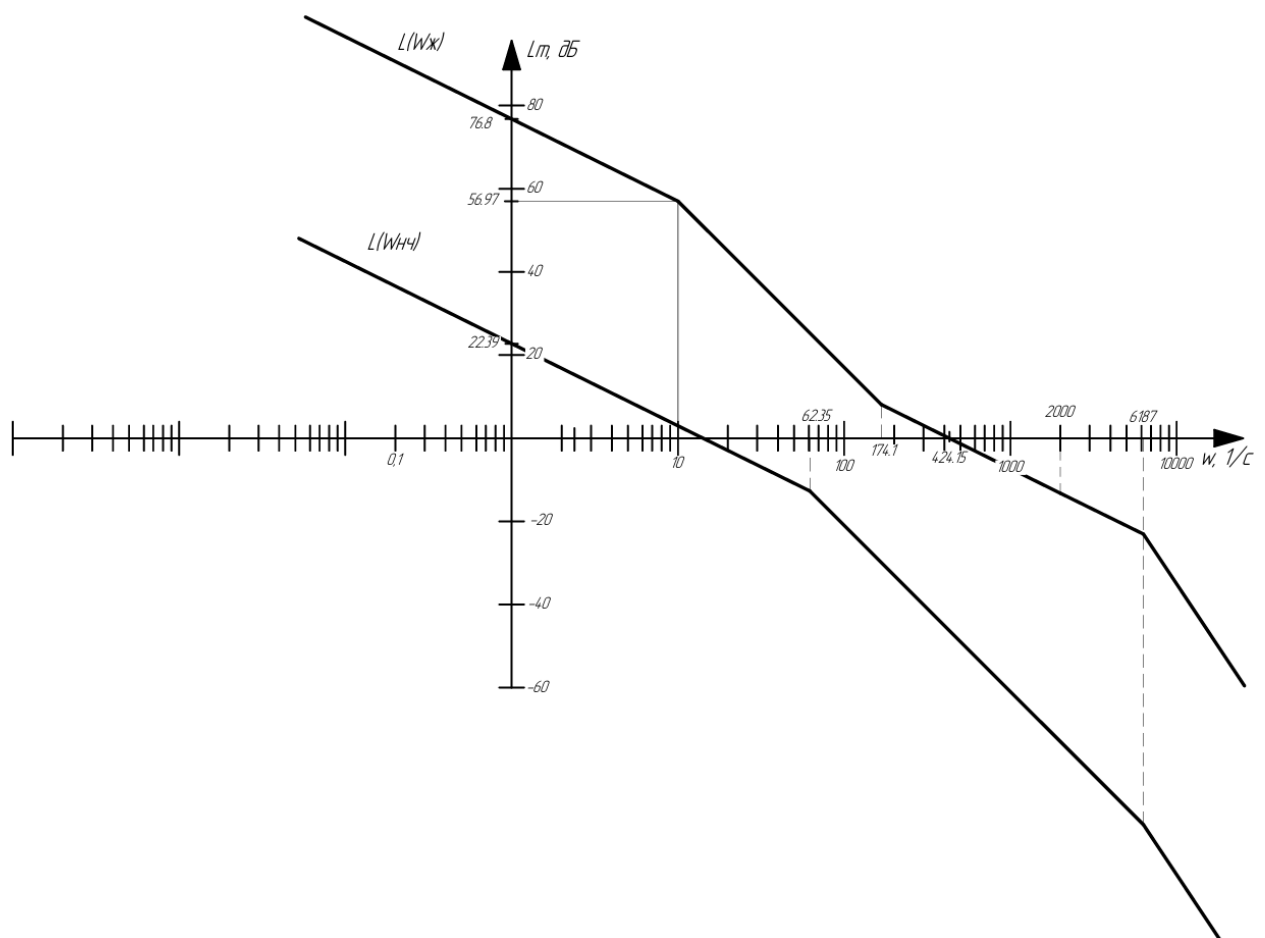


Рис. 10 ЛАЧХ желаемая и неизменяемая часть

Определим передаточную функцию желаемой системы:

$$20 \lg k = 76.8 \Rightarrow k = 6918.3 \quad (34)$$

$$T_1 = \frac{1}{\omega_p} = 0.1$$

$$T_2 = \frac{1}{174.1} = 0.0057$$

$$T_3 = \frac{1}{6187.65} = 0.0001616$$

$$T_4 = \frac{1}{\omega_2} = \frac{1}{6187.65} = 0.0001616$$

$$W_{\text{ж}} = \frac{6918.3(0.0057s + 1)}{s(0.1s + 1)(0.0005s + 1)(0.0001616s + 1)}$$

Тогда передаточная функция корректирующего устройства:

$$\begin{aligned} W_{\text{п}} &= \frac{W_{\text{ж}}}{W_{\text{нч}}} = \\ &= \frac{6918.3(0.0057s + 1)s(0.01603s + 1)(0.0001616s + 1)}{13.1752 * s(0.1s + 1)(0.0001616s + 1)(0.0001616s + 1)} \\ &= \frac{525.1(0.0057s + 1)(0.01603s + 1)}{(0.1s + 1)(0.0001616s + 1)} \end{aligned} \quad (35)$$

Построим модель корректирующего устройства(рис. 11):

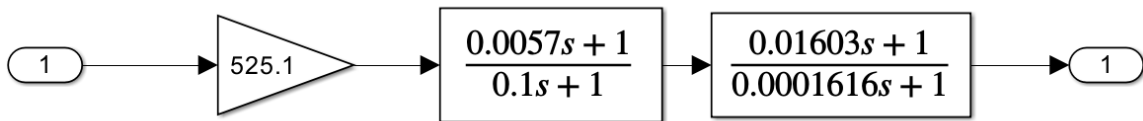


Рис. 11 Последовательное корректирующее устройство

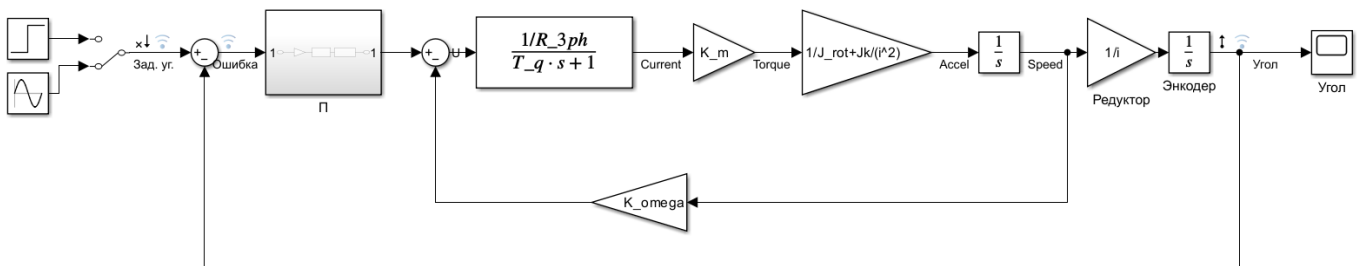


Рис. 12 Система с коррекцией

Проведем анализ полученной модели на удовлетворение техническим требованиям, для начала параметры переходного процесса:

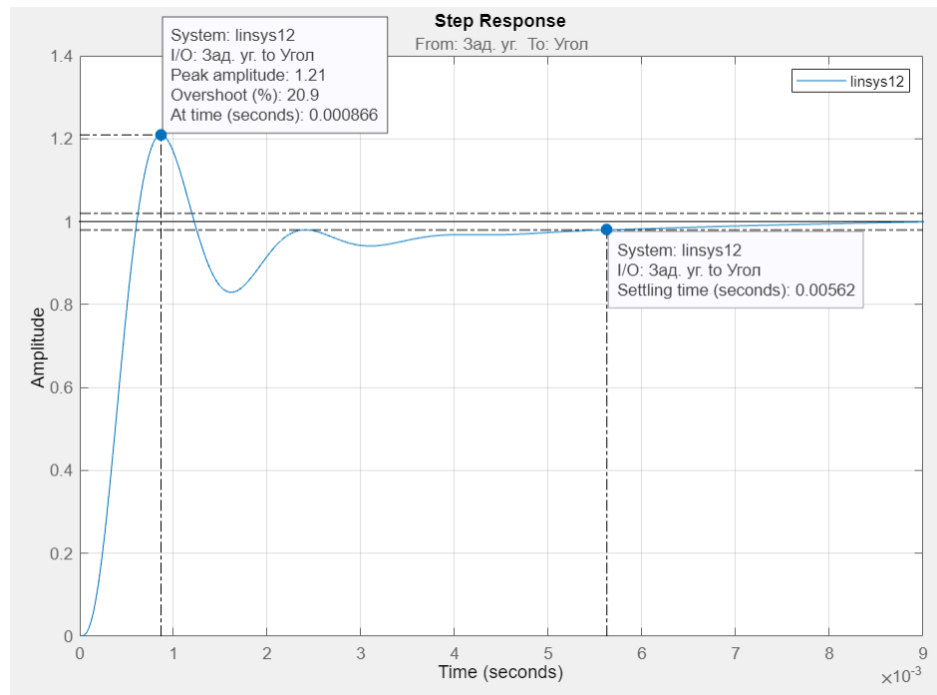


Рис.13 Переходной процесс после коррекции

Как видно из графика техническое задание по режиму переброски выполнено успешно. Далее посмотрим режим слежения, графики ошибки представлены на рис. 14.

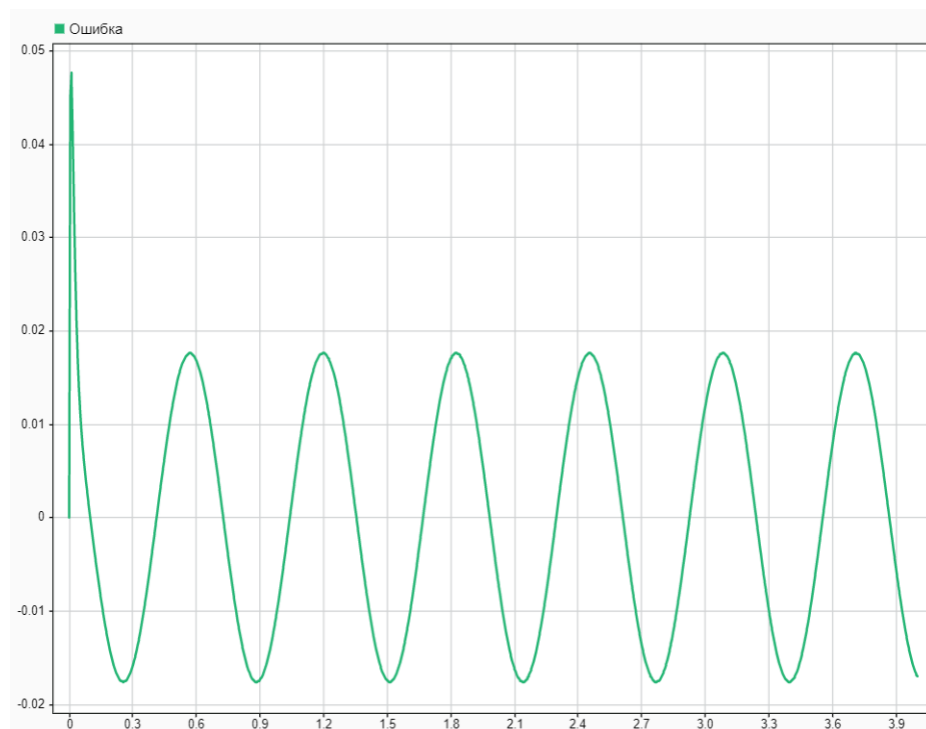


Рис. 14 Динамическая ошибка после коррекции

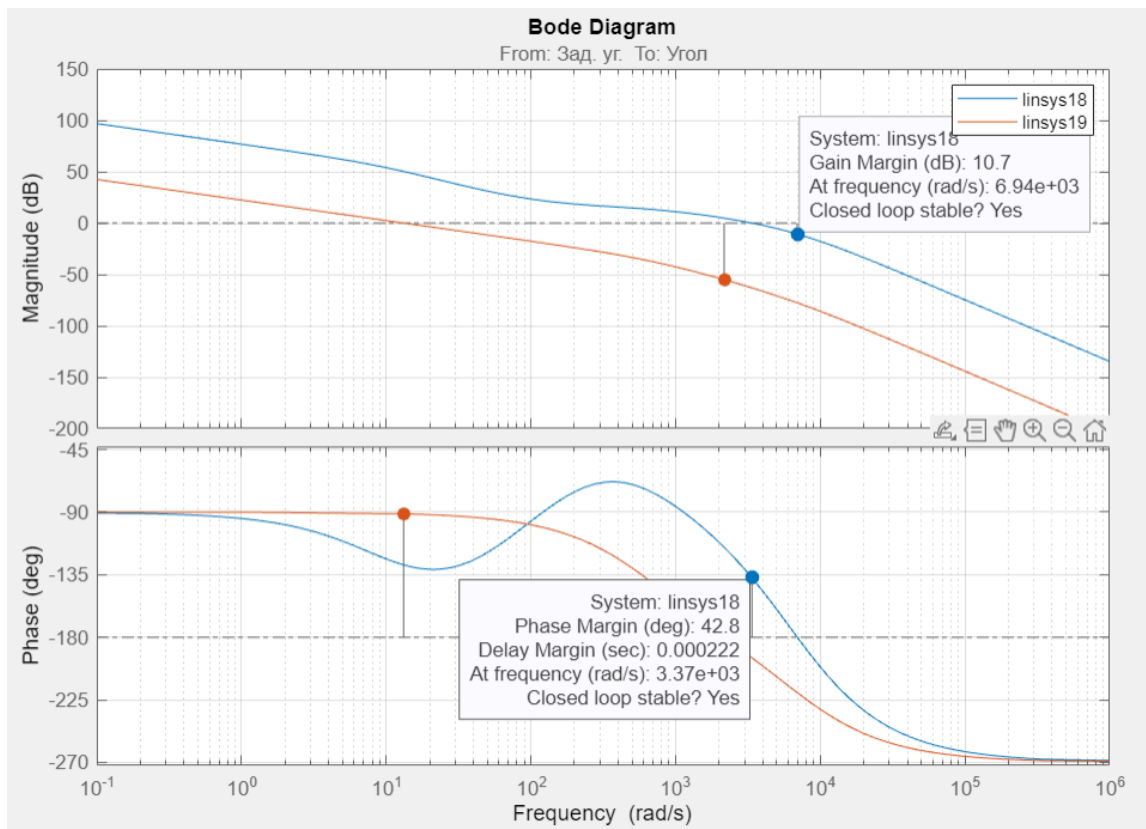


Рис. 15 ЛАЧХ и ЛФЧХ получившейся системы

На рис. 15 можно наблюдать сравнение ЛАЧХ и ЛФЧХ системы до и после коррекции.

#### 4 Уточнение модели при помощи нелинейностей

Далее стоит применить к модели некоторые уточнения путем введения нелинейности, здесь стоит отметить мертвую зону, которая отражает напряжение трогания двигателя, и блоки ограничения. Блок ограничения по напряжению недопускает повышение напряжения на двигателе выше, чем 90% от номинального напряжения. Блок ограничения по току не дает тому расти выше 3А что является рекомендацией производителя двигателя. На рис. 16 приведена уточненная модель.

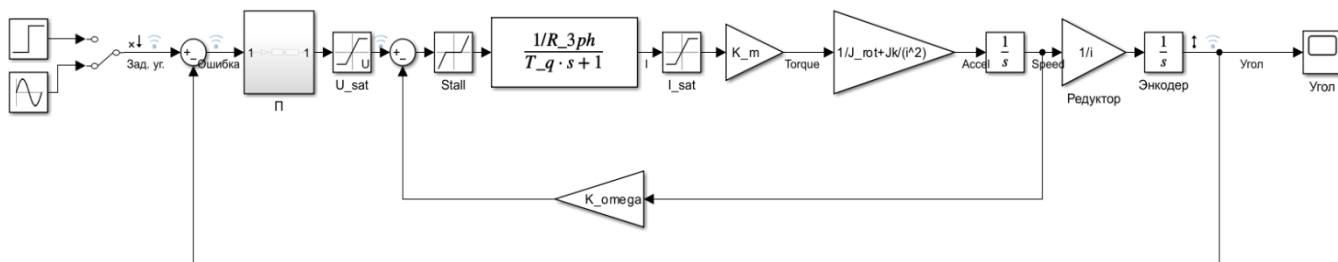


Рис. 16 Модель с нелинейными элементами

Проведем анализ уточненной модели, посмотрим на переходной процесс, изображенный на рисунке 17.

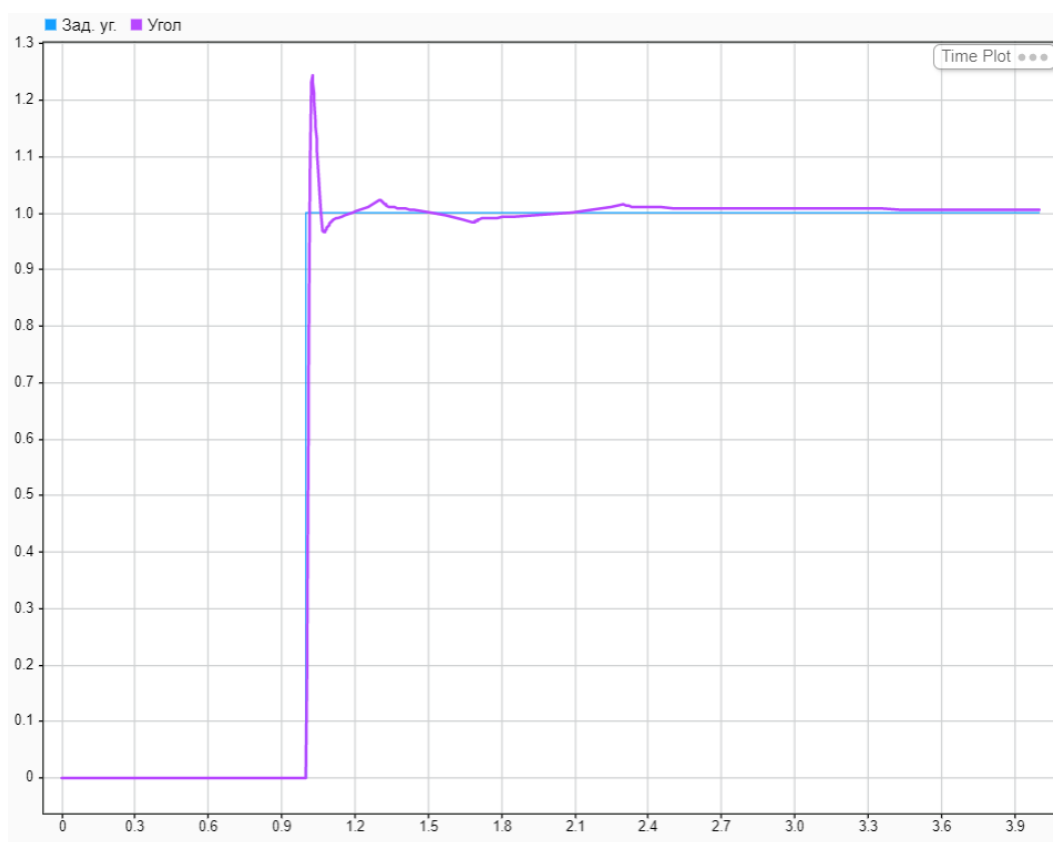


Рис. 17. Переходной процесс с учетом нелинейности

Заметим что время переходного процесса незначительно увеличилось как и перерегулирование, однако такие показатели также вписываются в техническое задание. Теперь посмотрим на динамическую ошибку. Графики динамической ошибки и напряжения в режиме слежения представлены на рис. 18.

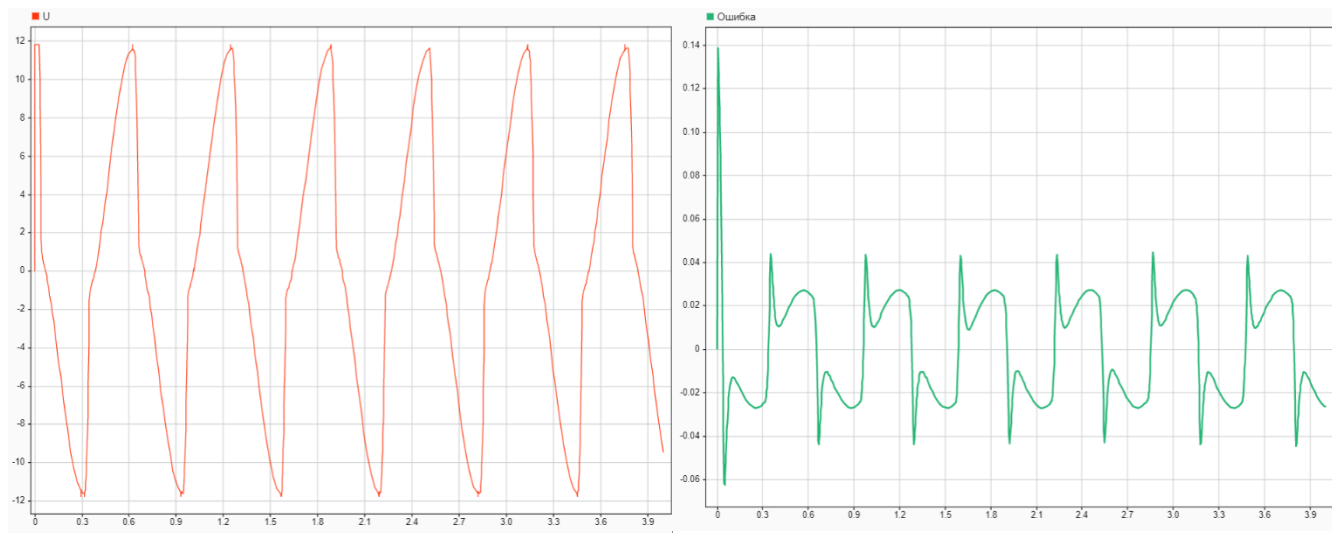


Рис. 18 Управляющее напряжение и ошибка

Заметим, что управляющее напряжение теперь в норме, и удалось избавиться от скачков, динамическая ошибка при этом обрела кратковременные скачки, которые выбиваются за пределы заданные в ТЗ, однако влияние таких скачков несущественно в рамках общей картины.



## 5 Анализ дискретной системы

На данном этапе разработки период дискретизации системы неизвестен, однако можно оценить учитывая частоту ШИМ 5 КГц, частоту работы микроконтроллера 72 МГц и учитывая быстроедействие остальных элементов системы можно принять  $T = 10$  мс. (ps тут нужно сделать период меньше – 4.5кГц)

Получим дискретную передаточную функцию системы коррекции. Которая будет реализована на микроконтроллере. Формировать управляющий сигнал будем в виде прямоугольных импульсов. Для этого используем экстраполятор нулевого порядка.

При помощи программы MatLab получим дискретную передаточную функцию корректирующего устройства системы, которое в непрерывной форме имеет вид:

$$W_n(s) = \frac{525.1(0.0057s + 1)(0.01603s + 1)}{(0.1s + 1)(0.0001616s + 1)} \quad (36)$$

Используем команду `c2d` с периодом квантования 10 мс и одним из наиболее точных методов преобразования «tustin» и получим:

$$W_n^*(z) = \frac{218 * z^2 - 128.6 * z + 7.479}{z^2 + 0.03262 z - 0.8481} \quad (37)$$

W\_korr\_discrete =

$$218 z^2 - 128.6 z + 7.479$$

-----

$$z^2 + 0.03262 z - 0.8481$$

Далее перейдем к разностному уравнению, которое будет реализовано на МК.

$$W_n^*(z) = \frac{X^*(z)}{G^*(z)} = \frac{218 * z^2 - 128.6 * z + 7.479}{z^2 + 0.03262 z - 0.8481} \Leftrightarrow \quad (38)$$

$$\Leftrightarrow X^*(z) \cdot (z^2 + 0.03262 z - 0.8481) =$$

$$= G^*(z) \cdot (218 * z^2 - 128.6 * z + 7.479)$$

$$x[n + 2] + 0,03262x[n + 1] - 0,8481x[n] =$$

$$= 218[n + 2] - 128.6g[n + 1] + 7.479g[n] \quad (39)$$

В итоге получили разностное уравнение, которое можно реализовать в МК. Для моделирования системы поставим в корректирующее устройство экстраполятор нулевого порядка (рис. 19).

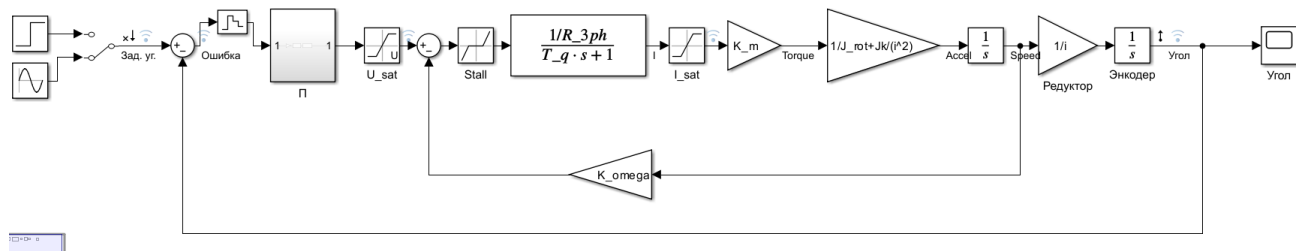


Рис. 19 Дискретная система

Посмотрим реакцию системы в следящем режиме и в режиме переброски (рис.20):

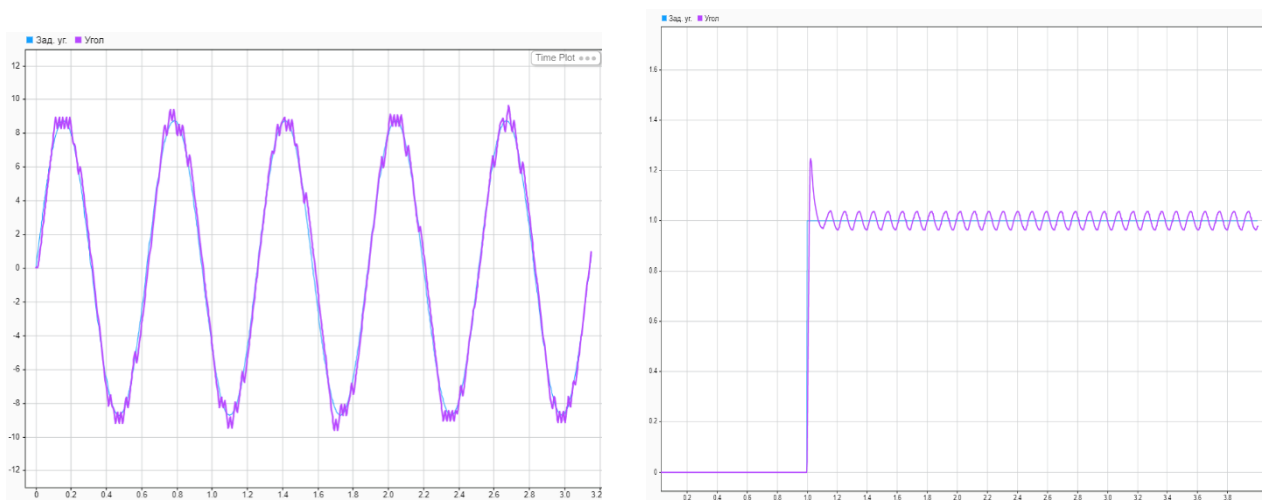


Рис. 20 Задающий и итоговый угол в 2х режимах

Как можно заметить в системе возникают колебания что вызвано дискретизацией управляющей сигнала. Т.е. система оказывается разомкнутой на протяжении периода дискретизации. Анализируя графики можно сделать вывод о том что система устойчива в заданных режимах работы.

## 6. Построение трехфазной модели BLDC двигателя и создание структурированной модели системы

Для дальнейшего развития проекта движения в сторону физической реализации, можно поэкспериментировать с моделью системы. В начале обсуждалась эквивалентная модель двигателя MX2210KV360HA на основе ДПТ. Создадим трехфазную модель двигателя (рис. 21):

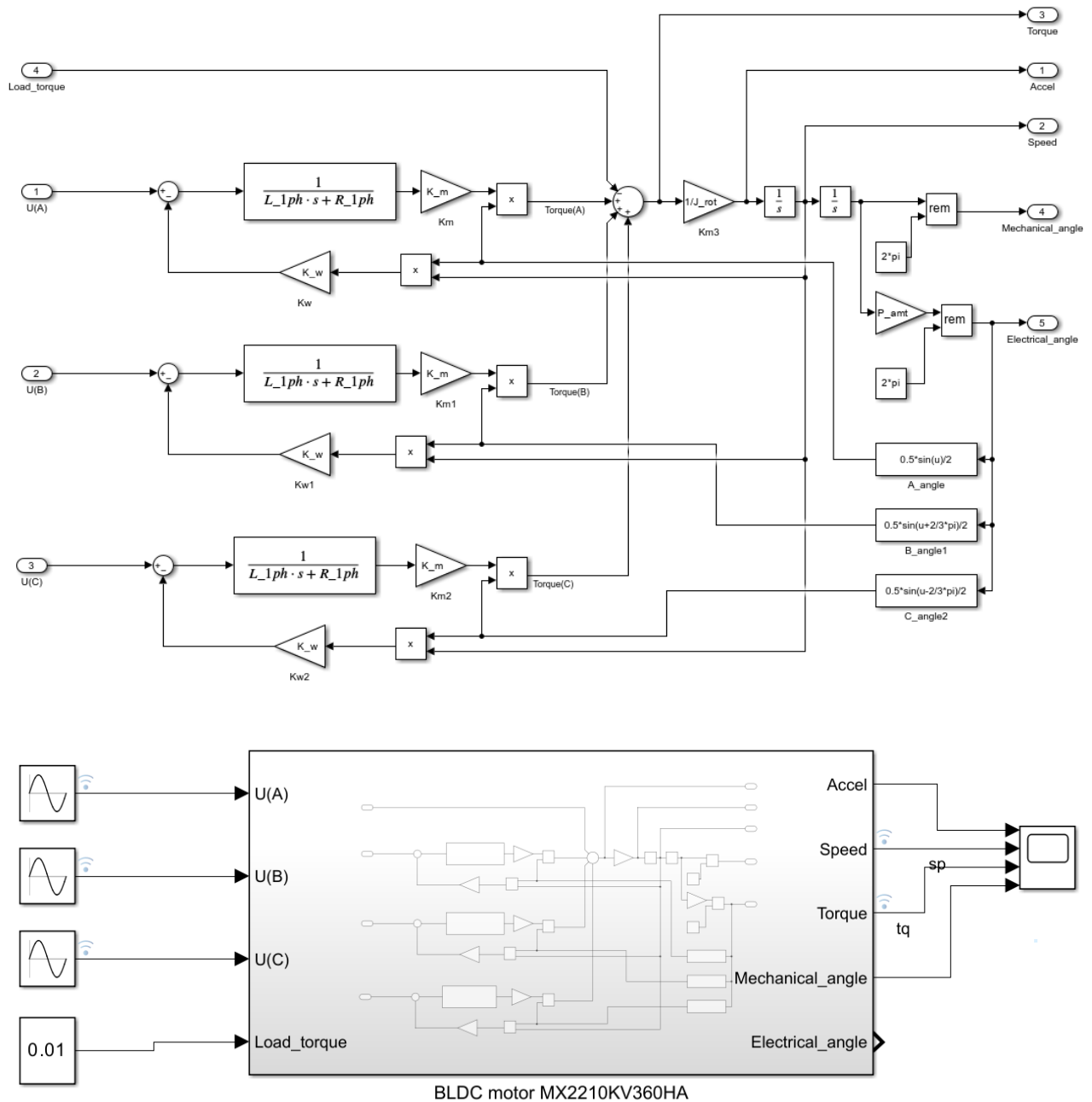


Рис. 21 Трехфазная модель BLDC MX2210KV360HA

Проведем некоторые тесты построенной модели, для этого подадим управляющий сигнал в виде 3 синусоид смещенных на 120 градусов каждая. Полученные графики представлены на рис. 22.

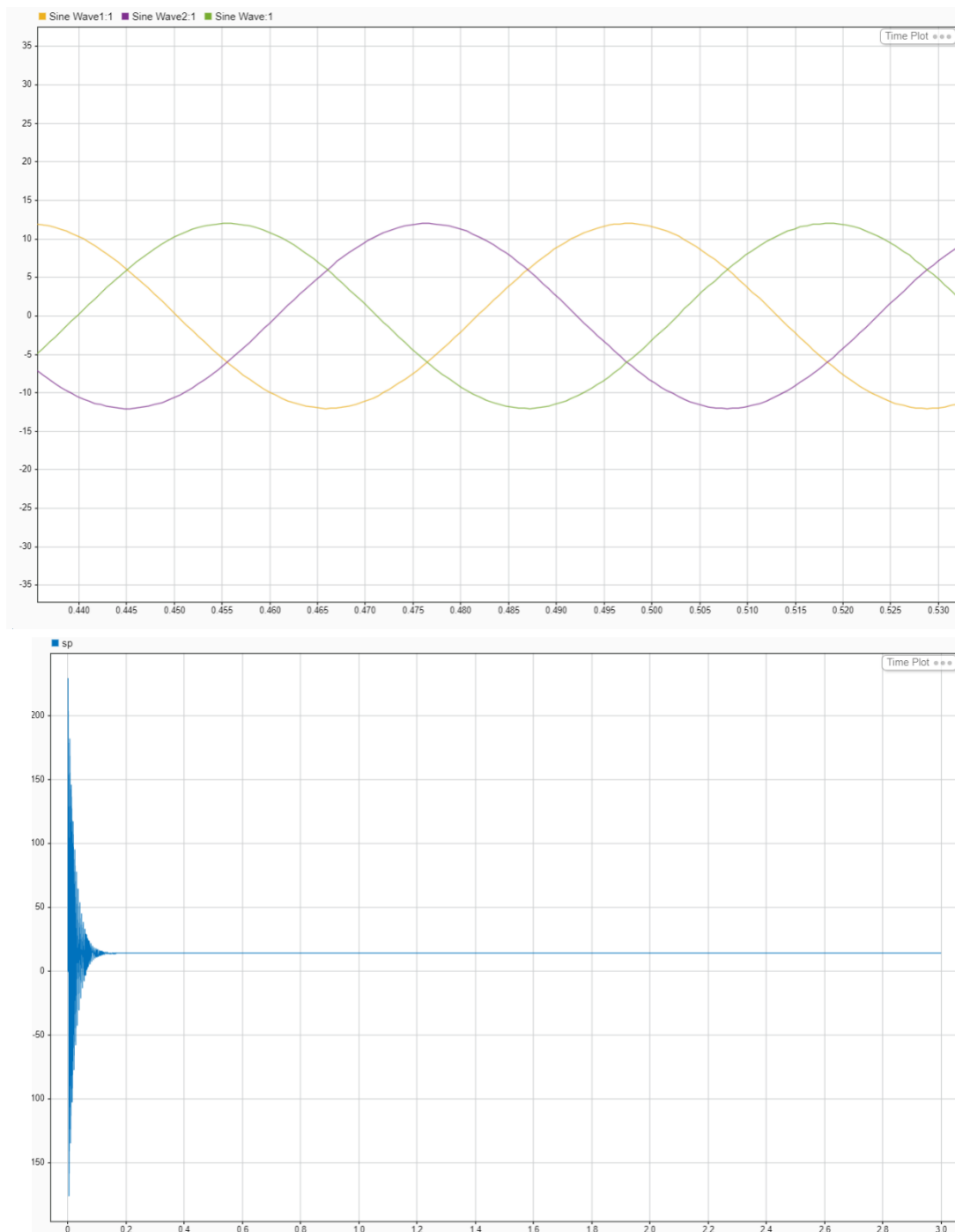


Рис. 22 Графики управляющего воздействия и скорости

Как видно из графиков, модель получилась устойчивой, однако итоговые характеристики, например скорость не сходится реальной, поэтому модель требует доработки.

Создадим общую модель системы с учетом выбранных микроконтроллера и усилителя мощности, энкодера, датчиков холла.

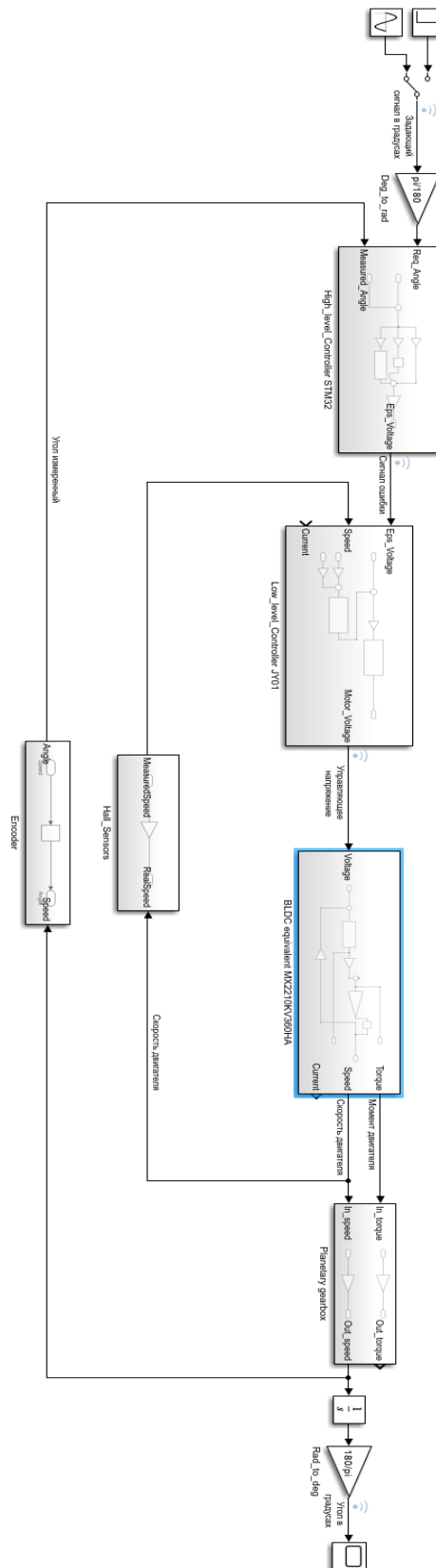


Рис. 23 Общая модель системы с учетом выбранных компонентов

В качестве корректирующего устройства в данной модели используется ПИД-регулятор (рис. 24)

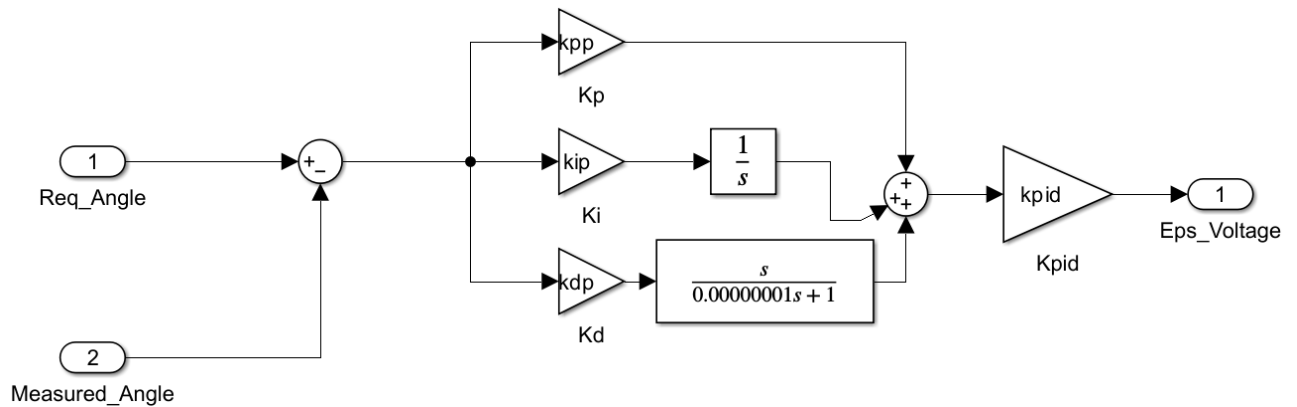


Рис. 24 Корректирующее устройство – ПИД регулятор

Коэффициенты были подобраны с помощью Control System Tuner

Листинг 2 Код матлаб для ПИД-регулятора

**% Высокоуровневый контроллер с ПИД-регулятором**

```
kpp = 0.51624;
kip = 5.1624e-08;
kdp = 0;
kpid = 1;
```

Посмотрим графики в режиме слежения и переброски – рисунки 25,26

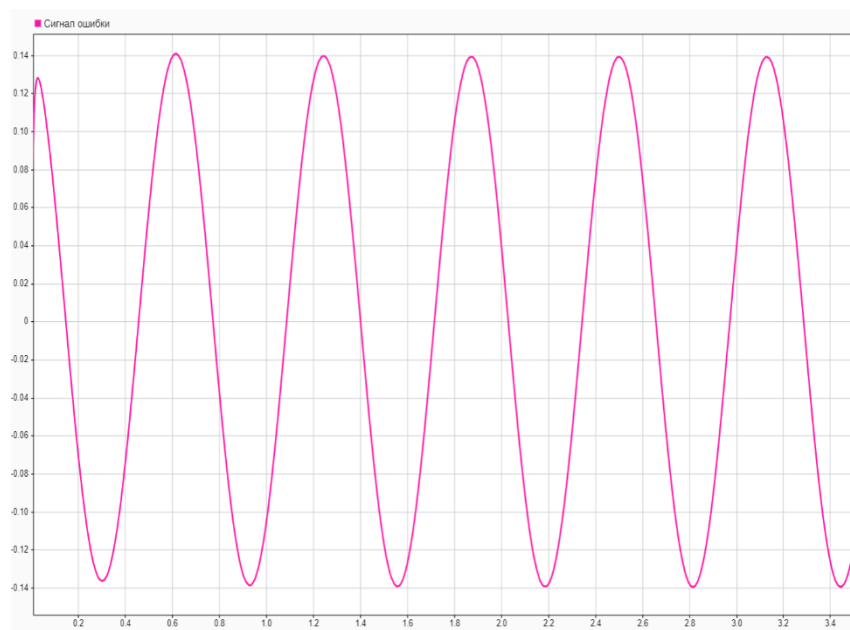


Рис. 25 Сигнал ошибки в режиме слежения (в градусах)

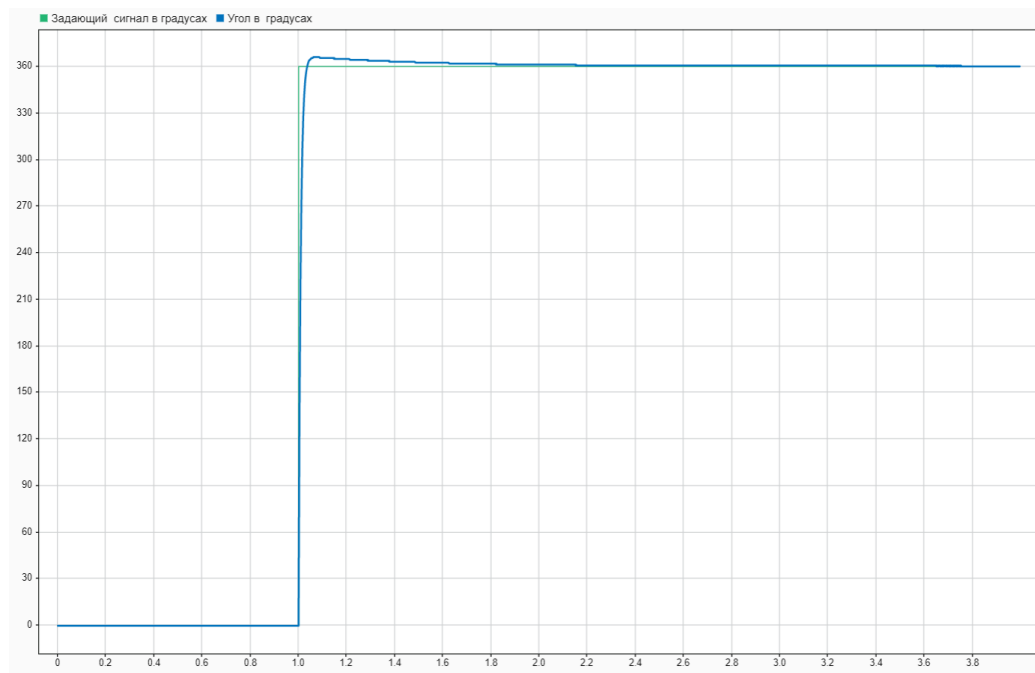


Рис. 26 Режим переброски

Как можно заметить из графиков, данная система справляется также хорошо с заданными режимами работы, что делает внедрение ПИД регулятора привлекательной перспективой



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы была получена модель BLDC двигателя и общая модель системы. Был проведен энергетический расчет для проверки правильности выбора двигателя.

Расчёт и моделирование были произведены в программном пакете MatLab и Simulink. Путём моделирования было установлено, что система не выполняет требуемые режимы работы. Для реализации требуемых параметров был проведён частотный синтез системы и получено корректирующее устройство, которое было дополнено нелинейными корректирующими элементами. При повторном моделировании был сделан вывод о корректности работы введенных корректирующих устройств. А также была получена дискретная модель системы, реализуемая на МК. Был сделан вывод об устойчивости итоговой дискретной модели. Также была создана модель трехфазного двигателя для дальнейших экспериментов, и структурированная модель привода оси с ПИД-регулятором, был сделан вывод о возможности такого корректирующего устройства.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Ротхаммель К. Энциклопедия антенн: Antennenbuch под ред. Кришке А. Изд. 11-е: Издательство ДМК-Пресс 2016. 812с. ISBN 978-5-97060-217-1
- 2) Биард Рэндал У., МакЛэйн Тимоти У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика 2012. 309 с.
- 3) С.В. Овсянников, А.А. Бошляков, А.О. Кузьмина  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ
- 8) К.О. Коровин , С.В. Кузьмин, Реализация канала связи с БПЛА с использованием широкополосных малоэлементных антенных решеток в качестве бортовых антенных систем, 2020, 6 с.
- 9) Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. Пособие для втузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 304 с.