

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО»
(Университет ИТМО)

Факультет систем управления и робототехники

Отчет
о производственной, проектная практика

по теме:
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОГРУЗКИ-РАЗГРУЗКИ ДЛЯ
СКЛАДСКОГО РОБОТА

Студент:
Группа № R3237

Д. Гевара

Предподаватель:
Доцент

И.А. Бжухатлов

Санкт-Петербург
2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 КОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ.....	4
1.1 Линейная шарико-винтовая передача (механизм оси Z)	4
1.2 Ременная передача со шкивом (механизм оси X)	6
2 ПОЛНАЯ СБОРКА И НАБЛЮДЕНИЯ	9
2.1 Полная сборка.....	9
2.2 Наблюдения	11
3 ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ ПЕРЕДАЧИ С ВИНТОВОЙ ПАРОЙ.....	12
3.1 Параметры системы	12
3.2 Требования к силе	12
3.3 Расчет крутящего момента	13
3.4 Скорость вращения	13
3.5 Крутящий момент ускорения.....	13
3.6 Требования к мощности	14
3.7 Выбор двигателя.....	14
3.8 Таблица сводки	15
3.9 Заключение	15
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	16

ВВЕДЕНИЕ

Целью данного проекта является разработка системы погрузки и разгрузки для складского робота, ориентированной на точное и надежное перемещение по вертикали (ось z) и горизонтали (ось x). Дизайн был вдохновлен роботизированным транспортером Tote-to-Person от Geek+[1], эталоном автоматизированных складских систем, и 3D-принтером Prusa MINI+[2], известным своими компактными и точными механизмами перемещения.

Из-за ограниченной продолжительности периода практики объем работ был ограничен разработкой основных механизмов для перемещения по осям z и x . Винтовой линейный привод был выбран для оси z благодаря его устойчивости, надежности и высокой точности, что делает его идеальным для вертикального перемещения под нагрузкой. Однако к его недостаткам относятся относительно низкая скорость и более высокая стоимость. Для оси x была выбрана система ремней и шкивов благодаря ее легкой конструкции, высокой скорости и экономичности, хотя она может страдать от снижения точности и возможного проскальзывания ремня при больших нагрузках.

Дизайн был разработан и смоделирован с помощью SolidWorks[3], где была создана подробная модель сборки для проверки предполагаемой функциональности системы.

1 КОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ.

1.1 Линейная шарико-винтовая передача (механизм оси Z)

Механизм оси Z использует линейную шарико-винтовую передачу для обеспечения точного вертикального движения системы погрузки и разгрузки складского робота. Система рассчитана на поддержку общей массы 30 кг (20 кг груза + 10 кг платформы) с желаемой скоростью 0,3 м/с и ускорением 0,5 м/с². Основные компоненты механизма оси Z включают:

- **Алюминиевый профиль:** Структурная рама длиной 2000 мм и сечением 30 мм × 135 мм, обеспечивающая прочную основу для механизма.
- **Резьбовой стержень и направляющие стержни:** Шарико-винтовая пара диаметром 25 мм, шагом 10 мм и длиной 1960 мм, в сочетании с направляющими стержнями для обеспечения стабильного линейного движения.
- **Верхние и нижние опорные элементы:** Специально разработанные компоненты для фиксации шарико-винтовой пары и направляющих стержней, обеспечивающие выравнивание и структурную целостность.
- **Дополнительные компоненты:** Винты, болты, шайбы, линейные подшипники, подшипник для поддержки шарико-винтовой пары и муфта для соединения винта с двигателем, обеспечивающая плавную передачу мощности.
- **Сборка:** Компоненты интегрированы в единую сборку, спроектированную и проверенную в SolidWorks для обеспечения точного выравнивания и функциональности. Алюминиевый профиль служит основой, верхние и нижние элементы фиксируют шарико-винтовую пару и направляющие стержни. Линейные подшипники обеспечивают плавное движение, а муфта гарантирует эффективную передачу крутящего момента от двигателя.

Ниже приведены некоторые рисунки сборки винтовой линейной передачи.

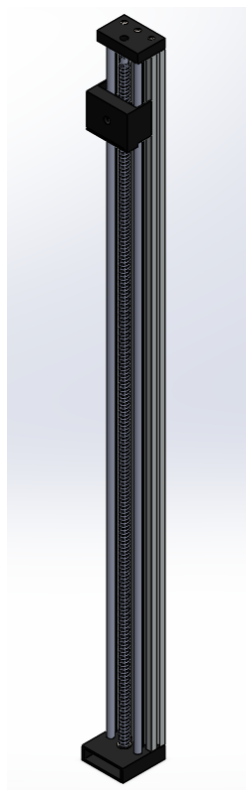
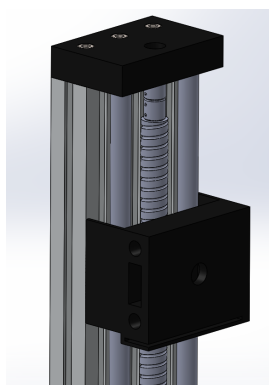
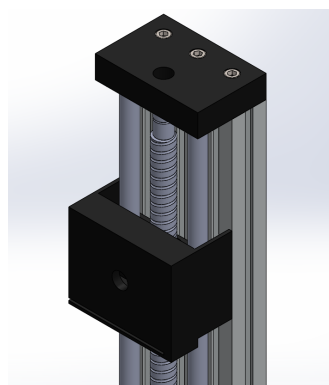


Рисунок 1 — Сборка Оси Z

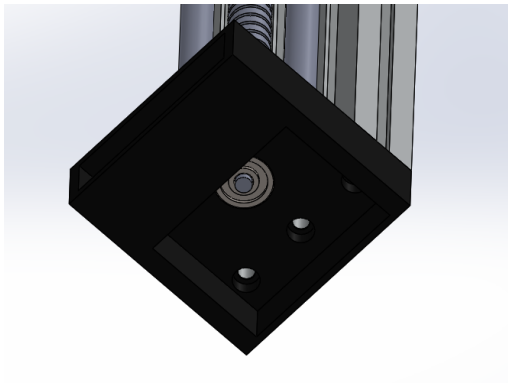


(a)

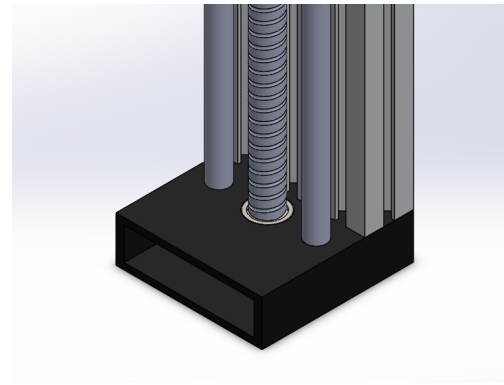


(б)

Рисунок 2 — Изображение верхней части системы крупным планом. На рисунке (a) верхняя часть видна спереди, а на рисунке (б) - сзади



(a)



(б)

Рисунок 3 — Изображение нижней части системы крупным планом. На рисунке (a) нижняя часть видна снизу, а на рисунке (б) видимая сверху

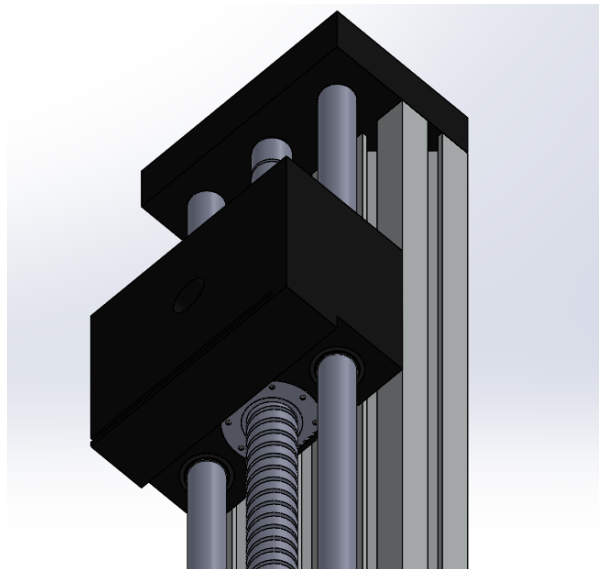


Рисунок 4 — Изображение нижней части ползунка в сборке крупным планом

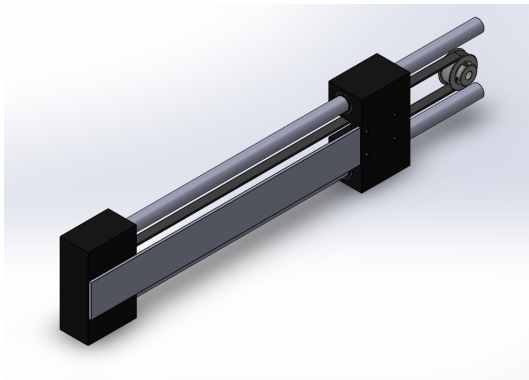
1.2 Ременная передача со шкивом (механизм оси X)

Механизм оси X использует ременную передачу со шкивом для быстрого и экономичного горизонтального движения при извлечении и перемещении грузов. Система легкая и оптимизирована для быстрой работы, хотя может иметь пониженную точность по сравнению с механизмом оси Z. Основные компоненты включают:

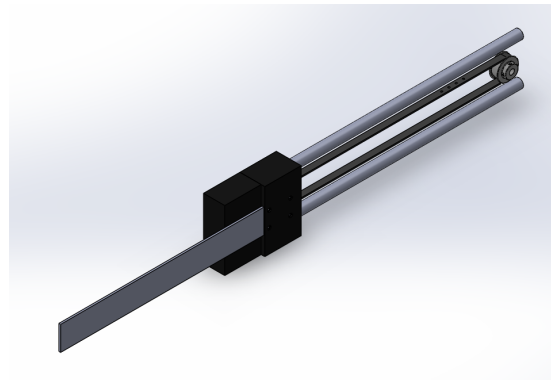
- **Плоский натяжной шкив:** Из каталога McMaster-Carr[4], с внешним диаметром 1,4 дюйма, внутренним диаметром 0,5 дюйма

- и шириной 1,125 дюйма, обеспечивающий плавное направление ремня.
- **Модифицированный шкив для ремня:** Также из каталога McMaster-Carr[5], с внешним диаметром 35 мм, диаметром вала 8 мм и диаметром шага 29,1 мм, адаптированный под требования системы.
 - **Ремень:** Плоский ремень, предназначенный для передачи движения между шкивами, выбран за его гибкость и экономичность.
 - **Ползун, концевой элемент и алюминиевая линейка:** Ползун, соединенный с ремнем, перемещает и извлекает грузы по алюминиевой линейке, которая обеспечивает стабильный путь для горизонтального движения. Концевой элемент фиксирует сборку и поддерживает натяжение ремня.
 - **Дополнительные компоненты:** Винты, болты, гайки и линейные подшипники для обеспечения плавного движения и фиксации сборки.
 - **Сборка:** Система ременной передачи смонтирована на каркасе, спроектированном в SolidWorks, с расположением шкивов для поддержания правильного натяжения и выравнивания ремня. Ползун движется по алюминиевой линейке, направляемый линейными подшипниками, для выполнения точной обработки грузов.

Ниже приведены некоторые фотографии сборки системы ремней и шкивов.

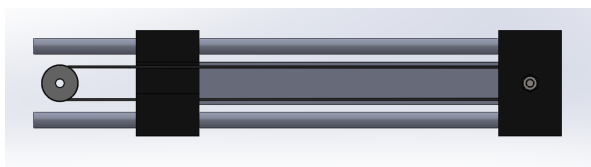


(a)

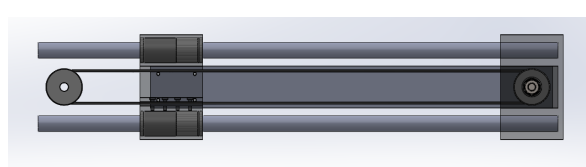


(б)

Рисунок 5 — Сборка системы ремня и шкива. На рисунке (a) алюминиевая рейка находится в исходном положении, а на рисунке (б) алюминиевая рейка вытянута



(a)



(б)

Рисунок 6 — Сборка системы ремней и шкивов показана сбоку. На рисунке (б) показан ползунок и конечная часть в режиме прозрачности

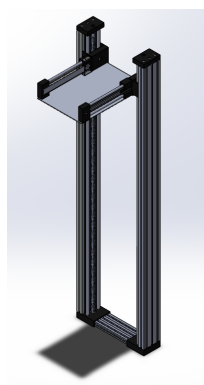
2 ПОЛНАЯ СБОРКА И НАБЛЮДЕНИЯ

2.1 Полная сборка

Предварительная полная сборка объединяет механизмы оси Z (линейная винтовая передача) и оси X (ременная передача со шкивом) в единую систему для операций погрузки и разгрузки складского робота. Основные дополнения к сборке включают:

- **Платформа для грузов:** Плоская платформа, предназначенная для удержания грузов во время транспортировки, с размерами 360 мм × 540 мм и полезной площадью 300 мм × 530 мм. Платформа имеет толщину 3 мм, материал пока не выбран, рассматриваются легкие и прочные варианты, такие как алюминий или композитные материалы, для баланса прочности и веса.
- **Нижний алюминиевый профиль:** Структурная основа, добавленная к сборке для обеспечения стабильности и поддержки всей системы. Размеры профиля соответствуют алюминиевой раме оси Z (сечение 30 мм × 135 мм, длина 2000 мм), обеспечивая структурную целостность.

Далее показаны рисунки полной сборки.

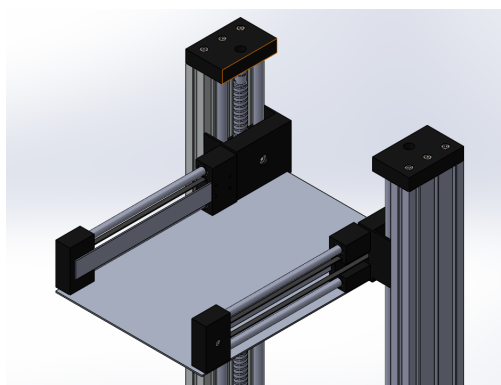


(a)

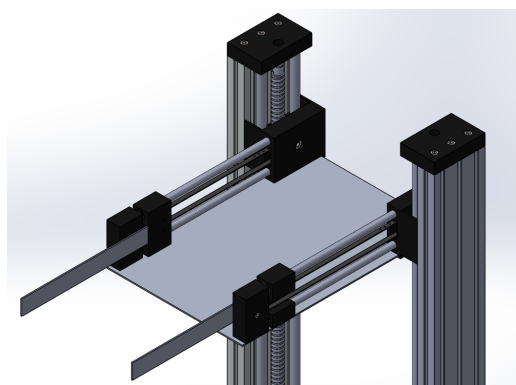


(б)

Рисунок 7 — Полная сборка. На рисунке (a) сборка показана спереди, а на рисунке (б) - сзади



(a)



(б)

Рисунок 8 — Полная сборка. Изображение кровати крупным планом с алюминиевыми рамками, неподвижными на рисунке (a) и вытянутыми на рисунке (б).

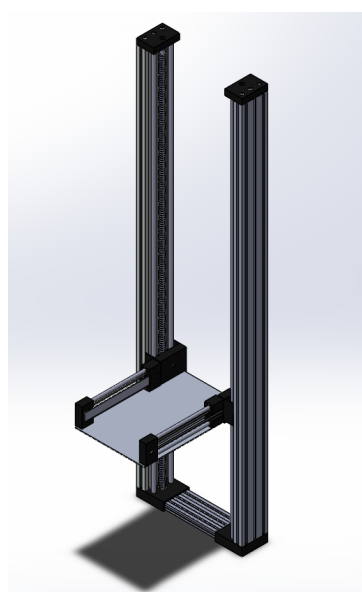


Рисунок 9 — Полная сборка в другом положении на оси Z.

2.2 Наблюдения

В процессе проектирования и сборки были сделаны следующие наблюдения:

- **Структурная стабильность:** Нижний алюминиевый профиль значительно повышает стабильность системы, особенно при динамических нагрузках во время вертикального движения. Однако требуется дополнительный анализ, чтобы подтвердить способность профиля выдерживать вибрации или боковые силы при высокоскоростной работе по оси X.
- **Точность и выравнивание:** Модель SolidWorks указывает на точное выравнивание винтовой и ременной систем, но реальная сборка может привести к незначительным отклонениям. Калибровка и тестирование физического прототипа необходимы для проверки производительности.
- **Учет веса:** Вес предварительной сборки, включая платформу и нижний профиль, может повлиять на требования к крутящему моменту и мощности двигателя. Если окончательный материал платформы или дополнительные компоненты увеличат общую массу сверх 30 кг, выбор двигателя (серводвигатель переменного тока мощностью 200 Вт) может потребовать пересмотра, возможно, потребуется двигатель мощностью 400 Вт, как указано в заключении.

3 ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ ПЕРЕДАЧИ С ВИНТОВОЙ ПАРОЙ

Система требует точного и эффективного перемещения по оси Z, с винтовой парой диаметром 25 мм, шагом 10 мм и длиной 1960 мм. Максимальная масса груза составляет 20 кг, с общей массой, не включая платформу, желаемой скоростью 0,3 м/с и ускорением 0,5 м/с². Расчеты ниже определяют требования к крутящему моменту, скорости и мощности для выбора подходящего двигателя, при общей массе 30 кг (20 кг груза + 10 кг платформы).

3.1 Параметры системы

В расчетах используются следующие параметры:

- Диаметр шарико-винтовой пары: 25 мм
- Шаг (p): 0,01 м
- Длина: 1,96 м
- Максимальная масса груза: 20 кг
- Предполагаемая масса платформы: 10 кг
- Общая масса (m_{total}): 30 кг
- Желаемая скорость (v): 0,3 м/с
- Ускорение (a): 0,5 м/с²
- Ускорение свободного падения (g): 9,81 м/с²
- Эффективность шарико-винтовой пары (η): 0,9

3.2 Требования к силе

Для вертикального движения вверх общая сила учитывает гравитацию и ускорение:

$$F = m_{\text{total}} \times (g + a) \quad (1)$$

Подставляя значения:

$$F = 30 \times (9,81 + 0,5) = 30 \times 10,31 = 309,3 \text{ Н} \quad (2)$$

3.3 Расчет крутящего момента

Крутящий момент, необходимый для шарико-винтовой пары во время ускорения:

$$T_{\text{screw}} = \frac{F \times p}{2\pi\eta} \quad (3)$$

Подставляя:

$$T_{\text{screw}} = \frac{309,3 \times 0,01}{2\pi \times 0,9} \approx \frac{3,093}{5,6549} \approx 0,547 \text{ Нм} \quad (4)$$

Для работы в установившемся режиме (постоянная скорость, только гравитация):

$$F_{\text{steady}} = m_{\text{total}} \times g = 30 \times 9,81 = 294,3 \text{ Н} \quad (5)$$

$$T_{\text{continuous}} = \frac{294,3 \times 0,01}{2\pi \times 0,9} \approx 0,520 \text{ Нм} \quad (6)$$

3.4 Скорость вращения

Скорость вращения, необходимая для достижения желаемой линейной скорости:

$$n = \frac{v}{p} \times 60 \quad (7)$$

Подставляя:

$$n = \frac{0,3}{0,01} \times 60 = 1800 \text{ об/мин} \quad (8)$$

3.5 Крутящий момент ускорения

Угловое ускорение:

$$\alpha = \frac{2\pi a}{p} = \frac{2\pi \times 0,5}{0,01} = 314,16 \text{ рад/с}^2 \quad (9)$$

Масса винта оценивается, предполагая стальной стержень (плотность $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$):

$$m_{\text{screw}} = \rho \times \pi r^2 L = 7850 \times \pi \times (0,0125)^2 \times 1,96 \approx 7,54 \text{ кг} \quad (10)$$

Инерция винта:

$$J_{\text{screw}} = \frac{1}{2} m_{\text{screw}} r^2 = \frac{1}{2} \times 7,54 \times (0,0125)^2 \approx 0,000589 \text{ кг м}^2 \quad (11)$$

Предполагая серводвигатель мощностью 200 Вт с инерцией $J_{\text{motor}} = 0,000029 \text{ кг м}^2$, общая инерция:

$$J_{\text{total}} = J_{\text{screw}} + J_{\text{motor}} \approx 0,000589 + 0,000029 = 0,000618 \text{ кг м}^2 \quad (12)$$

Крутящий момент ускорения:

$$T_{\text{inertia}} = J_{\text{total}} \times \alpha \approx 0,000618 \times 314,16 \approx 0,194 \text{ Нм} \quad (13)$$

Общий пиковый крутящий момент:

$$T_{\text{total}} = T_{\text{screw}} + T_{\text{inertia}} \approx 0,547 + 0,194 = 0,741 \text{ Нм} \quad (14)$$

3.6 Требования к мощности

Мощность для работы в установившемся режиме:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \times 1800}{60} = 188,5 \text{ рад/с} \quad (15)$$

$$P = T_{\text{continuous}} \times \omega = 0,520 \times 188,5 \approx 98 \text{ Вт} \quad (16)$$

3.7 Выбор двигателя

Выбор серводвигателя переменного тока мощностью 200 Вт является оптимальным для системы погрузки и разгрузки складского робота, учитывая его способность удовлетворять требованиям по крутящему моменту, скорости и мощности, рассчитанным для линейной винтовой передачи. Этот двигатель обеспечивает номинальный крутящий момент 0,64 Нм при 3000 об/мин и пиковый крутящий момент 1,92 Нм, что значительно превышает требования системы к непрерывному крутящему моменту 0,520 Нм и пиковому крутящему моменту 0,741 Нм при рабочей скорости 1800 об/мин. Рассчитанная потребляемая мощность 98 Вт находится в пределах мощности двигателя 200 Вт, обеспечивая эффективную работу без перегрузки. Например, двигатель, аналогичный E6 Series 200W AC Servo Motor Kit (3000 об/мин, 0,64 Нм, 17-битный энкодер, рейтинг IP65)[6], может быть использован.

3.8 Таблица сводки

Таблица 1 — Требования к крутящему моменту и мощности для различных масс

Общая масса (кг)	Сила (Н)	Непрерывный крутящий момент (Нм)	Пиковый крутящий момент (Нм)	Мощность (Вт)
25	257,8	0,456	0,650	86
30	309,3	0,520	0,741	98
40	412,4	0,694	0,888	131

3.9 Заключение

Для общей массы 30 кг рекомендуется серводвигатель переменного тока мощностью 200 Вт. Если масса платформы превышает 10 кг, можно рассматривать двигатель мощностью 400 Вт.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Geek+*. Geekplus Tote-to-Person RoboShuttle. — URL: <https://www.geekplus.com/product/roboshuttle> ; Last accessed 25 June 2025.
2. *Prusa J.* Original Prusa MINI+ kit assembly. — URL: https://help.prusa3d.com/manual/original-prusa-mini-kit-assembly_1215/mini-2 ; Last accessed 25 June 2025.
3. *CADFolks*. SolidWorks 2020 - Step-By-Step Guide: Part, Assembly, Drawings, Sheet Metal, Surfacing. — Independently published, 2020.
4. *McMasterCarr*. McMasterCarr Flat-Belt Idler Pulley. — URL: <https://www.mcmaster.com/1355K1/> ; Last accessed 25 June 2025.
5. *McMasterCarr*. McMasterCarr Corrosion-Resistant Timing Belt Pulley. — URL: <https://www.mcmaster.com/1277N717/> ; Last accessed 25 June 2025.
6. *StepperOnline*. E6 Series 200W AC Servo Motor Kit 3000rpm 0.64Nm 17-Bit Encoder IP65. — URL: <https://www.omc-stepperonline.com/e6-series-200w-ac-servo-motor-kit-3000rpm-0-64nm-17-bit-encoder-ip65-e6-rs200h2a2-m17s> ; Last accessed 25 June 2025.