

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

М. Е. Антипин

**Решение задачи кинематики манипулятора Promobot ROOKY**

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Томск  
2023

УДК 004.02  
ББК 3стд2-02  
А 72

**Рецензент:**

**Лобода Ю.О.**, доцент каф. управления инновациями ТУСУР,  
канд. пед. наук

**Антипин, Михаил Евгеньевич**

А 72 Решение задачи кинематики манипулятора Promobot ROOKY: Методические указания по выполнению лабораторной работы/ М.Е. Антипин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектронники, 2023. – 21 с.

Методические указания содержат рекомендации и материалы, необходимые для выполнения лабораторной работ, связанной с предварительным расчетом прямой задачи кинематики с угловой рабочей зоной и последующим программированием реального манипулятора, проведением измерений и сравнением с модельными расчетами. Могут быть использованы при проведении лабораторных работ по дисциплинам «Управление в робототехнических системах», «Робототехника», «Основы мехатроники и робототехники», а также в других дисциплинах, предполагающих изучение кинематики манипуляторов.

Для студентов высших учебных заведений.

Одобрено на заседании кафедры УИ, протокол № 5 от 28.12.2022.

УДК 004.02  
ББК 3стд2-02

© Антипин М.Е., 2023  
© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектронники, 2023

## Оглавление

1. Общие положения .....	4
2 Общие требования к проведению лабораторных работ.....	5
3 Техническое обеспечение лабораторных работ.....	7
4 Прием результатов выполнения лабораторных работ .....	8
5 Применяемая терминология.....	9
6 Математическое описание манипулятора.....	10
7 Описание лабораторного макета.....	14
8 Запуск серверного программного обеспечения для управления манипулятором.....	17
9 Задания на лабораторную работу.....	18
8 Оформление отчетов по лабораторным работам .....	19
Список рекомендуемой литературы.....	20

## **1. Общие положения**

Данные методические указания разработаны для студентов, обучающихся в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (далее - Университет).

Структура дисциплин по изучению робототехники, в частности «Управление в робототехнических системах», предполагает проведение лабораторных работ. Лабораторные работы предназначены для закрепления материала, полученного в лекционном курсе, самостоятельного изучения материалов дисциплины, предусмотренных рабочей программой. Полученные навыки и знания могут быть полезны при проектировании, разработке и внедрении робототехнических систем.

В ходе выполнения лабораторной работы студенты приобретают знания в области кинематики манипуляторов, навыки моделирования многокоординатных систем движения, программирования робототехнических систем, умения увязывать теоретические знания и результаты моделирования с практикой, четко излагать свои мысли, отвечать на вопросы, оформлять и представлять результаты работы.

Рекомендации подготовлены с целью помочь студентам в успешном освоении дисциплин и подготовке и прохождении промежуточных этапов аттестации.

## 2 Общие требования к проведению лабораторных работ

Лабораторные работы проводятся согласно учебному расписанию. В ходе выполнения лабораторных работ студент выполняет задания, предусмотренные настоящими методическими указаниями. Лабораторные работы выполняются студентами очной формы обучения индивидуально под контролем со стороны преподавателя. Все консультации осуществляются преподавателем.

Число студентов, одновременно присутствующих на занятии не должно превышать 14 человек. Если в списочном составе группы студентов больше 14, то группа должна быть разделена на подгруппы численностью от 7 до 14 человек в каждой.

Для выполнения лабораторных работ целесообразно в учебном расписании выделять 4 академических часа подряд, без больших перерывов. Расписание также должно предусматривать раздельное проведение занятий у подгрупп, если группа была разделена.

Перед началом занятий студенты должны изучить инструкцию по охране труда, действующую в лаборатории. Преподаватель должен убедиться в знании инструкции, задавая студенту вопросы по ее содержанию, после чего сделать соответствующую запись в журнале охраны труда.

Во время выполнения лабораторных работ студентам в аудитории запрещается:

- Разговаривать между собой на любые темы без разрешения преподавателя.
- Консультировать друг друга.
- Передавать друг другу материалы, являющиеся результатом выполнения заданий.
- Производить шум, мешающий остальным сосредоточиться на выполнении задания.
- Пользоваться наушниками, берушами и другими приспособлениями, не позволяющими отчетливо слышать указания преподавателя.
- Читать литературу, конспекты и другие записи, не относящиеся к изучаемому предмету.
- Находиться в помещении аудитории в верхней одежде, если температура выше 18°C.
- Приносить верхнюю одежду с собой и размещать ее на стуле/столе, если в учебном корпусе работает гардероб.

В случае однократного нарушения преподаватель должен предупредить студента. При повторном нарушении в течении одного занятия студент из аудитории удаляется.

Студент имеет право:

- Уточнять полученные задания у преподавателя.
- Пользоваться любыми доступными методическими материалами по данной дисциплине.
- Просить консультации у преподавателя, если он в текущий момент не распределяет задания, не принимает выполненные работы и не консультирует другого студента.
- Пользоваться для выполнения вычислений собственным ноутбуком или планшетным компьютером.

Преподаватель, давая консультацию студенту, указывает раздел технической документации или методической литературы, в которой имеется ответ на вопрос студента. Если необходимые сведения в документации и литературе отсутствуют, то преподаватель должен дать устные пояснения или продемонстрировать практические действия, приводящие к требуемому результату для повторения студентом.

Самостоятельная работа студентов над лабораторными работами осуществляется в той же аудитории (лаборатории), где проводятся практические занятия. Преподаватель должен

согласовать со студентами расписание самостоятельной работы - не менее 2 астрономических часов в неделю. В указанное время по учебному расписанию студентов и в аудитории (лаборатории) не должны проводиться другие занятия. Преподаватель должен обеспечить доступ студентов в аудиторию (лабораторию) в указанные часы. Необходимость самостоятельной работы определяет студент.

Консультации, выдача лабораторных заданий и прием результатов выполнения осуществляется только во время аудиторных занятий. Задания выполняются последовательно. Правильное выполнение некоторых заданий возможно только, если студент корректно выполнил предыдущие задания.

### 3 Техническое обеспечение лабораторных работ

Для выполнения лабораторных работ студенту предоставляется индивидуальное рабочее место, в состав которого входят:

- Персональный компьютер с предустановленным программным обеспечением:
  - операционной системой Windows10;
  - системой виртуализации Windows System for Linux (WSL);
  - Robot Operating System (ROS);
  - Визуальной средой программирования RR\_Studio;
  - Программой для проверки работы манипулятора Test\_Devices;
  - Среда программирования на языке Python;
  - Пакет офисных приложений для разработки текста отчета.
- Учебный комплект углового манипулятора Promobot Rooky;
- Средства измерения линейных перемещений:
  - опорный предмет в форме параллелепипеда с размерами  $\sim 0.2 \times 0.3 \times 0.5$  м,
  - линейка длиной не менее 0.8 м или рулетка.

Размещение и освещенность рабочих мест в учебной аудитории (лаборатории) должно удовлетворять действующим требованиям СанПиН.

#### 4 Прием результатов выполнения лабораторных работ

Результаты выполнения лабораторных работ представляются преподавателю в виде электронного файла отчета, содержащего результаты моделирования, измерения и выводы.

Во время приема выполненной работы преподаватель вправе:

- Требовать у студента скорректировать вычислительную модель, если результаты измерений значительно отличаются от расчетных значений;
- Самостоятельно проверить результаты измерения;
- Требовать у студента пояснений, относящихся к отдельным элементам вычислительной модели, способам ее получения и верификации.

Задание считается выполненным и принимается преподавателем только в том случае, если результаты измерений совпадают с расчетными значениями с отклонением не более одного сантиметра. Если эти условия не выполняются, то результат выполнения подлежит доработке. Студент должен работать над вычислительной моделью максимально самостоятельно, допускается использовать программные средства для проведения матричных и векторных вычислений, в том числе самостоятельно разработать программу.

Оценка выполнения лабораторной работы складывается из трех равнозначных компонентов:

- Время выполнения работы. Фиксируется с момента получения задания до момента сдачи отчета. Измеряется в астрономических часах. Сравнивается с нормативным временем выполнения.
- Полнота и правильность выполнения задания. Экспертная оценка преподавателя.
- Аккуратность при выполнении измерений, оформления текстовых и графических материалов.

Во время приема выполненной работы преподаватель вправе требовать у студента обоснования представленных материалов.

Преподаватель должен объявить студенту поставленную ему оценку за выполнение задания, а в случае возникновения непонимания, объяснить причины ее выставления. В случае, если оценка неудовлетворительно, студент имеет право повторно предъявить результат выполнения, но не более двух раз в течение одного занятия. При этом для вычисления оценки время, затраченное на исправление, прибавляется к общему времени выполнения задания.

Выставленная оценка влияет на оценку студента по контрольной точке и итоговую оценку по дисциплине.

Студенты, не выполнившие лабораторную работу с оценкой выше удовлетворительной, к итоговой аттестации по предмету не допускаются.



## 5 Применяемая терминология

Чтобы свободно ориентироваться в приведенных ниже материалах студенту следует ознакомиться с применяемой терминологией:

- Робот - автоматическое устройство, которое выполняет функции, обычно приписываемые человеку.
- Промышленный робот - перепрограммируемый многофункциональный манипулятор, предназначенный для осуществления различных, заранее заданных перемещений материалов, деталей, инструментов или специальных приспособлений с целью выполнения различных работ
- Манипулятор - разомкнутая механическая цепь, состоящая из твердых тел, образующих кинематические пары 5-го класса.
- Задача кинематики - математическое (уравнениями, графиками, таблицами и т. п.) определение положения и характеристик движения точек или тел во времени.
- Прямая задача кинематики манипулятора - расчете координат положения и ориентации системы координат, связанной со схватом или рабочим инструментом, при заданном наборе обобщенных координат манипулятора.
- Обобщенная координата манипулятора – в зависимости от типа сочленения: угол поворота при шарнирном соединении, и линейное перемещение при поступательном соединении.

## 6 Математическое описание манипулятора

В общем виде математическое описание манипулятора включает в себя решение трех задач:

$$\left. \begin{aligned} x &= f(q), \\ q &= A_m(Q_\partial, Q_\varepsilon), \\ Q_\partial &= A_n(U_n). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Первое уравнение устанавливает зависимость вектора координат схвата  $x$  от значений вектора обобщенных координат  $q$  и называется задачей кинематики. Второе уравнение определяет значение обобщенных координат  $q$  от сил, воздействующих со стороны приводов на сочленения манипулятора  $Q_\partial$  и внешних сил  $Q_\varepsilon$  и называется задачей динамики. А третье уравнение формирует усилия на сочленения  $Q_\partial$  путем подачи управляющего напряжения  $U_n$  на двигатели приводов, и формулирует задачу управления приводами. Несмотря на то, что движение схвата зависит от совместного решения всех трех задач, разделение переменных позволяет решать каждую задачу отдельно.

В этой лабораторной работе мы будем решать задачу кинематики. Сформулировать ее можно в двух вариантах: прямом и обратном (рисунок 1). Прямая задача кинематики определяет положения схвата по известным значениям обобщенных координат и имеет единственное решение. Обратная задача кинематики предполагает расчет значений обобщенных координат для правильного размещения схвата в рабочем пространстве. Очевидно, обратная задача кинематики имеет намного большее практическое значение, но к сожалению, в ряде случаев может иметь больше одного решения, а в некоторых случаях не иметь решений вовсе.

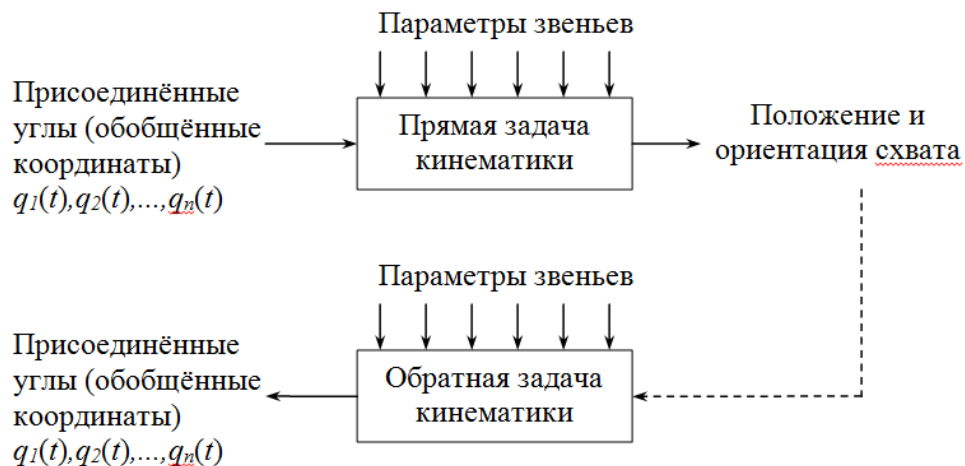


Рисунок 1 – задачи кинематики манипулятора

Прямая задача кинематики заключается в расчете координат положения и ориентации системы координат, связанной со схватом или рабочим инструментом, при заданном наборе обобщенных координат манипулятора.

Известно, что положение и ориентация твердого тела в пространстве однозначно определяется шестью координатами: тремя линейными (Декартовыми) и тремя угловыми (углами Эйлера). Использование метода, предложенного в 1955 г. учеными Жаком Денавитом и Ричардом Хартенбергом, позволяет сократить это число до четырех параметров, называемых параметрами Денавита-Хартенберга. Такое упрощение достигается с помощью стандартизированного алгоритма привязки систем координат к звеньям манипулятора.

Согласно методу Денавита-Хартенберга решение прямой задачи кинематики состоит из следующих этапов: привязки систем координат к звеньям робота, определение параметров Денавита-Хартенберга, построение матриц однородного преобразования.

Привязка систем координат осуществляется последовательно и по порядку, начиная с осей  $Z_i$  и заканчивая  $Y_i$ .

Для расстановки оси  $Z_i$  необходимо, чтобы ось  $Z_i$  совпала с осью вращения последующего сочленения  $i + 1$ . Это означает, что относительное расположение смежных звеньев (систем координат) будет определяться именно переменной вокруг этой оси. Кинематическая схема рассматриваемого манипулятора (рисунок 2) состоит из шести вращательных сочленений, поэтому оси  $Z_i$  будут совпадать с осями вращения данных сочленений (рисунок 3).

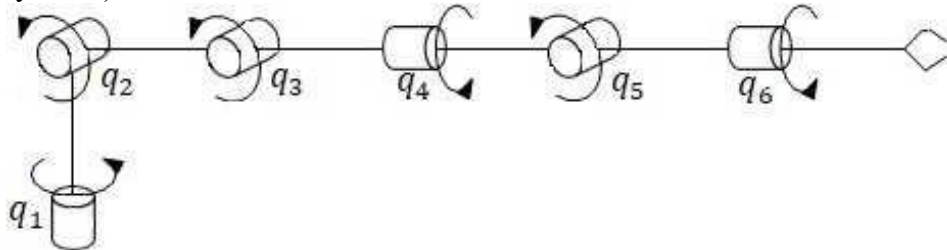


Рисунок 2 – кинематическая схема шестизвеного манипулятора с угловой рабочей зоной

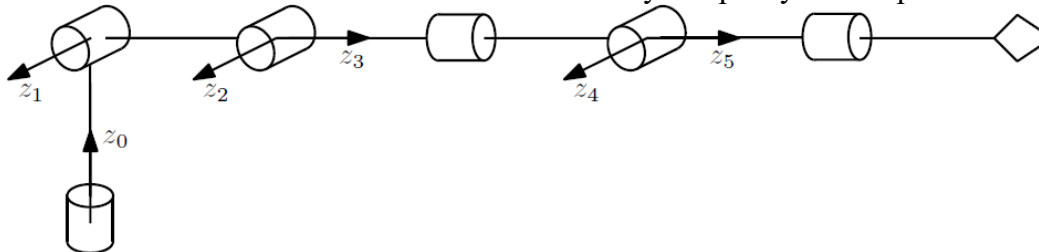


Рисунок 3 – Выбор осей  $z_i$  в соответствии с правилами Денавита-Хартенберга

Для выбора оси  $X_i$  (рисунок 4) необходимо, чтобы выполнялись два следующих условия:

1. Ось  $X_i$  должна быть перпендикулярна оси  $Z_{i-1}$ .
2. Ось  $X_i$  должна пересекать ось  $Z_{i-1}$ .

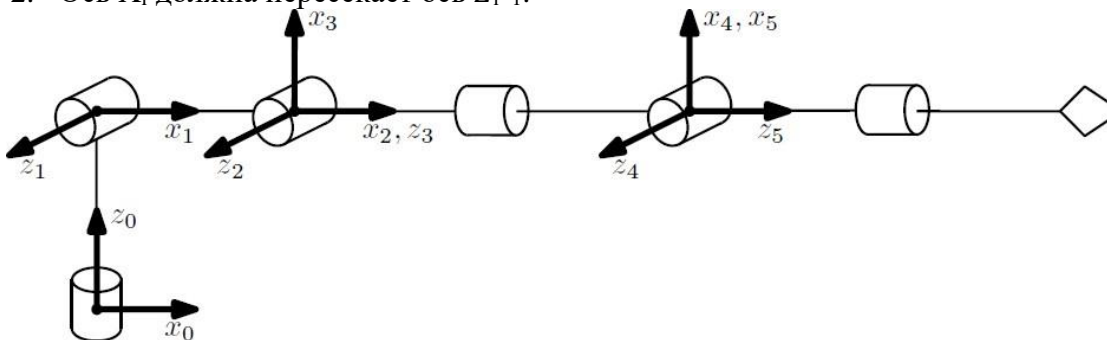


Рисунок 4 – выбор осей  $x_i$  по правилам Денавита-Хартенберга

Для выбора оси  $Y_i$  (рисунок 5) необходимо, чтобы система координат, заданная единичными векторами  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  была правой.

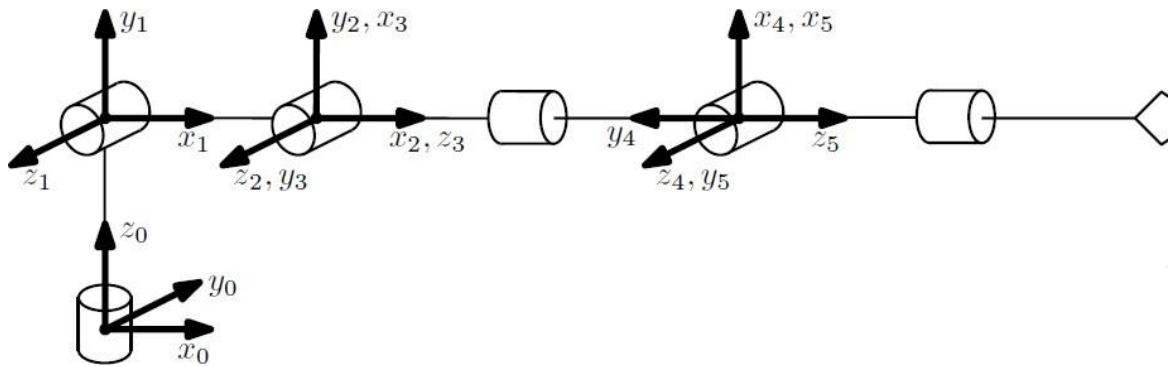


Рисунок 5 – выбор осей  $y_i$  по правилам Денавита-Хартенберга

Метод Денавита-Хартенберга позволяет сократить количество координат, однозначно определяющих систему координат в пространстве, с шести до четырех, известных как параметры Денавита-Хартенберга:

$a_i$  — расстояние вдоль оси  $x_i$  от  $z_{i-1}$  до  $z_i$ ;

$\alpha_i$  — угол вокруг оси  $x_i$  от  $z_{i-1}$  до  $z_i$ ;

$S_i$  — расстояние вдоль оси  $z_{i-1}$  от  $x_{i-1}$  до  $x_i$ ;

$Q_i$  — угол вокруг оси  $z_{i-1}$  от  $x_{i-1}$  до  $x_i$ .

Параметры  $a_i$  и  $\alpha_i$  всегда являются константами для всех кинематических схем и обусловлены конструкцией манипуляторов. Что касается оставшихся параметров  $S_i$  и  $Q_i$ , среди них только один параметр является постоянным, а другой — переменным в зависимости от типа сочленения: в случае вращательного — угол  $Q_i$  переменный, смещение  $S_i$  постоянное.

Выпишем параметры Денавита-Хартенберга для каждого из шести звеньев манипулятора с угловой рабочей зоной в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры Денавита-Хартенберга для шестизвенного манипулятора с угловой рабочей зоной

Параметр	Описание параметра	Звенья					
		1	2	3	4	5	6
$a_i$	$R(z_{i-1}; z_i)$	0	$L_2$	0	0	0	0
$\alpha_i$	$\angle(z_{i-1}; z_i)$	$\pi/2$	0	$\pi/2$	$-\pi/2$	$\pi/2$	0
$S_i$	$R(x_{i-1}; x_i)$	$L_1$	0	0	$L_4$	0	$L_6$
$Q_i$	$\angle(x_{i-1}; x_i)$	$q_1$	$q_2$	$q_3 + \pi/2$	$q_4$	$q_5$	$q_6$

Очевидно, что при решении прямой задачи кинематики рассматриваются 2 системы координат: инерциальная, связанная с основанием  $O_0X_0Y_0Z_0$ , и итоговая, связанная со схватом или рабочим инструментом  $O_nX_nY_nZ_n$ . Расположение этих двух систем друг относительно друга определяется двумя наборами координат: тремя линейными и тремя угловыми координатами, объединённые матрицей однородного преобразования.

${}^0A_n$  — Матрица однородного преобразования, определяющая связь систем координат  $O_0X_0Y_0Z_0$  и  $O_nX_nY_nZ_n$ . Она несёт в себе информацию о линейном смещении и пространственной ориентации одной системы относительно другой:

$$A_n^0 = \begin{bmatrix} n_n^0 & s_n^0 & a_n^0 & p_n^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_n^0 & p_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Векторы  $n_n^0$ ,  $s_n^0$  и  $a_n^0$  выражают направление осей  $x_n$ ,  $y_n$  и  $z_n$ , соответственно, относительно системы координат  $O_0X_0Y_0Z_0$ .  $R_n^0$  – матрица поворота системы  $O_nX_nY_nZ_n$  относительно  $O_0X_0Y_0Z_0$ , а  $p_n^0$  – вектор смещения начала координат.

Ранее были получены четыре параметра Денавита-Хартенберга для каждого звена манипулятора. Теперь из них необходимо построить соответствующие матрицы однородного преобразования следующим образом:

$$A_i = A_{z,\theta_i} * A_{z,S_i} * A_{x,a_i} * A_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} R_{x,\theta_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I & P_{S_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I & P_{a_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R_{x,\alpha_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

где  $i$  — номер звена,  $R_{x,\theta_i}$  и  $R_{x,\alpha_i}$  — базовые матрицы вращения на углы  $\theta_i$  и  $\alpha_i$ ,  $I$  — единичная матрица,  $P_{S_i}$  и  $P_{a_i}$  — векторы линейных перемещений на  $S_i$  и  $a_i$ .

Подставив все параметры Денавита-Хартенберга, получим 6 матриц однородного преобразования:

$$\begin{aligned} A_1^0 &= \begin{bmatrix} \cos(q_1) & 0 & -\sin(q_1) & 0 & 0 \\ \sin(q_1) & 0 & \cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ A_2^1 &= \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\sin(q_2) & 0 & L_2 * \cos(q_2) \\ \sin(q_2) & \cos(q_2) & 0 & L_2 * \sin(q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ A_3^2 &= \begin{bmatrix} -\sin q_3 & 0 & \cos q_3 & 0 \\ \cos q_3 & 0 & \sin q_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ A_4^3 &= \begin{bmatrix} \cos(q_4) & 0 & -\sin(q_4) & 0 \\ \sin(q_4) & 0 & \cos(q_4) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ A_5^4 &= \begin{bmatrix} \cos(q_5) & 0 & \sin(q_5) & 0 \\ \sin(q_5) & 0 & -\cos(q_5) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ A_6^5 &= \begin{bmatrix} \cos(q_6) & -\sin(q_6) & 0 & 0 \\ \sin(q_6) & \cos(q_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Итоговую матрицу, связывающую все системы координат, как и в случае с матрицами вращения, можно получить последовательным перемножением матриц однородного преобразования.

$$A_6^0 = A_1^0 * A_2^1 * A_3^2 * A_4^3 * A_5^4 * A_6^5 = \begin{bmatrix} R_n^0(q) & p_n^0(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

В результате, определив итоговую матрицу преобразования можно вычислить положение точки схвата в инерциальной системе отсчета по формуле:

$$\begin{matrix} \rightarrow^0 \\ r_c \end{matrix} = (x_c^0, y_c^0, z_c^0, 1) = A_6^0 \begin{matrix} \rightarrow^6 \\ r_c \end{matrix} \quad (6)$$

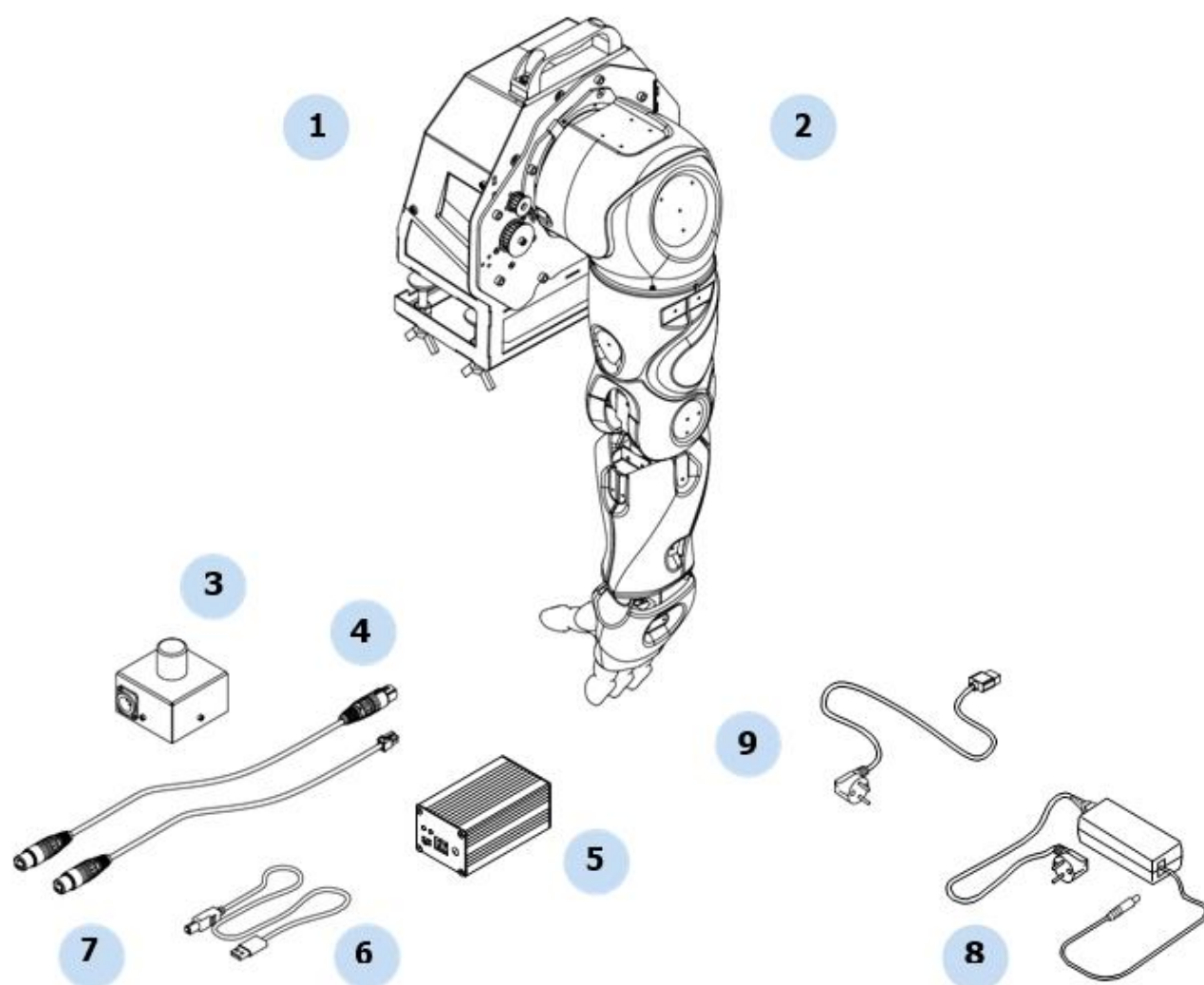
При этом  $\begin{matrix} \rightarrow^6 \\ r_c \end{matrix} = const$  — положение точки схвата в связанной с ним системе отсчета не меняется. Все изменения закладываются через обобщенные координаты в матрицу преобразования.

### 7 Описание лабораторного макета

Promobot Rooky — это рука-манипулятор робота Promobot V.4 с семью степенями свободы, адаптированная для учебного процесса. Рука-манипулятор имеет специальный кронштейн, с помощью которого она крепится к рабочему столу для проведения занятий.

Для безопасной и удобной работы манипулятор имеет пониженный (по сравнению с Promobot V.4) уровень напряжения на сервоприводах и защитные прозрачные пластиковые навесы, закрывающие подвижные части манипулятора.

Состав комплекта образовательной платформы Promobot Rooky представлен на рисунке 6.



1. Кронштейн для крепления руки-манипулятора
2. Рука-манипулятор
3. Кнопка экстренной остановки
4. Кабель подключения кнопки экстренной остановки к блоку питания
5. Интерфейсный блок
6. USB-кабель для подключения блока к ПК
7. Кабель подключения манипулятора к интерфейсному блоку
8. Блок питания интерфейсного блока;
9. Кабель для подключения блока питания манипулятора к сети 220 В

Рисунок 6 – состав комплекта Promobot Rooky

Характеристики манипулятора:

- |                              |            |
|------------------------------|------------|
| • Входное напряжение         | ~220/110 В |
| • Напряжение питания моторов | 24 В       |
| • Максимальный ток           | 15 А       |
| • Мощность                   | 350 Вт     |
| • Количество сервоприводов   | 7          |
| • Интерфейс                  | RS-485     |
| • Вес манипулятора в сборе   | 10 кг      |

Кинематическая схема манипулятора представлена на рисунке 7.

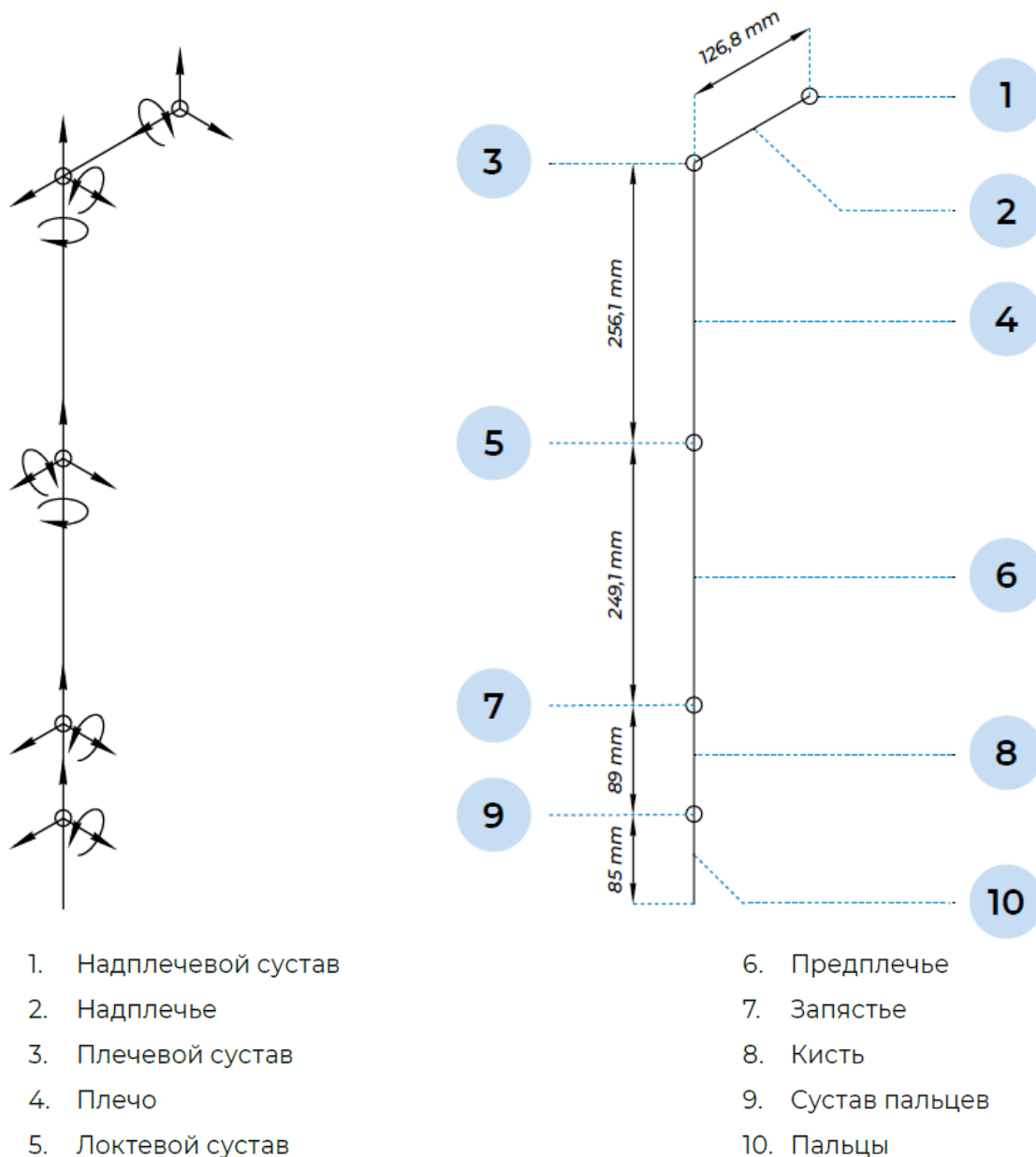


Рисунок 7 – Кинематическая схема манипулятора Promobot Rooky

Предельные рабочие углы поворота суставов:

- Надплечевой сустав 160°
- Плечевой сустав (подъём) 83°
- Плечевой сустав (вращение) 173°
- Локтевой сустав (подъём) 80°
- Локтевой сустав (вращение) 172°
- Запястье (подъём) 52°
- Пальцы (подъём) 75°



## 8 Запуск серверного программного обеспечения для управления манипулятором

На компьютерах лаборатории робототехнических манипуляторов установлена операционная система Windows, а управление манипулятором осуществляется из серверного программного обеспечения Robot Operating System (ROS), запускаемой из под Linux. Поэтому для получения доступа к визуальной среде программирования следует провести ряд манипуляций:

1. Войти в операционную систему Windows с правами администратора. Как правило, пароль администратора студентам не разглашается, вход осуществляется преподавателем или сотрудником лаборатории из числа учебно-вспомогательного персонала.
2. Нажать клавиши [win]+[x]. В открывшемся меню выбрать **Windows PowerShell (администратор)**. Подтвердить действие во всплывающем окне.
3. В открывшееся окно PowerShell скопировать и запустить командную строку:

```
python.exe 'C:\Program Files (x86)\Promobot\WSL2-main\utils\server.py'
```

Окно не закрывать до окончания работы. Можно свернуть на панель задач.

4. Нажать клавиши [win]+[x]. В открывшемся меню выбрать **Windows PowerShell (администратор)**. Подтвердить действие во всплывающем окне.
5. В открывшееся окно PowerShell ввести и запустить команду «wsl». Дождаться запуска виртуальной операционной системы Linux (несколько секунд).
6. Скопировать в окно и запустить командную строку:

```
sudo socat -d -d pty,link=/dev/RS_485,raw,echo=0,perm=0666 tcp:$HOST_ADDR:5000
```

При копировании в Linux сочетание клавиш [Ctrl]+[V] не работает. Рекомендуется воспользоваться сочетанием [Ctrl]+[Shift]+[V] или нажатием правой кнопки мыши.

Для выполнения команды потребуется пароль администратора Linux который нужно получить у преподавателя. При вводе пароль Linux никак не отображается.

Окно не закрывать до окончания работы. Можно свернуть на панель задач.

7. Нажать клавиши [win]+[x]. В открывшемся меню выбрать **Windows PowerShell (администратор)**. Подтвердить действие во всплывающем окне.
8. В открывшееся окно PowerShell ввести и запустить команду «wsl».
9. Скопировать в окно и запустить командную строку:

```
ros1launch promobot_control promobot_hardware.launch side:=left
```

В процессе выполнения команды (пару минут) осуществляется подключение к макету и калибровка, в процессе которой макет может двигаться.

Окно не закрывать до окончания работы. Можно свернуть на панель задач.

10. Запустить визуальную среду программирования RR\_Studio. Для подключения можно использовать IP адрес из окна PowerShell, открытого в шаге 3, или адрес 127.0.0.1

### 9 Задания на лабораторную работу

1. Изучить методические указания. Сверить кинематическую схему шестизвенного манипулятора, приведенную на рисунке 2 с кинематической схемой манипулятора Promobot Rooky (рисунок 7). Найти и отметить отличия.
2. Выбрать системы координат, связанные со звеньями манипулятора Promobot Rooky по правилам Денавита-Хартенберга.
3. Составить таблицу, аналогичную таблице 1 для манипулятора Promobot Rooky.
4. Обосновать преподавателю выбранные системы координат и полученную таблицу, ответить на вопросы по теоретической части. Результаты п.2 и 3 поместить в отчет.
5. Получить у преподавателя углы поворота суставов манипулятора  $q_i$ , при которых нужно рассчитать положение схвата.
6. Используя геометрические размеры манипулятора Promobot Rooky (рисунок 7) вычислить координаты  $(x_0, y_0, z_0)$  сустава пальцев в инерциальной системе отсчета в исходном положении (при нулевых значениях углов поворота).
7. Используя геометрические размеры манипулятора Promobot Rooky (рисунок 7) значения  $q_i$  и рассчитать матрицы преобразования по формулам (4).
8. Вычислить значение матрицы преобразования  $A_6^0$ . Допускается применять открытые математические пакеты для проведения векторно-матричных вычислений, или разработать собственную программу для умножения матриц и векторов.
9. Вычислить координаты  $(x, y, z)$  сустава пальцев в инерциальной системе отсчета по формуле (6).
10. Вычислить перемещение сустава пальцев при изменении углов поворота на  $q_i$  (п.5) по формуле  $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$ . Поместить результаты расчетов п. 6-10 в отчет.
11. Запустить серверное программное обеспечение Promobot Rooky.
12. Перевести манипулятор в исходное положение. Подвинуть опорный предмет (например, картонную коробку) до соприкосновения угла с ребром ладони манипулятора. Отметить точку соприкосновения на манипуляторе маркером для доски (смываемым).
13. Задать манипулятору углы  $q_i$ . Измерить расстояние от угла опорного предмета до маркированной точки манипулятора. Занести результаты измерения в отчет.
14. Сбросить все суставы в исходное положение.
15. Повторить п.12-14 не менее трех раз, маркируя разные точки манипулятора.
16. Объяснить в отчете расхождение измерений с расчетами в п.10, если они наблюдаются.

## **8 Оформление отчетов по лабораторным работам**

Отчет по лабораторной работе должен включать:

17. Титульный лист, оформленный в соответствии с приложением А.
18. Введение, в котором указывается цель работы и схема лабораторной установки.
19. Ход работы, в которой описывается выполнение каждой задачи.
20. Заключение.

В целях завершения лабораторной работы в аудитории по решению преподавателя допускается сдача аккуратно оформленного рукописного отчета, включая титульный лист, со вставкой и вклейкой скриншотов, прочих рисунков и изображений графиков

### Список рекомендуемой литературы

1. Методы и средства управления промышленными роботами : учебное пособие / М. Е. Вильбергер, И. И. Сингизин, Н. С. Попов, Г. С. Сидоров. — Новосибирск : НГТУ, 2022. — 72 с. — ISBN 978-5-7782-4616-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/306518> (дата обращения: 01.10.2022).
2. Крамаренко, Н. В. Алгоритмы управления движениями точки и робота-манипулятора : учебное пособие / Н. В. Крамаренко, А. А. Рыков. — Новосибирск : НГТУ, 2016. — 87 с. — ISBN 978-5-7782-2977-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/118104> (дата обращения: 01.10.2022).

## Приложение А

### Образец титульного листа отчета по лабораторным работам

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Факультет инновационных технологий

Кафедра управления инновациями

### ОТЧЁТ

по лабораторной работе по дисциплине

Тема лабораторной работы

Студент гр. 0ХХ

\_\_\_\_\_ И.О. Фамилия

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_г.

Преподаватель

Должность, ученая степень (если есть)

\_\_\_\_\_ И. О. Фамилия

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_г.

\_\_\_\_\_  
оценка

Томск 201