Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт машиностроения, материалов и транспорта

Высшая школа автоматизации и робототехники

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

**Разработка мобильного робота. Манипулятор**

по дисциплине «Конструирование модулей мехатронных  
устройств в робототехнике»

Выполнили

студенты гр. 3331506/70401 Самарин А.  С.

Паньков И.  С.

Ляпцев И.  А.

Жернаков А.  А.

Козлов Д.  А.

Коновалов В.  А.

Кочурин Р.П.

Шкабара Я.  А.

Якименко Г.  К.

Сомов А.С.

Руководитель

начальник отдела «Конструирование Прямицын И. Б.

робототехнических систем»

«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_ 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

**СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ**

Руководитель курс. проекта,

нач. отдела «Конструирование

робототехнических систем» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ И. Б. Прямицын

(подпись, дата)

Отв. исполнитель,

студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.  С. Самарин

(подпись, дата) (звено 0)

Исполнители:

студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ И.  А. Ляпцев

(подпись, дата) (отчет)

студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А. А. Жернаков

(подпись, дата) (звено 1)

студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Д.  А. Козлов

(подпись, дата) (отчет)

студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ В.  А. Коновалов

(подпись, дата) (чертежи)

студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Р. П. Кочурин

(подпись, дата) (чертежи)

студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Я. А. Шкабара

(подпись, дата) (звено 3)

студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Г. К. Якименко

(подпись, дата) (звенья 2, 3)

студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.С. Сомов

(подпись, дата) (чертежи)

Нормоконтроль \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ И. С. Паньков

(подпись, дата) (звено 2)

СОДЕРЖАНИЕ

[1 Техническое задание 4](#_Toc70083812)

[2 Проведение основных расчетов манипулятора 5](#_Toc70083813)

[2.1 Кинематический расчет манипулятора 5](#_Toc70083814)

[2.2 Статический и динамический расчет манипулятора 6](#_Toc70083815)

[2.2.1 Энергокинематический расчет 6](#_Toc70083816)

[2.2.2 Выбор сервоприводов 10](#_Toc70083817)

[3 Конструкции шарниров 11](#_Toc70083818)

[3.1 Конструкция опорно-поворотного устройства (ОПУ) 11](#_Toc70083819)

[3.2 Конструкция первого шарнира 12](#_Toc70083820)

[3.3 Конструкция второго шарнира 13](#_Toc70083821)

[3.4 Конструкция третьего шарнира 15](#_Toc70083822)

[4 Соединение с остальными частями робота 17](#_Toc70083823)

[4.1 Соединение с платформой 17](#_Toc70083824)

[4.2 Соединение с захватным устройством 17](#_Toc70083825)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 18](#_Toc70083826)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 19](#_Toc70083827)

# Техническое задание

Разработка манипулятора для крепления к подвижной платформе и участия в кубке РТК.

Основные требования, предъявляемые к манипулятору:

* количество звеньев: 4;
* масса манипулятора без схвата: не более 1,5 кг;
* возможность крепления схвата;
* полезная нагрузка: 0,5 кг;
* длина в вытянутом состоянии: 400 мм;
* средняя скорость вращения звеньев: .

# Проведение основных расчетов манипулятора

## Кинематический расчет манипулятора

В соответствии с техническим заданием создана кинематическая схема манипулятора (см. рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 — Кинематическая схема манипулятора

Параметры кинематической схемы в матричном представлении Денавита — Хартенберга приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Параметры Денавита — Хартенберга

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Звено |  |  |  |  |
| Звено 1 | 0 |  |  |  |
| Звено 2 |  | 0 |  |  |
| Звено 3 | 0 |  |  |  |
| Звено 4 | 0 | 0 | 0 |  |
| Схват | 0 | 0 |  | 0 |

## Статический и динамический расчет манипулятора

Исходными данными для анализа манипулятора являются выбранная кинематическая схема и заданная грузоподъёмность, равная 0,3 кг. Целью проведения расчёта является определение требований к моменту и мощности шарниров манипулятора, и как следствие, к мощности двигателя и моменту редуктора и двигателя для обоснования выбора конкретных компонентов.

Для определения искомых характеристик необходимо выполнить следующие действия:

* разработать предварительную статическую модель (массы, центры масс), в которой электромеханические компоненты, и, следовательно, массы отдельных звеньев заданы с избыточным запасом;
* выбрать конфигурацию максимального нагружения для каждого из шарниров манипулятора;
* определить статическую и динамическую нагрузку на шарниры в выбранной конфигурации.

Под конфигурацией манипулятора понимается вектор углов поворота его шарниров, а конфигурация максимального нагружения выбирается так, чтобы нагрузка на конкретный шарнир была максимально возможной, что для манипулятора рассматриваемой структуры допустимо выполнить без расчёта, на основе простого геометрического анализа.

### Энергокинематический расчет

Максимальная нагрузка будет при вытянутых звеньях (так как плечо приложения силы будет наибольшим), поэтому будем рассматривать момент, когда манипулятор вытянут на максимальную длину. В данном положении все центры масс звеньев, а также схвата и груза, находятся на одной прямой.

На рисунке 2.2 представлены все силы и моменты, действующие на манипулятор во время поворота двигателя в плечевом шарнире, где:

* Масса 1 звена **
* Масса 2 звена **
* Масса 3 звена **
* Масса груза 
* Масса схвата 
* Расстояние от поворотной оси до центра масс 2 звена 
* Расстояние от поворотной оси до центра масс 3 звена 
* Расстояние от поворотной оси до центра масс схвата 
* Расстояние от поворотной оси до центра масс груза 
*  — угловое ускорение плечевого шарнира;
*  — момент инерции 2 звена;
*  — момент инерции 3 звена;
* ** — момент инерции схвата (от англ. Grip — схват);
* ** — момент инерции груза (от англ. Load — нагрузка);
* **— момент, противодействующий опрокидыванию (от англ. Overturn — опрокидывание);
* *—* момент сил инерции механизма.



Рисунок 2.2 — Манипулятор с изображением приложенных сил и моментов

В соответствии с рисунком 2.2 момент, противодействующий опрокидыванию, и момент сил инерции механизма равны:





Из-за пренебрежимо малого плеча моментом инерции первого звена можно пренебречь.

Используя , найдем момент, противодействующий опрокидыванию:



Моменты инерции 2 и 3 звеньев и схвата относительно 2 шарнира найдем по теореме Штейнера, а момент инерции груза — как момент инерции материальной точки:









где  *—* моменты инерции 2 и 3 звеньев и схвата относительно их центров масс, взятые из массовых характеристик моделей SolidWorks, .

Найдем суммарный момент инерции относительно 1-го шарнира:



Теперь необходимо задаться законом движения. Для данного привода наиболее оптимальной для системы управления является трапецеидальная циклограмма с 20 % времени на разгон и 20 % времени на торможение. Циклограмма работы привода представлен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 — Циклограмма работы 2 привода

Согласно техническому заданию, средняя скорость вращения звеньев в радианах равна:



Возьмем угол поворота шарнира



Тогда время движения шарнира равно



Найдем время разгона и торможения:



Определим установившуюся скорость движения при трапецеидальной циклограмме (соотв. графику  на рисунке 2.3), приравняв площади под графиками  и :



Угловое ускорение, соответствующее трапецеидальной циклограмме, равно



Динамический момент в данной расчетной модели равен моменту сил инерции



Необходимый общий крутящий момент



Необходимая полезная мощность на выходе мотор-редуктора



Аналогичным образом рассчитаем пиковые момент и мощность остальных шарниров. Результаты расчетов представлены в сводной таблице 2.2.

Таблица 2.2 — Требуемые моменты и мощности шарниров

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Шарнир | Требования | |
| Мощность, Вт | Момент, |
| 1 | 1,64 | 3,01 |
| 2 | 1,88 | 3,45 |
| 3 | 0,84 | 1,54 |

### Выбор сервоприводов

В таблице 2.3 указаны сервоприводы, выбранные в соответствии с требуемыми моментами и мощностями шарниров.

Таблица 2.3 — Сервоприводы

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Шарнир | Сервопривод | Характеристики | |
| Мощность, Вт | Момент, |
| 1 | JMT TD-8135MG | 3,4 | 3,27 |
| 2 | Fan Model FS-38W | 12,7 | 3,80 |
| 3 | TD-8320MG | 3,0 | 1,72 |
| 4 | MG-90S | 0,7 | 0,22 |

# Конструкции шарниров

Корпуса шарниров будут изготовлены из ABS, валы и втулки будут изготовлены из сплава алюминия 1060.

Присоединительный и подшипниковый узлы изготавливаются из ABS, труба, соединяющая два узла, изготавливается из PC/ABS. Соединение узлов и трубы осуществляется при помощи цанговых зажимов, изготовленных из ABS.

Провода управления шарнирами и схватом проложены во внутренних полостях труб. Так как в местах переходов от одного звена к другому невозможно проложить внутри провода безопасно для них самих, то было решено сделать внешние разъёмы для проводов в присоединительном и подшипниковом узлах и соединить их при помощи внешней петли с запасом по длине, чтобы не ограничивать возможное вращение. Петля будет защищена гибкой защитной оплеткой из полиэстера.

## Конструкция опорно-поворотного устройства (ОПУ)

В сборку ОПУ входит сервопривод JMT TD-8135MG, который обеспечивает вращение. Сервопривод крепится к центрирующей детали при помощи четырех винтов М4×14 ГОСТ 11738–84. Крепление центрирующей детали к фланцу ОПУ осуществляется при помощи четырех винтов М3×25 ГОСТ 11738–84, центрирование производится по краю фланца при помощи выступающей части детали.

Характеристики сервопривода JMT TD-8135MG представлены далее:

Диапазон рабочих температур: -25°C — 70°C

Водонепроницаемость: нет

Диапазон влажности: 65% ± 10%

Размер: 40,0×20,5×40,5 мм

Вес: 56 г ± 5%

Предельный угол: 360°

Тип подшипника: 2BB

Длина соединительного провода: 320 мм ± 5 мм

Диапазон рабочих напряжений: 4,8 — 7,2 В

Скорость поворота на 60°: 0,32 — 0,22 с

Рабочий ток: 140 — 200 мА

Крутящий момент: 3,27 — 3,52 Нм

Метод управления: ШИМ

Диапазон ширины импульса: 500 — 2500 мкс

Угол поворота: 180° ± 3° (при 500 — 2500 мкс)

Ширина зоны нечувствительности: 5 мкс

На рисунке 3.1 представлена модель конструкции первого шарнира в опорно-поворотном устройстве в разрезе.

В конструкцию первого шарнира входит подшипниковый узел, состоящий из двух подшипников 1000905 2RS ГОСТ 8338–75, размещенный в подшипниковой чаше, данная конструкция используется для того, чтобы переносить на подшипники и, следовательно, на корпус внешние силы помимо вращающего момента. Подшипниковая чаша крепится к корпусу ОПУ при помощи шести винтов с потайной головкой М3×10 ГОСТ 17475–80.

В местах соединения «подшипниковая чаша — корпус», «фланец сервопривода — вал подшипникового узла» и «вал подшипникового узла — первое звено» предусмотрены центрирующие выступы. Фланец сервопривода крепится к валу подшипникового узла при помощи четырех винтов М3×8 ГОСТ 11738–84. Вал подшипникового узла крепится к корпусу первого шарнира при помощи четырех винтов с потайной головкой М3×12 ГОСТ 17475–80.

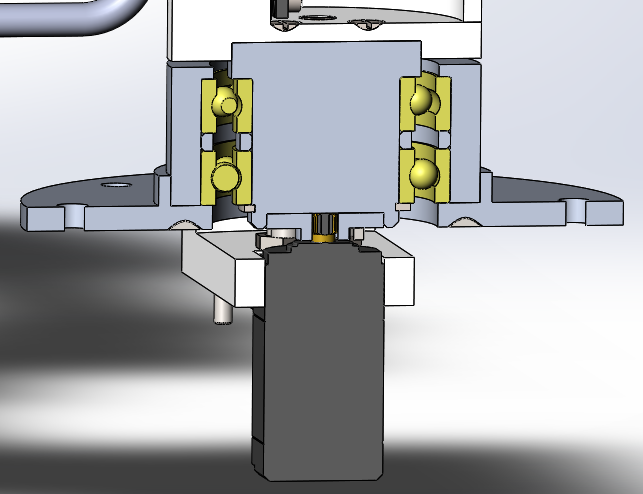


Рисунок 3.1 – Модель ОПУ в разрезе

Сборка опорно-поворотного устройства осуществляется в следующем порядке:

1. В подшипниковую чашу по порядку вставляются подшипник, втулки для внутреннего и внешнего колец подшипников, подшипник. Фиксирование подшипников в радиальном направлении осуществляется при помощи посадки внутренней поверхности подшипниковой чаши.
2. Подшипниковая чаша присоединяется к корпусу ОПУ. Центрирование осуществляется при помощи специального выступа на корпусе. Поджатие подшипников по внешнему контуру осуществляется с одной стороны выступом подшипниковой чаши, с другой — разницей диаметров отверстий подшипниковой чаши и корпуса ОПУ.
3. Вставляется вал подшипникового узла, используется наружное стопорное кольцо. Происходит фиксирование подшипников по внутреннему контуру при помощи наружного стопорного кольца и бурта на вале.
4. К валу подшипникового узла крепится фланец сервопривода. Центрирование происходит при помощи углубления в вале.
5. Сервопривод крепится к центрирующей детали.
6. Центрирующая деталь с сервоприводом крепится к корпусу ОПУ. Центрирование происходит при помощи выступа на центрирующей детали.
7. К валу подшипникового узла можно присоединять следующее звено. Центрирование будет происходить при помощи углубления в корпусе следующего звена.

## Конструкция второго шарнира

В сборку второго шарнира входит сервопривод Fan Model FS-38W, который обеспечивает вращение и крепится к корпусу при помощи четырех винтов М3×8 ГОСТ 11738–84.

Характеристики сервопривода Fan Model FS-38W представлены далее:

Диапазон рабочих температур: -20℃ ~ 60℃

Водонепроницаемость: да

Размер: 40×20×42 мм

Вес: 85 г

Предельный угол: 180° ± 10°

Тип подшипника: два шариковых подшипника

Длина соединительного провода: 320 мм

Диапазон рабочих напряжений: 4,8 — 7,4 В

Скорость поворота на 60°: 0,10 — 0,09 с

Рабочий ток: <500 мА

Крутящий момент: 3,80 — 4,00 Нм

Метод управления: ШИМ

Диапазон ширины импульса: 500 — 2500 мкс

Угол поворота: 90° (1000 — 2000 мкс)

Ширина зоны нечувствительности: 2 мкс

На рисунке 3.2 представлена модель конструкции второго шарнира в разрезе.

В конструкцию второго шарнира входит подшипниковый узел, состоящий из двух подшипников 1000905 2RS ГОСТ 8338–75, и размещенный в корпусе, выполненном по подобию подшипниковой чаши. Данная конструкция используется для того, чтобы переносить на подшипники и, следовательно, на корпус внешние силы помимо вращающего момента. Подшипники запираются при помощи крышки, которая крепится к корпусу шарнира при помощи винтов с потайной головкой М2×8 ГОСТ 17475–80.

В местах соединения «фланец сервопривода — вал подшипникового узла» и «вал подшипникового узла — второе звено» предусмотрены специальные центрирующие выступы. Крепление фланца к валу подшипникового узла происходит при помощи четырех винтов М3×8 ГОСТ 11738–84. Крепление вала подшипникового узла ко второму звену происходит при помощи четырех винтов М3×8 ГОСТ 11738–84.

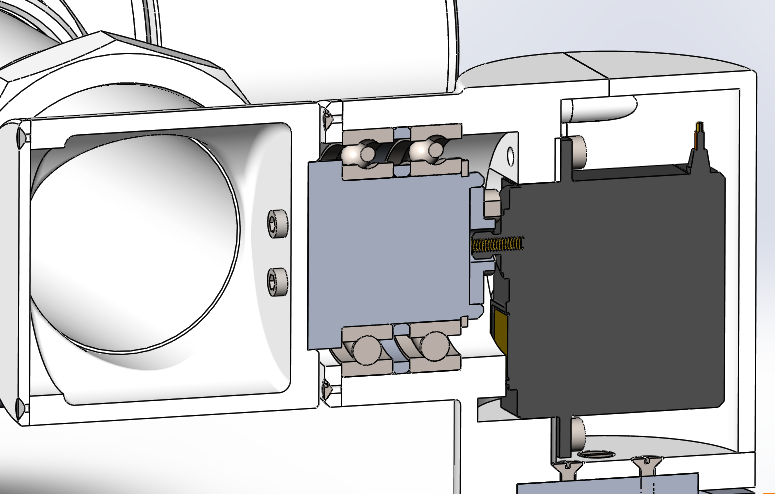


Рисунок 3.2 – Модель второго шарнира в разрезе

Сборка первого звена осуществляется в следующем порядке:

1. К валу подшипникового узла крепится фланец сервопривода. Центрирование осуществляется при помощи углубления в вале.
2. На вал подшипникового узла в следующем порядке одеваются подшипник, втулки для внутреннего и внешнего колец подшипников, подшипник. Устанавливается наружное стопорное кольцо. Происходит фиксирование внутренних колец подшипников с одной стороны при помощи бурта, с другой — стопорным кольцом.
3. Данная конструкция вставляется в соответствующее отверстие корпуса первого звена.
4. Запирается при помощи крышки. Происходит фиксирование крышкой внешних колец подшипников с одной стороны, буртом — с другой
5. К корпусу крепится сервопривод.
6. К валу подшипникового узла можно присоединять следующее звено. Центрирование будет происходить при помощи углубления в корпусе присоединительного узла следующего звена.

## Конструкция третьего шарнира

На рисунке 3.3 представлена модель конструкция третьего шарнира в разрезе.

В конструкцию третьего шарнира входит сервопривод TD-8320MG, который обеспечивает вращение, и крепится к корпусу при помощи четырех винтов М3×8 ГОСТ 11738–84.

Характеристики сервопривода TD-8320MG представлены далее:

Диапазон рабочих температур: -20°C — 60°C

Водонепроницаемость: да

Размер: 40,6×20,4×39,0 мм

Вес: 60 г ± 5%

Предельный угол: 360°

Тип подшипника: 2 шариковых подшипника

Диапазон рабочих напряжений: 4,8 — 6,6 В

Скорость поворота на 60°: 0,19 — 0,17 с

Крутящий момент: 1,72 — 2,05 Нм

Метод управления: ШИМ

В конструкции второго звена предусмотрена деталь, которая будет удерживать сервопривод от вращения, и прикреплена к корпусу теми же болтами, что и крышка справа на рисунке 3.3.

В шарнире используется подшипниковый узел, состоящий из двух подшипников 1000905 2RS ГОСТ 8338–75, и размещенный в корпусе, выполненном по подобию подшипниковой чаши, данная конструкция используется для того, чтобы переносить на подшипники и, следовательно, на корпус внешние силы помимо вращающего момента. Подшипники запираются при помощи крышки, которая крепится к корпусу шарнира при помощи винтов с потайной головкой М2×8 ГОСТ 17475–80.

В местах соединения «фланец сервопривода — вал подшипникового узла» и «вал подшипникового узла — третье звено» предусмотрены специальные центрирующие выступы. Крепление фланца к валу подшипникового узла происходит при помощи четырех винтов М3×8 ГОСТ 11738–84. Крепление вала подшипникового узла ко второму звену происходит при помощи четырех винтов М3×8 ГОСТ 11738–84.

На рисунке 3.3 также видны разъемы для внешней петли, чтобы перекидывать провода управления сервоприводами и схватом из второго звена в третье.

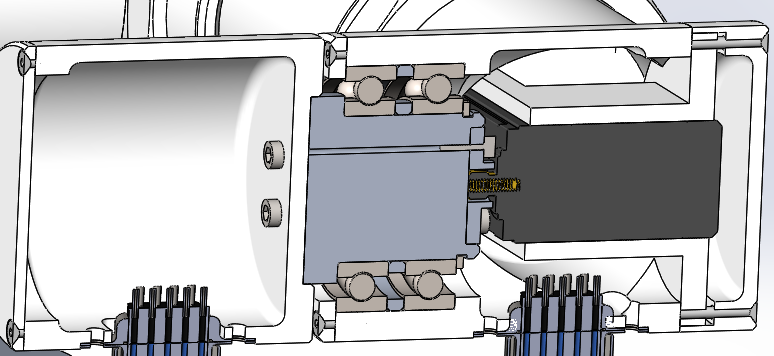


Рисунок 3.3 – Модель третьего шарнира в разрезе

Сборка подшипникового узла второго звена осуществляется в следующем порядке:

1. К валу подшипникового узла крепится фланец сервопривода. Центрирование осуществляется при помощи углубления в вале.
2. На вал подшипникового узла в следующем порядке одеваются подшипник, втулки для внутреннего и внешнего колец подшипников, подшипник. Устанавливается наружное стопорное кольцо. Происходит фиксирование внутренних колец подшипников с одной стороны при помощи бурта, с другой — стопорным кольцом.
3. Данная конструкция вставляется в соответствующее отверстие корпуса первого звена.
4. Запирается при помощи крышки. Происходит фиксирование крышкой внешних колец подшипников с одной стороны, буртом — с другой.
5. К корпусу крепится сервопривод, со специальной антиповоротной деталью.
6. К валу подшипникового узла можно присоединять следующее звено. Центрирование будет происходить при помощи углубления в корпусе присоединительного узла следующего звена.

## Конструкция четвертого шарнира

В сборку четвертого шарнира входит сервопривод MG-90S, который обеспечивает вращение. Крепление сервопривода к корпусу осуществляется при помощи четырех винтов М1.6×10 DIN 921 с гайками М1.6 ГОСТ 5927–70.

Характеристики сервопривода MG-90S представлены далее:

Диапазон рабочих температур: -30°C — 60°C

Размер: 23,0×12,2×29,0 мм

Вес: 13,4 г ± 5%

Предельный угол: 180°

Диапазон рабочих напряжений: 4,8 — 6,0 В

Скорость поворота на 60°: 0,11 — 0,10 с

Крутящий момент: 0,18 — 0,25 Нм

На рисунке 3.4 представлена модель конструкции четвертого шарнира в разрезе.

В конструкцию четвертого шарнира входит подшипниковый узел, состоящий из двух подшипников 1000803 2RS ГОСТ 8338–75, и размещенный в корпусе, выполненном по подобию подшипниковой чаши, данная конструкция используется для того, чтобы переносить на подшипники и, следовательно, на корпус внешние силы помимо вращающего момента. Подшипники запираются при помощи крышки, которая крепится к корпусу шарнира при помощи винтов с потайной головкой М2×8 ГОСТ 17475–80, и которая центрируется с корпусом с помощью выступа на крышке.

В местах соединения «фланец сервопривода — вал подшипникового узла» предусмотренный специальный центрирующий выступ. Соединение фланца с валом подшипникового узла осуществляется при помощи четырех болтов с неполной резьбой М2×16×10 ГОСТ 7805–70.

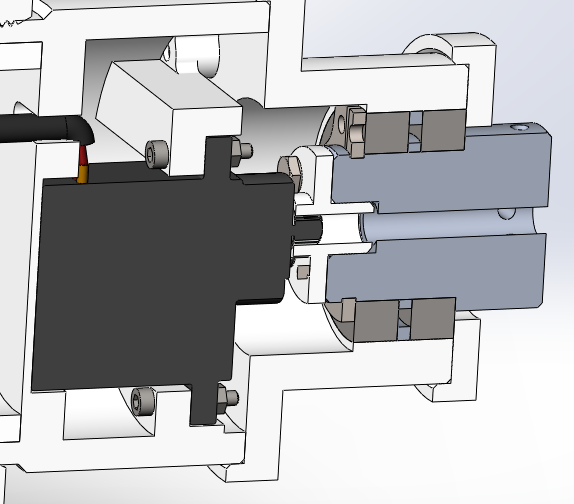


Рисунок 3.4 – Модель четвертого шарнира в разрезе

Сборка подшипникового узла третьего звена осуществляется в следующем порядке:

1. Происходит установка сервопривода в корпус узла.
2. К валу подшипникового узла крепится фланец сервопривода. Центрирование осуществляется при помощи выступа на фланце и углубления в вале.
3. На вал подшипникового узла в следующем порядке одеваются подшипник, втулки для внутреннего и внешнего колец подшипников, подшипник. Устанавливается наружное стопорное кольцо. Происходит фиксирование внутренних колец подшипников с одной стороны при помощи бурта, с другой — стопорным кольцом.
4. Данная конструкция вставляется в подшипниковую чашу.
5. Запирается при помощи крышки. Центрирование происходит при помощи выступа на крышке. Происходит фиксирование крышкой внешних колец подшипников с одной стороны, с другой — выступом подшипниковой чаши.
6. Подшипниковая чаша присоединяется к корпусу узла. Центрирование происходит при помощи выступа на чаше.
7. К валу подшипникового узла можно присоединять схват. Центрирование будет происходить по внешнему диаметру вала.

# Соединение с остальными частями робота

## Соединение с платформой

На рисунке 4.1 представлено соединение «платформа — манипулятор». Присоединение осуществляется в ответное отверстие платформы. Закрепление частей осуществляется при помощи шести болтов БОЛТ.

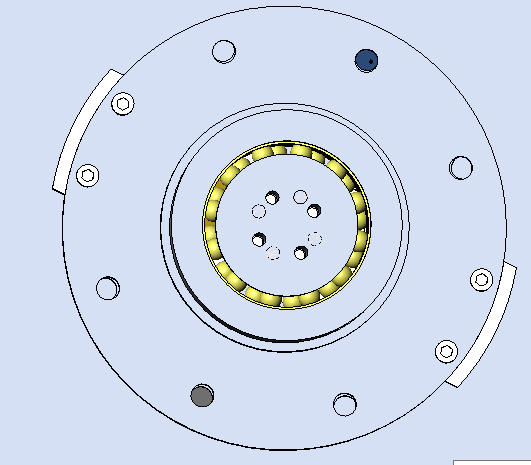


Рисунок 4.1 – Соединение «платформа — манипулятор»

## Соединение с захватным устройством

На рисунке 4.2 представлено соединение манипулятор — схват. Присоединение осуществляется на вал ответной части схвата. Закрепление частей осуществляется при помощи четырех болтов БОЛТ.



Рисунок 4.2 – Соединение манипулятор — схват

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы являлось сконструировать три шарнира манипулятора. В ходе выполнения работы была разработана электрическая и кинематическая схема манипулятора. Был проведён статический и динамический расчёт для определения максимальной мощности и момента для каждого шарнира. На основе полученных данных произведён подбор сервоприводов. Также было продумано крепление манипулятора к опорно-поворотному и захватному устройству.

Окончательным результатом проделанной работы является модель манипулятора в SolidWorks.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ