

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

С. Б. Перетятко

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ, РОБОТЫ
И АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ**

Учебно-методическое пособие по курсовой работе для студентов, обучающихся
в магистратуре по направлению подготовки
15.04.01 Машиностроение

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2023

УДК 62-529

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии продуктов питания
ФГБОУ ВО «КГТУ» М. Н. Альшевская

Перетятко, С. Б.

Производственные манипуляторы, роботы и автоматические линии: учеб.-метод. пособие по курсовой работе для студ. магистратуры по напр. подгот. 15.04.01 Машиностроение / С. Б. Перетятко. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 22 с.

Учебное-методическое пособие является руководством по курсовой работе для дисциплины «Производственные манипуляторы, роботы и автоматические линии». В пособии представлены учебно-методические материалы по выполнению курсовой работы, включающие содержание разделов текстовой части, описание ее построения и изложения, порядок защиты.

Табл. 7, рис. 4, список лит. – 7 наименований.

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 30 апреля 2023 г., протокол № 4

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано к опубликованию кафедрой инжиниринга технологического оборудования 21 апреля 2022 г., протокол № 3.

УДК 62-529

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2023 г.
© Перетятко С. Б., 2023 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Задание	6
Методические рекомендации по выполнению курсовой работы	8
Рекомендации по оформлению курсовой работы	11
Пример выполнения курсовой работы	12
Список вопросов к защите курсовой работы	20
Оценивание курсовой работы	20
Список литературы	21
Приложение А.	22

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Производственные роботы, манипуляторы и автоматические линии» входит в основную образовательную программу магистратуры по направлению подготовки 15.04.01 Машиностроение.

Цель дисциплины – получение знаний по современным техническим средствам автоматизации технологических процессов – промышленным манипуляторам, роботам и автоматическим линиям.

В результате освоения дисциплины студент должен:

знать:

- технологические функции, выполняемые машинами;
- вопросы проектирования и расчета основных параметров промышленных манипуляторов;
- различные типы и виды средств автоматизации;
- основные конструкции промышленных манипуляторов;
- условия создания гибких производственных комплексов современного промышленного производства;

уметь:

- выбирать оптимальные условия работы комплексов с использованием различных типов управления;
- производить расчеты основных параметров промышленных манипуляторов;
- выдвигать и обосновывать предложения по модернизации и проектированию данных средств автоматизации;

владеть:

- использования методов и приборов исследований манипуляторов в условиях действующего производства;
- компетентного выбора по рациональным режимам эксплуатации манипуляторов;
- в определении экономически целесообразного уровня роботизации и автоматизации;
- представлять современное состояние и перспективы технического и технологического развития роботизированных комплексов технологических машин и оборудования;
- математического и физического моделирования систем в области технологических машин и оборудовании.

Цель курсовой работы – закрепление теоретического материала по дисциплине «Производственные манипуляторы, роботы и автоматические линии» посредством решения комплексной задачи, являющейся основой для его применения в профессиональной деятельности и формирования компетенций в соответствии с ООП.

Основная задача создания промышленных роботов заключается в комплексной автоматизации производства. Суть комплексной автоматизации состоит в автоматизации различных видов деятельности, т.е. как автоматизации процессов по совершению полезной работы, связанной с затратами

механической энергии, так и автоматизация операций по сбору, переработке и передачи информации, выработке на основании этой информации управляющих воздействий, т.е. процессов управления, связанных с использованием «интеллекта».

Основной проблемы роботизации производства является формирование самого технологического процесса с участием этих машин. Говоря о состоянии робототехнических систем, следует отметить, что робототехника является одним из знаковых направлений развития науки и техники XXI века. Как машина-автомат принципиально нового типа, робот может быть и технологической машиной, и транспортной, и информационной, а может и вообще выпадать из этой категории, выполняя функции технологического приспособления или средства автоматизации [1].

Тема курсовой работы «Исследование и проектирование манипуляторов промышленных роботов» у всех студентов одинакова, также как и задание на ее выполнение, которое приведено в следующем разделе. В соответствии с вариантом необходимо выбрать исходные параметры системы.

Прежде чем приступить к выполнению задания, студенту следует изучить методические рекомендации и пример выполнения курсовой работы.

В конце пособия приведен список вопросов к защите курсовой работы.

Курсовая работа связана с анализом работы заданного манипулятора, расчетом и графическим его представлением.

При работе над курсовой работой студент может использовать не только учебную литературу, но и статьи, публикуемые в периодической печати, указывая в работе источники информации. Текстовая часть работы должна быть иллюстрирована рисунками, схемами, диаграммами, чертежами, таблицами по необходимости. В конце приводится список использованных источников.

По результатам выполнения и защиты курсовой работы выставляется оценка («отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно»).

При защите курсовой работы студенту предоставляется до 5 минут для краткого выступления, в котором необходимо сосредоточить внимание на главных вопросах темы или положениях, составляющих результат самостоятельных выводов. После выступления студенту задаются вопросы по теме курсовой работы. При защите учитывается наличие ошибок в работе, полнота раскрытия темы, логичность, убедительность выводов, качество ответов на вопросы.

Оценка курсовой работы определяется количеством допущенных в ней ошибок и результатом ее защиты:

- «отлично» - ошибок нет;
- «хорошо» - не более двух ошибок;
- «удовлетворительно» - при трех ошибках;
- «неудовлетворительно» - студент полностью не справился с заданием.

Задание

для выполнения курсовой работы

«Исследование и проектирование манипуляторов промышленных роботов»

Разработать электромеханический привод «плечевой» степени подвижности двухзвенного плоского манипулятора робота, кинематическая схема которого изображена на рис. 1 [2]. Предусмотреть технические средства для фиксации звеньев манипулятора при аварийном отключении питания привода. Обеспечить работу датчиков положения при аварийном отключении основного электропитания в течение не менее 30 мин. Источник питания приводов робота – заводская трехфазная электрическая сеть с напряжением 380 В и частотой 50 Гц.

Параметры манипуляционного механизма приведены в таблице № 1 и 2, а основные требования к исполнительной системе робота в таблице № 3.

Курсовая работа представляет собой решение комплексной технической задачи, а именно:

- кинематический анализ манипуляционного механизма второго звена;
- силовой анализ манипуляционного механизма;
- оценка мощности двигателя второго звена;
- выбор двигателя привода второго звена;
- определение требуемого передаточного отношения и марки редуктора;
- проверка правильности выбора двигателя и редуктора;
- кинематический анализ манипуляционного механизма первого звена;
- силовой анализ манипуляционного механизма;
- оценка мощности двигателя первого звена;
- выбор двигателя привода первого звена;
- определение требуемого передаточного отношения и марки редуктора;
- проверка правильности выбора двигателя и редуктора;
- построение приведённой диаграммы нагрузки;
- тепловой расчёт двигателя первого звена;
- учет дополнительных требований.

Номер задания из табл. 2 выдает преподаватель индивидуально.

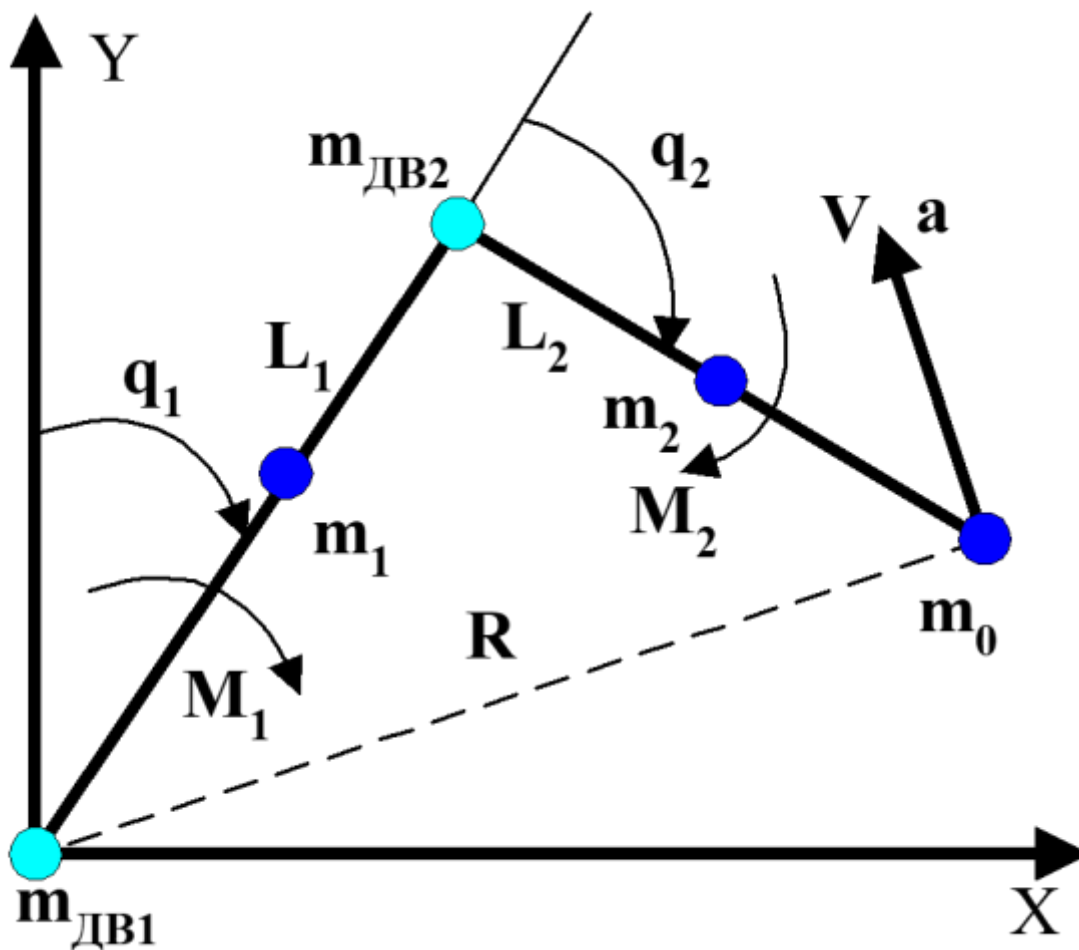


Рис. 1. Расчётная кинематическая схема манипуляционного механизма

Таблица № 1. Параметры манипуляционного механизма

Параметр	Условное обозначение	Значение
Длина "плечевого" звена манипуляционного механизма, м	L_1	
Расстояние от оси поворота "локтевого" звена до центра масс рабочего органа с объектом манипулирования, м	L_2	
Диапазон изменения перемещений "плечевого" звена манипуляционного механизма, град	q_1	-45 ... +120
Диапазон изменения перемещений "локтевого" звена манипуляционного механизма, град	q_2	-90 ... +90
Масса "плечевого" звена, кг	m_1	
Масса "локтевого" звена, кг	m_2	
Масса рабочего органа, кг	m_{po}	2
Масса объекта манипулирования, кг	m_o	-

Таблица № 2. Параметры манипуляционного механизма

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L ₁	0,6	0,5	0,4	0,7	0,8	0,6	0,5	0,4	0,7	0,8	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,7	0,7	0,8
L ₂	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,6	0,7	0,3	0,4	0,3	0,7	0,4	0,6	0,4	0,7	0,3	0,4	0,4
m ₁	12	13	14	9	8	12	13	14	9	8	12	12	12	13	13	14	14	9	9	8
m ₂	8	8	8	8	8	10	12	6	5	13	9	13	5	10	6	10	5	13	9	9

Таблица № 3. Основные требования к исполнительной системе робота

Параметр	Условное обозначение	Значение
Допустимая статическая погрешность рабочего органа, мм	$\Delta_{ст}$	0,1
Допустимая динамическая погрешность рабочего органа, мм	$\Delta_{дин}$	0,1
Максимальная скорость рабочего движения, м/с	$V_{р.мах}$	0,2
Максимальное ускорение рабочего движения, м/с ²	$a_{р.мах}$	0,05
Максимальная скорость РО при «переброске», м/с	$V_{мах}$	0,5
Длительность разгона до максимальной скорости, с	$t_{раз}$	0,2
Относительная длительность “переброски” в рабочем цикле, с	$t_{пер\ отн}$	0,25

Методические рекомендации по выполнению курсовой работы

Курсовую работу необходимо выполнять в следующей последовательности.

Кинематический анализ манипуляционного механизма.

Определим максимальную скорость и ускорение второго звена в режиме переброски.

Найдём максимальную скорость и ускорение второго звена при рабочем движении.

Силовой анализ манипуляционного механизма.

Статический момент второго звена.

Статический момент будет максимальным, если $\sin(q_1 + q_2) = 1$, т. е. $q_1 + q_2 = 90^\circ$.

Определим максимальный динамический момент второго звена.

Выбираем редуктор и коэффициент полезного действия этого редуктора.

Вычисляем максимальный момент нагрузки.

Производим оценку мощности двигателя второго звена.

Выбор двигателя привода второго звена [3].

Выбираем двигатель и определяем его технические характеристики:

- Номинальная мощность P_n
- Номинальный момент M_n
- Номинальная частота вращения n_n
- Номинальное напряжение $U_{ян}$

- Номинальный ток $I_{ян}$
- Момент инерции ротора $J_{дв}$
- Сопротивление якоря $R_я$
- Электромагнитная постоянная времени T_e
- Масса m

Определение требуемого передаточного отношения и марки редуктора.

Вычисляем оптимальные значения передаточного числа редуктора.

Выбираем редуктор [4].

Производим проверку правильности выбора двигателя и редуктора.

Проверка двигателя по моменту и по частоте вращения.

Так как максимально требуемый момент, и максимально требуемая частота вращения меньше номинальных значений, то двигатель обеспечит нужные режимы работы.

Тепловой расчёт проводить не требуется, так как номинальный момент двигателя превышает требуемый момент, поэтому двигатель не перегреется.

Выбор двигателя и редуктора привода первого звена.

Кинематический анализ манипуляционного механизма.

Рассмотрим манипуляционный механизм, когда рабочий орган движется вдоль оси x (рис. 2.)

Определим скорости и ускорения первого звена в режиме переброски.

Изменяя q_2 от -90° до $+90^\circ$, вычислим скорости и ускорения первого звена и занесём полученные данные в таблицу.

Определим максимальные скорость и ускорение рабочего движения первого звена.

Силовой анализ манипуляционного механизма.

Статический момент первого звена.

Динамический момент первого звена.

Эквивалентный момент инерции первого звена.

Момент нагрузки.

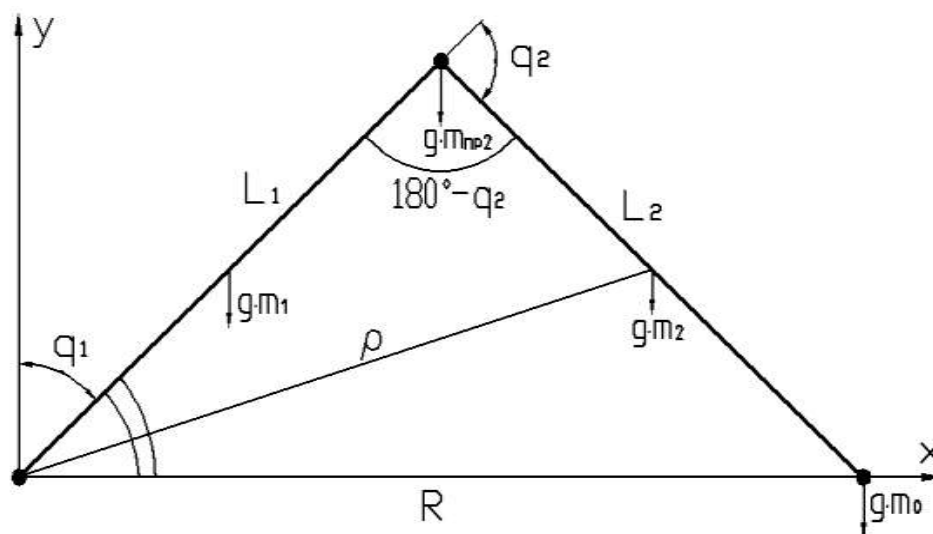


Рис. 2. Схема механизма

Принимая в расчёт зависимость $q_1 = \arccos \left[L_2 \cdot \sin \left(\frac{q_2}{R} \right) \right]$, вычислим моменты

изменяя q_2 в диапазоне от -90° до $+90^\circ$.

Так как диапазон возможных перемещений q_1 от -45° до $+120^\circ$ в таблице будем рассматривать только положительные значения q_2 .

Оценка мощности двигателя первого звена.

Максимальная мощность привода: $P_{H1\max}$;

Тогда требуемая мощность двигателя $P_1 = 3 \cdot P_{H1\max}$.

Выбор двигателя привода первого звена.

Выбираем двигатель [5].

Определяем технические характеристики:

- Номинальная мощность P_n
- Номинальный момент M_n
- Номинальная частота вращения n_n
- Номинальное напряжение $U_{ян}$
- Номинальный ток $I_{ян}$
- Момент инерции ротора $J_{об}$
- Сопротивление якоря $R_я$
- Электромагнитная постоянная времени T_e
- Масса m

Определение требуемого передаточного отношения и марки редуктора.

Вычисление оптимального значения передаточного числа редуктора

Выбираем редуктор [6].

Проверка правильности выбора двигателя и редуктора.

Проверка двигателя по моменту и по частоте вращения.

Так как максимально требуемый момент, и максимально требуемая частота вращения меньше номинальных значений, то двигатель обеспечит нужные режимы работы.

Построение приведённой диаграммы нагрузки.

Вначале построим область располагаемых моментов и скоростей (ОРМС).

Определим пусковой момент двигателя:

Скорость холостого хода двигателя.

Далее определим параметры для построения диаграммы нагрузки привода в режиме переброски.

Определим статический момент двигателя:

Определим динамический момент двигателя.

Суммарный момент инерции.

Основываясь на полученных данных, построим диаграмму нагрузки при работе привода в режиме переброски.

Ускорение при работе в режиме слежения.

Динамический момент привода в режиме слежения.

Для R и $J_{\Sigma 1}$, определим значения при различных q_2 .

Строим приведённые диаграммы нагрузки в режиме переброски и в рабочем режиме.

Диаграммы нагрузки полностью расположены в ОРМС, следовательно, двигатель удовлетворяет заданным законам движения.

Тепловой расчёт двигателя первого звена.

Учет дополнительных требований.

1) Для фиксации звеньев в случае аварийного отключения электроэнергии следует установить электромагнитные тормозные устройства на каждом приводе.

2) Для обеспечения работы датчиков положения при аварийном отключении питания следует подключить датчики и контроллер с квадратурным счётчиком к источнику бесперебойного питания.

3) Для работы двигателей постоянного тока от заводской трехфазная электрической сети с напряжением 380 В и частотой 50 Гц, необходимо оснастить мехатронную систему выпрямителем тока.

Рекомендации по оформлению курсовой работы

Курсовая работа оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2017. Отчет о научно-исследовательской работе [7].

Курсовая работа представляется на стандартных листах (формат А4), текст которой набран в текстовом редакторе Microsoft Word шрифтом 14 Times New Roman через 1,5 интервала с выравниванием по ширине и распечатан на одной стороне листа. Таблицы допускается заполнять шрифтом 12. Поля по 2 см с каждой стороны.

Курсовая работа должна включать: титульный лист, содержание, задание разделы содержательной части, заключение, список использованных источников. При необходимости добавляется приложение (например, программа расчета в среде Mathcad). Содержательная часть должна состоять из пяти разделов, соответствующих разделам задания.

Первый лист является титульным, его форма приведена в приложении А. Перед распечаткой внизу титульного листа необходимо внести текущий год, в пункте «Руководитель» – Фамилию И.О. ведущего преподавателя, в пункте «Выполнил» – свою Фамилию И.О.

Формулы в основной части набираются латинским шрифтом (*курсив*). Для набора больших формул следует использовать встроенные средства Microsoft Word (Equation 3,0).

Номер, название и необходимые пояснения к рисунку делается под ним. Номер и название таблицы – перед ней. Оформление рисунков и таблиц см. в разделе «Пример выполнения курсовой работы».

Курсовая работа представляется на кафедре в одном экземпляре не позднее, чем за две недели до конца семестра. В случае возвращения курсовой работы на доработку, по согласованию с преподавателем, студент может не перепечатывать всю работу, а добавить раздел «Работа над ошибками».

Пример выполнения курсовой работы

Параметры манипуляционного механизма приведены в таблице № 3, а основные требования к исполнительской системе робота в таблице № 4.

Таблица № 3. Параметры манипуляционного механизма

Параметр	Условное обозначение	Значение
Длина "плечевого" звена манипуляционного механизма, м	L_1	0,6
Расстояние от оси поворота "локтевого" звена до центра масс рабочего органа с объектом манипулирования, м	L_2	0,5
Диапазон изменения перемещений "плечевого" звена манипуляционного механизма, град	q_1	-45 ... +120
Диапазон изменения перемещений "локтевого" звена манипуляционного механизма, град	q_2	-90 ... +90
Масса "плечевого" звена, кг	m_1	12
Масса "локтевого" звена, кг	m_2	8
Масса рабочего органа, кг	m_{po}	2
Масса объекта манипулирования, кг	m_o	-

Выбор двигателя и редуктора привода второго звена.

Кинематический анализ манипуляционного механизма.

Определим максимальную скорость и ускорение второго звена в режиме переброски

$$\Omega_{2\max} = \frac{V_{\max}}{l_2} = \frac{0,5}{0,5} = 1 \text{ м/с};$$

$$\dot{\Omega}_{2\max} = \frac{V_{\max}}{t_{\text{раз}} \cdot l_2} = \frac{0,5}{0,2 \cdot 0,5} = 5 \text{ м/с}^2;$$

Таблица № 4. Основные требования к исполнительской системе робота

Параметр	Условное обозначение	Значение
Допустимая статическая погрешность рабочего органа, мм	$\Delta_{\text{ст}}$	0,1
Допустимая динамическая погрешность рабочего органа, мм	$\Delta_{\text{дин}}$	0,1
Максимальная скорость рабочего движения, м/с	$V_{p.\max}$	0,2
Максимальное ускорение рабочего движения, м/с ²	$a_{p.\max}$	0,05
Максимальная скорость РО при «переброске», м/с	V_{\max}	0,5
Длительность разгона до максимальной скорости, с	$t_{\text{раз}}$	0,2
Относительная длительность "переброски" в рабочем цикле, с	$t_{\text{пер отн}}$	0,25

Найдём максимальную скорость и ускорение второго звена при рабочем движении.

$$\Omega_{2p \max} = \frac{V_{p \max}}{l_2} = \frac{0,2}{0,5} = 0,4 \text{ м/с};$$

$$\dot{\Omega}_{2p \max} = \frac{a_{p \max}}{l_2} = \frac{0,05}{0,5} = 0,1 \text{ м/с}^2;$$

Силовой анализ манипуляционного механизма.

Статический момент второго звена равен:

$$M_{CT2} = g \cdot (m_2 \cdot \frac{l_2}{2} + m_{po} \cdot l_2) \cdot \sin(q_1 + q_2);$$

Статический момент будет максимальным, если $\sin(q_1 + q_2) = 1$, т.е. $q_1 + q_2 = 90^\circ$.

$$M_{CT2 \max} = 9,8 \cdot (8 \cdot \frac{0,5}{2} + 10 \cdot 2 \cdot 0,5) \cdot 1 = 29,4 \text{ Нм}; \quad M = 9,8 \cdot (8 \cdot 0,5/2 + 2 \cdot 0,5) \cdot 1 = 29,4.$$

Определим максимальный динамический момент второго звена:

$$M_{Дин2 \max} = J_{\text{экв}2} \cdot \dot{\Omega}_{2 \max},$$

где $J_{\text{экв}2} = m_{po} \cdot l_2^2 + \frac{m_2 \cdot l_2^2}{3}$ – эквивалентный момент инерции.

$$J_{\text{экв}2} = 2 \cdot 0,5^2 + \frac{8 \cdot 0,5^2}{3} = 1,17 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$\text{Отсюда } M_{Дин2 \max} = 1,17 \cdot 5 = 5,83 \text{ Нм};$$

Выбираем редуктор HDUR-32 компании Harmonic drive gearing. Коэффициент полезного действия этого редуктора равен $\eta = 0,83$.

Вычисляем максимальный момент нагрузки:

$$M_{H2 \max} = \frac{1}{\eta} (M_{CT2} + M_{Дин2 \max}) = \frac{1}{0,83} \cdot (29,4 + 5,83) = 42,45 \text{ Нм}.$$

Оценка мощности двигателя второго звена.

Максимальная мощность привода определяется по формуле:

$$P_{H2 \max} = M_{H2 \max} \cdot \Omega_{2 \max} = 42,45 \cdot 1 = 42,45 \text{ Вт};$$

Требуемая мощность двигателя $P_2 = 2 \cdot P_{H2 \max} = 2 \cdot 42,45 = 84,9 \text{ Вт}$.

Выбор двигателя привода второго звена.

Выбираем двигатель GNM-4150A фирмы Engel ElectroMotoren.

Технические характеристики:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| ▪ Номинальная мощность | $P_n = 100 \text{ Вт}$ |
| ▪ Номинальный момент | $M_n = 0,318 \text{ Нм}$ |
| ▪ Номинальная частота вращения | $n_n = 3000 \text{ об/мин}$ |
| ▪ Номинальное напряжение | $U_{ян} = 24 \text{ В}$ |
| ▪ Номинальный ток | $I_{ян} = 5,5 \text{ А}$ |
| ▪ Момент инерции ротора | $J_{\text{дв}} = 0,0938 \cdot 10^{-3} \text{ кгм}^2$ |
| ▪ Сопротивление якоря | $R_{я} = 049 \text{ Ом}$ |
| ▪ Электромагнитная постоянная времени | $T_e = 0,0016 \text{ с}$ |
| ▪ Масса | $m = 2,45 \text{ кг}$ |

Определение требуемого передаточного отношения и марки редуктора.

Вычисление оптимального значения передаточного числа редуктора:

$$i_{p2} = \sqrt{\frac{P_{H2\max}}{J_{\text{дв}2} \cdot \Omega_{2\max} \cdot \dot{\Omega}_{2\max}}} = \sqrt{\frac{42,45}{0,0938 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 5}} = 300;$$

Выбираем редуктор HDUR-32-260-2G-R-SP, у которого передаточное отношение $i_{p1} = 260$, максимальный эквивалентный зазор $\sigma = 1,45 \cdot 10^{-4}$ рад, жёсткость $c = 2,8 \cdot 10^4$ Нм/рад и масса $m = 1,7$ кг.

Проверка правильности выбора двигателя и редуктора.

Проверка двигателя по моменту и по частоте вращения:

$$M_2 = J_{\text{дв}2} i_{p2} \dot{\Omega}_{2\max} + \frac{M_{H2\max}}{i_{p2}} = 0,0938 \cdot 10^{-3} \cdot 260 \cdot 5 + \frac{42,45}{260} = 0,285 \text{ Нм} < M_{\text{дв}2н} = 0,318 \text{ Нм};$$

$$\Omega_{\text{дв}2\max} = \Omega_{2\max} \cdot i_p = 1 \cdot 260 = 260 \text{ рад/с};$$

$$n_{\text{дв}2\max} = \Omega_{\text{дв}2\max} \cdot \frac{30}{\pi} = 260 \cdot \frac{30}{\pi} = 2484 \text{ об/мин} < n_n = 3000 \text{ об/мин}.$$

Так как максимально требуемый момент и максимально требуемая частота вращения меньше номинальных значений, то двигатель обеспечит нужные режимы работы.

Тепловой расчёт проводить не требуется, так как номинальный момент двигателя превышает требуемый момент, поэтому двигатель не перегреется.

Выбор двигателя и редуктора привода первого звена.

Кинематический анализ манипуляционного механизма.

Рассмотрим манипуляционный механизм, когда рабочий орган движется вдоль оси x (рис. 3).

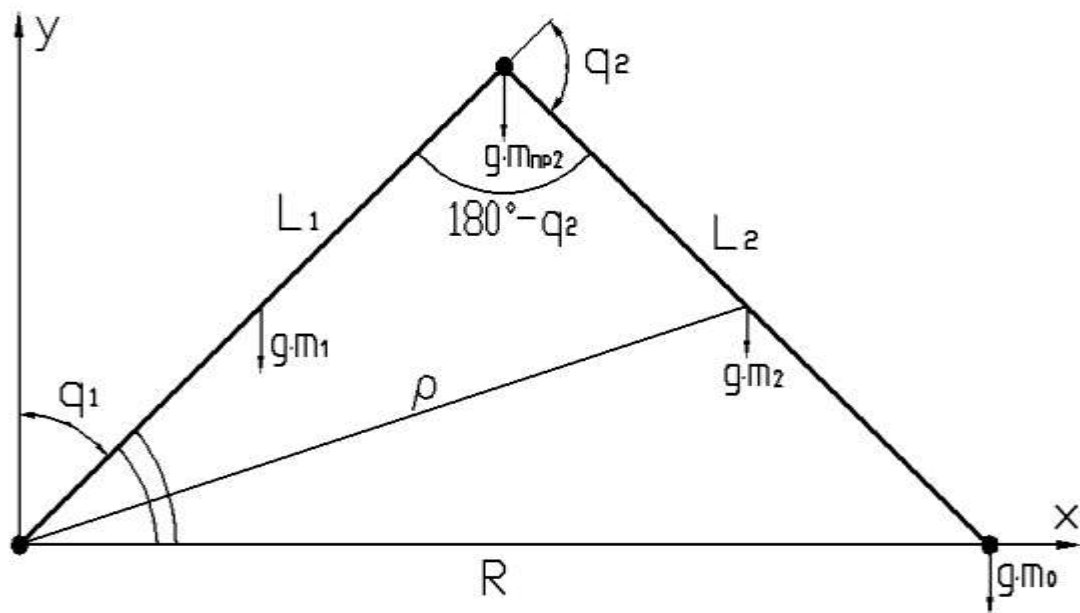


Рис. 3. Схема механизма

Определим скорости и ускорения первого звена в режиме переброски.

$$\Omega_1 = \frac{\Omega_{\max}}{R}; \quad \dot{\Omega}_1 = \frac{\dot{\Omega}_{\max}}{t_p \cdot R},$$

где R – кратчайшее положение от центра системы координат до центра схвата.

По теореме косинусов:

$$R = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 \cdot l_2 \cdot \cos q_2}.$$

Изменяя q_2 от -90° до $+90^\circ$, вычислим скорости и ускорения первого звена и занесём полученные данные в таблице № 5.

Таблица № 5

$q_2, ^\circ$	-90	-60	-30	0	30	60	90
$R, м$	0,781	0,954	1,063	1,1	1,063	0,954	0,781
$\Omega_1, м/с$	0,641	0,524	0,471	0,455	0,471	0,524	0,641
$\dot{\Omega}_1, м/с^2$	3,201	2,621	2,352	2,273	2,352	2,621	3,201

Из таблицы видно, что $\Omega_{1\max} = 0,641 м/с$, $\dot{\Omega}_{1\max} = 3,201 м/с^2$.

Определим максимальные скорость и ускорение рабочего движения первого звена:

$$\Omega_{1p\max} = \frac{V_{p\max}}{R_{\min}} = \frac{0,2}{0,781} = 0,256 м/с;$$

$$\dot{\Omega}_{1p\max} = \frac{a_{p\max}}{R_{\min}} = \frac{0,05}{0,781} = 0,064 м/с^2;$$

Силовой анализ манипуляционного механизма.

Статический момент первого звена равен:

$$M_{CT1} = (g \cdot m_1 \cdot \frac{l_1}{2} + g \cdot m_2 \cdot l_1 + g \cdot m_0 \cdot l_1 + g \cdot m_{np2} \cdot l_1) \cdot \sin(q_1 + q_2) + M_{CT2},$$

где $m_{np2} = m_{\delta 2} + m_{p2} = 2,45 + 1,7 = 4,15 кг$.

Динамический момент первого звена равен:

$$M_{Дин1} = J_{экв1} \cdot \dot{\Omega}_1.$$

Эквивалентный момент инерции первого звена:

$$J_{экв1} = m_0 \cdot R^2 + m_2 \cdot \rho^2 + m_{np2} \cdot l_1^2 + m_1 \cdot \frac{l_1^2}{4},$$

где $\rho^2 = l_1^2 + \frac{l_2^2}{4} + l_1 \cdot l_2 \cdot \cos q_2$ – кратчайшее положение от системы координат до середины второго звена.

$$\text{Момент нагрузки: } M_{H1} = \frac{1}{\eta} (M_{CT1} + M_{Дин1}).$$

Принимая в расчёт зависимость $q_1 = \arccos \left[L_2 \cdot \sin \left(\frac{q_2}{R} \right) \right]$, вычислим моменты изменяя q_2 в диапазоне от -90° до $+90^\circ$.

Так как диапазон возможных перемещений q_1 от -45° до $+120^\circ$, в таблице № 6 будем рассматривать только положительные значения q_2 .

Таблица № 6

$q_2, ^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$q_1, ^\circ$	90	85,456	80,92	76,4	71,9	67,43	63	58,64	54,36	50,19
$R, м$	1,1	1,096	1,083	1,063	1,034	0,998	0,954	0,903	0,845	0,781
$\Omega_1, м/с$	0,455	0,456	0,461	0,47	0,483	0,501	0,524	0,554	0,592	0,64
$\dot{\Omega}_1, м/с^2$	2,273	2,281	2,307	2,352	2,417	2,505	2,621	2,769	2,958	3,201
$q_1+q_2, ^\circ$	90	95,456	100,9	106,4	111,9	117,4	123	128,6	134,4	140,2
$\rho, м$	0,85	0,847	0,839	0,826	0,808	0,784	0,757	0,725	0,689	0,65
$M_{Icm}, Нм$	137,89	137,41	136	133,6	130,4	126,3	121,3	115,6	109,2	102,2
$J_{экв1}, кгм^2$	10,689	10,634	10,47	10,21	9,846	9,403	8,889	8,32	7,714	7,089
$M_{дин1}, Нм$	24,292	24,26	24,16	24,01	23,8	23,56	23,29	23,04	22,82	22,69
$M_{IH}, Нм$	195,397	194,78	193	189,9	185,8	180,5	174,2	167	159	150,4
$P_{H1max}, Вт$	88,816	88,874	89,05	89,36	89,81	90,45	91,32	92,5	94,1	96,3

Оценка мощности двигателя первого звена.

Максимальная мощность привода: $P_{H1max} = 96,3 \text{ Вт}$;

Тогда требуемая мощность двигателя $P_1 = 3 \cdot P_{H1max} = 3 \cdot 96,3 = 288,9 \text{ Вт}$.

Выбор двигателя привода первого звена.

Выбираем двигатель 55NM81-100-2 компании Kollmorgen.

Технические характеристики:

- Номинальная мощность $P_n = 350 \text{ Вт}$
- Номинальный момент $M_n = 2,7 \text{ Нм}$
- Номинальная частота вращения $n_n = 1600 \text{ об/мин}$
- Номинальное напряжение $U_{ян} = 42 \text{ В}$
- Номинальный ток $I_{ян} = 19,2 \text{ А}$
- Момент инерции ротора $J_{об} = 0,000071 \text{ кгм}^2$
- Сопротивление якоря $R_{я} = 0,65 \text{ Ом}$
- Электромагнитная постоянная времени $T_e = 0,00035 \text{ с}$
- Масса $m = 6,5 \text{ кг}$

Определение требуемого передаточного отношения и марки редуктора.

Вычисление оптимального значения передаточного числа редуктора:

$$i_{p1} = \sqrt{\frac{P_{H1max}}{J_{об1} \cdot \Omega_{1max} \cdot \dot{\Omega}_{1max}}} = \sqrt{\frac{96,3}{0,000071 \cdot 0,641 \cdot 3,201}} = 257,1;$$

Выбираем редуктор TP+ 025 MA, у которого передаточное отношение $i_{p1} = 220$, максимальный эквивалентный зазор $\sigma = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$, жёсткость $c = 32 \cdot 10^4 \text{ Нм/рад}$ и масса $m = 6,1 \text{ кг}$.

Проверка правильности выбора двигателя и редуктора.

Проверка двигателя по моменту и по частоте вращения:

$$M_1 = J_{\partial e1} i_{p1} \dot{\Omega}_{1\max} + \frac{M_{n1\max}}{i_{p1}} = 0,071 \cdot 10^{-3} \cdot 220 \cdot 3,201 + \frac{195,397}{220} = 0,94 \text{ Нм} < M_{\partial e1n} = 2,7 \text{ Нм};$$

$$\Omega_{\partial e1\max} = \Omega_{1\max} \cdot i_{p1} = 0,641 \cdot 220 = 141,02 \text{ рад/с};$$

$$n_{\partial e1\max} = \Omega_{\partial e1\max} \cdot \frac{30}{\pi} = 141,02 \cdot \frac{30}{\pi} = 1347,32 \text{ об/мин} < n_n = 1600 \text{ об/мин}.$$

Так как максимально требуемый момент, и максимально требуемая частота вращения меньше номинальных значений, то двигатель обеспечит нужные режимы работы.

Построение приведённой диаграммы нагрузки. Вначале построим область располагаемых моментов и скоростей (ОРМС). Определим пусковой момент двигателя:

$$M_{II} = \frac{k_m \cdot U_{я}}{R_{я}} = \frac{0,18 \cdot 42}{0,65} = 11,63 \text{ Нм};$$

$$\text{где } k_m = \frac{U_{я} - I_{я} \cdot R_{я}}{\Omega_{\partial \text{ном}}} = \frac{42 - 19,2 \cdot 0,65}{167,47} = 0,18 \frac{\text{Нм}}{\text{А}} \quad - \quad \text{коэффициент момента}$$

двигателя; $k_e = k_m = 0,18 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ – коэффициент ЭДС двигателя.

Скорость холостого хода двигателя:

$$\Omega_{\partial \text{в.хх}} = \frac{U_{я}}{k_e} = \frac{42}{0,18} = 233,33 \text{ рад/с}.$$

Далее определим параметры для построения диаграммы нагрузки привода в режиме переброски.

Определим статический момент двигателя:

$$M_{cm1\partial \text{в}} = \frac{M_{cm1}}{i_{p1} \cdot \eta} = \frac{137,89}{220 \cdot 0,83} = 0,755 \text{ Нм};$$

Определим динамический момент двигателя:

$$M_{\partial \text{ин1}} = J_{\Sigma 1} \dot{\Omega}_{\partial e1},$$

$$\text{где ускорение двигателя } \dot{\Omega}_{\partial e1} = i_{p1} \cdot \dot{\Omega}_{1\max} = 220 \cdot 3,201 = 704,22 \text{ рад/с}^2;$$

Суммарный момент инерции:

$$J_{\Sigma 1} = J_{\partial e1} + J_{n1\text{прив}},$$

$$\text{где } J_{n1\text{прив}} = \frac{J_{\text{экс1max}}}{i_p^2 \eta} = \frac{10,689}{220^2 \cdot 0,83} = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad - \quad \text{приведённый момент}$$

инерции первого звена.

$$J_{\Sigma 1} = 0,071 \cdot 10^{-3} + 0,27 \cdot 10^{-3} = 0,341 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$\text{Отсюда } M_{\partial \text{ин1}} = 0,341 \cdot 10^{-3} \cdot 704,22 = 0,24 \text{ Нм}.$$

Тогда момент разгона равен:

$$M_p = M_{\text{ст.двиг}} + M_{\partial \text{ин1}} = 0,755 + 0,24 = 0,995 \text{ Нм};$$

А момент торможения равен:

$$M_m = M_{\text{ст.двиг}} - M_{\partial \text{ин1}} = 0,755 - 0,24 = 0,515 \text{ Нм}.$$

Основываясь на полученных данных, построим диаграмму нагрузки при работе привода в режиме переборки. Коэффициент перегрузки по моменту:

$$\lambda = \frac{M_{\text{д.ном}}}{M_p} = \frac{2,7}{0,995} = 2,7.$$

Значит, $\lambda \cdot M_{\text{д.ном}} = 2,7 \cdot 2,7 = 7,29 \text{ Нм}$;

Для построения семейства эллипсов нагрузки при работе привода в режиме слежения определим следующие параметры. Ускорение при работе в режиме слежения

$$\dot{\Omega}_{\text{сл}} = A_s \cdot \omega_s^2,$$

где $A_s = \frac{\Omega_p^2}{\dot{\Omega}_p} = \frac{V_p^2 \cdot R}{R^2 \cdot a_p} = \frac{V_p^2}{R \cdot a_p}$, и $\omega_s = \frac{\dot{\Omega}_p}{\Omega_p} = \frac{a_p \cdot R}{R \cdot V_p} = \frac{a_p}{V_p}$ – амплитуда и круговая

частота эквивалентного гармонического воздействия.

Динамический момент привода в режиме слежения:

$$M_{\text{дин.сл}} = J_{\Sigma 1} \cdot \dot{\Omega}_{\text{сл}}.$$

Используя выражения для R и $J_{\Sigma 1}$, определим значения при различных q_2 .

Диаграммы нагрузки полностью расположены в ОРМС, следовательно двигатель удовлетворяет заданным законам движения.

Таблица № 7

$q_2, ^\circ$	0	30	60	90
$R, \text{ м}$	1,1	1,063	0,954	0,781
$M_{\text{л.ст}}, \text{ Нм}$	0,755	0,732	0,664	0,56
$J_{\Sigma 1}, \text{ кгм}^2$	0,000341	0,000325	0,00029	0,00025
$\dot{\Omega}_{\text{сл}}, \text{ м/с}^2$	0,045	0,047	0,052	0,064
$M_{\text{дин.сл}}, \text{ Нм}$	0,000015	0,000015	0,000015	0,000016
$M_{\text{сл1}}, \text{ Нм}$	0,755	0,732	0,664	0,56

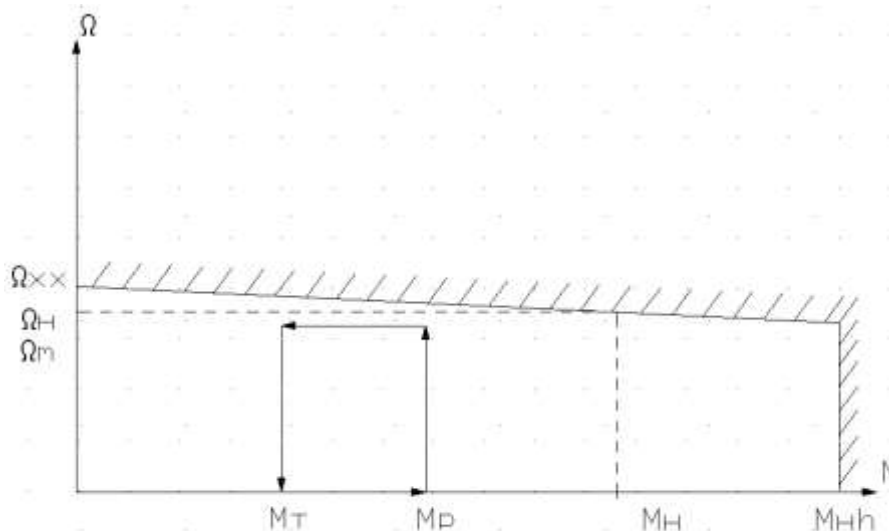


Рис. 4. ОРМС и приведённые диаграммы нагрузки в режиме переборки и в рабочем режиме

Тепловой расчёт двигателя первого звена.

Для двигателей постоянного тока можно использовать метод эквивалентного момента:

$$M_{\text{дэл}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} M_{\text{дв}}^2(t) dt.$$

Условие отсутствия перегрева:

$$M_{\text{дэл}} \leq M_{\text{д1ном}}.$$

Среднеквадратичный момент равен:

$$M_{\text{дэл}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} (M_p^2 \cdot t_p + M_m^2 \cdot t_m + M_{\text{сл}}^2 \cdot t_{\text{сл}})},$$

где $t_{\text{сл}}$ – длительность слежения; $t_{\text{ц}}$ – длительность цикла.

$$t_{\text{ц}} = \frac{t_p + t_T}{t_{\text{омн}}} = \frac{0,2 + 0,2}{0,25} = 1,6 \text{ с};$$

$$t_{\text{сл}} = t_{\text{ц}} - t_p - t_T = 1,6 - 0,2 - 0,2 = 1,2 \text{ с};$$

$$M_{\text{дэ}} = \sqrt{\frac{1}{1,6} (0,955^2 \cdot 0,2 + 0,515^2 \cdot 0,2 + 0,755^2 \cdot 1,2)} = 0,758 \text{ Нм}.$$

Условие отсутствия перегрева выполняется: $M_{\text{дэл}} = 0,758 \text{ Нм} \leq M_{\text{д1ном}} = 2,7 \text{ Нм}$.

Учет дополнительных требований.

1) Для фиксации звеньев в случае аварийного отключения электроэнергии следует установить электромагнитные тормозные устройства на каждом приводе.

2) Для обеспечения работы датчиков положения при аварийном отключении питания следует подключить датчики и контроллер с квадратурным счётчиком к источнику бесперебойного питания.

3) Для работы двигателей постоянного тока от заводской трехфазная электрической сети с напряжением 380 В и частотой 50 Гц, необходимо оснастить мехатронную систему выпрямителем тока.

Выводы

В процессе проектирования электромеханического следящего привода исполнительной системы работа были определены двигатели, редукторы, силовые преобразователи в соответствии с требованиями по обеспечению энергетической возможности движения объекта по заданному закону движения с требуемыми зависимостями развиваемых скоростей и усилий. Также был произведен выбор информационных устройств – датчиков обратных связей, которые могут обеспечивать заданную точность привода. Следящий привод работает без тепловой перегрузки. В соответствии с особыми требованиями были рассмотрены вопросы аварийной остановки системы.

Был произведен расчет регуляторов положения, скорости и тока, произведена их настройка и определены коэффициенты датчиков обратных связей для обеспечения требований к исполнительной системе по точности, устойчивости и качеству переходных процессов. Все выбранные в ходе

выполнения курсовой работы элементы системы обеспечивают работоспособность при заданных условиях.

Список вопросов к защите курсовой работы

1. Дайте определение понятия робот.
2. Дайте определение понятия манипулятор.
3. Что такое звено манипулятора?
4. Дайте определение понятия привод.
5. Что такое датчик положения?
6. Как проводится кинематический анализ манипуляционного механизма промышленного робота?
7. Как проводится силовой анализ манипуляционного механизма промышленного робота?
8. По каким параметрам выбирают редуктор привода звена манипулятора?
9. Что такое передаточное отношение редуктора?
10. Зачем проводить тепловой расчет для двигателя и когда он необходим?
11. Что значит работать в режиме переброски?
12. Что значит работать в рабочем режиме?
13. Какие дополнительные требования могут предъявляться к манипуляторам промышленных роботов?
14. Что такое выпрямитель электрического тока?

Оценивание курсовой работы

Оценка «5» («отлично») – задание выполнено полностью и без ошибок, оформление соответствует требованиям нормативных документов, на весь заимствованный материал имеются ссылки на Список использованных источников. Студент исчерпывающе, последовательно, четко и логически отвечает на вопросы по выполнению курсовой работы, использует при ответе материалы учебной и научной литературы, подтверждает полное освоение предусмотренной компетенции.

Оценка «4» («хорошо») – задание полностью выполнено, но не весь заимствованный материал сделаны ссылки, имеются отдельные неточности в курсовой работе и в ответах на вопросы.

Оценка «3» («удовлетворительно») – имеются серьезные ошибки при выполнении задания, либо оно выполнено не полностью, нарушены требования нормативных документов. Ответы на вопросы подтверждают освоение предусмотренной компетенции на минимально допустимом уровне.

Оценка «2» («неудовлетворительно») – задание не выполнено, студент допускает грубые ошибки при ответе на вопросы по курсовой работе, не подтверждает освоение предусмотренной компетенции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лозовецкий, В. В. Робототехнические комплексы – средства автоматизации технологических процессов и производств лесной промышленности: учебник для вузов / В. В. Лозовецкий, Е. Г. Комаров; под ред. В. В. Лозовецкого. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 568 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/153691>.
2. Илюхин, Ю. В. Проектирование исполнительных систем роботов. Линеаризованные системы: учеб. пособие / Ю. В. Илюхин, Ю. В. Подураев. – Москва: Издательство МПИ, 1989. – 75 с.
3. Двигатели постоянного тока фирмы ENGEL ElectroMotoren [Электронный ресурс] – URL: <http://www.engel-elektromotoren.de/produkte/pg/> (дата обращения 04.04.2023)
4. Редуктор фирмы Harmonic Drive [Электронный ресурс] – URL: <http://www.harmonicdrive.net/products/componentsets/hdur-component/> (дата обращения 04.04.2023).
5. Двигатель постоянного тока фирмы Kollmorgen [Электронный ресурс] – URL: <http://www.kollmorgen.com/en-us/products/motors/brush-dc/serviced-motors/> (дата обращения 04.04.2023).
6. Редуктор фирмы Wittenstein-alpha [Электронный ресурс] – URL: <http://www.wittenstein-alpha.de/> (дата обращения 04.04.2023).
7. ГОСТ 7.32-2017 Отчет о научно-исследовательской работе. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 28 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»

Институт агроинженерии и пищевых систем

Кафедра Инжиниринга технологического оборудования
наименование кафедры

Курсовая работа
допущена к защите
Руководитель: _____
(уч. степень, звание, должность)
_____ И.О. Фамилия
« ____ » _____ 20 ____ г.

Курсовая работа
защищена с оценкой _____
Руководитель: _____
(уч. степень, звание, должность)
_____ И.О. Фамилия
« ____ » _____ 20 ____ г.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАНИПУЛЯТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Курсовая работа по дисциплине
«Производственные манипуляторы, роботы и автоматические линии»
КР.32.15.04. _____

Работу выполнил:
студент гр. _____
_____ И.О. Фамилия
« ____ » _____ 20 ____ г.

Калининград

20 ____

Локальный электронный методический материал

Сергей Борисович Перетятко

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ, РОБОТЫ
И АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ

Редактор Е. Билко

Уч.-изд. л. 1,8. Печ. л. 1,4

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»,
236022, Калининград, Советский проспект, 1