



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Московский государственный технологический университет**  
**«СТАНКИН»**  
**(ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)**

---

Кафедра робототехники и мехатроники

**КУРСОВАЯ РАБОТА**  
на тему  
Разработка следящего привода с компьютерным управлением  
Вариант 2

Выполнил:  
студент группы ИДБ-14-04 \_\_\_\_\_ Валуев В.С.  
(дата) (подпись)

Проверил  
преподаватель: \_\_\_\_\_ Илюхин Ю.В.  
(дата) (подпись)

Москва 2018 г.

## **Оглавление**

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>1. ЭНЕРГИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Выбор исполнительного двигателя и преобразователя движения для «локтевого» звена манипулятора .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1.1. Кинематический анализ манипулятора.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1.2. Силовой анализ манипулятора.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1.3. Оценка мощности и подбор исполнительного двигателя второго звена.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1.4. Определение оптимального передаточного отношения и выбор редуктора.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1.5. Проверочный расчет .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2. Выбор исполнительного двигателя и преобразователя движения для первого звена манипулятора .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2.1. Кинематический анализ манипулятора.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2.2. Силовой анализ манипулятора.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2.3. Оценка мощности и подбор исполнительного двигателя первого звена .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2.4. Определение передаточного отношения и выбор редуктора .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.5. Проверочный расчет .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.6. Построение ОРМС двигателя привода первого звена.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.7. Тепловой расчет двигателя привода «плечевого» звена .....</b>	<b>18</b>
<b>2. СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1. Определение требований по точности.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2. Выбор датчика положения .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Синтез регуляторов следящего привода.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.1. Синтез подсистемы регулирования тока .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2. Синтез подсистемы регулирования скорости .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.3. Синтез подсистемы регулирования положения .....</b>	<b>37</b>
<b>3. Алгоритмы компьютерной реализации регуляторов следящего привода .....</b>	<b>44</b>
<b>4. Выполнение особых требований.....</b>	<b>48</b>
<b>Заключение .....</b>	<b>49</b>
<b>Список использованных источников .....</b>	<b>50</b>

**Исходные данные:**

$\Delta R_{\text{доп.ст}} = 0,01 \text{ [м]}$  – допустимая статическая ошибка;

$\Delta R_{\text{доп.дин}} = 0,012 \text{ [м]}$  – допустимая динамическая ошибка;

$v_{p.m} = 0.5 \text{ [м/с]}$  – максимальная скорость рабочего движения РО;

$a_{p.m} = 0.5 \text{ [м/с}^2\text{]}$  – максимальное ускорение рабочего движения РО;

$v_{п.м} = 1 \text{ [м/с]}$  – максимальная скорость РО при переброске;

$t_p = 0.5 \text{ [с]}$  – длительность разгона до максимальной скорости;

$\sigma_{\text{доп}} = 10 \text{ [%]}$  – допустимое перерегулирование;

$k_{п.относ} = 0,25$  – относительная длительность переброски в рабочем цикле;

$L_1 = 0.5 \text{ [м]}$  – длина первого звена;

$L_2 = 0.5 \text{ [м]}$  – длина второго звена;

$m_1 = 10 \text{ [кг]}$  – масса первого звена;

$m_2 = 7 \text{ [кг]}$  – масса второго звена;

$m_{po} = 2,5 \text{ [кг]}$  – масса РО;

$m_o = 1 \text{ [кг]}$  – масса объекта манипулирования;

$q_{1min} = \frac{-\pi}{6}$  ;  $q_{1max} = \frac{\pi}{2}$  – диапазон перемещений первого звена;

$q_{2min} = \frac{-2\pi}{3}$  ;  $q_{2max} = \frac{\pi}{2}$  – диапазон перемещений второго звена;

## Введение

Цифровой следящий привод (ЦСП) представляет собой динамическую систему, образованную взаимодействующими друг с другом цифровыми и аналоговыми элементами, что усложняет математическую модель и исследование его свойств. Поэтому синтез ЦСП осуществляется в основном с использованием линеаризованных математических моделей.

В настоящей работе используется подход к синтезу алгоритмов ЦСП, который получил название синтеза цифровой системы по ее непрерывному аналогу.

Начальным этапом процесса проектирования является выполнение энергетического расчета и выбор на этой основе исполнительных двигателей, механических передач и силовых преобразователей (усилителей мощности), в совокупности обеспечивающих возможность реализации силового воздействия на объект управления.

В структуре системы предусматривается замыкание привода по углу поворота вала двигателя, в результате чего образуется главный контур регулирования положения, и использование двух дополнительных контуров динамической коррекции, построенных по принципам систем подчиненного регулирования и реализующих регулирование токов в обмотках и скорости вращения вала двигателя. Производится синтез цифровых подсистем регулирования тока, скорости, положения.

Результатами синтеза следящего привода с дискретными средствами коррекции является значение периода квантования по времени и дискретные передаточные функции алгоритмов реализации регуляторов и корректирующих обратных связей, необходимые для формирования соответствующих разностных уравнений и программной реализации цифрового управления.

## 1. ЭНЕРГИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

### 1.1. Выбор исполнительного двигателя и преобразователя движения для «локтевого» звена манипулятора

#### 1.1.1. Кинематический анализ манипулятора

Вычислим требуемую максимальную угловую скорость, развиваемую вторым звеном манипулятора

$$\Omega_{2m.тр} = \frac{v_{п.м}}{L_2} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ [рад/с]},$$

где  $v_{п.м}$  – максимальная скорость при переброске [м/с];  $L_2$  – расстояние от оси поворота «локтевого» звена до центра масс рабочего органа [м].

Определим требуемое максимальное угловое ускорение второго звена манипулятора

$$\varepsilon_{2m.тр} = \frac{\Omega_{2m}}{t_p} = \frac{2}{0,5} = 4 \text{ [рад/с}^2\text{]},$$

где  $t_p$  – длительность разгона до максимальной скорости [с].

Требуемая максимальная угловая скорость рабочего движения второго звена

$$\Omega_{2р.м.тр} = \frac{v_{р.м}}{L_2} = \frac{0,5}{0,5} = 1 \text{ [рад/с]}.$$

Требуемое максимальное угловое ускорение рабочего движения второго звена

$$\varepsilon_{2р.м.тр} = \frac{a_{р.м}}{L_2} = \frac{0,5}{0,5} = 1 \text{ [рад/с}^2\text{]},$$

где  $a_{р.м}$  – максимальное ускорение рабочего движения рабочего органа.

#### 1.1.2. Силовой анализ манипулятора

Найдем требуемый максимальный момент привода «локтевого» звена манипулятора

$$M_{2m.тр} = \frac{1}{\eta_{2р}} (M_{2ст.m} + M_{2дин.m}).$$

Здесь  $\eta_{2р} = 0,9$  – КПД предварительно выбранного планетарного редуктора;  $M_{2ст.m}$  – максимальный статический момент второго звена манипулятора

$$M_{2ст.m} = m_2 g \cdot \frac{L_2}{2} \cdot \sin(q_1 + q_2) + (m_{po} + m_{об}) g L_2 \sin(q_1 + q_2),$$

где  $m_2$  – масса второго звена манипулятора;  $g \approx 9,8 \text{ [м/с}^2\text{]}$  – ускорение свободного падения;  $m_{po}$  – масса рабочего органа;  $m_o$  – масса объекта управления.

Чтобы вычислить максимальный статический момент «локтевого» такую конфигурацию механизма, при которой  $\sin(q_1 + q_2)$  будет равен 1. Для этого будем считать, что  $q_1 = q_2 = 45^\circ$ , так как  $\sin(90^\circ) = 1$  (рис. 1).

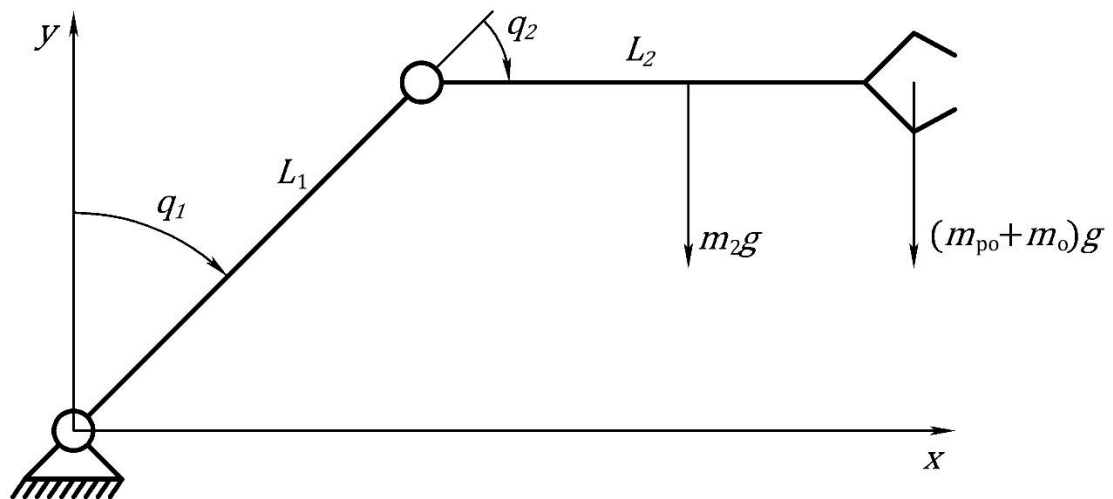


Рис. 1. Конфигурация манипулятора для определения статического момента

Тогда

$$M_{2ст.m} = m_2 g \cdot \frac{L_2}{2} + (m_{po} + m_{об}) g L_2 = 7 \cdot 9,8 \cdot \frac{0,5}{2} + (2,5 + 1) \cdot 9,8 \cdot 0,5 = 34,3 \text{ [Нм];}$$

$M_{2дин.m}$  – максимальный динамический момент на втором звене

$$M_{2дин.m} = J_{2экв} \cdot \varepsilon_{2m},$$

где  $J_{2экв}$  – эквивалентный момент инерции «локтевого» звена

$$J_{2\text{экв}} = (m_{\text{по}} + m_{\text{об}}) \cdot L_2^2 + m_2 \cdot \left(\frac{L_2}{2}\right)^2 = (2,5 + 1) \cdot 0,25 + 7 \cdot \frac{0,25}{4} = 1,3125 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2\text{]}.$$

Следовательно,

$$M_{2\text{дин.т}} = 1,3125 \cdot 4 = 5,25 \text{ [Нм]}.$$

Тогда требуемый максимальный момент двигателя второго звена

$$M_{2\text{т.тр}} = \frac{34,3 + 5,25}{0,9} = 43,94 \text{ [Нм]}.$$

### 1.1.3. Оценка мощности и подбор исполнительного двигателя второго звена

Определим требуемую максимальную мощность двигателя «локтевого» звена манипулятора

$$P_{2\text{т.тр}} = M_{2\text{т.тр}} \cdot \Omega_{2\text{т.тр}} = 43,94 \cdot 2 = 87,8889 \text{ [Вт]},$$

где  $\eta = 0,9$  – КПД предварительно взятого планетарного редуктора.

Требуемая мощность двигателя

$$P_{2\text{дв.тр}} = 2,5 \cdot P_{2\text{т}} = 2,5 \cdot 87,8889 \approx 219,7222 \text{ [Вт]}.$$

Выбираем двигатель привода второго звена из условия:

$$P_{2\text{дв.тр}} < P_{2\text{дв.н}}.$$

На основании этого выберем бесколлекторный двигатель DB59C024035–А фирмы Nanotech. Его основные характеристики приведены ниже.

Nanotech DB59C024035–А:

$P_{2\text{дв.н}} = 220 \text{ [Вт]}$  – номинальная мощность двигателя;

$U_{2\text{н}} = 24 \text{ [В]}$  – номинальное напряжение;

$I_{2\text{н}} = 13,6 \text{ [А]}$  – номинальная сила тока;

$M_{2\text{дв.т}} = 1,8 \text{ [Нм]}$  – максимальный момент на валу двигателя;

$M_{2\text{дв.н}} = 0,6 \text{ [Нм]}$  – номинальный момент на валу двигателя;

$n_{2\text{дв.н}} = 3500 \text{ [об/мин]}$  – частота вращения вала двигателя;

$J_{2\text{дв}} = 17,3 \cdot 10^{-6} \text{ [кг} \cdot \text{м}^2\text{]}$  – момент инерции ротора двигателя;

$L_{2\text{дв}} = 1,3 \text{ [мГн]}$  – индуктивность обмоток двигателя;

$R_{2\text{дв}} = 0,135 \text{ [Ом]}$  – сопротивление в обмотках двигателя;

$k_{2m} = 13 \text{ [Нсм/А]} = 0,044 \text{ [Нм/А]}$  – коэффициент момента двигателя;

$m_{2\text{дв}} = 0,95 \text{ [кг]}$  – масса двигателя.

#### 1.1.4. Определение оптимального передаточного отношения и выбор редуктора

Определим оптимальное передаточное отношение редуктора

$$i_{2\text{опт}} = \sqrt{\frac{M_{2m.\text{тр}}}{J_{2\text{дв}} \cdot \varepsilon_{2m.\text{тр}}}} = \sqrt{\frac{43,94}{17,3 \cdot 10^{-6} \cdot 4}} = 796,89,$$

По полученному передаточному отношению выберем планетарный редуктор PLG 64 LB с характеристиками:

$i_{2p} = 490$  – передаточное отношение редуктора;

$\eta_{2p} = 0,9$  – КПД редуктора;

$c_{2p} = 2,4$  – жесткость редуктора;

$m_{2p} = 1,6 \text{ [кг]}$  – масса редуктора.

#### 1.1.5. Проверочный расчет

Проверяем условие по моменту:

$$M_{2\text{дв.}m.\text{тр}} < M_{2\text{дв.н}} ,$$

где  $M_{2\text{дв.}m.\text{тр}}$  – требуемый максимальный момент второго двигателя

$$M_{2\text{дв.}m.\text{тр}} = J_{2\text{дв}} i_{2p} \varepsilon_{2m.\text{тр}} + \frac{M_{2m.\text{тр}}}{i_{2p}} = 17,3 \cdot 10^{-6} \cdot 490 \cdot 4 + \frac{43,94}{490} = 0,1236 \text{ [Нм]};$$

$$M_{2\text{дв.}m.\text{тр}} = 0,1236 \text{ [Нм]} < M_{2\text{дв.н}} = 0,6 \text{ [Нм]}.$$



Условие выполняется.

Проверим условие по частоте вращения:

$$n_{2\text{дв.т.тр}} < n_{2\text{дв.н}}.$$

Здесь  $n_{2\text{дв.т.тр}}$  – требуемая максимальная частота вращения второго двигателя

$$n_{2\text{дв.т.тр}} = \frac{30 \cdot \Omega_{2\text{дв.т.тр}}}{\pi},$$

где  $\Omega_{2\text{дв.т.тр}}$  – требуемая максимальная угловая скорость второго двигателя

$$\Omega_{2\text{дв.т.тр}} = i_{2p} \cdot \Omega_{2\text{т.тр}} = 980 [\text{рад/с}].$$

Тогда

$$n_{2\text{дв.т.тр}} = \frac{30 \cdot 980}{3,14} = 9,3583 \cdot 10^3 [\text{об/мин}],$$

$$n_{2\text{дв.т.тр}} = 9,3583 \cdot 10^3 [\text{об/мин}] > n_{2\text{дв.н}} = 3500 [\text{об/мин}].$$

Условие не выполняется.

Чтобы выполнялось условие по угловой скорости, возьмем аналогичный редуктор с передаточным отношением  $i_{2p} = 120$ .

Проверяем условие по моменту:

$$M_{2\text{дв.т.тр}} < M_{2\text{дв.н}}.$$

$$M_{2\text{дв.т.тр}} = J_{2\text{дв}} i_{2p} \varepsilon_{2\text{т.тр}} + \frac{M_{2\text{т.тр}}}{i_{2p}} = 17,3 \cdot 10^{-6} \cdot 120 \cdot 4 + \frac{43,94}{120} = 0,3745 [\text{Нм}];$$

$$M_{2\text{дв.т.тр}} = 0,3745 [\text{Нм}] < M_{2\text{дв.н}} = 0,6 [\text{Нм}].$$

Условие выполняется.

Проверим условие по частоте вращения:

$$n_{2\text{дв.т.тр}} < n_{2\text{дв.н}}.$$

$$\Omega_{2\text{дв.т.тр}} = i_{2p} \cdot \Omega_{2\text{т.тр}} = 120 \cdot 2 = 240 [\text{рад/с}],$$

$$n_{2дв.т.тр} = \frac{30 \cdot \Omega_{2дв.т.тр}}{\pi} = \frac{30 \cdot 240}{3,14} = 2291,8 \text{ [об/мин]}.$$

$$n_{2дв.т.тр} = 2291,8 \text{ [об/мин]} > n_{2дв.н} = 3500 \text{ [об/мин]}.$$

Условие выполняется.

## 1.2. Выбор исполнительного двигателя и преобразователя движения для первого звена манипулятора

### 1.2.1. Кинематический анализ манипулятора

Требуемая максимальная угловая скорость, развиваемая первым звеном манипулятора, [рад/с]:

$$\Omega_{1т.тр} = \frac{v_{п.т}}{R},$$

где  $v_{п.т}$  – максимальная скорость при переброске [м/с];  $R$  – расстояние от оси вращения «плечевого» звена до конечной точки, которое можно определить по теореме косинусов (рис. 2), [м]:

$$R^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos(180 - q_2) = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2 \cos(q_2).$$

Здесь  $q_2$  – обобщенная координата, характеризующая положение второго звена манипулятора относительно продольной оси первого звена.

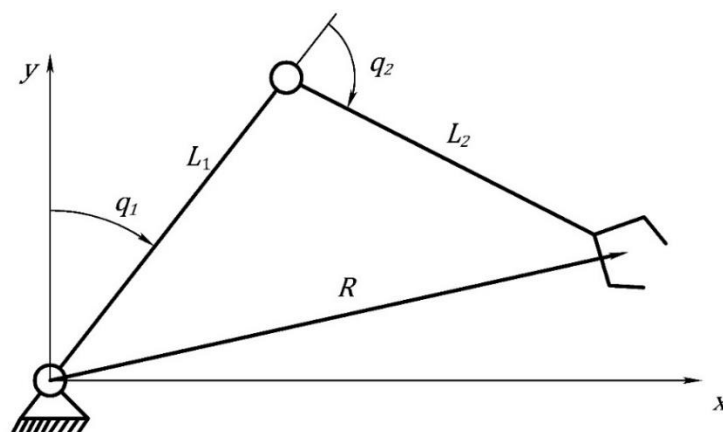


Рис. 2. Исследуемый манипулятор

Таким образом, угловая скорость «плечевого» звена манипулятора зависит от обобщенной координаты  $q_2$ :

$$\Omega_{1тр}(q_2).$$

Требуемое максимальное угловое ускорение первого звена манипулятора, [рад/с<sup>2</sup>]:

$$\varepsilon_{1m.тр} = \frac{\Omega_{1m.тр}}{t_p},$$

где  $t_p$  – длительность разгона до максимальной скорости, [с].

Следовательно, угловое ускорение первого звена тоже зависит от  $q_2$ :

$$\varepsilon_{1тр}(q_2).$$

Требуемая максимальная угловая скорость рабочего движения первого звена, [рад/с]:

$$\Omega_{2р.м.тр} = \frac{v_{р.м}}{R}.$$

Требуемое максимальное угловое ускорение рабочего движения первого звена, [рад/с<sup>2</sup>]:

$$\varepsilon_{2р.м.тр} = \frac{a_{р.м}}{R}.$$

Следовательно, требуемые угловая скорость и угловое ускорение рабочего движения также зависят от обобщенной координаты  $q_2$ :

$$\Omega_{2р.тр}(q_2).$$

$$\varepsilon_{2р.тр}(q_2).$$

### 1.2.2. Силовой анализ манипулятора

Требуемый максимальный момент сил, который должен развивать привод «плечевого» звена манипулятора. При условии, что силы тяжести приложены в центрах масс первого и второго звеньев, рабочего органа и объекта управления

$$M_{1м.тр} = \frac{1}{\eta_1} \cdot (M_{1ст.м} + M_{1дин.м}).$$

Здесь  $\eta_1 = 0,9$  – КПД предварительно выбранного планетарного редуктора привода первого звена;  $M_{1ст.м}$  – максимальный статический момент первого звена манипулятора

$$M_{1\text{ст.}m} = m_1 g \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(q_1) + m_{2\text{пр}} g L_1 \sin(q_1) + m_2 g (L_1 \sin(q_1) + \\ + \frac{L_1}{2} \cdot \sin(q_1 + q_2)) + (m_{\text{ро}} + m_{\text{об}}) g (L_1 \sin(q_1) + L_2 \sin(q_1 + q_2)),$$

где  $m_1$  – масса первого звена манипулятора;  $m_2$  – масса второго звена манипулятора;  $g \approx 9,8$  [м/с<sup>2</sup>] – ускорение свободного падения;  $m_{\text{ро}}$  – масса рабочего органа;  $m_{\text{о}}$  – масса объекта управления;  $m_{2\text{пр}}$  – масса привода «локтевого» звена

$$m_{2\text{пр}} = m_{2\text{дв}} + m_{2\text{р}} = 0,95 + 1,6 = 2,55 \text{ [кг]}.$$

$M_{1\text{дин.}m}$  – максимальный динамический момент на втором звене

$$M_{1\text{дин.}m} = J_{1\text{экв}} \cdot \varepsilon_{1m},$$

где  $J_{1\text{экв}}$  – эквивалентный момент инерции

$$J_{1\text{экв}} = (m_{\text{ро}} + m_{\text{об}}) R^2 + m_2 \rho^2 + m_{2\text{пр}} L_1^2 + m_1 \left( \frac{L_1}{2} \right)^2.$$

Здесь  $\rho$  – расстояние от оси вращения «плечевого» звена до центра масс «локтевого»

$$\rho = \sqrt{L_1^2 + \left( \frac{L_2}{2} \right)^2 + 2L_1 \frac{L_2}{2} \cos(q_2)}.$$

Максимальное значение суммарного момента можно получить путем варьирования значений обобщенных координат  $q_1$  и  $q_2$ . Для упрощения решения задачи рассмотрим конфигурацию манипулятора, приведенную на рис.3, при которой рабочий орган находится на горизонтальной прямой линии, проходящей через ось вращения «плечевого» звена. Тогда между значениями обобщенных координат  $q_1$  и  $q_2$  существует зависимость:

$$q_1 = \arccos \left( \frac{L_2 \sin(q_2)}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 \cos(q_2)}} \right).$$

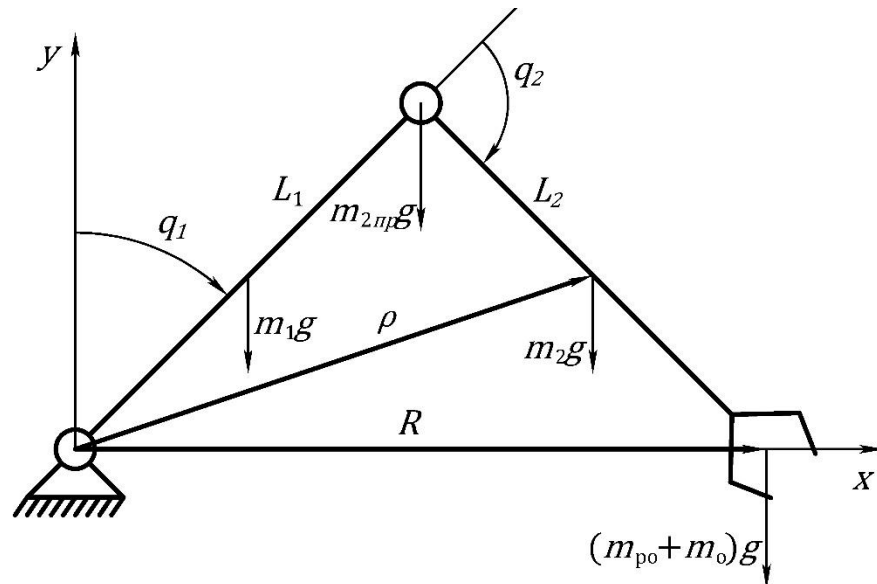


Рис. 3. Конфигурация механизма для силового анализа

Таким образом, достаточно изменять только обобщенную координату  $q_2$ , а  $q_1$  может быть вычислена по приведенной выше формуле.

### 1.2.3. Оценка мощности и подбор исполнительного двигателя первого звена

Для определения максимальной мощности механического движения «плечевого» звена построим график зависимости максимальной мощности  $P_{1m}$  от обобщенной координаты  $q_2$  (рис. 4).

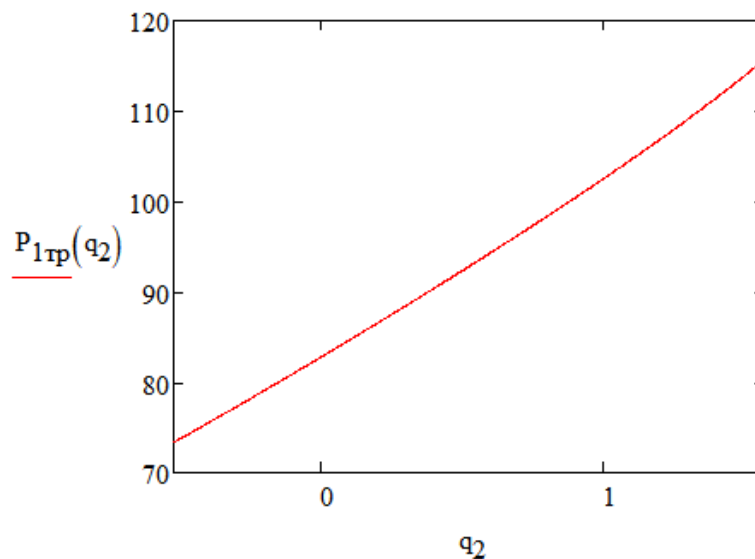


Рис. 4. График зависимости максимальной мощности от обобщенной координаты  $q_2$

Из графика видно, что максимальное значение мощности  $P_{1m}$  принимает при граничном значении обобщенной координаты  $q_{2m} = 90^\circ$ .

Тогда

$$P_{1m.тр} = P_{1тр}(q_{2m}) = 115,8034 \text{ [Вт]};$$

$$\Omega_{1m.тр} = \Omega_{1тр}(q_{2m}) = 1,4142 \text{ [рад/с]};$$

$$\varepsilon_{1m.тр} = \varepsilon_{1тр}(q_{2m}) = 2,8284 \text{ [рад/с}^2\text{]};$$

$$\Omega_{1р.м.тр} = \Omega_{1р.тр}(q_{2m}) = 0,7071 \text{ [рад/с]};$$

$$\varepsilon_{1р.м.тр} = \varepsilon_{1р.т}(q_{2m}) = 0,7071 \text{ [рад/с}^2\text{]};$$

$$M_{1ст.м} = M_{1ст}(q_{2m}) = 60,6267 \text{ [Нм]};$$

$$J_{1экв} = J_{1экв}(q_{2m}) = 5,2 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2\text{]};$$

$$M_{1дин.м} = M_{1дин}(q_{2m}) = 14,7078 \text{ [Нм]};$$

$$M_{1м} = M_{1тр}(q_{2m}) = 81,8854 \text{ [Нм]};$$

Таким образом, требуемая мощность первого двигателя

$$P_{1дв.тр} = 2,5 \cdot P_{1м} = 2,5 \cdot 118,3768 = 289,5086 \text{ [Вт]}.$$

Выбираем двигатель привода первого звена из условия:

$$P_{1дв.тр} < P_{1дв.н}$$

На основании этого выберем бесколлекторный двигатель В86112-24 фирмы Transmotec. Его основные характеристики приведены ниже.

Transmotec В86112-24:

$P_{1дв.н} = 393 \text{ [Вт]}$  – номинальная мощность двигателя;

$U_{1дв.н} = 24 \text{ [В]}$  – номинальное напряжение;

$I_{1дв.н} = 23 \text{ [А]}$  – номинальная сила тока;

$M_{1дв.п} = 6,2 \text{ [Нм]}$  – максимальный момент на валу двигателя;

$M_{1дв.н} = 1,2 \text{ [Нм]}$  – номинальный момент на валу двигателя;

$n_1 = 3126 \text{ [об/мин]}$  – частота вращения вала двигателя;

$n_{xx} = 3870 \text{ [об/мин]}$  – частота вращения вала двигателя;

$J_{1дв} = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ [кг} \cdot \text{м}^2\text{]}$  – момент инерции ротора двигателя;

$L_{1дв} = 0,096$  [мГн] – индуктивность обмоток двигателя;

$R_{1дв} = 0,04$  [Ом] – сопротивление в обмотках двигателя;

$k_m = 0,0586$  [Нм/А] – коэффициент момента двигателя;

$T_{1м} = 10,6$  [мс] – электрохимическая постоянная времени;

$m_{1дв} = 3,15$  [кг] – масса двигателя.

#### 1.2.4. Определение передаточного отношения и выбор редуктора

Определим оптимальное передаточное отношение редуктора

$$i_{2опт} = \sqrt{\frac{M_{1м.тр}}{J_{1дв} \cdot \varepsilon_{1м.тр}}} = \sqrt{\frac{81,8854}{0,16 \cdot 10^{-3} \cdot 2,8284}} \approx 425,374.$$

По полученному передаточному отношению выберем планетарный редуктор WITTENSTAIN TP010MA с характеристиками:

$i_{1р} = 220$  – передаточное отношение редуктора;

$\eta_{1р} = 0,92$  – КПД редуктора;

$c_{1р} = 3,2659 \cdot 10^5$  [Нм/рад] – жесткость редуктора;

$\Delta\varphi_{1р} = 2,9089 \cdot 10^{-4}$  [рад] – люфт редуктора;

$m_{1р} = 6,1$  [кг] – масса редуктора.

Основываясь на паспортных данных двигателя, определим его параметры:

Номинальная угловая скорость двигателя:

$$\Omega_{1дв.н} = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{3,14 \cdot 6000}{30} = 1338,5 \text{ [рад/с];}$$

Коэффициент противо-ЭДС:

$$k_e = \frac{U_{1н} - I_{1дв.н} R_{1дв}}{\Omega_{1дв.н}} = \frac{230 - 1,5 \cdot 8,7}{1338,5} = 0,3453 \text{ [Вс/рад];}$$

Угловая скорость холостого хода двигателя:

$$\Omega_{1дв.хх} = \frac{\pi \cdot n_{хх}}{30} = \frac{3,14 \cdot 3870}{30} = 405,2655 \text{ [рад/с];}$$

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_{1Э} = \frac{L_{1ДВ}}{R_{1ДВ}} = \frac{5,4 \cdot 10^{-3}}{8,7} = 0,6207 \text{ [мс]}.$$

### 1.2.5. Проверочный расчет

Проверяем условие по моменту:

$$M_{1ДВ.т.тр} < M_{1ДВ.н} ,$$

где  $M_{1ДВ.т.тр}$  – требуемый максимальный момент первого двигателя

$$M_{1ДВ.т.тр} = J_{1ДВ} i_{1р} \varepsilon_{1т.тр} + \frac{M_{1т.тр}}{i_{1р}} = 0,16 \cdot 10^{-3} \cdot 220 \cdot 2,8284 + \frac{81,8854}{220} = 0,4718 \text{ [Нм]};$$

$$M_{1ДВ.т.тр} = 0,4718 \text{ [Нм]} < M_{1ДВ.н} = 1,2 \text{ [Нм]}.$$

Условие выполняется.

Проверим условие по частоте вращения:

$$n_{1ДВ.т.тр} < n_{1ДВ.н} .$$

Здесь  $n_{1ДВ.т.тр}$  – требуемая максимальная частота вращения второго двигателя

$$n_{1ДВ.т.тр} = \frac{30 \cdot \Omega_{1ДВ.т.тр}}{\pi} ,$$

где  $\Omega_{1ДВ.т.тр}$  – требуемая максимальная угловая скорость второго двигателя

$$\Omega_{1ДВ.т.тр} = i_{1р} \cdot \Omega_{1т.тр} = 220 \cdot 1,4142 = 311,127 \text{ [рад/с]}.$$

Тогда

$$n_{1ДВ.т.тр} = \frac{30 \cdot 311,127}{3,14} = 2971 \text{ [об/мин]},$$

$$n_{1ДВ.т.тр} = 2971 \text{ [об/мин]} < n_{1ДВ.н} = 3126 \text{ [об/мин]}.$$

Условие выполняется.



### 1.2.6. Построение ОРМС двигателя привода первого звена

Для построения ОРМС найдем момент разгона первого двигателя:

$$M_{1p} = M_{1\text{дин.пр.т}} + M_{1\text{ст.пр.т}},$$

где  $M_{1\text{дин.пр.т}}$  – максимальный динамический момент, приведенный к валу двигателя «плечевого» звена

$$M_{1\text{дин.пр.т}} = J_{1\Sigma} \cdot \varepsilon_{1\text{дв.т.тр}}.$$

Здесь  $\varepsilon_{1\text{дв.т.тр}}$  – требуемое максимальное угловое ускорение, которое должен развивать первый двигатель

$$\varepsilon_{1\text{дв.т.тр}} = i_{1p} \cdot \varepsilon_{1\text{т.тр}} = 400 \cdot 2,8284 = 1131,4 \text{ [рад/с}^2\text{]};$$

$J_{1\Sigma}$  – суммарный момент инерции, приведенный к валу первого двигателя

$$J_{1\Sigma} = J_{1\text{дв}} + J_{1\text{экв.пр}},$$

где  $J_{1\text{экв.пр}}$  – эквивалентный момент инерции, приведенный к валу первого двигателя

$$J_{1\text{экв.пр}} = \frac{J_{1\text{экв}}}{i_{1p}^2 \cdot \eta_{1p}} = \frac{5,2}{(220)^2 \cdot 0,92} = 1,168 \cdot 10^{-4} \text{ [кг} \cdot \text{м}^2\text{]}.$$

Тогда суммарный момент инерции

$$J_{1\Sigma} = 0,16 \cdot 10^{-3} + 1,168 \cdot 10^{-4} = 2,7678 \cdot 10^{-4} \text{ [кг} \cdot \text{м}^2\text{]}.$$

Следовательно, максимальный динамический момент, приведенный к валу первого двигателя

$$M_{1\text{дин.пр.т}} = 2,7678 \cdot 10^{-4} \cdot 622,254 = 0,1722 \text{ [Нм]};$$

$M_{1\text{ст.пр.т}}$  – максимальный статический момент, приведенный к валу первого двигателя

$$M_{1\text{ст.пр.т}} = \frac{M_{1\text{ст.т}}}{i_{1p} \cdot \eta_{1p}} = \frac{60,6267}{220 \cdot 0,92} = 0,2995 \text{ [Нм]}.$$

Подставив полученные значения динамического и статического моментов, найдем момент разгона первого двигателя:

$$M_{1p} = 0,1722 + 0,2995 = 0,4718 \text{ [Нм]}.$$

Определим момент торможения первого двигателя:

$$M_{1т} = M_{1ст.пр.т} - M_{1дин.пр.т} = 0,2995 - 0,1722 = 0,1273 \text{ [Нм]}.$$

Коэффициент форсирования по току  $\lambda$  возьмем равным 1, тогда максимальный момент

$$M_{1дв.т} = \lambda M_{1дв.н} = 1 \cdot 1,2 = 1,2 \text{ [Нм]}.$$

На рис. 5 показана приведенная диаграмма нагрузки в области располагаемых моментов и скоростей.

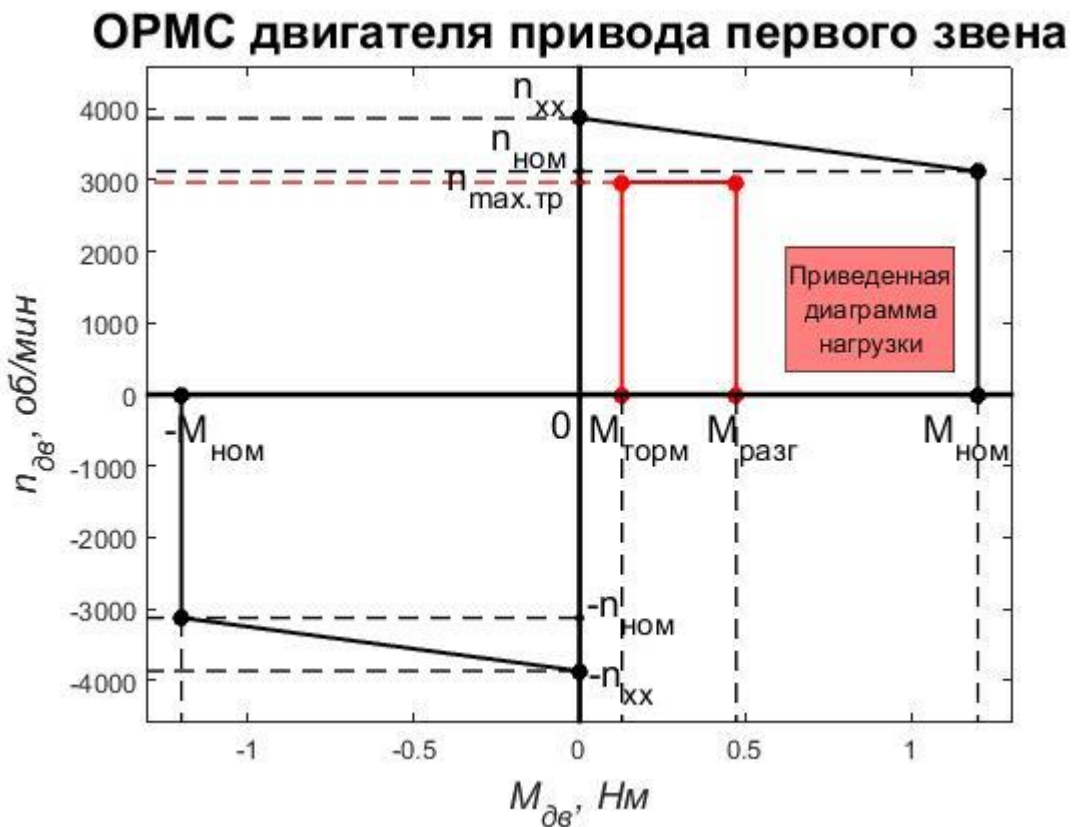


Рис. 5. Приведенная диаграмма нагрузки в ОРМС первого двигателя

### 1.2.7. Тепловой расчет двигателя привода «плечевого» звена

При проведении теплового расчета рассматривается эквивалентный гармонический закон движения вала двигателя, входящего в состав привода «плечевого» звена (рис. 6).

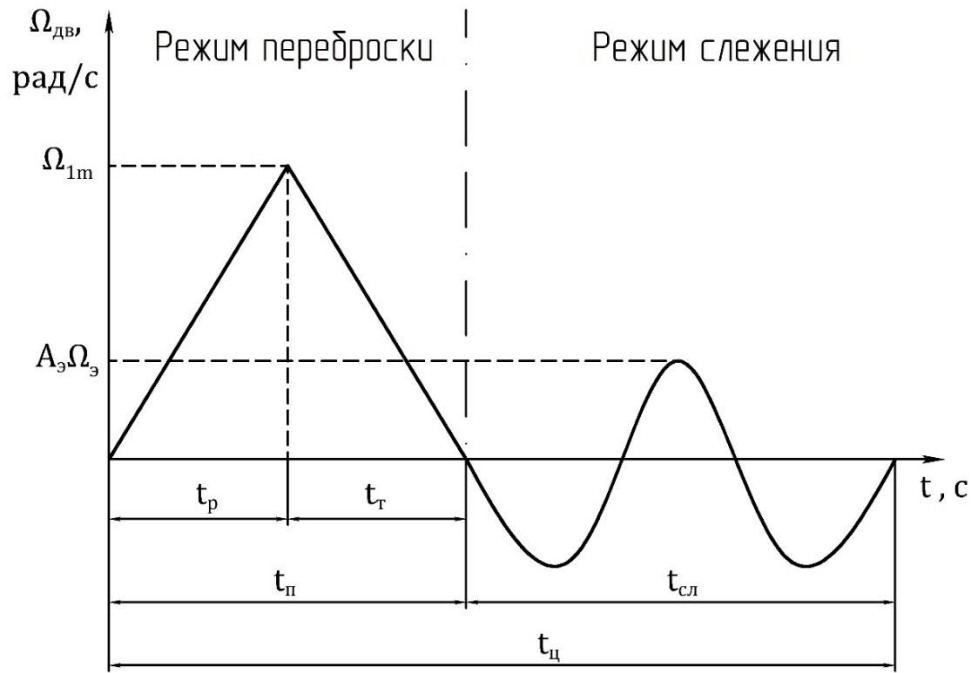


Рис. 6. Эквивалентный гармонический закон движения вала двигателя

Заменим реальное движение эквивалентным гармоническим, тогда найдем амплитуду эквивалентного гармонического задающего воздействия

$$A_э = \frac{\Omega_{1p.m.тр}^2 \cdot i_{1p}}{\varepsilon_{1p.m.тр}} = \frac{(0,7071)^2 \cdot 220}{0,7071} = 155,5635 \text{ [рад]}.$$

Определим круговую частоту эквивалентного гармонического задающего воздействия

$$\Omega_э = \frac{\varepsilon_{1p.m.тр}}{\Omega_{1p.m.тр}} = \frac{0,7071}{0,7071} = 1 \text{ [рад/с]}.$$

Найдем угловое ускорение привода первого звена в режиме слежения

$$\varepsilon_{1дв.сл} = A_э \Omega_э^2 = 155,5635 \cdot 1 = 155,5635 \text{ [рад/с}^2\text{]}.$$

Определим момент первого двигателя в режиме слежения

$$M_{1сл} = M_{1ст.п.т} + M_{1дин.п.сл},$$

где  $M_{1дин.п.сл}$  — динамический момент нагрузки в режиме слежения, приведенный к валу первого двигателя

$$M_{1дин.п.сл} = J_{1\Sigma} \cdot \varepsilon_{1дв.сл} = 2,7678 \cdot 10^{-4} \cdot 155,5635 = 0,0431 \text{ [Нм]}.$$

Тогда

$$M_{1сл} = 0,2995 + 0,0431 = 0,3426 \text{ [Нм]}.$$

Найдем длительность режима переброски, считая, что

$$t_p = t_T = 0,5 \text{ [с]},$$

где  $t_T$  – длительность торможения.

То

$$t_{\Pi} = t_p + t_T = 0,5 + 0,5 = 1 \text{ [с]}.$$

Вычислим длительность цикла

$$t_{\text{ц}} = \frac{t_{\Pi} \cdot (k_{\text{п.отн}} + 1)}{k_{\text{п.отн}}} = \frac{1 \cdot (0,25 + 1)}{0,25} = 5 \text{ [с]}.$$

Зная длительность цикла и длительность переброски, определим длительность режима слежения

$$t_{\text{сл}} = t_{\text{ц}} - t_{\Pi} = 5 - 1 = 4 \text{ [с]}.$$

Следовательно, момент первого двигателя при эквивалентном гармоническом законе движения

$$\begin{aligned} M_{1\text{дв.экв}} &= \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} (M_{1\text{р}}^2 t_p + M_{1\text{т}}^2 t_T + M_{1\text{сл}}^2 t_{\text{сл}})} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{5} ((0,4718)^2 \cdot 0,5 + (0,1273)^2 \cdot 0,5 + (0,3426)^2 \cdot 4)} = 0,3432 \text{ [Нм]}. \end{aligned}$$

Проверим выполнение условия по эквивалентному моменту:

$$\begin{aligned} M_{1\text{дв.экв}}^2 &< M_{1\text{дв.н}}^2. \\ 0,1178 &< 1,44. \end{aligned}$$

Условие выполняется.

## 2. СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

### 2.1. Определение требований по точности

Требования к точности следящего привода задаются с учетом его ошибки в соответствии с условием

$$\delta = |\delta(nT)| \leq \delta_{\text{доп}},$$

где  $\delta$  и  $\delta_{\text{доп}}$  – текущая ошибка привода и ее допустимое значение соответственно;  $n$  – номер тактового момента времени;  $T$  – период квантования управляющего воздействия по времени.

Следящие приводы «плечевого» и «локтевого» звеньев манипулятора имеют свои погрешности  $\Delta q_1$  и  $\Delta q_2$ , приводящие к образованию отклонения  $R$  рабочего органа от желаемого положения (рис. 7).

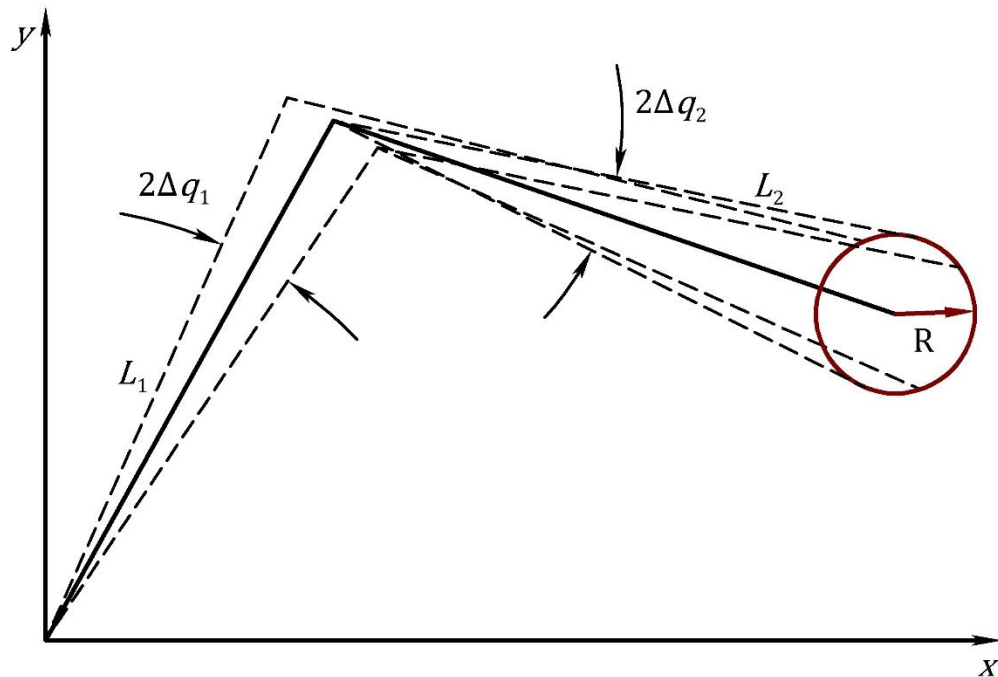


Рис. 7. Погрешности манипулятора

В результате выбора датчиков обратной связи, структур и значений параметров регуляторов приводов, требуется обеспечить выполнение неравенства

$$R \leq R_{\text{доп}},$$

где  $R_{\text{доп}}$  – максимально допустимое отклонение рабочего органа от желаемого положения.

На основании приведенного выше неравенства предъявим требования к допустимым погрешностям приводов. Для этого рассматривается частный случай, характерный для робототехники, когда одинаковы длины звеньев манипулятора и совпадают максимальные погрешности всех приводов. Тогда справедливо уравнение

$$R = 3\Delta q_1 L_1.$$

Из этого уравнения следует требование к допустимой погрешности отдельного привода

$$\delta_{\text{доп}} = |\Delta q_{1m}| = |\Delta q_{2m}| \leq \frac{R_{\text{доп}}}{3L_1}.$$

Таким образом, после синтеза привод должен иметь максимальную погрешность  $\delta_m$  не превышающую допустимую  $\delta_{\text{доп}}$ .

Погрешность  $\delta_m$  содержит несколько составляющих и с учетом, что привод замкнут по положению вала двигателя, может быть вычислена по формуле

$$\delta_m = \frac{M_{1m}}{c_{1p}} + \frac{\Delta\varphi_{1p}}{2} + \frac{\Delta_{\text{дат}}}{i_{1p}} + \frac{\delta_{\text{д.дин}}}{i_{1p}} + \frac{\delta_{\text{д.м}}}{i_{1p}},$$

где  $\Delta_{\text{дат}}$  – дискретность датчика обратной связи по положению;  $\delta_{\text{д.дин}}$  – динамическая ошибка привода, приведенная к валу двигателя и вызванная изменением задающего воздействия;  $\delta_{\text{д.м}}$  – динамическая моментная ошибка привода, вызванная изменением момента внешних сил, приведенная к валу двигателя.

Методика выбора датчика положения, структуры и значений параметров регуляторов предусматривает назначение максимально допустимых значений каждой из составляющих результирующей погрешности, удовлетворяющих уравнению

$$\delta_{\text{доп}} = \delta_{1\text{доп}} + \delta_{2\text{доп}} + \delta_{3\text{доп}} + \delta_{4\text{доп}} + \delta_{5\text{доп}}.$$

Таким образом, в результате синтеза должны выполняться неравенства

$$\frac{M_{1m}}{c_{1p}} \leq \delta_{1\text{доп}}; \frac{\Delta\varphi_{1p}}{2} \leq \delta_{2\text{доп}}; \frac{\Delta_{\text{дат}}}{i_{1p}} \leq \delta_{3\text{доп}}; \frac{\delta_{\text{д.дин}}}{i_{1p}} \leq \delta_{4\text{доп}}; \frac{\delta_{\text{д.м}}}{i_{1p}} \leq \delta_{5\text{доп}}.$$

В соответствии с заданием  $R_{\text{доп}} = 12$  [мм], тогда найдем допустимую погрешность первого звена

$$\delta_{\text{доп}} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 0,5} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ [рад]}.$$

Оценим погрешность привода, обусловленную упругостью редуктора. На этапе энергетического расчета был предварительно выбран редуктор с жесткостью  $c_{1p} = 33002$  [Нм/рад], тогда

$$\delta_{1\text{доп}} = \frac{75,3346}{3,2659 \cdot 10^5} = 2,3067 \cdot 10^{-4} \text{ [рад]}.$$

Учитывая погрешность, вызванную люфтом предварительно выбранного редуктора, примем

$$\delta_{2\text{доп}} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3,14}{2 \cdot 360 \cdot 60} = 1,4544 \cdot 10^{-4} \text{ [рад]}.$$

В контуре регулирования скорости применим ПИ-регулятор, чтобы в установившемся режиме ошибка, вызванная постоянным внешним моментом, была равна нулю. Считаем, что внешний момент меняется настолько медленно, что динамическая ошибка, вызванная изменением момента, также равна нулю. Тогда можно принять

$$\delta_{5\text{доп}} = 0.$$

Следовательно, допустимое значение суммы  $\delta_{3\text{доп}} + \delta_{4\text{доп}}$  составляет

$$(\delta_{3\text{доп}} + \delta_{4\text{доп}}) = \delta_{\text{доп}} - \delta_{1\text{доп}} - \delta_{2\text{доп}} - \delta_{5\text{доп}} = 8 \cdot 10^{-3} - 2,3067 \cdot 10^{-4} - 1,4544 \cdot 10^{-4} - 0 = 7,6239 \cdot 10^{-3} \text{ [рад]}.$$

Примем  $\delta_{3\text{доп}} = 0,714 \cdot 10^{-5}$ , тогда

$$\delta_{4\text{доп}} = 7,6239 \cdot 10^{-3} - 0,714 \cdot 10^{-5} = 7,6167 \cdot 10^{-3} \text{ [рад]}.$$

Так как получилось слишком большое значение, то примем

$$\delta_{4\text{доп}} = 100 \cdot \delta_{3\text{доп}} = 100 \cdot 0,357 \cdot 10^{-5} = 0,357 \cdot 10^{-3} \text{ [рад]}.$$

Проверим, не превышает ли максимальное значение ошибки допустимого значения

$$\begin{aligned} \delta_m &= \delta_{1\text{доп}} + \delta_{2\text{доп}} + \delta_{3\text{доп}} + \delta_{4\text{доп}} + \delta_{5\text{доп}} = 2,3067 \cdot 10^{-4} + \\ &+ 1,4544 \cdot 10^{-4} + 0,714 \cdot 10^{-5} + 7,6167 \cdot 10^{-3} + 0 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ [рад]}. \end{aligned}$$

$$\delta_{\text{доп}} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ [рад]} = \delta_m = 7,3669 \cdot 10^{-4} \text{ [рад]}.$$

Условие выполняется.

## 2.2. Выбор датчика положения

Оценка требуемой разрешающей способности датчика положения производится на основании зависимости

$$\frac{\Delta_{\text{дат}}}{i_{1p}} \leq \delta_{\text{здоп}}.$$

Так как,

$$\Delta_{\text{дат}} = \frac{\pi}{2N_{\text{д}}},$$

где  $N_{\text{д}}$  – разрешающая способность датчика.

Подставим эту формулу в уравнение получим

$$N_{\text{д}} \geq \frac{\pi}{2\delta_{\text{здоп}} \cdot i_{1p}} = \frac{3,14}{2 \cdot 0,714 \cdot 10^{-5} \cdot 220} = 999,9977 \text{ [дискрет/об]}.$$

Исходя из полученного условия, выберем инкрементальный энкодер ENC41-H06-2048-C15 компании Datalogic со следующими характеристиками:

- разрешающая способность – 2048 [дискрет/об];
- напряжение питания – 5-30 [В];
- максимальная частота вращения вала – 6000 [об/мин];
- масса – 0,1 [кг].

Определим коэффициент передачи цепи обратной связи по положению при использовании выбранного инкрементального энкодера совместно с квадратурным счетчиком

$$k_{\text{дп}} = \frac{4 \cdot N_{\text{д}}}{2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 2048}{2 \cdot 3,14} = 1303,8 \text{ [ед/рад]}.$$

### 2.3. Синтез регуляторов следящего привода

Необходимо выбрать структуру и значения параметров регуляторов привода, обеспечивающих выполнение следующих требований к динамическим свойствам привода:

- а) Динамическая ошибка привода не более допустимой

$$\delta_{\text{4доп}} = 7,6167 \cdot 10^{-3} \text{ [рад]}.$$



Поскольку должно выполняться условие

$$\frac{\delta_{\text{д.дин}}}{i_{1p}} \leq \delta_{4\text{доп}},$$

то

$$\delta_{\text{д.дин}} \leq \delta_{4\text{доп}} \cdot i_{1p} = 7,6167 \cdot 10^{-3} \cdot 220 = 1,6757 \text{ [рад]};$$

b) Статическая ошибка не больше допустимого значения

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \leq \delta_{\text{доп.ст.}}$$

Так как  $R_{\text{доп.ст}} = 10 \text{ [мм]}$ , то

$$\delta_{\text{доп.ст}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 0,5} = 6,6667 \cdot 10^{-3} \text{ [рад]}.$$

Найдем  $\delta_3$  в соответствии с выбранным датчиком

$$\delta_3 = \frac{\pi}{2N_d i_{1p}} = \frac{3,14}{2 \cdot 2048 \cdot 220} = 3,4846 \cdot 10^{-6} \text{ [рад]}.$$

$$\delta_1 = \delta_{1\text{доп}} = 2,3067 \cdot 10^{-4} \text{ [рад]}.$$

$$\delta_2 = \delta_{2\text{доп}} = 1,4544 \cdot 10^{-4} \text{ [рад]}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 &= 2,3067 \cdot 10^{-4} + 1,4544 \cdot 10^{-4} + 3,4846 \cdot 10^{-6} = \\ &= 3,7959 \cdot 10^{-4} \text{ [рад]}. \end{aligned}$$

Проверяем условие

$$3,7959 \cdot 10^{-4} < 6,6667 \cdot 10^{-3}.$$

Условие выполняется.

c) Время переходного процесса не более допустимого

$$T_{\text{пп.доп}} = \frac{t_p}{3} = \frac{0,5}{3} = 0,1667 \text{ [с]}.$$

d) Перерегулирование не более  $\sigma_{\text{доп}} = 10\%$ .

На рис. 8 приведена структура следящего привода на основе МСА.

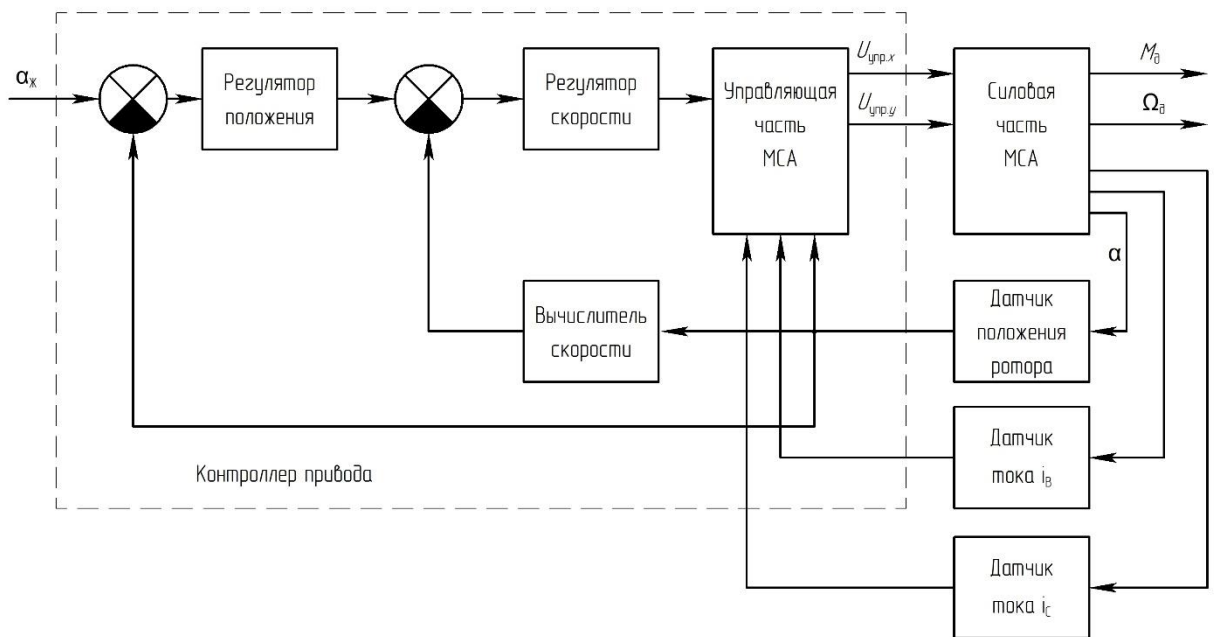


Рис. 8. Структура следящего привода

Полагаем, что в следящем приводе используется П-регулятор положения. Найдем контрольную точку, обусловленную требуемой динамической точностью привода

$$L_k = 20 \cdot \lg \left( \frac{A_{\text{э}}}{\delta_{\text{д.дин}}} \right) = 20 \cdot \lg \left( \frac{155,5635}{1,6757} \right) = 39,3543 \text{ [дБ]}.$$

Для достижения требуемой точности движения рабочего органа ЛАЧХ разомкнутого по положению следящего привода должна проходить не ниже контрольной точки.

Произведем оценку частоты среза разомкнутого следящего привода. Вычислим первую оценку частоты среза

$$\omega_{c1} = \frac{\omega_{\text{э}} \cdot A_{\text{э}}}{\delta_{\text{д.дин}}} = \frac{1 \cdot 155,5635}{1,6757} = 92,8358 \text{ [рад/с]}.$$

Найдем вторую оценку частоты среза из условия длительности переходного процесса

$$\omega_{c2} \geq \frac{3}{T_{\text{пп,доп}}} = 18 \text{ [рад/с]}.$$

Окончательно примем  $\omega_c = 93 \text{ [рад/с]}$ .

Определим частоты среза подсистемы регулирования тока и скорости

$$\omega_{СТ} = m_2 \omega_C;$$

$$\omega_{СС} = m_3 \omega_C.$$

Так как в системе допускается перерегулирование  $\sigma_{доп} = 10\%$ , то коэффициенты  $m_2$  и  $m_3$  выберем такие же, как и для непрерывной системы:  $m_2 = 3$  и  $m_3 = 12$ . Тогда

$$\omega_{СТ} = 3\omega_C = 279 \text{ [рад/с];}$$

$$\omega_{СС} = 12\omega_C = 1116 \text{ [рад/с].}$$

### 2.3.1. Синтез подсистемы регулирования тока

На рис. 9 приведена структурная схема МСА следящего привода на основе трехфазного БДПТ.

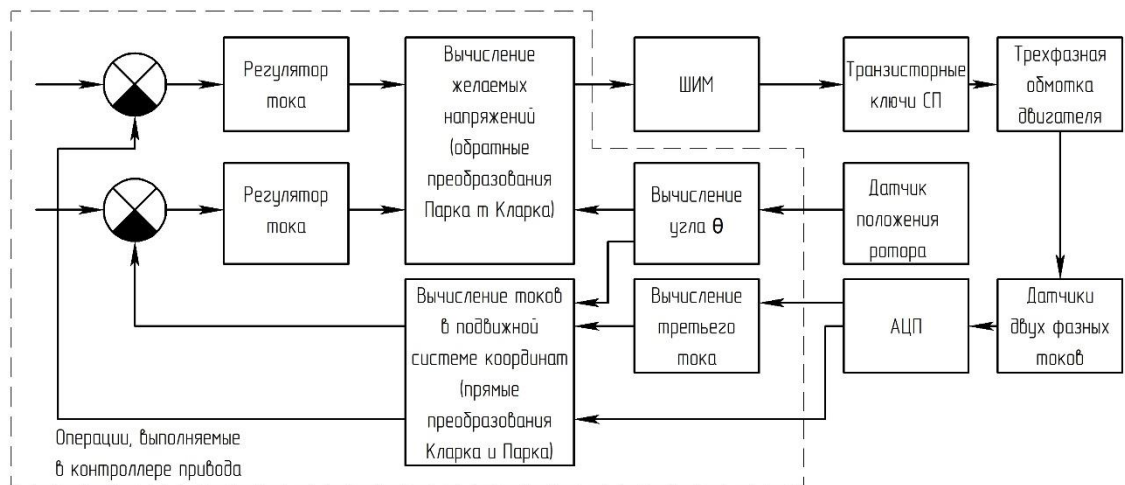


Рис. 9. Структурная схема МСА на основе БДПТ

Структура МСА содержит 2 одинаковые и независимые подсистемы регулирования токов. Принципиально важно то, что структуры этих подсистем одинаковы. Значения одинаковых параметров электрических обмоток, силовых преобразователей и ПИ-регуляторов в этих подсистемах совпадают.

МСА на основе трехфазного БДПТ с векторным управлением ведет себя практически также, как и подсистема регулирования тока в

ДПТ. Их динамические свойства совпадают при условии, что равны значения одинаковых параметров на их обмотках, силовых преобразователей и ПИ-регуляторов.

Поэтому синтез регуляторов МСА на основе трехфазного БДТ с векторным управлением будем производить, пользуясь моделью подсистемы регулирования тока на основе ДПТ (рис. 10).

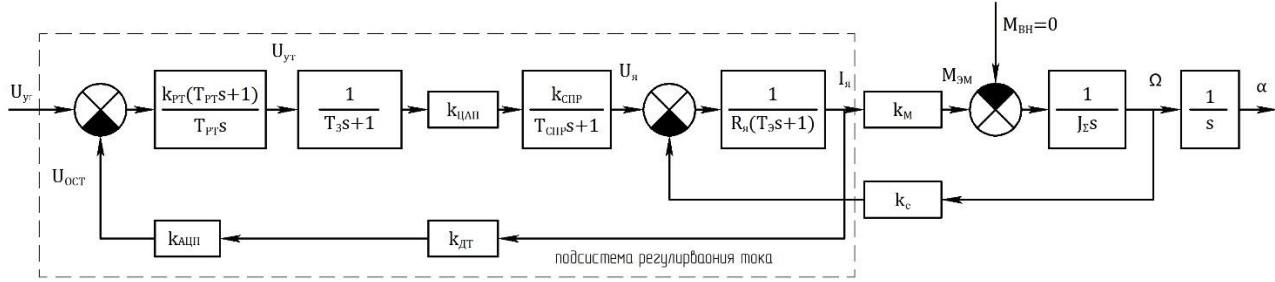


Рис. 10. Подсистема регулирования тока

Запишем передаточную функцию непрерывного объекта управления в составе подсистемы регулирования тока

$$W_{от}(s) = \frac{k_{от}s}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)}.$$

Здесь  $k_{от} = k_{цап}k_{тн}k_{ост}$  – коэффициент передачи непрерывного объекта управления, где  $k_{цап}$  – коэффициент передачи ЦАП;  $k_{тн}$  – коэффициент передачи неизменяемой части;  $k_{ост}$  – коэффициент отрицательной обратной связи по току.

Выберем ЦАП AD5761 фирмы Analog Devices с характеристиками:

$n_{цап} = 16$  – количество разрядов;

$U_{цап.m} = 10$  [В] – максимальное выходное напряжение;

$T_{цап} = 7,5 \cdot 10^{-6}$  [с] – постоянная времени ЦАП.

Определим коэффициент передачи ЦАП

$$k_{цап} = \frac{U_{цап.m}}{2^{n_{цап}}} = \frac{10}{2^{16}} = 1,5259 \cdot 10^{-4}.$$

Найдем коэффициент передачи неизменяемой части

$$k_{тн} = k_{спр} \frac{T_{1М}}{R_{1ДВ}},$$

где  $k_{\text{спр}}$  – коэффициент усиления силового преобразователя

$$k_{\text{спр}} = \frac{U_{1\text{дв}}}{U_{\text{спр.}m}} = \frac{24}{10} = 2,4.$$

Здесь  $U_{\text{спр.}m} = 10$  [В] – максимальное входное управляющее напряжение силового преобразователя.

Тогда

$$k_{\text{тн}} = 2,4 \cdot \frac{10,6 \cdot 10^{-3}}{0,04} = 0,636.$$

Вычислим коэффициент обратной связи по току

$$k_{\text{ост}} = k_{\text{дт}} k_{\text{ацп}},$$

где  $k_{\text{дт}}$  – коэффициент передачи датчика тока

$$k_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{ацп.}m} \cdot k_{1m}}{M_{1\text{дв.п}}}.$$

Выберем АЦП AD4001 фирмы Analog Devices с характеристиками:

$n_{\text{ацп}} = 16$  – количество разрядов;

$U_{\text{ацп.}m} = 5$  [В] – максимальное входное напряжение;

$T_{\text{ацп}} = 5 \cdot 10^{-7}$  [с] – постоянная времени ЦАП.

Определим коэффициент передачи АЦП

$$k_{\text{ацп}} = \frac{2^{n_{\text{ацп}}}}{U_{\text{ацп.}m}} = \frac{2^{16}}{5} = 1,3107 \cdot 10^4.$$

Тогда

$$k_{\text{дт}} = \frac{5 \cdot 0,0586}{6,2} = 0,0945.$$

Следовательно, коэффициент усиления обратной связи по току

$$k_{\text{ост}} = 0,0945 \cdot 1,3107 \cdot 10^4 = 619,4209.$$

Вычислим коэффициент передачи непрерывного объекта управления, подставив в формулу все значения

$$k_{от} = 1,5259 \cdot 10^{-4} \cdot 0,636 \cdot 619,4209 = 0,0601.$$

В передаточной функции непрерывного объекта управления постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$  приблизительно равны электромеханической и электромагнитной постоянным времени двигателя соответственно:

$$T_1 \approx T_{1М} = 10,6 \cdot 10^{-3} \text{ [с];}$$

$$T_2 \approx T_{1Э} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ [с].}$$

Постоянная времени  $T_3$  учитывает совокупное влияние на динамические свойства подсистемы регулирования тока малых по значению постоянных времени и временных запаздываний элементов этой подсистемы. Они характеризуют свойства силового преобразователя, разделительного усилителя в цепи измерения тока, длительность процесса формирования управляющего воздействия ЭВМ или контроллере ЦСП, затраты времени на цифро-аналоговое преобразование этого воздействия, опрос датчика тока и аналого-цифровое преобразование его сигнала. Можно принять

$$T_3 = T_{\text{шим}} + T_{\text{цап}} + T_{\text{ру}} + T_{\text{ацп}} + \tau_{\text{эвм}},$$

где  $T_{\text{ру}}$  – постоянная времени разделительного усилителя;  $\tau_{\text{эвм}}$  – длительность процесса формирования управляющего воздействия, отсчитываемая от момента выдачи управляющего воздействия на ЦАП. Очевидно, что  $\tau_{\text{эвм}}$  составляет часть периода квантования по времени сигналов в подсистеме регулирования тока, например,  $\tau_{\text{эвм}} \approx 0,5T$ ;  $T_{\text{шим}}$  – период широтно-импульсной модуляции в силовом преобразователе.

Выберем разделительный усилитель AD210 фирмы Analog Devices с постоянной времени  $T_{\text{ру}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ [с]}$ .

Определим частоту ШИМ из условия

$$f_{\text{шим}} > f_{\text{шим.min}} = \frac{1}{2\pi T_{\text{шим.max}}},$$

где  $T_{\text{шим.max}}$  – максимальный период ШИМ

$$T_{\text{шим.мах}} = \frac{1}{2\omega_{\text{ст}}} - (T_{\text{цап}} + T_{\text{ру}} + T_{\text{ацп}}) = \frac{1}{2 \cdot 1116} - (7,5 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-7}) = 4,3503 \cdot 10^{-4} [\text{с}].$$

Тогда

$$f_{\text{шим.мин}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,3503 \cdot 10^{-4}} = 365,8493 [\text{Гц}].$$

Следовательно, выберем  $f_{\text{шим}} = 4 [\text{кГц}]$ .

Найдем период ШИМ

$$T_{\text{шим}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{шим}}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 4000} = 3,97789 \cdot 10^{-5} [\text{с}].$$

Для дальнейшего синтеза подсистемы регулирования тока преобразуем передаточную функцию  $W_{\text{от}}(s)$  выполнив сначала  $Z$ -преобразование, а затем билинейное, получим дискретную передаточную функцию, зависящую от  $w$ :

$$\overline{W}_{\text{от}}(w) = \frac{k_{\text{от}}w(1 - wT/2)}{(T_1w + 1)(T_2w + 1)(T_3w + 1)}.$$

В числителе полученной передаточной функции появилось неминимально-фазовое звено, существенно влияющее на динамические свойства цифровой подсистемы регулирования тока.

Для коррекции динамических свойств подсистемы регулирования тока применим ПИ-регулятор. Его дискретная передаточная функция имеет вид

$$\overline{W}_{\text{рт}}(w) = k_{\text{рт}} \frac{1 + T_{\text{рт}}w}{T_{\text{рт}}w}.$$

Здесь  $k_{\text{рт}}$  – коэффициент усиления пропорциональной составляющей регулятора тока;  $T_{\text{рт}} = k_{\text{ит}}^{-1}$  – постоянная времени регулятора тока;  $k_{\text{ит}}$  – коэффициент усиления интегральной составляющей регулятора тока.

Для выбора параметров регулятора тока рассмотрим разомкнутую подсистему регулирования тока. С учетом описания ПИ-регулятора тока дискретная передаточная функция разомкнутой подсистемы регулирования тока приобретает вид

$$\overline{W}_{\text{т}}(w) \approx \frac{k_{\text{рт}}k_{\text{от}}(T_{\text{рт}}w + 1)(1 - wT/2)}{T_{\text{рт}}(T_1w + 1)(T_2w + 1)(T_3w + 1)}.$$

В соответствии с правилом настройки подсистемы регулирования тока на технический оптимум примем

$$T_{\text{рт}} = T_2 \approx T_{1\text{э}} = 2,4 \cdot 10^{-3} [\text{с}].$$

Тогда

$$k_{\text{ит}} = \frac{1}{T_{\text{рт}}} = \frac{1}{2,4 \cdot 10^{-3}} = 416,6667.$$

Таким образом, получаем

$$\overline{W}_T(w) \approx \frac{\omega_{\text{ст}}^* (1 - wT/2)}{(T_1 w + 1)(T_3 w + 1)},$$

где  $\omega_{\text{ст}}^*$  - псевдочастота среза разомкнутой подсистемы регулирования тока, причем  $\omega_{\text{ст}}^* = k_{\text{т}} T_1^{-1}$ ;  $k_{\text{т}} = k_{\text{рт}} k_{\text{от}} T_{\text{рт}}^{-1}$  – коэффициент передачи разомкнутой подсистемы регулирования тока.

Желаемое значение коэффициента усиления регулятора тока  $k_{\text{рт}}$  определяется по желаемому значению  $\omega_{\text{ст}}^*$  по формуле

$$k_{\text{рт}} = \omega_{\text{ст}}^* T_1 T_{\text{рт}} k_{\text{от}}^{-1}.$$

Как правило, выполняется условие  $\omega_{\text{ст}}^* < T^{-1}$ . Поэтому  $\omega_{\text{ст}}^*$  примерно равна желаемому значению частоты среза  $\omega_{\text{ст}}$ . Таким образом, для выбора значения коэффициента усиления регулятора тока  $k_{\text{рт}}$  воспользуемся формулой

$$k_{\text{рт}} = \omega_{\text{ст}} T_1 T_{\text{рт}} k_{\text{от}}^{-1} = \frac{1116 \cdot 10,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2,4 \cdot 10^{-3}}{0,0601} = 0,4723.$$

Выбор периода квантования по времени  $T$  осуществляется из условия

$$T \leq T_{\text{max}},$$

где  $T_{\text{max}}$  – максимально допустимое значение периода квантования, при котором обеспечиваются достаточные запасы устойчивости и требуемое качество переходных процессов подсистемы регулирования тока

$$T_{\text{max}} = \frac{1}{2\omega_{\text{ст}}} - T_4.$$

Здесь  $T_4 = T_{\text{шим}} + T_{\text{цап}} + T_{\text{ру}} + T_{\text{ацп}} = 3,9789 \cdot 10^{-5} + 7,5 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-7} = 5,2789 \cdot 10^{-5} [\text{с}].$



Таким образом,

$$T_{max} = \frac{1}{2 \cdot 1116} - 5,2789 \cdot 10^{-5} = 3,9524 \cdot 10^{-4} \text{ [c]}.$$

Следовательно, из условия примем  $T = 2 \cdot 10^{-6}$ .

Пользуясь полученными параметрами построим ЛАФЧХ подсистемы регулирования тока и по ней определим запасы устойчивости по фазе и амплитуде (рис. 11).

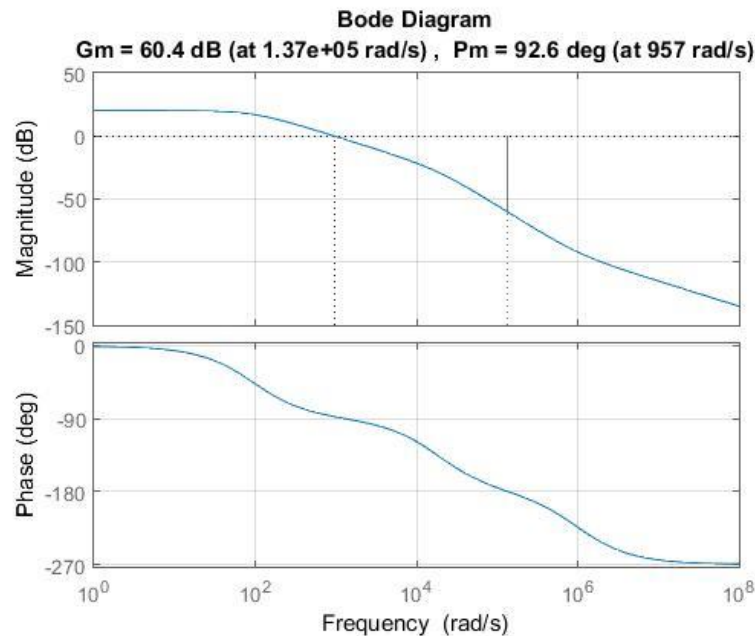


Рис. 11. ЛАФЧХ подсистемы регулирования тока

По рис. 11. видно, что запас устойчивости по амплитуде равен 60,4 [дБ], а по фазе – 92,6 [дБ].

### 2.3.2. Синтез подсистемы регулирования скорости

На рис. 12 приведена модель подсистемы регулирования скорости.

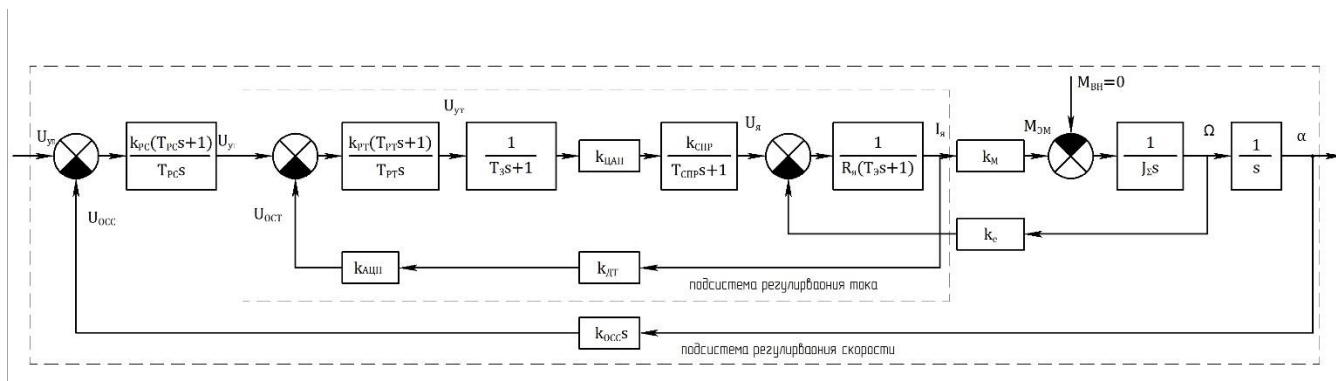


Рис. 12. Подсистема регулирования скорости

Замкнутая подсистема регулирования тока входит в состав подсистемы регулирования скорости и влияет на ее динамические свойства.

Учтем, что свойства замкнутой цифровой подсистемы регулирования тока описываются передаточной функцией

$$\overline{\Phi}_T(w) = \overline{W}_T(w)[1 + \overline{W}_T(w)]^{-1}k_{\text{ост}}^{-1}.$$

Так как псевдочастота среза  $\omega_{\text{ср}}^*$  разомкнутой подсистемы регулирования скорости удовлетворяет условию  $\omega_{\text{ср}}^* < \omega_{\text{ст}}^*$ , то в первом приближении вместо дискретной передаточной функции  $\overline{\Phi}_T(w)$  можно рассматривать передаточную функцию  $\Phi_T(s)$ , описывающую замкнутую цифровую подсистему регулирования тока как непрерывную подсистему. При построении подсистемы регулирования скорости примем передаточную функцию непрерывного аналога замкнутой подсистемы регулирования тока в следующем виде:

$$\Phi_T(s) = [1 + (\omega_{\text{ст}}^*)^{-1}s]^{-1}k_{\text{ост}}^{-1},$$

причем при  $0 < \omega^* < \omega_{\text{ст}}^* < 2/T$  справедливо  $\omega_{\text{ст}}^* \approx \omega_{\text{ст}}$ .

С учетом времени запаздывания  $\tau_c$ , обусловленного затратами времени на вычисление в ЭВМ управляющего воздействия и формирование сигнала обратной связи по скорости, свойства неизменяемой части рассматриваемой подсистемы характеризуются передаточной функцией

$$W_{\text{сн}}(s) = \frac{k_{\text{сн}}}{s^2(1 + \tau_T s)},$$

где  $k_{\text{сн}}$  – коэффициент передачи неизменяемой части;  $\tau_T = (\omega_{\text{ст}}^*)^{-1} + \tau_c$  – постоянная времени апериодического звена, описывающего совокупное влияние замкнутой подсистемы регулирования тока и запаздывания на динамические свойства подсистемы регулирования скорости.

Вычислим коэффициент передачи неизменяемой части

$$k_{\text{сн}} = k_{1m}(k_{\text{ост}}J_{\Sigma})^{-1} = \frac{0,0586}{619,4209 \cdot 2,7678 \cdot 10^{-4}} = 0,3418 [\text{с}^{-2}].$$

Применив Z и билинейное преобразование, получаем дискретную передаточную функцию приведенной непрерывной части подсистемы регулирования скорости, зависящую от переменной  $w$

$$\overline{W}_{\text{сн}}(w) = \frac{k_{\text{сн}}(1 - wT_c/2)}{w^2(1 + w\tau_T)}.$$

Для увеличения точности привода при наличии моментов сил трения и действий внешних сил применим реализуемый с помощью контроллера или управляющей ЭВМ ПИ-регулятор скорости с передаточной функцией

$$\overline{W}_{pc}(w) = k_{pc} \frac{1 + T_{pc}w}{T_{pc}w},$$

где  $k_{pc}$  – коэффициент усиления пропорциональной составляющей регулятора скорости;  $T_{pc}$  – постоянная времени регулятора скорости.

Сформируем дискретную передаточную функцию разомкнутой подсистемы регулирования скорости, в которой учтены свойства алгоритма формирования отрицательной обратной связи по скорости. Такая дискретная передаточная функция имеет вид

$$\overline{W}_c(w) = \omega_{cc} \frac{(1 + T_{pc}w)(1 - wT_c/2)}{T_{pc}w^2(1 + w\tau_T)(1 + wT_c/2)}.$$

Здесь  $\omega_{cc}$  – оценка частоты среза разомкнутой подсистемы регулирования скорости, причем  $\omega_{cc} = k_{pc}k_{ch}k_{occ}$  при условии  $\omega_{cc} < \tau_T^{-1}$ .

Значения параметров ПИ-регулятора скорости вычисляются на основании желаемого значения частоты среза  $\omega_{cc}$  по формулам

$$k_{pc} = \omega_{cc}(k_{ch}k_{occ})^{-1};$$

$$T_{pc} = 4\omega_{cc}^{-1} = \frac{4}{279} = 0,0143 \text{ [с]}.$$

Значение периода квантования по времени  $T_c$  выбирают из условия

$$T_c \leq T_{c.max},$$

где  $T_{c.max}$  – максимально допустимое значение периода квантования, при котором обеспечиваются достаточные запасы устойчивости и требуемое качество переходных процессов замкнутой подсистемы регулирования скорости

$$T_{c.max} = \left( \frac{0,3258}{\omega_{cc}} - \frac{1}{\omega_{ст}} \right) \cdot \frac{1}{1 + q_c}.$$

Примем  $q_c = 0,3$  – доля от периода квантования по скорости, затрачиваемая на формирование управляющего сигнала по скорости.

Тогда

$$T_{c.max} = \left( \frac{0,3258}{279} - \frac{1}{1116} \right) \cdot \frac{1}{1 + 0,3} = 2,0899 \cdot 10^{-4} \text{ [с]}.$$

Примем  $T_c = 2 \cdot 10^{-5} \text{ [с]}$ .

Вычислим коэффициент обратной связи по скорости

$$k_{occ} = k_{дп} \cdot T_c = 1303,8 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 0,0261.$$

Тогда

$$k_{pc} = \frac{279}{0,3418 \cdot 0,0261} = 3,1303 \cdot 10^4.$$

Найдем постоянную времени  $\tau_c$

$$\tau_c = T_c \cdot q_c = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,3 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ [с]}.$$

Следовательно,

$$\tau_T = \frac{1}{1116} + 6 \cdot 10^{-6} = 9,0206 \cdot 10^{-4} \text{ [с]}.$$

Пользуясь полученными параметрами построим ЛАФЧХ подсистемы регулирования скорости и по ней определим запасы устойчивости по фазе и амплитуде (рис. 13).

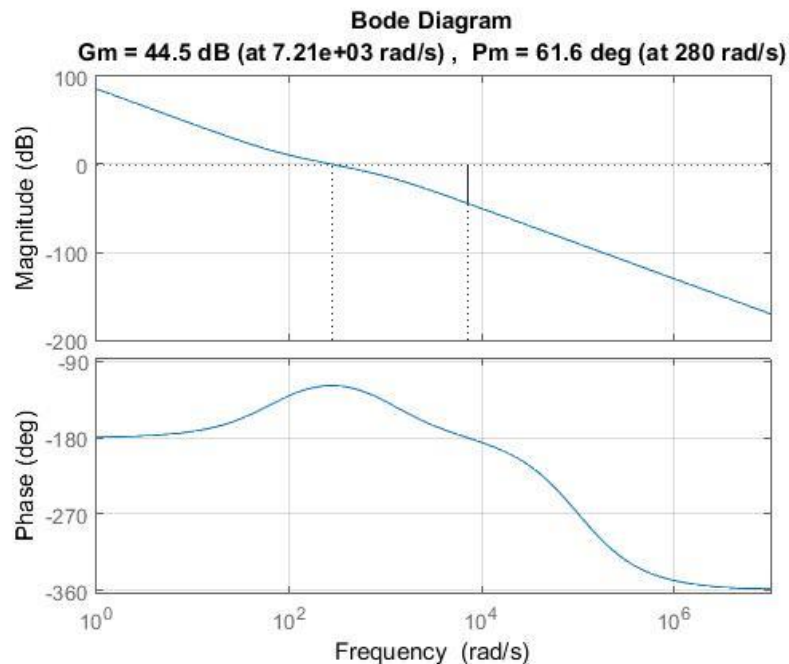


Рис. 13. ЛАФЧХ подсистемы регулирования скорости

По рис. 13. видно, что запас устойчивости по амплитуде равен 44,5 [дБ], а по фазе – 61,6 [дБ].

Для построения модели упростим полученную выше дискретную передаточную функцию разомкнутой подсистемы регулирования скорости

$$\overline{W}_c(w) = \omega_{cc} \frac{(1 + T_{pc}w)}{T_{pc}w^2(1 + wT_{эKB.C})},$$

где  $T_{эKB.C}$  – эквивалентная постоянная времени апериодического звена

$$T_{эKB.C} = T_c + \tau_T = 2 \cdot 10^{-5} + 9,0206 \cdot 10^{-4} = 9,2206 \cdot 10^{-4} [c].$$

Тогда передаточная функция замкнутой подсистемы регулирования скорости, последовательно включенной с корректирующим алгоритмом имеет вид

$$\overline{\Phi}_c(w) \approx \omega_{cc} \frac{(k_{дп}T_c)^{-1}(1 + wT_c/2)}{(\omega_{cc}^{-1}w + 1)(1 + wT_{эKB.C})}.$$

### 2.3.3. Синтез подсистемы регулирования положения

На рис. 14 приведена модель подсистемы регулирования положения.

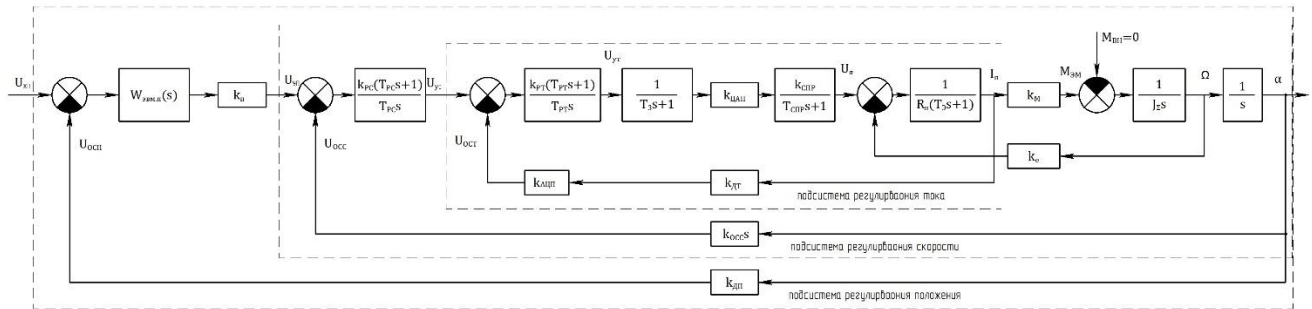


Рис. 14. Подсистема регулирования положения

В подсистеме регулирования положения используется П-регулятор положения. С учетом этого запишем дискретную передаточную функцию разомкнутого по положению следящего привода

$$\overline{W}_п(w) = k_{рп}k_{дп}\overline{W}_{эВМ.П}(w)\overline{\Phi}_c(w).$$

Здесь  $\overline{W}_{\text{ЭВМ.П}}(w)$  – дискретная передаточная функция звена, учитывающего время  $\tau_{\text{п}}$ , необходимое ЭВМ для формирования управляющего воздействия в контуре регулирования положения. При  $\tau_{\text{п}} < T_c/2$  выглядит следующим образом

$$\overline{W}_{\text{ЭВМ.П}}(w) = \frac{1 + w(T_c/2 - \tau_{\text{п}})}{1 + w T_c/2}.$$

Тогда передаточная функция следящего привода

$$\overline{W}_{\text{п}}(w) \approx \frac{\omega_c \omega_{\text{с}} (1 + T_{\text{рс}} w) [1 + w(T_c/2 - \tau_{\text{п}})]}{w [T_{\text{рс}} w^2 (1 + w T_{\text{ЭВМ.С}}) + \omega_{\text{с}} (1 + T_{\text{рс}} w)]},$$

где  $\omega_c = k_{\text{рп}} T_c^{-1}$ , следовательно,

$$k_{\text{рп}} = T_c \cdot \omega_c = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 93 = 1,86 \cdot 10^{-3}.$$

Пользуясь полученными параметрами построим ЛАФЧХ подсистемы регулирования положения и по ней определим запасы устойчивости по фазе и амплитуде (рис. 15).

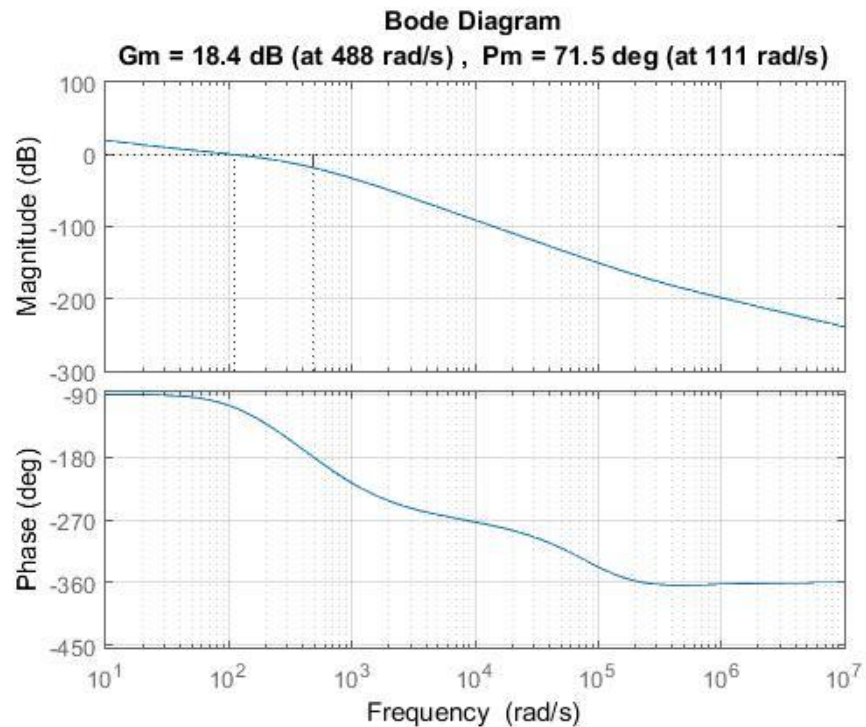


Рис. 15. ЛАФЧХ подсистемы регулирования положения

По рис. 15. видно, что запас устойчивости по амплитуде равен 18,4 [дБ], а по фазе – 71,5 [дБ].

Построим переходный процесс полученного следящего привода (рис. 16).

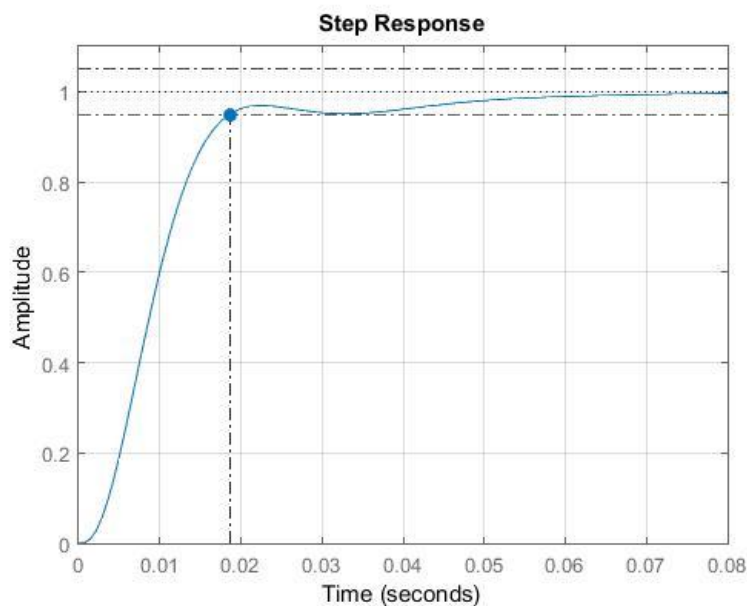


Рис. 16. Переходный процесс

По рис. 16. видно, что система соответствует требованиям по быстродействию и по перерегулированию.

На основе полученных передаточных функций построим модель в среде Матлаб и произведем моделирование получившегося следящего привода. На рис. 17. Приведена модель для моделирования.

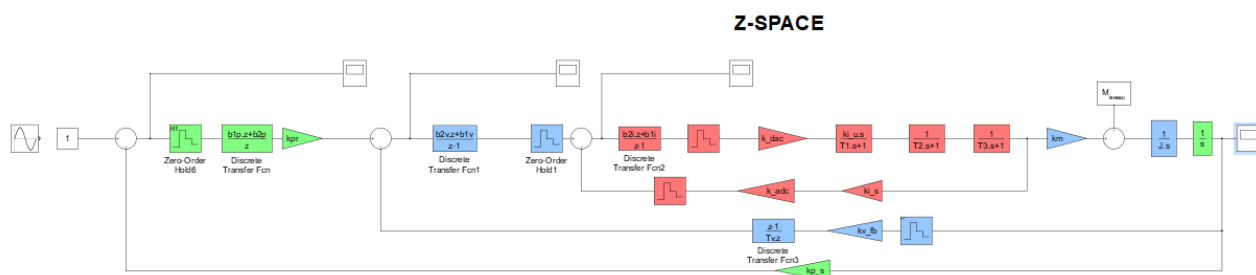


Рис. 17. Модель следящего привода

Ниже приведены параметры, занесенные в рабочую область модели:

%Параметры эквивалентного гармонического задающего воздействия

$$A_e = 155.5635;$$

we=1;

```
%Параметры двигателя
```

```

R=0.04;
L=0.096*10^-3;
U=24;
I=23;
Tm=10.6*10^-3;
Te=2.4*10^-3;
ke=0.0705;
km=0.0586;
T1=Tm;
T2=Te;
J=1.3134*10^-4;
Mn=1.2;
Ms=6.2;
%Период квантования по току
Ti=2*10^-6;
%Частота среза по току
wi_cutoff=1116;
%Псевдочастота среза по току
wi_cutoff_d=(2/Ti)*tan(wi_cutoff*Ti/2);
%Параметры АЦП
n_adc=16;
U_adc_max_in=5;
k_adc=2^n_adc/U_adc_max_in;
T_adc=5*10^-7;
%Параметры ЦАП
n_dac=16;
U_dac_max_out=10;
k_dac=2^n_dac/U_dac_max_out;
T_dac=7.5*10^-6;
%Постоянная времени разделительного усилителя
T_ia=5*10^-6;
%ШИМ

```



```

f_pwm=4000;
T_pwm=1/(2*pi*f_pwm);
%Доля от Ti, затрачиваемая ЭВМ на формирования сигнала управления
по току
qi=0.5;
%Длительность формирования ЭВМ сигнала управления по току
tau_i=qi*Ti;
%Постоянная времени общего запаздывания на формирования управля-
ющего сигнала по току
T3=T_pwm+T_dac+T_adc+T_ia+tau_i;
%Коэффициенты усиления подсистемы регулирования по току
ui=10;
k_vfc=U/ui;
ki_u=k_vfc*Tm/R;
ki_s=U_adc_max_in*km/Ms;
ki_fb=ki_s*k_adc;
ki=k_dac*ki_u*ki_fb;

%Параметры ПИ-регулятор тока
Tir=T2;
kir=0.75*Tir/ki*(T1*T3*wi_cutoff_d^2+(T1+T3)*wi_cutoff_d+1)/(1-
wi_cutoff_d*Ti/2);
kii=1/Tir;
b1i=kir*(kii*Ti/2-1);
b2i=kir*(kii*Ti/2+1);
%-----
%Период квантования по скорости
Tv=2*10^-5;
%Частоты среза по скорости
wv_cutoff=279;
%Псевдочастота среза по скорости
wv_cutoff_d=(2/Tv)*tan(wv_cutoff*Tv/2);
%Параметры датчика положения

```

```

PPR=2048;
kp_s=4*PPR/(2*pi);
%Коэффициенты усиления подсистемы регулирования по скорости
kv_u=km/(J*ki_fb);
kv_fb=kp_s*Tv;
% Параметры ПИ-регулятора скорости
Tvr=4/wv_cutoff;
kvr=((Tvr*wv_cutoff_d^2)/(kv_u*kv_fb))*((1+Tv*wv_cutoff_d/2)*(1+wv_cutoff_d/wi_cutoff))/((1+Tvr*wv_cutoff_d)*(1-Tv*wv_cutoff_d/2));
kiv=1/Tvr;
b1v=kvr*(kiv*Tv/2-1);
b2v=kvr*(kiv*Tv/2+1);
%-----
%Период квантования по положению
Tp=Tv;
%Частоты среза по положению
wp_cutoff=93;
%Доля от Tp, затрачиваемая ЭВМ на формирования сигнала управления по положению
qr=0.3;
%Длительность формирования ЭВМ сигнала управления по положению
tau_p=qr*Tp;
%Параметры П-регулятора положения
kpr=2*tan(wp_cutoff*Tp/2);
b1p=(1-tau_p/Tv);
b2p=tau_p/Tv;

```

На рис. 18. приведен полученный переходный процесс в результате подаче на вход модели единичного воздействия.

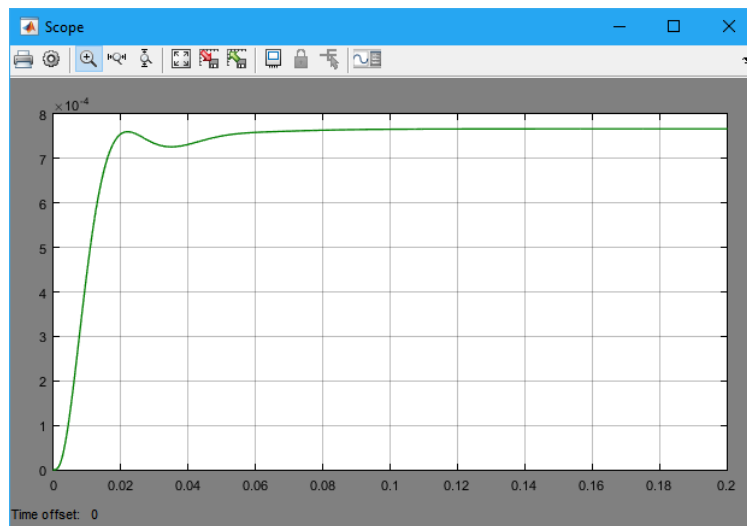


Рис. 18. Переходный процесс

На рис. 19-20. приведен график ошибки по положению в результате под-  
дачи на вход гармонического эквивалентного воздействия.

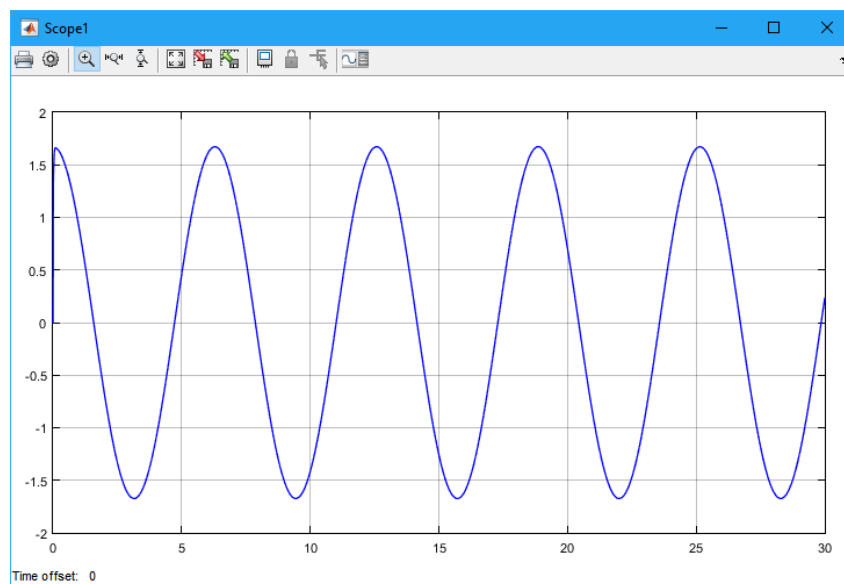


Рис. 19. Ошибка по положению

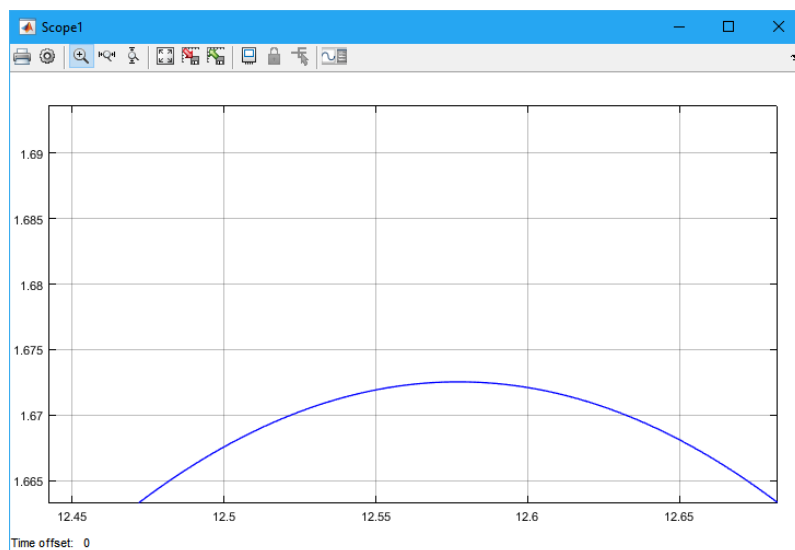


Рис. 20. Увеличенная область рис. 19

Из рис. 19-20 видно, что ошибка привода по положению не выходит за допустимое значение 1,6757 рад.

### 3. Алгоритмы компьютерной реализации регуляторов следящего привода

Формирование управляющего воздействия, передаваемого через ЦАП на исполнительную часть системы управления, с учетом опроса датчиков и реализации нелинейной коррекции, регуляторов положения, скорости и тока производится в соответствии со следующими двумя алгоритмами.

#### Алгоритм 1.

- 1) Начало. Переход к выполнению программы оперативного управления, реализующей алгоритм 1, по запросу прерывания от таймера, вырабатывающего импульсы с периодом  $T_c$ .
- 2) Прием из вне или вычисление задающего воздействия цифровой следящей системы.
- 3) Опрос датчика положения.
- 4) Вычисление рассогласования следящей системы и нелинейная коррекция.
- 5) Реализация регулятора положения и вычисление управляющего воздействия, подаваемого на вход подсистемы регулирования скорости.
- 6) Вычисление скорости на основании данных датчика положения или опрос датчика скорости и аналогоцифровое преобразование его сигнала.
- 7) Вычисление рассогласования в подсистеме регулирования скорости.
- 8) Реализация регулятора скорости, вычисление и запоминание управляющего воздействия, предназначенного для подачи на вход подсистемы регулирования тока.

- 9) Конец. Выход из программы оперативного управления, реализующей алгоритм 1, и возврат к ранее прерванной программе.

#### Алгоритм 2.

- 1) Начало. Переход к выполнению программы оперативного управления, реализующей алгоритм 2, по запросу прерывания от таймера, вырабатывающего импульсы с периодом  $T$ .
- 2) Извлечение из памяти управляющего воздействия, сформированного регулятором подсистемы регулирования скорости.
- 3) Опрос датчика тока и аналогоцифровое преобразование его сигнала.
- 4) Вычисление рассогласования в подсистеме регулирования тока.
- 5) Реализация регулятора тока и вычисление управляющего воздействия, подаваемого на вход ЦАП или преобразователь код-ШИМ.
- 6) Конец. Выход из программы оперативного управления, реализующей алгоритм 2, и возврат к ранее прерванной программе.

На рис. 21-22 приведены блок схемы алгоритма 1 и 2 соответственно.

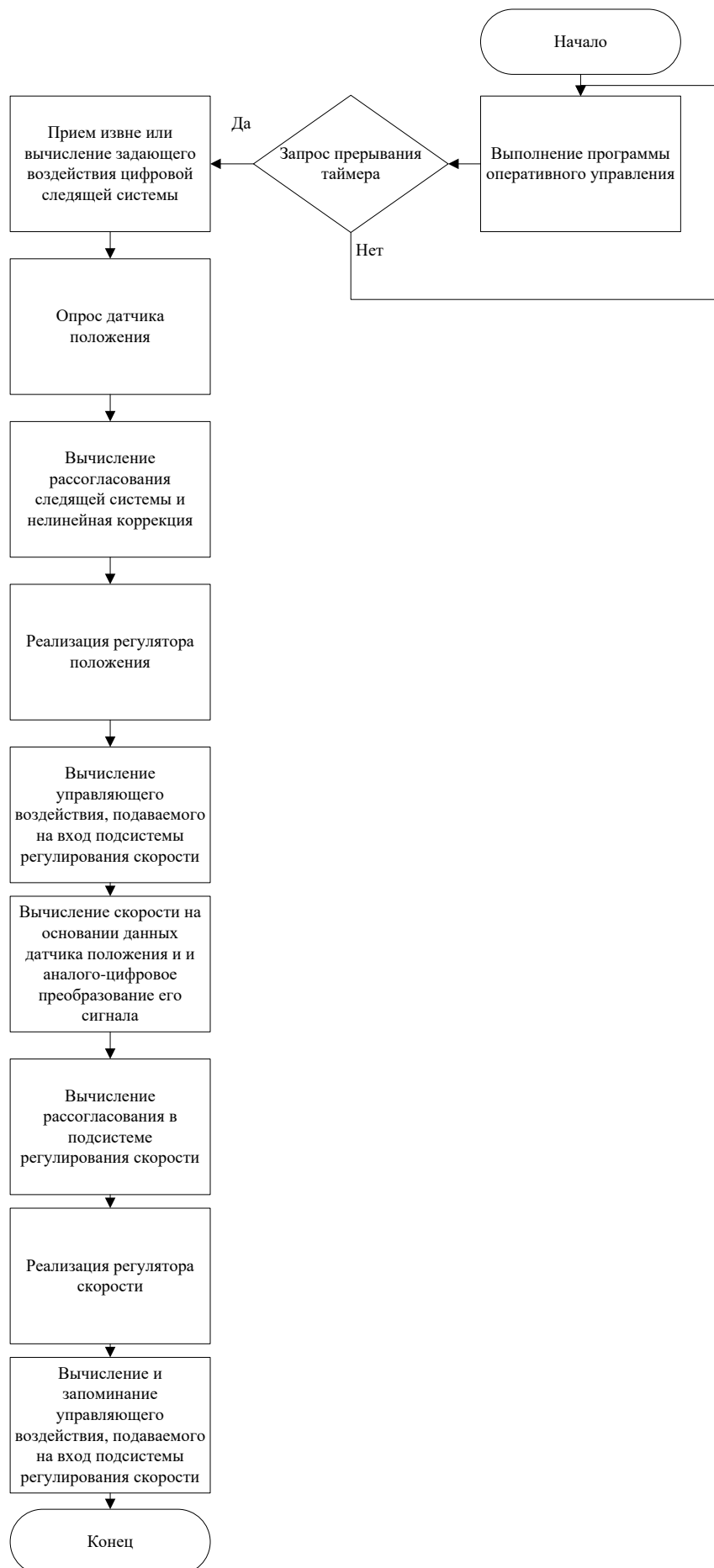


Рис. 21. Блок-схема алгоритма 1

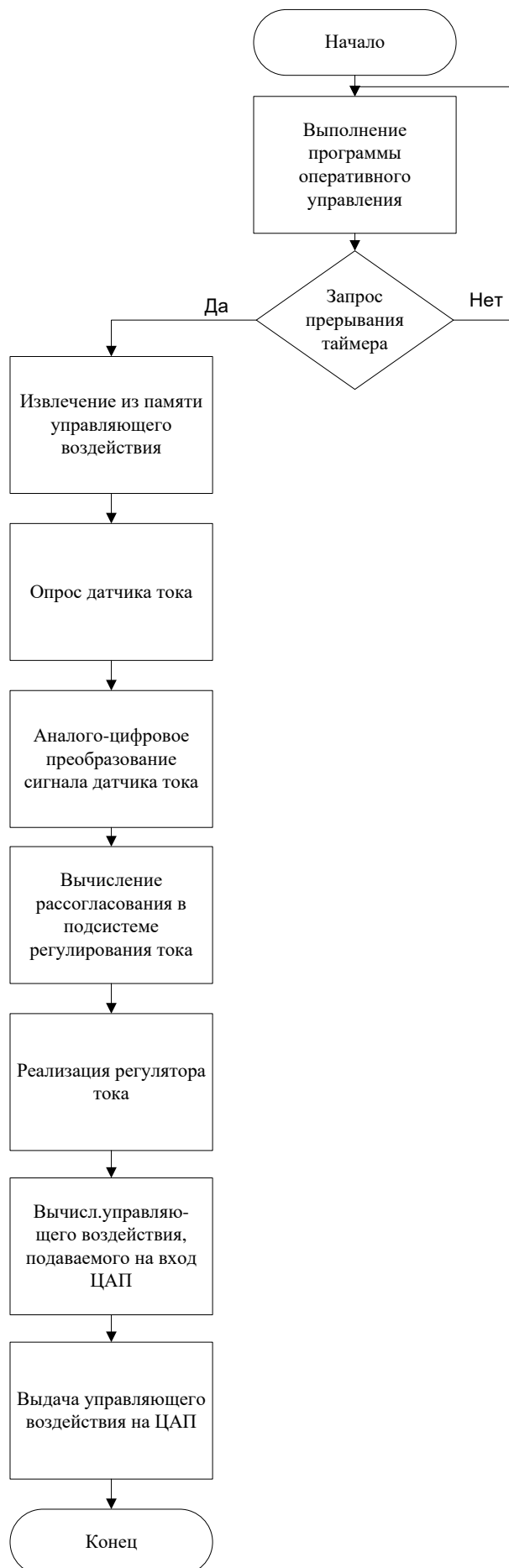


Рис. 22. Блок-схема алгоритма 2.

#### 4. Выполнение особых требований

- необходимо установить электромагнитные тормозные устройства на каждом приводе для фиксации звеньев в случае аварийного отключения электроэнергии;
- датчики и контроллер с квадратурным счетчиком должны быть подключены к источнику бесперебойного питания для обеспечения их работы в случае аварийного отключения питания;
- мехатронная система должна быть оснащена выпрямителем тока для работы двигателей постоянного тока от заводской трехфазной электрической сети с напряжением 380 В и частотой 50 Гц.



## **Заключение**

Синтез приводов двухзвенного манипулятора в данном курсовом проекте был произведен с учетом всех требования, указанных в ТЗ. Выполнение требований по точности и быстродействию были доказаны с помощью моделирования в среде Матлаб.

### **Список использованных источников**

- 1.Илюхин Ю.В., Подураев Ю.В. Проектирование исполнительных систем роботов.Линеаризованные системы :Учебное пособие М.:Издательство МПИ,1989. 75с.
- 2.Егоров О.Д.,Подураев Ю.В. Мехатронные модули. Расчет и конструирование: Учебное пособие. М.:МГТУ «СТАНКИН», 2004.-360с:ил.
- 3.Илюхин Ю.В.,Компьютерное управление мехатронными системами:  
учебное пособие. М.:ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2014.320 с.:ил.