

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

Исследование характеристик робота-манипулятора

Электронное методическое пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка образовательных контентов в рамках мастер-класса по внедрению и использованию СЭДО в реальном учебном процессе»
Соглашение № 1/27 от 03 июня 2013 г.

САМАРА
2013

УДК 621.6-52

И 889

Составители: **Илюхин Владимир Николаевич, Грешняков Павел Иванович, Рыбальченко Максим Дмитриевич**

Рецензент: Михеев В.А., д.т.н., профессор кафедры ОМД

Компьютерная верстка: Гаврилова

Доверстка: Кошелев

Исследование характеристик робота-манипулятора [Электронный ресурс]: электрон. метод. пособие / М-во образования России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им.С. П. Королева (нац.исслед. ун-т); сост. В.Н. Илюхин, М.Д. Рыбальченко, П.И. Грешняков -Электрон. текстовые и граф. дан. (6,3 Мбайт). - Самара, 2013. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Электронное методическое пособие является учебно-теоретическим изданием, необходимым при выполнении студентами лабораторной работы, по специальности 150802.65 Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика (семестр 8) и по направлениям 151000.62 Технологические машины и оборудование (6 семестр), 141100.62 Энергетическое машиностроение (6 семестр), 150700.62 Машиностроение, 220700.62 "Автоматизация технологических процессов и производств" (6 семестр), и магистрантов по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов» (семестр А) Методические указания целесообразно использовать при изучении дисциплины «Основы мехатроники». В лабораторной работе студентам предлагается выполнить ряд заданий, применяя знания, полученные в ряде предшествующих дисциплин. Выполнение данной лабораторной работы позволит студентам освоить промышленное оборудование, его компоновку, настройку и программирование с целью автоматизации производственных процессов.

Разработано на кафедре на кафедре АСЭУ.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

Содержание

| | |
|--|----|
| ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ | 4 |
| Введение | 5 |
| 1 Модуль «Робот-Манипулятор | 6 |
| 2 Типы робототехники DENSO | 8 |
| 2.1 Шестиосевые роботы DENSO | 8 |
| 2.2 Характеристики робототехники DENSO | 11 |
| 2.3 Спецификация робота | 13 |
| 3 Механика электромеханических роботов | 15 |
| 3.1 Уравнения кинематики исполнительного устройства робота | 15 |
| 3.2 Кинетостатический расчет исполнительного устройства робота | 17 |
| 3.3 Определение линейных скоростей и ускорений точек звеньев | 20 |
| 3.4 Уравнения Лагранжа 2-го рода | 20 |
| 3.5 Уравнения движения исполнительного устройства | 21 |
| 4 Моделирование системы манипулятора в программных комплексах MATLAB Simulink и AMESim | 22 |
| 4.1 Математический анализ объекта | 22 |
| 4.2 Моделирование объекта в программе Simulink Version 5.0 (R13) | 25 |
| 4.3 Математический анализ объекта в программе AMESim | 27 |
| 4.4 Сравнение результатов , полученных с использованием различного ПО | 28 |
| 5 Программирование манипулятора | 29 |
| Выводы | 35 |
| Список литературы | 36 |
| Приложение А | 37 |

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ПР- промышленный робот

ЛСК – локальная система координат

БСК – базовая система координат

ХРТ – характеристическая рабочая точка

Введение.

Гибкая производственная линия имитирует различные производственные процессы и представляет собой законченный вариант автоматизированной производственной линии, на которой возможны перемещение, сортировка, контроль качества, имитация сверления и штамповки заготовок различного материала и цвета.

Данный учебный стенд состоит шести отдельных программно-аппаратных модулей, взаимодействующих между собой в режиме реального времени. Для каждого отдельного модуля в рамках лабораторной работы предусмотрены несколько задач различной сложности, рассчитанные на три уровня подготовленности студента.

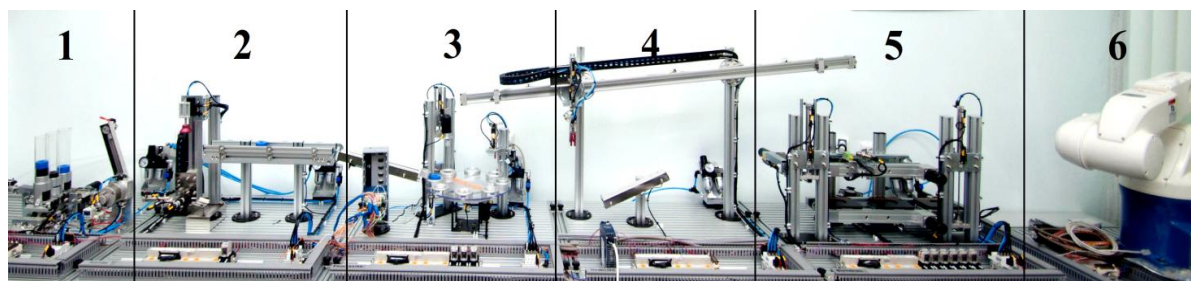


Рисунок 1 - Внешний вид гибкой производственной линии

- 1 – Модуль «Распределение» («Distribution»)
- 2 – Модуль «Проверка» («Testing»)
- 3 – Модуль «Обработка» («Processing»)
- 4 – Модуль «Манипулирование» («Handling»)
- 5 – Модуль «Буферизация» («Buffering»)
- 6 – Модуль «Робот-Манипулятор» («Robot Assembly»)

1 Модуль «Робот-Манипулятор» («Robot Assembly»)

Шестой модуль имитирует распределение готовой продукции в зависимости от ее типа.

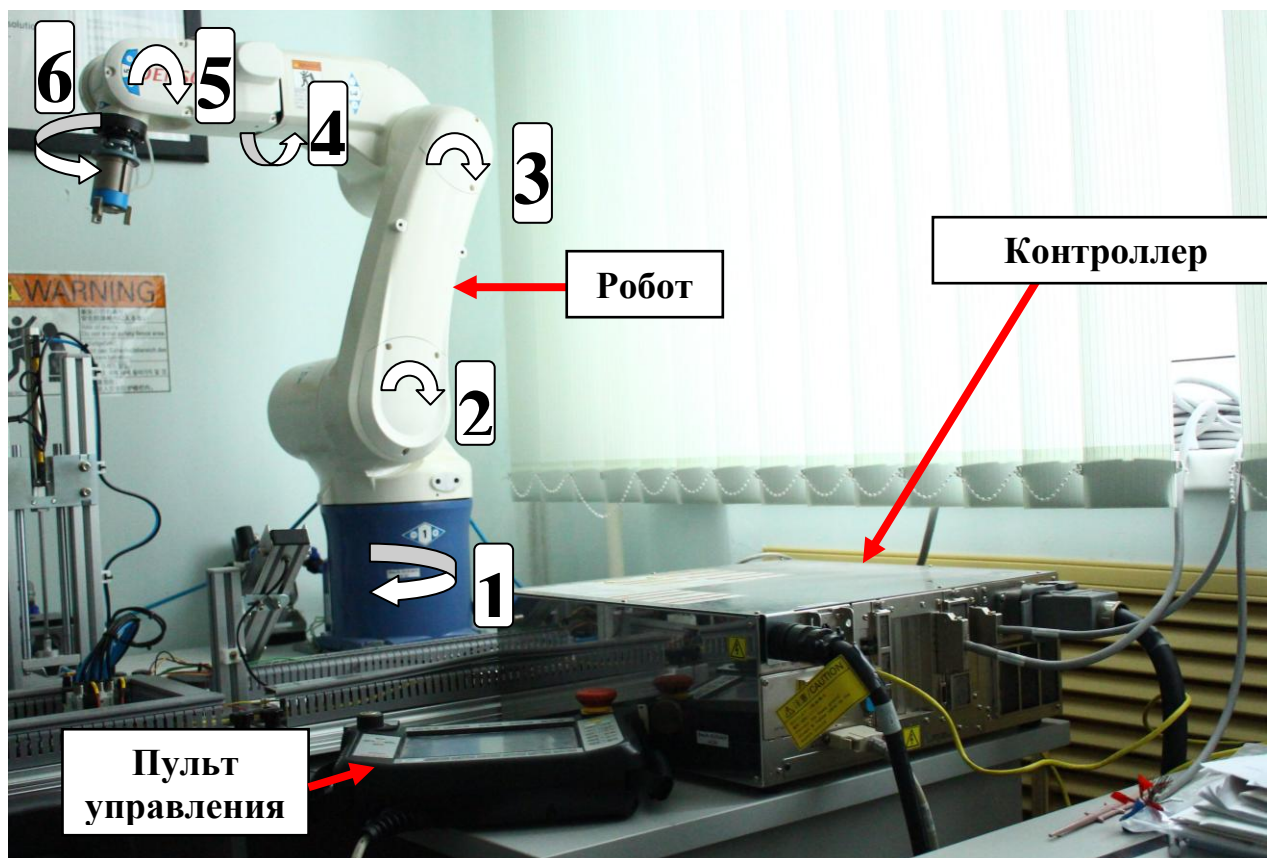


Рисунок 2 - Внешний вид модуля «Робот-Манипулятор»

Программа работы модуля состоит в следующем:

1. Приведение руки в исходное положение.
2. Ожидание сигнала о готовности с предыдущего модуля.
3. Захват детали.
4. Перенос детали на склад, соответствующий её типу.
5. Повторение цикла.

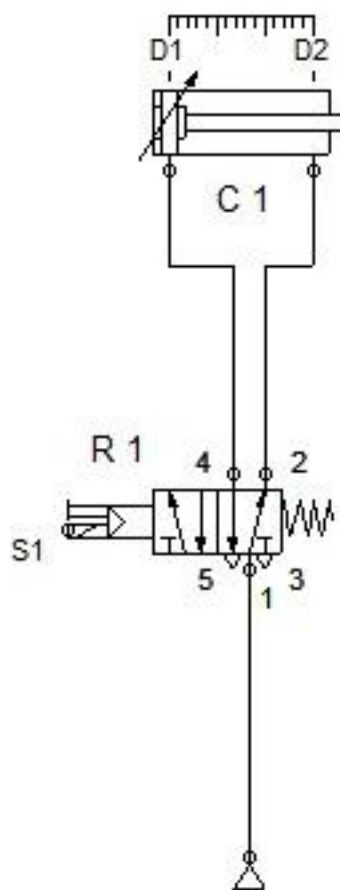


Рисунок 3 - Пневматическая схема модуля «Робот-Манипулятор»

Таблица 1 - Датчики модуля «Робот-Манипулятор»

| № п/п | Тип датчика | Расположение датчика |
|-------|----------------------------------|--------------------------|
| 1 | Фотодатчик F1 | Датчик заполнения склада |
| 2 | Магнитоконтактный (геркон) D1 | Захват |
| 3 | Магнитоконтактный (геркон) D2 | Захват |

Блок-схема работы модуля «Робот-Манипулятор» приведена в Приложении А.

2 Типы робототехники DENSO

DENSO предлагает широкий выбор роботов, каждый со своими сферами применения и преимуществами.

2.1 Шестиосевые роботы DENSO

Гамма шестиосевых роботов DENSO включает в себя серии VP, VS, VM, а также новые модели DENSO VS с короткой и длинной рукой.

Эти роботы обеспечивают большую гибкость и улучшенные эксплуатационные показатели по сравнению с четырехосевыми аналогами. Благодаря увеличенному размаху движения они обладают более широким диапазоном применений без ущерба для скорости и точности. Шестиосевые роботы DENSO обладают лучшими в этой отрасли спецификациями.

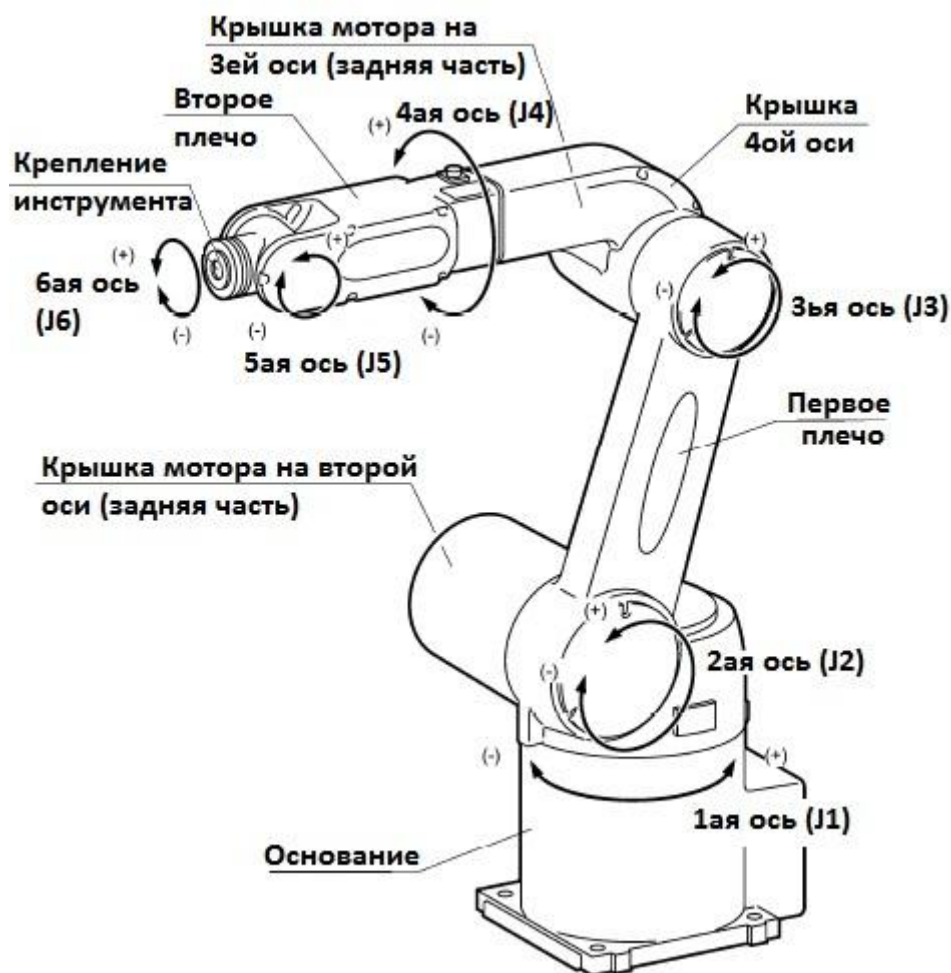


Рисунок 4 – Шестиосевой манипулятор DENSO

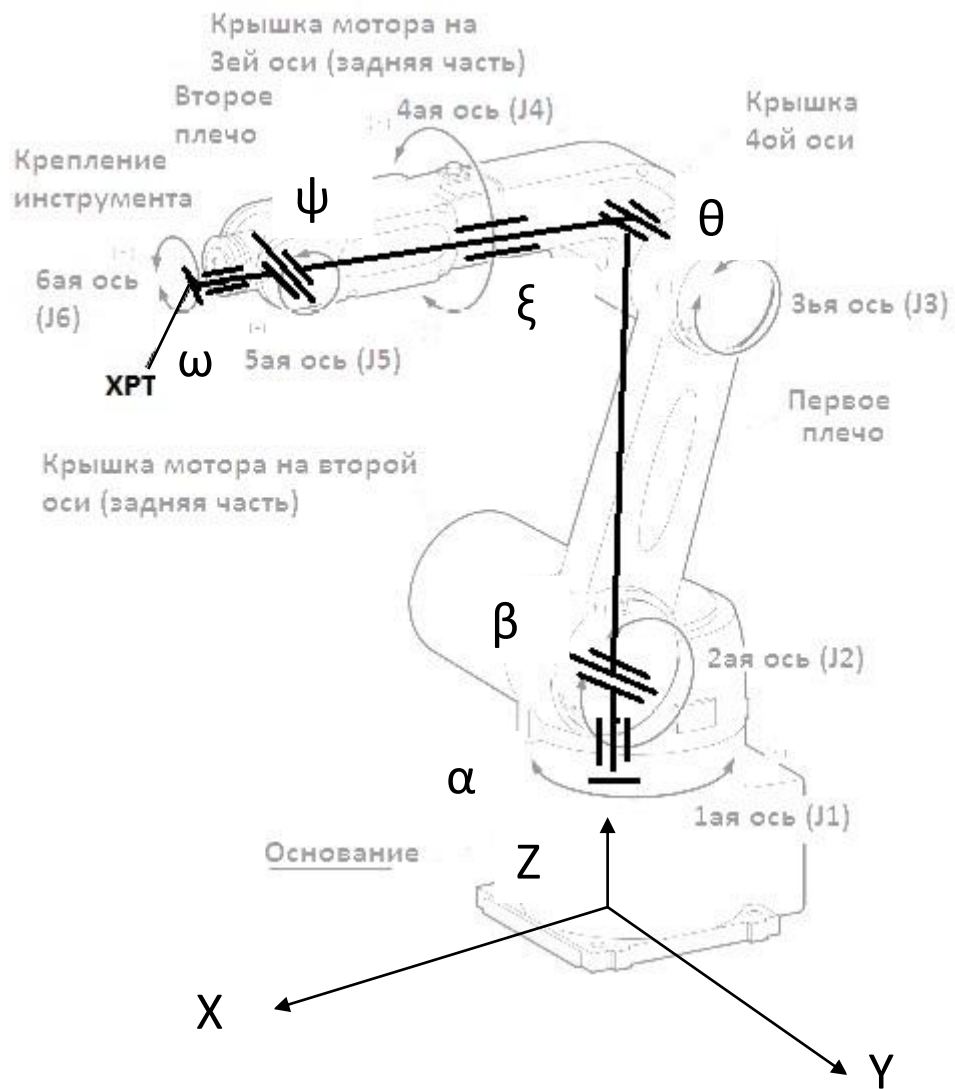


Рисунок 5 – Шестиосевой манипулятор DENSO (схематично)

(9) VS-6577G-B (With brakes)

Workable space defined by point P

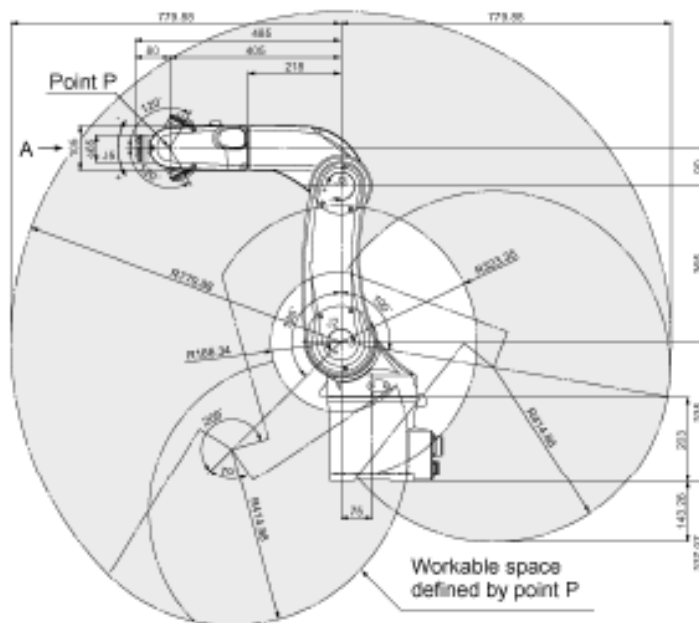
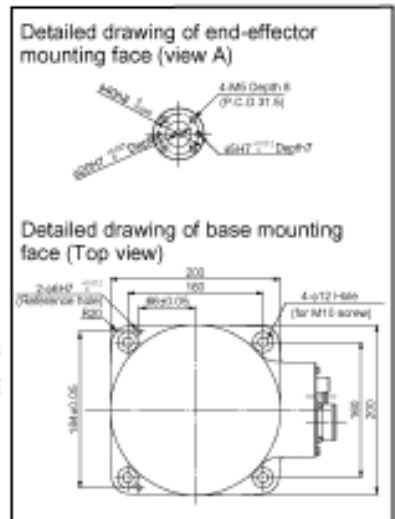
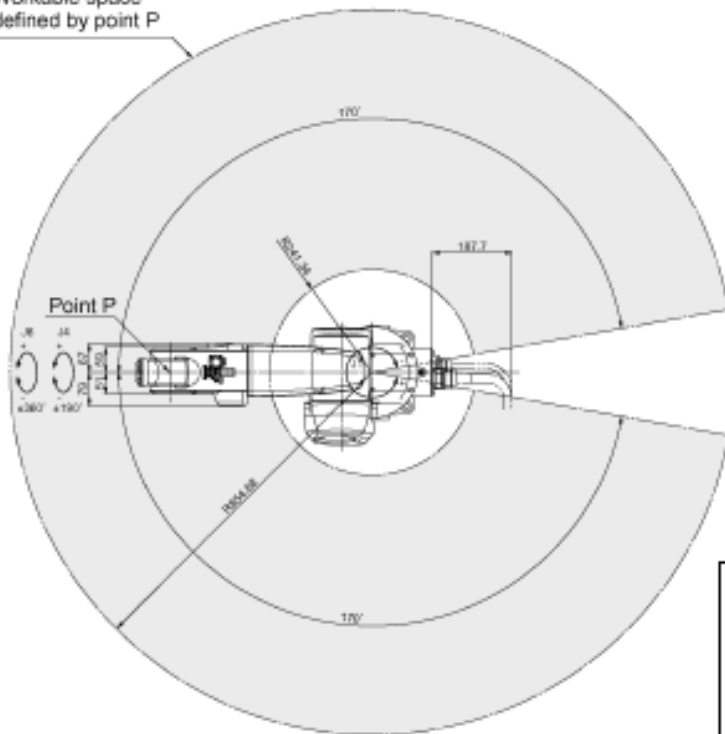


Рисунок 6 – Рабочее пространство робота

Таблица 2 - Основные характеристики:

| | |
|---|-------------------------------------|
| Период цикла | от 0.99 до 0.33 секунды |
| Постоянная точность | между ± 0.07 мм и ± 0.02 мм |
| Максимальная суммарная скорость | от 3 900 мм/сек до 11 000 мм/сек |
| Длина руки | между 430 мм и 1298 мм |
| Грузоподъемность | до 10 кг |
| Для максимальной эффективности в ограниченных пространствах все модели включают внутреннюю проводку и воздухопровод | |

Новые шестиосевые роботы серии VS отличаются исключительными показателями:

- Скорость (до 11 000 мм/сек)
- Точность (± 0.03 мм и ± 0.02 мм)
- Универсальность (устанавливаются на полу, потолке и стенах)
- Исключительно узкая и компактная конструкция позволяет экономить установочное пространство
- Возможность расположить двигатель и кабель подключения энкодера под основанием робота
- Грузоподъемность до 7 кг обеспечивает максимально возможные эксплуатационные показатели

2.2 Характеристики робототехники DENSO

Кроме экономичности и простоты в эксплуатации, еще одним преимуществом этих роботов является то, что у них всего один тип контролера для всех моделей.

Роботы DENSO были разработаны для эксплуатации практически в любых условиях, включая пыль, влагу или сложные условия эксплуатации.

Классификация уровней защиты роботов:

- Стандартный
- Защищенный от пыли и брызг (IP65)

- Защищенный (IP67)
- Чистые комнаты класса 10 и 100
- Устойчивый к H₂O₂ (перекись водорода; обычно используется для стерилизации в фармацевтике и медицине)
- Спецификации UL (для США и Канады)

Для простоты все контролеры роботов DENSO имеют стандартное подсоединение к сети Ethernet для подключения к другому устройству, как, например, ПЛК или промышленному компьютеру.

Гибкий выбор различных методов ввода инструкций в робототехнику DENSO включает в себя следующее:

- **Сенсорный экран подвесного пульта обучения DENSO**
- **WINCAPS III**

Собственное программное обеспечение DENSO для автономного программирования, мониторинга и моделирования.

- **ORiN2**

Инновационное промежуточное программное обеспечение позволяет использовать существующие языки высокого уровня, такие как C++, C#, Visual Basic и Java для программирования роботов DENSO, что избавляет от необходимости учить язык программирования каждого нового робота.

2.3 Спецификация работа

Таблица 3 - Спецификация

| Компонент | Спецификация | |
|--|--|-----------------------------------|
| | Стандартный тип (VM) | Защищенный от пыли и брызг (VM-W) |
| Номер робототехнического комплекса (Примечание 1) | VM-6083G | VM-6083GW |
| Серийный номер робота | VM-6083D/GM | VM-6083D/GM-W |
| Полная длина руки | 385(первое плечо)+445(второе плечо)=830 мм | |
| Смещения руки | J1(сдвиг):180мм, J3 (переднее плечо): 100мм. | |
| Максимальное рабочее пространство | R=1,111 мм (посадочное место рабочего органа) R=1,021 мм (Позиция P: оси J4, J5, J6 в центре) | |
| Диапазон перемещения | J1: $\pm 170^\circ$, J2: $+135^\circ$, -90° , J3: $+165^\circ$, -80° J4: $\pm 185^\circ$, J5: $\pm 120^\circ$, J6: $\pm 360^\circ$ | |
| Максимальная грузоподъемность | 10 кг | |
| Максимальная составная скорость | 8300 мм/с (в центре посадочного места рабочего органа) | |
| Точность позиционирования (Примечание 2) | В каждом из направлений, X,Y,Z: $\pm 0,05$ мм (в центре посадочного места рабочего органа) | |
| Максимально допустимый момент инерции | Вокруг J4 и J5: $0,36 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ Вокруг J6: $0,064 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ | |
| Измерение положения | Абсолютный датчик положения | |
| Привод мотора и тормоза | АС сервомоторы для всех узлов Наличие тормозов в узлах от J2 до J6 | |
| Пользовательские пневмопровода (Примечание 3) | 7 систем(ф 4x6, ф 6x1) Содержит 3 электромагнитных клапана (двух позиционные, бистабильные) | |

| | | | |
|--|--------------------------------|---|-----------------------------------|
| Пользовательская сигнальная линия | | 10 (для приближенных сигналов с датчика и т.д.) | |
| Источник воздуха | Рабочее давление | 0,10 ~ 0,39 МПа | |
| | Масимально допустимое давление | 0,49 МПа | |
| Воздушный шум (уровень взвешенного эквивалентного продолжительного звукового давления) | | 80 дБ или меньше | |
| Степень защиты | | IP40 | IP54 (Рука: IP65) |
| Вес | | Приблизительно 82 кг (180 фунтов) | Приблизительно 86 кг (189 фунтов) |
| <p>Примечание 1: Номер робототехнического комплекса является к серийным номером всего комплекса включая работа и контроллер.</p> <p>Примечание 2: Точность позиционирования указывается для постоянного диапазона рабочих температур</p> <p>Примечание 3: Только пневматическая система ф 4х6 может управляться с помощью встроенных электромагнитных клапанов</p> | | | |

3 Механика электромеханических роботов

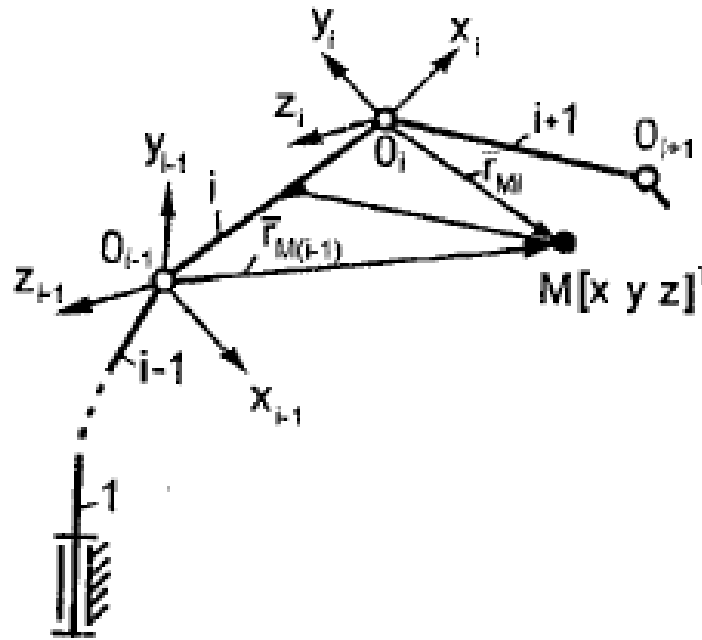


Рисунок 7 – Положение звеньев робота

3.1 Уравнения кинематики исполнительного устройства робота

Уравнения кинематики исполнительного устройства робота устанавливают связь между взаимным положением звеньев исполнительного устройства, их линейными и угловыми скоростями и ускорениями как в относительном, так и в абсолютном движении и обобщенными координатами обобщенными скоростями и обобщенными ускорениями ... ,

Соотношения между координатами центра рабочего органа и обобщенными координатами можно записать в виде:

$$\text{в системе декартовых координат: } \bar{r}_0 = A_N \cdot (q_1, \dots, q_N) \bar{r}_N + \bar{b}_N \cdot (q_1, \dots, q_N),$$

$$\text{в системе однородных координат: } \bar{r}_0 = B_N \cdot (q_1, \dots, q_N) \bar{r}_N, \text{ где:}$$

$$A_N(q_1, \dots, q_N) = \prod_{j=1}^N A_{j-1,j}(q_j),$$

$$\bar{r}_0 = A_N \cdot (q_1, \dots, q_N) \bar{r}_N + b_N \cdot (q_1, \dots, q_N),$$

$$\bar{b}_N = \sum_{j=1}^N A_1(q_1) \dots A_{j-1}(q_{j-1}) \bar{b}_j(q_j),$$

$$B_N(q_1, \dots, q_N) = \prod_{j=1}^N A_{j-1,j} \cdot (q_j).$$

Эти уравнения и представляют собой векторные уравнения кинематики исполнительного устройства робота, определяющие положение и ориентацию рабочего органа в пространстве.

в дальнейших расчетах будем пользоваться только системой однородных координат.

В системе однородных координат положение и ориентацию рабочего органа полностью определяет матрица B_N :

$$B_N = \prod_{j=1}^N A_{j-1,j} = \begin{bmatrix} \cos(x_N \wedge x_0) & \cos(y_N \wedge x_0) & \cos(z_N \wedge x_0) & b_1 \\ \cos(x_N \wedge y_0) & \cos(y_N \wedge y_0) & \cos(z_N \wedge y_0) & b_2 \\ \cos(x_N \wedge z_0) & \cos(y_N \wedge z_0) & \cos(z_N \wedge z_0) & b_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

где матрица 3×3 представляет собой матрицу направляющих косинусов, т.е. косинусов углов между соответствующими осями БСК и ЛСК рабочего органа.

Например, $\cos(y_N \wedge z_0)$ — угол между осью Z_0 БСК и осью Y_N ЛСК рабочего органа.

Вектор начала 0 ЛСК рабочего органа записывают в виде

$\bar{r}_N = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$. Тогда положение ХРТ рабочего органа в БСК может быть определено радиус-вектором:

$$\bar{r}_0 = B_N \cdot \bar{r}_N = B_N \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ 1 \end{bmatrix},$$

где $\bar{r}_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0 \ 1]^T$ — радиус-вектор ХРТ в БСК; $X_0 \ Y_0 \ Z_0$ проекции вектора r_0 на оси БСК O_0X_0, O_0Y_0, O_0Z_0 соответственно.

Тогда положение оси Z_N относительно осей БСК можно записать в виде:

$$\bar{n}_N = B_N \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(z_N \wedge x_0) \\ \cos(z_N \wedge y_0) \\ \cos(z_N \wedge z_0) \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $\bar{n}_N = [n_{N_x} \ n_{N_y} \ n_{N_z} \ 0]^T$ - вектор ориентации оси Z_N относительно осей БСК.

Положение оси X_N относительно осей БСК определяют вектором:

$$\bar{m}_N = B_N \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(x_N \wedge x_0) \\ \cos(x_N \wedge y_0) \\ \cos(x_N \wedge z_0) \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $\bar{m}_N = [m_{N_x} \ m_{N_y} \ m_{N_z} \ 0]^T$ — вектор ориентации оси X_N относительно осей БСК.

Векторы r_0, n_N, m_N полностью определяют положение и ориентацию рабочего органа в пространстве.

3.2 Кинестатический расчет исполнительного устройства робота

Кинестатический расчет исполнительного устройства робота заключается в определении реактивных сил и моментов в кинематических

парах при известных внешних нагрузках и инерционных силах и моментах. При решении задач кинестатики используют принцип Даламбера.

Реактивные силы и моменты в кинематических парах относятся к категории внутренних по отношению к исполнительному устройству в целом; по отношению к каждому звену в отдельности они являются внешними. Знание усилий в кинематических парах необходимо для расчетов звеньев исполнительного устройства на прочность, жесткость, виброустойчивость, износостойкость, для расчетов подшипников на долговечность, а также для выбора двигателя.

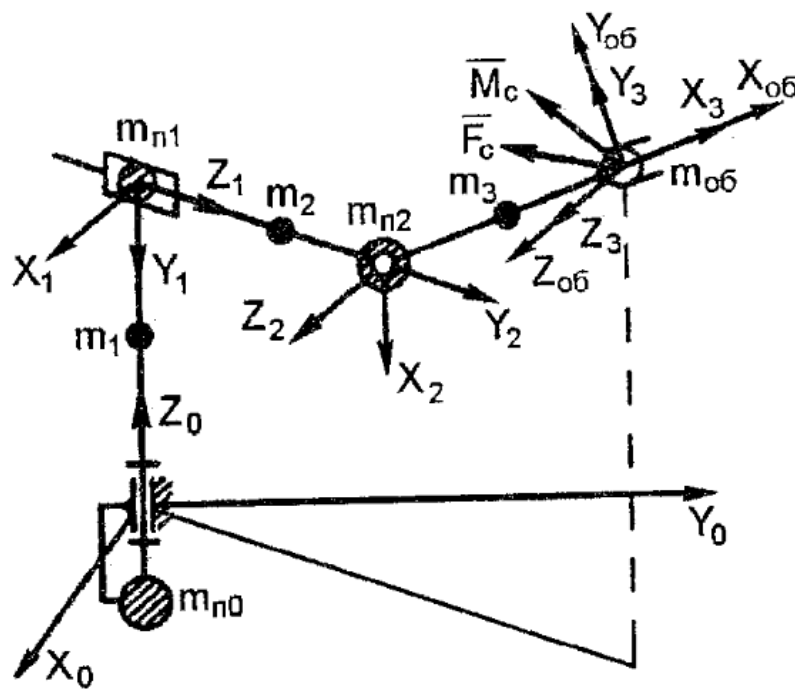


Рисунок 8 - Кинестатическая схема манипулятора

Выражения главного вектора \bar{F} внешних сил и главного момента \bar{M} действующих на это звено:

$$\begin{cases} \bar{F}_i = \bar{R}_{i-1,i} + \sum_{j=1}^n \bar{F}_{ij} + \sum_{j=1}^n \bar{\phi}_{ij} = 0 \\ \bar{M}_i = \bar{M}_{i-1,i} + \bar{M}_{i-1,j}^R + \sum_{j=1}^n \bar{M}_{i,j}^F + \sum_{j=1}^n \bar{M}_{i,j}^\phi + \sum_{j=1}^n \bar{M}_{i,j}^H = 0 \end{cases}$$

где n — число соответствующих силовых факторов, действующих на i -е звено; $R_{i-1,i}$ — главный вектор реактивных сил в k -ой кинематической паре, соединяющей $(i-1)$ -е и i -е звенья.

Таким образом в k -й поступательной кинематической паре главный вектор реактивных сил и главный вектор реактивных моментов будут равны:

$$R_{i-1,i}^k = \begin{bmatrix} R_{i-1,i}^{kx} \\ R_{i-1,i}^{ky} \\ R_{i-1,i}^{kz} + F_{i-1,i}^{kz} \end{bmatrix} = L_{oi}^T \begin{bmatrix} R_{i-1,i}^x \\ R_{i-1,i}^y \\ R_{i-1,i}^z \end{bmatrix}$$

$$M_{i-1,i}^k = \begin{bmatrix} M_{i-1,i}^{kx} \\ M_{i-1,i}^{ky} \\ M_{i-1,i}^{kz} \end{bmatrix} = L_{oi}^T \begin{bmatrix} M_{i-1,i}^x \\ M_{i-1,i}^y \\ M_{i-1,i}^z \end{bmatrix}$$

В k -й вращательной кинематической паре:

$$R_{i-1,i}^k = \begin{bmatrix} R_{i-1,i}^{kx} \\ R_{i-1,i}^{ky} \\ R_{i-1,i}^{kz} \end{bmatrix} = L_{oi}^T \begin{bmatrix} R_{i-1,i}^x \\ R_{i-1,i}^y \\ R_{i-1,i}^z \end{bmatrix}$$

$$M_{i-1,i}^k = \begin{bmatrix} M_{i-1,i}^{kx} \\ M_{i-1,i}^{ky} \\ M_{i-1,i}^{kz} + T_{i-1,i}^{kz} \end{bmatrix} = L_{oi}^T \begin{bmatrix} M_{i-1,i}^x \\ M_{i-1,i}^y \\ M_{i-1,i}^z \end{bmatrix}$$

Для нахождения реактивных сил и моментов во всех кинематических парах исполнительного устройства робота необходимо рассмотреть равновесие каждого его подвижного звена, начиная с последнего n -го.

3.3 Определение линейных скоростей и ускорений точек звеньев

В БСК положение точки М i-го звена:

$$\bar{r}_M = B_i \cdot \bar{r}_{i,M}$$

После дифференцирования найдем линейную скорость точки М i-го звена в БСК:

$$\bar{v}_M = \frac{d\bar{r}_M}{dt} = \frac{dB_i}{dt} \bar{r}_{i,M} = \sum_{j=1}^i B_i^j \cdot \bar{r}_{i,M} \cdot \dot{q}_j$$

Линейное уравнение точки М i-го звена определим, дифференцируя выражение:

$$\bar{a}_{i-1,M} = \frac{d\bar{v}_{i-1,M}}{dt} = D_i A_{i-1,i} \bar{r}_{i,M} \ddot{q}_i + D_i^2 A_{i-1,i} \bar{r}_{i,M} \dot{q}_i^2$$

В БСК линейное уравнение точки М i-го звена определим, дифференцируя выражение для линейной скорости:

$$\bar{a}_M = \frac{d\bar{v}_M}{dt} = \sum_{j=1}^i \frac{dB_i^j}{dt} \bar{r}_{i,M} \cdot \dot{q}_j + \sum_{j=1}^i B_i^j \cdot \bar{r}_{i,M} \frac{d\dot{q}_j}{dt} = \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i B_i^{jk} \cdot \bar{r}_{i,M} \cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k + \sum_{j=1}^i B_i^j \cdot \bar{r}_{i,M} \cdot \ddot{q}_j$$

Если точка М совпадает с центром i-й кинематической пары или с характеристической рабочей точкой Р, то:

$$\bar{r}_{iM} = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

3.4 Уравнения Лагранжа 2-го рода

Для описания динамики исполнительного устройства робота наиболее часто используют уравнения Лагранжа 2-го рода

Кинетическая энергия всего исполнительного устройства равна:

$$T = \sum_{i=1}^N T_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N tr(\dot{B}_i H_i \dot{B}_i^T)$$

Где H_i -матрица инерции i-го звена.

В правой части уравнения – матрица B_N , ее элементы заданы составляющими векторов r_0, p_N, m_N

Потенциальная энергия исполнительного устройства:

$$П = \sum_{i=1}^N m_i \cdot \bar{G}^T \bar{\rho}_i = \sum_{i=1}^N m_i \cdot \bar{G}^T B_i \bar{\rho}_i^i$$

Где m_i -масса i -го звена; $\bar{\rho}_i = [x_i \ y_i \ z_i \ 1]^T$ –вектор центра масс i -го звена в системе координат i -го звена; $\bar{\rho}_i$ - вектор центра масс i -го звена в БСК; $\bar{G} = [g_x \ g_y \ g_z \ 0]^T$ -вектор ускорения свободного падения.

3.5 Уравнения движения исполнительного устройства

Как было указано выше, для описания динамики исполнительного устройства робота наиболее часто используют уравнения Лагранжа 2-го рода.

Таким образом, окончательно уравнения движения исполнительного устройства робота записывают в виде:

$$tr \sum_{l=i}^N \sum_{j=1}^l B_l^j H_l B_l^{iT} \ddot{q}_j - tr \sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^l B_l^{jK} H_l B_l^{iT} \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k + tr \sum_{l=i}^N \Phi_l B_l^{iT} = Q_{iП},$$

$i = 1, \dots, N$

Уравнения представляют собой идеализированную модель динамики исполнительного устройства. При выводе этих уравнений не учитывались силы сухого и вязкого трения в кинематических парах, моменты инерции роторов двигателей, гироскопические моменты, возникающие при перемещении вращающихся роторов, наличие люфтов и других нелинейностей. Все эти составляющие могут оказать существенное влияние на динамику, особенно силы трения и люфты.

4 Моделирование системы манипулятора в программных комплексах MATLAB Simulink и AMESim

4.1 Математический анализ объекта

а) Мы смоделировали САР.

С её помощью мы поддерживаем постоянным значение усилия, развиваемого поршнем. Возмущающим воздействием в данной системе является внешняя переменная сила $F_{вн}$, имитирующая влияние веса рабочего органа сварочных клещей. Чувствительным элементом служит датчик давления. В качестве управляющего воздействия служит давление в полости нагнетания цилиндра $P_{эф}$.

Все требуемые уравнения представлены в виде системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot P_{эф} \cdot \eta + \frac{m \cdot g}{\sin(\alpha)} \\ P_{эф} = 8750000 \cdot I_{рег} \\ P = \frac{I_{вх} - I_{мин}}{I_{мак} - I_{мин}} \cdot P_{мак} \\ F_p = P \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \\ I_{рег} = (I_{мп} - I) \cdot K_p + K_i \cdot \int_0^t (I_{мп} - I) dT + K_d \cdot \frac{d(I_{мп} - I)}{dt} \end{array} \right.$$

,где D – диаметр поршня цилиндра уравновешивания,

F_p – усилие, требуемое в точке сварки,

$F_{вн}$ – внешнее воздействие.

При этом внешнее воздействие зависит от положения рабочего органа сварочных клещей через угол α , измеряемый от исходного положения:

,где m - масса рабочего органа сварочных клещей.

$$F_{вн} = \pm \frac{m \cdot g}{\sin(\alpha)}$$

б) Составили «матрицу манипулятора» для нашего устройства и его

параметров:

$$T = \sum_{i=1}^N T_i =$$

$$\begin{pmatrix} a & -b & 0 & 0 \\ b & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & -d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -d & -f & 0 & 132 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h & -i & 0 & -365 \\ i & h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 218 \\ 0 & m & -n & 0 \\ 0 & n & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r & -s & 0 & 187 \\ s & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 80 \\ 0 & x & -y & 0 \\ 0 & y & -x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

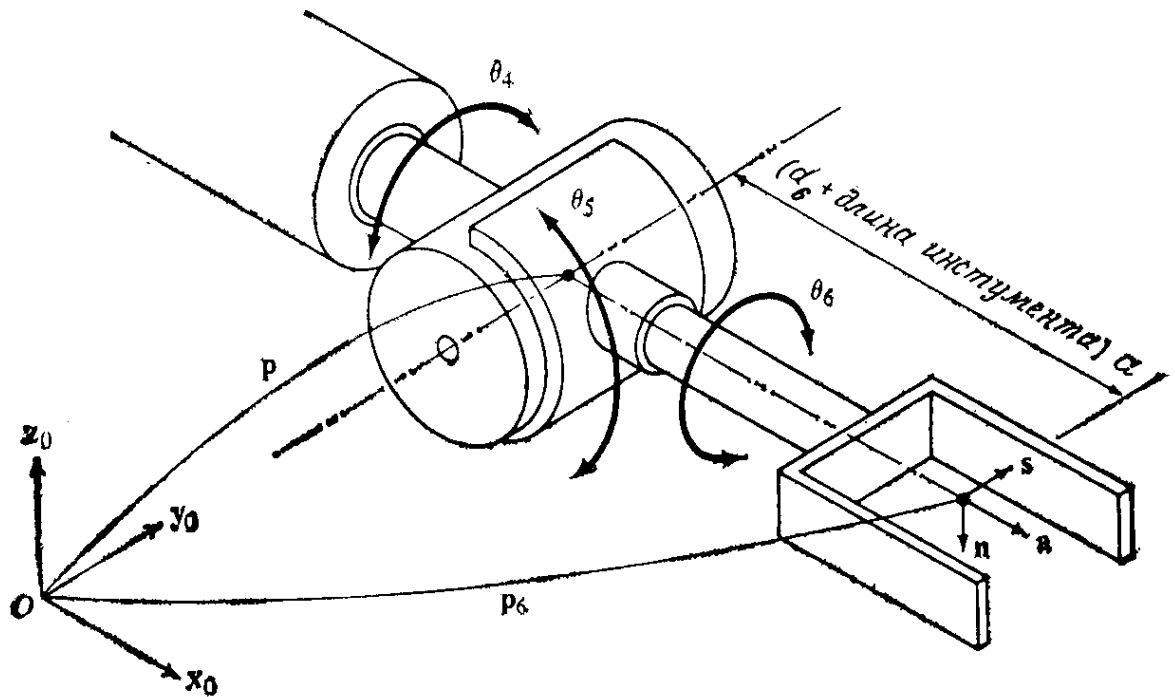


Рисунок 9 – Рабочий орган устройства

в) Посчитали «матрицу манипулятора» в трёх контрольных точках.

Откалибровали систему.

- Исходное положение: $\alpha, \beta, \theta, \xi, \psi, \omega = 0$

$$\begin{pmatrix} a & -b & 0 & 0 \\ b & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & -d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -d & -f & 0 & 132 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h & -i & 0 & -365 \\ i & h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 218 \\ 0 & m & -n & 0 \\ 0 & n & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left(\begin{array}{c|c} r & -s & 0 & 187 \\ s & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 80 \\ 0 & x & -y & 0 \\ 0 & y & -x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 40 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 52 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- $\alpha, \beta=90; \theta, \xi, \psi, \omega = 0$

$$\begin{pmatrix} a & -b & 0 & 0 \\ b & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & -d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -d & -f & 0 & 132 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h & -i & 0 & -365 \\ i & h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 218 \\ 0 & m & -n & 0 \\ 0 & n & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left(\begin{array}{c|c} r & -s & 0 & 187 \\ s & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 80 \\ 0 & x & -y & 0 \\ 0 & y & -x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -80 \\ 0 & 0 & -1 & 92 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- $\alpha, \beta=90; \theta, \xi=45; \psi, \omega = 0$

$$\begin{pmatrix} a & -b & 0 & 0 \\ b & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & -d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -d & -f & 0 & 132 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h & -i & 0 & -365 \\ i & h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 218 \\ 0 & m & -n & 0 \\ 0 & n & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left(\begin{array}{c|c} r & -s & 0 & 187 \\ s & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 80 \\ 0 & x & -y & 0 \\ 0 & y & -x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} -0.7 & -0.7 & 0 & -56.0 \\ -0.49 & 0.49 & -0.7 & -322.7 \\ 0.49 & -0.49 & -0.7 & 252.7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Схема системы приведена на рисунке 9.

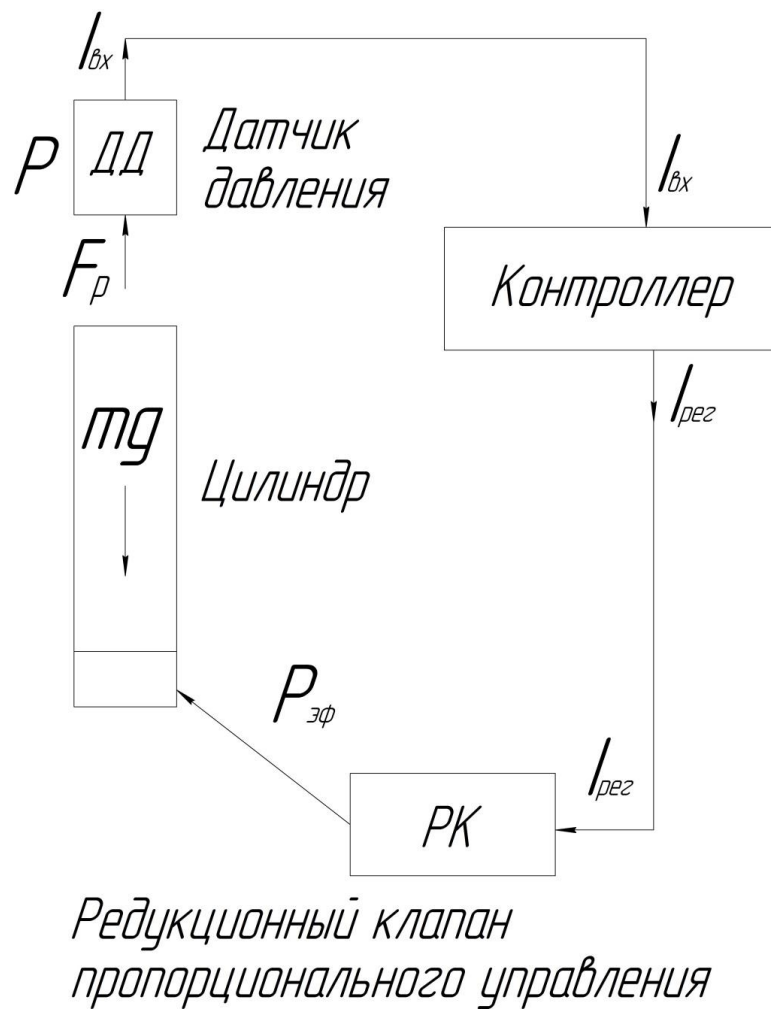


Рисунок 10 – Схема системы

4.2 Моделирование объекта в программе Simulink Version 5.0 (R13)

Структурная схема системы, без учета внешнего воздействия, построенная в программном пакете Simulink приведена на рисунке 10.

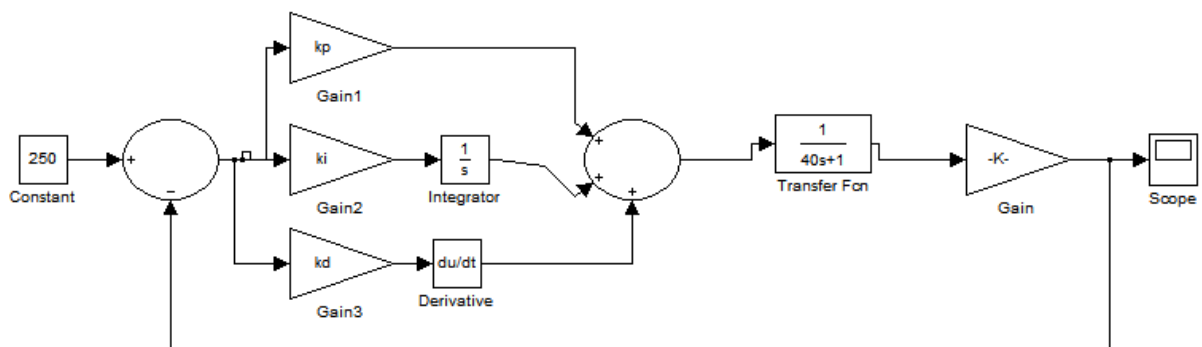


Рисунок 11 – Структурная схема системы

Структурная схема системы, с учетом внешнего воздействия, построенная в программном пакете Simulink приведена на рисунке 11.

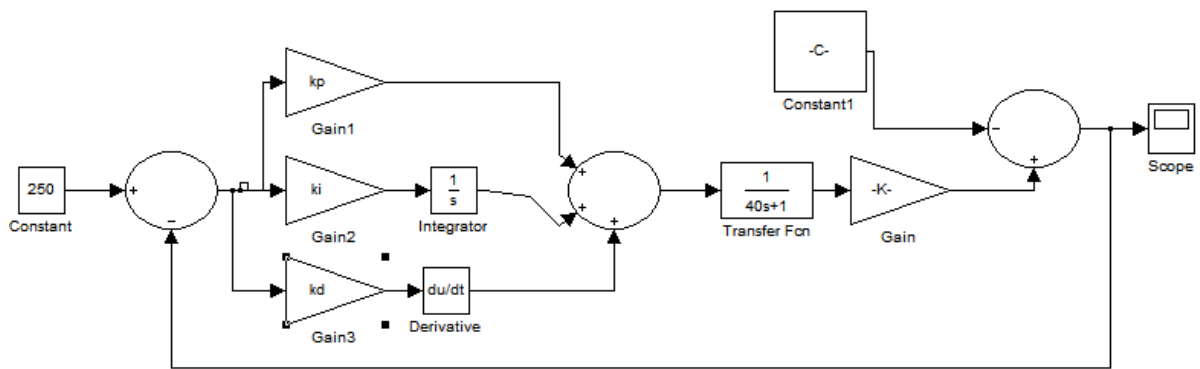


Рисунок 12 – Структурная схема системы, с учетом внешнего воздействия

Переходные характеристики данной системы для П, ПИ и ПИД регулятора приведены соответственно на рисунках 12, 13, 14. Программно выполнены задержки сигналов 15 секунд.

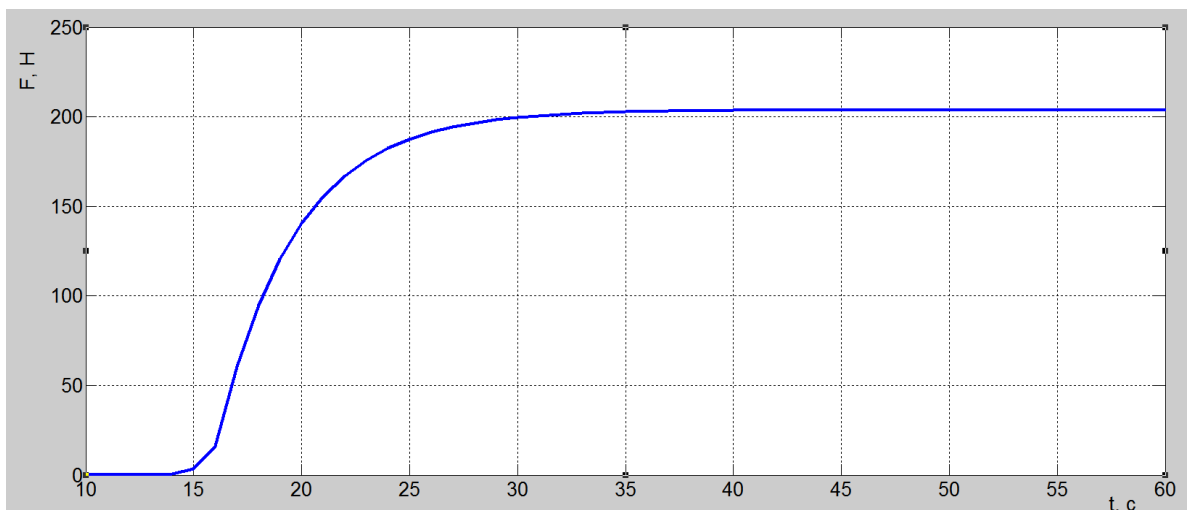


Рисунок 13 – Переходная характеристика для П-регулятора

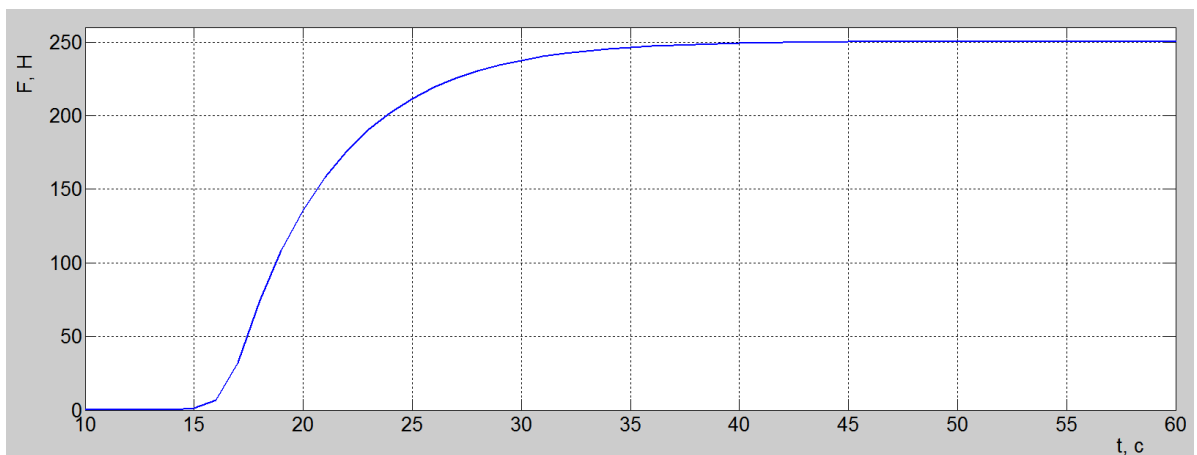


Рисунок 14 – Переходная характеристика для ПИ-регулятора

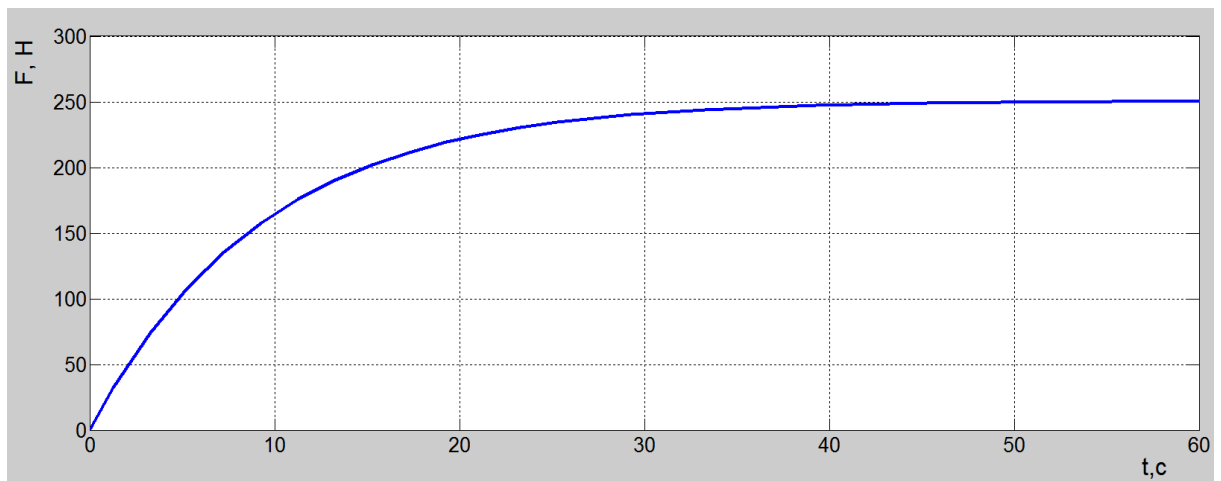


Рисунок 15 – Переходная характеристика для ПИД-регулятора

4.3 Математический анализ объекта в программе AMESim

Расчетная модель представлена на рисунке 15.

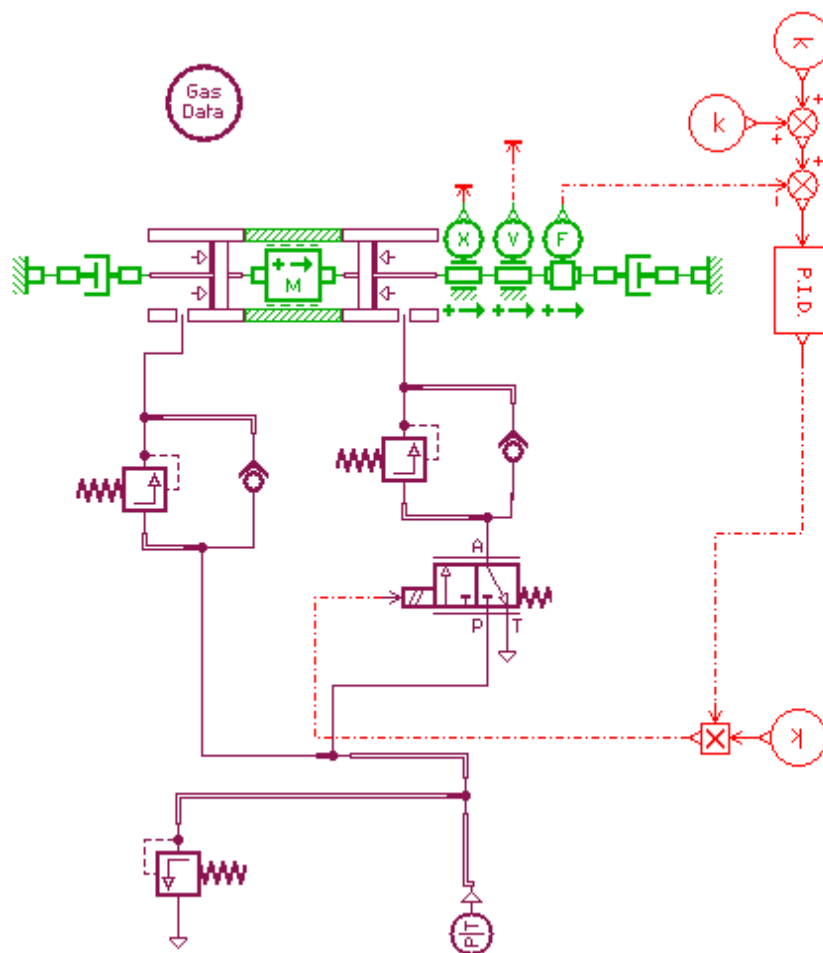


Рисунок 16 – Структурная схема системы

В данном программном пакете для моделирования системы необходимо было задать: параметры рабочего тела, параметры пневматических элементов (давление открытия клапанов, подачу насоса), константы регулятора.

В качестве требуемого цилиндра мы использовали три стандартных библиотечных элемента.

В звене контроллера используется ПИД-регулятор.

4.4 Сравнение результатов , полученных с использованием различного ПО

Из анализа моделей видно что результаты, полученные с помощью программы AMESim, точнее аналогичным данным MATLAB Simulink, в данной постановке задачи. Это может объясняться тем, что при задании параметров системы в программе AMESim мы описываем каждый компонент, а также используемые подмодели. Программа MATLAB Simulink работает в основном с числовой информацией и математическими алгоритмами, заданными вручную.

5 Программирование манипулятора

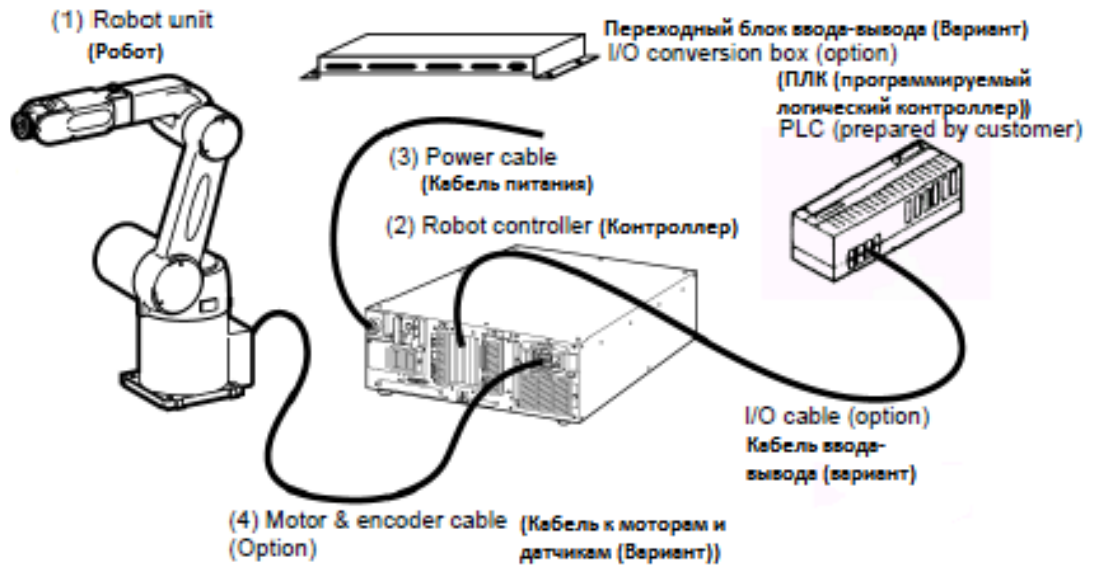


Рисунок 17 - Установка

Рабочая программа манипулятора DENSO представлена на рисунке 19.

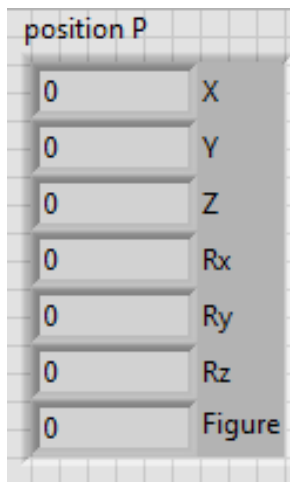
Программа управления состоит из двух частей. Одна из которых обеспечивает подвод рабочего органа оборудования к требуемой зоне, а вторая определяет непосредственно саму работу, выполняемую рабочим органом.

Эти части взаимодействуют между собой, т.к. из первой мы можем взять координаты текущего положения инструмента и отрегулировать требуемые значения для данного положения уже во второй части.

Так в случае с промышленными сварочными клещами эта связь может быть выражена формулой:
$$F_{вн} = \pm \frac{m \cdot g}{\sin(\alpha)}$$

Где m – масса рабочего органа (сварочных клещей),

α – угол между вектором подачи и вектором ускорения свободного падения.



- robot coordinates**
is the cluster of the cartesian coordinates (X, Y, Z, Ry, Ry, Rz, Fig).
- X**
is the X coordinate [mm].
- Y**
is the Y coordinate [mm].
- Z**
is the Z coordinate [mm].
- Rx**
is the rotation around the X axis [degrees].
- Ry**
is the rotation around the Y axis [degrees].
- Rz**
is the rotation around the Z axis [degrees].
- Figure**
is the Figure of the position.

Рисунок 18 - Координаты текущего положения рабочего органа в LabView

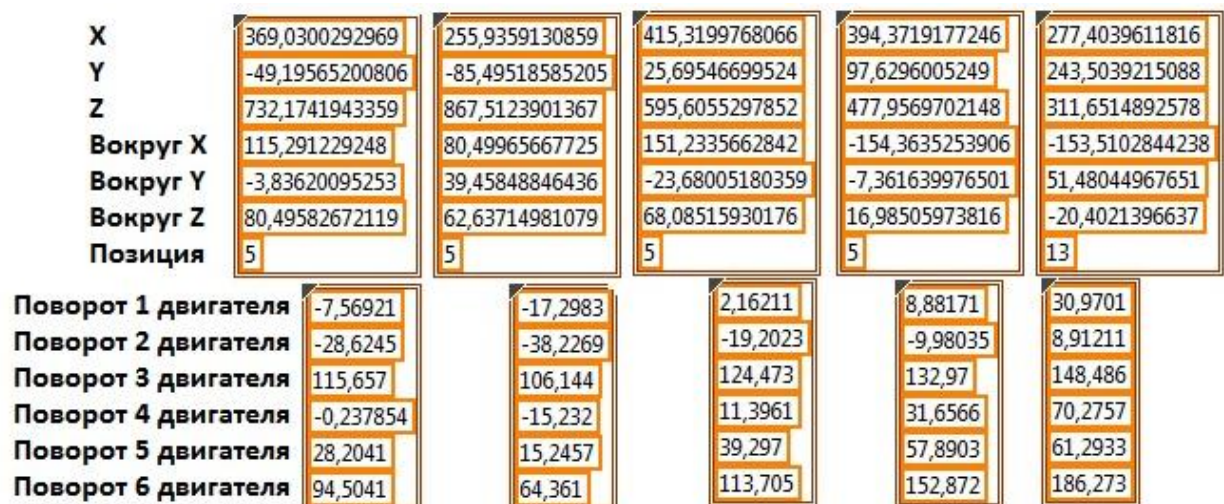


Рисунок 19 - Координаты экспериментальных точек в LabView

Определение положения выходного звена робота в зависимости от углов поворота его звеньев:

Таблица 4 – Положение рабочего органа в контрольных точках

| № | Углы поворота двигателей, ° | Координаты рабочего органа (программа), мм | Координаты рабочего органа (расчёт), мм |
|---|-----------------------------|--|--|
| 1 | | | $\begin{pmatrix} -0.157 & -0.971 & 0.18 & -641.809 \\ -0.373 & -0.11 & -0.921 & -28.014 \\ 0.914 & -0.212 & -0.345 & -59.851 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ |
| 2 | | | $\begin{pmatrix} -0.129 & -0.315 & -0.94 & -805.247 \\ 0.372 & -0.894 & 0.249 & 27.939 \\ -0.919 & -0.318 & 0.233 & -193.507 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 3 | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">2,16211</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">-19,2023</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">124,473</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">11,3961</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">39,297</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">113,705</div> | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">415,3199768066</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">25,69546699524</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">595,6055297852</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">151,2335662842</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">-23,68005180359</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">68,08515930176</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">5</div> | $\begin{pmatrix} 0.43 & -0.417 & 0.8 & 20.181 \\ 0.9 & 0.126 & -0.418 & 67.474 \\ 0.073 & 0.9 & 0.43 & -75.695 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ |
| 4 | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">8,88171</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">-9,98035</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">132,97</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">31,6566</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">57,8903</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">152,872</div> | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">394,3719177246</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">97,6296005249</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">477,9569702148</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">-154,3635253906</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">-7,361639976501</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">16,98505973816</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">5</div> | $\begin{pmatrix} -0.082 & 0.917 & 0.39 & -311.32 \\ 0.803 & 0.293 & -0.52 & 60.199 \\ -0.591 & 0.27 & -0.76 & -702.753 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ |
| 5 | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">30,9701</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">8,91211</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">148,486</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">70,2757</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">61,2933</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">186,273</div> | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">277,4039611816</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">243,5039215088</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">311,6514892578</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">-153,5102844238</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">51,48044967651</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">-20,4021396637</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">13</div> | $\begin{pmatrix} 0.401 & -0.126 & 0.907 & -152.005 \\ -0.853 & 0.309 & 0.42 & -63.968 \\ -0.334 & -0.942 & 0.017 & -296.474 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ |

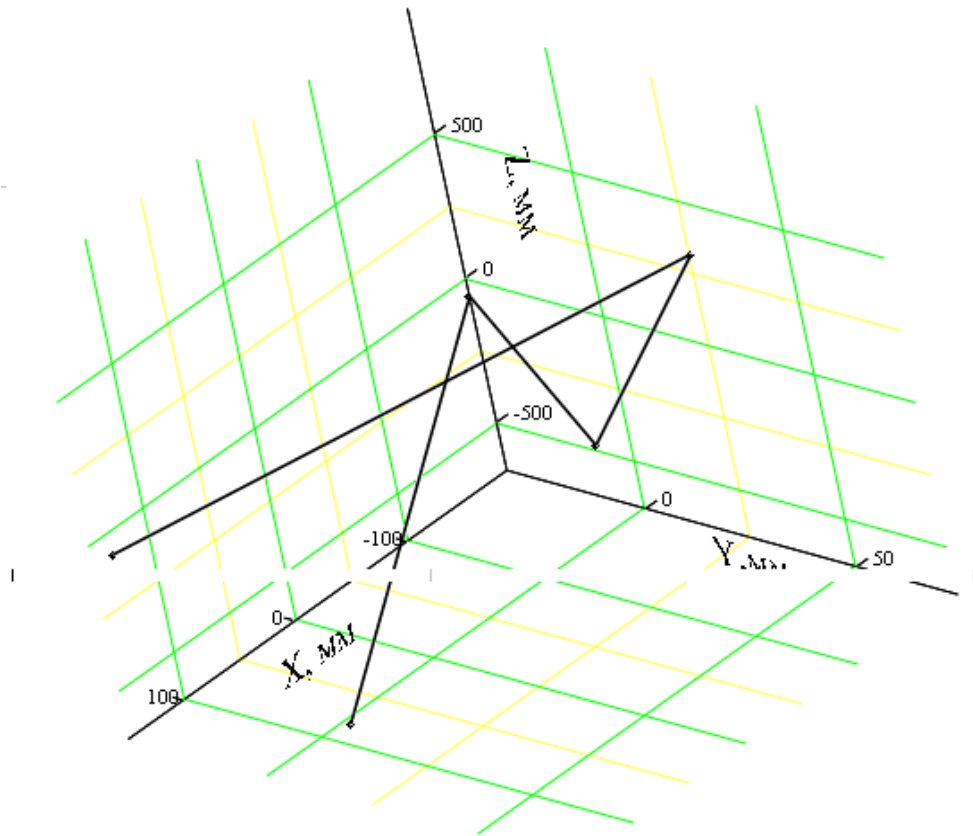


Рисунок 20 – Расчетная траектория перемещения выходного звена робота

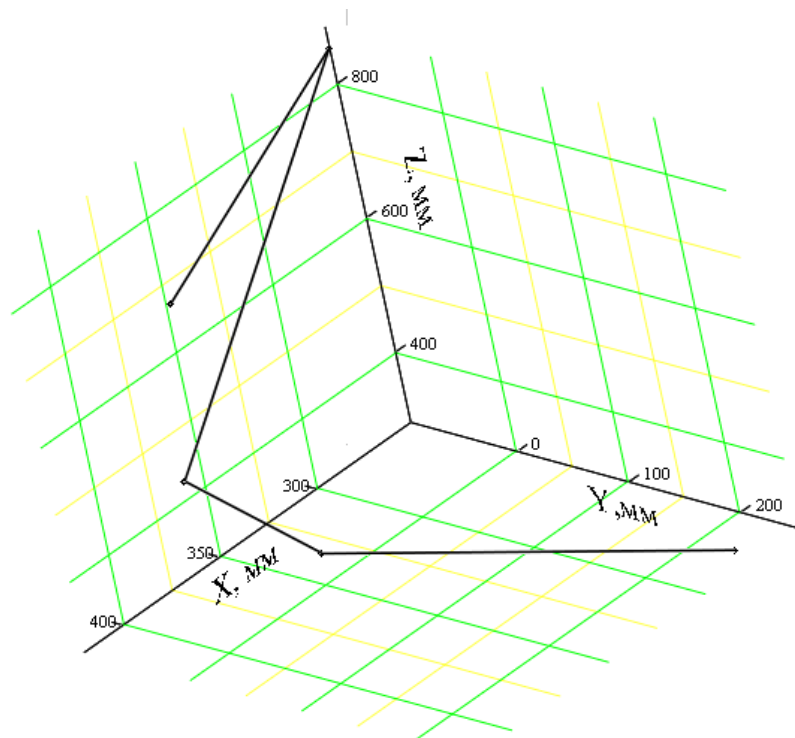


Рисунок 21 – Реальная траектория перемещения выходного звена робота

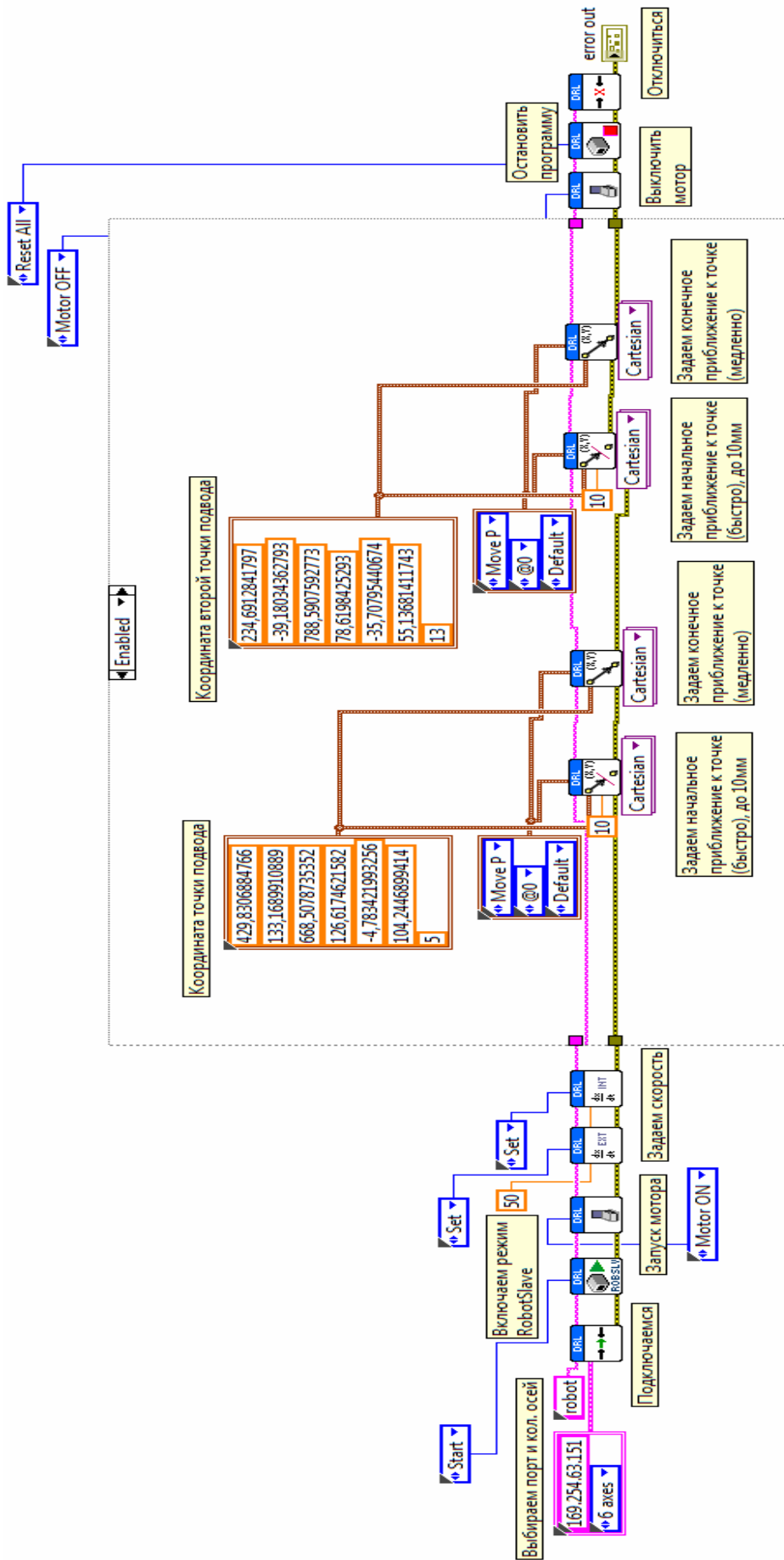


Рисунок 22 - Программа управления

Выводы

В результате проделанной работы мы познакомились с основными принципами моделирования сложного технического оборудования на примере робота DENSO.

Ознакомились с программными пакетами AMESim и MATLAB Simulink и возможностями их применения для моделирования сложных систем.

Ознакомились с основами программирования и управления промышленными манипуляторами в среде LabView.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дж. Трэвис, Дж. Кринг. LabVIEW для всех. ДМК Пресс: 2008. - 880 с.
2. Загидуллин Р.Ш. LabVIEW в исследованиях и разработках. – М.: Горячая линия - Телеком, 2005. - 352 с.
3. Егоров О.Д. Механика электромеханических роботов. – М.: ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2009. - 339 с.

Приложение А

Блок-схема работы модуля «Робот-Манипулятор»

