



WYDZIAŁ  
ELEKTROTECHNIKI  
I AUTOMATYKI

Imię i nazwisko studenta: Dawid Mościcki  
Nr albumu: 176228  
Poziom kształcenia: Studia pierwszego stopnia  
Forma studiów: stacjonarne  
Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka  
Specjalność: Robotyka i Systemy Mechatroniki

Imię i nazwisko studenta: Dominik Lamcha  
Nr albumu: 176326  
Poziom kształcenia: Studia pierwszego stopnia  
Forma studiów: stacjonarne  
Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka  
Specjalność: Automatyka i Systemy Sterowania

## **PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA**

Tytuł pracy w języku polskim: Projekt i realizacja robota przemysłowego sterowanego z wykorzystaniem środowiska ROS.

Tytuł pracy w języku angielskim: Design and construction of an industrial robot controlled by the ROS environment.

Opiekun pracy: dr inż. Mariusz Dąbkowski

## **Podziękowania**

- Specjalne podziękowanie dla firmy FIJALO-POLAND Cyprian Fijało za możliwość przygotowania i wykonania elementów stalowych oraz pozyskanych silników krokowych.
- Podziękowania dla Stowarzyszenia Robotyków SKALP za udostępnienie miejsca oraz sprzętu potrzebnego do wykonania, zmontowania i przetestowania całej konstrukcji.
- Podziękowania A&A Automatyka za przekazanie aparatów i osprzętu użytego do konstrukcji szafy sterowniczej
- Podziękowania dla TUPLEX za przekazane arkusze szkła akrylowego.

## STRESZCZENIE

Niniejsza praca inżynierska skupia się na rozpoznaniu nowoczesnych rozwiązań budżetowych ramion robotycznych oraz na zaprojektowaniu i wykonaniu jednego z nich. Omawiane są rozwiązania historyczne na przykładzie robota IRB6 oraz podejście nowoczesne - Omron Viper 850. Praca zawiera opis myśli projektowej poszczególnych części. Przedstawione zostały zarówno strona mechaniczna, elektryczna jak i programowa. W części mechanicznej zostały opisane podstawowe zasady, które towarzyszyły projektantom podczas prac, jak i wyjaśnienia niektórych użytych rozwiązań. Część elektryczna skupia się na opisie szafy sterowniczej, jak i wyjaśnienia podstawowe zasady projektowe tego typu konstrukcji. Wspomniane są również decyzje, które zostały podjęte z powodu ograniczonego budżetu. Opis oprogramowania zawiera wprowadzenie do środowiska ROS oraz tłumaczy w jaki sposób należy sterować silnikami krokowymi i ich sterownikami. Udokumentowane zostały również prace przeprowadzane przy wykonaniu praktycznym konstrukcji. Zespół postarał się przybliżyć, z jakich metod korzystał by wykonać potrzebne elementy. Opis prac zawiera wiele fotografii wykonywanych podczas budowy. Przeprowadzono testy gotowego ramienia oraz wynikające z nich rozważaniami. Na końcu opracowania zawarto przemyślenia dotyczące procesu projektowego oraz wnioski dotyczące potencjalnej kolejnej wersji urządzenia.

**Słowa kluczowe:** Automatyka, Robotyka, Manipulator, Ramię przemysłowe

**Dziedzina nauki i techniki:** Robotyka praktyczna

## ABSTRACT

This engineering thesis focuses on the recognition of modern budgetary solutions of robotic arms and on the design and implementation of one of them. Historical solutions are discussed using the example of the IRB6 robot and the modern approach - the Omron Viper 850. The paper includes a description of the design thought of the different parts. Mechanical, electrical and software aspects are presented. In the mechanical part, the basic principles that accompanied the designers during their work are described, as well as explanations of some solutions used. The electrical part focuses on a description of the control cabinet and explains the basic design principles of this type of construction. It also mentions the decisions that were made because of the limited budget. The software description includes an introduction to the ROS environment and explains how to control the stepper motors and their drivers. The work carried out on the practical implementation of the design is also documented. The team has tried to explain what methods were used to make the necessary elements. The description of the work includes many photographs taken during the construction. Tests of the finished arm were carried out and the results, together with their conclusions, are presented in this paper. At the end of the paper, thoughts on the design process and conclusions for the potential next version of the device are included.

**Keywords:** Automation, Robotics, Manipulator, Industrial arm

**Field of science:** Practical robotics

## SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów .....	6
1. WSTĘP (DOMINIK LAMCHA, DAWID MOŚCICKI) .....	7
1.1. Cel, zakres i podział pracy .....	7
1.2. Inspiracje .....	8
2. PROJEKT MECHANICZNY MANIPULATORA EKSPERYMENTALNEGO MK.0 (DAWID MOŚCICKI) .....	15
2.1. Kinematyka Prosta .....	15
2.2. Kinematyka odwrotna .....	19
2.3. Obliczenia projektowo-konstrukcyjne .....	22
2.4. Projekt elementów nośnych .....	24
3. PROJEKT KONSTRUKCJI ELEKTRYCZNO - ELEKTRONICZNEJ ROBOTA MK.0 (DOMINIK LAMCHA) .....	34
3.1. Ogólna struktura blokowa układu elektryczno-elektronicznego .....	34
3.2. Jednostka sterująca .....	34
3.3. Silniki i ich sterowniki .....	36
3.4. Szafa sterownicza .....	38
4. PROJEKT OPROGRAMOWANIA (DAWID MOŚCICKI) .....	51
4.1. Zadania stawiane oprogramowaniu .....	51
4.2. ROS - wprowadzenie .....	51
4.3. Podstawy sterowania silnikami krokowymi .....	59
5. REALIZACJA KONSTRUKCJI PROTOTYPU MK.0 (DOMINIK LAMCHA) .....	64
5.1. Technologie wytwarzania zastosowane do budowy prototypu .....	64
5.2. Etapy montażu prototypu .....	71
6. TESTY WERYFIKACYJNE PRACY PROTOTYPU (DOMINIK LAMCHA) .....	81
6.1. Pomiary .....	81
6.2. Możliwość zastosowań .....	84
7. PODSUMOWANIE (DOMINIK LAMCHA, DAWID MOŚCICKI) .....	86
7.1. Wnioski wyciągnięte podczas prac .....	86
Wykaz rysunków .....	88
Wykaz tabel .....	91

## **WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW**

ROS - Robot Operating System

URDF - Unified Robot Description Format

XML - Extensible Markup Language

FDM - Fused Deposition Modeling

SLA - Stereolithography

PLC - Programmable Logic Controller

LCD - Liquid-crystal Display

IFR - International Federation of Robotics

ISO - International Organization for Standardization

CNC - Computerized Numerical Control

MAG - Metal Active Gas

# 1. WSTĘP (DOMINIK LAMCHA, DAWID MOŚCICKI)

## 1.1. Cel, zakres i podział pracy

Celem niniejszej pracy inżynierskiej jest projekt i konstrukcja budżetowego ramienia robotycznego. Wedle założeń powinien on być jak najlepiej przystosowany do pracy w przemyśle. Stworzonych zostało kilka wersji projektu którego ostateczną wersję wykonano praktycznie i zaprezentowano w tej pracy. Zakres niniejszej pracy inżynierskiej przedstawiono poniżej:

- analiza rynku i potrzeb przemysłu lekkiego,
- projekt części mechanicznej,
- projekt części elektryczno-elektronicznej,
- projekt oprogramowania,
- wykonanie praktyczne,
- testy gotowego urządzenia.

Pomysł na pracę zespołową nad tym projektem uzasadniono różnym polem talentów i zainteresowań członków zespołu, szeroką tematyką pracy oraz jej skalą. Poniżej przedstawiono zakres obowiązków

1) Dominik Lamcha:

- realizacja części mechanicznej,
- projekt i realizacja części elektronicznej,

2) Dawid Mościcki:

- projekt części mechanicznej,
- realizacja oprogramowania sterującego.

W pierwszym rozdziale przedstawiono podział cel, zakres i podział pracy oraz inspiracje projektowe zespołu.

W rozdziale drugim opisano kinematykę prostą i odwrotną, przedstawiono obliczenia momentów obrotowych przegubów oraz zaprezentowano proces projektowania mechaniki ramienia robotycznego. W rozdziale tym umieszczono również poglądowe rysunki złożeniowe poszczególnych członów robota.

Rozdział trzeci przedstawia opis części elektrycznej projektu. Przedstawiono w nim opis szafy sterowniczej oraz jej wszystkich komponentów. Wyjaśniono też podstawowe zasady projektowe tego typu konstrukcji.

W rozdziale czwartym przedstawiono oprogramowanie projektu, zarówno niskopoziomowe umieszczone na mikroprocesorze ATMega2560 oraz wysokopoziomowe zrealizowane w ROSie.

Piąty rozdział opisuje procesy technologiczne wykorzystane do obróbki materiałów i stworzenia prototypu. Udokumentowane zostały również prace przeprowadzane na wykonaniu praktycznym konstrukcji.

W rozdziale szóstym zawarto podstawowe pomiary parametrów gotowego urządzenia oraz podano możliwości praktycznego zastosowania.

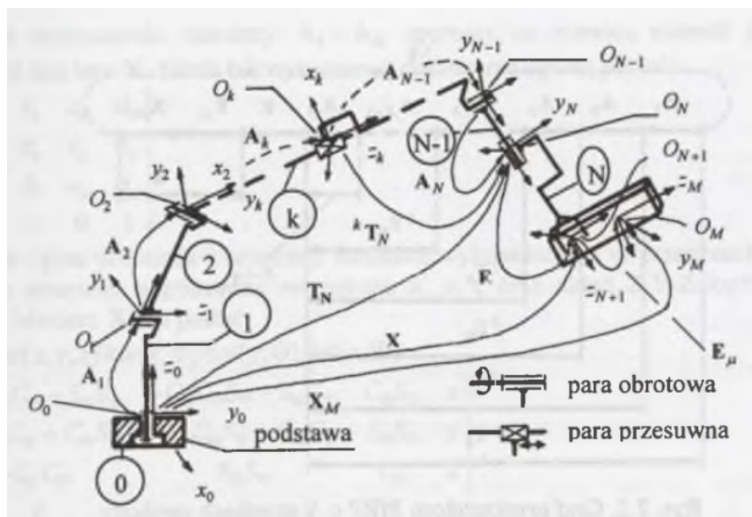
Rozdział siódmy koncentruje się na wnioskach, które wyciągnął zespół przy pracy projektowej i realizacji gotowej konstrukcji.

## 1.2. Inspiracje

Projekt ramienia inspirowany jest rozwiązaniami przemysłowymi dużych firm takich jak Kuka czy ABB. Liczba stopni swobody była głównie ograniczona dostępnym budżetem. Początkowo zakładano projekt o sześciu stopniach ale w projekcie finalnym udało się uzyskać ich 5. Ważne było również, aby konstrukcja miała centrycznie prowadzoną wiązkę elektryczną (wewnątrz struktury ramienia) oraz rozdzielność między ramieniem a szafą sterowniczą. Aby zapewnić możliwość łatwego rozłączania obu modułów, skąd pomysł na specjalny przewód i złącza.

### Trochę historii

Początki rozwoju współczesnych robotów datuje się od 1950 roku, a pierwsze konstrukcje powstawały w USA [1]. 20 lat później, technologia dociera do Polski w postaci zakupionej licencji firmy ASEA na robota przemysłowego IRB-6 oraz IRB-60, którego schemat kinematyczny widać na rysunku 1.4. W tamtych czasach możliwości programowania ruchu oraz symulacji były ograniczone przez ówczesne możliwości technologiczne i moc obliczeniową komputerów. Mimo tych ograniczeń, opisywany robot IRB-6, posiada 5 stopni swobody które pozwalały mu unieść 6 kg dodatkowego obciążenia. Robot ten porusza się dzięki pięciu identycznym silnikom prądu stałego o mocy około 1 kW, których pętla sterowania zamknięta jest poprzez zastosowanie selsynów. Selsyn jest to rodzaj transformatora o zmiennej przekładni, która zależy od wzajemnej pozycji dwóch uzwojeń. Jedno z nich jest stacjonarne a drugie umieszczone jest w obiekcie pomiarowym. Różnice w napięciu świadczą o względnej pozycji obiektów. Niestety czujniki te miały podobną masę i wymiary co główny napęd. Dlatego ograniczają maksymalny udźwig ramienia oraz wprowadzają dodatkowe momenty bezwładności. Aby osiągnąć precyzyjne sterowanie taką konstrukcją wymagane są odpowiednio dobrane kontrolery pozycji robota i związane z tym modelowanie matematyczne.



Rysunek 1.1. Schemat kinematyczny ramienia robotycznego IRB-6

Ramiona robotyczne takie jak IRB-6 znalazły swoje zastosowanie w branży motoryzacyjnej oraz w branży maszynowej. Wraz z rozwojem technologii coraz częściej roboty przemysłowe znajdowały zastosowanie we wszystkich branżach, gdzie praca człowieka była ciężka, niebezpieczna i monotoniczna. Narzędzia nowoczesnej robotyki i modelowania komputerowego pozwa-



lają na budowę prostego prototypu ramienia robotycznego bez zagłębiania się w modelowanie matematyczne. Za pomocą symulacji i uniwersalnych opisów łańcuchów kinematycznych programy komputerowe wspomagają inżynierów w np. tworzeniu tablicy Hartenberga-Denevita. Notacja Denavita-Hartenberga[2] upraszcza matematyczny opis mechanicznych ramion i pozwala zapisać kinematykę mechanizmu w formie macierzy rotacji i translacji. Za pomocą przybliżania macierzy bezwładności metodą elementów skończonych programy komputerowe wyręczają również w modelowaniu zarówno kinematyki jak i dynamiki robota. Same zagadnienie kinematyki prostej i odwrotnej może być rozwiązane przez użycie otwarto-źródłowych gotowych algorytmów zoptymalizowanych pod daną liczbę osi. Dzięki użyciu odpowiednich narzędzi można skrócić znacznie czas potrzebny na badania i rozwój projektu - nie istnieje potrzeba wynajdywania koła na nowo. Przy wykorzystaniu wyżej wymienionych narzędzi powstało eksperymentalne ramię robotyczne MK.0.

### ***Obecne trendy rozwoju robotów***

Automatyzacja procesów i współpraca maszyn z ludźmi staje się coraz bardziej obecna w życiu codziennym zwykłych ludzi. Popularyzacja tematu robotyki w mediach przyczyniła się do znajdowania zastosowań domowych maszyn do tej pory zarezerwowanych dla produkcji. Fundacja IFR (International Federation of Robotics) wskazuje na rozwój tzw. Service Robots (Roboty Współpracujące) których główną rolą jest bezpośrednia pomoc człowiekowi. Zadanie to jest tyle problematyczne gdyż należy zapewnić bezpieczne operacje takiej maszyny w otoczeniu ludzi. W przypadku awarii nie może ona zagrażać jego zdrowiu lub życiu. Cechuje je również spora doza autonomii i łatwości operowania. ISO 8373. Wskazuje się również na rozwój robotów służących do dezynfekcji. Zostało to niejako wymuszone ostatnim rozwojem światowych wydarzeń i pandemii Covid-19[3].

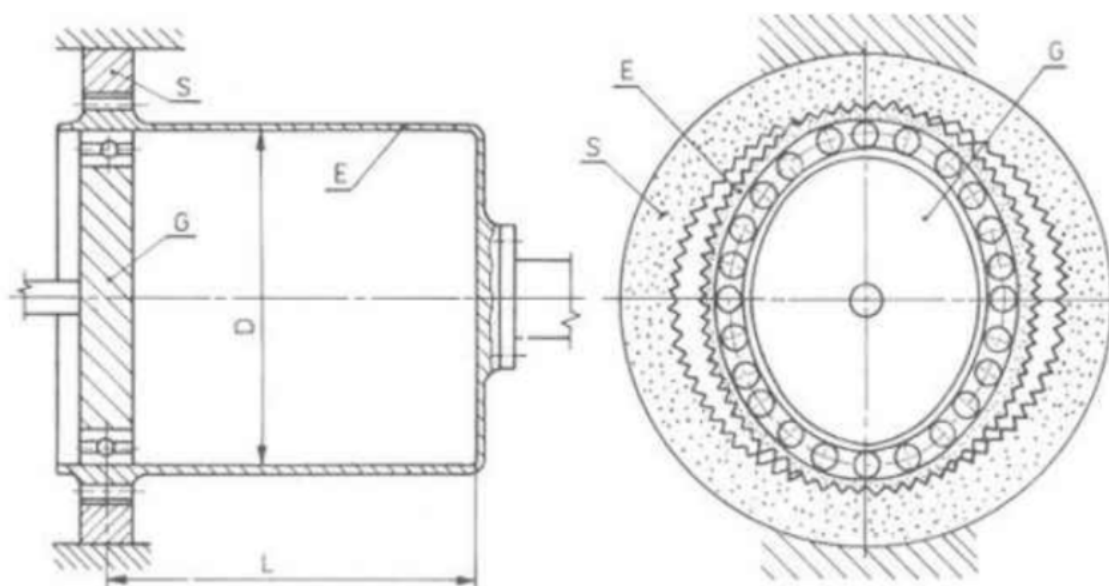
### ***Omron Viper 850***

Robot przemysłowy Viper 850 (rysunek 3.1) firmy Omron Adept technology jest przykładem nowoczesnego podejścia do projektowania. Jest to uniwersalna konstrukcja którą firma reklamuje jako zdolną do "obróbki, montażu i przenoszenia materiałów" Urządzenie waży 36 kg, ma zasięg do 850 mm i jest w stanie przemieścić ciężary do 5 kg z dokładnością do  $\pm 0,03$  mm. Jest to urządzenie które idealnie spełnia założenia projektowe niniejszej pracy inżynierskiej



Rysunek 1.2. Omron Viper 850 [4]

Korpus wykonany jest z aluminiowych odlewów by zapewnić lekkość i sztywność konstrukcji. Napędzają go serwomotory z przekładniami falowymi. Jest to typowe nowoczesne rozwiązanie przełożenia napędu w robotyce.



Rysunek 1.3. Schemat przekładni falowej według normy PN-79/M-88514 [5]

„Reduktor falowy jest to reduktor z jedną przekładnią walcową, w której generator G odkształca elastyczne koło zębate E w kierunku promieniowym, powodując jego zazębienie z kołem zębatym S w obszarach przemieszczających się wraz z generowaną falą odkształceń, wskutek czego ruch jest przekazywany na koło elastyczne E” - [5], (rysunek 1.3). Koło elastyczne posiada taki sam moduł zęba jak koło sztywne, lecz posiada kilka zębów mniej. Poruszanie elipsy wewnątrz powoduje przestawianie koła elastycznego względem pozycji koła sztywnego o niewielkie kąty. Stałe zazębienie wielu zębów gwarantuje precyzję i duże momenty, które może przenieść przekładnia. Dodatkowo przekładnie te są bardzo lekkie w stosunku konwencjonalnych przełożeń o podobnym stosunku, dlatego też idealnie nadają się do stosowania w ramionach robotycznych. Na każdy przegub przypada również czujnik w postaci enkodera inkrementalnego, który zbiera informacje o aktualnym położeniu ramienia. Jest on częścią serwomotoru. Czujnik taki wykorzy-

stuje tarczę i impulsator np. optyczny do zbierania informacji o obrocie jego wyjścia. Roboty takie zazwyczaj posiadają wewnętrzny akumulator do podtrzymania wartości zapisanych w układach enkoderów, by po odcięciu zasilania nadal wiadomo było, w jakiej pozycji on się znajduje. Po wymianie lub naładowaniu owego akumulatora potrzebna jest procedura bazowania. Można tego uniknąć stosując enkodery absolutne, których tarcza kodowa wskazuje konkretną pozycję. Uzyskanie jednak podobnych rozdzielczości wiązałoby się ze znacznie wyższym kosztem takich czujników. Robot posiada moduł zasilacza i sterowników oraz prosty panel przedni. Obsługa jest intuicyjna, a aplikacje zrobione tak, by użytkownik z niewielkim doświadczeniem w robotyce był w stanie zaprogramować proste czynności.

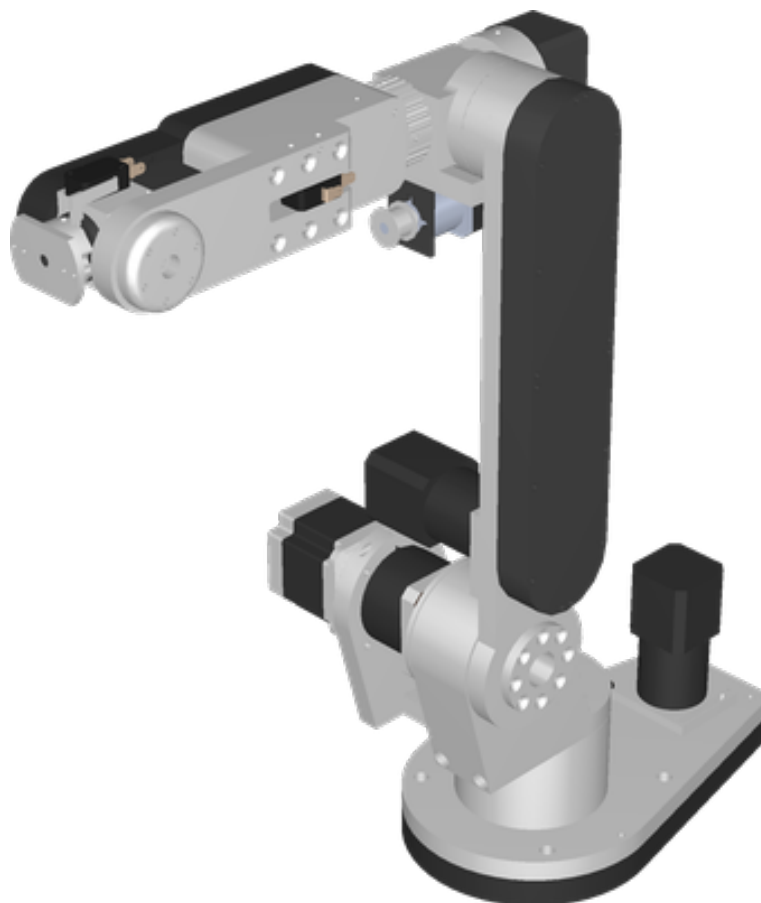
Konstrukcja ta znajduje zastosowanie przy lekkich powtarzalnych pracach. Jednym z przykładów może być inspekcja wizyjna gotowych produktów, gdzie robot porównuje obraz z kamery którą wodzi po obiekcie i ocenia jego potencjalne wady produkcyjne. Kolejnym przykładem jest zastosowanie kilku urządzeń do współpracy przy segregacji i etykietowaniu próbek badawczych w laboratorium medycznym [6]. Minimalizuje to kontakt człowieka z potencjalnie skażonymi próbkami i usprawnia pracę zakładu. Ramię to idealnie nadaje się do lekkich i powtarzalnych prac przy czym zakres ruchu sprawia, że jest to konstrukcja na tyle uniwersalna, że całe linie inspekcyjne czy transportowe mogą być zrealizowane przy pomocy jednego typu robota, a poszczególne aplikacje różnią się jedynie głowicą roboczą zlokalizowaną w kiści.

Kompaktowa budowa, pokaźny udźwig oraz łatwość aplikacji są cechami, które charakteryzują roboty współpracujące. Mimo niewielkiej wagi możliwość wysięgu na 850 mm spełnia podstawowe wymagania przemysłu lekkiego. Niestety procesy produkcyjne i komponenty użyte w nim są poza zasięgiem cenowym zespołu. Enkodery absolutne na każdej z osi wyeliminowałyby konieczność pozycjonowania robota po każdym odcięciu zasilania. Zastosowania przekładni falowych również przyczyniłoby się do poprawy precyzji oraz udźwigu ramienia.

## ***Przegląd najpopularniejszych konstrukcji otwarto-źródłowych ramion robotycznych***

### ***Ramię robotyczne AR3***

Najbardziej zaawansowane i precyzyjne ramię robotyczne posiada 2kg udźwigu i 6 stopni swobody. Główne elementy nośne konstrukcji zostały wyfrezowane z aluminium, stąd sztywność konstrukcji i cena w okolicy 10-14 tysięcy złotych. Na 1.4 widać wyrenderowane złożenie robota AR3.



Rysunek 1.4. Zdjęcie poglądowe ramienia AR3[7]

#### *Ramię robotyczne BCN3D MOVEO*

Ramię robotyczne BCN3D MOVEO to konstrukcja 5-osiowa z około 200g udźwigu. Najważniejsze zalety tego projektu to cena na poziomie 2 tysięcy złotych i możliwość wydrukowania wszystkich elementów w 3D (co znacząco obniża koszt). Brak precyzyjnych przekładni, niedopracowany system napinaczy pasków i brak odpowiedniego łożyskowania uniemożliwiają osiągnięcie sztywności i precyzji. Na rysunku 1.5 widzimy zdjęcie gotowej konstrukcji gotowej do działania.



Rysunek 1.5. Zdjęcie poglądowe ramienia BCN3D MOVEO[8]

#### *Ramię robotyczne KAUDA*

Podobnie jak w konstrukcji MOVEO, KAUDA, zaprezentowana na rysunku 1.6, ma niską cenę za pomocą wydrukowania całej konstrukcji w 3D. Niestety nie znaleziono informacji o całkowitym koszcie wykonania konstrukcji, ale szacunkowo jest to około 1400 złotych. Kwota ta została oszacowana za pomocą dostępnej listy części i cen wydruków 3D w Polsce. Przekładnie wydrukowane w 3D z niskim przełożeniem i słabe silniki skutkują bardzo małym udźwigniem na poziomie około 50 gram. Ruch konstrukcji nie jest płynny, występuje szarpanie przy rozpoczęciu i zakończeniu ruchu.



Rysunek 1.6. Zdjęcie poglądowe ramienia KAUDA[9]

#### *Wyciągnięte wnioski w odniesieniu do założeń projektu*

Na podstawie przeglądu otwarto-źródłowych projektów ramion robotycznych dotarło do konkluzji, że większość ramion ma problem z prowadzeniem przewodów (są poza obudową, przez co można o nie zahaczyć). Dzięki inspiracji w postaci nowoczesnych cobotów została podjęta de-

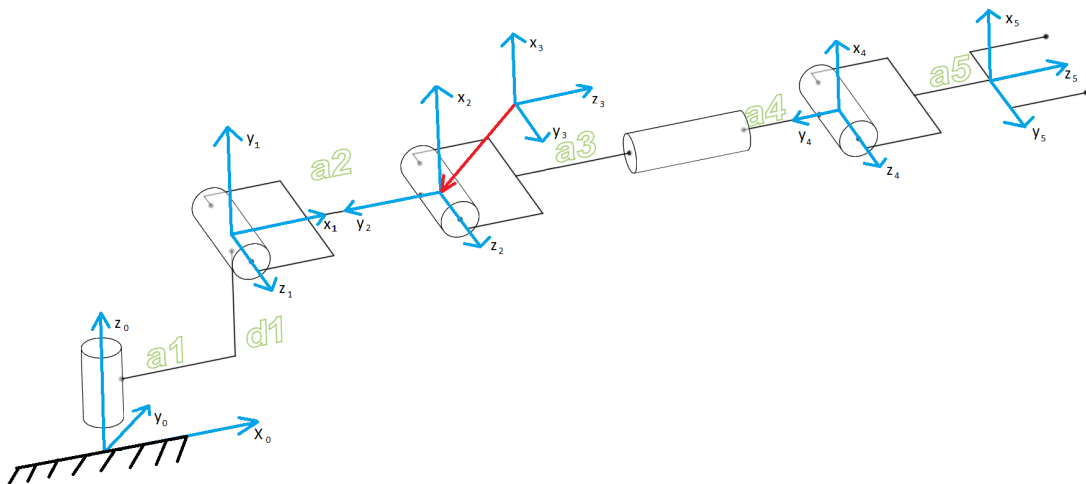
cyzja o próbie zbudowania ramienia z centralnie prowadzoną wiązką przewodów nie wystających poza obudowę. Cobot jest to rodzaj ramienia robotycznego przystosowanego do współpracy z człowiekiem i dzielania z nim jednej przestrzeni. Niestety sztywność, precyzja i udźwig konstrukcji AR3 jest poza zasięgiem cenowym niniejszej pracy inżynierskiej.

## 2. PROJEKT MECHANICZNY MANIPULATORA EKSPERYMENTALNEGO MK.0

(DAWID MOŚCICKI)

### 2.1. Kinematyka Prosta

Kinematyka [10] to opis ruchu ciała sztywnego, zawiera w sobie łańcuch kinematyczny, którego liczba stopni swobody jest równa liczbie stawów. Łańcuch kinematyczny jest zgrupowaniem elementów sztywnych połączonych przegubami (stawami). Eksperymentalne ramie robotyczne MK.0 posiada 5 stopni swobody, co pokazano schematycznie na rysunku 2.1, na zielono zaznaczono odległości między złączami.



Rysunek 2.1. Schemat kinematyczny ramienia robotycznego

Wszystkie przeguby są obrotowe, a tablica D-H zapisana została w tabeli 2.1, gdzie  $\varphi_i$  to kolejne kąty obrotu przegubów. Wartości liczbowe przesunięć wynoszą kolejno :  
 $d_1 = 0.37, a_1 = 0.29, a_2 = 0.3, d_4 = a_3 + a_4 = 0.17 + 0.06 = 0.23, d_5 = 0.06$

Tabela 2.1. Tablica D-H

$\varphi$	$\mathbf{d}$	$\mathbf{a}$	$\alpha$
$\varphi_1$	$d_1$	$a_1$	$90^\circ$
$\varphi_2 + 90^\circ$	0	$a_2$	0
$\varphi_3$	0	0	$90^\circ$
$\varphi_4$	$d_4$	0	$-90^\circ$
$\varphi_5$	0	0	$90^\circ$
$\varphi_6$	$d_5$	0	0

W tabeli 2.2 zestawiono maksymalne zakresy obrotowe członów w odniesieniu do rysunku 2.1.

Tabela 2.2. Zakresy przegubów manipulatora odnoszące się do pozycji ramienia pokazanej na Rys 2.1

Numer przegubu	Minimalny zakres obrotu[rad]	Maksymalny zakres obrotu[rad]
1	$-\pi$	$\pi$
2	$-\pi/4$	$5 \cdot \pi/4$
3	$-\pi/2$	$\pi/2$
4	$-3 \cdot \pi/4$	$3 \cdot \pi/4$
5	$-\pi/2$	$\pi/2$

Po wyznaczeniu tablicy D-H można przystąpić do opisu równań kinematyki prostej. Wzór ogólny opisujący zależności macierzy transformacji otrzymanej z notacji D-H wyraża się wzorem (2.1).

$$T_i = \begin{pmatrix} \cos\varphi_i & -\sin\varphi_i \cos\alpha_i & \sin\varphi_i \sin\alpha_i & a_i \cos\varphi_i \\ \sin\varphi_i & \cos\varphi_i \cos\alpha_i & -\cos\varphi_i \sin\alpha_i & a_i \sin\varphi_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Następnie opisano przejścia pomiędzy układami współrzędnych we wzorach od (2.2) do (2.7). Dla uproszczenia zapisu przyjęto :  $\cos = c$  oraz  $\sin = s$ .

$$T_0^1 = \begin{pmatrix} c\varphi_1 & 0 & s\varphi_1 & 0.29 \cdot c\varphi_1 \\ s\varphi_1 & 0 & -c\varphi_1 & 0.29 \cdot s\varphi_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0.37 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$T_1^2 = \begin{pmatrix} -s\varphi_2 & -c\varphi_2 & 0 & -0.3 \cdot s\varphi_2 \\ c\varphi_2 & -s\varphi_2 & 0 & 0.3 \cdot c\varphi_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

$$T_2^3 = \begin{pmatrix} c\varphi_3 & 0 & s\varphi_3 & 0 \\ s\varphi_3 & 0 & -c\varphi_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

$$T_3^4 = \begin{pmatrix} c\varphi_4 & 0 & -s\varphi_4 & 0 \\ s\varphi_4 & 0 & c\varphi_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0.23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$



$$T_4^5 = \begin{pmatrix} c\varphi_5 & 0 & s\varphi_5 & 0 \\ s\varphi_5 & 0 & -c\varphi_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

$$T_5^6 = \begin{pmatrix} c\varphi_6 & -s\varphi_6 & 0 & 0 \\ s\varphi_6 & c\varphi_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.06 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Aby otrzymać całkowitą kinematykę prostą ramienia, należy wymnożyć poprzednie 6 macierzy. W celu uproszczenia zapisu i zwiększenia czytelności pracy podzielono obliczenia na dwa etapy. Etap przejścia  $T_0^3$  pokazano wzorem (2.8), a poniżej opisano poszczególne elementy macierzy.

$$T_0^3 = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

$$r_{11} = -c_1 \cdot c_3 \cdot s_2 - c_1 \cdot c_2 \cdot s_3$$

$$r_{12} = s_1$$

$$r_{13} = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 - c_1 \cdot s_2 \cdot s_3$$

$$r_{14} = (29 \cdot c_1 - 30 \cdot c_1 \cdot s_2)/100$$

$$r_{21} = -c_3 \cdot s_1 \cdot s_2 - c_2 \cdot s_1 \cdot s_3$$

$$r_{22} = -c_1$$

$$r_{23} = c_2 \cdot c_3 \cdot s_1 - s_1 \cdot s_2 \cdot s_3$$

$$r_{24} = (29 \cdot s_1 - 30 \cdot s_1 \cdot s_2)/100$$

$$r_{31} = c_2 \cdot c_3 - s_2 \cdot s_3$$

$$r_{32} = 0$$

$$r_{33} = c_3 \cdot s_2 + c_2 \cdot s_3$$

$$r_{34} = (30 \cdot c_2 + 37)/100$$

$$r_{41} = 0$$

$$r_{42} = 0$$

$$r_{43} = 0$$

$$r_{44} = 1$$

Następnie obliczono etap przejścia  $T_3^6$ , przedstawiony wzorem (2.9), oraz opisano jego elementy poniżej.

$$T_3^6 = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & t_{44} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned}
t_{11} &= c_4 \cdot c_5 \cdot c_6 - s_4 \cdot s_6 \\
t_{12} &= -c_6 \cdot s_4 - c_4 \cdot c_5 \cdot s_6 \\
t_{13} &= c_4 \cdot s_5 \\
t_{14} &= 3 \cdot c_4 \cdot s_5 / 50 \\
t_{21} &= c_5 \cdot c_6 \cdot s_4 + c_4 \cdot s_6 \\
t_{22} &= c_4 \cdot c_6 - c_5 \cdot s_4 \cdot s_6 \\
t_{23} &= s_4 \cdot s_5 \\
t_{24} &= 3 \cdot s_4 \cdot s_5 / 50 \\
t_{31} &= -c_6 \cdot s_5 \\
t_{32} &= s_5 \cdot s_6 \\
t_{33} &= c_5 \\
t_{34} &= (6 \cdot c_5 + 23) / 100 \\
t_{41} &= 0 \\
t_{42} &= 0 \\
t_{43} &= 0 \\
t_{44} &= 1
\end{aligned}$$

Zapis kinematyki prostej można uprościć do macierzy  $2 \times 2$ , co wyraża się wzorem (2.10). Dzięki temu otrzymano macierz rotacji, wyrażonej wzorem (2.11) oraz macierz translacji wyrażoną wzorem (2.12). Wzory te posłużą następnie do obliczenia kinematyki odwrotnej.

$$H_0^6 = \begin{Bmatrix} R_0^6 & D_0^6 \\ 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

$$R_0^6 = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

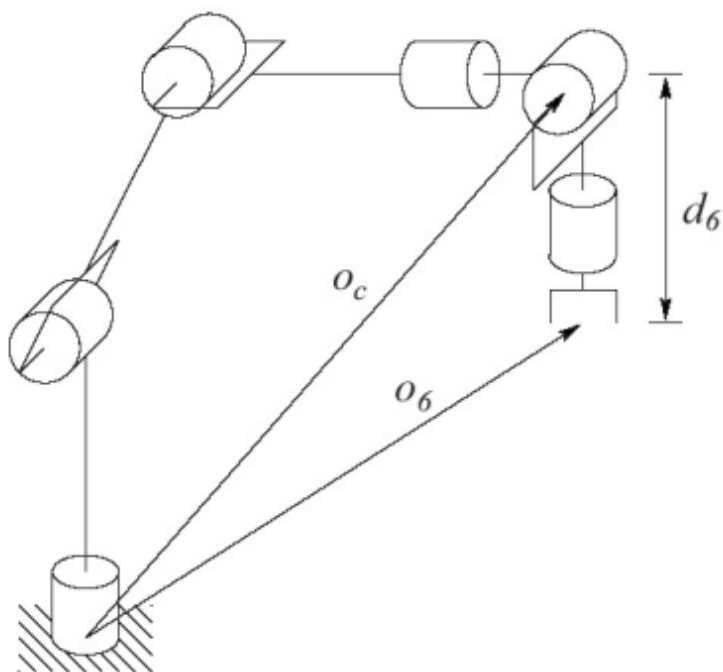
$$\begin{aligned}
a_{11} &= c_4 \cdot c_5 \cdot c_6 - s_4 \cdot s_6 - c_1 \cdot c_3 \cdot s_2 - c_1 \cdot c_2 \cdot s_3 \\
a_{12} &= -c_6 \cdot s_4 - c_4 \cdot c_5 \cdot s_6 \cdot s_1 \\
a_{13} &= c_4 \cdot s_5 \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 - c_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \\
a_{21} &= c_5 \cdot c_6 \cdot s_4 + c_4 \cdot s_6 - c_3 \cdot s_1 \cdot s_2 - c_2 \cdot s_1 \cdot s_3 \\
a_{22} &= c_4 \cdot c_6 - c_5 \cdot s_4 \cdot s_6 - c_1 \\
a_{23} &= s_4 \cdot s_5 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot s_1 - s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \\
a_{31} &= -c_6 \cdot s_5 \cdot c_2 \cdot c_3 - s_2 \cdot s_3 \\
a_{32} &= 0 \\
a_{33} &= c_5 \cdot c_3 \cdot s_2 + c_2 \cdot s_3
\end{aligned}$$

$$D_0^6 = \begin{Bmatrix} \frac{3 \cdot c_4 \cdot s_5}{50} & \frac{3 \cdot c_4 \cdot s_5}{50} \\ \frac{3 \cdot s_4 \cdot s_5}{50} & \frac{(29 \cdot s_1 - 30 \cdot s_1 \cdot s_2)}{100} \\ \frac{(6 \cdot c_5 + 23)}{100} & \frac{(30 \cdot c_2 + 37)}{100} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$



## 2.2. Kinematyka odwrotna

Kinematyka odwrotna [10] polega na znalezieniu wartości przegubowych ramienia robota dla danego położenia  $P$  oraz orientacji  $O$ . W celu przeprowadzenia analizy kinematyki odwrotnej ramienia zastosowano odsprężenie kinematyczne dzieląc ramię na dwie części. Pierwsza składa się z trzech pierwszych przegubów, a druga z 3 ostatnich przegubów. Podział został pokazany na rysunku 2.2. Zagadnienie kinematyki odwrotnej rozwiązano za pomocą analizy trygonometrycznej.



Rysunek 2.2. Schemat ramienia robotycznego, dla którego zastosowano odsprężenie kinematyczne [10]

Aby wyznaczyć pozycję końcową  $O$  należy zastosować wzór (2.13), gdzie przez pozycję  $O$  jest transformacją  $T_0^6$ , a  $R$  oznacza orientację końcówki ramienia.

$$O = O_c^0 + d_6 \cdot R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Należy teraz przekształcić wzór (2.13), tak aby obliczyć  $O_c$ , co ukazano wzorem (2.14).

$$O_c^0 = O - d_6 \cdot R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Następnie należy przekształcić równanie (2.14), tak aby zapisać składowe  $x, y, z$  w formie macierzowej i wyznaczyć pozycję 3 pierwszych przegubów, co pokazano w równaniu (2.15).

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_x - d_6 \cdot r_{13} \\ o_y - d_6 \cdot r_{23} \\ o_z - d_6 \cdot r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

W celu wyznaczenia macierzy orientacji należy rozbić macierz rotacji na 2 elementy, co pokazano w równaniu (2.16).

$$R = R_0^3 R_3^6 \quad (2.16)$$

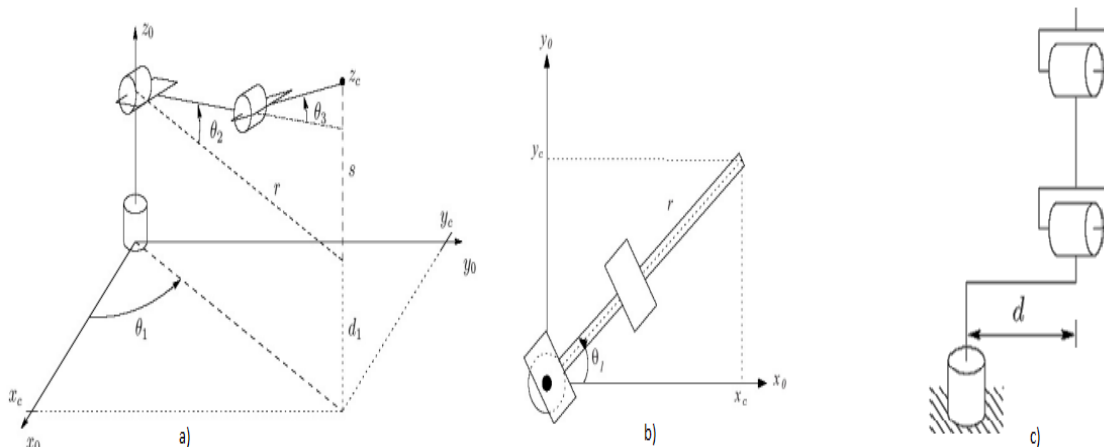
Następnie należy przekształcić równanie (2.16), tak aby wyznaczyć orientację 3 ostatnich przegubów, co widać we wzorze (2.17).

$$R_3^6 = (R_0^3)^{-1} R = (R_0^3)^T R \quad (2.17)$$

Aby opisać zależności kątowe wykorzystano funkcję  $atan2$ , którą zdefiniowano w równaniu 2.18.

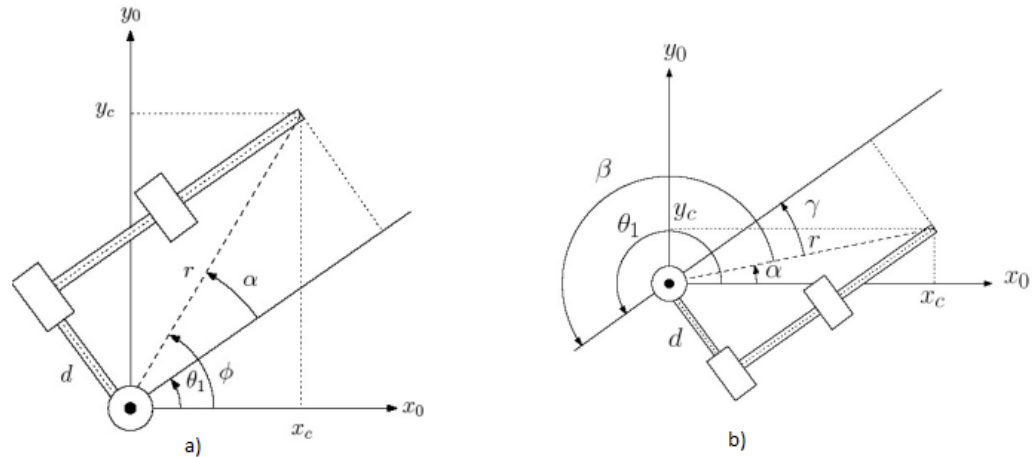
$$atan2(y, x) = \begin{cases} -atan2(-y, x) & y < 0 \\ \pi - atan(-y/x) & y \geq 0, x < 0 \\ atan(y/x) & y \geq 0, x \geq 0 \\ \pi/2 & y > 0, x = 0 \\ \text{undefined} & y = 0, x = 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

Trzy pierwsze wartości przegubowe określają pozycję manipulatora, a wszystkie zależności wykorzystane w dalszych wzorach pokazano na rysunku 2.3.



Rysunek 2.3. Zależności kątowe pierwszych trzech przegubów. a) rzut izometryczny z pokazaniem kątów, b) rzut z góry z pokazaniem kąta  $\theta_1$ , c) pokazanie odsunięcia osi obrotu kolejnych członów od  $\theta_1$  [10]

Należy jednak pamiętać, że dla takiej konfiguracji ramienia z odsunięciem osi obrotu drugiego członu o odległość  $d$ , należy rozważyć dwa przypadki pokazane na rysunku 2.4.



Rysunek 2.4. Dwie możliwe konfiguracje ramienia. a) ramię po lewej w górze, b) ramię po prawej na dole [10]

Za pomocą trygonometrii można określić wartość pierwszego kąta przegubu  $\theta_1$  dla obu przypadków. We wzorze (2.19) ukazano wyprowadzoną zależność kątową dla przypadku a) z rysunku 2.4, natomiast we wzorze (2.20) widnieje wyprowadzona zależność dla przypadku b) z rysunku 2.4.

$$\text{Konfiguracja a) : } \theta_1 = \text{atan2}(x_c, y_c) - \text{atan2}(\sqrt{x_c^2 + y_c^2 - d^2}, d), \quad (2.19)$$

$$\text{Konfiguracja b) : } \theta_1 = \text{atan2}(x_c, y_c) + \text{atan2}(-\sqrt{x_c^2 + y_c^2 - d^2}, -d) \quad (2.20)$$

Następnym krokiem jest wyznaczenie zależności dla kąta  $\theta_3$  w sposób pokazany we wzorach od (2.21) do (2.24).

$$\theta_3 = \text{atan2}(D, \pm\sqrt{1 - D^2}), \quad (2.21)$$

$$D = (r^2 + s^2 - a_2^2 - a_3^2)/2 \cdot a_2 \cdot a_3, \quad (2.22)$$

$$r = x_c^2 + y_c^2 - d^2, \quad (2.23)$$

$$s = z_c - d_1 \quad (2.24)$$

Korzystając z wcześniej wprowadzonych oznaczeń, wyprowadzono zależność kąta  $\theta_2$  w równaniu (2.25).

$$\theta_2 = \text{atan2}(r, s) - \text{atan2}(a_2 + a_3 \cdot \cos(\theta_3), a_3 \cdot s_3) \quad (2.25)$$

Pozostałe wartości kątów przegubów 4, 5 i 6 zostały wyprowadzone korzystając z wcześniej rozpisanych zależności (wzór 2.9) i własności kątów Eulera, a końcowe zależności pokazane zostały we wzorach od (2.26) do (2.28). Należy pamiętać, że ostatnia wartość przegubowa w przypadku takiej konfiguracji kinematycznej zawsze wynosi 0.

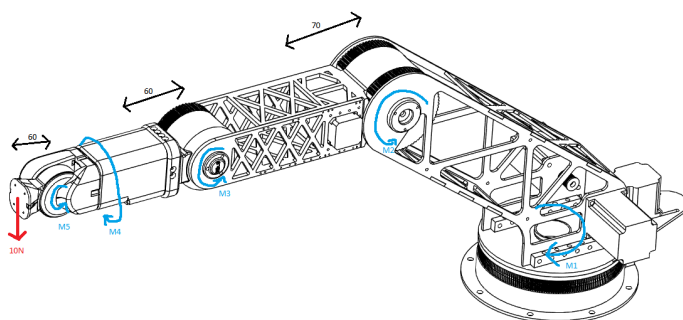
$$\theta_4 = \text{atan2}(-t_{13}, -t_{23}), \quad (2.26)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(t_{33}, \pm\sqrt{t_{13}^2 + t_{23}^2}), \quad (2.27)$$

$$\theta_6 = 0 \quad (2.28)$$

### 2.3. Obliczenia projektowo-konstrukcyjne

Jednym z ważniejszych etapów projektowych jest dobranie odpowiednich silników konstrukcji. W przypadku dobrania silników, których momenty nie będą w stanie obrócić ramienia robotycznego, precyzyjne sterowanie ramieniem w otwartej pętli sterowania nie będzie możliwe ze względu na 'gubienie kroków' silników krokowych. Na rysunku 2.5 zaznaczono kolorem niebieskim momenty poszczególnych członów, kolorem czarnym odsunięcie środka masy przegubów od ich osi obrotu, natomiast kolorem czarnym oznaczono dodatkowe obciążenie o wartości 1 kg na końcówce ramienia robotycznego.



Rysunek 2.5. Schematyczne rozrysowanie momentów silników ramienia robotycznego oraz odsunięcie ich środków mas od ich osi obrotów.

Do poprawnego działania ramienia robotycznego potrzebne są silniki o odpowiedniej mocy wynikającej z obciążeń statycznych i dynamicznych. Dokonano obliczeń statycznych dla przegubów numer 5, 3, 2, zapisując wzory ogólne oznaczone od 2.29 do 2.32.

$$M = F \cdot r = m \cdot g \cdot r [Nm], \quad (2.29)$$

$$M_5 = r_5 \cdot m_5 \cdot g [Nm], \quad (2.30)$$

$$M_3 = r_3 \cdot m_3 \cdot g + (d_4 + r_5) \cdot m_5 \cdot g [Nm], \quad (2.31)$$

$$M_2 = r_2 \cdot m_2 \cdot g + (a_2 + d_4 + r_5) \cdot m_5 \cdot g + (a_2 + r_3) \cdot m_3 \cdot g [Nm] \quad (2.32)$$

Dla pierwszych czterech przegubów wykonano obliczenia dynamiczne, wzory ogólne oznaczone są numerami od (2.33) do (2.42).

$$\tau = I \cdot \epsilon = m \cdot r^2 \cdot \epsilon, \quad (2.33)$$

$$\tau_4 = m_5 \cdot r_5^2 \cdot \epsilon [Nm], \quad (2.34)$$

$$\tau_1 = m_5 \cdot r_{j5}^2 \cdot \epsilon + m_4 \cdot (r_{j4})^2 \cdot \epsilon + m_3 \cdot (r_{j3})^2 \cdot \epsilon + m_2 \cdot (r_0)^2 \cdot \epsilon, \quad (2.35)$$

$$(2.36)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & m_2 a_2^2 \frac{d^2}{dt^2} \theta_2 + m_3 (a_2^2 + 2a_2 l_3 \cos(\theta_3) + l_3^2) \frac{d^2}{dt^2} \theta_2 + m_3 (a_2 l_3 \cos(\theta_3) + l_3^2) \frac{d^2}{dt^2} \theta_3 \\ & - m_3 a_2 l_3 \left( 2 \frac{d}{dt} \theta_2 \frac{d}{dt} \theta_3 + \left( \frac{d}{dt} \theta_3 \right)^2 \right) \sin(\theta_3) + m_2 g a_2 \cos(\theta_2) + m_3 g l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\tau_3 = m_3 (a_2 l_3 \cos(\theta_3) + l_3^2) \frac{d^2}{dt^2} \theta_2 + m_3 l_3^2 \frac{d^2}{dt^2} \theta_3 + m_3 l_3 a_2 \left( \frac{d}{dt} \theta_2 \right)^2 \sin(\theta_3) + m_3 g l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \quad (2.38)$$

$$r_{j5} = a_1 + a_2 + d_4 + a_5 + r_5, \quad (2.39)$$

$$r_{j4} = a_1 + a_2 + a_3 + r_4, \quad (2.40)$$

$$r_{j3} = a_1 + a_2 + r_3, \quad (2.41)$$

$$l_3 = a_3 + a_4 + a_5 \quad (2.42)$$

Poniżej wypisano przyjęte wartości:

$$r_{j5} = 0.94$$

$$r_{j4} = 0.82$$

$$r_{j3} = 0.66$$

$$a_2 = 0.3$$

$$l_3 = 0.29$$

$$\epsilon = 5[\text{rad}/\text{s}^2]$$

$$m_5 = 1.35$$

$$m_4 = 1.12[\text{kg}]$$

$$m_3 = 1.78[\text{kg}]$$

$$m_2 = 9.88[\text{kg}]$$

$$r_5 = 0.06[\text{m}]$$

$$r_4 = 0.06[\text{m}]$$

$$r_3 = 0.07[\text{m}]$$

$$r_0 = 0[\text{m}]$$

Następnie korzystając z wcześniej zapisanych wzorów określono maksymalne momenty obrotowe silników, co opisano wzorami od 2.43 do 2.47.

$$M_5 = 0.06 \cdot 1.35 \cdot 10 = 0.8[\text{Nm}], \quad (2.43)$$

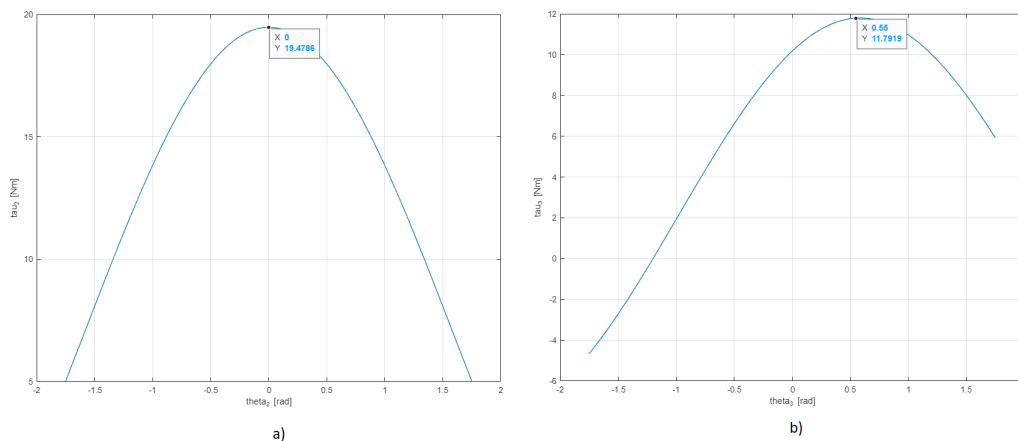
$$M_3 = 0.06 \cdot 1.78 \cdot 10 + (0.06 + 0.06) \cdot 1.35 \cdot 10 = 2.69[\text{Nm}], \quad (2.44)$$

$$M_2 = 0.07 \cdot 1.88 \cdot 10 + (0.3 + 0.23 + 0.06) \cdot 1.35 \cdot 10 + (0.3 + 0.07) \cdot 1.78 \cdot 10 = 15.88[\text{Nm}], \quad (2.45)$$

$$\tau_4 = 1.35 \cdot 0.06^2 \cdot 5 = 0.024[\text{Nm}], \quad (2.46)$$

$$\tau_1 = 1.35 \cdot 0.94^2 \cdot 5 + 1.12 \cdot 0.82^2 \cdot 5 + 1.78 \cdot 0.66^2 \cdot 5 + 0 = 13.61[\text{Nm}] \quad (2.47)$$

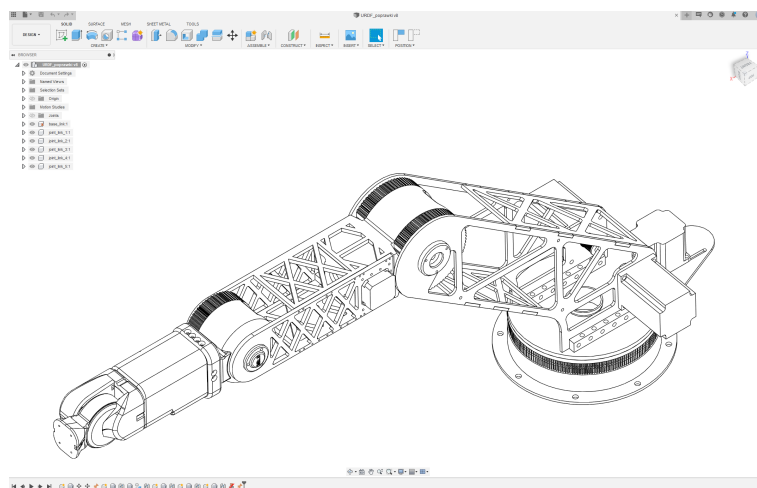
Aby obliczyć wartości  $\tau_2$  oraz  $\tau_3$  skorzystano z oprogramowania 'MATLAB', a symulacyjnie uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 2.6. Założone przyspieszenie kątowne obu przegubów wynosi  $5 [\text{rad}/\text{s}^2]$ , natomiast założona prędkość kątowna obu przegubów wynosi  $5 [\text{rad}/\text{s}]$ . Maksymalne momenty dynamiczne wynoszą odpowiednio  $19.48 [\text{Nm}]$  dla przegubu drugiego przy kącie równym  $0 [\text{rad}]$  oraz  $11.79 [\text{Nm}]$  dla przegubu trzeciego przy kącie równym  $0.55 [\text{rad}]$ .



Rysunek 2.6. Wyniki symulacji obciążeń dynamicznych. a) Zależność  $\tau_3$  od  $\theta_3$ , b) Zależność  $\tau_2$  od  $\theta_2$ .

## 2.4. Projekt elementów nośnych

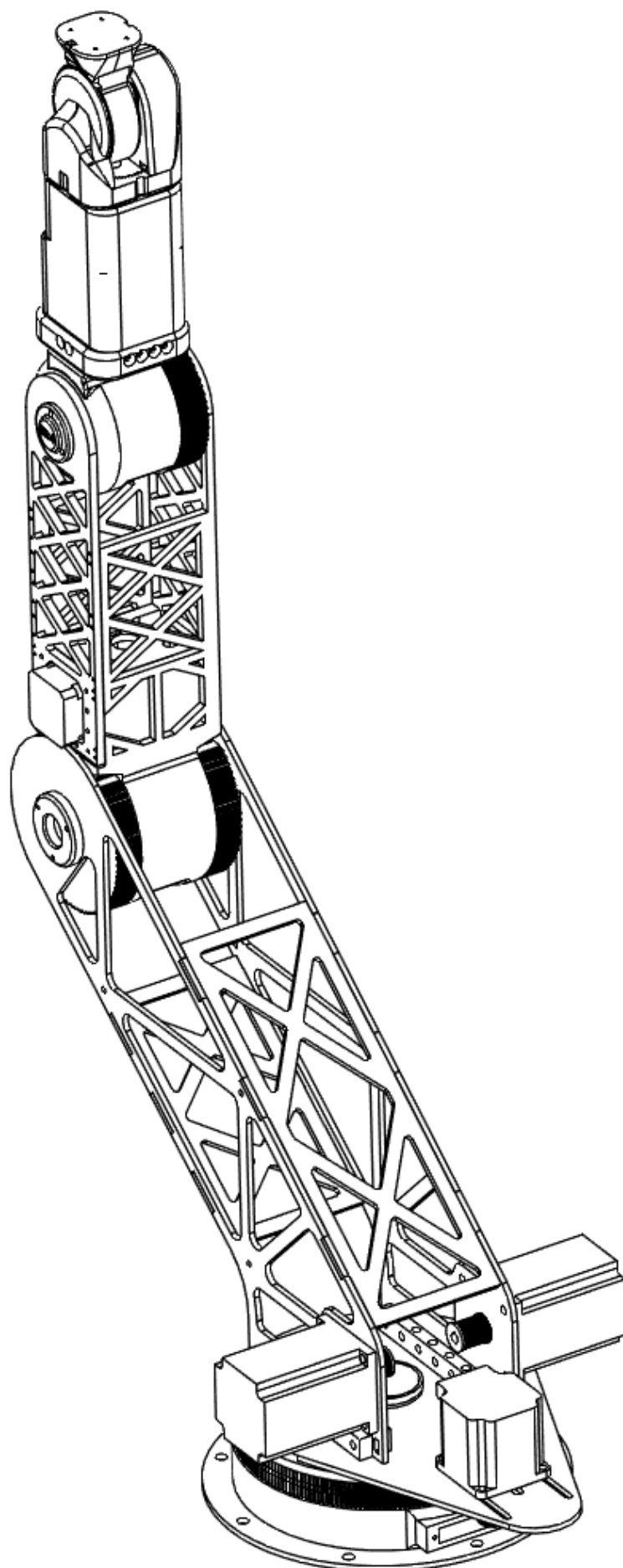
Wszystkie elementy mechaniczne zostały zaprojektowane w programie Autodesk Fusion360 [11]. Oprogramowanie to bazuje na rozwiązaniach chmurowych i jest przeznaczone do modelowania 3D (zarówno CAD jak i CAM) wytwarzania produktów i ich symulacji. Posiada również pełną integrację z symulacjami (termodynamicznymi, statycznymi, dynamicznymi itd.) oraz narzędzia umożliwiające efektywne zarządzanie dużymi projektami. Jego interfejs jest prosty, przejrzysty oraz intuicyjny co znacznie przyspiesza pracę i proces nauki oprogramowania. Zaprojektowany w nim łańcuch kinematyczny, wraz z właściwościami takimi jak rozkład masy i użyte materiały, można wyeksportować w prosty sposób do innych oprogramowań (np. dalej opisywany urdf) poprzez odpowiednie wtyczki. Dzięki odpowiedniemu zarządzaniu projektem można zautomatyzować proces tworzenia rysunków złożeniowych. Widok interfejsu Fusion360 został przedstawiony na rysunku 2.7.



Rysunek 2.7. Widok uporządkowanego projektu w Fusion360

Poniżej na rysunku 2.8 pokazano model wykonanego ramienia robotycznego w rzucie izometrycznym.





Rysunek 2.8. Uproszczony model końcowy zaprojektowanego ramienia robotycznego

W dalszej części zaprezentowano rysunki złożeniowe zaprojektowanych przegubów bez śrub, nakrętek, pasów zębatych i ich napinaczy. Profil zęba dobranych pasów zębatych musi być na tyle duży, aby możliwe było precyzyjne wydrukowanie jego koła zębatego, dlatego zdecydowano się na użycie pasa zębatego T5 o szerokości 16mm pokazanego na rysunku 2.9. Rysunki złożeniowe mają charakter poglądowy.

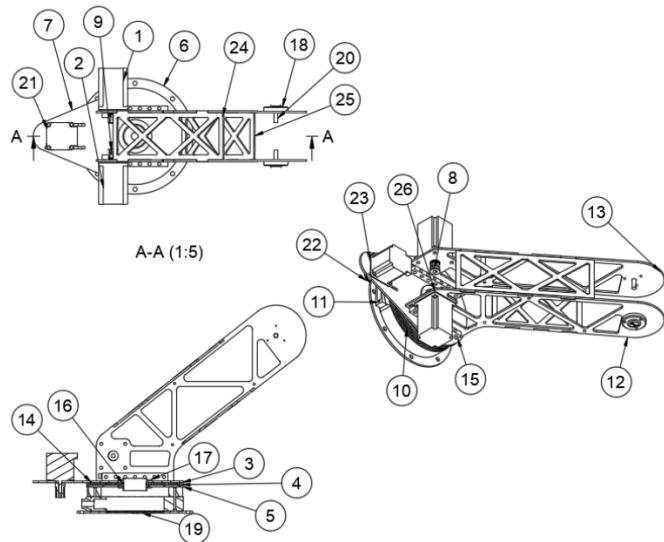


Rysunek 2.9. Zamknięty pas zębaty T5 o szerokości 16mm przekładający ruch silnika na pierwszy człon ramienia robotycznego.

### **Projekt członu numer 1**

Największą trudnością w projektowaniu okazało się połączenie schludnego wyglądu z możliwościami finansowymi i produkcyjnymi. W całej konstrukcji przewody prowadzone są centralnie (żaden przewód nie znajduje się poza obrysem bryły manipulatora). Dla małej liczby przewodów nie jest to zbyt problematyczne, ale dla pierwszego przegubu, przez który musi przejść 30 przewodów o przekroju od  $2 \text{ mm}^2$  do  $3.5 \text{ mm}^2$  pojawia się trudność. Opisywana dalej konstrukcja przegubu numer 1 została pokazana na rysunku 2.10. Przewody, umieszczone w peszlu, poprowadzono centralnie w konstrukcji kratowej, a następnie zaprojektowano (na podstawie gotowego prefabrykatu w postaci grubościennej rury stalowej) specjalne przeniesienie napędu umożliwiające przełożenie przez niego przewodów w peszlu. Wytoczona rura stalowa zabezpieczona jest dwoma pierścieniami Segera. Aby ograniczyć koszty w projekcie zostało zbudowane własne łożysko wykorzystujące stalowe kulki o średnicy  $5 \text{ mm}$ . Metalowe kulki położone są między dwiema stalowymi płytami o grubości  $4 \text{ mm}$  każda, poruszając się w specjalnych korytkach wydrukowanych w 3D. Napinanie pasa napędzającego następuje poprzez odpowiednie umieszczenie i przy mocowanie silnika krokowego. W górnym panelu zaprojektowano odpowiednie szczeliny umożliwiające prostą regulację napięcia pasa napędowego. Przełożenie przegubu pierwszego wynosi 16.25:1, więc moment obrotowy wynosi  $20.5 \text{ [Nm]}$ . Niestety wadą takiego rozwiązania jest kąt opasania koła zębatego napędzającego wynoszący  $120^\circ$  (najwyższa sprawność przeniesienia napędu występuje dla  $180^\circ$  i spada proporcjonalnie do kąta opasania). Mocowanie do miejsca pracy następuje poprzez 7 śrub M8.

Parts List				
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Nema34	4 N*m torque	Aluminum
2	1	Nema34 (1)	4 N*m torque	Aluminum
3	1	Ball_guide	Ball trough	
4	1	Ball_guide (1)	Ball trough	
5	1	Bottom_plate		Steel
6	1	Mount_plate		Steel
7	1	Upper_plate		Steel
8	1	GearT5x12_8mm		ABS Plastic
9	1	GearT5x12_8mm (1)		ABS Plastic
10	1	GearT5x195		ABS Plastic
11	1	Base		ABS Plastic
12	1	Side_support		Steel
13	1	Side_support (1)		
14	1	Balls	80 pieces, each 5mm diameter	Aluminum
15	1	Side_support_fixing		ABS Plastic
16	1	Sliding_sleeve		Aluminum
17	1	Joint_1_fixing		Steel
18	2	Shaft_cover		ABS Plastic
19	1	Bottom_cover		ABS Plastic
20	2	Shaft		Stainless Steel
21	1	Nema23		Aluminum
22	1	GearT5x12_5mm		ABS Plastic
23	1	Nema23_adapter		ABS Plastic
24	1	Top_truss		Steel
25	1	Bottom_truss		Steel
26	2	Nema34_adapter		ABS Plastic

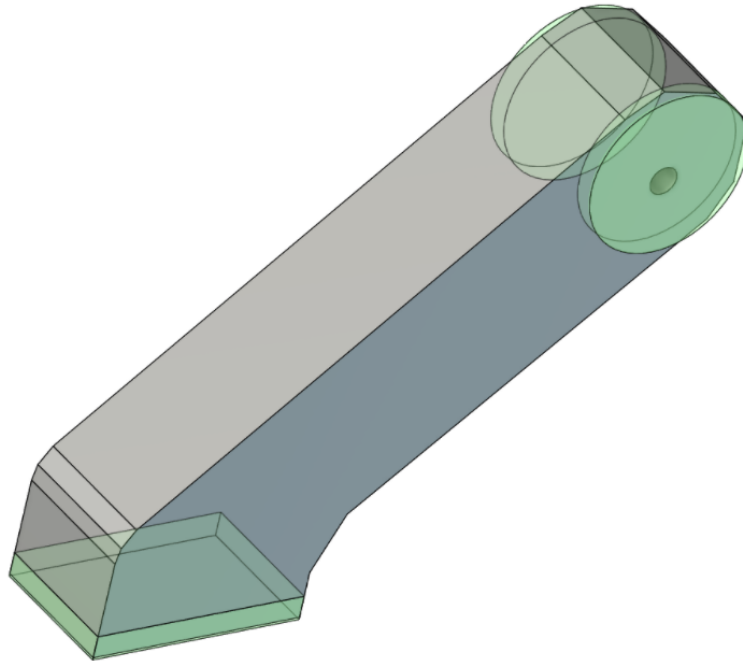


Rysunek 2.10. Rysunek złożeniowy pierwszego przegubu ramienia robotycznego.

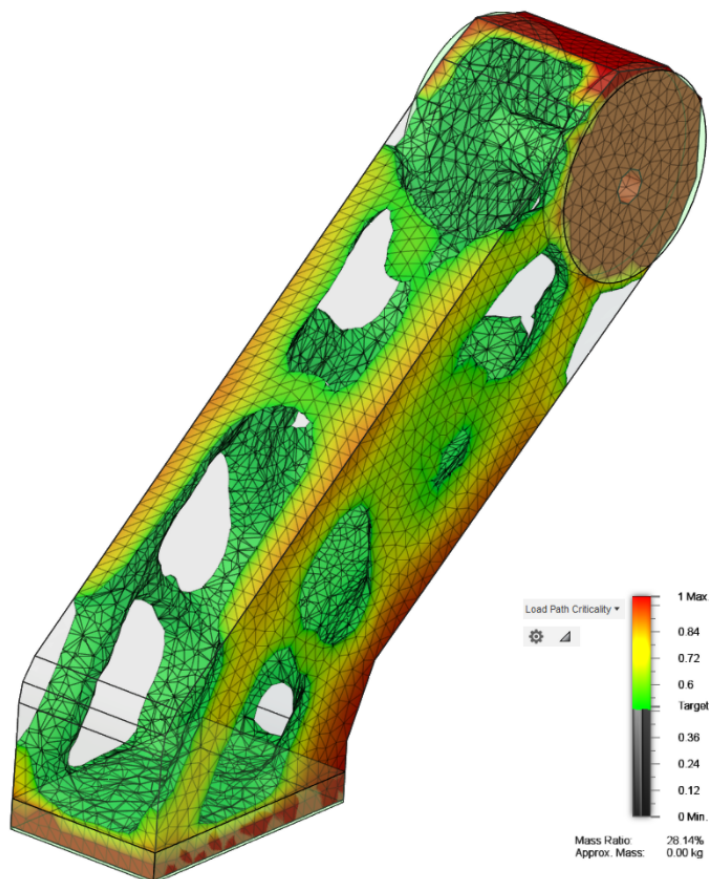
Warto zwrócić uwagę na umieszczenie trzech silników po przeciwnej stronie osi reszty ramienia. Dzięki temu rozwiązaniu łożysko odpowiadające za ruch obrotowy wokół osi ramienia jest równo obciążone i same ramię robotyczne może operować bez przykręcenia do stołu (choć jest to niewskazane). Odpowiedni rozkład masy pierwszych przegubów, zapewniona przez konstrukcję stalową i ciężkie silniki krokowe, jest kluczowa dla uzyskania sztywności i precyzji ruchu. Ze względu na zastosowanie konstrukcji kratowej nie istniała możliwość zaprojektowania przeciwwagi dla dalszych przegubów, stąd silniki drugiej osi muszą mieć moc wystarczającą do stałego utrzymania pozostałych przegubów. Silniki krokowe wykorzystane w tym przegubie, łącznie z ich sterownikami, zostały pozyskane przez zespół podczas wymiany krokowców na serwomechanizmy w frezarce CNC dzięki uprzejmości lokalnej firmy FIJALO-POLAND Cyprian Fijała.

### Projekt członów numer 2 i 3

Do zaprojektowania głównych elementów konstrukcji ramienia robotycznego (przenoszących największe obciążenia) wykorzystano narzędzie optymalizacji topologicznej[12]. Optymalizacja ta w na podstawie zestawu ograniczeń lub narzuconych cech usuwa materiał z bryły. Można wybrać ilość wybranego materiału z bryły i ustalić ostateczny kształt, jednak zwrócona przez algorytm bryła musi być wyprodukowana w sposób addytywny (poprzez druk 3D). Przebieg przykładowego procesu projektowania tą metodą przedstawiono na rysunkach 2.11 i 2.12.



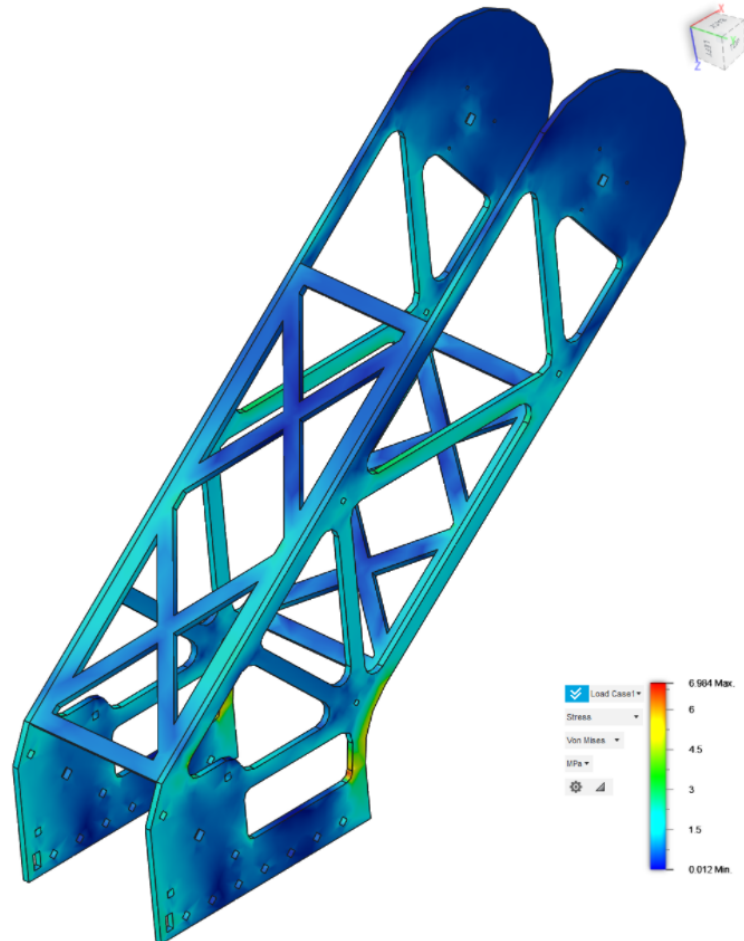
Rysunek 2.11. Zaprojektowana prymitywna bryła na podstawie założeń konstrukcyjnych.



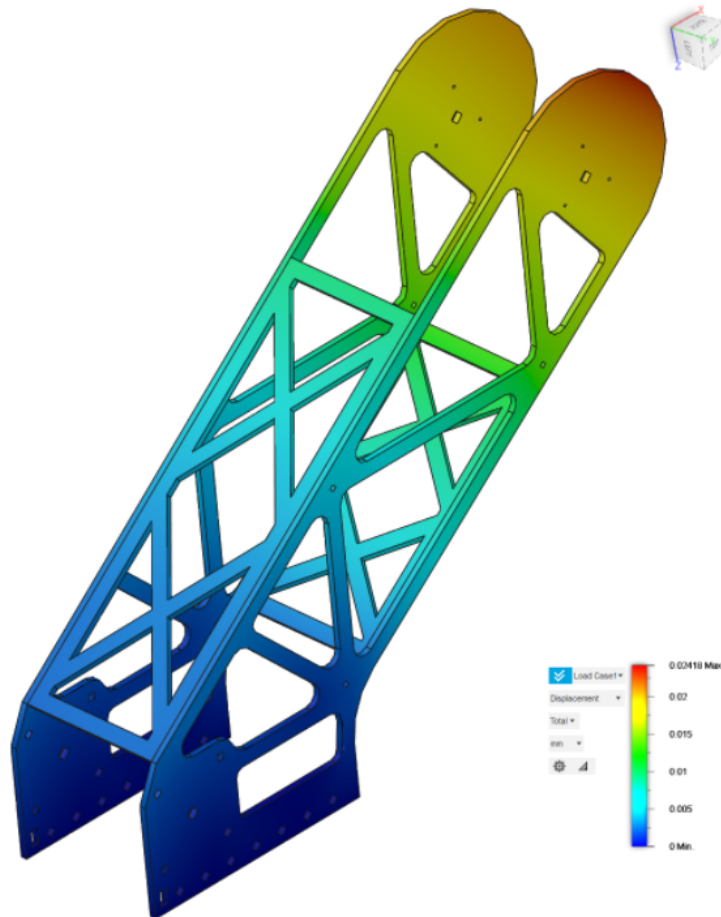
Rysunek 2.12. Kształt otrzymany przez algorytm optymalizacji topologicznej.

Aby uzyskać większą sztywność konstrukcji i ograniczyć koszt, zdecydowano się na zastosowanie stalowej blachy (stal konstrukcyjna 235) o grubości 4 mm i na tej podstawie dokonano analizy wytrzymałościowej z optymalizacją topologiczną oraz zaprojektowano spawaną konstruk-

cję z 4 elementów. Konstrukcję następnie sprawdzono poprzez analizę metodą elementów skończonych i uzyskano maksymalne przesunięcie od osi bryły wynoszące około 0.03 mm. Symulację przeprowadzono z odpowiednim współczynnikiem bezpieczeństwa oraz uwzględniono siły dynamiczne przy maksymalnie rozprostowanym ramieniu oraz maksymalnym przyspieszeniu. Przebieg procesu projektowego i wyniki symulacji zaprezentowano na rysunkach 2.13 i 2.14.

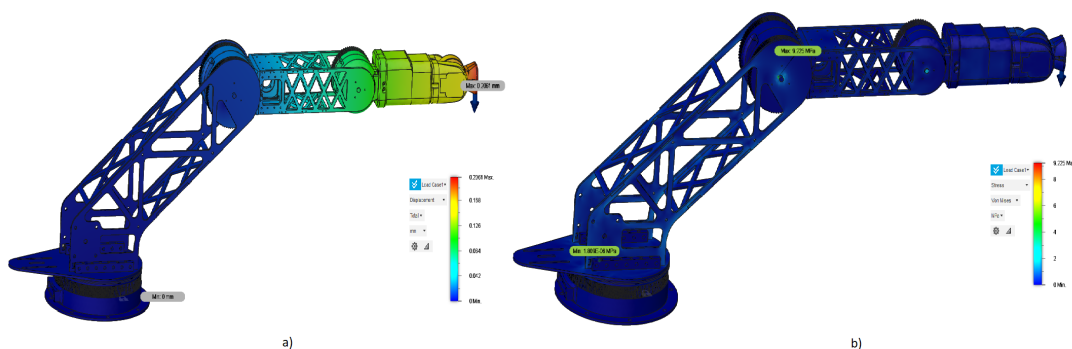


Rysunek 2.13. Symulacja naprężeń Von Mises zaprojektowanej konstrukcji na podstawie poprzednich symulacji i założeń projektowych.



Rysunek 2.14. Symulacja odkształceń otrzymanej końcowej bryły, przemieszczenie wyrażone w milimetrach.

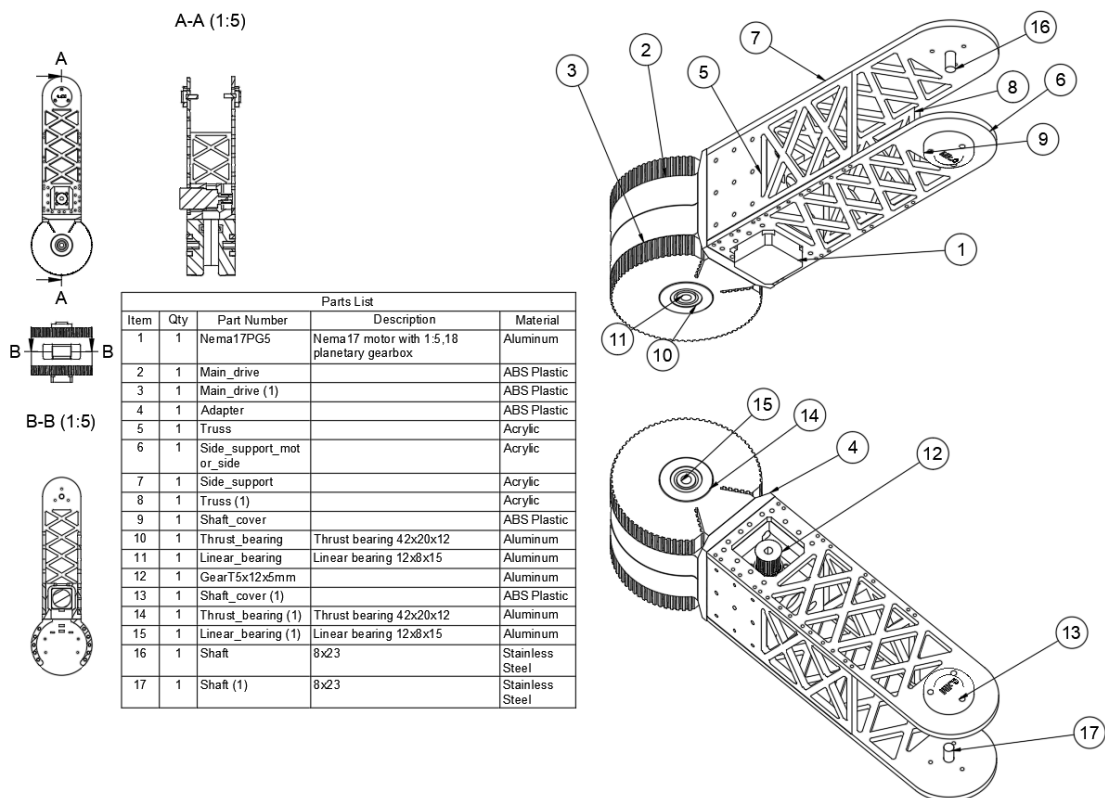
Dokonano również symulacji naprężeń i odkształceń całej konstrukcji, a jej wyniki pokazano na rysunku 2.15. Ze względu na niskie obciążenie w wysokości 1 kg na maksymalnym wysięgu ramienia robotycznego i odpowiednim materiałem udało się uzyskać przemieszczenie końca manipulatora wynoszące 0.2 mm.



Rysunek 2.15. Symulacja odkształceń otrzymanej końcowej bryły, przemieszczenie wyrażone w milimetrach.

Analityczną metodą zaprojektowano przegub 3 ramienia robotycznego, zoptymalizowanego pod pięciomilimetrowe szkło akrylowe skręcane śrubami M2. Kable w peszlu poprowadzono centrycznie wzdłuż kratownic. Przeguby łożyskowane są za pomocą łożysk wzdłużnych oraz pre-

czyjnego wałka w łożysku liniowym. Przeniesienie napędu obu przegubów realizowane jest na pasach zębatych T5. Na rys 2.16 elementy oznaczone numerami od 5 do 8 skręcane są do siebie za pomocą śrub M2 o wysokiej jakości wykonania, a do elementu oznaczonego numerem 4 specjalnymi wkrętami do tworzyw sztucznych. Ze względu na stosunkowo małe przenieszone obciążenie tego przegubu (maksymalnie około 3kg) konstrukcja ze szkła akrylowego, mimo swojej lekkości, jest wystarczająco sztywna dla prezentowanego prototypu. Przełożenie silnika zrealizowane jest za pomocą przekładni planetarnej, mocowanej na silniku, oraz pasa zębatego. Łączne przełożenie siły przegubu trzeciego wynosi 25.9:1, więc moment obrotowy przegubu wynosi 10.36 Nm, natomiast łączne przełożenie siły przegubu drugiego wynosi 6.5:1, więc moment obrotowy przegubu wynosi 52 Nm.

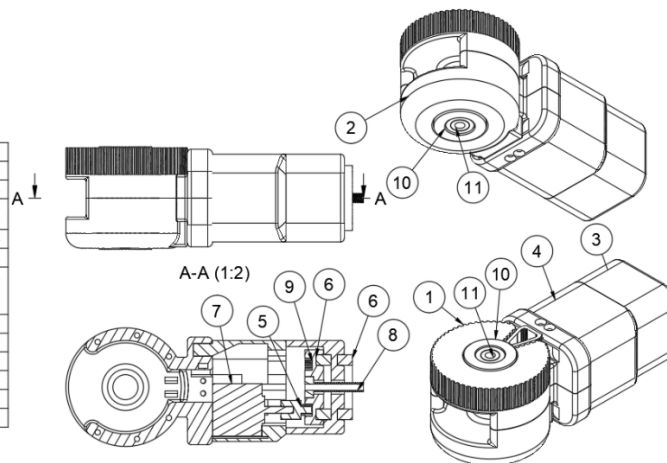


Rysunek 2.16. Zaprojektowana konstrukcja przegubu numer 3.

### Projekt przegubu numer 4

Zgodnie z głównym założeniem projektowym o schowaniu przewodów w środku ramienia robotycznego, pomimo tego, że przegub porusza się dookoła osi Z, musi zawierać w sobie wiązkę przewodów. Zdecydowano się na wykonanie własnej przekładni dzięki której można odsunąć silnik od osi obrotu wyjścia przegubu oraz można w niej poprowadzić przewody. Przegub czwarty do przegubu piątego mocowany jest za pomocą wytoczonej w środku śruby M8 (średnica wytoczenia 5 mm) i skręcony za pomocą nakrętki z klejem do gwintów. Główną wadą takiego rozwiązania jest nierozbieralność. Przegub łożyskowany jest na dwóch łożyskach wzdluznych, dzięki czemu śruba może być dokręcona na tyle mocno, aby luz był zaniedbywalny. Widok projektu przegubu numer 4 pokazano na rysunku 2.17. Łączne przełożenie przekładni wynosi 4:1, więc moment obrotowy przegubu wynosi 1.6 Nm.

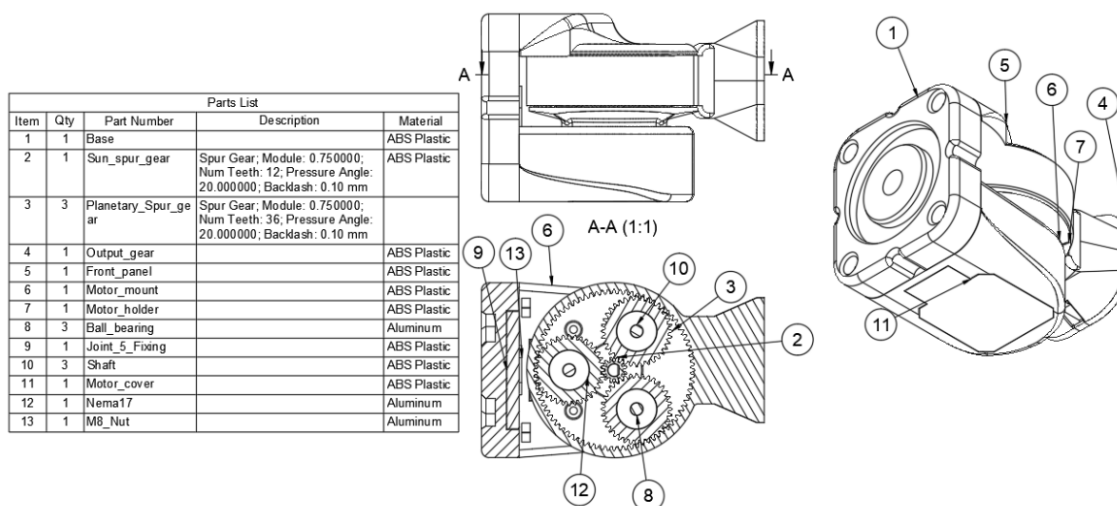
Parts List				
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Main_drive		ABS Plastic
2	1	Main_drive_support		ABS Plastic
3	1	Upper_body		ABS Plastic
4	1	Mid_body		ABS Plastic
5	1	Spur_gear_10	Spur Gear; Module: 0.750000; Num Teeth: 10; Pressure Angle: 20.000000; Backlash: 0.00 mm	ABS Plastic
6	2	Thrust_bearing	Thrust bearing 4x20x12	Aluminum
7	1	Nema17		Aluminum
8	1	M8x40		Steel
9	1	Spur_gear_40		ABS Plastic
10	2	Thrust_bearing (1)	Thrust bearing 4x20x12	Aluminum
11	2	Linear_bearing	Linear bearing 12x8x15	Aluminum



Rysunek 2.17. Zaprojektowana konstrukcja przegubu numer 4.

### Projekt przegubu numer 5

Aby osiągnąć jak największy udźwig ramienia robotycznego zdecydowano się na zaprojektowanie i wydrukowanie własnej przekładni planetarnej (w celu obniżenia masy i zwielokrotnienia momentu obrotowego silnika krokowego). Koła obiegowe łożyskowane są za pomocą łożysk wzdłużnych. Najmniejsze koło zębate przenosi przez nie napęd na jarzmo zewnętrzne, które za pomocą technologii druku 3D mogło zostać wydrukowane jako jeden element. Na końcu tego elementu znajduje się uniwersalne mocowanie na chwytak. Niestety główną wadą takiej przekładni jest ograniczenie w postaci minimalnego modułu koła zębatego - w technologii FDM wynosi ono około 0.75. Jeżeli wykorzystano by technologię SLA, można by uzyskać zdecydowanie mniejszy moduł i co za tym idzie, większe przełożenie. Przełożenie przekładni wynosi 8:1, więc moment obrotowy przegubu wynosi 2.4 Nm. Konstrukcję przedstawiono na rysunku 2.18.



Rysunek 2.18. Zaprojektowana konstrukcja przegubu numer 5.

Rysunki techniczne elementów zostały umieszczone na końcu pracy. Ograniczono się do zwiarytowania ważniejszych elementów, ponieważ części zaprojektowane pod technologię druku 3D są bardzo skomplikowane.



### ***Dobór odpowiedniego mechanizmu chwytającego***

Dokonano przeglądu otwarto-źródłowych chwytaków i zdecydowano się na konstrukcję zaprojektowaną pod przenoszenie butelek. Zęby chwytaka, pokazanego na rysunku 2.19, pokryte są odlewem silikonowym, który odpowiednio dociśnięty do przedmiotu zwiększa tarcie i umożliwia pewniejszy chwyt. Jego odpowiednia masa, gabaryt oraz korzystanie tylko z jednego modelarskiego serwomechanizmu przeważało nad jego wyborem.

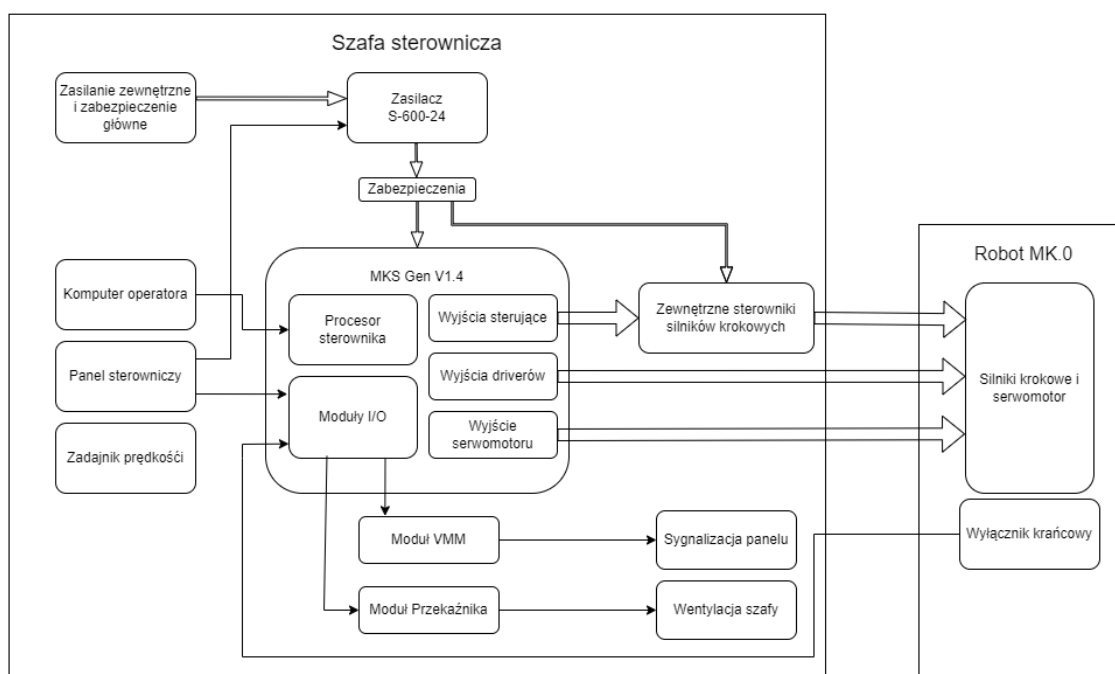


Rysunek 2.19. Wybrany mechanizm chwytający. Oryginalna nazwa : *Mantis Gripper*[13]

### 3. PROJEKT KONSTRUKCJI ELEKTRYCZNO - ELEKTRONICZNEJ ROBOTY MK.0 (DOMINIK LAMCHA)

#### 3.1. Ogólna struktura blokowa układu elektryczno-elektronicznego

Przy projektowaniu zdecydowano się na użycie silników krokowych w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego. Oznaczało to konieczność stosowania sterowników owych napędów. Dla stabilności systemu bardzo ważna była pewność niegubienia kroków, gdyż tylko na ich podstawie sterownik wnioskuje o aktualnym położeniu. Zdecydowano się na użycie wielu części pochodzących z rozbiórki starych szaf sterowniczych, by zminimalizować koszty budowy. Schemat ideowy połączeń ukazano na rysunku 3.1.



Rysunek 3.1. Schemat poglądowy sekcji elektrycznej

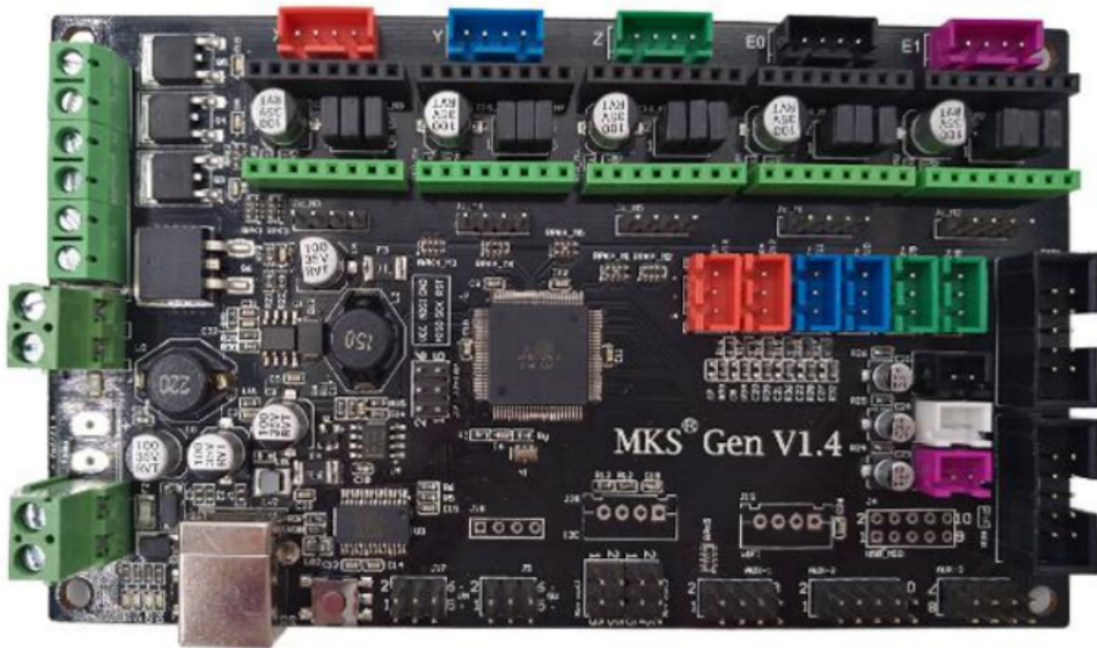
Profesjonalny schemat połączeń zrealizowany przy pomocy programu EPLAN jest zawarty na końcu pracy. Projekt składa się z następujących części

- jednostka sterująca,
- silniki,
- sterowniki silników,
- zasilacz,
- zabezpieczenia.

#### 3.2. Jednostka sterująca

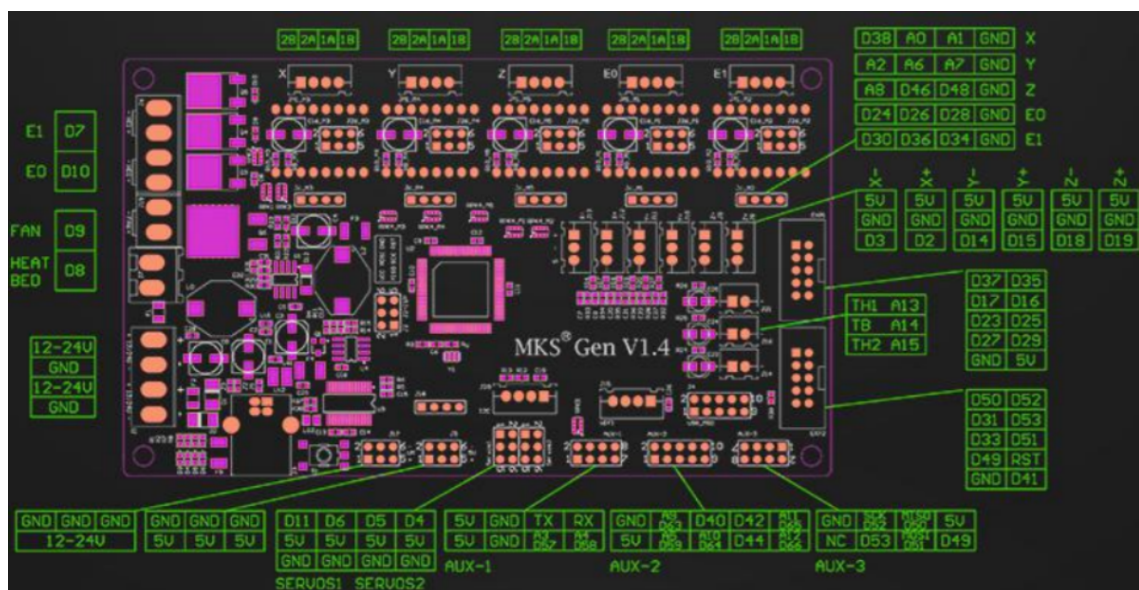
Do obsługi ruchu i peryferiów urządzenia służy zazwyczaj sterownik programowalny. Zastosowanie go daje przede wszystkim wysoką niezawodność i bezpieczeństwo działania. Niestety dedykowane PLC które nadawałyby się do obsługi ramienia są poza zasięgiem cenowym niniejszej

szej pracy inżynierskiej. Zdecydowano się na użycie sterownika zbudowanego na procesorze Atmega 2560 taktowanego zegarem 16 Mhz. Nie jest to jednak typowy niskobudżetowy mikrokontroler (Raspberry pi lub Arduino). Do obsługi silników użyto płytki MKS Gen V1.4 pokazanej na rysunku 3.2. Rozkład nóżek wyżej opisywanego układu, wraz z ich oznaczeniami, pokazano na rysunku 3.3. Układ ten został zaprojektowany do obsługi drukarek 3D. Jest przygotowany do obsługi 5 silników krokowych, 4 serwomotorów oraz wielu peryferiów takich jak wyświetlacz LCD czy podgrzewanie stołu drukarki.



Rysunek 3.2. Zdjęcie płytki MKS Gen V1.4[14]

Układ komunikuje się z komputerem za pomocą portu szeregowego USB. Jest zasilany napięciem stałym 24V. Zaprojektowano go do sterowania dedykowanymi driverami silników krokowych, ale układ ma możliwość wyprowadzenia pinów Step, Enable, Direction, które konieczne są do obsługi zewnętrznych sterowników.



Rysunek 3.3. Schemat płytki MKS Gen V1.4

Obecnie wykorzystywane są wszystkie piny obsługi silników krokowych oraz jeden serwo-motor. Sterownik obsługuje także sygnalizację pracy, stopu oraz alarmów. Do jego wejść wpięte są przyciski szafy sterowniczej oraz potencjometr dzięki któremu istnieje możliwość płynnej regulacji jednego z napięć wejściowych.

### 3.3. Silniki i ich sterowniki

#### *Silniki*

Do napędzania konstrukcji zdecydowano się na użycie silników krokowych głównie ze względu na ich zdecydowanie mniejszy koszt w porównaniu do serwomotorów. Przykład użytego w projekcie silnika przedstawiono na rysunku 3.4.



Rysunek 3.4. Silnik krokowy napędzający pas zębaty podstawy

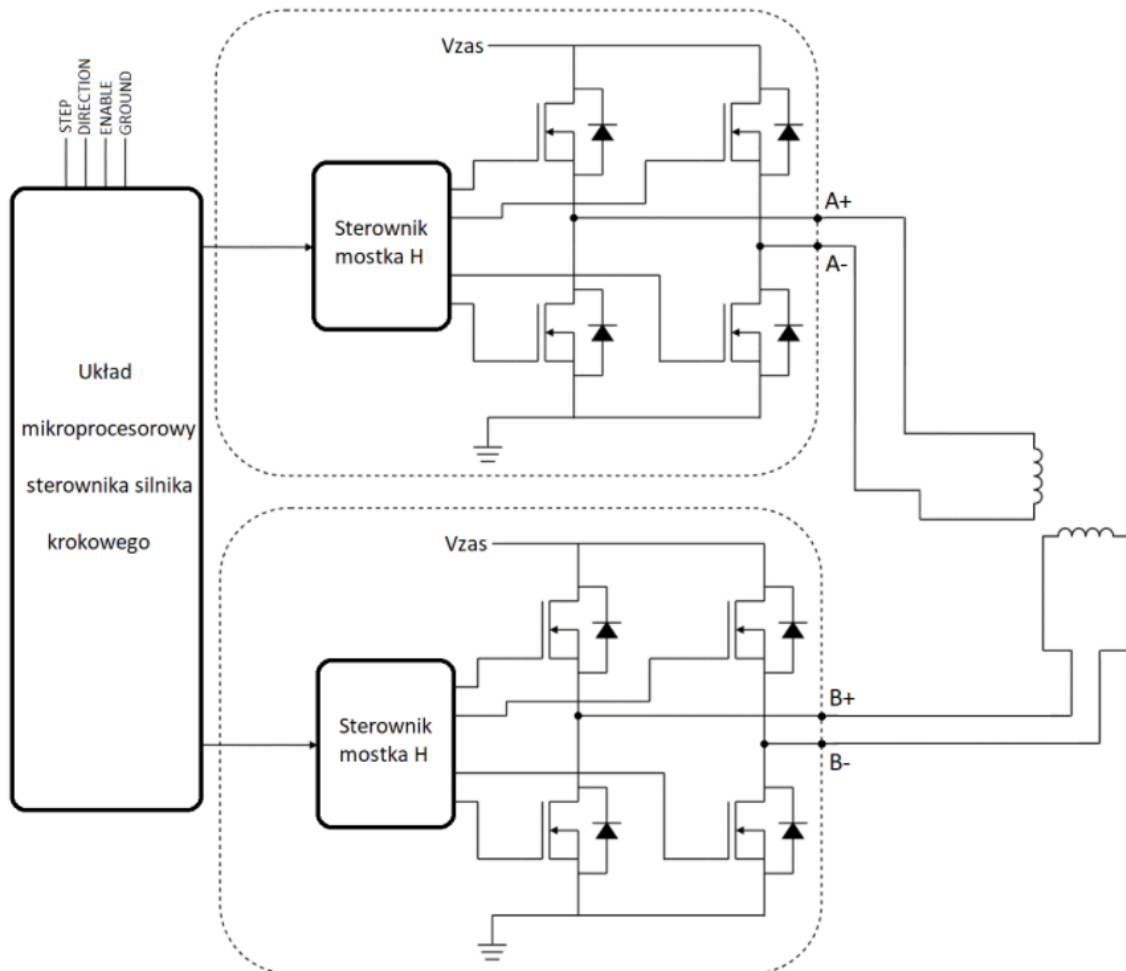
Ze względu na prostotę sterowania, cenę i stosunkowo wysoką niezawodność (w odniesieniu do ceny) zdecydowano się wyposażyć ramię w 6 silników krokowych działających w otwartej pętli sterowania. Sterowanie jest precyzyjne, jeżeli silniki nie przegrzewają się oraz nie przekroczono maksymalnego udźwigu ramienia.

#### *Sterowniki silników*

Silniki krokowe wymagają użycia sterowników do poprawnego funkcjonowania. W niniejszym projekcie używane jest 6 tego typu urządzeń. Sterownik silnika krokowego jest urządzeniem, który zasila uzwojenia silnika w zadanej przez operatora kolejności i częstotliwości. Wejścia tych urządzeń umożliwiają zadawania niskoprądowych impulsów i stanów napięcia.

W typowym sterowniku występują 3 wejścia sterujące. Pierwszym z nich jest wejście zezwalające ( ENABLE ), które warunkuje pracę silnika. Wejście kierunku ( DIRECTION ) określa

w którą stronę będzie kręcił się silnik, natomiast wejście impulsowe ( STEP ) służy do zadawania liczby i częstotliwości kroków, które on wykona. Sterownik mikroprocesorowy oblicza, w jaki sposób uruchamiać poszczególne gałęzie tranzystorowych mostków H. Sterowniki samych mostków przyjmują na swoje wejście informacje o tym, w jaki sposób spolaryzować cewkę silnika. Schemat sterownika silnika przedstawiono na rysunku 3.5.



Rysunek 3.5. Schemat ideowy sterownika silnika krokowego

Do wyjścia drivera podłączamy cewki silnika krokowego. W aplikacji MK.0 drivery zewnętrzne jak i te umieszczone na płycie MKS, są połączone z listwą zaciskową gniazda wielopinowego. Dokładne połączenia sterowników zewnętrznych przedstawiono na rysunku 3.6.

DRIVER M2.2		DRIVER M2.1		DRIVER M3		DRIVER M1	
STEP	STEP2	STEP	STEP2	STEP	STEP3	STEP	STEP1
GND	GND2	GND	GND2	GND	GND3	GND	GND1
DIR	DIR2	DIR	DIR2	DIR	DIR3	DIR	DIR1
GND	GND2	GND	GND2	GND	GND3	GND	GND1
EN	EN2	EN	EN2	EN	EN3	EN	EN1
GND	GND2	GND	GND2	GND	GND3	GND	GND1
+24	X42	+24	X43	+24	X44	+24	X41
GND	X11.3	GND	X11.4	GND	X12.3	GND	X13.3
A1	XP12	A1	XP8	A1	XP16	A1	XP2
A2	XP13	A2	XP9	A2	XP17	A2	XP3
B1	XP14	B1	XP11	B1	XP18	B1	XP5
B2	XP15	B2	XP10	B2	XP19	B2	XP7

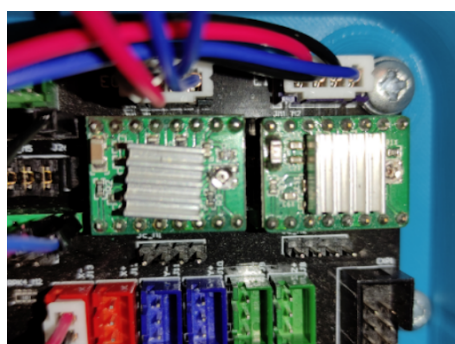
Rysunek 3.6. Wykaz połączeń zewnętrznych sterowników

W naszej konstrukcji użyto driverów zewnętrznych opartych na mikroprocesorze Toshiba TB6600HG IC. Sterują one największymi silnikami krokowymi używanymi w najniższych poziomach. Konstrukcje te noszą nazwy: TB6600 oraz M542. Ukazano je na rysunku 3.7.



Rysunek 3.7. Sterowniki silników TB6600 oraz M542

Zastosowano również sterowniki dedykowane do płytki MKS - A4988. Wpięte są one bezpośrednio pod przygotowane dla nich złącza. Ich wyprowadzenia na cewki są wpięte bezpośrednio na listwę zaciskową wtyczki. Sterowniki te ukazano na rysunku 4.23



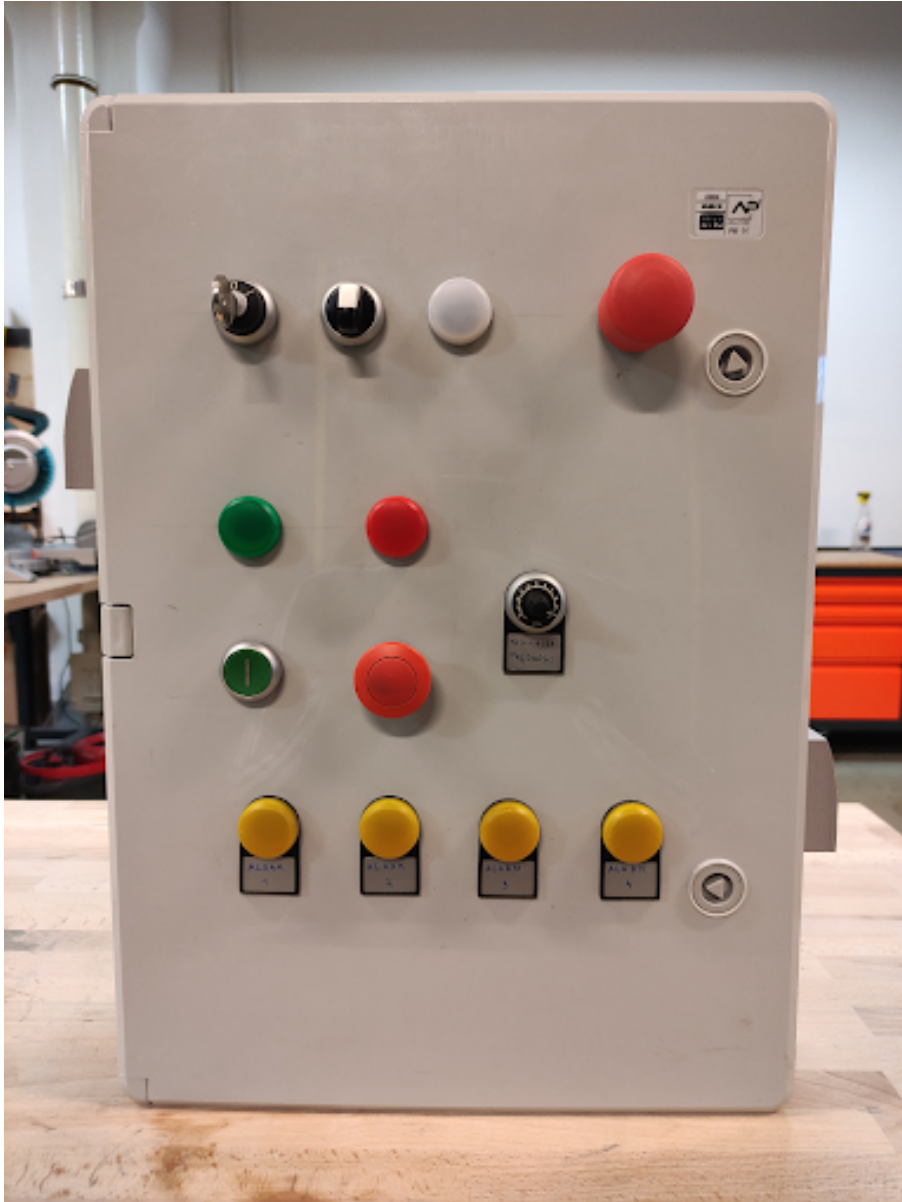
Rysunek 3.8. Sterowniki silników A4988

### 3.4. Szafa sterownicza

W celu dostosowania konstrukcji do pracy w warunkach przemysłowych i zwiększenia jej mobilności zdecydowano się na zaprojektowanie szafy sterowniczej, która mieściłaby wszelkie urządzenia zasilające i sterujące oraz była niejako prostym panelem operatorskim. Na niej miał



się również znaleźć stop awaryjny odcinający zasilanie w razie zaistnienia awarii. Szafa sterownicza pomaga uporządkować skomplikowaną budowę układów i aparatury elektromechanicznej, sterowniczej i układy zasilania. Powinna zawierać w sobie wszelkie wymagane urządzenia zamocowane w sztywny sposób, chroniący je przed uszkodzeniem. Zazwyczaj jest wykonana z tworzywa sztucznego lub stali skrzynią. W środku znajduje się stalowa płyta, do której mocowane są bezpośrednio lub za pomocą specjalnej szyny urządzenia. Montaż szynowy umożliwia łatwiejszą wymianę uszkodzonych modułów, ale niekiedy aparaty nie są przystosowane do takiego sposobu mocowania. Okablowanie szafy jest ukryte w mocowanych weń korytach kablowych. Dzięki temu maleje ryzyko przypadkowego uszkodzenia połączeń oraz potencjalnego porażenia. Na zewnątrz skrzyni montowane są wskaźniki oraz przełączniki. Szafa musi również zapewniać ochronę urządzeń przed warunkami atmosferycznymi oraz odpowiednią ich wentylację. W niniejszej pracy użyto szafy z tworzywa sztucznego, z uwagi na mniejszą wagę. Konstrukcja powinna być mobilna, więc nie skorzystano tylnych mocowań, lecz zastosowano dolną ścianę jako podstawę, na której stoi szafa. To wyeliminowało typowe połączenie przemysłowe, w którym większość podłączeń podłączana jest od dołu z uwagi na większą odporność na zabrudzenia i wilgoć. W lewej ścianie skrzyni zamontowano wejście USB oraz zasilania. W prawej natomiast umieszczono gniazdo do przyłączenia robota. Wentylacja została przeprowadzona w sposób krzyżowy. Wlot zimnego powietrza znajduje się u dołu prawej ściany a wylot przy górnej krawędzi lewej ściany. Wymuszony przepływ zrealizowano za pomocą dwóch wentylatorów wyciągających powietrze. Rozmieszczenie aparatów na płycie wewnątrz gwarantuje najlepsze możliwe chłodzenie. Najbardziej delikatne i narażone na ciepło urządzenia są umieszczone tuż przy czepni zimnego powietrza. Zasilacz i sterowniki silników jako urządzenia wydzielające największe promieniowanie ciepłe zamocowano tuż przy wylocie. Na rysunku 3.9 widoczne są czepnie powietrza na ścianach bocznych oraz przyciski i sygnalizacja panelu przedniego.



Rysunek 3.9. Panel czołowy szafy sterowniczej

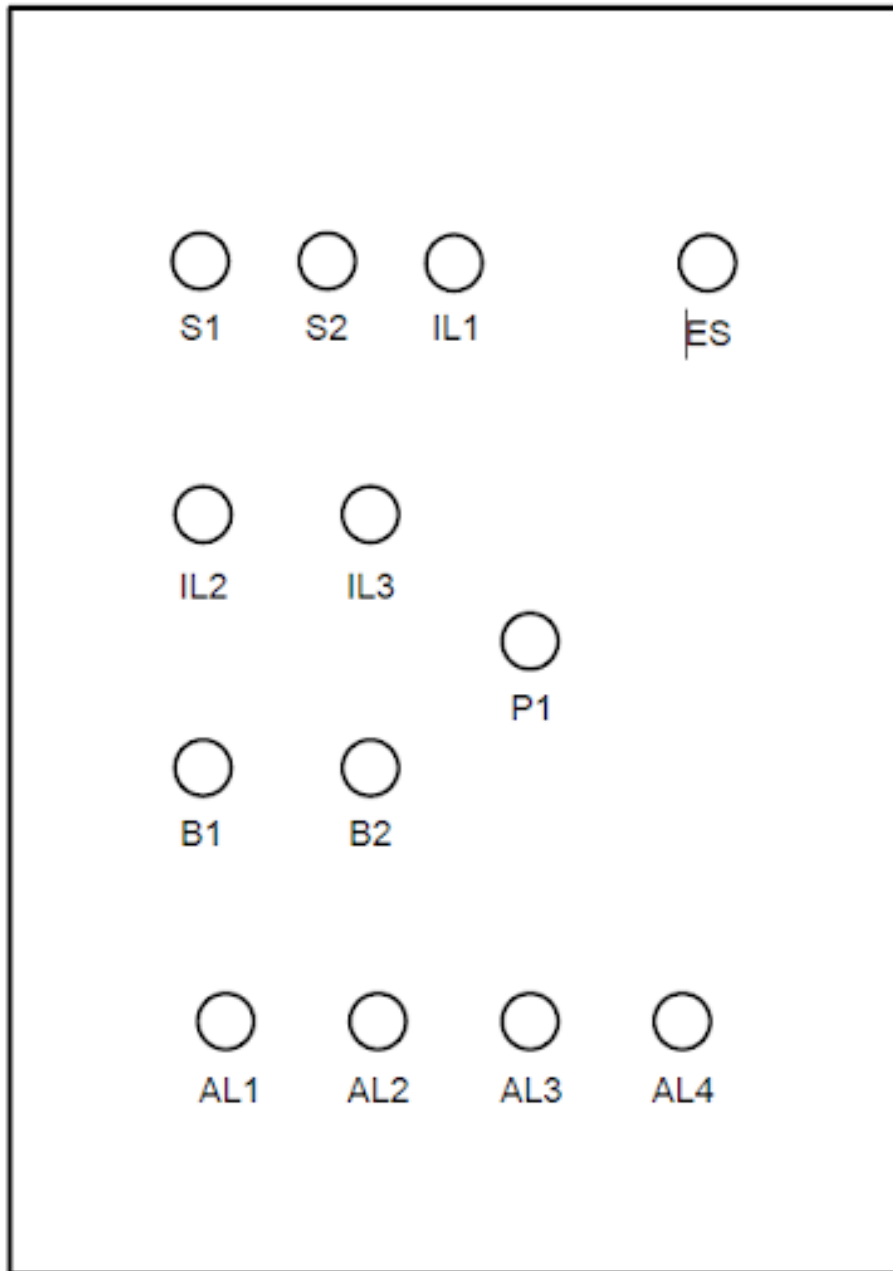
Wiekło szafy zamykane jest na specjalny trójkątny klucz w celu utrudnienia dostępu osobom postronnym do wnętrza urządzenia.

Na panelu czołowym ukazanym na rysunku 3.10 ukazano kolejno:

- S1 - wyłącznik napięcia uruchamiany kluczem,
- S2 - wyłącznik napięcia,
- IL1 - lampka potwierdzająca obecność napięcia 24V na wyjściu zasilacza impulsowego,
- ES - awaryjny wyłącznik zasilania,
- IL2 - lampka potwierdzająca stan robota podczas aktywnej pracy,
- IL3 - lampka potwierdzająca stan robota podczas oczekiwania na polecenia ( tryb stop ),
- P1 - zadajnik prędkości umożliwiający płynną regulację prędkości ramienia,
- B1 - przycisk start,
- B2 - przycisk stop,
- AL1 - lampka informująca o wystąpieniu alarmu nr 1,
- AL2 - lampka informująca o wystąpieniu alarmu nr 2,



- AL3 - lampka informująca o wystąpieniu alarmu nr 3,
- AL4 - lampka informująca o wystąpieniu alarmu nr 4,



Rysunek 3.10. Rysunek panelu czołowego wraz z oznaczeniami elementów

### Zasilacz

Do spełnienia zapotrzebowań na energię całego układu użyto zasilacza impulsowego S-600-24 ukazanego na rysunku 3.11. Jest to konstrukcja, która zapewnia do 25 A prądu wyjściowego co oznacza do 600 W przy napięciu wyjściowym 24 V. Zdecydowano się na konstrukcję impulsową względem tradycyjnego zasilacza liniowego głównie ze względu na jego mniejszy koszt i wagę. Typowe rozwiązanie wymagałoby użycia zdecydowanie większego transformatora, co znacznie podniosłoby cenę. Wadą rozwiązania impulsowego są wyższe zakłócenia i szumy napięcia wyjściowego, aczkolwiek konstrukcja MK.0 mogła sobie na ów pozwolić. Wysoka spraw-

ność pozwala obniżyć straty ciepłe wewnątrz szafy sterowniczej. Głównymi odbiorami mocy są cztery sterowniki silników oraz płytki sterownicze.

Jest to zasilacz, który przewyższa zapotrzebowania konstrukcji ramienia na moc, jednak zdecydowano się na niego gdyż założenia konstrukcyjne miały umożliwić potencjalny rozwój.

Urządzenie	Maksymalny pobór mocy
Sterownik TB6600	25W x 2
Sterownik M542	20W x 2
Płytki MKS Sterownik A4988 Obsługa serwomotoru	30W

Tabela 3.1. Tabela głównych poborów mocy

Łączny pobór mocy można ustalić jako sumę poszczególnych odbiorów.

$$P[W] = 2 \cdot P_{driver1} + 2 \cdot P_{driver2} + P_{mks} + P_{lights} = 2 \cdot 25W + 2 \cdot 20W + 30W + 7 \cdot 0,5W = 123,5W \quad (3.1)$$

Przy założeniu że pojedyncza sygnalizacja pobiera około 0,5 W, szafa generuje szczytowy pobór mocy w granicach 124 W. Licząc wymagania zasilacza z zapasową mocą na ewentualne akcesorium w kiesi, bezpiecznym zapasem mocy byłoby urządzenie z wydajnością 150 W. S-600-24 jest przewymiarowanym zasilaczem którego moc pięciokrotnie przerasta zapotrzebowanie MK.0



Rysunek 3.11. Zasilacz impulsowy S-600-24

Zasilacz posiada wbudowany wentylator który wyciąga ciepłe powietrze kierując je na wentylatory główne. Na jednym z jego wyjść podłączona jest także lampka na panelu czołowym sygnalizująca jego pracę.

## Zabezpieczenia

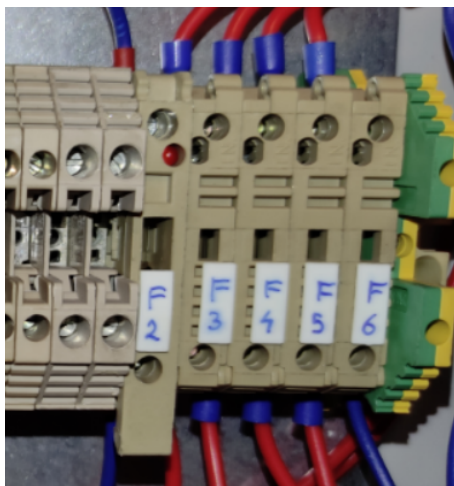
Zdecydowano się na użycie głównie zabezpieczeń topikowych z uwagi na cenę takiego rozwiązania. Jedną z zalet takiego podejścia jest również możliwość chwilowego przeciążania poszczególnych bloków. Głównym zabezpieczeniem jest F1, bezpiecznik 2 A włączony szeregowo w linię zasilania sieciowego. Znajduje się on w gnieździe zasilania sieciowego. Został przedstawiony na rysunku 3.12



Rysunek 3.12. Gniazdo kabla sieciowego wraz z oprawą bezpiecznika

Kolejne bloki ukazane na rysunku 3.13 zabezpieczają kolejno:

- F2 - Płytki sterująca wraz z sterownikami M4 i M5,
- F3 - Sterownik silnika krokowego M1,
- F4 - Sterownik silnika krokowego M2.1,
- F5 - Sterownik silnika krokowego M2.2,
- F6 - Sterownik silnika krokowego M3,



Rysunek 3.13. Blok zabezpieczeń topikowych

Wszystkie mają wytrzymałość prądową wynoszącą 1 A, co daje po 24 W długotrwałego obciążenia na każdy z odbiorników. Osadzone są w rozłącznikach bezpiecznikowych, gniazdach przystosowanych do zamocowania na szynie D 35. Wszystkie użyte bezpieczniki topikowe są cylindrycznymi wkładkami o wymiarach 5x20 mm. Płytki sterująca ma wbudowany pomiar prądu pobieranego przez sterowniki silników M4 i M5 i to przezeń realizowana jest ich ochrona przeciwprzeciążeniowa. Nie zdecydowano się na dedykowane zabezpieczenie przeciwprzepięciowe oraz różnicowo-prądowe z racji na niewielką moc urządzenia. Bezpieczeństwo gwarantowane jest przez rozdzielnię, do której przyłączona jest szafa sterownicza. Przyłączane poprzez przewód sie-

ciowy PE jest połączone ze wszystkimi częściami metalowymi. Specjalne złącze szynowe łączy potencjały wszystkich części przewodzących wewnątrz szafy. Metalowe gniazdo D-Sub jest jedną z metalowych części, do których dostęp może mieć postronny użytkownik. Wszelkie dostępne dotykowo części metalowe są uziemione dodatkowo w celu zapewnienia bezpieczeństwa przeciwporażeniowego w razie awarii wewnętrznej izolacji. Awaryjne odłączenie napięcia jest możliwe poprzez wyłącznik bezpieczeństwa zlokalizowany na panelu czołowym szafy.

#### *Realizacja połączeń modułów*

Profesjonalne podejście do projektowania konstrukcji zakłada wzięcie pod uwagę ewentualnych napraw lub modyfikacji przeprowadzanych w czasie eksploatacji. Z tej racji zdecydowano się na rozdział połączeń przy pomocy modułu złączek szynowych. Umożliwiają one modyfikacje układu bez dużej ingerencji w połączenia kablowe wewnątrz szafy. Na etapie projektowania tego typu ułatwienia również są pomocne gdyż konstruktorzy mogą łatwiej zmieniać koncepcje połączeń. Z powodu ograniczonego miejsca zrezygnowano z użycia koryt kablowych.

Omówienie połączeń rozdzielono na 2 sekcje:

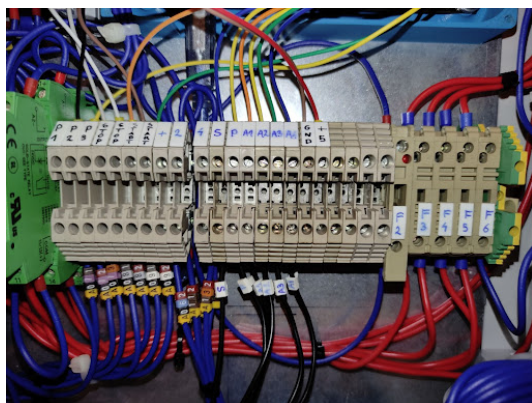
- Sekcja główna
- Sekcja wyjść

#### **Sekcja główna**

Listwę rozpoczyna złączka uziemiająca. Łączy ona PE doprowadzone z instalacji ze wszystkimi częściami odizolowanymi. Następnie doprowadzony jest przewód neutralny do zacisku zasilacza. Przewód fazowy jest poprowadzony przez wyłączniki napięcia po czym trafia na zacisk fazowy zasilacza. Kolejna sekcja to wyprowadzenie stabilizowanego napięcia 24V. Urządzenie wskazuje na użycie wszystkich trzech dostępnych wyprowadzeń w celu zmniejszenia obciążenia. Użyto łączek dwupoziomowych dla wygodniejszego podłączenia wielu odbiorów. W celu wyrównania potencjalnych różnic potencjałów na zaciskach zasilacza, złączki zostały dodatkowo zmostkowane. Szynę tą ukazano rysunku 3.14. Na pozycji 17 zamocowany jest moduł przekaźnika który służy do sterowania pracą wentylatorów szafy. Kolejny segment służy wyprowadzeniu wyjść i wejść sterownika MKS. Na skrajnej pozycji listwy znajdują się gniazda na bezpieczniki i jednocześnie podłączenie zasilania dla płytki sterującej jak i sterowników silników. Część tą ukazano na rys 3.15. Wykaz połączeń szynowych została przedstawiona na rysunku 3.16



Rysunek 3.14. Sekcja zasilania - sekcja mocy



Rysunek 3.15. Sekcja zasilania - sekcja sygnałowa i zabezpieczeń

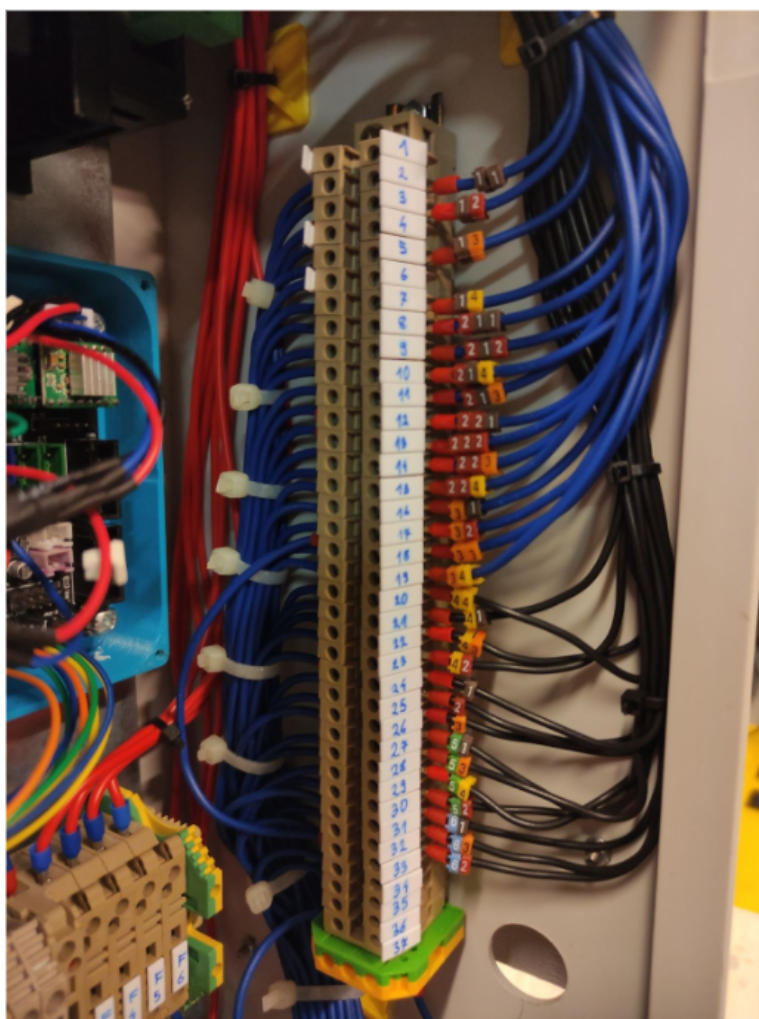
PE GNIAZDO	X1	PE COMM
N GNIAZDO	X2	N PWR
L GNIAZDO	X3	X4
A011	X4	X3
A012	X5	X6
A031	X6	X5
A032	X7	X8
A041	X8	X7
A042	X9	L PWR
ZACISK LISTWY	X10	
3. M2.2 4. M2.1	X11	1. V- 2. MKS -
3. M3 4. X17 COM	X12	1. V-
3. M1 4. VMM GND	X13	1. V-
3. X42 4. X41	X14	1. V+
3. X43 4. FAN+	X15	1. V+ 2. X40
3. X44	X16	1. V+ 2. X25
COM X12.4 NO FAN -	X17	A1 MKS FAN A2 MKS GND
A071	X18	5V MKS
A072	X19	A12
A073	X20	GND MKS
A081	X21	5V MKS
A082	X22	A4
A091	X23	GND MKS
A092	X24	A5
A052, A062	X25	X16.2 , X26
A102, A112	X26	X25, X27
A122, A132	X27	X26
S	X28	D44
P	X29	D64
A1	X30	D63
A2	X31	D40
A3	X32	D42
A4	X33	D65
	X34	GND MKS
	X35	5V MKS
*REZERWA	X36	*REZERWA
*REZERWA	X37	*REZERWA
*REZERWA	X38	*REZERWA
*REZERWA	X39	*REZERWA
X15.2	X40 F2	MKS +24
X14.4	X41 F3	M1
X14.3	X42 F4	M2.1
X15.3	X43 F5	M2.2
X16.3	X44 F6	M3
PE GNIAZDO OUT	X45	

Rysunek 3.16. Wykaz połączeń głównej listwy zaciskowej

## Sekcja wyjść

Mniejsza szyna, ukazana na rysunku 4.32, służy jako wyprowadzenie pinów wtyczki DB-37. Są one ponumerowane zgodnie ze standardem oznaczeń wtyczki. Takie rozwiązanie umożliwiło zespołowi szybką zmianę kolejności cewek poszczególnych silników krokowych. Dodatkowo wolne piny mogą służyć jako zasilanie dodatkowego akcesorium zamiast silnika krokowego i chwytaka, który został zamocowany w podstawowej wersji.

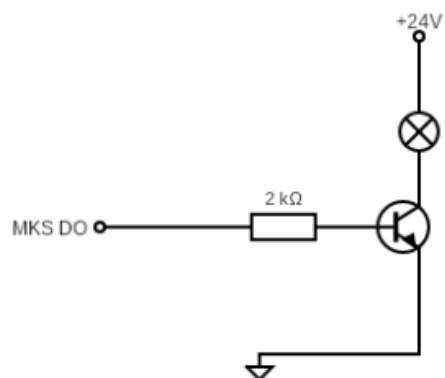
P1	XP1	*
P2	XP2	M1.A1
P3	XP3	M1.A2
P4	XP4	*
P5	XP5	M1.B1
P6	XP6	*
P7	XP7	M1.B2
P8	XP8	M2.1.A1
P9	XP9	M2.1.A2
P10	XP10	M2.1.B2
P11	XP11	M2.1.B1
P12	XP12	M2.2.A1
P13	XP13	M2.2.A2
P14	XP14	M2.2.B1
P15	XP15	M2.2.B2
P16	XP16	M3.A1
P17	XP17	M3.A2
P18	XP18	M3.B1
P19	XP19	M3.B2
P20	XP20	M4.B1
P21	XP21	M4.B2
P22	XP22	M4.A1
P23	XP23	M4.A2
P24	XP24	5V -X
P25	XP25	GND -X
P26	XP26	D3 -X
P27	XP27	M5.B2
P28	XP28	M5.A1
P29	XP29	M5.B1
P30	XP30	M5.A2
P31	XP31	D11 SERV
P32	XP32	GND SERV
P33	XP33	5V GND
P34	XP34	REZERWA
P35	XP35	REZERWA
P36	XP36	REZERWA
P37	XP37	REZERWA



Rysunek 3.17. Wykaz połączeń wraz ze zdjęciem szyny wyjściowej

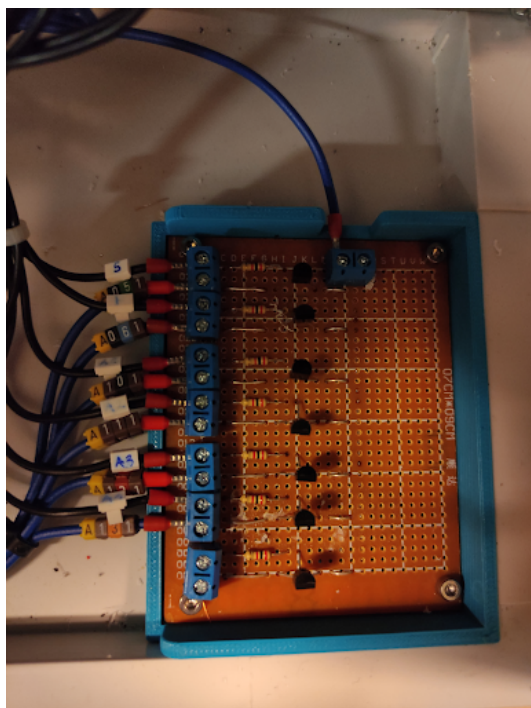
### Moduł dopasowania wyjść sterownika

Płytkę sterownika dysponuje wyjściami cyfrowymi. Są to niskoprądowe wyjścia 5V. Lampki użyte w panelu są w standardzie przemysłowym 24 V i ich aktywacja wymagało dopasowania napięcia. Wykonano więc moduł kluczy tranzystorowych (rysunek 3.18) i umieszczono w dolnej części szafy. Poniżej przedstawiono jeden z siedmiu układów.



Rysunek 3.18. Schemat elektryczny pojedynczego wejścia

w Układ został zmontowany na płycie uniwersalnej i przykręcony do wydrukowanej dlań obudowy. Na szczycie widoczne jest podłączenie wspólnej masy, a po lewej podłączenia poszczególnych lampek. Ukazano go na rysunku 3.19 zaś na rysunku 3.20 widoczne są połączenia do konkretnych sygnalizatorów.



Rysunek 3.19. Zmontowany moduł dopasowujący



X28	BT1	COM	X17.4
A051	CT1	GND	
X29	BT2		
A061	CT2		
X30	BT3		
A101	CT3		
X31	BT4	VOLTAGE	
A111	CT4	MATCH	
X32	BT5	MODULE	
A121	CT5		
X33	BT6		
A131	CT6		
	BT7		
	CT7		

Rysunek 3.20. Wykaz połączeń modułu

### Połączenie i komunikacja

W celu umożliwienia odłączania szafy od głównej części urządzenia zdecydowano się na użycie wielożyłowego przewodu. Profesjonalne gniazda i wtyczki wielopinowe są poza zasięgiem cenowym owej pracy, dlatego też użyto miast nich wtyczki D-Sub 37. Przewód (rysunek 3.21) zdecydowano się wykonać samodzielnie.



Rysunek 3.21. Wtyczka kabla łączącego robota z szafą sterowniczą

Połączenia wykonano zgodnie ze standardem przyjętym dla tego typu konektorów. Wykaz pinów na wtyczce przedstawiono na rys 3.22.



REAR VIEW OF MALE 37 PIN  
SUB-D CONNECTOR



REAR VIEW OF FEMALE 37 PIN  
SUB-D CONNECTOR

Rysunek 3.22. Numeracja pinów we wtyczce oraz w gnieździe[15]

Profesjonalne roboty stosują wielopinowe złącze shunka (rysunek 4.37).



Rysunek 3.23. Złącze wielopinowe schunka[16]

Do komunikacji między płytką sterownika a komputerem użyto interfejsu szeregowego USB. Gniazdo żeńskie zostało wyprowadzone na lewą ścianę szafy sterowniczej a do kompletu osprzętu szafy załączany jest również przewód USB Męski - Męski

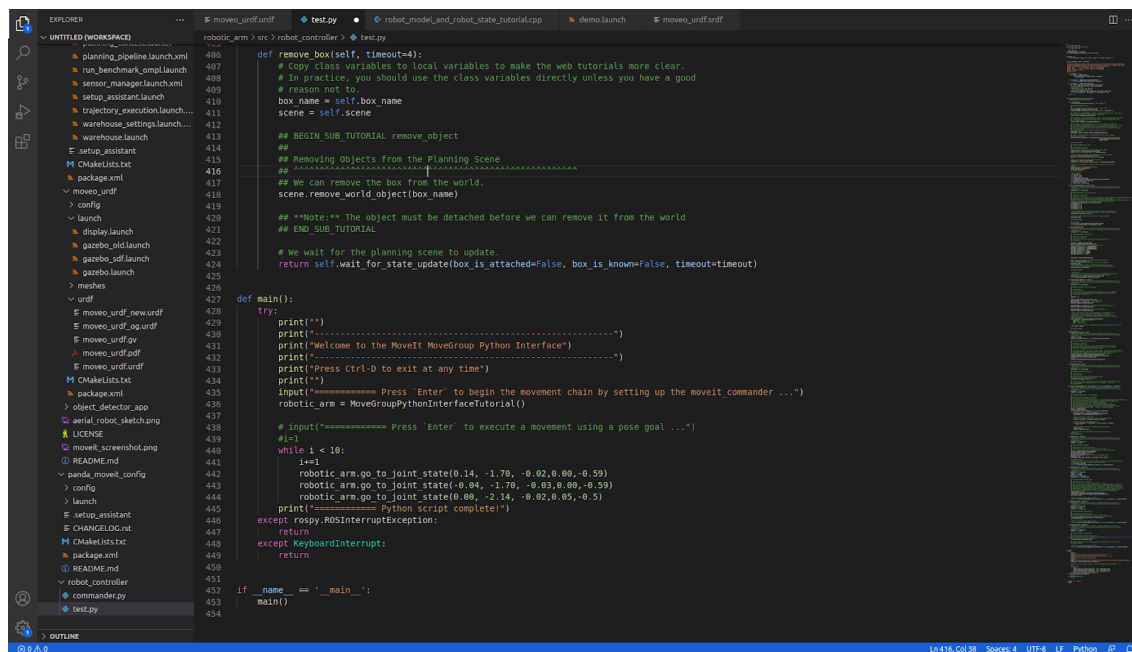
Planowano użyć modułu Bluetooth do komunikacji z zewnętrznym Teach Panelem lub modułu Wi-Fi, by takowy panel zaimplementować w aplikacji sieciowej.



## 4. PROJEKT OPROGRAMOWANIA (DAWID MOŚCICKI)

### 4.1. Zadania stawiane oprogramowaniu

Oprogramowanie powinno realizować w czasie rzeczywistym sterowanie wszystkimi przegubami robota, realizować zadania kinematyki prostej i odwrotnej oraz umożliwiać wygodne i przyjazne środowisko do zadawania trajektorii i zadań. Zostało ono zrealizowane jako typowa architektura wielopoziomowa. Najniższym poziomem oprogramowania są sterowniki silników krokowych, które przekształcają impulsy kroków na odpowiednie wystawienie silnika krokowego. Niski poziom oprogramowania umieszczonego na mikroprocesorze odpowiada za przekazywanie informacji do sterowników silników krokowych, wyświetlanie alarmów, odczytywanie stanów przycisków. Wysoki poziom oprogramowania realizuje część wizualizacyjną i nadzorczą umieszczoną w Robot Operating System. Oprogramowanie zrealizowano w wersji 'ROSa Kinetic' w systemie operacyjnym Ubuntu 16.04. Podczas wyboru oprogramowania zwrócono uwagę na możliwości edytowania i tworzenia pliki z różnymi rozszerzeniami (.urdf, .c, .py, .ino) i zdecydowano się na wykorzystanie uniwersalnego Visual Studio Code stworzonego przez Microsoft. Można go używać zarówno w systemie operacyjnym Windows jak i Linux. Posiada wtyczki umożliwiające np. programowanie i kompilowanie kodu w języku C pod mikroprocesory z rodziny ATmega, kolorowanie składni i pokazywanie podpowiedzi dla plików z rodziny .xml (np. .urdf, .sdf) oraz wspiera większość języków programowania. Zrzut ekranu z wyżej opisanego programu widać na rysunku 4.1.



```
def remove_box(self, timeout=4):
    # Copy class variables to local variables to make the web tutorials more clear.
    # In practice, you should use the class variables directly unless you have a good
    # reason not to.
    box_name = self.box_name
    scene = self.scene

    ## BEGIN SUB TUTORIAL remove object
    ##
    ## Removing objects from the Planning Scene
    ##
    ## We can remove the box from the world.
    scene.remove_world_object(box_name)

    ## **Note:** The object must be detached before we can remove it from the world
    ## END SUB TUTORIAL

    # We wait for the planning scene to update.
    return self.wait_for_state_update(box_is_attached=False, box_is_known=False, timeout=timeout)

def main():
    try:
        print("")
        print("-----")
        print("Welcome to the MoveIt MoveGroup Python Interface")
        print("-----")
        print("Press (ctrl-D) to exit at any time")
        print("")
        input("==== Press 'Enter' to begin the movement chain by setting up the moveit commander ...")
        robotic_arm = MoveGroupPythonInterfaceTutorial()

        # input("==== Press 'Enter' to execute a movement using a pose goal ...")
        #!
        while 1 < 10:
            i+=1
            robotic_arm.go_to_joint_state(0.14, -1.70, -0.02, 0.00, -0.59)
            robotic_arm.go_to_joint_state(0.04, -1.70, -0.03, 0.00, -0.59)
            robotic_arm.go_to_joint_state(0.00, -2.14, -0.02, 0.00, -0.5)
            print("==== Python Script complete!")
        except rospy.ROSInterruptException:
            return
        except KeyboardInterrupt:
            return

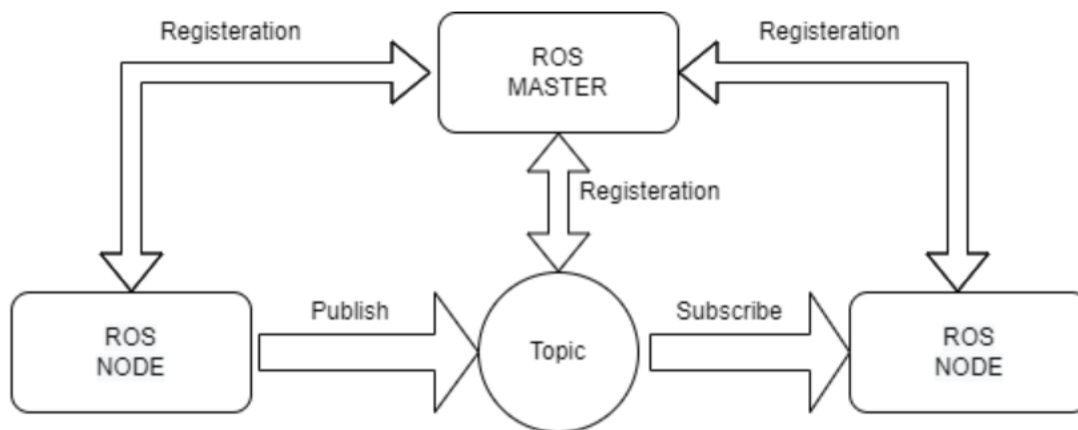
if __name__ == '__main__':
    main()
```

Rysunek 4.1. Zrzut ekranu z projektu w Visual Studio Code [17]

### 4.2. ROS - wprowadzenie

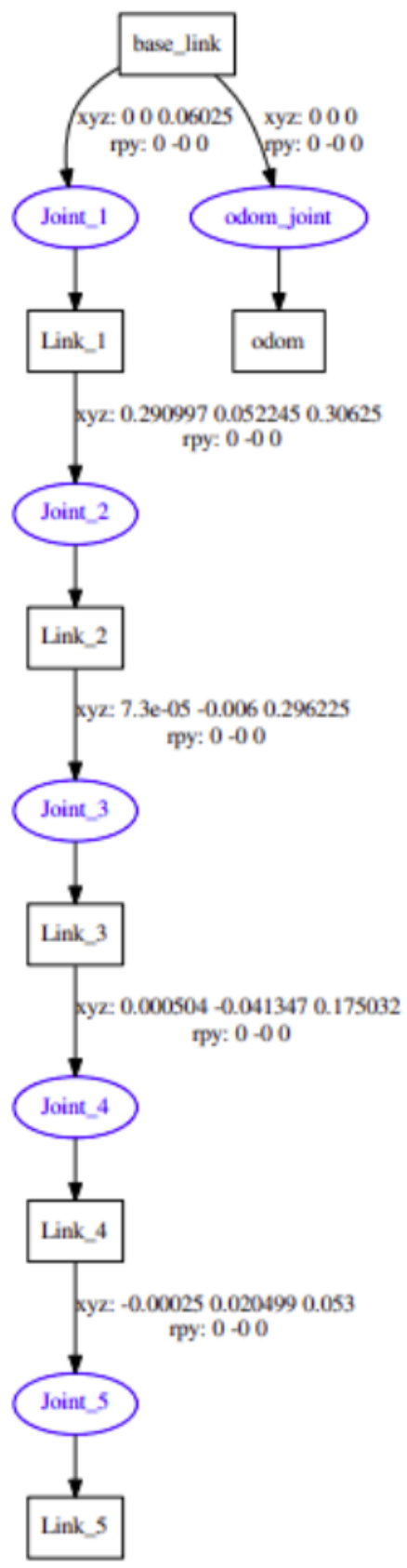
ROS [18] to otwartoźródłowe oprogramowanie służące jako podstawowe narzędzie pracy nowoczesnej robotyki. Zapewnia ono standaryzację oprogramowania i umożliwia szybkie proto-

typowanie. Niewątpliwie jedną z największych zalet ROSa jest zbudowana wokół niego społeczność dzieląca się swoimi doświadczeniami i pracą. Za pomocą tego systemu operacyjnego możemy wydzielić abstrakcyjną część oprogramowania (wizualizację, symulację, nadzór) od części umieszczonej na sterowniku. Ekosystem ten zapewnia komunikację poszczególnych komponentów oprogramowania za pomocą systemu przekazywania wiadomości między rozdzielnymi procesami. Każdy element wysokopoziomowego systemu może publikować (ang. Publish) wiadomości oraz subskrybować (ang. Subscribe) je na poszczególnych tematach (ang. Topics). Schemat ideowy opisanej komunikacji przedstawiono na rysunku 4.2. ROS zapewnia też dostęp do wielorakich narzędzi pozwalających na przeprowadzanie symulacji, nadzoru nad procesami oraz samych algorytmów.



Rysunek 4.2. Przedstawienie ideowej komunikacji ROSa

Aby przenieść model ramienia robotycznego z Fusion360 do warstwy wizualizacyjnej ROSa, stworzono opis URDF [19]. Format URDF wykorzystuje język XML do opisu zależności między układami współrzędnych (ich translacji i rotacji) względem układu początkowego (Base Link) lub układu globalnego. Łańcuch kinematyczny zaprojektowany na podstawie opisu *URDF* eksperymentalnego ramienia robotycznego MK.0 przedstawiono na rysunku 4.3.



Rysunek 4.3. Wizualizacja opisu URDF

Element '*base\_link*' odpowiada za początek układu współrzędnych całego łańcucha kinematyki, przeguby oznaczone są za pomocą nazw '*Joint\_X*', natomiast rodzaje ruchów przegubów zdefiniowane są jako '*Link\_X*'.

Poniżej pokazano przykładową deklarację łańcucha kinematycznego :

```
<link
  name="Link_1">
  <inertial>
  <origin rpy="0 0 0" xyz="-0.0022 0 0.08"/>
  <mass value="3.659594519084256"/>
  <inertia ixx="0.04654" ixy="-0.0003" ixz="-0.0312"
    iyy="0.0782" iyz="-0.0003" izz="0.0693"/>
  </inertial>
  <visual>
  <origin rpy="0 0 0" xyz="0.0 -0.0 -0.06025"/>
  <geometry>
  <mesh filename="package://moveo_urdf/meshes/joint_link_1_1.stl"
    scale="0.001 0.001 0.001"/>
  </geometry>
  </visual>
  <collision>
  <origin rpy="0 0 0" xyz="0.0 -0.0 -0.06025"/>
  <geometry>
  <mesh filename="package://moveo_urdf/meshes/joint_link_1_1.stl"
    scale="0.001 0.001 0.001"/>
  </geometry>
  </collision>
</link>
```

Sekcja '*inertial*' odpowiada za określenie masy przegubu i macierzy inercji rotacji. W związku z tym, że macierz ta jest 3x3 oraz jest symetryczna, w opisie *URDF* zapis został uproszczony do 6 elementów. Macierze najczęściej wyznaczane są w programach komputerowych takich jak Fusion 360.

Sekcja '*visual*' odpowiada za naniesienie siatki wizualizacyjnej na uproszczony model kolizji. W przypadku niniejszej pracy jest taki sam jak model kolizji - modele są na tyle proste, że można symulować je w czasie zbliżonym do rzeczywistego.

Sekcja '*collision*' odpowiada za nałożenie w odpowiednich miejscach na łańcuch kinematyczny brył. Dzięki temu można przewidywać kolizję robota z otoczeniem, jak i z samym sobą. Najczęściej w celu uproszczenia złożoności obliczeniowej stosuje się uproszczone modele kolizji które opisane są na modelu warstwy wizualizacji.

Aby zadeklarować poprawną oś obrotu między przegubami należy wskazać '*parent link*' (przegub z którego następuje rotacja) oraz '*child link*' (przegub do którego następuje rotacja). W sekcji limit można określić maksymalne kąty obrotu oraz na przykład maksymalną prędkość. Za pomocą deklaracji '*axis*' określa się oś obrotu przegubu. Przykładowy opis przegubu w formacie URDF [20] pokazano poniżej :

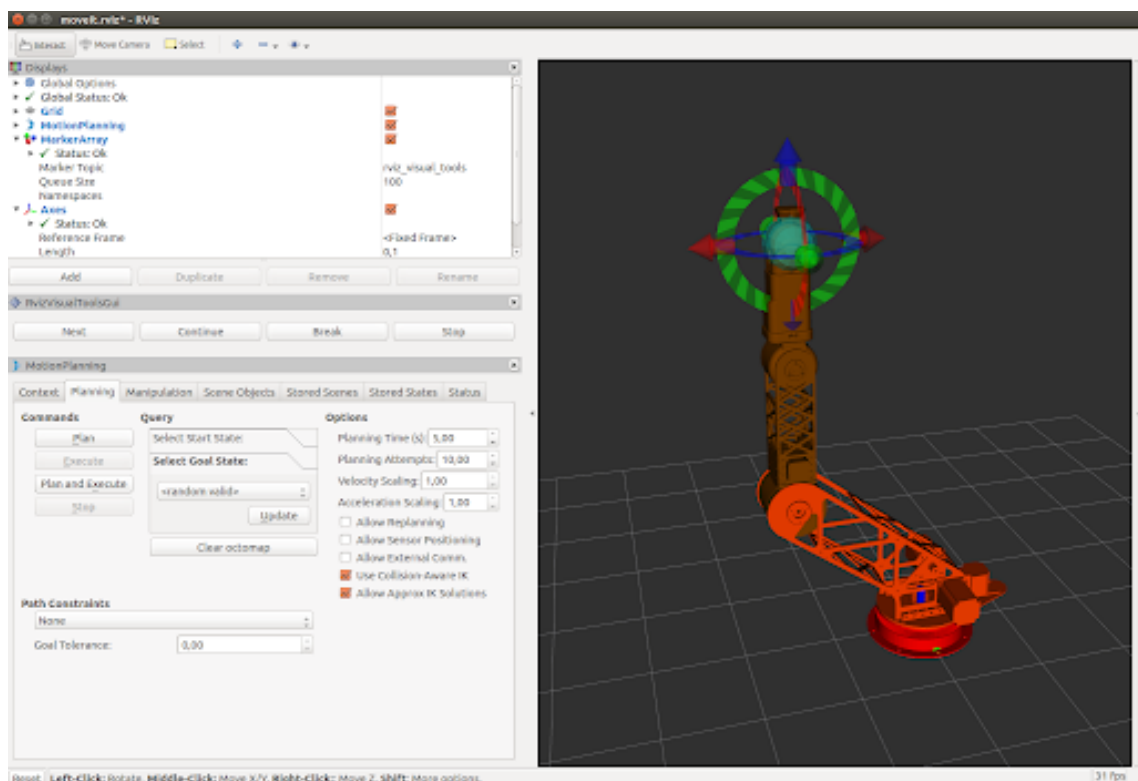
```
<joint
```

```

name="Joint_1 "
type="revolute">
<origin rpy="0 0 0" xyz="0.0 0.0 0.06025"/>
<parent link="base_link"/>
<child link="Link_1"/>
<axis xyz="0.0 0.0 1.0"/>
<limit
  lower="-3.1415"
  upper="3.1415"
  effort="5"
  velocity="1"/>
</joint >

```

Movel2 [21] to oprogramowanie umożliwiające wizualizację, symulację i kontrolę ramienia robotycznego. Program ten (wspierany przez ROS), ułatwia dostęp do między innymi algorytmów planowania trasy, określania kinematyki prostej i odwrotnej, zadań manipulacji oraz detekcji kolizji. Najważniejszą jego częścią jest jednak sama warstwa interfejsu graficznego pozwalająca na prostą manipulację ramieniem robotycznych. Użytkownik może ciągnąć za koniec manipulatora (ang. end-effector) aby wodzić ramię po trajektorii, zaplanować ruch za pomocą komendy Plan oraz wykonać ruch rzeczywistym obiektem za pomocą komendy 'Execute'. Jak widać na rysunku 4.4 ramię robotyczne w pozycji początkowej (bazowej) ma wszystkie przeguby skierowane w górę (tak też narysowano znaczniki do pozycjonowania osi).



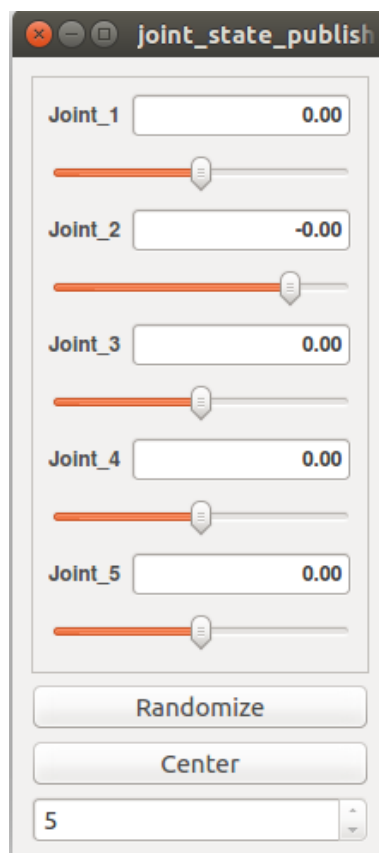
Rysunek 4.4. Zrzut ekranu z środowiska MoveIt

Aby sprawdzić poprawność kinematyki, osi obrotów i limitów poszczególnych przegubów manipulatora skorzystano z prostego interfejsu graficznego pozwalającego na publikowanie pręemieszczeń przegubów robota. Przemieszczając suwaki zachodzą wizualne zmiany w środowisku

Movel, zgodnie z zadeklarowaną konfiguracją URDF. Kąty wyrażone są w radianach, w pliku konfiguracyjnym ustalono minimalne i maksymalne wychylenia wszystkich przegubów wyrażonych w radianach :

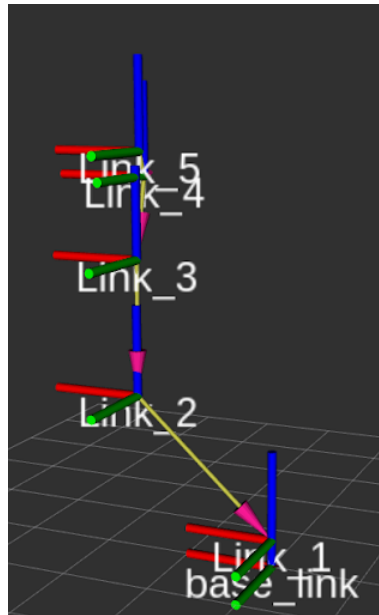
1. Od  $-\pi$  do  $\pi$ ,
2. Od  $-\pi$  do  $\pi/4$ ,
3. Od  $-\pi/2$  do  $\pi/2$ ,
4. Od  $-7 \cdot \pi/8$  do  $7 \cdot \pi/8$ ,
5. Od  $-\pi/2$  do  $\pi/2$

Po konfiguracji i sprawdzeniu poprawności opisu URDF można przeprowadzić zadania kinematyki odwrotnej, korzystając z interfejsu graficznego przedstawionego na rysunku 4.5. Rozwiązanie zagadnienia kinematyki odwrotnej ramienia robotycznego, korzystając z opisu URDF, przedstawiono na rysunku 4.7. Wizualizację łańcucha kinematycznego otrzymanego z opisu URDF przedstawiono na rysunku 4.6.



Rysunek 4.5. Interfejs umożliwiający weryfikację poprawności opisu URDF

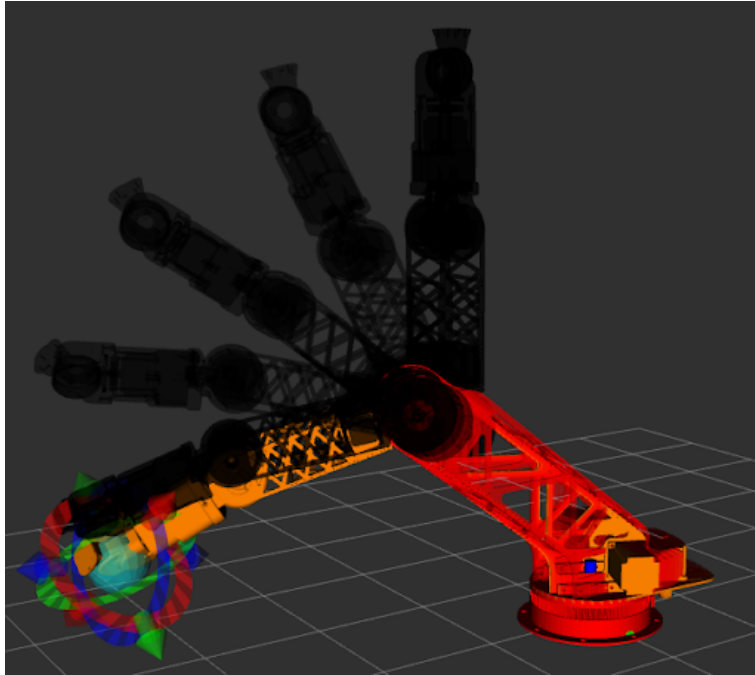




Rysunek 4.6. Wizualizacja łańcucha kinematycznego eksperymentalnego ramienia robotycznego MK.0.

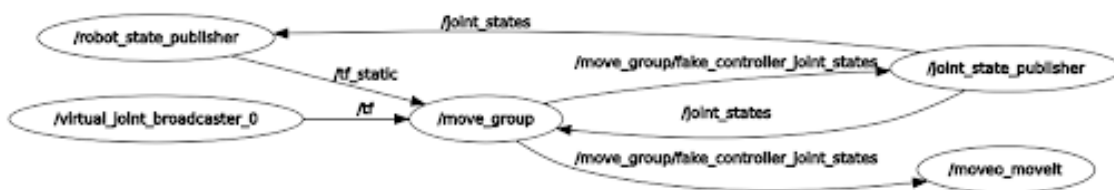
Architektura systemu została przygotowana w oparciu o repozytorium projektu BCN3D Moveo [22] opublikowane na licencji MIT [23]. W niniejszej pracy inżynierskiej zmodyfikowano tę paczkę plików tak, aby umożliwiała sterowanie eksperymentalnym ramieniem robotycznym MK.0. Poniżej opisano węzły i tematy ROSa przedstawione na rysunku 4.8 :

- /moveo\_moveit - informacje dla środowiska wizualizacyjnego,
- /move\_group - opis łańcucha kinematyki manipulatora, określenie aktualnych wartości przegubowych,
- /joint\_state\_publisher - można na niego wpływać z innych programów aby wpływać na symulację np. ze skryptu pythonowego,
- /robot\_state\_publisher - tłumaczy wartości przegubowe na odpowiednie pozycje silnika wyrażone w krokach (dla silników krokowych),
- /joint\_states - wartości przegubowe wyrażone w radianach,
- /move\_group/fake\_controller\_joint\_states - kontroler odpowiedzialny za utrzymywanie zadanych kątów przez silniki, działający w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego - w przyszłości ramię robotyczne może być rozbudowane o enkodery, w aktualnej wersji ramienia nie działa, stąd w nazwie fake (ang. fałszywy),
- /tf - węzeł ten utrzymuje wszystkie zależności między układami współrzędnych robota



Rysunek 4.7. Widok aproksymacji rozwiązania zagadnienia kinematyki odwrotnej z programu MoveIt

Na początku pobierane są informacje o łańcuchu kinematycznym, konfiguracji przestrzennej i obiekty 3D z pliku `.urdf` i przekazywane są zarówno do `/tf` i `/move_group`. Następnie przekazywane są dalej do środowiska wizualizacyjnego MoveIt. Po wystereowaniu robota w symulacji na nową pozycję, informację o wartościach przegubowych są wysyłane poprzez `/joint_state_publisher`, tłumaczone na odpowiednie wartości kroków (zgodnie z plikami konfiguracyjnymi przełożeń i mikrokroków) poprzez `/robot_state_publisher` do mikroprocesora Atmega2560 (jeżeli podłączono). Nie istnieje potrzeba podłączania rzeczywistego ramienia robotycznego do symulacji. Dzięki temu na początku można upewnić się co do poprawności wykonywania kodu, sprawdzenia kolizji i spójności systemu. Następnie można tworzyć skrypty np. w języku python i za pomocą nich kontrolować ramię zadając szereg ruchów lub opisaną trajektorię w interpolacji typu spline. Interpolacja typu Spline [24] tworzy punkty pomocnicze trajektorii, które są łączone wielomianem od 1 do 3 stopnia i dzięki temu umożliwia uzyskanie gładkich przejść ramienia robotycznego między tymi punktami. Gotowa biblioteka `moveit_commander` [25] pozwala na wykorzystanie gotowych solverów do obliczania kinematyki odwrotnej i np. interpolacji ruchu po płaszczyźnie. Solver [26] to algorytm obliczeniowy udostępniający gotowe funkcję do obliczania danego problemu matematycznego. W przypadku niniejszej pracy inżynierskiej wykorzystano solver `IKFast` do obliczania kinematyki odwrotnej ramienia robotycznego. Niestety został przygotowany dla konstrukcji 6 i 7 osiowych, więc musiał zostać nieco zmodyfikowany na potrzeby konstrukcji 5 osiowej. Warto zauważyć, że opis matematyczny rotacji dokonany jest za pomocą kwaternionów. Opisywana architektura znajduje się na rysunku 4.8.



Rysunek 4.8. Rozpisana architektura systemu komunikacji ROSa

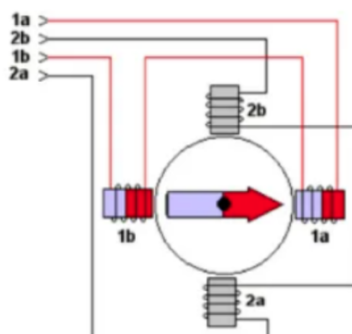
Przykładowy skrypt w języku *python* pozwalający wysterować ramię robotyczne pokazano poniżej. Skrypt ten realizuje funkcję powtarzającą trajektorię składającą się z 3 punktów 10 razy. Punkty podane w kinematyce prostej i wykonane za pomocą interpolacji przegubowej. Przykładowy kod wraz z opisem i wymaganymi bibliotekami można znaleźć pod tym adresem [25].

```
def main():
    try:
        print("Welcome to the MoveIt MoveGroup Python Interface")
        input("Press Enter to begin the movement chain by setting up the moveit_commander")
        robotic_arm = MoveGroupPythonInterfaceTutorial()
        i=1
        while i < 10:
            i+=1
            robotic_arm.go_to_joint_state(0.14, -1.70, 0.02, 0.00, -0.59)
            robotic_arm.go_to_joint_state(-0.04, -1.70, -0.03, 0.00, -0.59)
            robotic_arm.go_to_joint_state(0.00, -2.14, -0.02, 0.05, -0.50)
        print("Python script complete!")
    except rospy.ROSInterruptException:
        return
    except KeyboardInterrupt:
        return
```

Warto podkreślić, że skrypt ten jest całkowicie niezależnym komponentem systemu operacyjnego. Dowolny element oprogramowania może kontrolować wyżej wymieniony przesył informacji systemu i na niego wpływać - zarówno pobierać informację o obiekcie jak i nim sterować. Funkcja "go\_to\_joint\_state" realizuje zagadnienie kinematyki prostej, przekształcając aktualną pozycję ramienia robotycznego na pozycję wskazaną w argumentach funkcji (wartości przegubowe wyrażone są w radianach).

### 4.3. Podstawy sterowania silnikami krokowymi

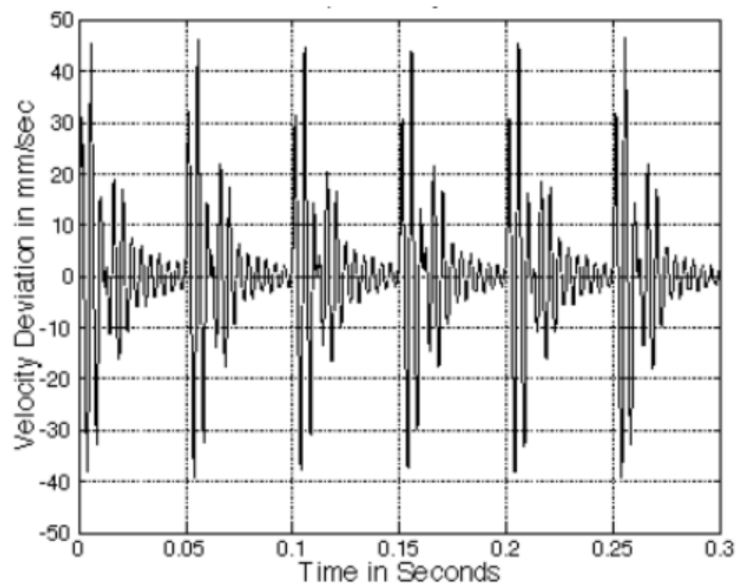
Ze względu na prostotę sterowania, cenę i stosunkowo wysoką niezawodność (w odniesieniu do ceny) zdecydowano się wyposażyć ramię w 6 silników krokowych działających w otwartej pętli sterowania. Sterowanie jest precyzyjne jeżeli silniki nie przegrzewają się oraz nie przekroczą maksymalnego udźwigu ramienia. Silnik krokowy jest to bezszczotkowy silnik prądu stałego, pełny obrót dokonuje przez wykonanie "kroków" (najczęściej co 1,8 stopnia), stąd też nazwa tego silnika. W projekcie zastosowano tylko bipolarne silniki krokowe, posiadają pojedyncze uzwojenie na fazę (4 przewody - 2 fazy), aby ograniczyć liczbę przewodów. Sterowanie odbywa się zazwyczaj za pomocą mostka H w którym prąd stały uzwojenia musi zostać odwrócony, aby umożliwić wykonanie "kroku" przez silnik. Sterownik silnika krokowego musi radzić sobie z wysokimi, chwilowymi wartościami natężenia prądu przy odwracaniu jego kierunku (prąd cewki zmienia kierunek). Najpopularniejszym mostkiem H do sterowania takimi silnikami w zastosowaniach hobbystycznych jest układ L293D. W celu uproszczenia projektu zastosowano gotowe sterowniki silników krokowych, które zostały odpowiednio dobrane pod wymagania prądowe silnika. Każdy z tych sterowników stosuje metodę mikrokroku, aby kontrolować pozycję silnika. Konceptyjny schemat omawianego silnika krokowego przedstawiono na rysunku 4.9.



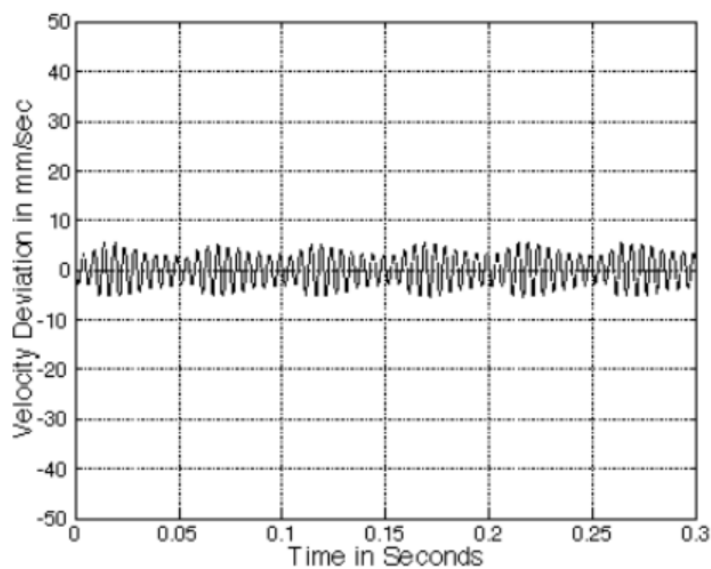
Rysunek 4.9. Konceptyjny model silnika krokowego bipolarnego [27]

Aby wygładzić ruch silnika, zminimalizować wibrację oraz oscylację wokół zadanej pozycji silnika, wszystkie sterowniki silników zastosowane w projekcie wykorzystują metodę mikrokroku. Technika ta szczególnie efektywna jest przy niskich prędkościach obrotowych. Sterowanie mikrokrokowe dzieli każdy pełny krok na mniejsze kroki. Przykładowo użyty sterownik A4988 umożliwia podział pojedynczego kroku silnika na 16 mikrokroków, co daje 3200 "kroków" na obrót zamiast 200. Najczęściej używaną techniką do uzyskania mikrokroków jest stosowanie modulacji szerokości impulsu (PWM) napięcia do sterowania prądem uzwojeń silnika. Wysyłane są dwie sinusoidalne fale napięcia, przesunięte w fazie o  $90^\circ$  - podczas narastania prądu w jednym uzwojeniu, prąd płynnie maleje w drugim uzwojeniu. Stąd mniejsze oscylacje momentu obrotowego i płynniejszy ruch.

Jak widać na rysunkach 4.10 i 4.11 technika nie jest idealna - rzeczywista konstrukcja silnika oraz ograniczenia w sterowaniu uniemożliwiają osiągnięcie idealnej charakterystyki, stąd oscylacje nie zostają wygładzone całkowicie. Przez pojawianie się tętnienia momentu obrotowego oraz szumów, można jedynie przybliżyć idealną sinusoidę, stąd ograniczenia w sterowaniu. Przez zastosowanie mikrokroku obniża się wartość generowanego momentu obrotowego, więc należy odpowiednio dobrać go uwzględniając siły tarcia oraz siły potrzebne do poruszenia przegubu. Przebiegi idealne silnika krokowego przy sterowaniu mikrokrokowym przedstawiono na rysunku 4.12, jednak w rzeczywistości często pojawiają się zakłócenia i charakterystyka nieco odbiega od idealnej.



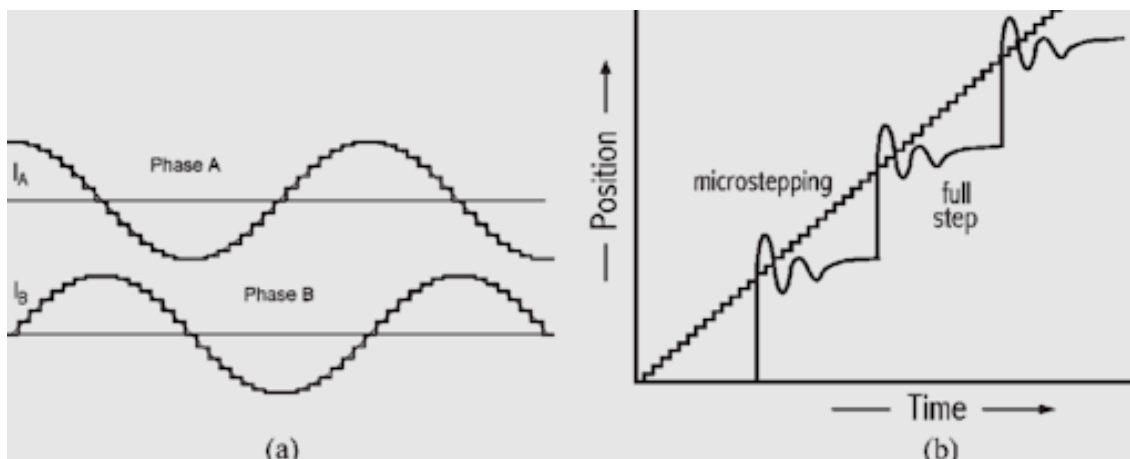
Rysunek 4.10. Przebieg odchylenia prędkości silnika krokowego bez zastosowania metody mikroroku [28]



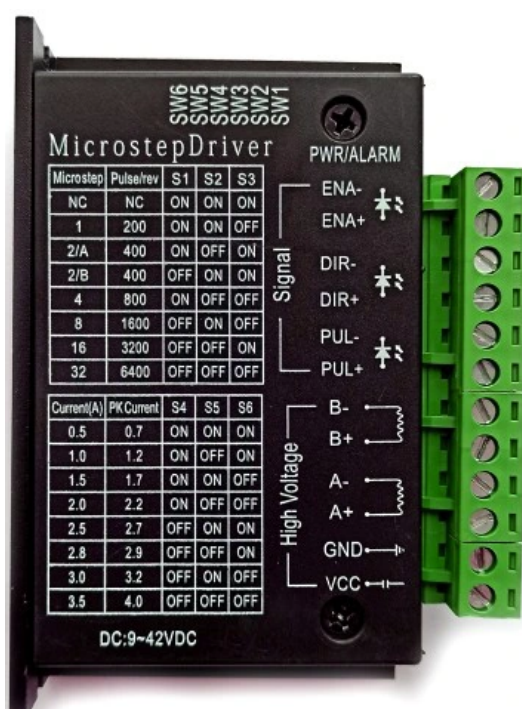
Rysunek 4.11. Przebieg odchylenia prędkości silnika krokowego z wykorzystaniem metody mikroroku [28]

Sterownik silnika, przedstawiony na rysunku 4.13, przyjmuje od mikroprocesora sygnały :

1. Enable - włączenie zasilania
2. Direction - kierunku ruchu
3. Pulse - sterownik wykonuje krok silnika za każdym razem kiedy widzi zbocze narastające



Rysunek 4.12. Na przebiegu a) widać aproksymację prądu za pomocą mikro kroków, a na przebiegu b) widać otrzymywane przebiegi pozycji silnika [29]

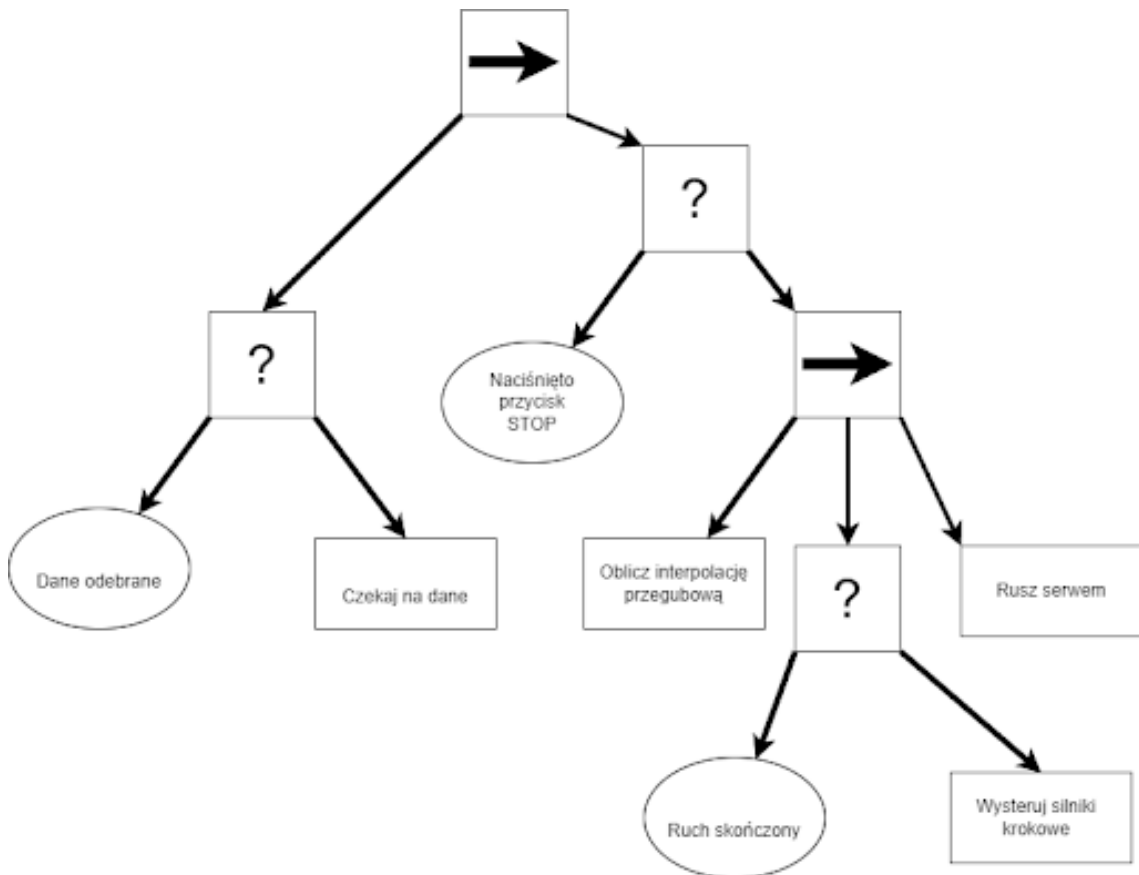


Rysunek 4.13. Zdjęcie sterownika silników krokowych TB6600

Ramię robotyczne sterowane jest za pomocą algorytmu interpolacji przegubowej, a algorytm sterowania zrealizowano na procesorze ATmega2560. W interpolacji przegubowej układ sterowania oblicza, jaką drogę musi przebyć każdy przegub w celu przemieszczenia robota z jednego punktu zdefiniowanego w programie do drugiego. Bazując na znajomości czasu ruchu i wartości przemieszczeń wymaganych dla innych osi, układ sterowania dzieli ruch na mniejsze inkreментy w ten sposób, że ruch we wszystkich osiach zaczyna i kończy się jednocześnie. Aby sterować wszystkimi silnikami jednocześnie należy przeplatać sterowanie każdego z silników między sobą, na tyle szybko aby ruch był płynny. Zastosowano do tego celu mechanizm przerwań. W uproszczeniu na samym początku algorytmu znajduje się definicja liczby kroków w jednym ruchu do przebycia dla każdego z silników, następnie uwzględniając przyspieszenie i prędkość maksymalną każdego z tych silników należy ustawić kolejkę następujących po sobie przerwań, wysyłających stan wysoki pinu STEP na poszczególne sterowniki silników krokowych. Aby wszystkie silniki zaczynały ruch

i kończyły jednocześnie (jak to jest w interpolacji przegubowej) należy rozbudować algorytm o określenie stałej czasowej dla każdego z silników przed ruchem.

Algorytm, przedstawiony ideowo na rysunku 4.14, został napisany w języku C++ i przygotowany do procesu kompilacji pod procesor ATmega2560 (różne procesory mają różne rejestry i nazwy przerwań, stąd program zadziała tylko na tym procesorze). Dane z ROSa do mikroprocesora przesyłane są za pomocą interfejsu szeregowego z wykorzystaniem USB. Zgodnie z drzewem behawioralnym algorytm sterowania ramieniem robotycznym utrzymuje pozycję silników dopóki nie dostanie wysterowania od zewnętrznego kontrolera i wykona ruch wtedy i tylko wtedy, gdy nie naciśnięto awaryjnego przycisku stop. Pierwszym krokiem algorytmu jest obliczenie interpolacji przegubowej, czyli wyliczenie odpowiedniej częstotliwości pokonywania kroku dla każdego z silników. Następnie sekwencja ruchu zostaje rozpoczęta, a po jej zakończeniu, jeżeli wysłano taką komendę, serwo umieszczone w chwytaku wykona ruch na podaną pozycję.



Rysunek 4.14. Schemat ideowy algorytmu sterowania ramieniem robotycznym umieszczonego na mikroprocesorze. Zapis za pomocą drzewa behawioralnego [30]

Oprogramowanie zostało umieszczone w załączniku na zewnętrznym nośniku CD oraz jest dostępne na repozytorium *github* [31].

## 5. REALIZACJA KONSTRUKCJI PROTOTYPU MK.0 (DOMINIK LAMCHA)

### 5.1. Technologie wytwarzania zastosowane do budowy prototypu

Zespół współpracował z różnymi warsztatami i miał dostęp do wielu wyspecjalizowanych narzędzi. Pozwoliło to podnieść konstrukcję na wyższy poziom wykonania elementów. Podczas prac używano całą gamę procesów technologicznych.

#### Druk 3D

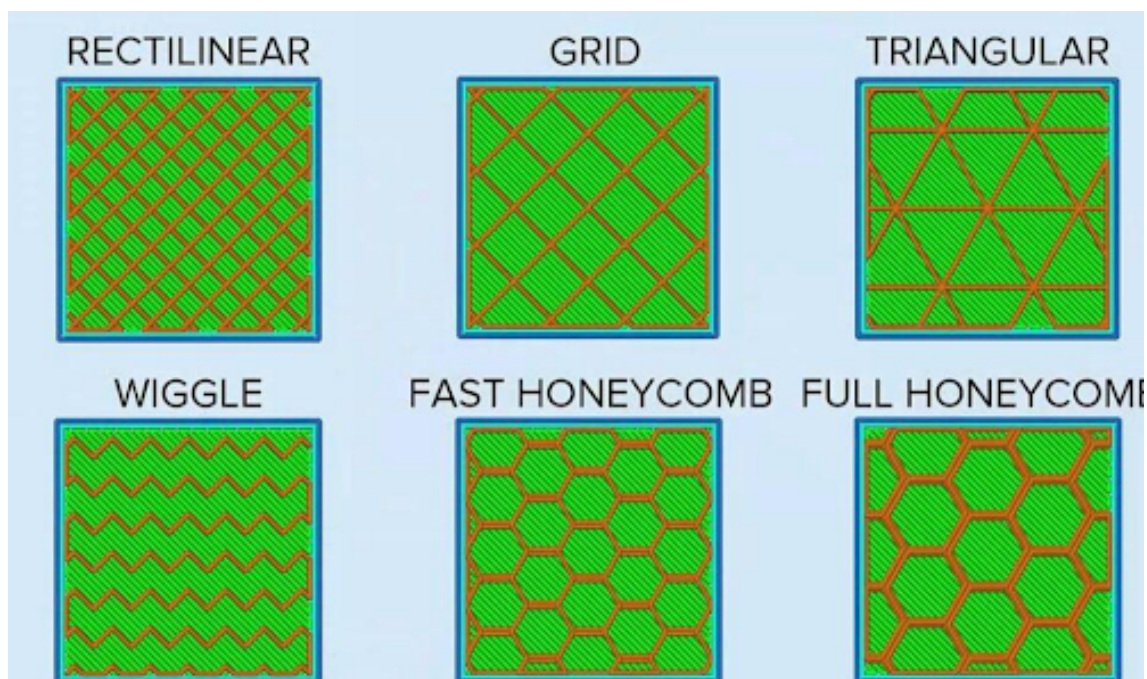
Podstawową metodą tworzenia prototypów oraz gotowych części było wykorzystanie technologii druku 3D. Wszystkie elementy które powstały w tej technologii wykonano na klasycznej drukarce typu FDM. FDM - technologia stosująca wytłaczanie materiału, wykorzystuje termoplastyczny polimer w formie filamentu (drutu o średnicy najczęściej 1,75mm) do tworzenia trójwymiarowych obiektów. W drukarkach tego typu materiał jest wpychany do rozgrzanego mechanizmu wytłaczarki (zazwyczaj od 190° do 280°), gdzie następuje jego stopienie i dalej formowanie przez przejście przez dyszę (najczęściej o średnicy 0.4 mm lub 0.6 mm). Model 3D wytwarzany jest warstwa po warstwie za pomocą głowicy umieszczonej na ploterze XYZ. Wykorzystana do drukowania elementów omawianej pracy inżynierskiej drukarka Prusa i3Mk3s została przedstawiona na rysunku 5.1



Rysunek 5.1. Prusa i3Mk3s - najbardziej popularna drukarka 3D technologii FDM[32]

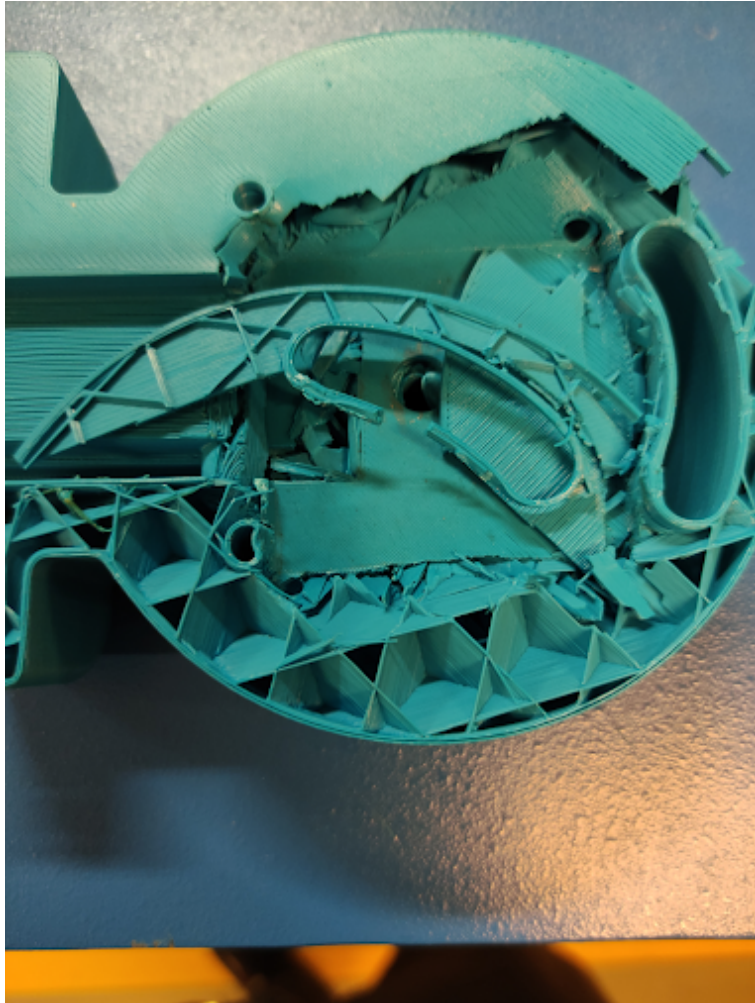


Aby zaoszczędzić materiał i wagę konstrukcji większość elementów nie jest pełnych w środku - posiadają specjalny wzór wypełniający, którego gęstość uzależniona jest od wymagań wytrzymałościowych. Przykładowe wzory pokazano na rys 5.2. Każdy ze wzorów cechuje się inną wytrzymałością na siły w innych osiach, dla przykładu największą wytrzymałość na nacisk w osi prostopadłej do druku otrzymano poprzez zastosowanie wzoru "full honeycomb"[33].



Rysunek 5.2. Przykładowe rodzaje wypełnienia[34] stosowane w druku 3D w technologii FDM

Niektóre elementy drukowane zostały poddane dodatkowym testom obciążeniowym w celu doraźnego sprawdzenia ich wytrzymałości. Sprawdzano różne stopnie wypełnień oraz typy wzorów wypełniających. Materiały po przeprowadzonej próbie wytrzymałościowej przedstawiono na rysunku 5.3.



Rysunek 5.3. Jeden z wydruków poddanych testom obciążeniowym

Opis zastosowania poszczególnych rodzaju wzorów można znaleźć na [35] , a ich charakterystyki wytrzymałościowe na [36] .

### **Frezowanie**

Do wykonania tego elementu użyto frezarki CNC. Frezowanie jest rodzajem obróbki skrawaniem, w której za ruch obrotowy odpowiada specjalne narzędzie, zaś za ruch posuwowy stół na którym zamocowany jest przedmiot obrabiany (czasami również narzędzie). Jako materiału użyto 5 mm płyty szkła akrylowego. Płyta została przymocowana do urządzenia za pomocą stołu próżniowego. Parametry ruchu wrzeciona zostały dopasowane do używanego frezu oraz materiału. Pracę narzędzia ukazano na rysunku 5.4.



Rysunek 5.4. Frezarka podczas obróbki szkła akrylowego

## Toczenie

Podstawa robota musiała zapewniać możliwość przepustu kabli mimo możliwości obrotu. Dlatego zdecydowano się na wykonanie specjalnej tulei łączącej elementy zaprojektowanego przez zespół łożyska podstawy. Tuleja ta została wytoczona. Toczenie jest obróbką skrawaniem, gdzie element obrabiany porusza się wokół osi tokarki, a nóż jest stacjonarny, umieszczony na wózku narzędziowym. Proces ten pozwala uzyskać przedmioty, które muszą zachowywać okrągły kształt z dużą dokładnością. Toczony elementy wykonano dzięki uprzejmości firmy Fijała Poland, która użyczyła maszyn skrawających.



Rysunek 5.5. Tokarka w firmie Fijał Poland

## Odlewanie

Profesjonalne aplikacje zazwyczaj odlewają korpusy swoich maszyn z aluminium a potem frezują w nich powierzchnie przylgniowe czy wytaczają otwory. Używa się wtenczas form zrobionych z masy formierskiej. W przypadku ramienia MK.0 odlane zostały tylko okładziny chwytaka. Przygotowano negatyw modelu i wydrukowano zeń formę. Następnie zalano ją silikonem. Zdjęcie z procesu ukazano na rysunku 5.6.



Rysunek 5.6. Proces zalewania formy silikonem

### **Wycinanie laserem**

Jest to proces który wykorzystuje promień lasera i gaz techniczny w celu pozbycia się materiału obrabianego. Przykładowe zdjęcie z pracy lasera przemysłowego ukazano na rysunku 5.7. W przypadku projektu MK.0, stworzono potrzebne rysunki a wycinanie zamówiono u firmy zewnętrznej przy pomocy pośredniczącej firmy Fijała Poland.



Rysunek 5.7. Przemysłowy laser podczas pracy

Gotowe arkusze wypiaskowano a następnie pomalowano. Przykład gotowego półproduktu ukazano na rysunku 5.8.



Rysunek 5.8. Element po wypiaskowaniu i pomalowaniu

### Spawanie

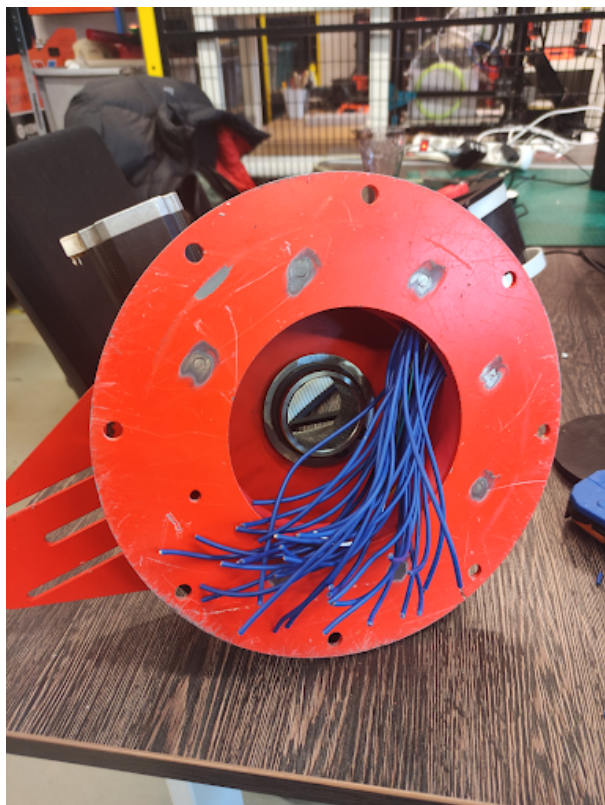
Wycięte laserowo arkusze były następnie zespawane. Spawanie polega na łączeniu materiałów przez ich nagrzanie i stopienie w miejscu łączenia z dodaniem lub bez dodania spoiwa. Źródłem ciepła jest zwykle łuk spawalniczy tworzony przez prąd generowany przez źródło prądu spawania. Spawanie z użyciem łuku elektrycznego nazywa się spawaniem łukowym. Kratownica pierwszego członu została wyspawana metodą MAG. W przypadku tej technologii jako gazu osłonowego  $CO_2$ , który jest gazem aktywnym. Po połączeniu 4 arkuszy, konstrukcja została wypiaskowana, a następnie pomalowana. Efekt pracy ukazano na rysunku 5.9.



Rysunek 5.9. Kratownica po wyspawaniu i pomalowaniu

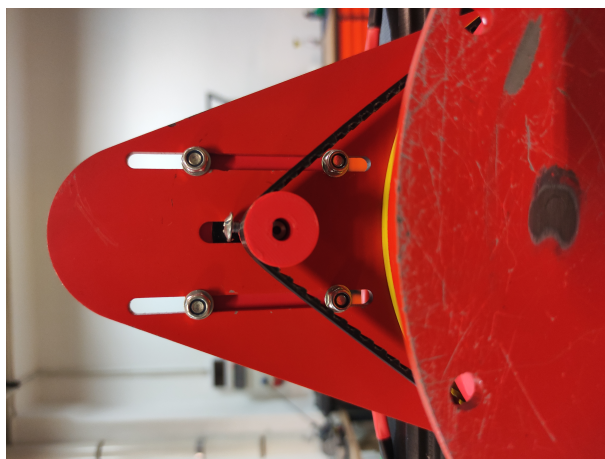
## 5.2. Etapy montażu prototypu

Pierwszym złożonym elementem była podstawa. Do wydrukowanych dystansów oraz koła zębatego przymocowano flanszę główną i wycięte wcześniej podstawy łożyska. Założony został pas zębata. Przymocowano gniazdo wielopinowe oraz założono bieżnię łożyska podstawy. Po zaaplikowaniu smaru teflonowego i ułożeniu kulek, łożysko zamknięto osadzając na wytoczonej wcześniej tulei pierścienie segera. Tuleja ta widoczna jest na rysunku 5.10.



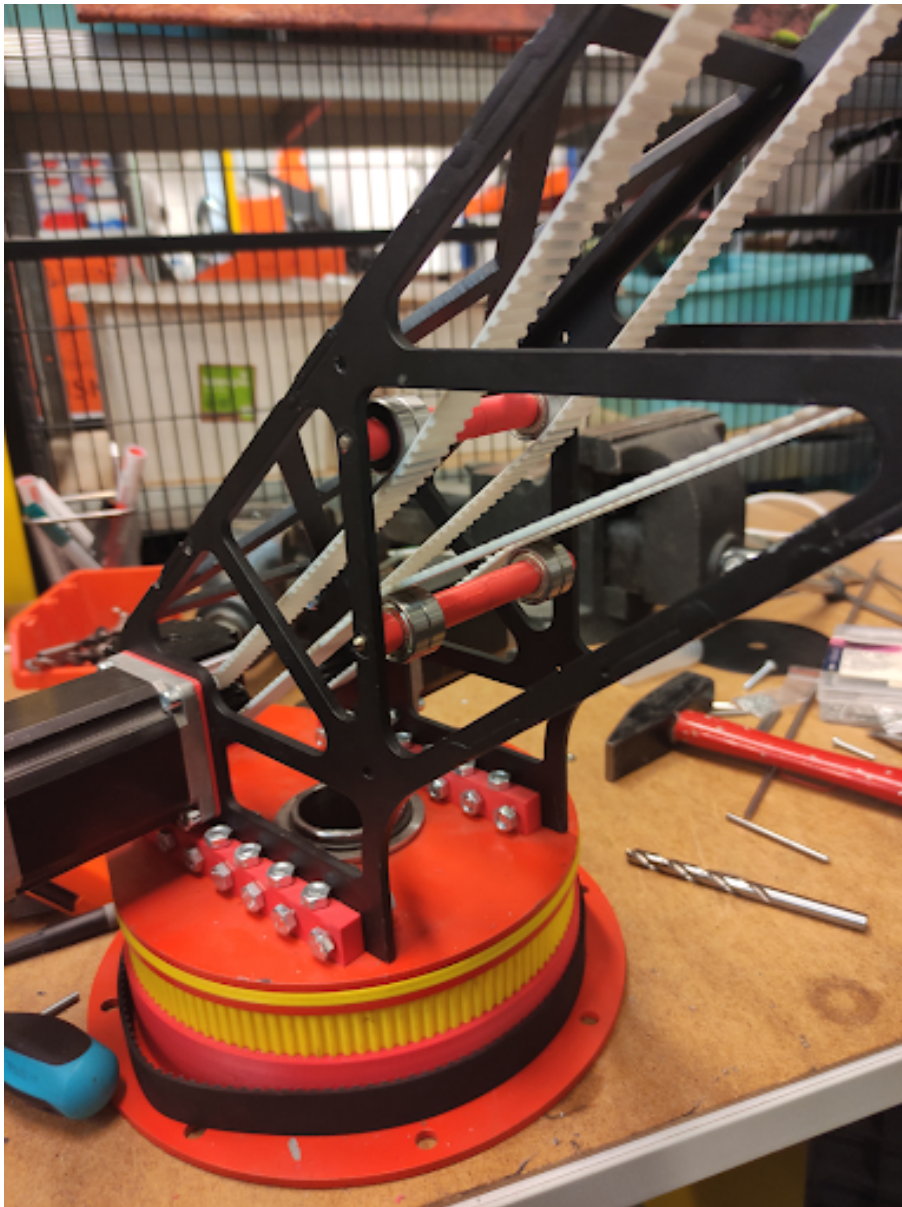
Rysunek 5.10. Widok podstawy po osadzeniu gniazda

Wyspawaną i pomalowaną kratownicę pierwszego członu przymocowano śrubami do wydrukowanych bloków. osadzone zostały silniki krokowe. Napinanie pierwszego pasa realizowane jest na prowadnicach pierwszego silnika krokowego. Widoczne jest to na rysunku 5.11.



Rysunek 5.11. Napięty pas zębata podstawy

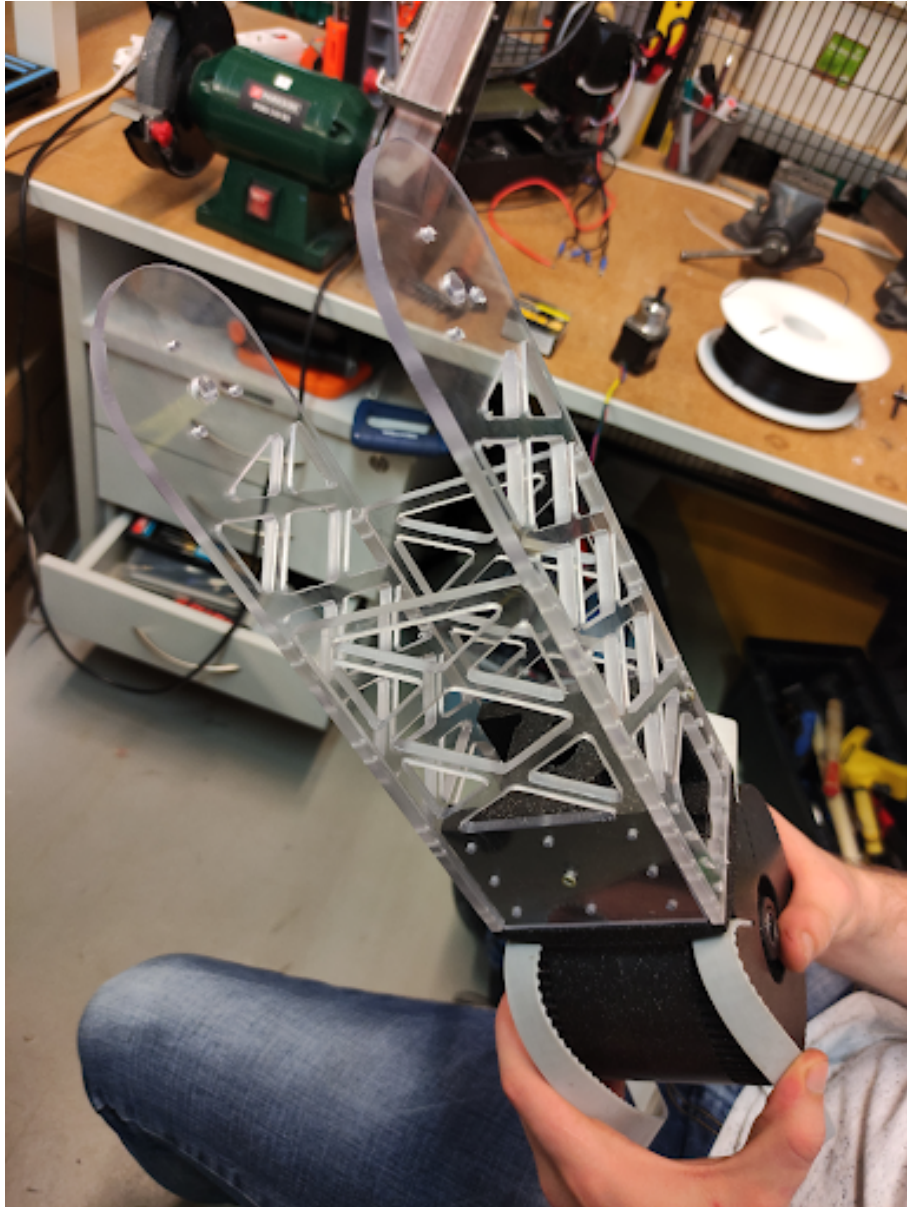
Napinacze pasków widoczne na rysunku 5.12 zostały zamontowane po zakończeniu usytuowania dalszych członów.



Rysunek 5.12. Gotowa konstrukcja pierwszego członu

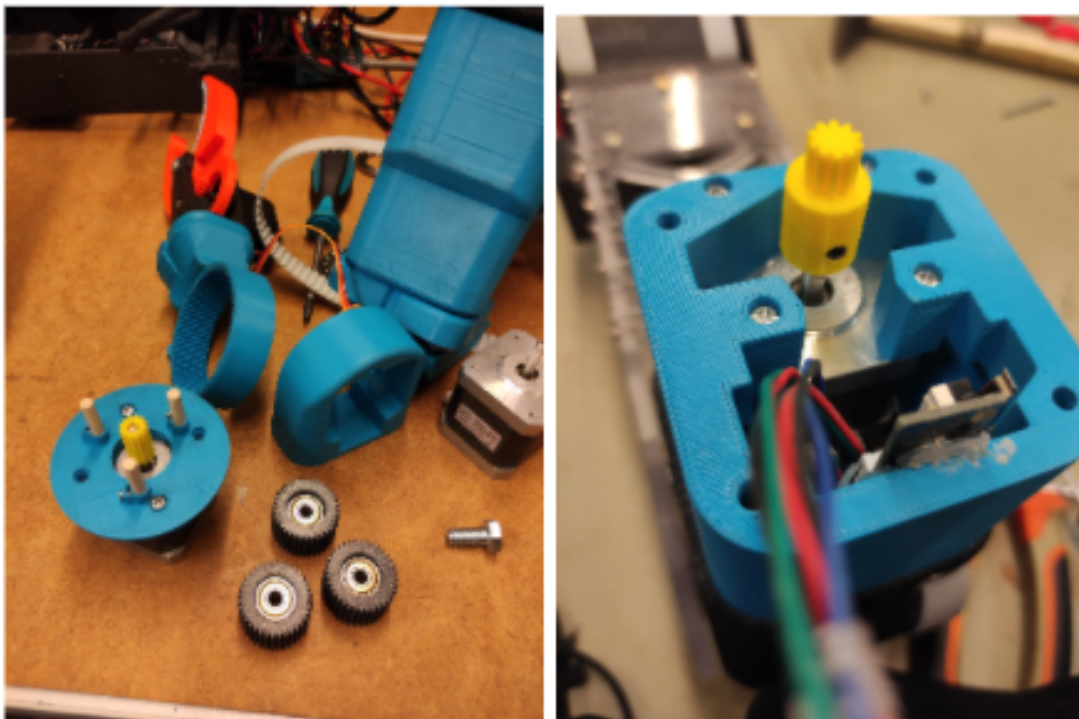
Pracę nad drugim członem rozpoczęto od skręcenia ze sobą wyfrezowanych arkuszy. Pierwsze testy wykazały że typowe śruby twardości 8.8 mają tendencję do ścinania swoich łbów więc zdecydowano się na użycie nierdzewnych śrub o podwyższonej twardości. Tak skręcaną ramę przymocowano do wydrukowanego gniazda, w którym zawierają się również koła zębate. Gotową konstrukcję ukazano na rysunku 5.13





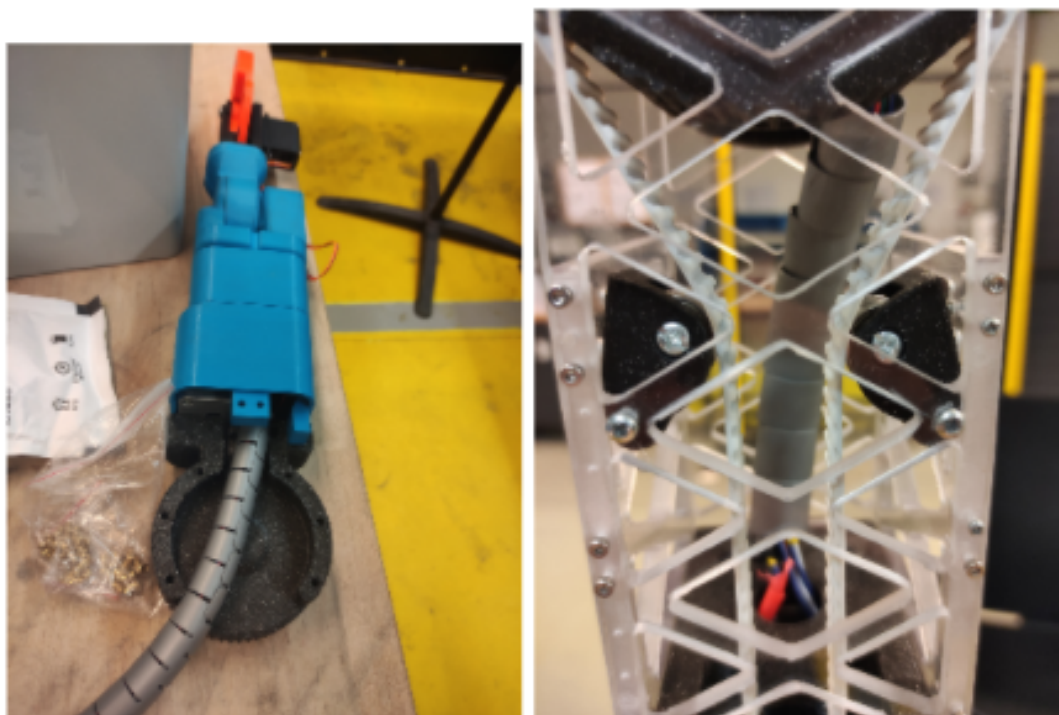
Rysunek 5.13. Skręcona konstrukcja drugiego członu

Osadzono łożyska talerzowe i dostosowane zostały piny służące do osadzenia w metalowej kratownicy. Przepuszczono peszel kablowy i po założeniu pasków, zamocowano drugi przegub w kratownicy. Osadzono łożyska i zamknięto pokrywy. Paski zostały naciągnięte za pomocą nieruchomych napinaczy. Przegub 3, 4 i 5 w większości składają się z elementów drukowanych. Składanie tych części ukazano na rysunku 5.14.



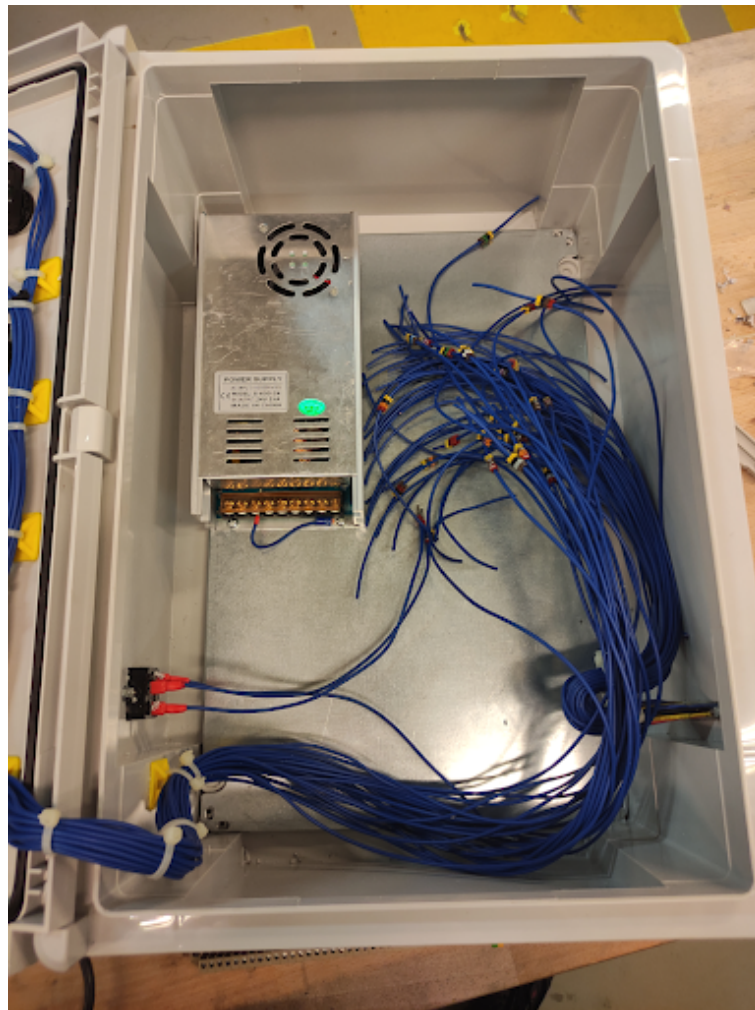
Rysunek 5.14. Prace montażowe górnych przegubów ramienia

Procedura osadzenie była bliźniacza co w przypadku członu drugiego z tą różnicą że napinacze paska są tym razem regulowane. Na każdym z etapów należało pamiętać o centralnie prowadzonej wiązce elektrycznej. Na rysunku 5.15 pokazuje złożoną górną część ramienia i napięcie pasków trzeciego członu.



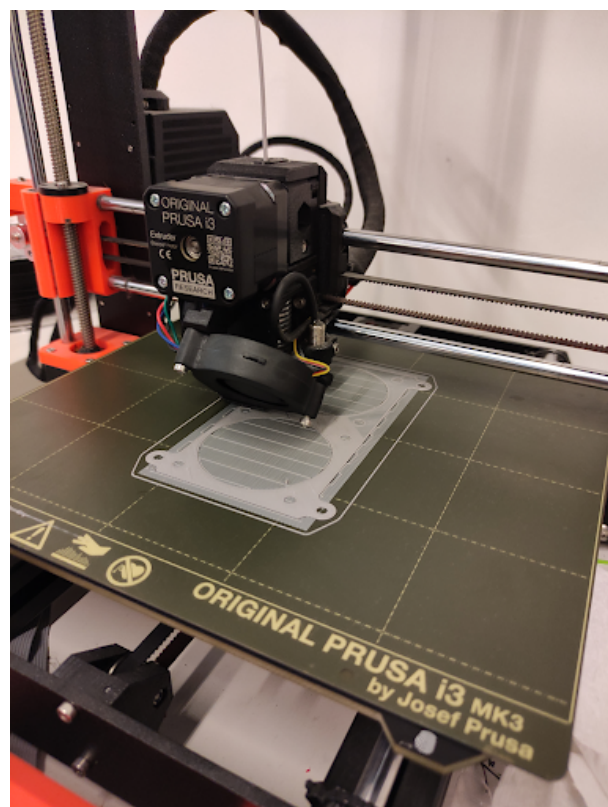
Rysunek 5.15. Złożone przeguby końcowe

Prace nad szafą sterowniczą rozpoczęto od wywiercenia wszelakich otworów potrzebnych do osadzenia lampek oraz przycisków. Następnie zamontowano gniazda oraz listwę zaciskową gniazda wielopinowego. Na rysunku 5.16 ukazano prace montażowe na płycie szafy.



Rysunek 5.16. Początki prac nad szafą sterowniczą

Po przylutowaniu wyprowadzeń, gniazdo zostało wpuszczone w szafę i przykręcone. Na płycie montażowej zainstalowano wszelkie niezbędne komponenty i rozpoczęto poprowadzenie połączeń. Osadzono wszystkie elementy zewnętrzne i uziemiono wystające metalowe elementy. Wydrukowane zostały również osłony wentylatora i czepni powietrza do chłodzenia szafy co ukazano na rysunku 5.17



Rysunek 5.17. Drukowanie osłon wentylatora

Przewód łączący skrzynię z ramieniem wykonano przylutowując do wtyczki 37 żył kabla sterowniczego o przekroju 1,5 mm<sup>2</sup> by minimalizować potencjalne spadki napięć. Pracę ukazano na rysunku 5.18



Rysunek 5.18. Lutowanie wtyczki DB-37

Następnie nałożona nań ochronny oplot. Po wydrukowaniu pokryw wtyczek osadzono w nich wtyczki DB - 37 i zalano klejem. W ten sam sposób zarobiono obie strony przewodu. Na rysunku 5.19 widoczny jest proces klejenia korpusu w którym osadzona jest wtyczka.



Rysunek 5.19. Klejenie obudowy wtyczki

Po wyschnięciu obu stron kabla, sprawdzono ponownie poprawność połączeń elektrycznych i zgodność z rozkładem wyprowadzeń. Nie zdecydowano się na dodatkowe żyły wzmacniające, gdyż przekrój przewodów gwarantuje ich wytrzymałość mechaniczną

Prace montażowe zakończono pomyślnie. Na rysunku 5.20 ukazano gotowe ramię wraz z szafą sterowniczą. Przedstawiono widok pracującej szafy na rysunku 5.21. Zmontowane aparaty wewnątrz ukazano na rysunku 5.22 oraz 5.23



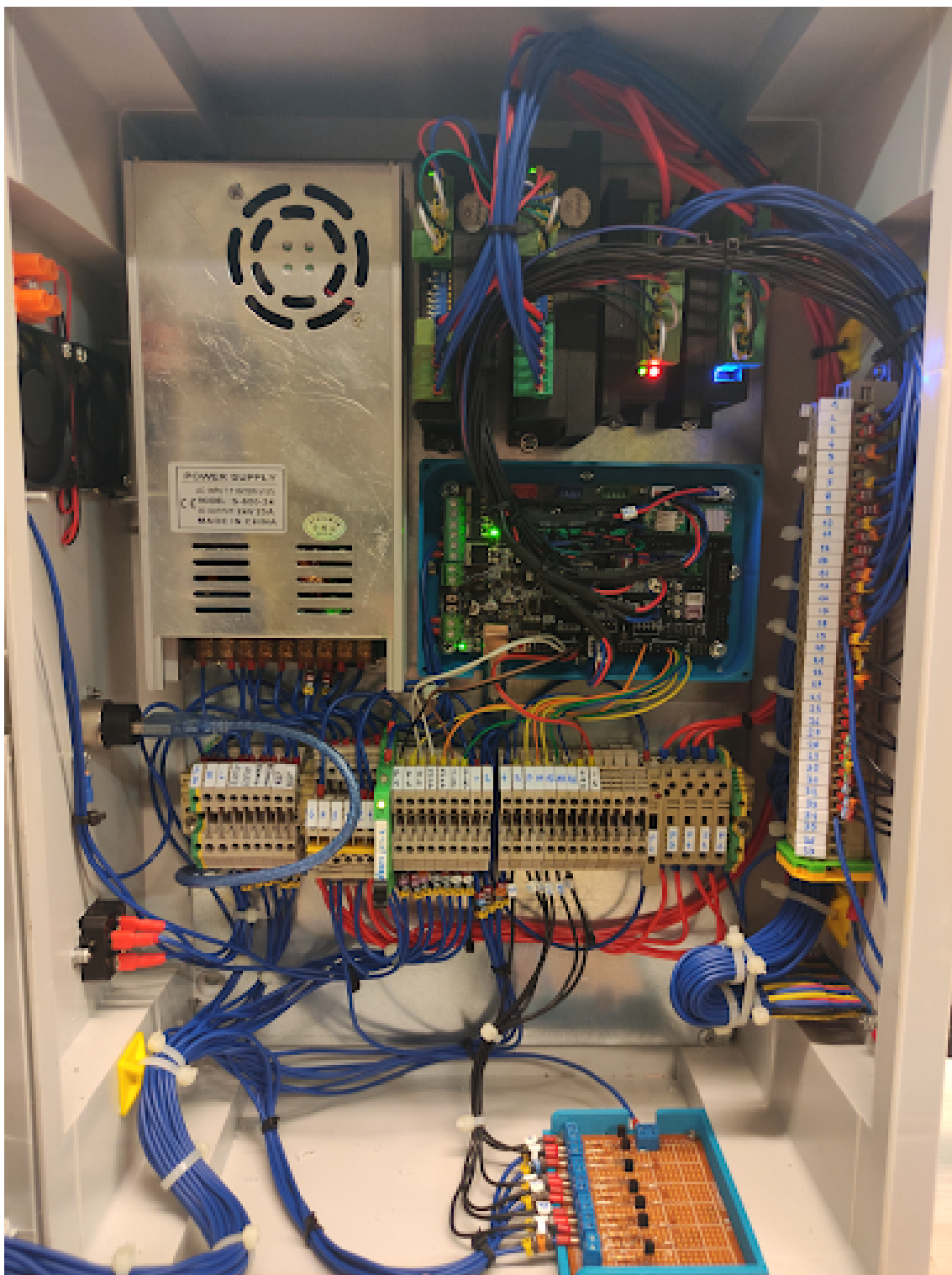
Rysunek 5.20. Robot MK.0 wraz z szafą sterowniczą



Rysunek 5.21. Szafa sterownicza podczas pracy



Rysunek 5.22. Wieko szafy - widok wewnętrzny



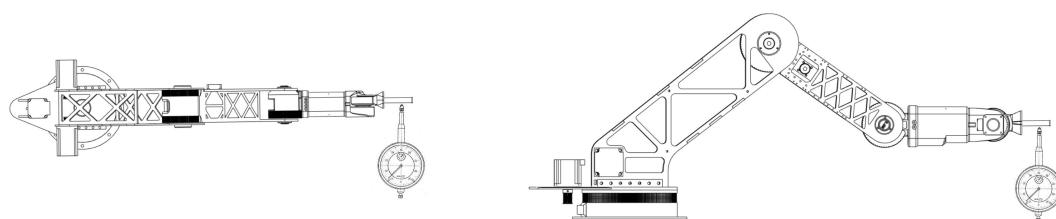
Rysunek 5.23. Szafa sterownicza po otwarciu



## 6. TESTY WERYFIKACYJNE PRACY PROTOTYPU (DOMINIK LAMCHA)

### 6.1. Pomiary

Zaprojektowano badanie które weryfikuje powtarzalność pracy poszczególnych osi projektu. Wykorzystano do tego celu czujnik zegarowy umieszczony na statywie magnetycznym. Wskazuje on przemieszczenie swojej głowicy z dokładnością do jednej setnej milimetra. Przy jego pomocy, weryfikowano pozycję chwytaka po wykonaniu ruchu testowego. Trajektorię zadaną ustalono dla każdego z silników, jako wychylenie o  $15^\circ$  od pozycji startowej, a następnie ruch powrotny. Konfiguracje bazowe ukazano na rysunku 6.1.



Rysunek 6.1. Bazowe konfiguracje przy pomiarze powtarzalności

Sprawdzano odpowiedź robota na cykliczne przesunięcia. Wykonywany program zakładał bezwzględną powtarzalność ruchu (bazowanie i ruch bez sprzężenia zwrotnego). Niedokładności konstrukcji mechanicznej powodują jednak brak precyzji ruchu. Podczas pomiarów zauważono również spore deformacje materiałów.

Po wybraniu wstępnego luzu i dotknięciu czujnika zadawano ruch o  $15^\circ$  w kierunku przeciwnym do instrumentu pomiarowego. Następnie podawano rozkaz powrotu do pozycji wyjściowej. Taka sekwencja była powtórzona ośmiokrotnie i przy każdej pozycji krańcowej zostały odczytane wartości czujnika zegarowego. Przykład odczytu pokazano na rys 6.2.



Rysunek 6.2. Pomiar czujnikiem zegarowym

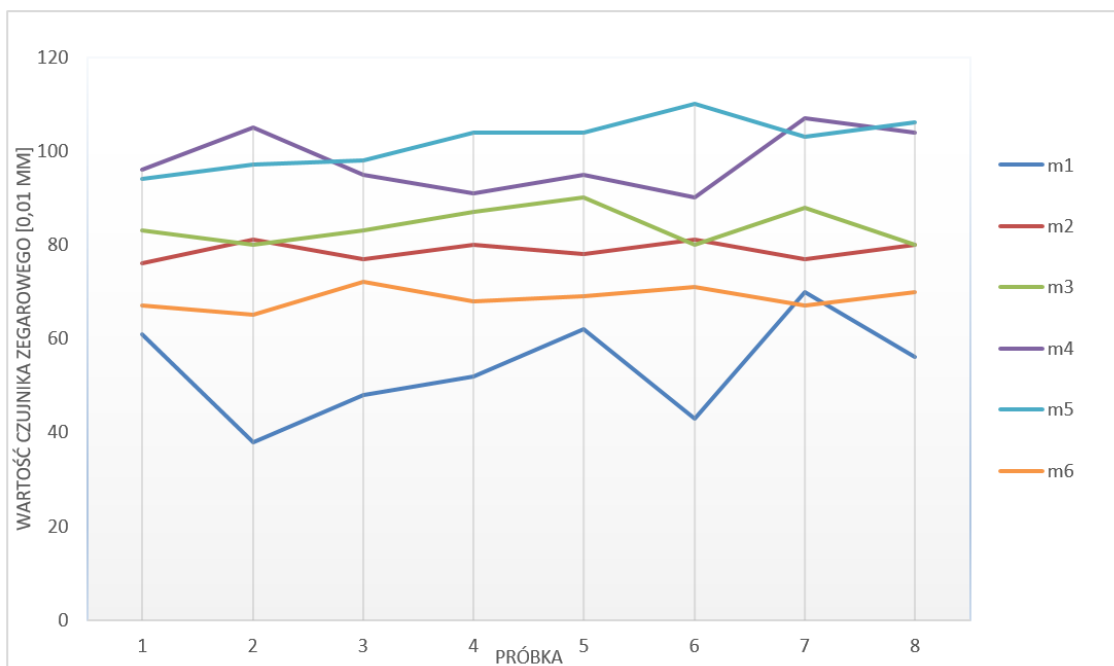
Istotnie wspomnieć, iż dokonując pomiarów ramię było nieobciążone i odkształcenia były powodowane jedynie masą własną. Doświadczenie miało więc dowieść poprawnego pozycjonowania pętli otwartego sprzężenia zwrotnego. Aby obliczyć powtarzalność dla danej próbki pomiarów należy odszukać wartości krańcowe serii i użyć formuły przedstawionej we wzorze (6.1).

$$Repeatability[S] = \frac{S_{max} - S_{min}}{2} \quad (6.1)$$

Obliczone wartości dla zebranych wartości przedstawiono w tabeli 6.1

Tabela 6.1. Zestawienie pomiarów czujnika zegarowego dla każdej osi wraz z obliczoną powtarzalnością S

Pomiar [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	Min	Max	S
$m_1$	0,61	0,38	0,48	0,52	0,62	0,43	0,70	0,56	0,70	0,38	0,16
$m_2$	0,76	0,81	0,77	0,80	0,78	0,81	0,77	0,80	0,81	0,76	0,025
$m_3$	0,83	0,80	0,83	0,87	0,90	0,80	0,88	0,80	0,90	0,80	0,05
$m_4$	0,96	1,05	0,95	0,91	0,95	0,90	1,07	1,04	1,07	0,90	0,085
$m_5$	0,94	0,97	0,98	1,04	1,04	1,10	1,03	1,06	1,10	0,94	0,08
$m_6$	0,67	0,65	0,72	0,68	0,68	0,71	0,67	0,70	0,72	0,65	0,035



Rysunek 6.3. Wykres rozkładu pomiarów dokładności powrotu do pozycji zadanej

Pomiary wykazują zaskakująco dobrą powtarzalność wykonywanych ruchów. Największym ograniczeniem dokładności konstrukcji jest jej sztywność. Aby ją poprawić należałoby użyć lepszych korpusów, wykonanych np. z aluminium. Widocznie odstaje dokładność pierwszego członu co może być spowodowane zbyt słabym silnikiem do tej aplikacji. Kolejnym z powodów jest fakt najdalej oddalonego punktu pomiarowego od osi obrotu.

Dokonano pomiarów wybranych napięć i prądów Natężenia prądu na zaciskach jarzm bezpieczników przy pracy jałowej bez obciążenia

Na podstawie pomiarów stwierdzono zgodność z zakładanymi zabezpieczeniami 1A. Wyniki tychże badań przedstawiono w tabeli 6.2. Jeżeli podczas pracy jałowej wykorzystano zaledwie około 40% wartości zabezpieczenia, to wytrzyma ono chwilowe przeciążenia, które charakteryzują pracę silników krokowych. W przypadku zadania ruchu z maksymalnym obciążeniem wartość ta wzrasta, ale nie przekracza 1A. Zabezpieczenie więc zadziała dopiero w przypadku poważnego przeciążenia lub awarii (np zwarcia). Bezpieczniki topikowe cechują się również pewną bezwładnością cieplną, która w tym przypadku jest korzystna. Układy sterowników oraz silniki nie są wrażliwe na przetężenie lecz na ciepło które generują wyższe przepływy, dlatego też chwilowe przeciążenia są akceptowane.

Tabela 6.2. Pomiary prądów na osadach bezpiecznikowych

Element	Pomiar
F1	0,41 A (AC)
F2	0,53 A
F3	0,26 A
F4	0,365 A
F5	0,362 A
F6	0,352 A

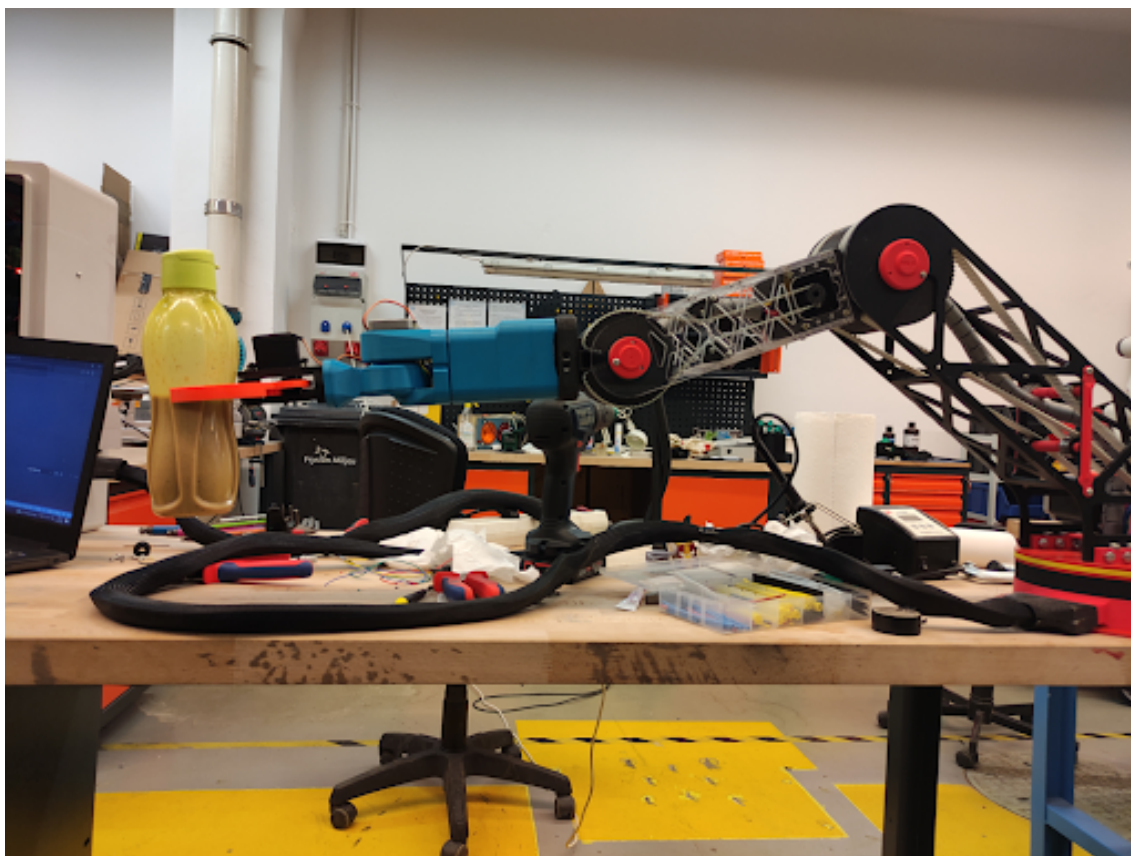
Zmierzono napięcia na każdej cewce z silników krokowych. Pomiary przedstawione w tabeli 6.3, wykazują że połączenia są sprawne i posiadają podobną wartość oporu. Napięcia na obu cewkach silnika w stanie jałowym powinny być do siebie bardzo zbliżone, co potwierdzają pomiary.

Tabela 6.3. Pomiary napięć cewek silników krokowych

Numer połączenia	Wartość
112	1,54 V
134	1,61 V
2112	1,34 V
2134	1,32 V
2212	1,34 V
2234	1,34 V
312	2,37 V
334	2,40 V
412	2,67 V
434	2,66 V
512	2,34 V
534	2,37 V

## 6.2. *Możliwość zastosowań*

Jako eksperyment testowy zespół nakazał ramieniu przenosić butelkę. Udało się wykonać zadaną trajektorię przestawienia naczynia. Ramię jest w stanie manipulować obiektami do 0,5 kg z satysfakcjonującą prędkością oraz dokładnością. Przy pomocy kilku ramion MK.0 można by było stworzyć potencjalną linię produkcyjną. Należy pamiętać, że chwytak butelek nie jest koniecznym wyposażeniem kiści manipulatora. Na rysunku 6.4 ukazano test ruchu robota z obciążeniem na pełnym wysięgu ramienia.



Rysunek 6.4. Procedura testowa udźwigu ramienia

Procedurę testową powtarzalności oraz udźwigu ramienia zamieszczono w sekcji załączników na nośniku CD.

## 7. PODSUMOWANIE (DOMINIK LAMCHA, DAWID MOŚCICKI)

### 7.1. Wnioski wyciągnięte podczas prac

Założenia projektowe pracy zostały zrealizowane, a powstałe ramię robotyczne przetestowane. Wytworzony prototyp może być podstawą do dalszego rozwoju projektu oraz stanowić podstawę do testowania algorytmów manipulacji i generowania trajektorii. Eksperymentalne ramię robotyczne MK.0 nie posiada wystających przewodów poza obudowę oraz posiada udźwig w okolicy 0.7 kg. Każdy z przegubów realizuje powtarzalnie przewidziany zakres roboczy, mimo stosunkowo dużego wysięgu, z zamontowanym chwytakiem wynoszącego około 1.05 m. Podczas składania podstawy założony został zamknięty pas zębaty. Jego umiejscowienie uniemożliwia jego łatwą wymianę. W kolejnych wersjach konstrukcji zespół zdecydowałby się na ułatwienie obsługi ramienia i możliwość prostej wymiany podstawowych elementów eksploatacyjnych.

Zespół przekonał się również jak istotne jest uwzględnianie zużycia elementów, by umożliwić serwisowanie projektu.

Wykonanie projektu szafy sterowniczej pokazało projektantom istotę planowania większych skrzyń na osprzęt. Przez zastosowanie zbyt małej skrzyni musiano zdecydować się na zrezygnowanie z koryt kablowych i nie pozostawiono wiele miejsca na ewentualną przebudowę.

Problemy z okablowaniem ramienia skłoniłyby zespół do zamiany wiązki na przewody z izolacją silikonową. Większa elastyczność takich połączeń skutkowałaby dłuższą, niezawodną pracą.

Wyciąganie się pasów z czasem może doprowadzić do zaistnienia luzów i przeskakiwania pasa pod obciążeniem. By temu zapobiec należałoby skonstruować napinacze z automatycznym kasowaniem luzu.

Moc silnika M1 powinna zostać zwiększona, gdyż przy wyższych obciążeniach i prędkościach istnieje ryzyko zgubienia kroku.

Dzięki nowoczesnym metodom prototypowania i wytwarzania, mimo bardzo ograniczonych kosztów, zespół był w stanie zrealizować wieloelementowy prototyp i przetestować na nim skomplikowane oprogramowanie.

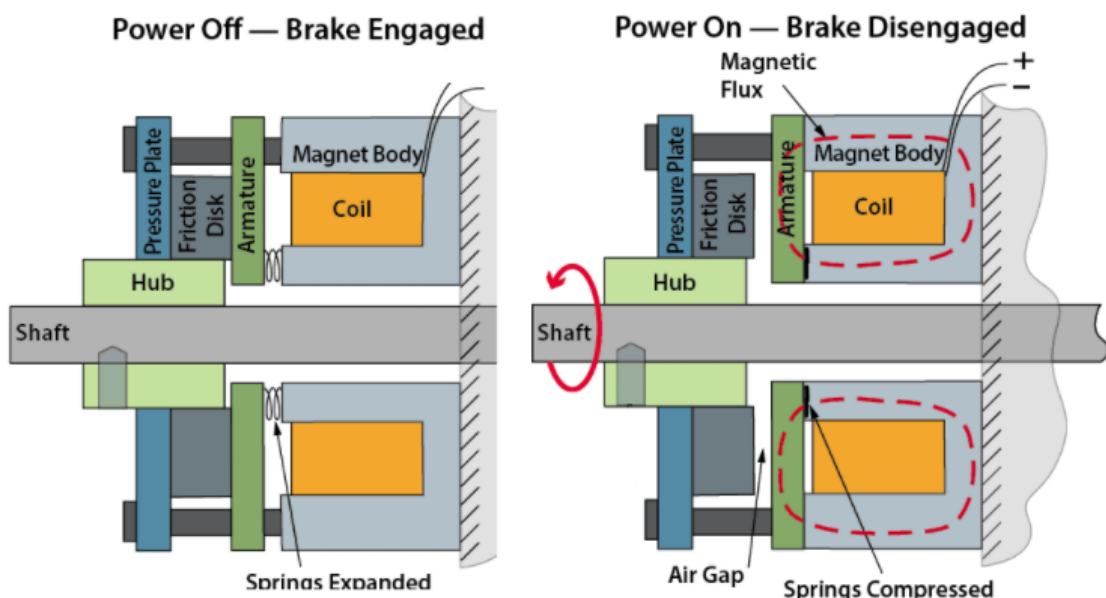
Przestarzały, 8bitowy, mikroprocesor z rodziny ATmega jest w stanieysterować wiele silników krokowych równorzędnie utrzymując wymianę danych z komputerem nadrzędnym. Aby ograniczyć koszty projektowe można zakupić prosty i tani mikroprocesor, a skomplikowane i złożone obliczeniowo problemy rozwiązywać w wyższej warstwie systemu.

Technologia druku 3D obniża znacząco koszty wykonania pierwszych, funkcjonalnych prototypów i umożliwia weryfikację idei projektowych.

Dzięki infrastrukturze zapewnianej przez ROSa, można znacząco w stanie skrócić czas potrzebny do wytworzenia oprogramowania skomplikowanych systemów robotycznych bez braku potrzeby stosowania drogich sterowników programowalnych. Niniejsza praca pokazuje wycinek możliwości tego systemu na przykładzie gotowego środowiska wizualizującego MoveIt i algorytmów rozwiązujących zagadnienie kinematyki prostej i odwrotnej, korzystając z opisu URDF. Dzięki wykorzystaniu abstrakcyjnej warstwy komunikacji ROSa można programować i testować niezależnie od siebie komponenty programu (np. skrypt odpowiadający za przekształcanie wartości kątowych przegubów ramienia robotycznego w liczby kroków silnika oraz skrypt odpowiadający za detekcję kolizji robota z innym przedmiotem).

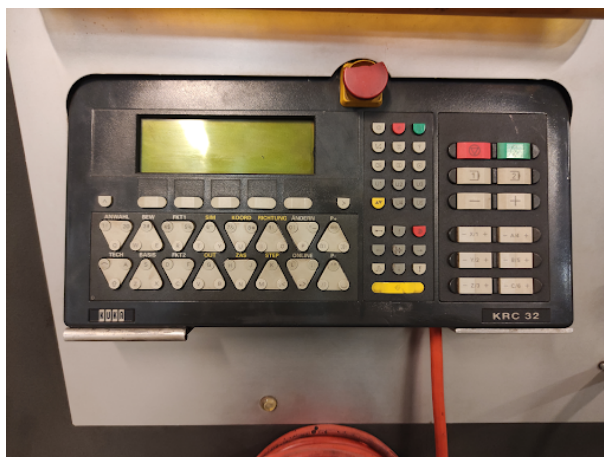
## Ograniczenia spowodowane kosztami

Konstrukcja nie posiada niektórych funkcjonalności, które zespół chciałby zaimplementować. Najważniejszym z brakujących układów jest system blokowania ramienia po odcięciu zasilania. Konstrukcja MK.0 umożliwia zatrzymanie ruchu w danej pozycji przy założeniu pełnej sprawności funkcjonowania programu. Bazuje ona na zaprzestaniu wysyłania impulsów na sterowniki silników i zatrzymanie ich w konkretnym kroku. Niestety w przypadku awarii sterownika może dojść do niepożądanych ruchów. Wtedy należy odłączyć zasilanie od układu, co realizowane jest poprzez wyłącznik główny. Niestety wtedy odcięte jest również zasilanie sterowników, co powoduje swobodny ruch członów ramienia. Profesjonalne rozwiązania stosują hamulce elektromagnetyczne. Hamulce takie działają w trybie NC czyli są normalnie zamknięte. Oznacza to że by umożliwić jakikolwiek ruch należy podać na nie zasilanie. Wtedy cewki odciągają zaciski cierne hamulca. Rozwiązanie takie gwarantuje blokadę ruchu przy całkowitym odcięciu zasilania. Na rysunku 7.1 ukazano hamulec w stanie zamkniętym (Power Off) oraz w stanie otwartym (Power On) [37].



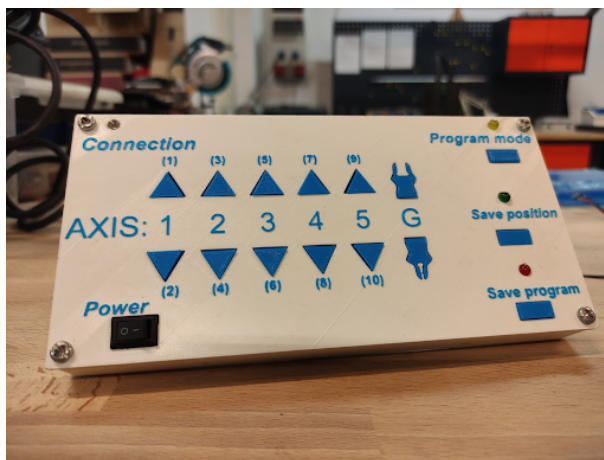
Rysunek 7.1. Schemat typowego rozwiązania hamulca elektromagnetycznego[37]

Z powodu ograniczonego czasu nie skończono rozwijać aplikacji teach panelu. Profesjonalne aplikacje robotów przemysłowych posiadają takowy panel, który pozwala manualnie ustawiać robota w konkretnych pozycjach i zapisywać je tworząc trajektorię. Przykład takowego ukazano na rysunku 7.2.



Rysunek 7.2. Teachpanel robota firmy KUKA

Przyciski muszą umożliwiać kontrolę każdej z osi osobno lub przesuwanie się samej końcówki roboczej. Na zdjęciu widoczny jest zaawansowany panel sterowniczy firmy KUKA. Przygotowano prototyp panelu ramienia MK.0, lecz nie udało się zaimplementować go w ostatecznej wersji urządzenia. Przedstawiono go na rysunku 7.3. Umożliwiał on ruch każdej z osi z osobna bez regulacji prędkości ruchu. Po uruchomieniu trybu programowania za pomocą przycisku PROGRAM MODE, użytkownik mógł ręcznie przestawiać robota i zapisywać stany końcowe za pomocą przycisku SAVE POSITION. Po zakończonej sekwencji należało zatwierdzić ruchy przyciskiem SAVE PROGRAM.



Rysunek 7.3. Prototypowy panel robota MK.0

Projektując kolejną wersję konstrukcji zespół zdecydowałby się na aplikację mobilną i komunikację ze sterownikiem poprzez moduł bezprzewodowy. Profesjonalne rozwiązanie nadal wymagałoby skonstruowania dedykowanego panelu. Na pokazanym prototypie zabrakło przycisku awaryjnego wyłączenia napięcia.



## WYKAZ RYSUNKÓW

1.1	Schemat kinematyczny ramienia robotycznego IRB-6 . . . . .	8
1.2	Omron Viper 850 [4] . . . . .	10
1.3	Schemat przekładni falowej według normy PN-79/M-88514 [5] . . . . .	10
1.4	Zdjęcie poglądowe ramienia AR3[7] . . . . .	12
1.5	Zdjęcie poglądowe ramienia BCN3D MOVEO[8] . . . . .	13
1.6	Zdjęcie poglądowe ramienia KAUDA[9] . . . . .	13
2.1	Schemat kinematyczny ramienia robotycznego . . . . .	15
2.2	Schemat ramienia robotycznego, dla którego zastosowano odsprężenie kinematyczne [10] . . . . .	19
2.3	Zależności kątowe pierwszych trzech przegubów. a) rzut izometryczny z pokazaniem kątów, b) rzut z góry z pokazaniem kąta $\theta_1$ , c) pokazanie odsunięcia osi obrotu kolejnych członów od $\theta_1$ [10] . . . . .	20
2.4	Dwie możliwe konfiguracje ramienia. a) ramię po lewej w górze, b) ramię po prawej na dole [10] . . . . .	21
2.5	Schematyczne rozrysowanie momentów silników ramienia robotycznego oraz odsunięcie ich środków mas od ich osi obrotów. . . . .	22
2.6	Wyniki symulacji obciążeń dynamicznych. a) Zależność $\tau_3$ od $\theta_3$ , b) Zależność $\tau_2$ od $\theta_2$ . . . . .	24
2.7	Widok uporządkowanego projektu w Fusion360 . . . . .	24
2.8	Uproszczony model końcowy zaprojektowanego ramienia robotycznego . . . . .	25
2.9	Zamknięty pas zębaty T5 o szerokości 16mm przekładający ruch silnika na pierwszy człon ramienia robotycznego. . . . .	26
2.10	Rysunek złożeniowy pierwszego przegubu ramienia robotycznego. . . . .	27
2.11	Zaprojektowana prymitywna bryła na podstawie założeń konstrukcyjnych. . . . .	28
2.12	Kształt otrzymany przez algorytm optymalizacji topologicznej. . . . .	28
2.13	Symulacja naprężeń Von Mises zaprojektowanej konstrukcji na podstawie poprzednich symulacji i założeń projektowych. . . . .	29
2.14	Symulacja odkształceń otrzymanej końcowej bryły, przemieszczenie wyrażone w milimetrach. . . . .	30
2.15	Symulacja odkształceń otrzymanej końcowej bryły, przemieszczenie wyrażone w milimetrach. . . . .	30
2.16	Zaprojektowana konstrukcja przegubu numer 3. . . . .	31
2.17	Zaprojektowana konstrukcja przegubu numer 4. . . . .	32
2.18	Zaprojektowana konstrukcja przegubu numer 5. . . . .	32
2.19	Wybrany mechanizm chwytający. Oryginalna nazwa : <i>Mantis Gripper</i> [13] . . . . .	33
3.1	Schemat poglądowy sekcji elektrycznej . . . . .	34
3.2	Zdjęcie płytki MKS Gen V1.4[14] . . . . .	35
3.3	Schemat płytki MKS Gen V1.4 . . . . .	35
3.4	Silnik krokowy napędzający pas zębaty podstawy . . . . .	36
3.5	Schemat ideowy sterownika silnika krokowego . . . . .	37
3.6	Wykaz połączeń zewnętrznych sterowników . . . . .	38
3.7	Sterowniki silników TB6600 oraz M542 . . . . .	38
3.8	Sterowniki silników A4988 . . . . .	38
3.9	Panel czołowy szafy sterowniczej . . . . .	40
3.10	Rysunek panelu czołowego wraz z oznaczeniami elementów . . . . .	41
3.11	Zasilacz impulsowy S-600-24 . . . . .	42
3.12	Gniazdo kabla sieciowego wraz z oprawą bezpiecznika . . . . .	43
3.13	Blok zabezpieczeń topikowych . . . . .	43
3.14	Sekcja zasilania - sekcja mocy . . . . .	44
3.15	Sekcja zasilania - sekcja sygnałowa i zabezpieczeń . . . . .	45
3.16	Wykaz połączeń głównej listwy zaciskowej . . . . .	46
3.17	Wykaz połączeń wraz ze zdjęciem szyny wyjściowej . . . . .	47

3.18	Schemat elektryczny pojedynczego wejścia . . . . .	48
3.19	Zmontowany moduł dopasowujący . . . . .	48
3.20	Wykaz połączeń modułu . . . . .	49
3.21	Wtyczka kabla łączącego robota z szafą sterowniczą . . . . .	49
3.22	Numeracja pinów we wtyczce oraz w gnieździe[15] . . . . .	50
3.23	Złącze wielopinowe schunka[16] . . . . .	50
4.1	Zrzut ekranu z projektu w Visual Studio Code [17] . . . . .	51
4.2	Przedstawienie ideowej komunikacji ROSa . . . . .	52
4.3	Wizualizacja opisu URDF . . . . .	53
4.4	Zrzut ekranu z środowiska MoveIt . . . . .	55
4.5	Interfejs umożliwiający weryfikację poprawności opisu URDF . . . . .	56
4.6	Wizualizacja łańcucha kinematycznego eksperymentalnego ramienia robotycznego MK.0. . . . .	57
4.7	Widok aproksymacji rozwiązania zagadnienia kinematyki odwrotnej z programu MoveIt . . . . .	58
4.8	Rozpisana architektura systemu komunikacji ROSa . . . . .	58
4.9	Koncepcyjny model silnika krokowego bipolarnego [27] . . . . .	60
4.10	Przebieg odchylenia prędkości silnika krokowego bez zastosowania metody mikro-kroku [28] . . . . .	61
4.11	Przebieg odchylenia prędkości silnika krokowego z wykorzystaniem metody mikro-kroku [28] . . . . .	61
4.12	Na przebiegu a) widać aproksymację prądu za pomocą mikrokroków, a na przebiegu b) widać otrzymywane przebiegi pozycji silnika [29] . . . . .	62
4.13	Zdjęcie sterownika silników krokowych TB6600 . . . . .	62
4.14	Schemat ideowy algorytmu sterowania ramieniem robotycznym umieszczonego na mikroprocesorze. Zapis za pomocą drzewa behawioralnego [30] . . . . .	63
5.1	Prusa i3Mk3s - najbardziej popularna drukarka 3D technologii FDM[32] . . . . .	64
5.2	Przykładowe rodzaje wypełnienia[34] stosowane w druku 3D w technologii FDM . . . . .	65
5.3	Jeden z wydruków poddanych testom obciążeniowym . . . . .	66
5.4	Frezarka podczas obróbki szkła akrylowego . . . . .	67
5.5	Tokarka w firmie Fijało Poland . . . . .	68
5.6	Proces zalewania formy silikonem . . . . .	69
5.7	Przemysłowy laser podczas pracy . . . . .	69
5.8	Element po wypiąskowaniu i pomalowaniu . . . . .	70
5.9	Kratownica po wypiąskowaniu i pomalowaniu . . . . .	70
5.10	Widok podstawy po osadzeniu gniazda . . . . .	71
5.11	Napięty pas zębaty podstawy . . . . .	71
5.12	Gotowa konstrukcja pierwszego członu . . . . .	72
5.13	Skręcona konstrukcja drugiego członu . . . . .	73
5.14	Prace montażowe górnych przegubów ramienia . . . . .	74
5.15	Złożone przeguby końcowe . . . . .	74
5.16	Początki prac nad szafą sterowniczą . . . . .	75
5.17	Drukowanie osłon wentylatora . . . . .	76
5.18	Lutowanie wtyczki DB-37 . . . . .	76
5.19	Klejenie obudowy wtyczki . . . . .	77
5.20	Robot MK.0 wraz z szafą sterowniczą . . . . .	78
5.21	Szafa sterownicza podczas pracy . . . . .	79
5.22	Widok szafy - widok wewnętrzny . . . . .	79
5.23	Szafa sterownicza po otwarciu . . . . .	80
6.1	Bazowe konfiguracje przy pomiarze powtarzalności . . . . .	81
6.2	Pomiar czujnikiem zegarowym . . . . .	82
6.3	Wykres rozkładu pomiarów dokładności powrotu do pozycji zadanej . . . . .	83
6.4	Procedura testowa udźwigu ramienia . . . . .	85
7.1	Schemat typowego rozwiązania hamulca elektromagnetycznego[37] . . . . .	87
7.2	Teachpanel robota firmy KUKA . . . . .	88

7.3 Prototypowy panel robota MK.0 . . . . . 88

## WYKAZ TABEL

2.1	Tablica D-H . . . . .	15
2.2	Zakresy przegubów manipulatora odnoszące się do pozycji ramienia pokazanej na Rys 2.1 . . . . .	16
3.1	Tabela głównych poborów mocy . . . . .	42
6.1	Zestawienie pomiarów czujnika zegarowego dla każdej osi wraz z obliczoną powtarzalnością S . . . . .	82
6.2	Pomiary prądów na osadach bezpiecznikowych . . . . .	83
6.3	Pomiary napięć cewek silników krokowych . . . . .	84

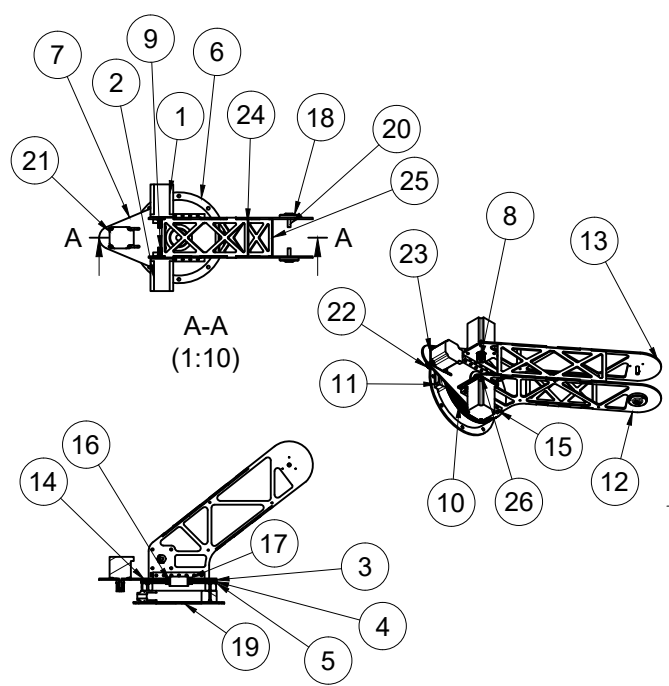
## WYKAZ LITERATURY

- [1] S. Tadeusz, *Modelling and simulation of industrial robot manipulator motion*, vol. 1. Infona, 2004.
- [2] J. Denavit and R. S. Hartenberg, "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices," 1955.
- [3] "World robotics 2021 – service robots report." <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/service-robots-hit-double-digit-growth-worldwide>. Accessed on 31.12.2021.
- [4] "Omron polska." <https://industrial.omron.pl/pl/products/viper>. Accessed on 31.12.2021.
- [5] "Ebmia.pl." <https://www.ebmia.pl/wiedza/porady/mechanika-porady/przekladnia-falowa/>. Accessed on 31.12.2021.
- [6] O. A. Pacific, "Omron poc lab: Viper cell."
- [7] "Annin robotics ar3." <https://www.anninrobotics.com/>. Accessed on 31.12.2021.
- [8] "Bcn3d moveo: A fully open source 3d printed robot arm." <https://www.bcn3d.com/bcn3d-moveo-the-future-of-learning-robotic-arm/>. Accessed on 31.12.2021.
- [9] "Kauda robotic arm." <https://www.instructables.com/KAUDA-Robotic-Arm/>. Accessed on 31.12.2021.
- [10] M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, *et al.*, *Robot modeling and control*, vol. 3. wiley New York, 2006.
- [11] "Fusion360 integrated cad, cam, cae, and pcb software." <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>. Accessed on 31.12.2021.
- [12] "Future of making, shape optimization and topology optimization." <https://www.autodesk.com/solutions/topology-optimization>. Accessed on 31.12.2021.
- [13] "Mantis gripper." <https://www.thingiverse.com/thing:1480408>. Accessed on 31.12.2021.
- [14] "Mks gen v1.4 motherboard manual." <https://www.roboter-bausatz.de/media/pdf/0b/f0/a7/MKS-Gen-DataSheet.pdf>. Accessed on 31.12.2021.
- [15] "Clark wire cable." <http://www.clarkwire.com/PinOutRS449.htm>. Accessed on 31.12.2021.
- [16] "Syntax svk-085-fphgst." <https://shop.klotz-ais.com/tlp-f.html>. Accessed on 31.12.2021.
- [17] "Code editing software." <https://code.visualstudio.com/>. Accessed on 31.12.2021.
- [18] "Robot operating system." <https://www.ros.org/>. Accessed on 31.12.2021.
- [19] "Ros urdf package library." <http://wiki.ros.org/urdf>. Accessed on 31.12.2021.

- [20] "Ros urdf joint element." <http://wiki.ros.org/urdf/XML/joint>. Accessed on 31.12.2021.
- [21] "Incorporating the latest advances in motion planning, manipulation, 3d perception, kinematics, control and navigation." <https://moveit.ros.org/>. Accessed on 31.12.2021.
- [22] "Ros packages that can be used to plan and execute motion trajectories for the bcn3d moveo robotic arm in simulation and real-life.." [https://github.com/jesseweisberg/moveo\\_ros](https://github.com/jesseweisberg/moveo_ros). Accessed on 31.12.2021.
- [23] "The mit license." <https://opensource.org/licenses/MIT>. Accessed on 31.12.2021.
- [24] M. Dąbkowski, "Systemy sterowania robotów przemysłowych." <https://eia.pg.edu.pl/documents/184160/295670/systemysterowania.pdf>. Accessed on 31.12.2021.
- [25] "Move group python interface." [http://docs.ros.org/en/kinetic/api/moveit\\_tutorials/html/doc/move\\_group\\_python\\_interface/move\\_group\\_python\\_interface\\_tutorial.html](http://docs.ros.org/en/kinetic/api/moveit_tutorials/html/doc/move_group_python_interface/move_group_python_interface_tutorial.html). Accessed on 31.12.2021.
- [26] "Ikfast kinematics solver." [http://docs.ros.org/en/kinetic/api/moveit\\_tutorials/html/doc/ikfast/ikfast\\_tutorial.html](http://docs.ros.org/en/kinetic/api/moveit_tutorials/html/doc/ikfast/ikfast_tutorial.html). Accessed on 31.12.2021.
- [27] "Bipolar stepper motors: What is it? (circuit and sequence)." <https://www.electrical4u.com/bipolar-stepper-motor/>. Accessed on 31.12.2021.
- [28] "What is microstepping?." <https://www.linearmotiontips.com/microstepping-basics/>. Accessed on 31.12.2021.
- [29] A. Bellini, C. Concari, G. Franceschini, and A. Toscani, "Mixed-mode pwm for high-performance stepping motors," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, pp. 3167 – 3177, 01 2008.
- [30] M. Colledanchise and P. Ögren, *Behavior trees in robotics and AI: An introduction*. CRC Press, 2018.
- [31] D. Mościcki, "Mk0-robotic-arm." [https://github.com/Edekheh/MK0\\_Robotic\\_Arm](https://github.com/Edekheh/MK0_Robotic_Arm). Accessed on 10.01.2022.
- [32] "Prusa 3d - research." <https://www.prusa3d.com/pl/kategoria/original-prusa-i3-mk3s/>. Accessed on 31.12.2021.
- [33] "Infill patterns; which is the strongest one for 3d printing?." <https://3dsolved.com/infill-patterns-which-is-the-strongest-one-for-3d-printing/>. Accessed on 31.12.2021.
- [34] "What infill patterns are there?." <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>. Accessed on 31.12.2021.
- [35] "Infill patterns." <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know>. Accessed on 31.12.2021.
- [36] "Infill patterns - which is the strongest?." <https://3dsolved.com/infill-patterns-which-is-the-strongest-one-for-3d-printing/>. Accessed on 31.12.2021.

[37] "Sepac - clutch brake company." <https://sepac.com/blog/electromagnetic-brake-applications-for-the-robotics-industry/>. Accessed on 31.12.2021.

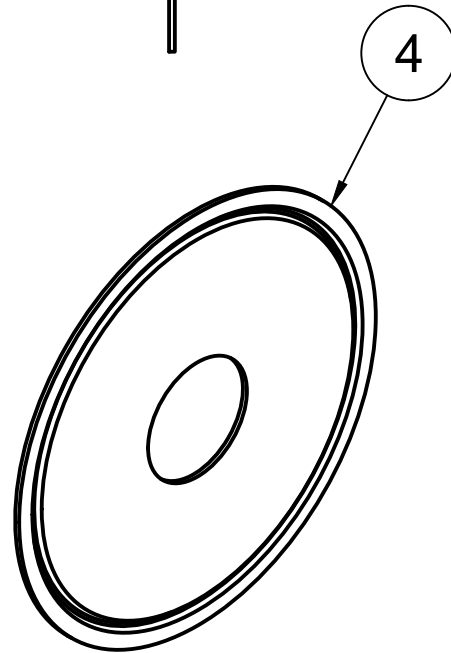
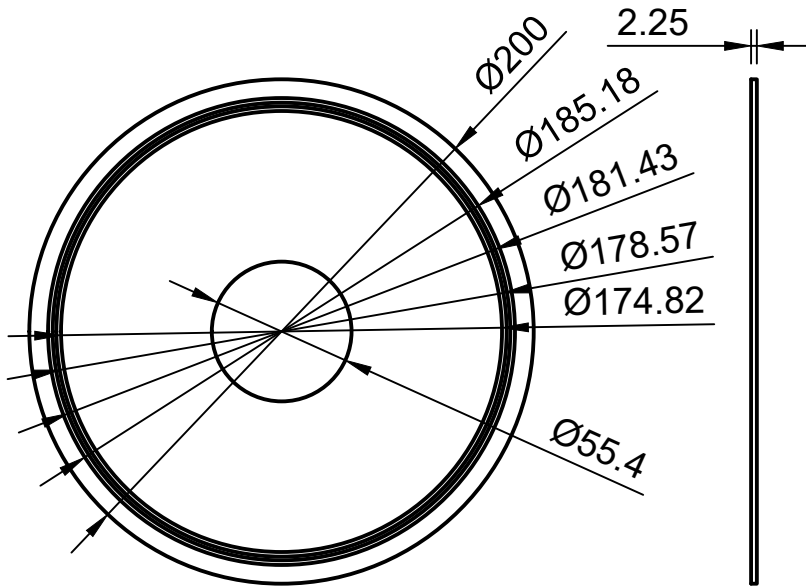
Parts List				
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Nema34	4 N*m torque	Aluminum
2	1	Nema34 (1)	4 N*m torque	Aluminum
3	1	Ball_guide	Ball trough	Aluminum
4	1	Ball_guide (1)	Ball trough	Aluminum
5	1	Bottom_plate		Aluminum
6	1	Mount_plate		Aluminum
7	1	Upper_plate		Aluminum
8	1	GearT5x12_8mm		Aluminum
9	1	GearT5x12_8mm (1)		Aluminum
10	1	GearT5x195		Aluminum
11	1	Base		Aluminum
12	1	Side_support		Aluminum
13	1	Side_support (1)		Aluminum
14	1	Balls	80 pieces, each 5mm diameter	Aluminum
15	1	Side_support_fixing		Aluminum
16	1	Sliding_sleeve		Aluminum
17	1	Joint_1_fixing		Aluminum
18	2	Shaft_cover		Aluminum
19	1	Bottom_cover		Aluminum
20	2	Shaft		Aluminum
21	1	Nema23		Titanium
22	1	GearT5x12_5mm		ABS Plastic
23	1	Nema23_adapter		ABS Plastic
24	1	Top_truss		Aluminum
25	1	Bottom_truss		Aluminum
26	2	Nema34_adapter		ABS Plastic



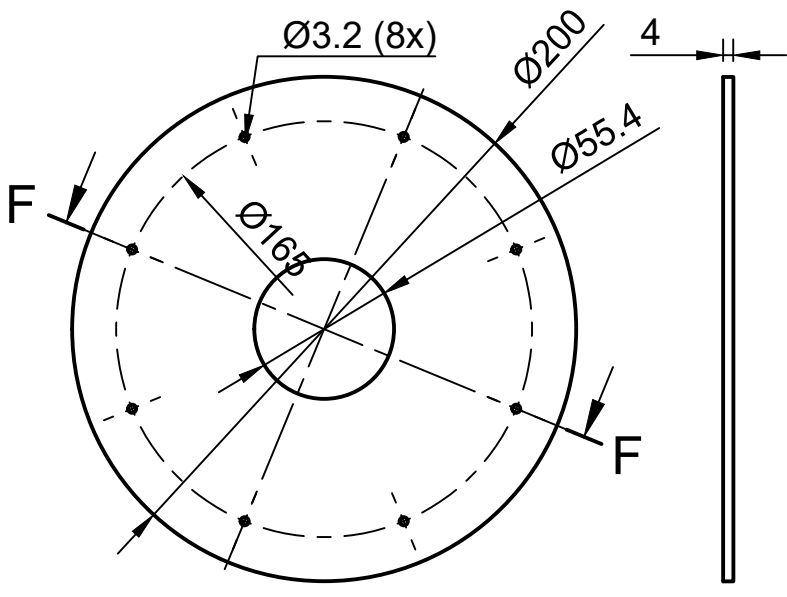
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by
		Document type	Document status
		Title <b>Cleared_project_Joint1</b>	DWG No.
		Rev.	Date of issue
			Sheet <b>1/17</b>



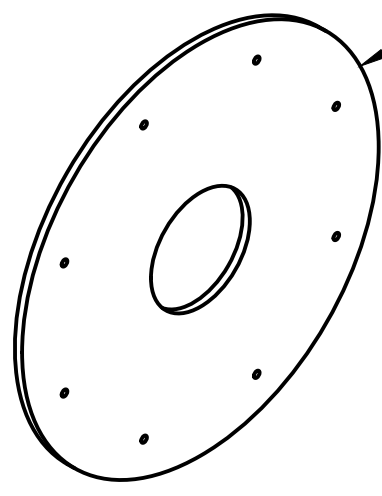
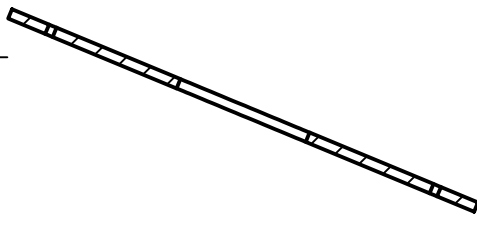




Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
SCALE 1:3	Document type		Document status	
	Title <b>Ball_guide</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>2/17</b>	

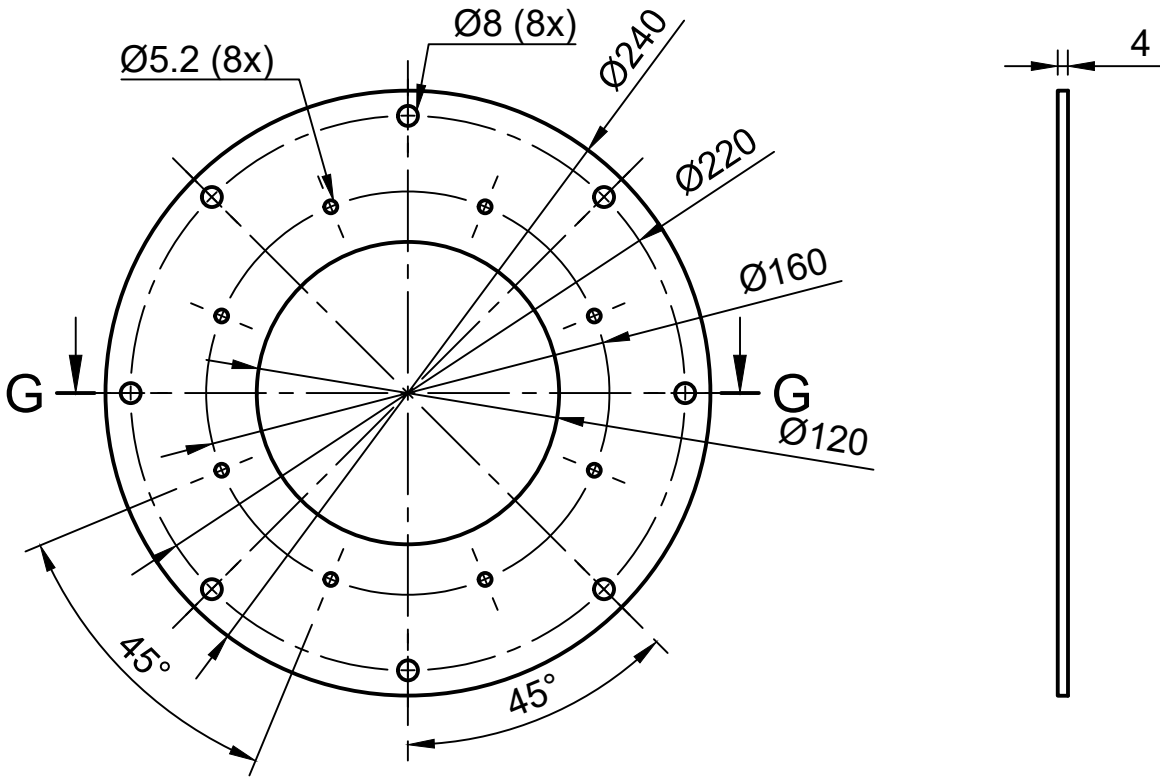


F-F (1:3)

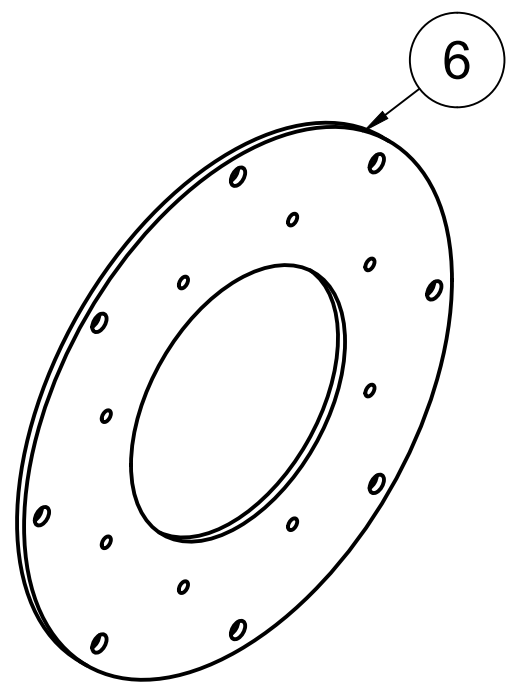
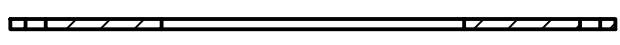


5

Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
SCALE 1:3		Document type	Document status	
		Title <b>Bottom_plate</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>3/17</b>

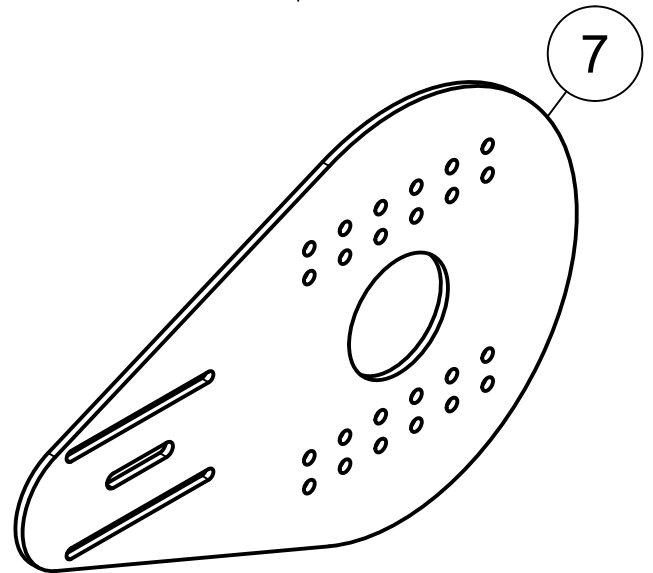
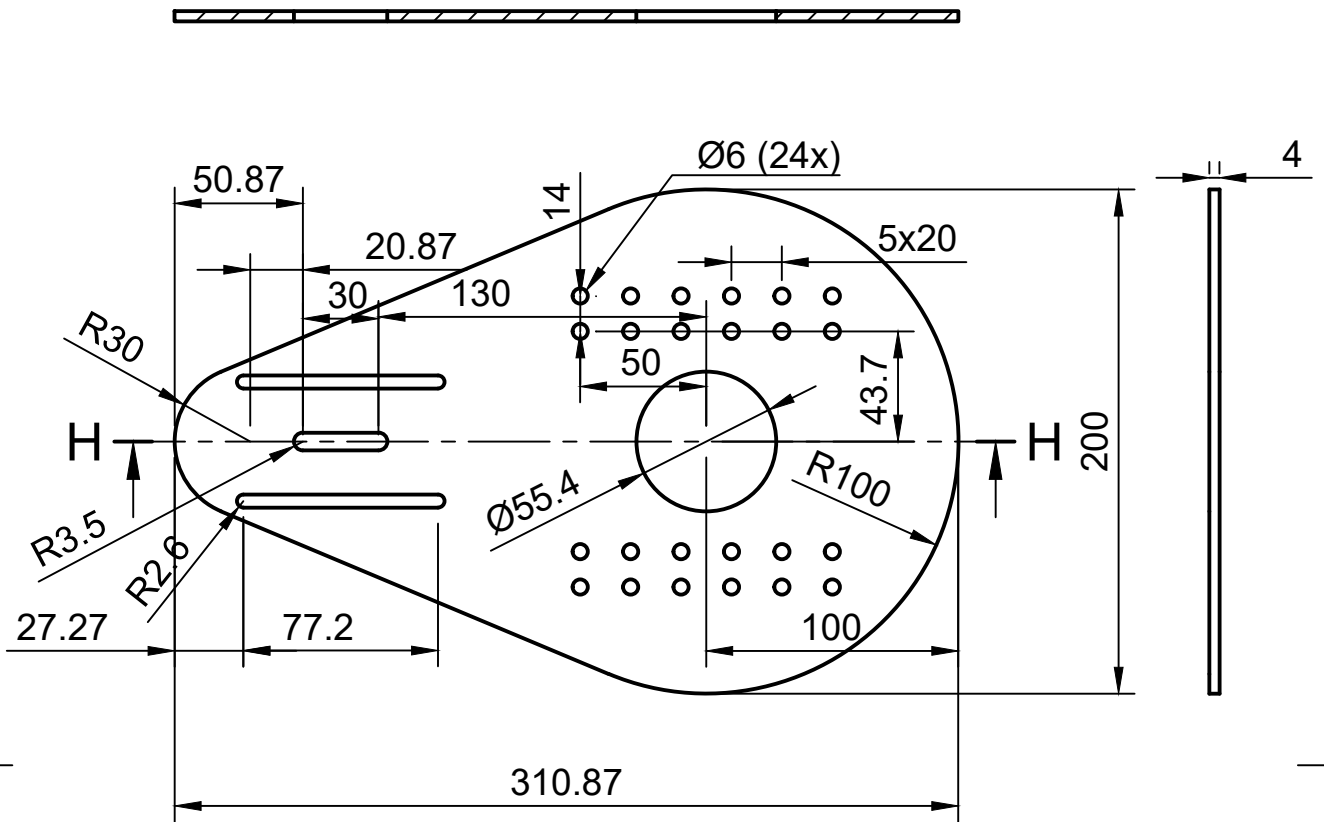


G-G (1:3)

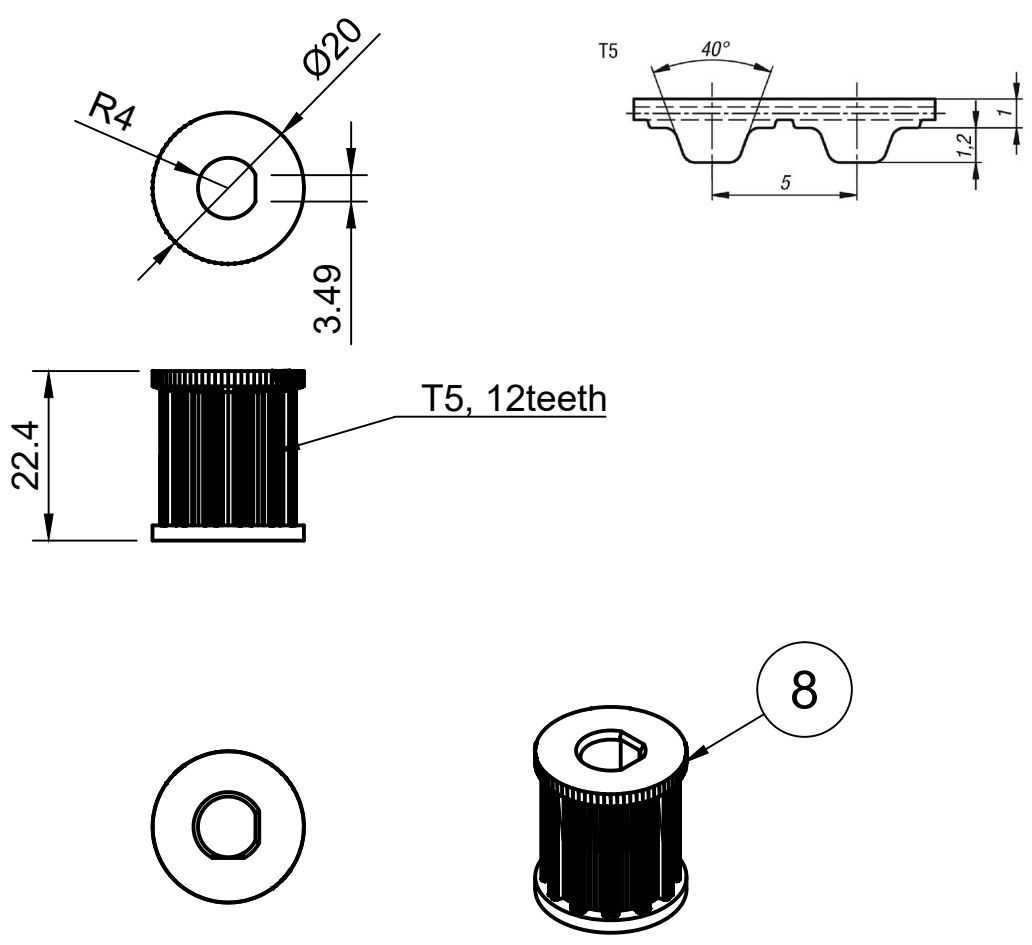


Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:3	Document type		Document status	
	Title <b>Mount_plate</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>4/17</b>	

# H-H (1:3)

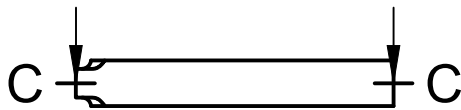
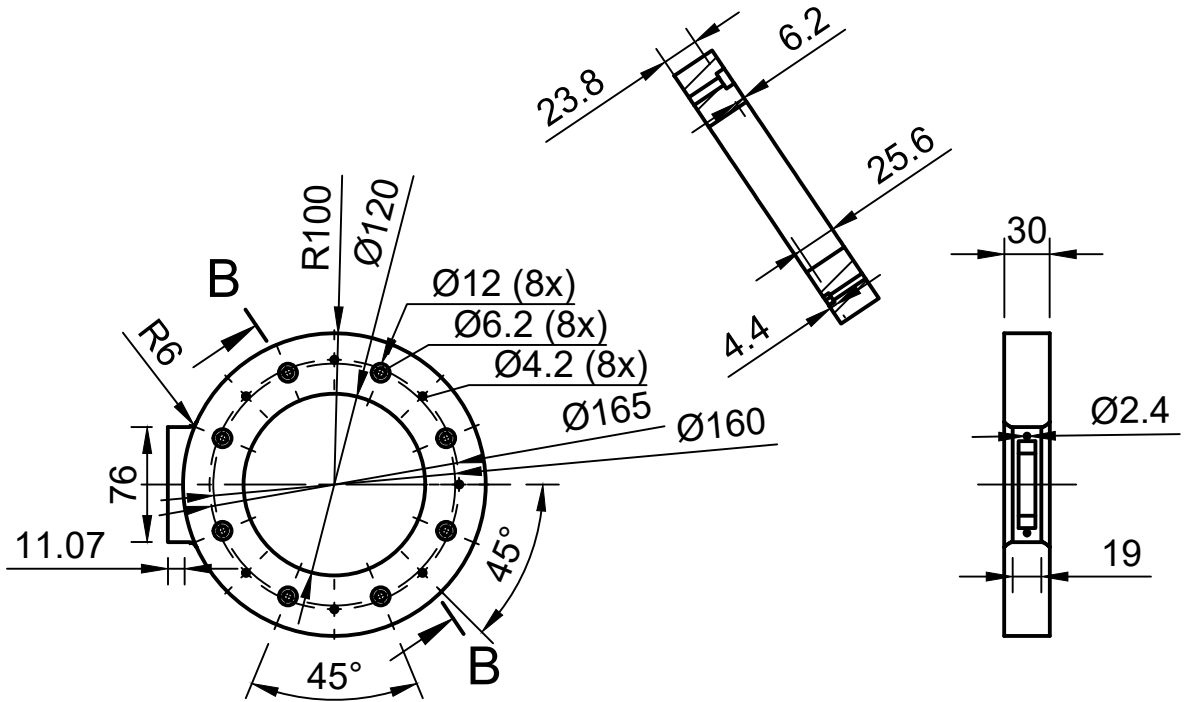


Dept.	Technical reference	Created by Dawid Mościcki 28.12.2021	Approved by	
Scale 1:3		Document type	Document status	
		Title Upper_plate	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 5/17

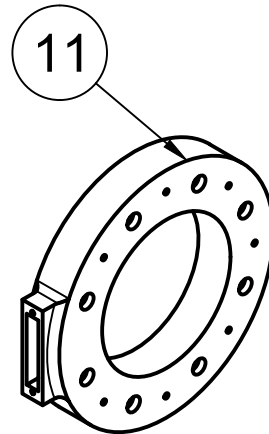
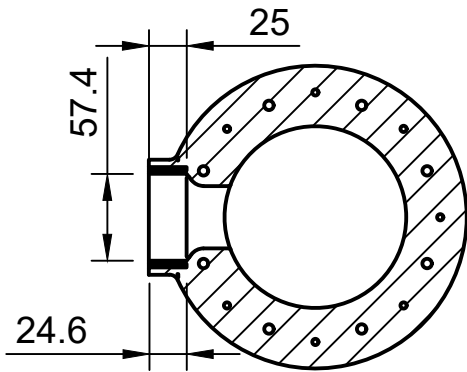


Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1	Document type		Document status	
	Title <b>GearT5x12_8mm</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>6/17</b>	

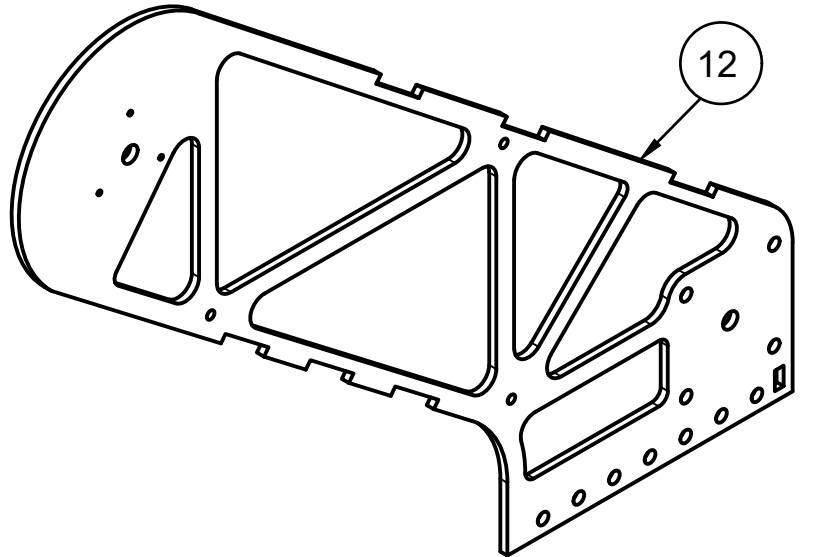
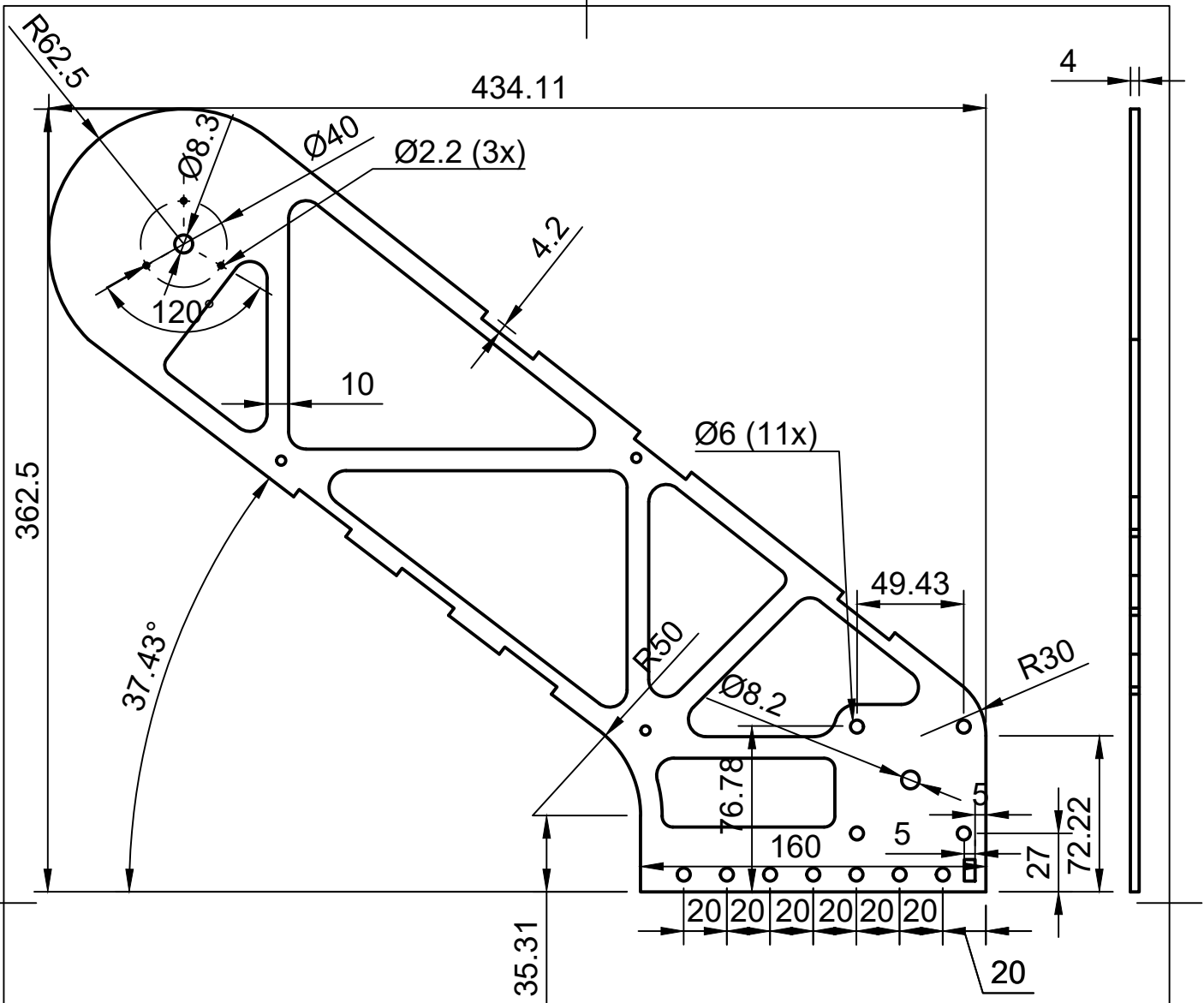
B-B (1:5)



C-C (1:5)

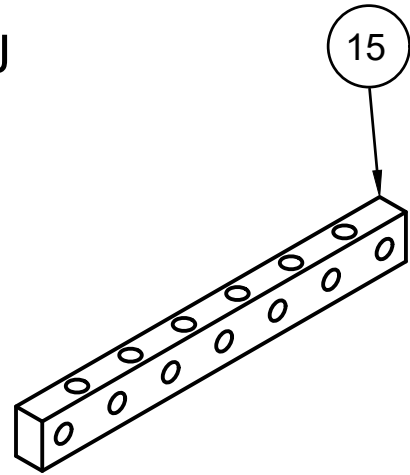
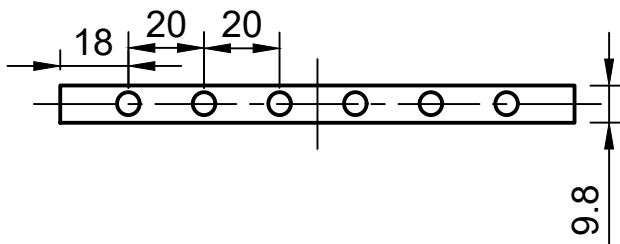
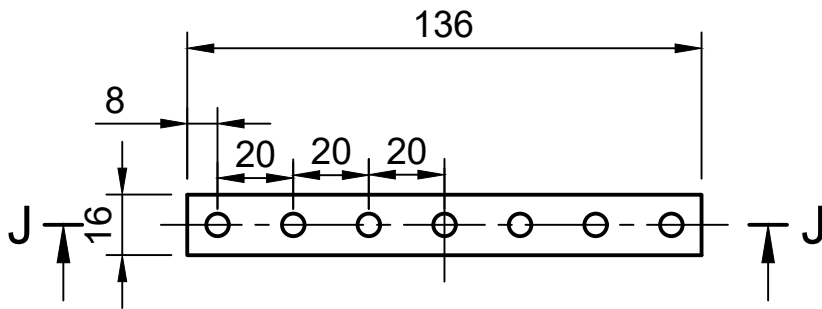
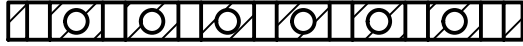


Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:5		Document type	Document status	
		Title <b>Base</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>7/17</b>



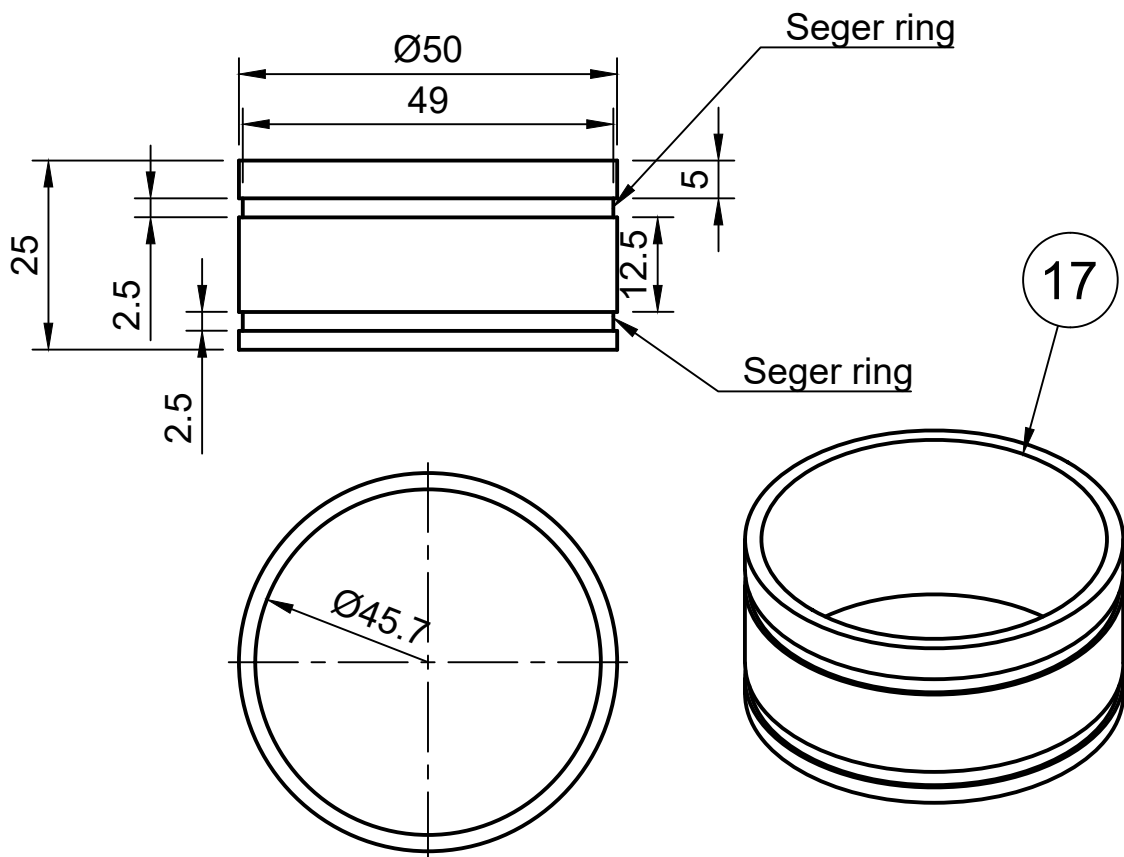
Dept.	Technical reference	Created by Dawid Mościcki 28.12.2021	Approved by	
Scale 1:3	Document type		Document status	
	Title Side_support		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet 8/17	

# J-J (1:2)

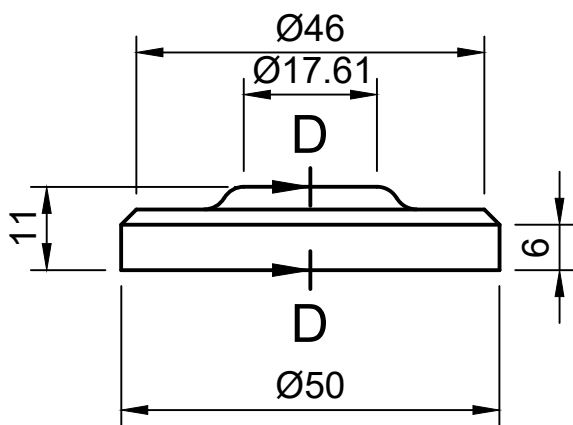
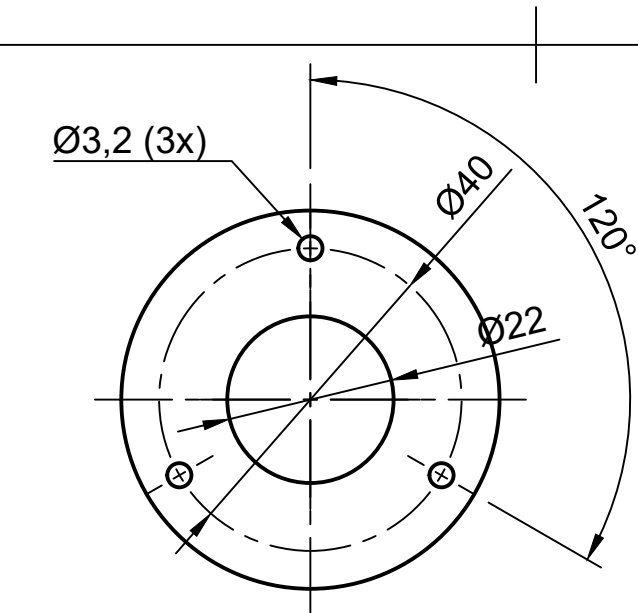


Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:2	Document type		Document status	
	Title <b>Side_support_fixing</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>9/17</b>	

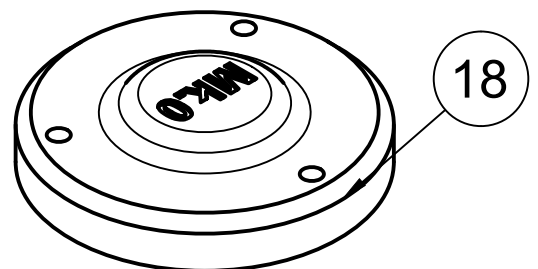
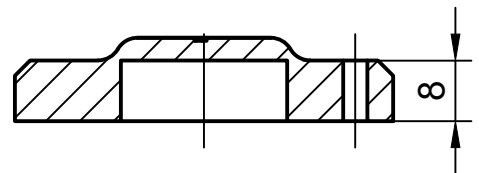




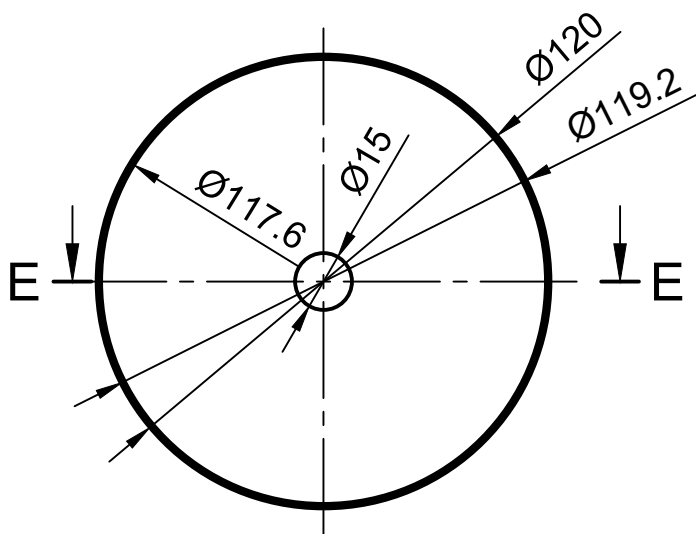
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1	Document type		Document status	
	Title <b>Joint_1_fixing</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>10/17</b>	



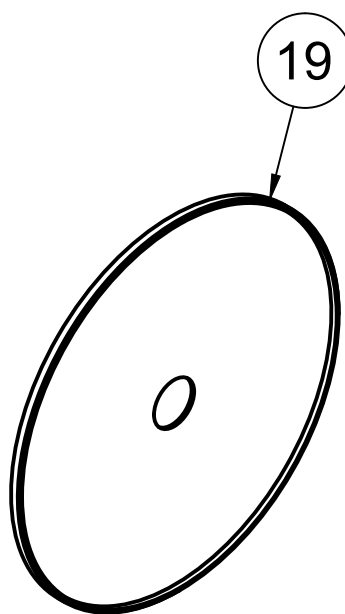
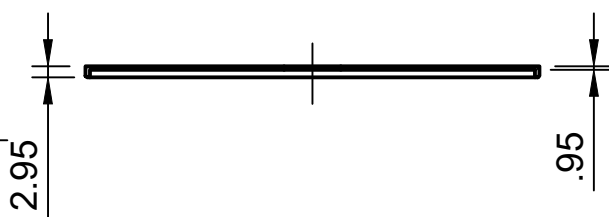
D-D (1:1)



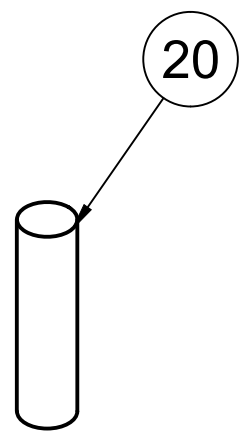
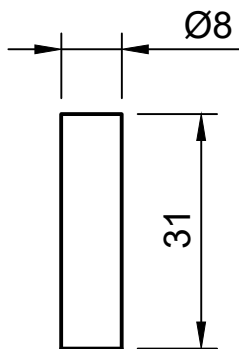
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1	Document type		Document status	
	Title <b>Shaft_cover</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>11/17</b>	



E-E (1:2)

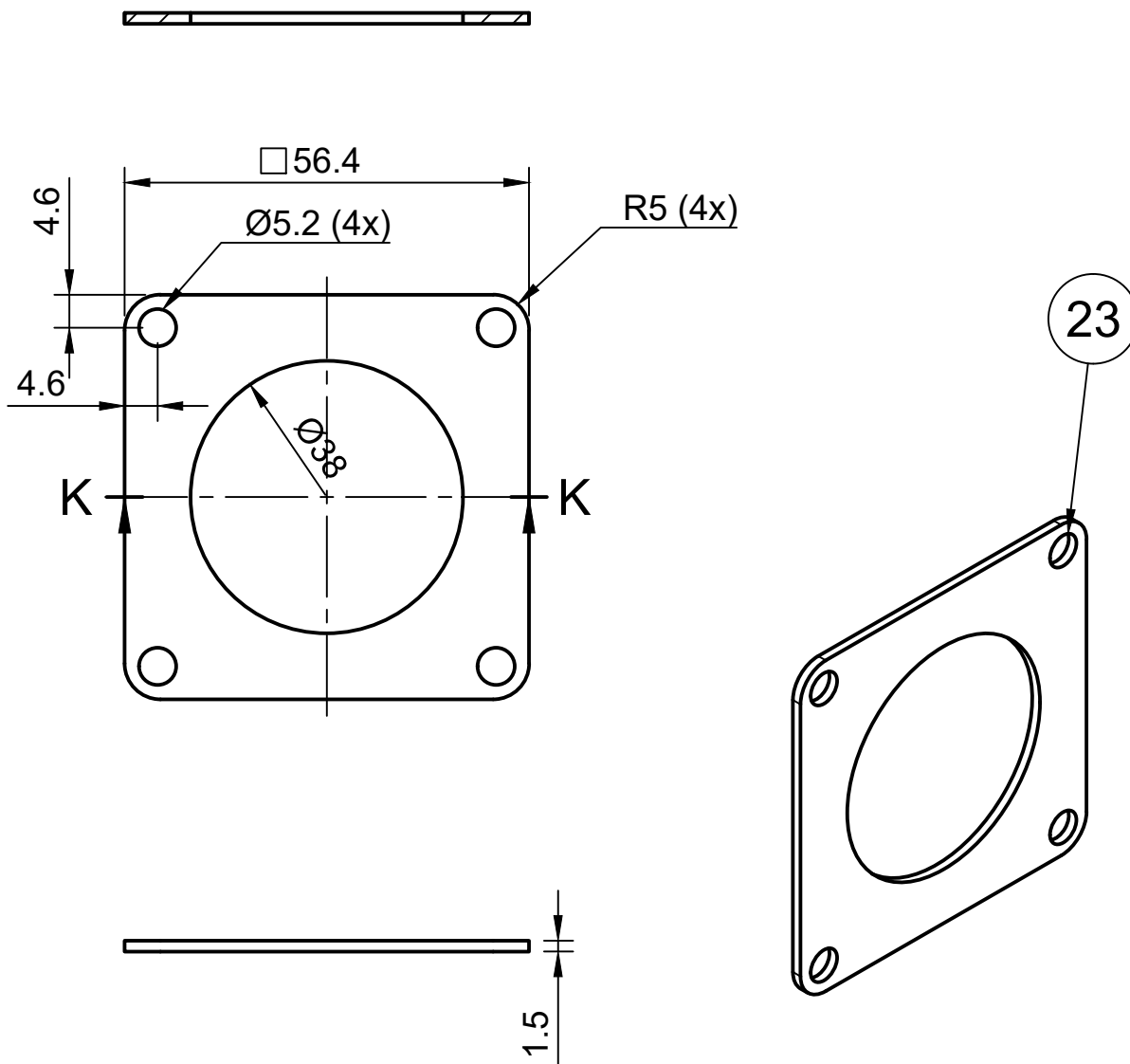


Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:2		Document type	Document status	
		Title <b>Bottom_cover</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>12/17</b>

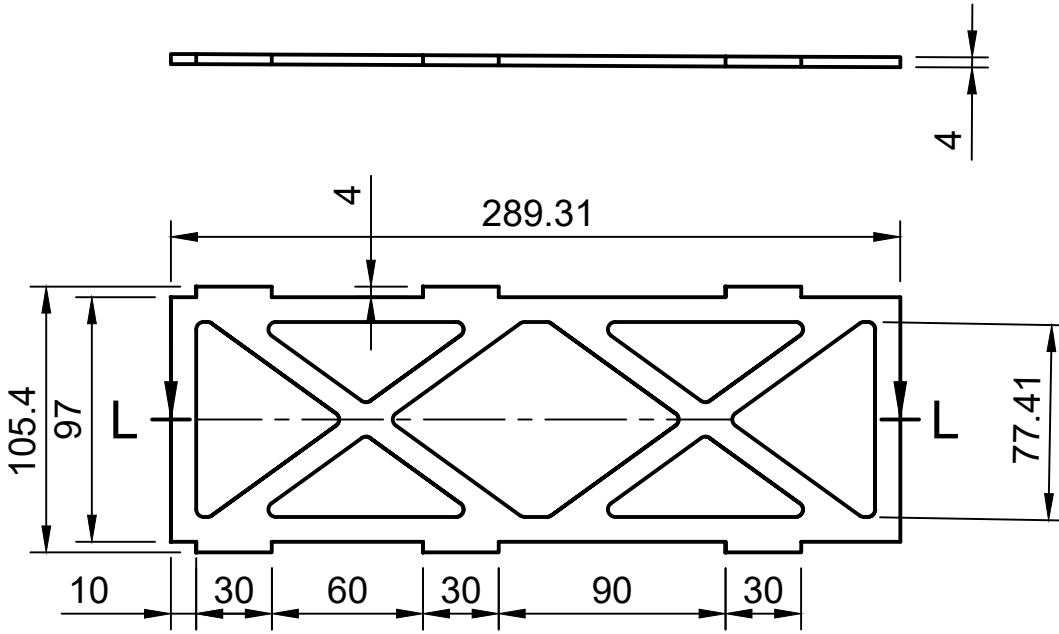


Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1		Document type	Document status	
		Title <b>Shaft</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>13/17</b>

# K-K (1:1)



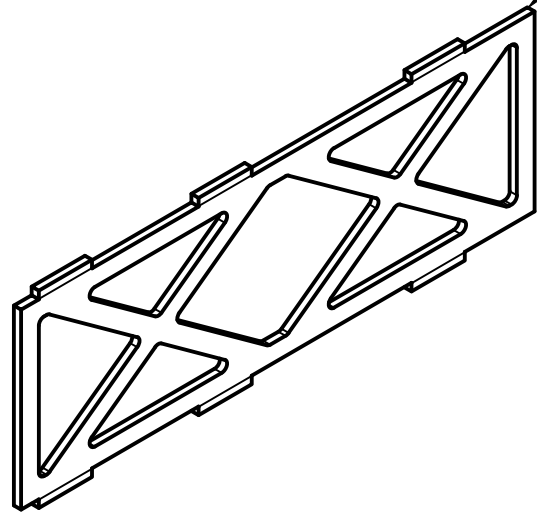
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1		Document type	Document status	
		Title <b>Nema23_adapter</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>14/17</b>



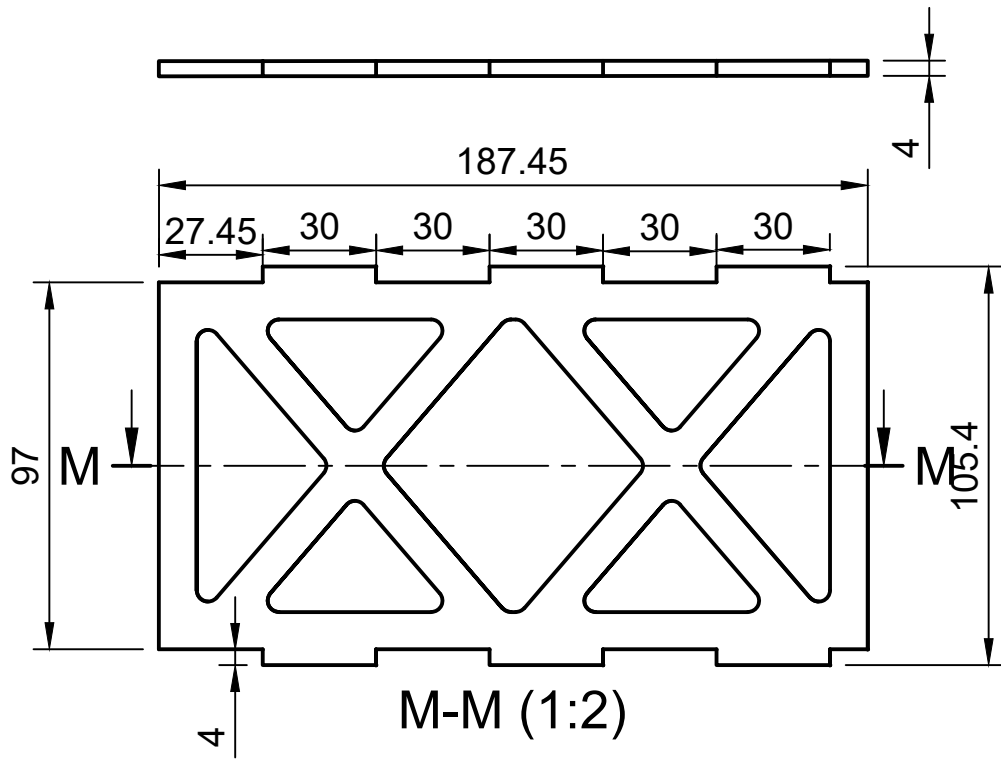
L-L (1:3)



24

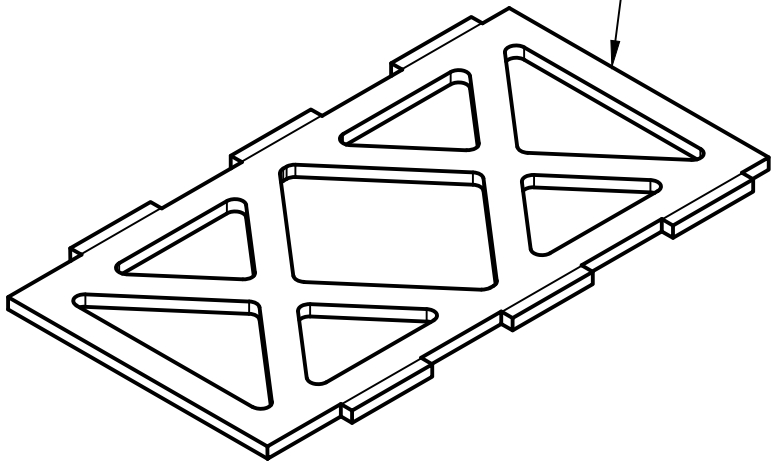


Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:3		Document type	Document status	
		Title <b>Top_truss</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>15/17</b>



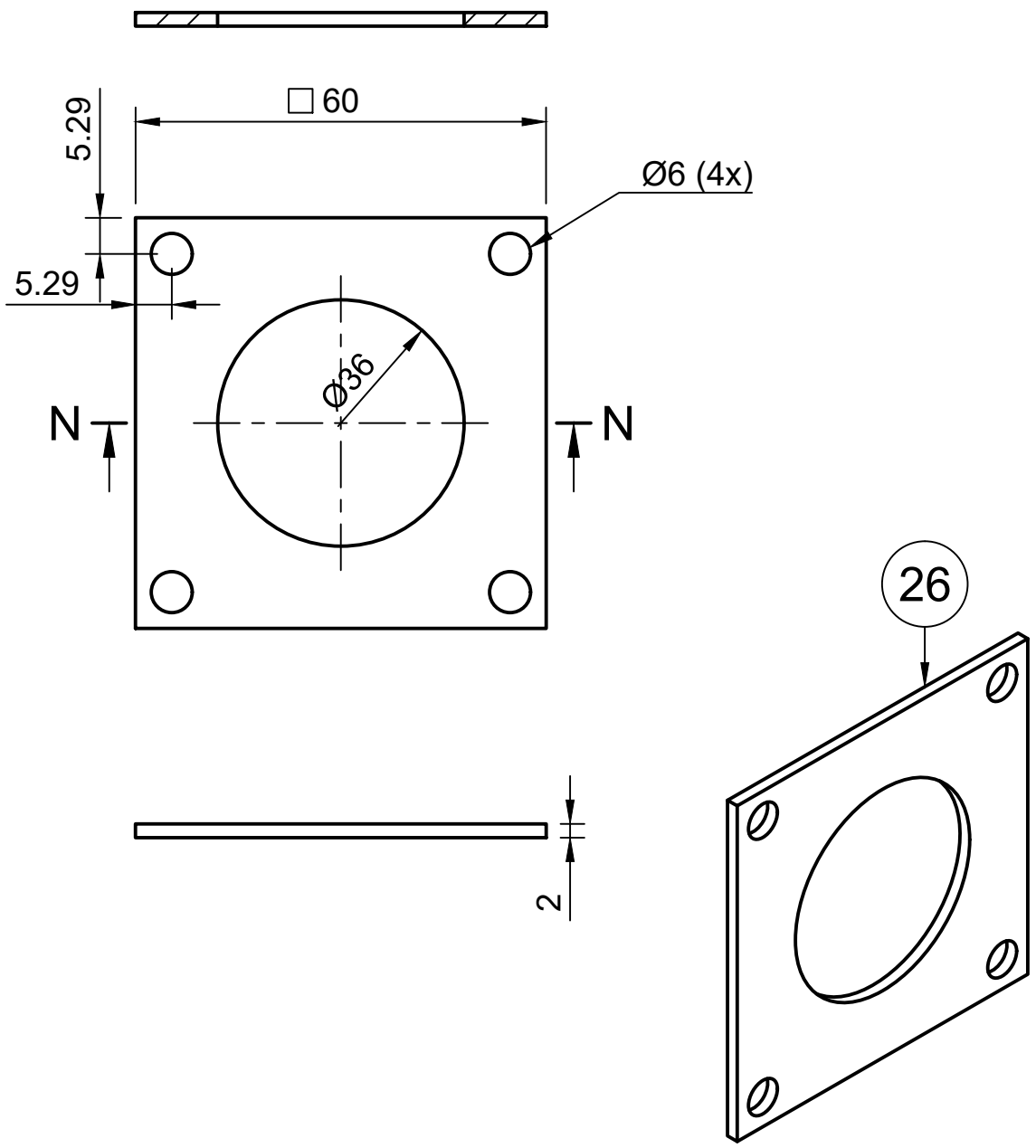
M-M (1:2)

25



Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1		Document type	Document status	
		Title <b>Bottom_truss</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>16/17</b>

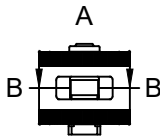
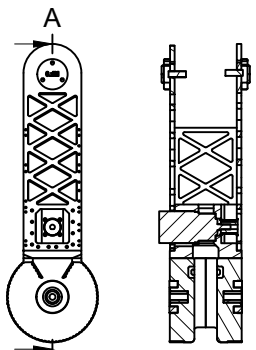
# N-N (1:1)



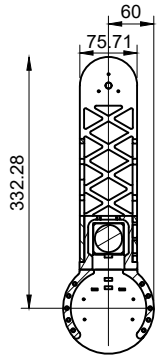
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1	Document type		Document status	
	Title <b>Nema34_adapter</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>17/17</b>	



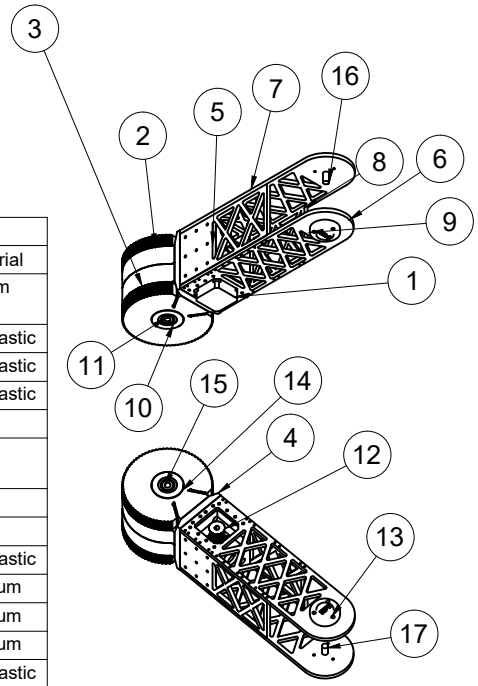
A-A (1:5)



B-B (1:5)

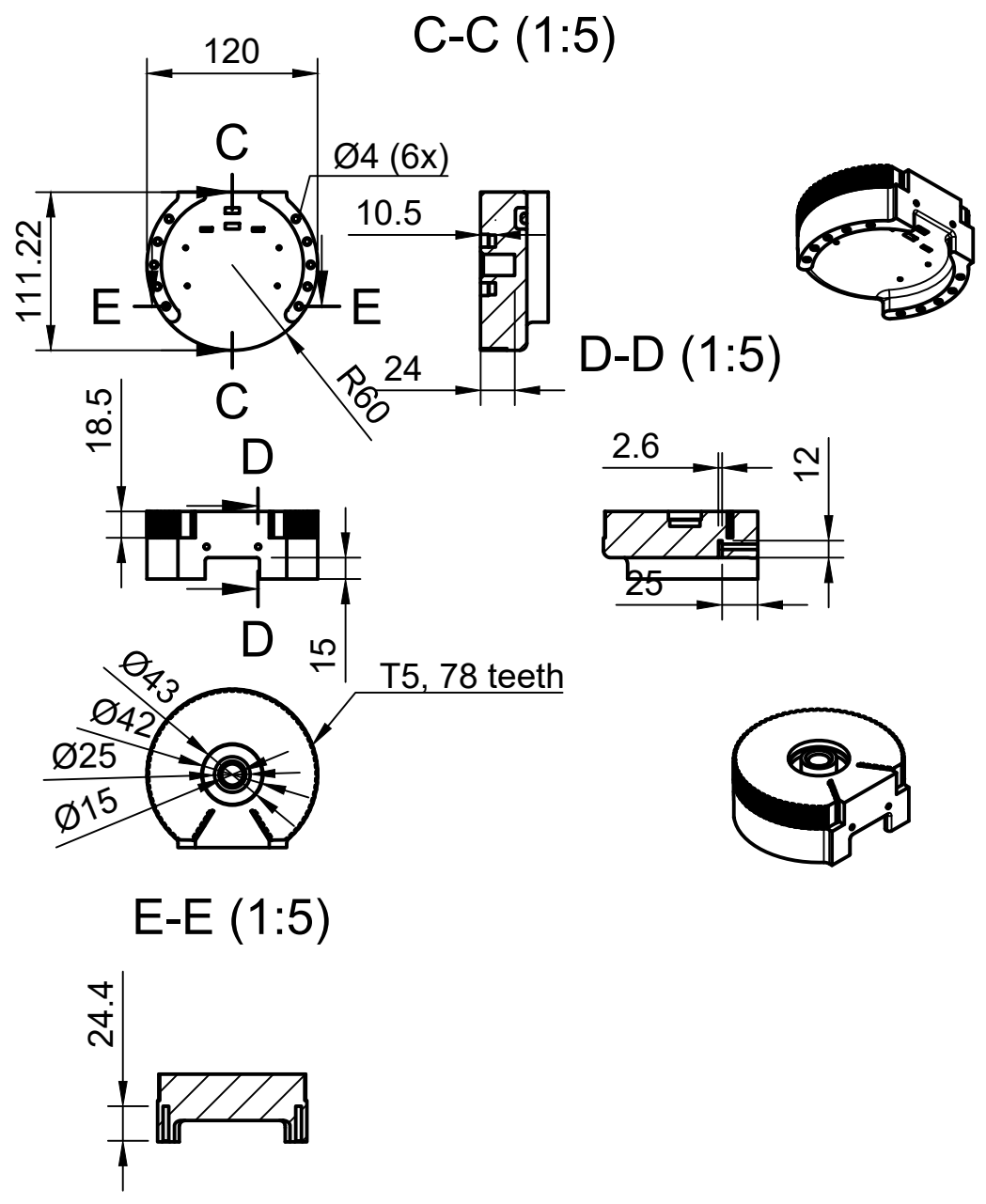


Parts List				
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Nema17PG5	Nema17 motor with 1:5,18 planetary gearbox	Titanium
2	1	Main_drive		ABS Plastic
3	1	Main_drive (1)		ABS Plastic
4	1	Adapter		ABS Plastic
5	1	Truss		Acrylic
6	1	Side_support_mot or_side		Acrylic
7	1	Side_support		Acrylic
8	1	Truss (1)		Acrylic
9	1	Shaft_cover		ABS Plastic
10	1	Thrust_bearing	Thrust bearing 42x20x12	Aluminum
11	1	Linear_bearing	Linear bearing 12x8x15	Aluminum
12	1	GearT5x12x5mm		Aluminum
13	1	Shaft_cover (1)		ABS Plastic
14	1	Thrust_bearing (1)	Thrust bearing 42x20x12	Aluminum
15	1	Linear_bearing (1)	Linear bearing 12x8x15	Aluminum
16	1	Shaft	8x23	Stainless Steel
17	1	Shaft (1)	8x23	Stainless Steel



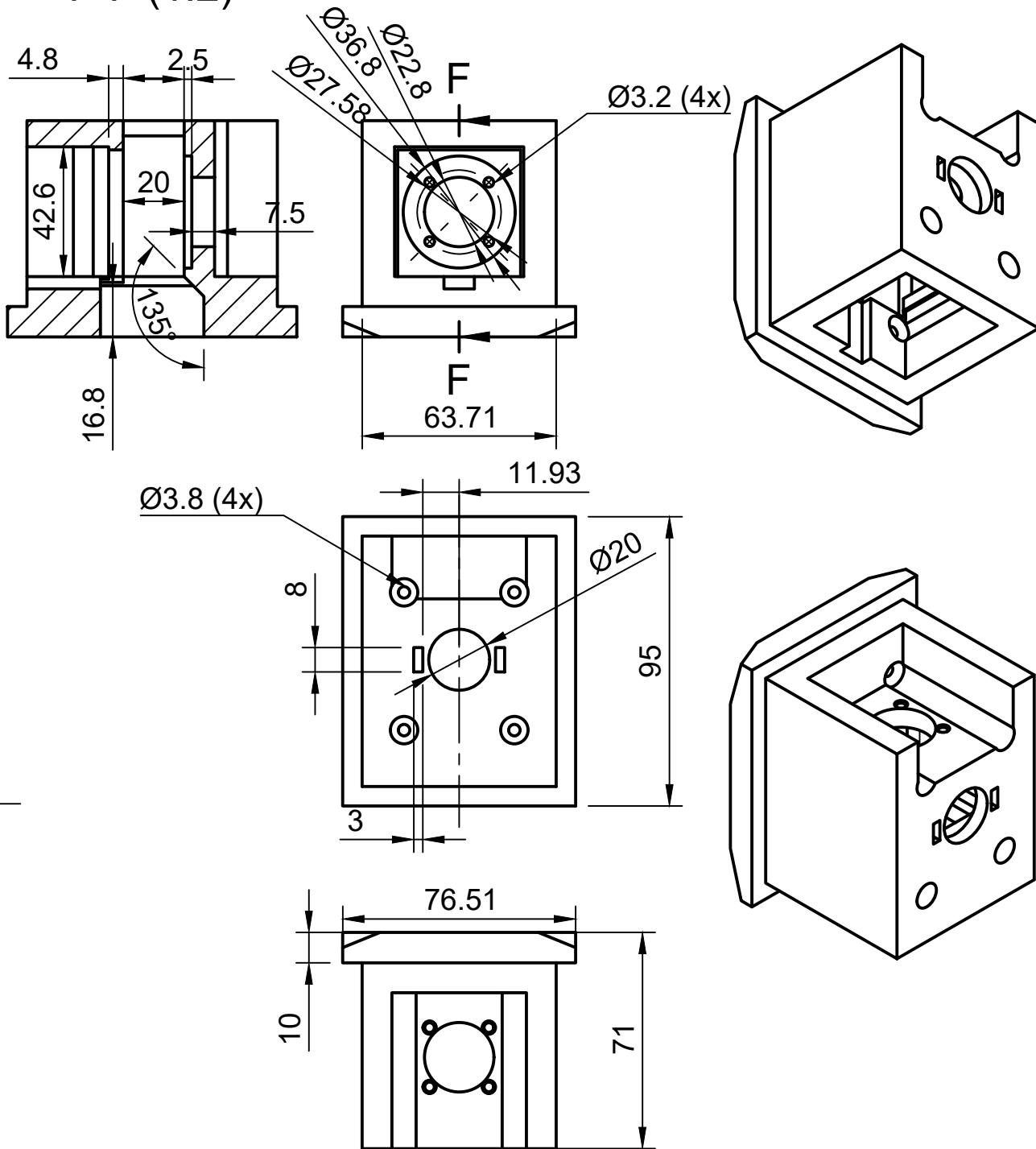
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by
		Document type	Document status
		Title <b>clearing_joint_3</b>	DWG No.
		Rev.	Date of issue
			Sheet <b>1/9</b>



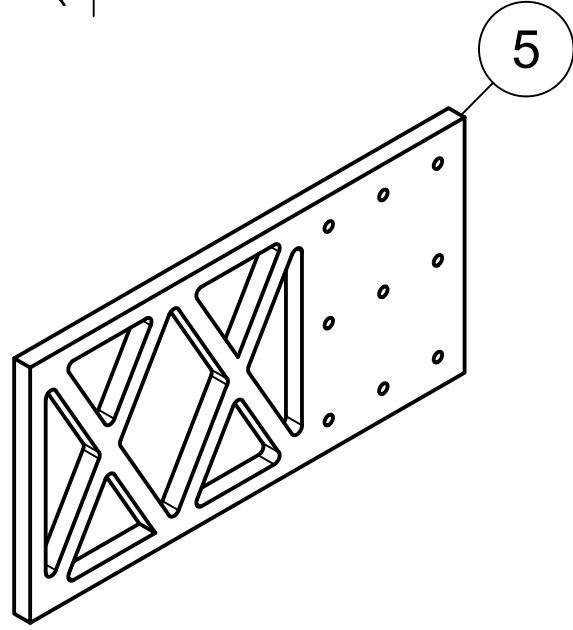
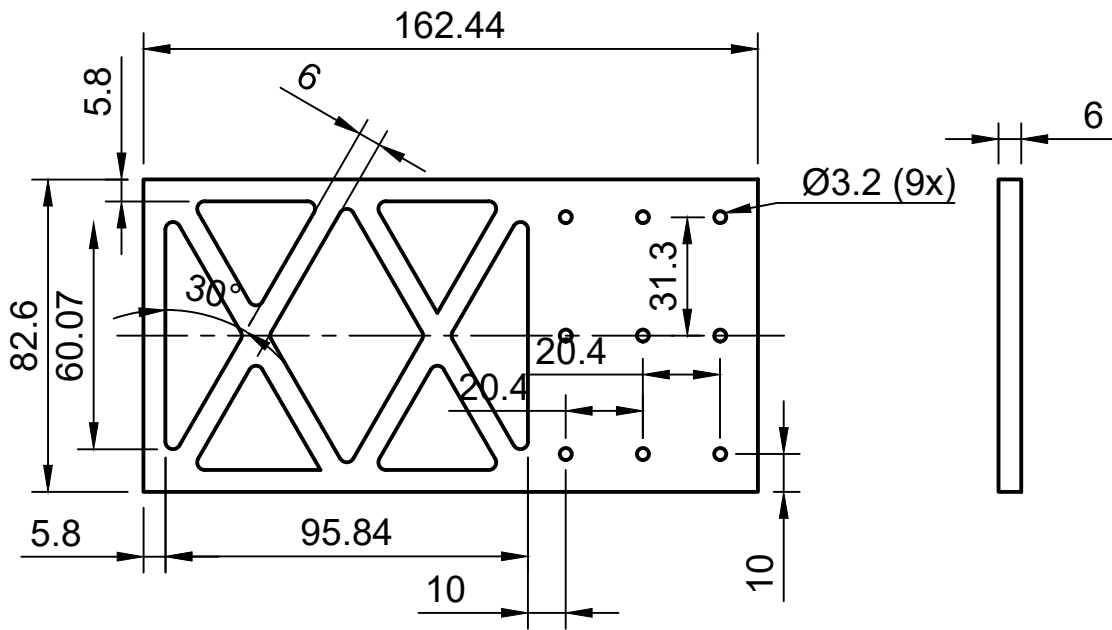


Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:5		Document type	Document status	
		Title <b>Main_drive</b>	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
				Sheet <b>2/9</b>

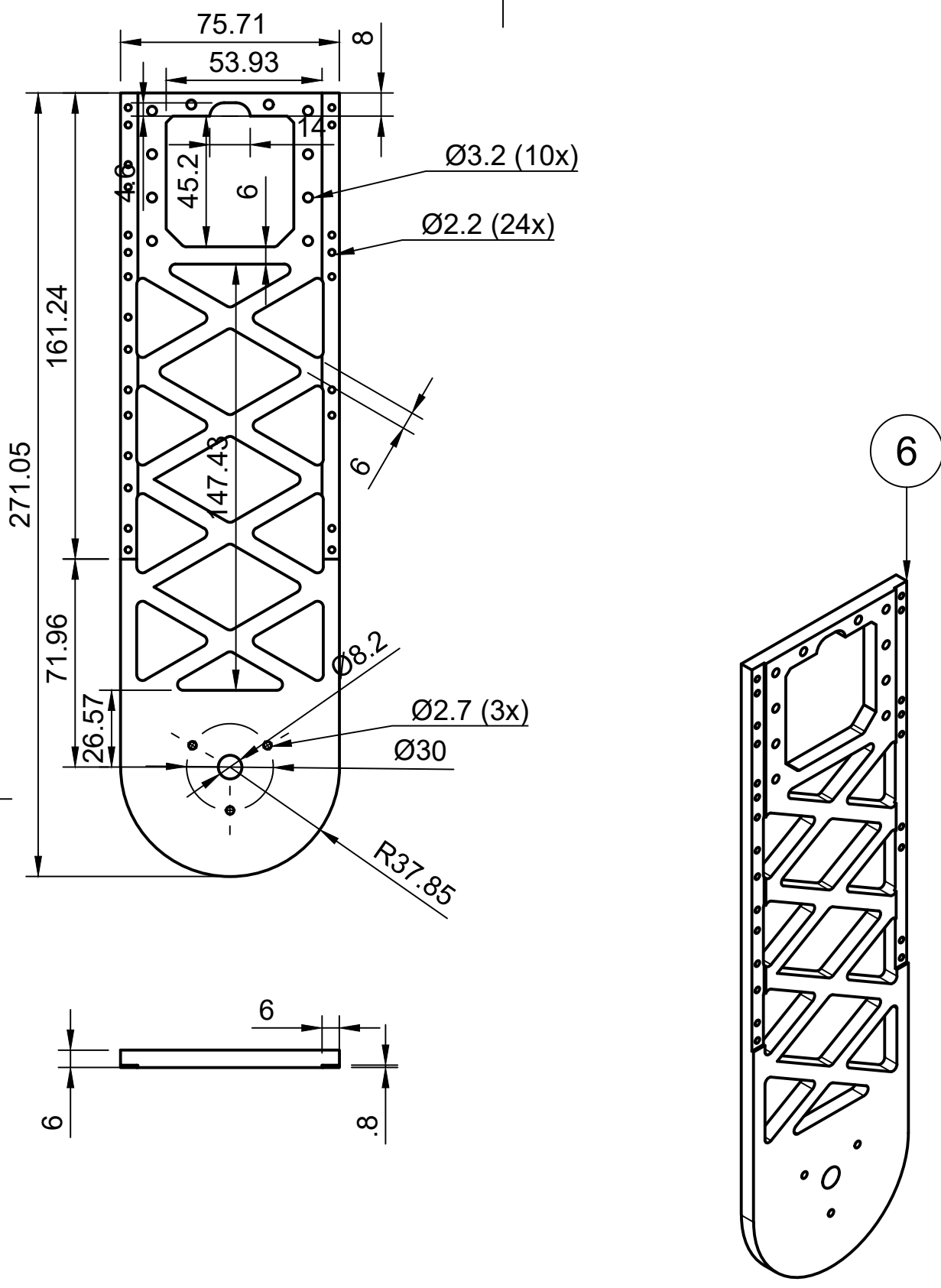
# F-F (1:2)



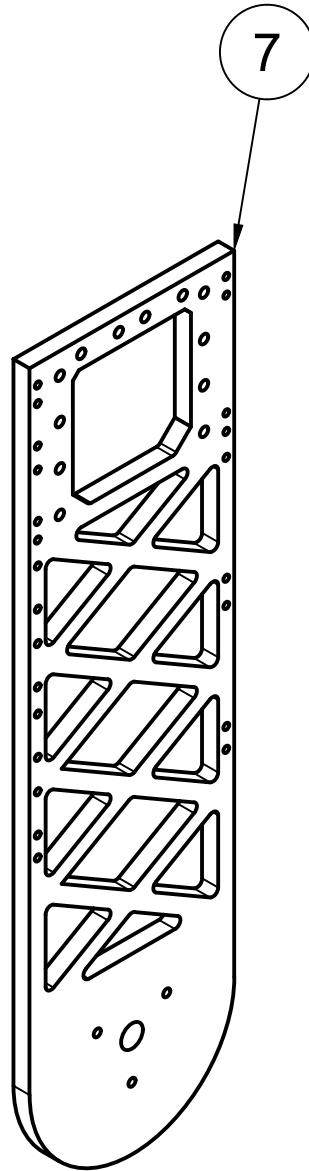
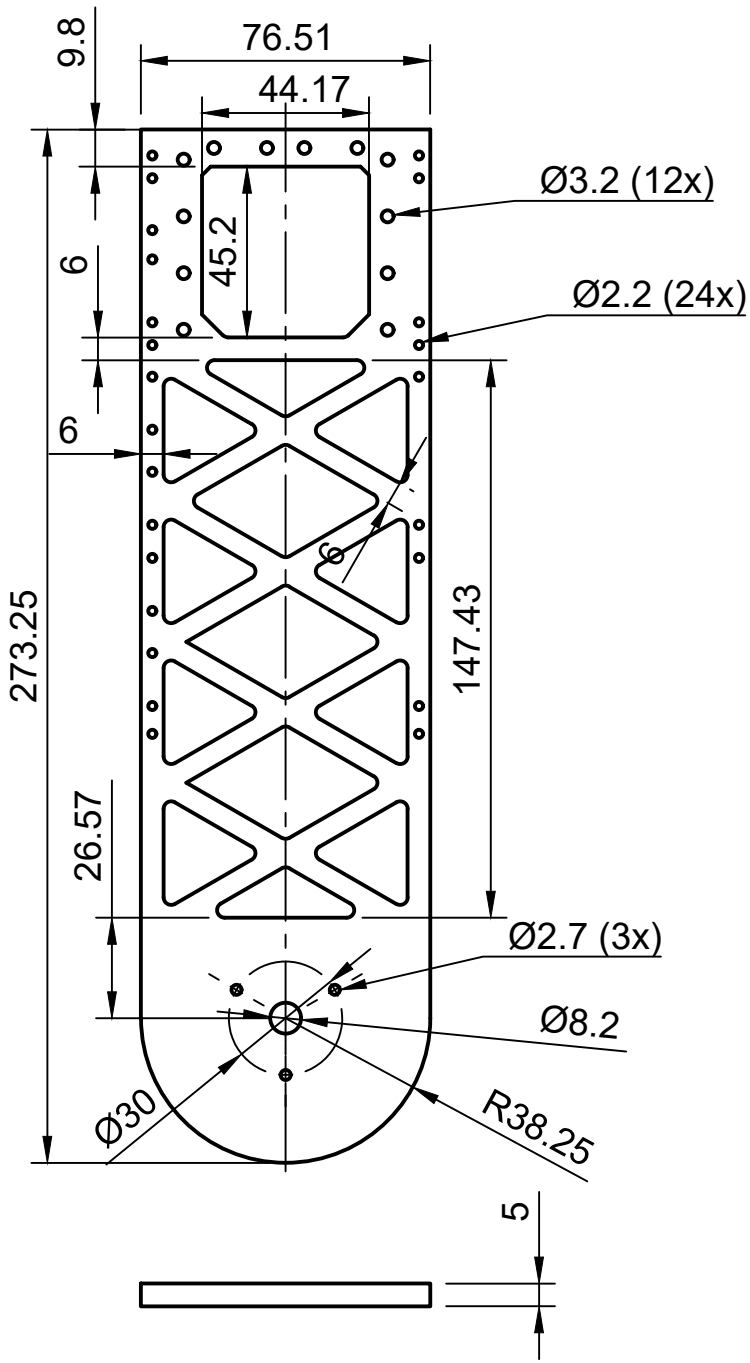
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:2	Document type		Document status	
	Title <b>Adapter</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>3/9</b>	



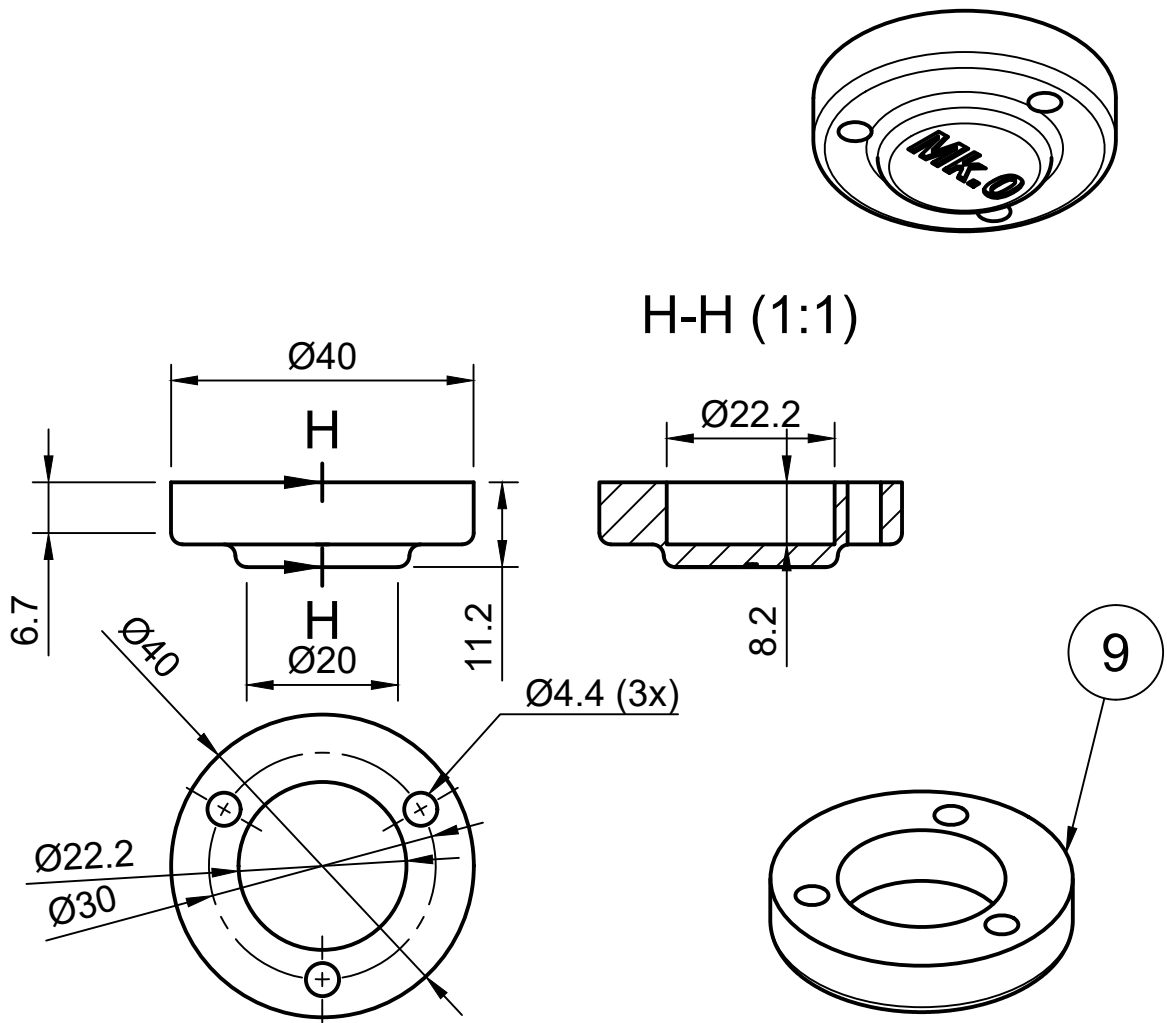
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:2	Document type		Document status	
	Title <b>Truss</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>4/9</b>	



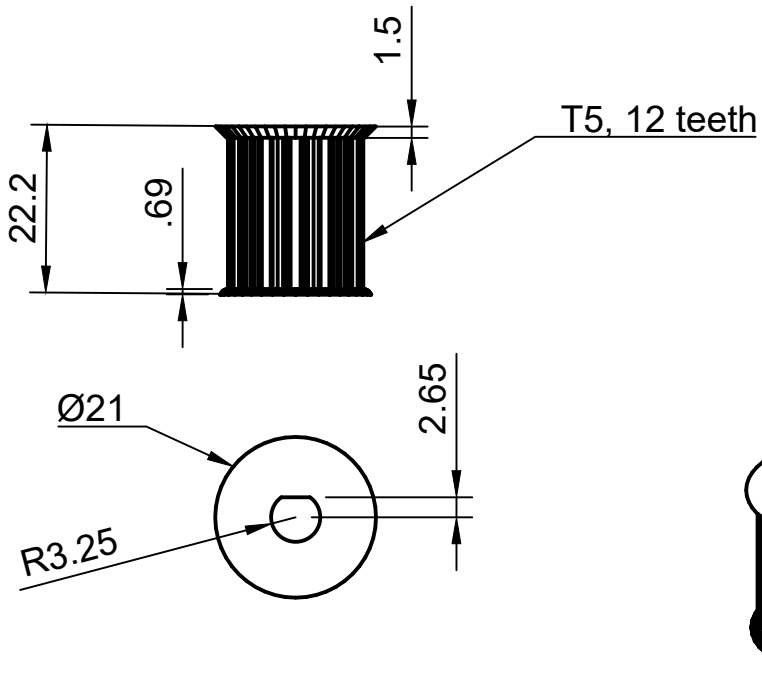
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:2	Document type		Document status	
	Title <b>Side_support_motor_side</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>5/9</b>	



Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:2	Document type		Document status	
	Title <b>Side_support</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>6/9</b>	

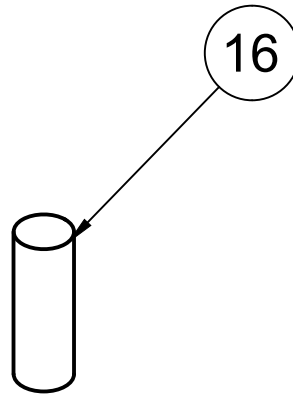
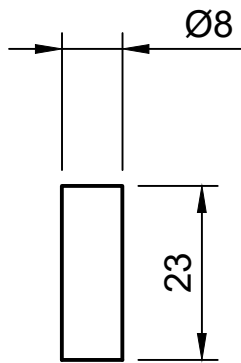


Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1	Document type		Document status	
	Title <b>Shaft_cover</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>7/9</b>	



Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1	Document type		Document status	
	Title <b>GearT5x12x5mm</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>8/9</b>	

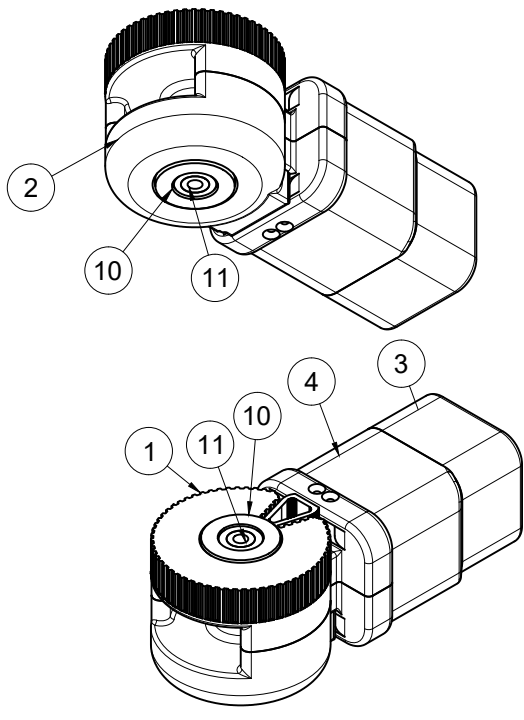
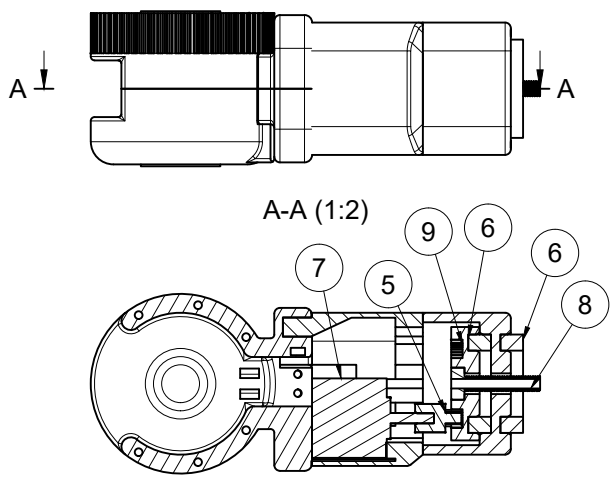




Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1		Document type	Document status	
		Title <b>Shaft</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>9/9</b>

1 2 3 4 5 6 7 8

A  
B  
C  
D  
E  
F

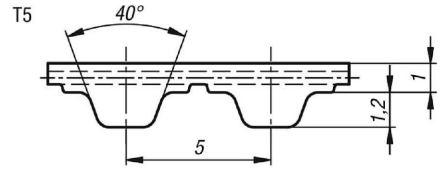
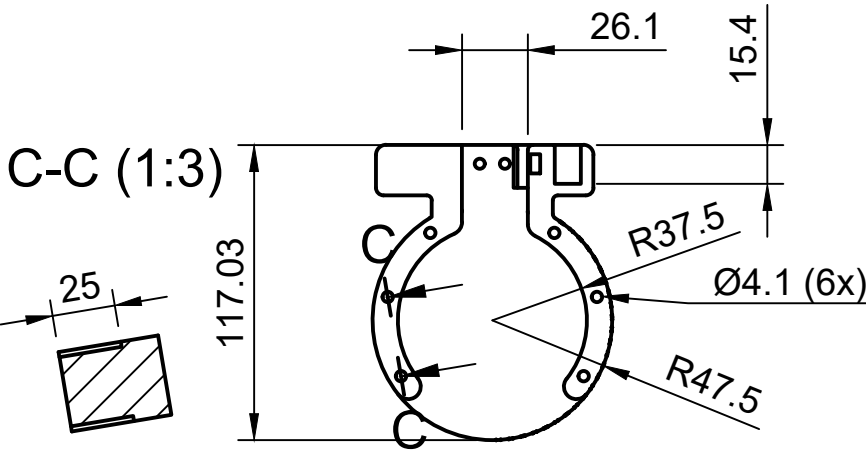


Parts List

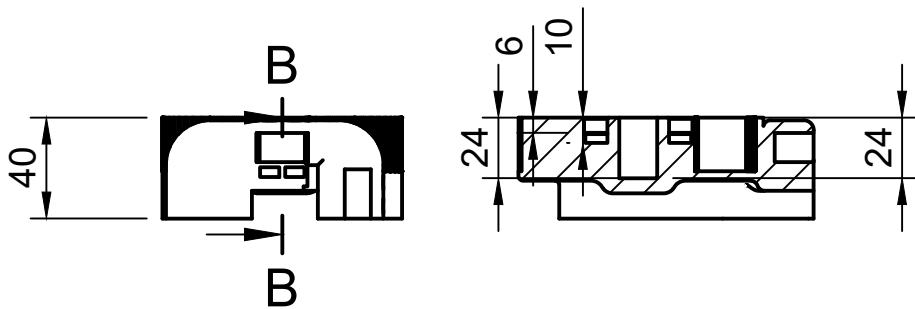
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Main_drive		ABS Plastic
2	1	Main_drive_support		ABS Plastic
3	1	Upper_body		ABS Plastic
4	1	Mid_body		ABS Plastic
5	1	Spur_gear_10	Spur Gear; Module: 0.750000; Num Teeth: 10; Pressure Angle: 20.000000; Backlash: 0.00 mm	ABS Plastic
6	2	Thrust_bearing	Thrust bearing 42x20x12	Aluminum
7	1	Nema17		Titanium
8	1	M8x40		Steel
9	1	Spur_gear_40		ABS Plastic
10	2	Thrust_bearing (1)	Thrust bearing 42x20x12	Aluminum
11	2	Linear_bearing	Linear bearing 12x8x15	Aluminum

Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by
		Document type	Document status
		Title <b>clearing_joint4</b>	DWG No.
		Rev.	Date of issue
			Sheet <b>1/8</b>

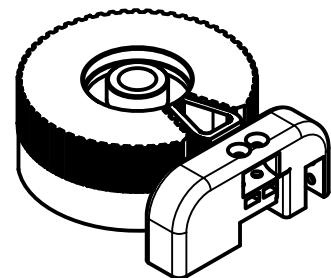
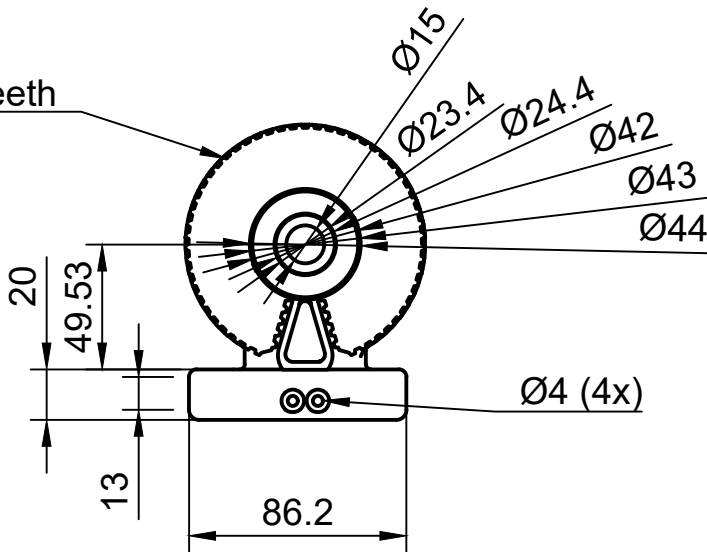
1 2 3 4 5 6 7 8



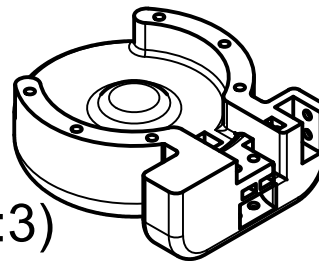
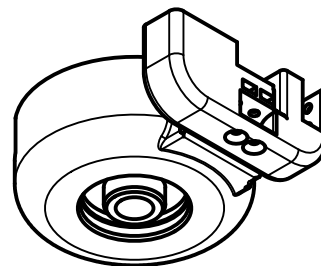
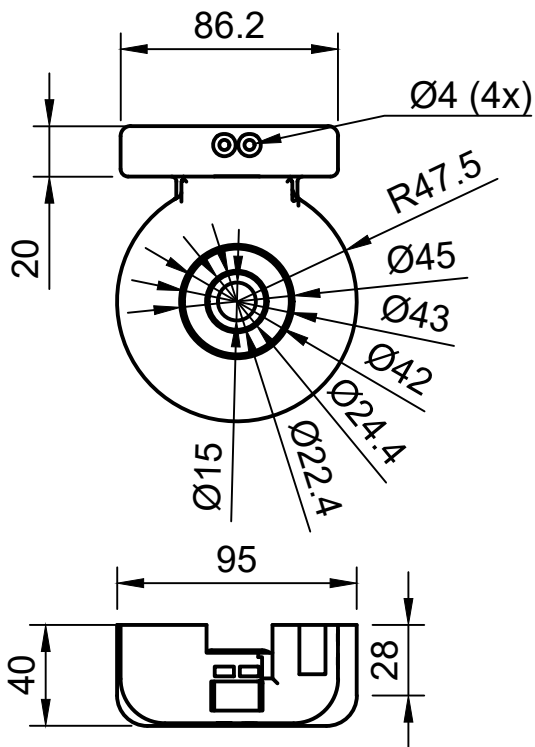
B-B (1:3)



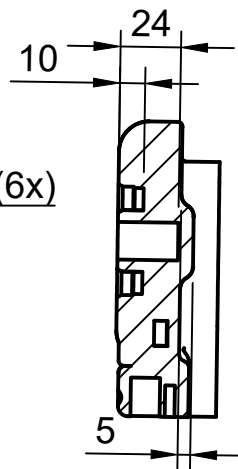
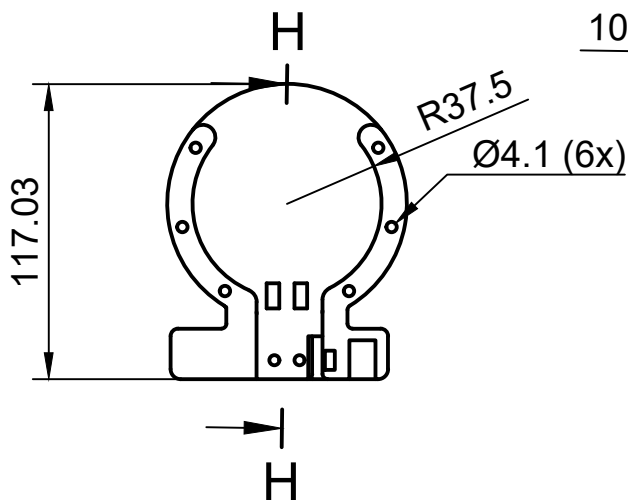
T5, 60 teeth



Dept.	Technical reference	Created by Dawid Mościcki 28.12.2021	Approved by	
Scale 1:3		Document type	Document status	
		Title Main_drive	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 2/7

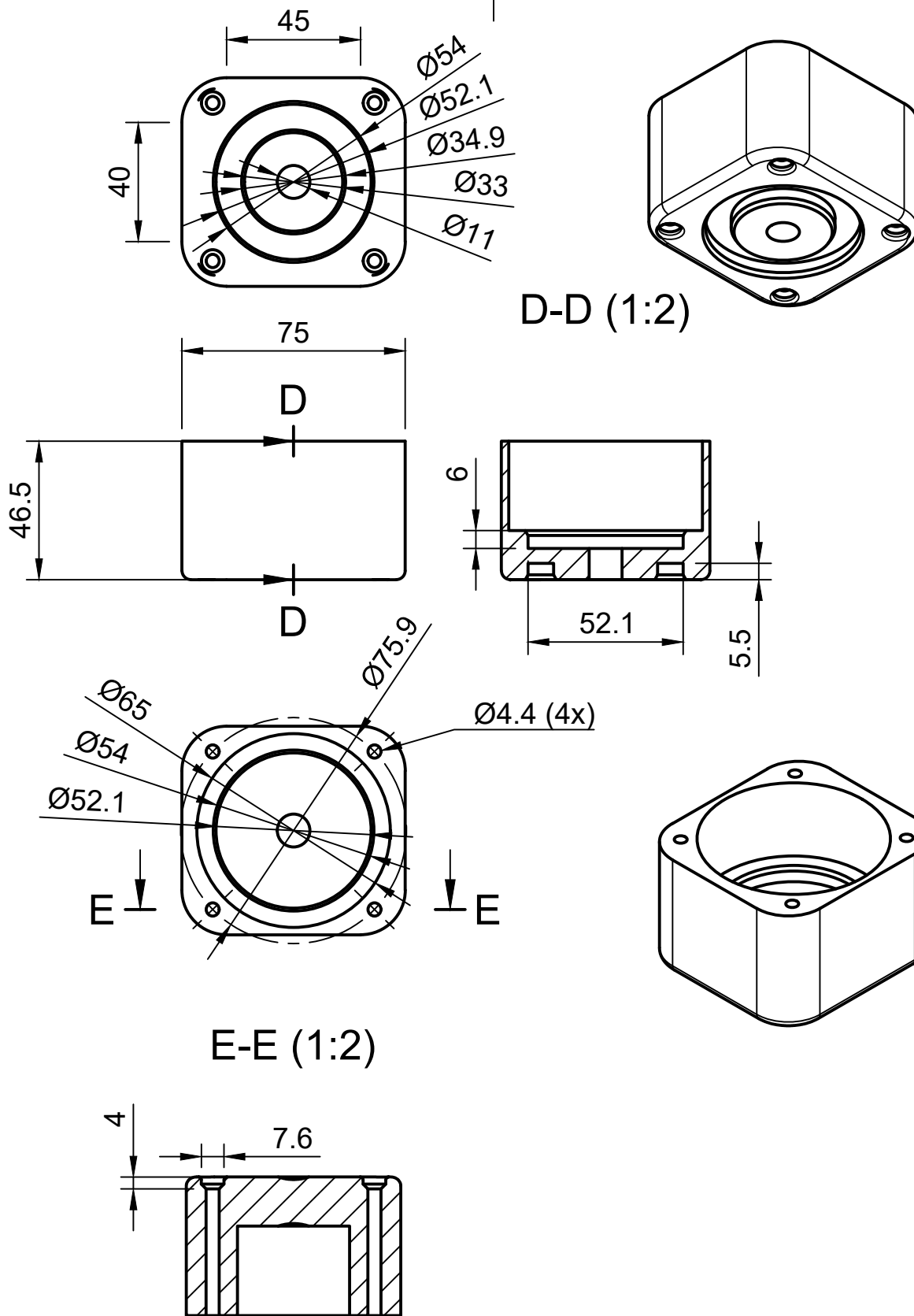


H-H (1:3)

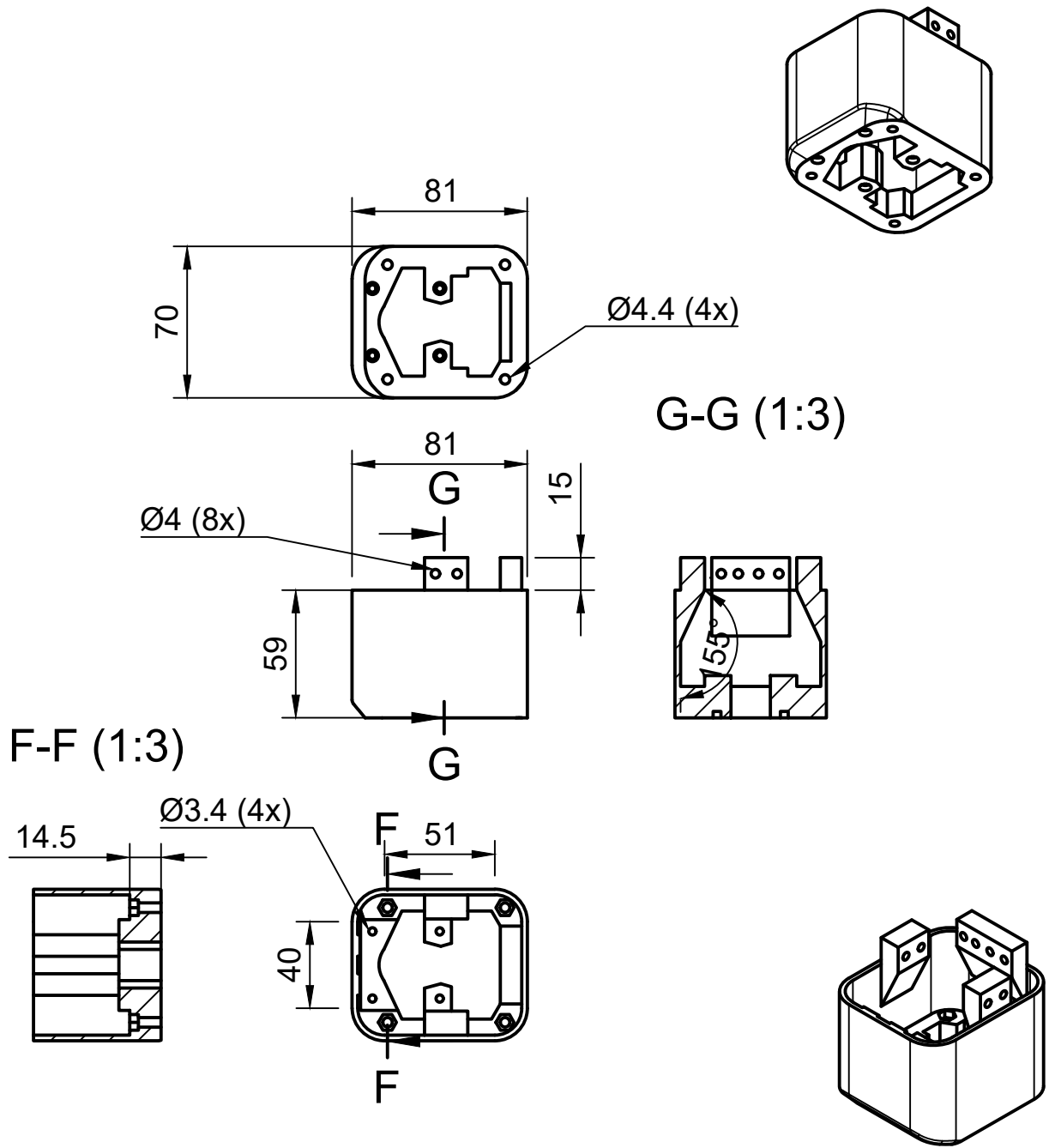


Dept.	Technical reference	Created by Dawid Mościcki 28.12.2021	Approved by	
Scale 1:3	Document type		Document status	
	Title Main_drive_support		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet 3/7	

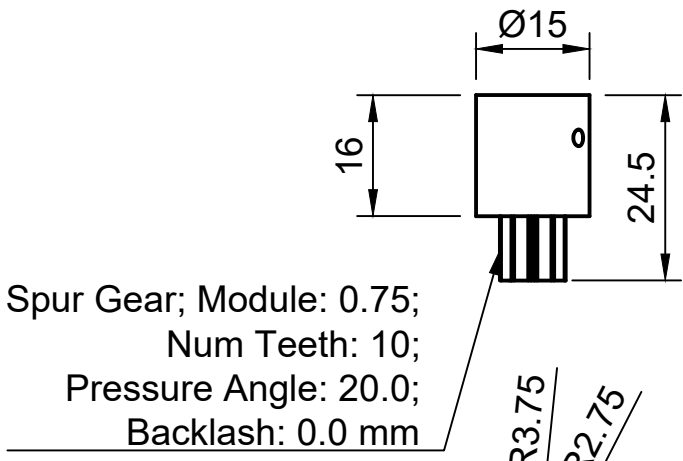




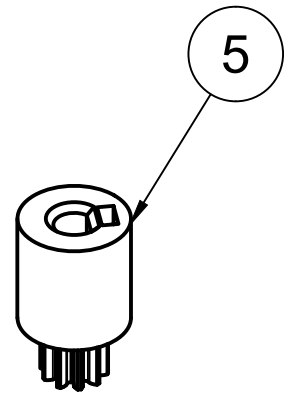
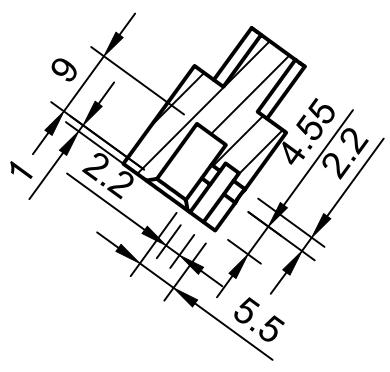
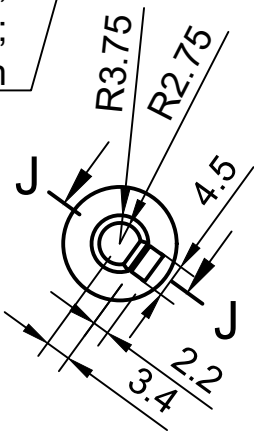
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:2	Document type		Document status	
	Title <b>Upper_body</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>4/7</b>	



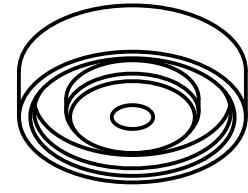
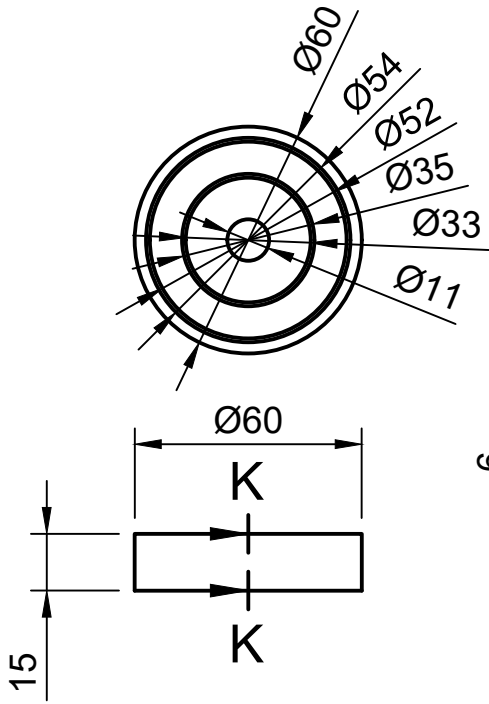
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:3	Document type		Document status	
	Title <b>Mid_body</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>5/7</b>	



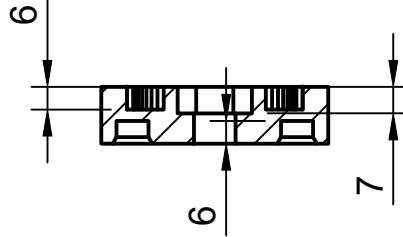
J-J (1:1)



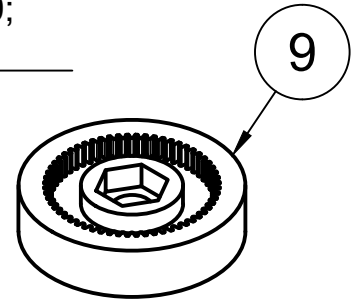
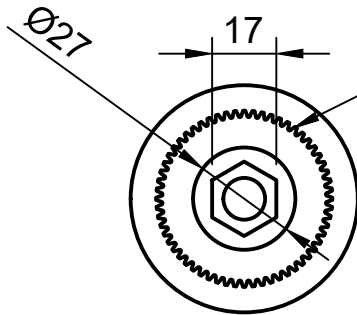
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1	Document type		Document status	
	Title <b>Spur_gear_10</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>6/7</b>	



K-K (1:2)

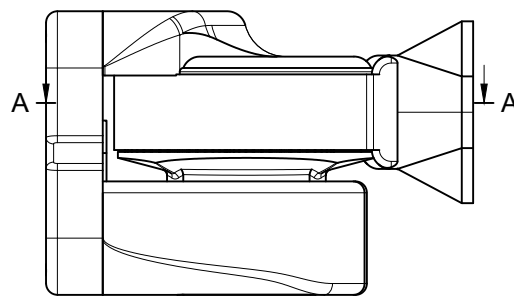
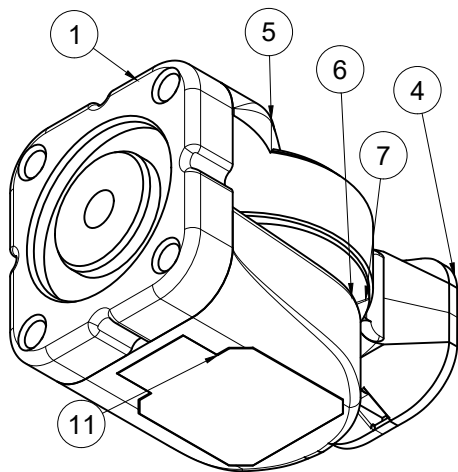


Spur Gear; Module: 0.75;  
 Num Teeth: 60;  
 Pressure Angle: 20.0;  
 Backlash: 0.0 mm

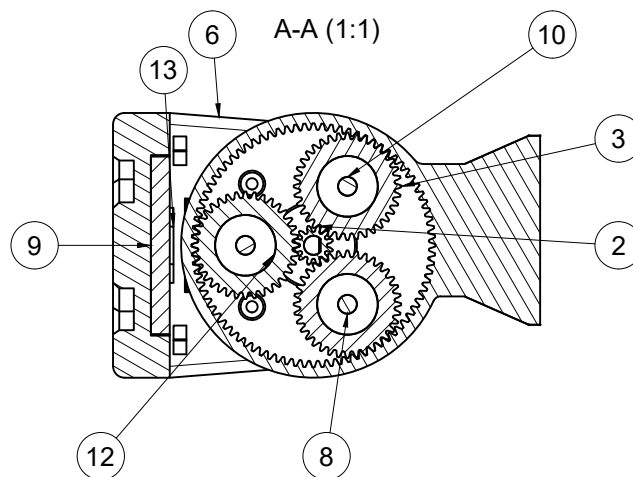


Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:2	Document type		Document status	
	Title <b>Spur_gear_40</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>7/7</b>	



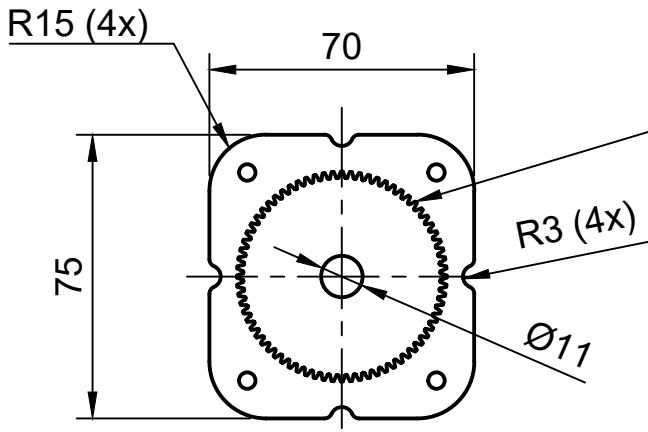


A-A (1:1)

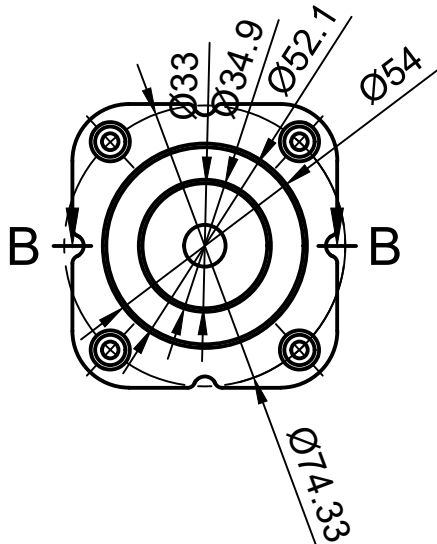
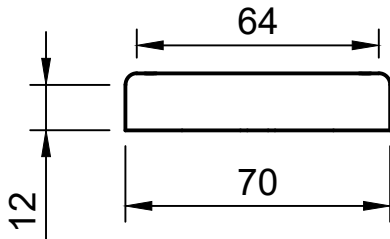
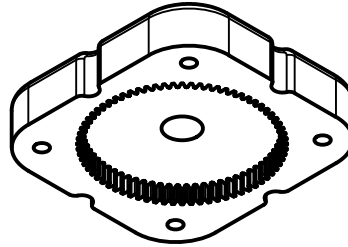


Parts List				
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Base		ABS Plastic
2	1	Sun_spur_gear	Spur Gear; Module: 0.750000; Num Teeth: 12; Pressure Angle: 20.000000; Backlash: 0.10 mm	ABS Plastic
3	3	Planetary_Spur_gear	Spur Gear; Module: 0.750000; Num Teeth: 36; Pressure Angle: 20.000000; Backlash: 0.10 mm	
4	1	Output_gear		ABS Plastic
5	1	Front_panel		ABS Plastic
6	1	Motor_mount		ABS Plastic
7	1	Motor_holder		ABS Plastic
8	3	Ball_bearing		Aluminum
9	1	Joint_5_Fixing		ABS Plastic
10	3	Shaft		ABS Plastic
11	1	Motor_cover		ABS Plastic
12	1	Nema17		Titanium
13	1	M8_Nut		Aluminum

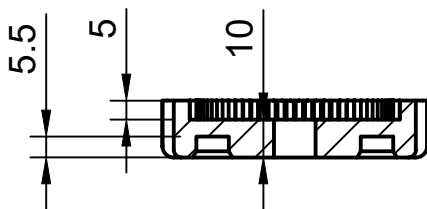
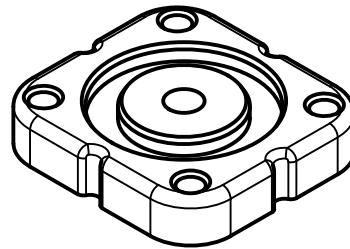
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by
		Document type	Document status
		Title <b>clearing_joint_5</b>	DWG No.
		Rev.	Date of issue
			Sheet <b>1/11</b>



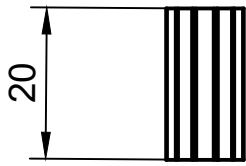
Spur Gear; Module: 0.75;  
 Num Teeth: 60;  
 Pressure Angle: 20deg;  
 Backlash: 0.20 mm



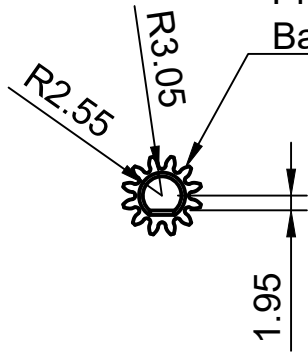
B-B (1:2)



Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:2	Base	Document type	Document status	
		Title	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>2/11</b>



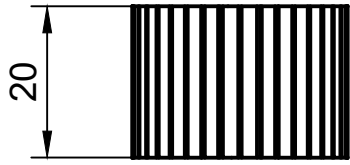
Spur Gear; Module: 0.75;  
 Num Teeth: 12;  
 Pressure Angle: 20.0;  
 Backlash: 0.10 mm



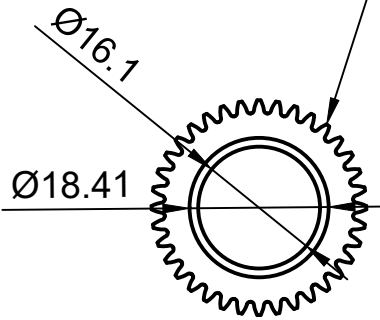
2



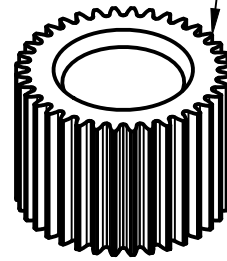
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1	Document type		Document status	
	Title <b>Sun_spur_gear</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>3/11</b>	



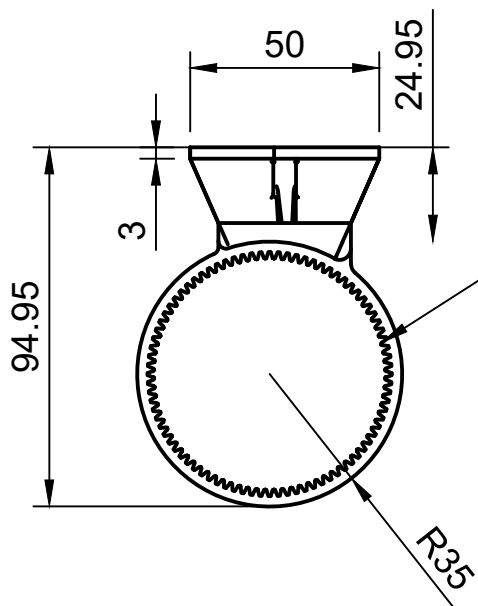
Spur Gear; Module: 0.75;  
 Num Teeth: 36;  
 Pressure Angle: 20.0;  
 Backlash: 0.10 mm



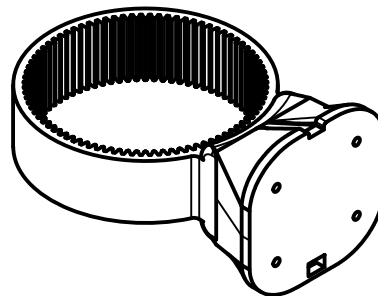
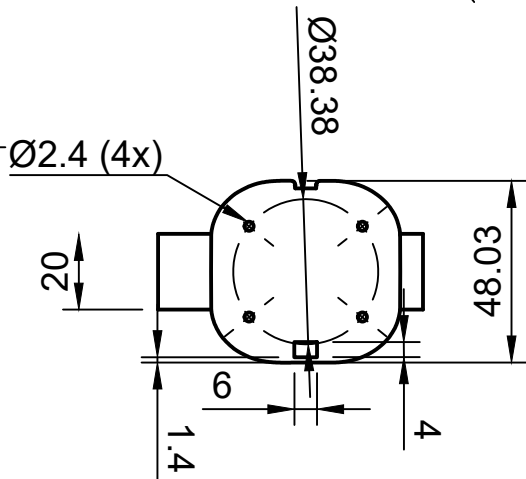
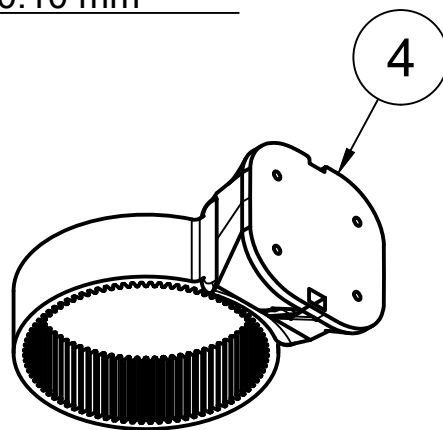
3



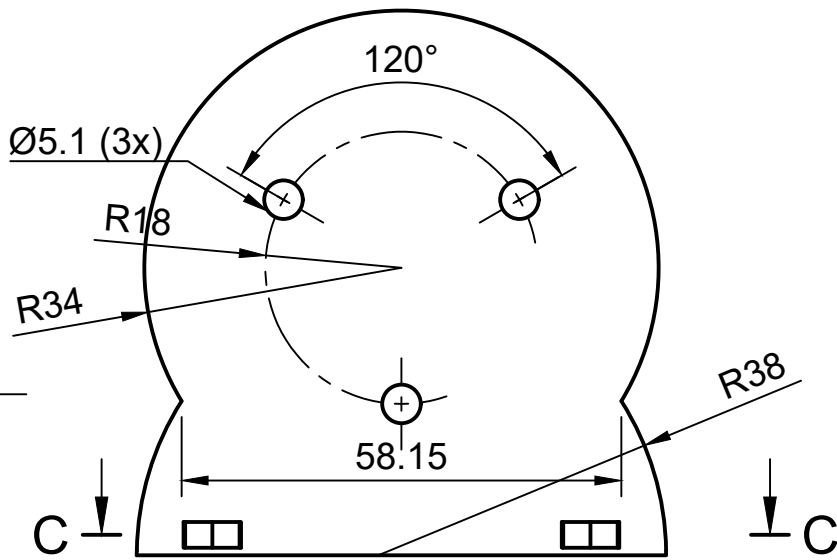
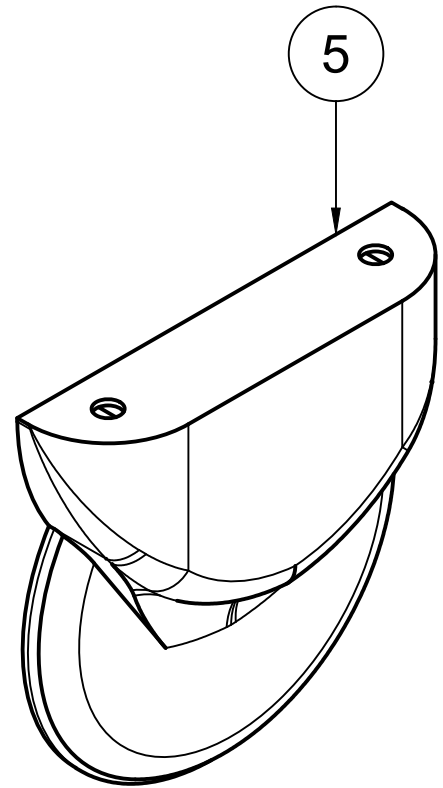
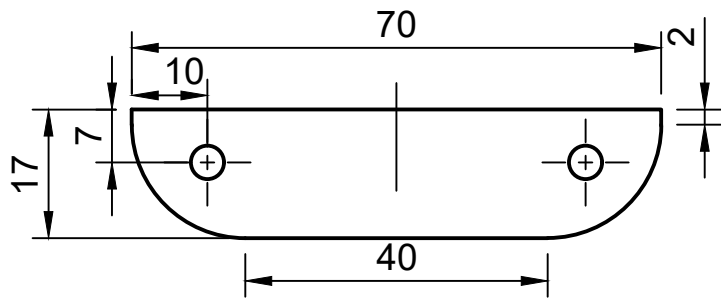
Dept.	Technical reference	Created by Dawid Mościcki 28.12.2021	Approved by	
Scale 1:1		Document type	Document status	
		Title Planetary_Spur_gear	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 4/11



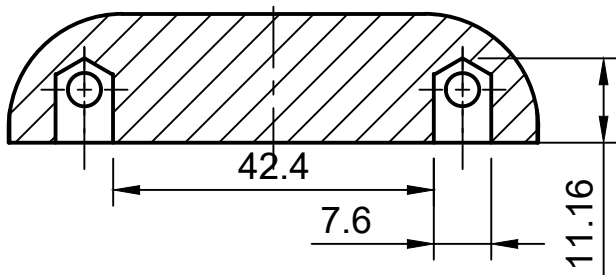
Spur Gear; Module: 0.75;  
 Num Teeth: 84;  
 Pressure Angle: 20.0;  
 Backlash: 0.10 mm



Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:2		Document type	Document status	
		Title <b>Output_gear</b>	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
				Sheet <b>5/11</b>

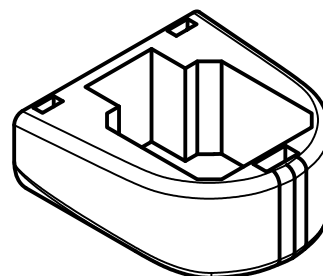
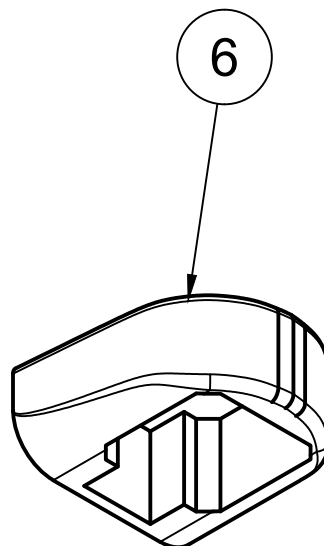
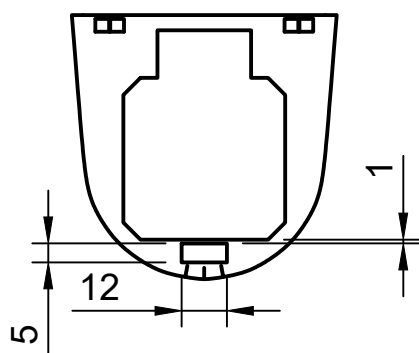
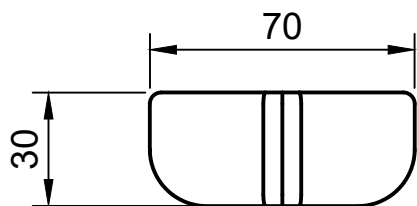
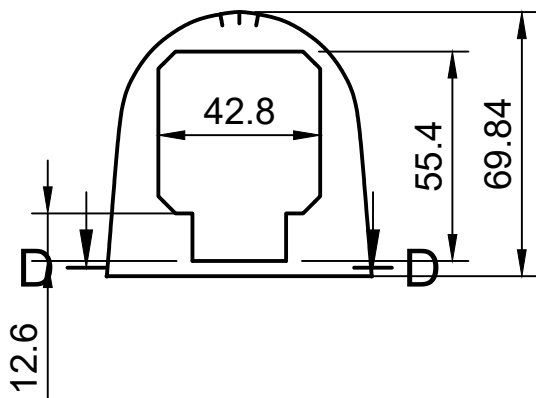
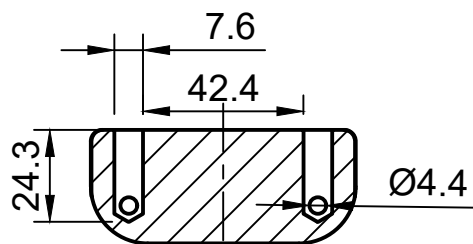


C-C (1:1)

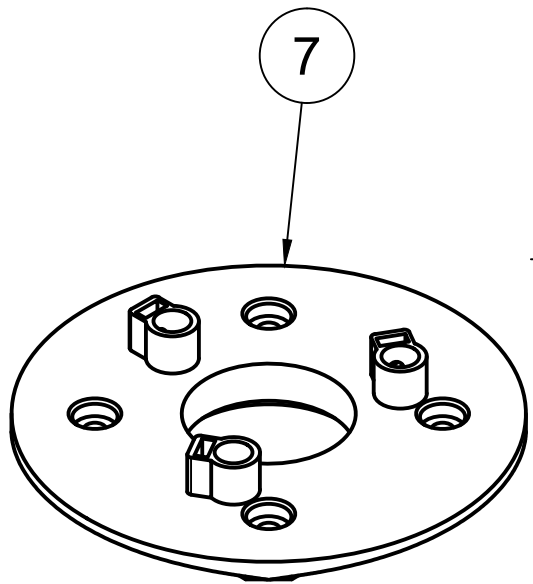
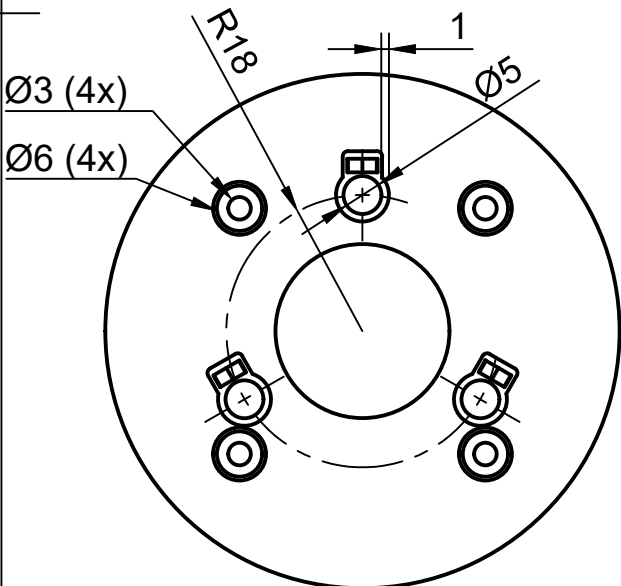
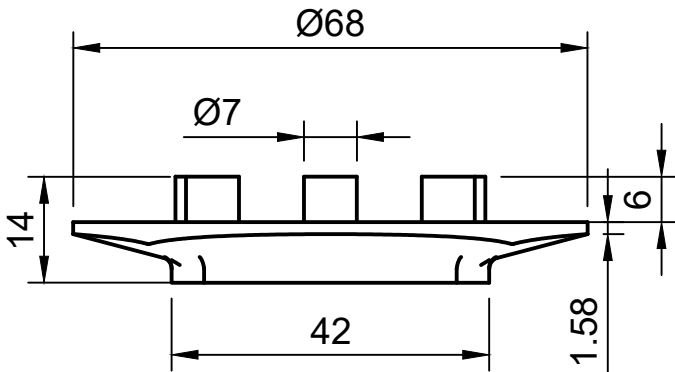
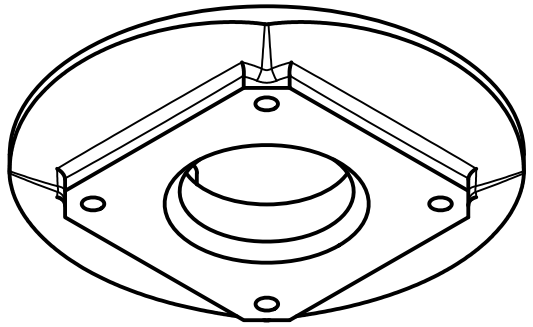
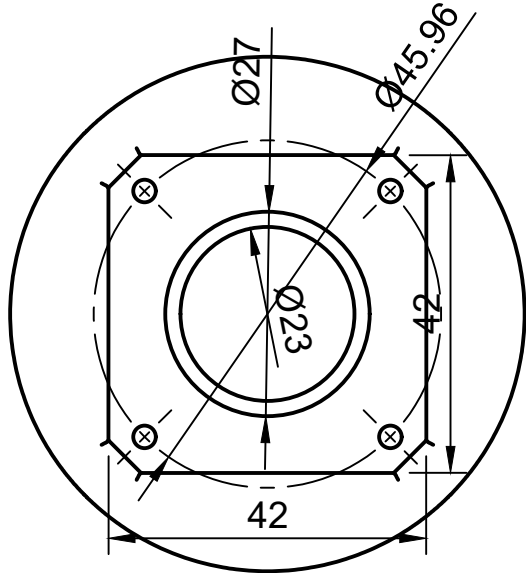


Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1		Document type	Document status	
		Title <b>Front_panel</b>	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
				Sheet <b>6/11</b>

D-D (1:2)



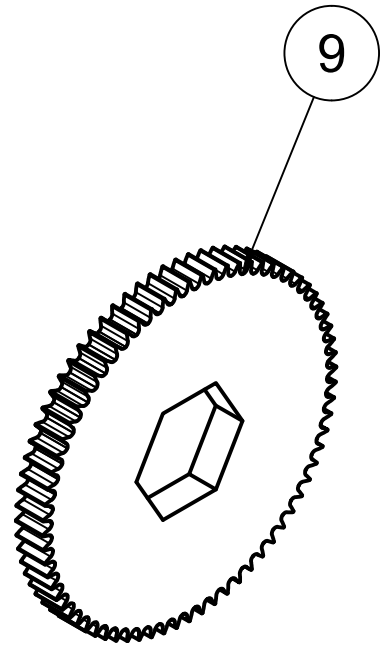
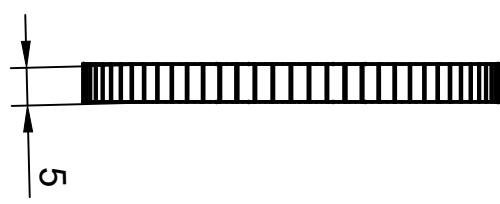
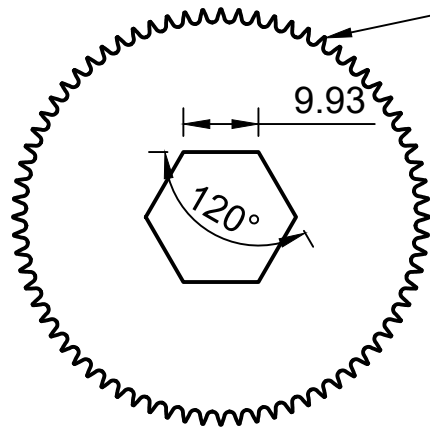
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:2	Document type		Document status	
	Title <b>Motor_mount</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>7/11</b>	



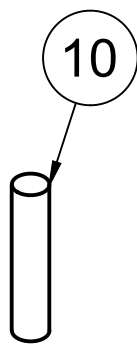
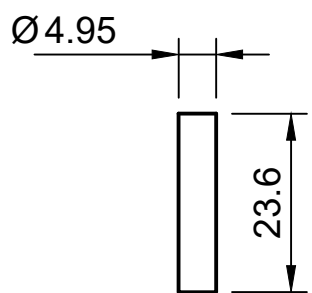
Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1		Document type	Document status	
		Title <b>Motor_holder</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>8/11</b>



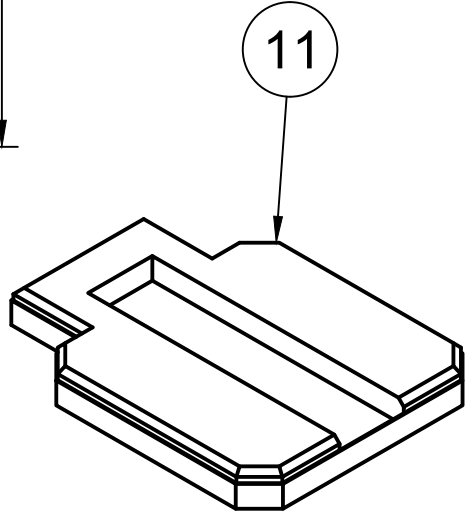
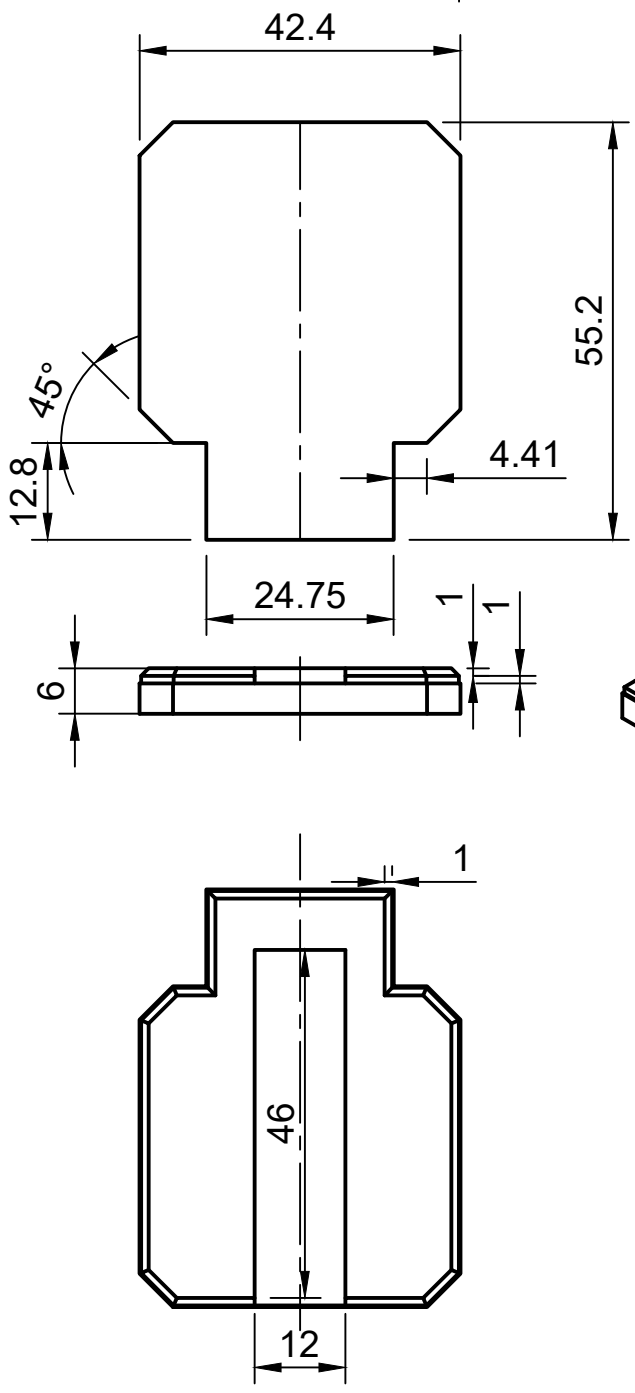
Spur Gear; Module: 0.75;  
 Num Teeth: 60;  
 Pressure Angle: 20deg;  
 Backlash: 0.0 mm



Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1	Document type		Document status	
	Title <b>Joint_5_Fixing</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>9/11</b>	



Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1		Document type	Document status	
		Title <b>Shaft</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>10/11</b>



Dept.	Technical reference	Created by <b>Dawid Mościcki 28.12.2021</b>	Approved by	
Scale 1:1	Document type		Document status	
	Title <b>Motor_cover</b>		DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>11/11</b>	

DOMINIK S176326

GDAŃSK

Tel.

Firma / klient  
Opis projektu  
Numer rysunku  
Komisja

Politechnika Gdańska  
Prototyp ramienia MK.0  
DL-01/2021  
DOM&PID

Producent (firma)

DOMINIK S176326

Ścieżka

Nazwa projektu

MK.0

Fabrykat / wyrób

Typ

MK.0

Miejsce instalacji

GPNT

Osoba odpowiedzialna

Elementy specjalne

Utworzono dnia

2022-01-05

Edytowano dnia

2022-01-06

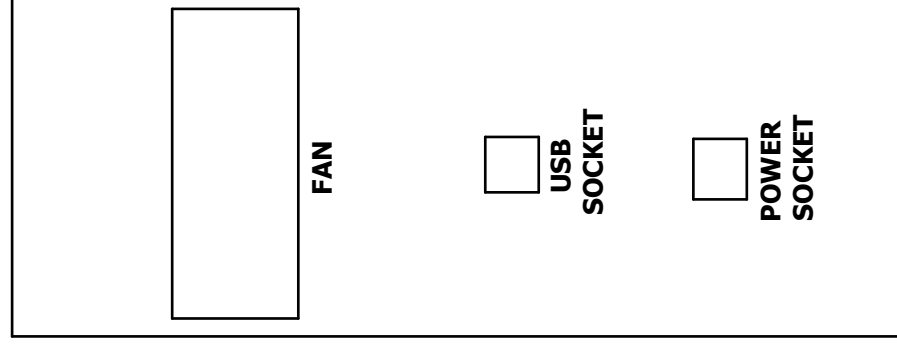
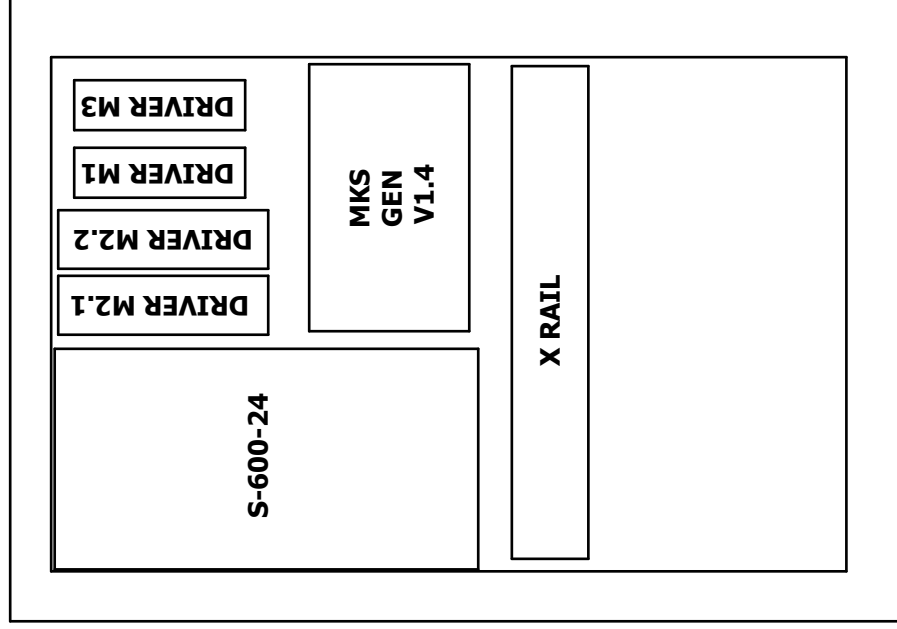
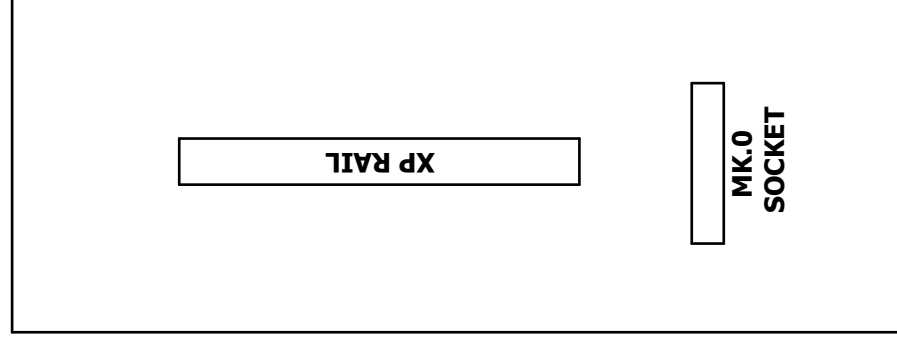
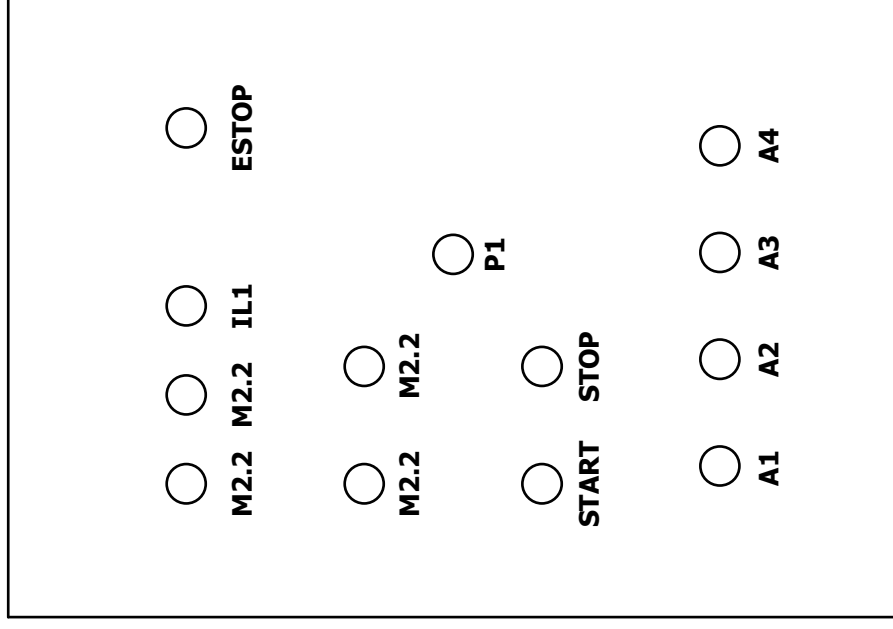
przez (Skrót) Adam

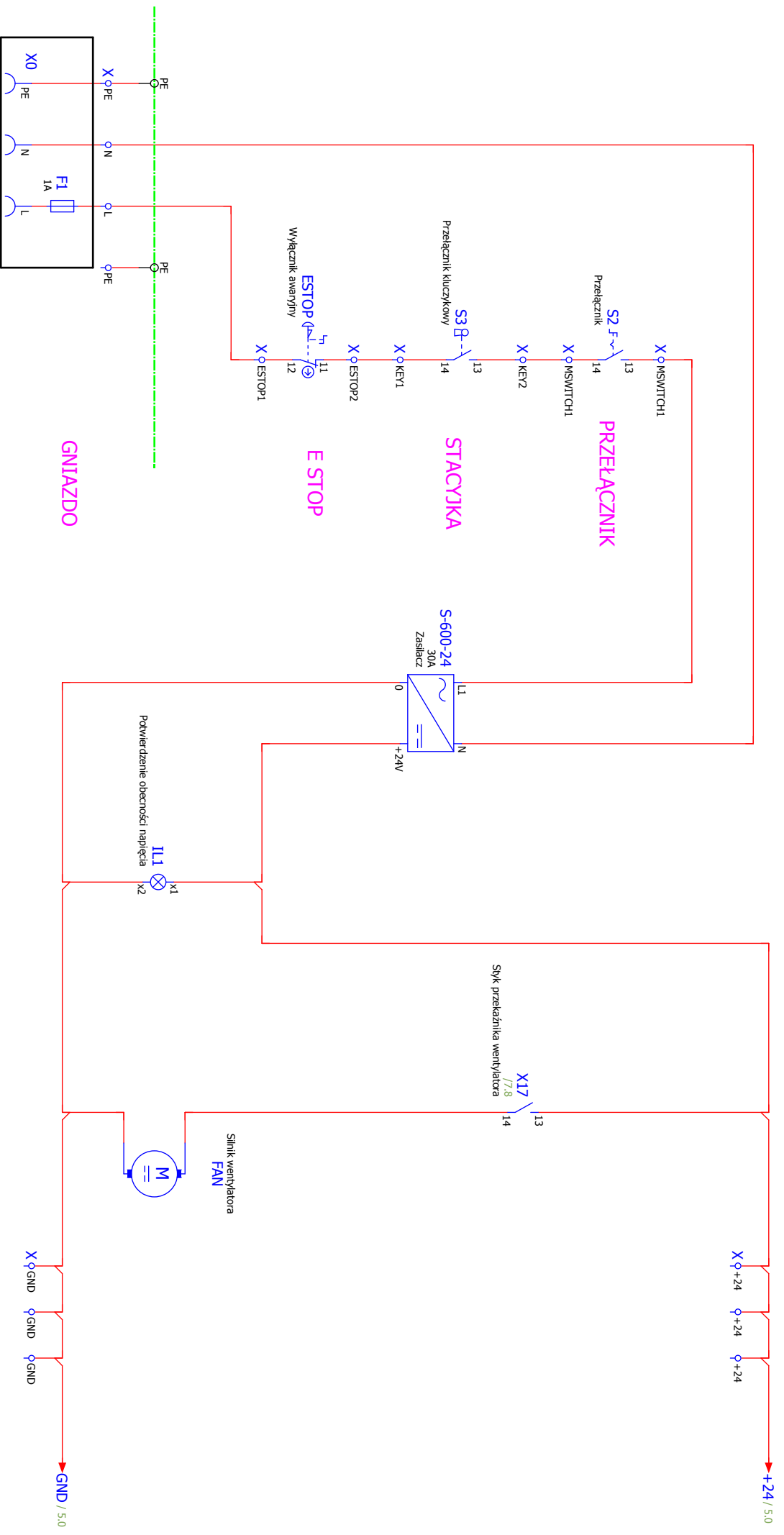
Ilość stron

24

Strona	Opis stron	Dodatkowe pole strony	Data		
=ROB+CAB0/1	STRONA TYTUŁOWA		2022-01-05		X
=ROB+CAB0/2	Spis treści : =ROB+CAB0/1 - =ROB+CAB0/24		2022-01-06		X
=ROB+CAB0/3	WIDOK		2022-01-06		X
=ROB+CAB0/4	ZASILANIE		2022-01-06		X
=ROB+CAB0/5	MKS POWER&&COMM		2022-01-06		X
=ROB+CAB0/6	WEJŚCIA		2022-01-06		X
=ROB+CAB0/7	WYJŚCIA CYFROWE		2022-01-06		X
=ROB+CAB0/8	WYJŚCIA STER1		2022-01-06		X
=ROB+CAB0/9	WYJŚCIA STER2		2022-01-06		X
=ROB+CAB0/10	Plan zacisków =ROB+CAB0-DRIVER.M1-XD.M1		2022-01-06		
=ROB+CAB0/11	Plan zacisków =ROB+CAB0-DRIVER.M2.1-XD.M2.1		2022-01-06		
=ROB+CAB0/12	Plan zacisków =ROB+CAB0-DRIVER.M2.2-XD.M2.2		2022-01-06		
=ROB+CAB0/13	Plan zacisków =ROB+CAB0-DRIVER.M3-XD.M3		2022-01-06		
=ROB+CAB0/14	Plan zacisków =ROB+CAB0-VMM-XVMM		2022-01-06		
=ROB+CAB0/15	Plan zacisków =ROB+CAB0-X		2022-01-06		
=ROB+CAB0/16	Plan zacisków =ROB+CAB0-XP		2022-01-06		
=ROB+CAB0/17	Zestawienie zacisków PLC : =ROB+CAB0-MKS - =ROB+CAB0-MKS		2022-01-06		
=ROB+CAB0/18	Zestawienie zacisków PLC : =ROB+CAB0-MKS-M1 - =ROB+CAB0-MKS-M1		2022-01-06		
=ROB+CAB0/19	Zestawienie zacisków PLC : =ROB+CAB0-MKS-M2.1 - =ROB+CAB0-MKS-M2.1		2022-01-06		
=ROB+CAB0/20	Zestawienie zacisków PLC : =ROB+CAB0-MKS-M3 - =ROB+CAB0-MKS-M3		2022-01-06		
=ROB+CAB0/21	Zestawienie zacisków PLC : =ROB+CAB0-MKS-M4 - =ROB+CAB0-MKS-M4		2022-01-06		
=ROB+CAB0/22	Zestawienie zacisków PLC : =ROB+CAB0-MKS-M5 - =ROB+CAB0-MKS-M5		2022-01-06		
=ROB+CAB0/23	Zestawienie zacisków PLC : =ROB+CAB0-MKS-MKS - =ROB+CAB0-MKS-MKS		2022-01-06		
=ROB+CAB0/24	Zestawienie zacisków PLC : =ROB+CAB0-MKS-SERV1 - =ROB+CAB0-MKS-SERV1		2022-01-06		



**RZUT LEWA SCIANA****RZUT PLYTY MONTAZOWEJ****RZUT PRAWA SCIANA****RZUT WIEKA**

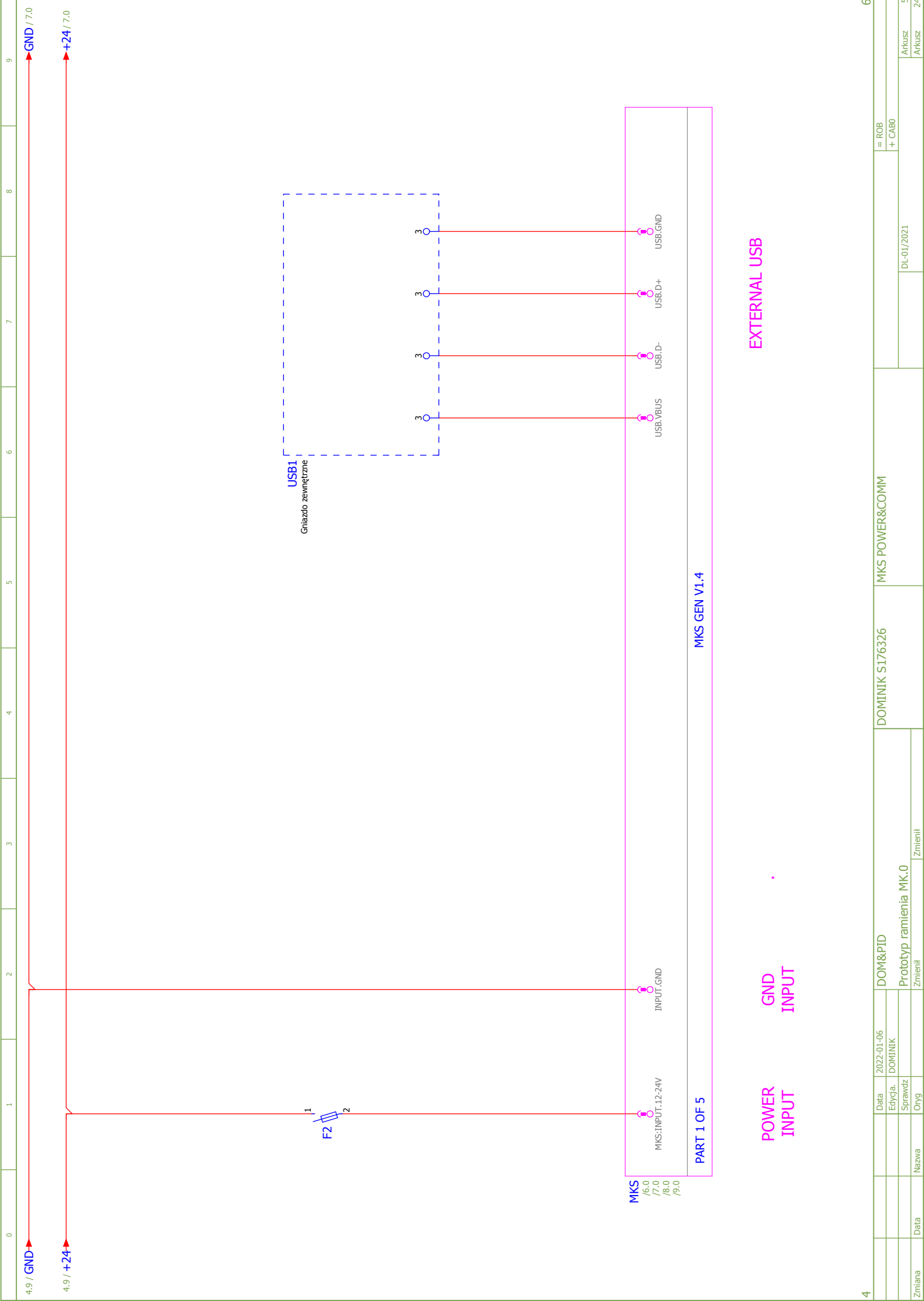


ZASILANIE 230V AC

ZASILANIE 24V DC

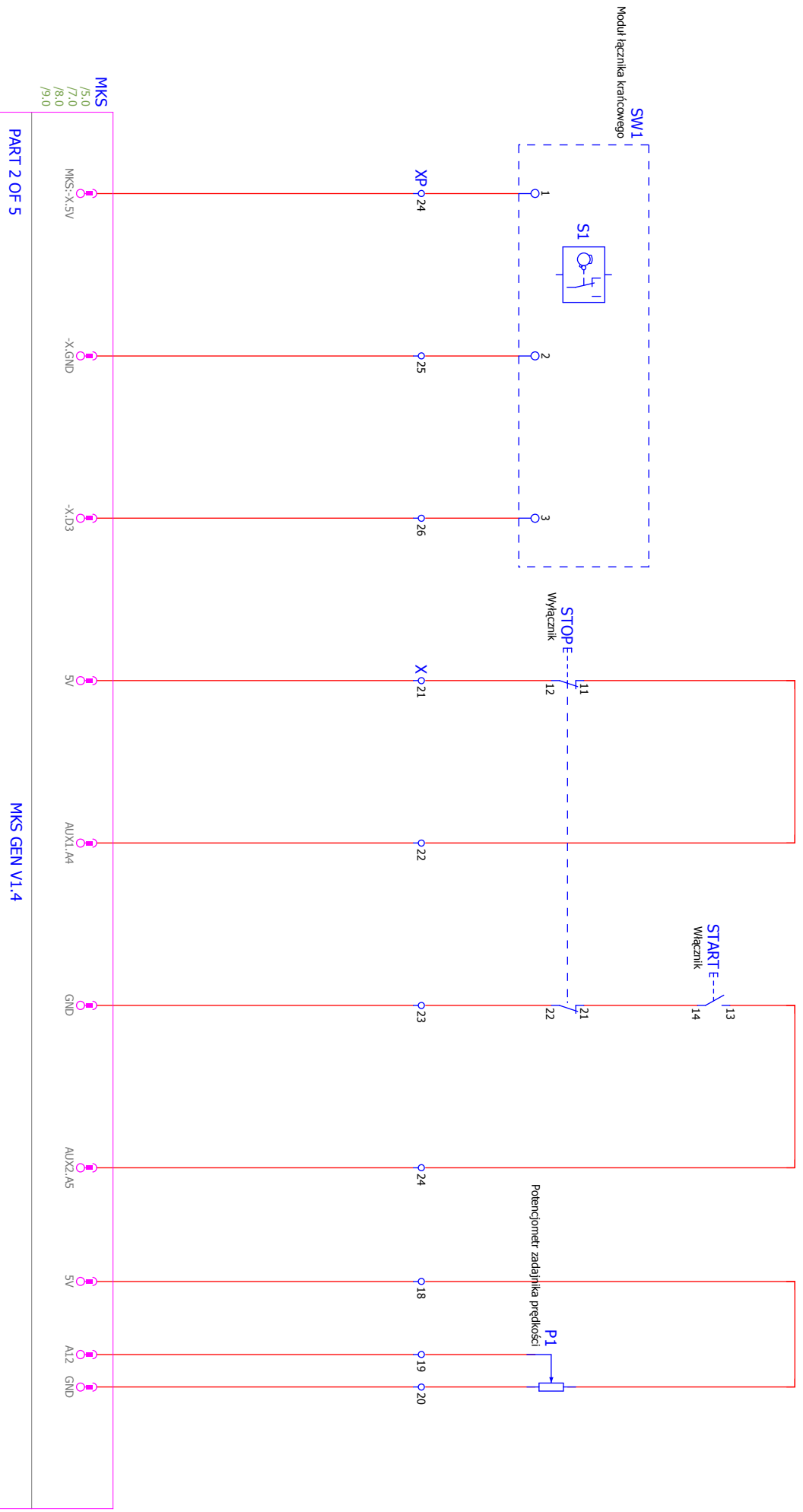
WENTYLATOR

3		Data		2022-01-06		DOM&PID		Prototyp ramienia MK.0		DOMINIK S176326		ZASILANIE		5	
Miana		Edycja		DOMINIK		Sprawdz		Zmienil		Zmienil		= ROB		4	
Data		Sprawdz		OY9		Zmienil		Zmienil		DL-01/2021		+ CAB0		Arkusz	
Nazwa		Sprawdz		OY9		Zmienil		Zmienil		DL-01/2021		+ CAB0		Arkusz	
Nazwa		Sprawdz		OY9		Zmienil		Zmienil		DL-01/2021		+ CAB0		Arkusz	
Nazwa		Sprawdz		OY9		Zmienil		Zmienil		DL-01/2021		+ CAB0		Arkusz	
Nazwa		Sprawdz		OY9		Zmienil		Zmienil		DL-01/2021		+ CAB0		Arkusz	



Date	2022-01-06	DOM&PID	DOMINIK S176326	MKS POWER&COMM	= ROB + CABO	6
Edyga.	DOMINIK	Prototyp ramienia MK.0				
Sprawdz		Zmienit	Zmienit			
Nazwa						
Zmiana						
Data						
Zmiana						
Data						
Zmiana						
Data						
Zmiana						
Data						
Zmiana						



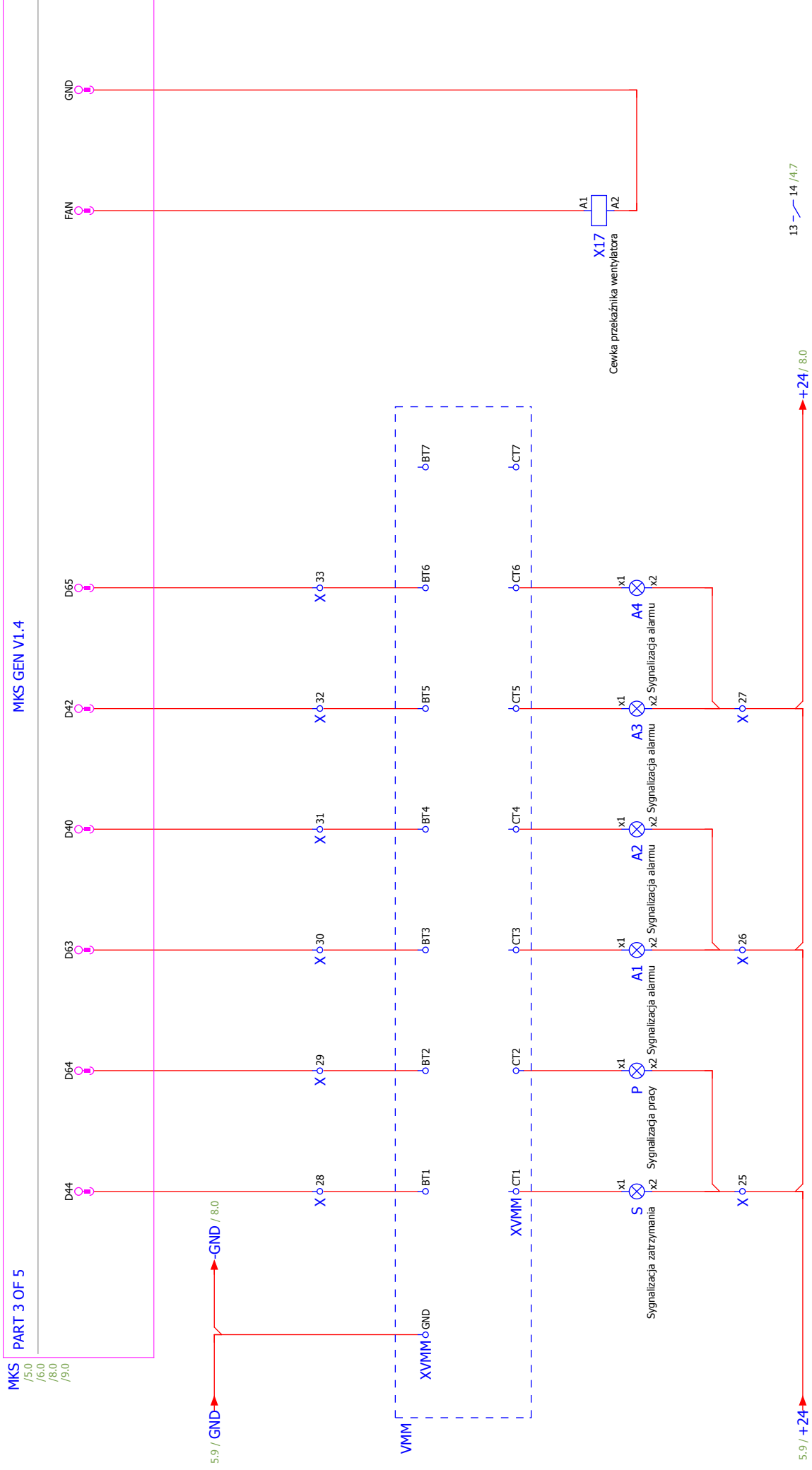


+5 SW1    GND SW1    IN SW1    STOP    START    ZADAJNIK PRĘDKOŚCI

PART 2 OF 5

MKS GEN V1.4

Zmiana		Data		2022-01-06		DOMINIK		DOMINIK S176326		WEIŚCIA		= ROB	
Edycja		Sprawdz		OY9		Zmienil		Zmienil		DL-01/2021		+ CAB0	
Nazwa		Prototyp ramienia MK.0		Zmienil		Zmienil		Zmienil		Zmienil		Arkusze	
Data		2022-01-06		DOMINIK		DOMINIK S176326		WEIŚCIA		DL-01/2021		Arkusze	
Data		2022-01-06		DOMINIK		DOMINIK S176326		WEIŚCIA		DL-01/2021		Arkusze	
Data		2022-01-06		DOMINIK		DOMINIK S176326		WEIŚCIA		DL-01/2021		Arkusze	



FAN COIL

STOP PRACA ALARM 1 ALARM 2 ALARM 1 ALARM 2

Zmiana	Data	Nazwa	Zmienit

DOM&PID	
Prototyp ramienia MK.0	Zmienit

DOMINIK S176326

WYJŚCIA CYFROWE

= ROB  
+ CABO

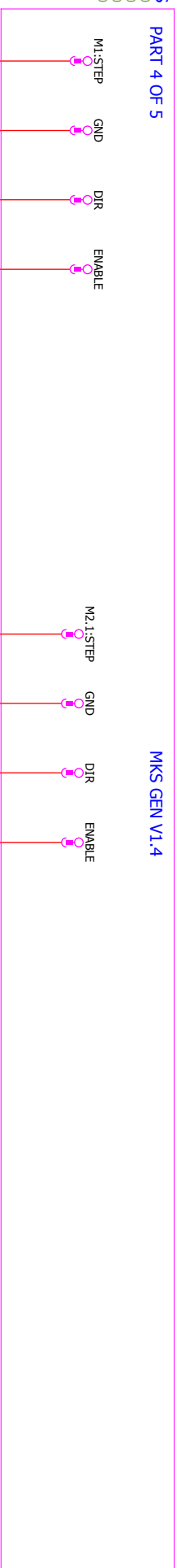
DL-01/2021

Arkusz	7
Arkusz	24

MKS  
/3/0  
/6/0  
/7/0  
/9/0

PART 4 OF 5

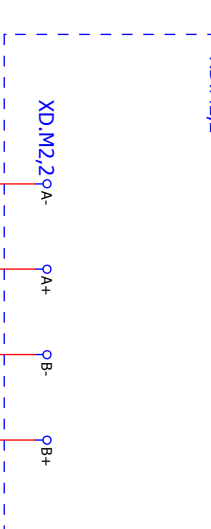
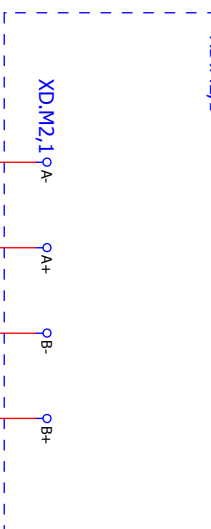
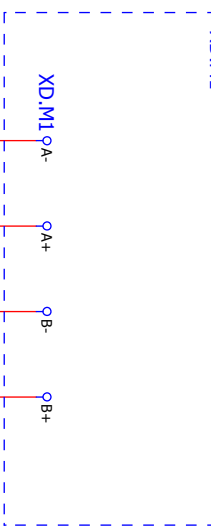
MKS GEN V1.4



DRIVER M1  
Sterownik silnika

DRIVER M2,1  
Sterownik silnika

DRIVER M2,2  
Sterownik silnika

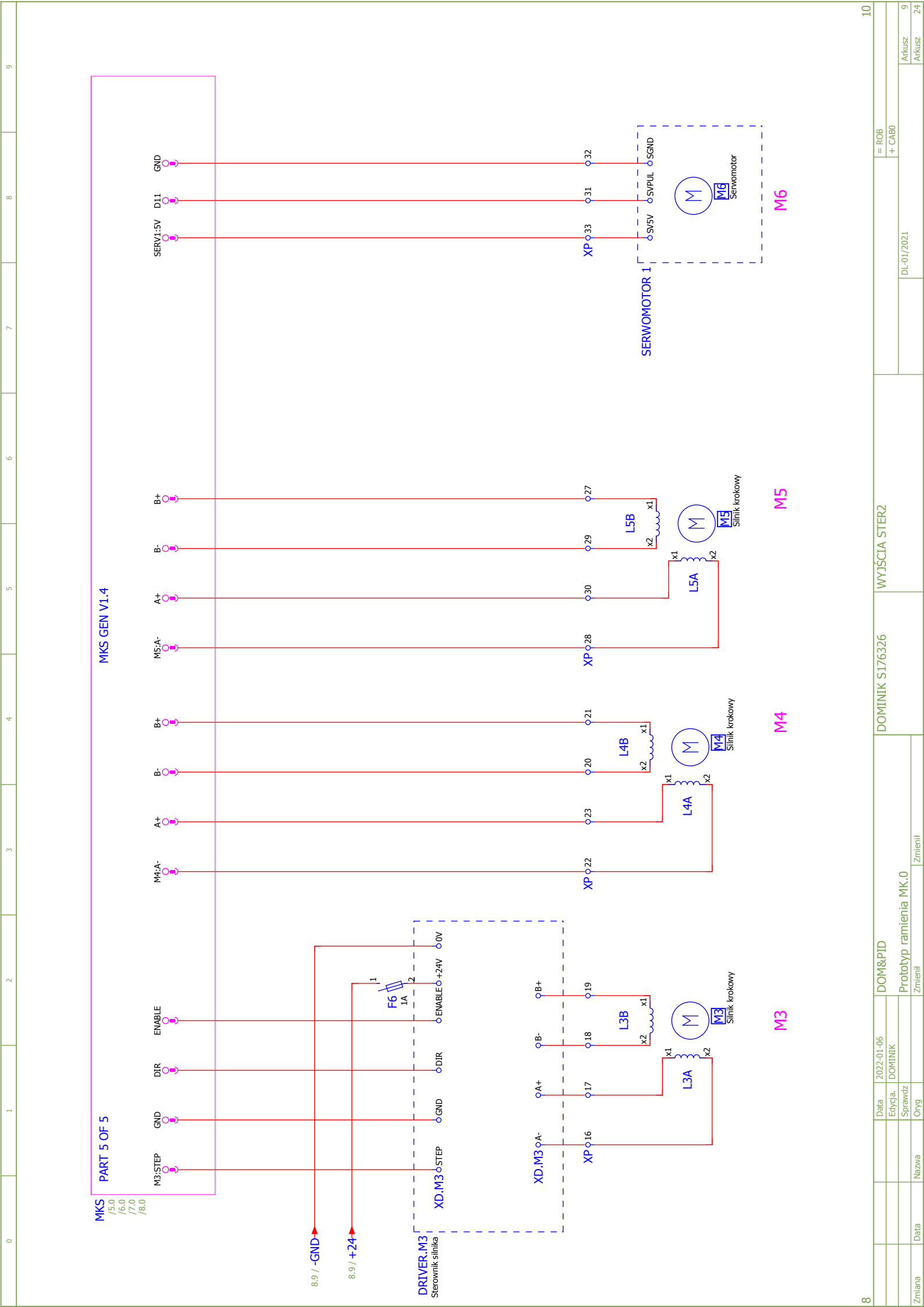


M1

M2.1

M2.2

7		DOM&PID		DOMINIK S176326		WYJŚCIA STER1		= ROB + CAB0	
Data		2022-01-06		Data		2022-01-06		Data	
Edycja		DOMINIK		Edycja		DOMINIK		Edycja	
Sprawdz				Sprawdz				Sprawdz	
OY9				OY9				OY9	
Nazwa		Prototyp ramienia MK.0		Nazwa		Prototyp ramienia MK.0		Nazwa	
Zmienił				Zmienił				Zmienił	
Miana				Miana				Miana	
Data				Data				Data	
Arkusze		8		Arkusze		8		Arkusze	
24		24		24		24		24	
9				9				9	



Data		2022-01-06		DOM&PID		DOMINIK S176326		WYJŚCIA STER2		= ROB + CABO	
Edycja		DOMINIK		Prototyp ramienia MK.0		Zmienit		Zmienit		DL-01/2021	
Sprawdz		Oryg		Zmienit		Zmienit		Zmienit		9	
Nazwa		Zmienit		Zmienit		Zmienit		Zmienit		Arkusz	
Zmiana		Data		Nazwa		Zmienit		Zmienit		Arkusz	
										24	

Listwa

=ROB+CAB0-DRIVER.M1-XD.M1

		Nazwa kabla							Nazwa kabla							Strona / kolumna			
	Tekst funkcyjny	typ kabla	Oznaczenie celu	Przyłącze	Zacisk	Mostek/zworka	Oznaczenie celu	Przyłącze	Typ kabla										
M1					0V	•	-VMM-XVMM	GND											/8.2
M1					+24V	•	-DRIVER.M2.1-XD.M2.1	0V											/8.2
M1					A+	•	-XP	2											/8.1
M1					A-	•	-XP	3											/8.1
M1					B+	•	-XP	2											/8.2
M1					B-	•	-XP	7											/8.2
M1					DIR	•	-MKS-M1	5											/8.1
M1					ENABLE	•	-MKS-M1												/8.2
M1					GND	•	-MKS-M1												/8.1
M1					STEP	•	-MKS-M1												/8.1









**Listwa**  
**=ROB+CAB0-VMIM-XVMIM**

Tekst funkcyjny	Nazwa kabla	Nazwa kabla	Oznaczenie celu	Przyłącze	Zacisk	Mostek/zworka	Oznaczenie celu	Przyłącze	Typ kabla	Strona / kolumna	
STOP					BT1	●	-X	28			17.1
PRACA					BT2	●	-X	29			17.2
ALARM 1					BT3	●	-X	30			17.3
ALARM 2					BT4	●	-X	31			17.4
=					BT5	●	-X	32			17.4
=					BT6	●	-X	33			17.5
=					BT7	●					17.6
STOP					CT1	●					17.1
PRACA					CT2	●	-P	x1			17.2
ALARM 1					CT3	●					17.3
ALARM 2					CT4	●					17.4
=					CT5	●					17.4
=					CT6	●					17.5
=					CT7	●					17.6
					GND	●	-MKS-MKS -DRIVER.M1-XD.M1	0V			17.1



Lista  
=ROB+CAB0-XP

Tekst funkcyjny		Nazwa kabla	Oznaczenie celu	Przyłącze	Zacisk	Mostek/zworka	Oznaczenie celu	Przyłącze	Typ kabla	Strona / kolumna
			-DRIVER.M1-XD.M1	A-	2	•	-11A	x2		/8.1
			-DRIVER.M1-XD.M1	A+	3	•	-11A	x1		/8.1
			-DRIVER.M1-XD.M1	B-	5	•	-11B	x2		/8.2
			-DRIVER.M1-XD.M1	B+	7	•	-11B	x1		/8.2
			-DRIVER.M2.1-XD.M2.1	A-	8	•	-12.1A	x2		/8.4
			-DRIVER.M2.1-XD.M2.1	A+	9	•	-12.1A	x1		/8.4
			-DRIVER.M2.1-XD.M2.1	B+	10	•	-12.1B	x1		/8.5
			-DRIVER.M2.1-XD.M2.1	B-	11	•	-12.1B	x2		/8.5
			-DRIVER.M2.2-XD.M2.2	A-	12	•	-12.2A	x2		/8.7
			-DRIVER.M2.2-XD.M2.2	A+	13	•	-12.2A	x1		/8.7
			-DRIVER.M2.2-XD.M2.2	B-	14	•	-12.2B	x2		/8.8
			-DRIVER.M2.2-XD.M2.2	B+	15	•	-12.2B	x1		/8.8
			-DRIVER.M3-XD.M3	A-	16	•	-13A	x2		/9.1
			-DRIVER.M3-XD.M3	A+	17	•	-13A	x1		/9.1
			-DRIVER.M3-XD.M3	B-	18	•	-13B	x2		/9.2
			-DRIVER.M3-XD.M3	B+	19	•	-13B	x1		/9.2
			-MKS-M4		20	•	-14B	x2		/9.4
			-MKS-M4		21	•	-14B	x1		/9.4
			-MKS-M4		22	•	-14A	x2		/9.3
			-MKS-M4		23	•	-14A	x1		/9.3
			-SW1	1	24	•	-MKS-MKS			/6.1
			-SW1	2	25	•	-MKS-MKS			/6.2
			-SW1	3	26	•	-MKS-MKS			/6.3
			-MKS-M5		27	•	-15B	x1		/9.6
			-MKS-M5		28	•	-15A	x2		/9.5
			-MKS-M5		29	•	-15B	x2		/9.5
			-MKS-M5		30	•	-15A	x1		/9.5
			-MKS-SERV1		31	•	-SERWOMOTOR1	S/PUL		/9.8
			-MKS-SERV1		32	•	-SERWOMOTOR1	SGND		/9.8
			-MKS-SERV1		33	•	-SERWOMOTOR1	SV5V		/9.8



# Zestawienie zacisków PLC

Nazwa projektu MK.0

Identyfikator aparatu PLC	Adres	Umieszczenie	Tekst funkcyjny	Zębatka	Moduł	Adres symboliczny	Zacisk
	STEP	/8.1				=ROB+CAB0-DRIVER.M1-XD.M1:STEP	
	GND	/8.1				=ROB+CAB0-DRIVER.M1-XD.M1:GND	
	DIR	/8.1				=ROB+CAB0-DRIVER.M1-XD.M1:DIR	
	ENABLE	/8.2	M1			=ROB+CAB0-DRIVER.M1-XD.M1:ENABLE	



# Zestawienie zacisków PLC

F19\_001

Nazwa projektu MK.0

Identyfikator aparatu PLC	Adres	Umieszczenie	Tekst funkcyjny	Zębatka	Moduł	Adres symboliczny	Zacisk
	STEP	/9.1				=ROB+CAB0-DRIVER.M3-XD.M3:STEP	
	GND	/9.1				=ROB+CAB0-DRIVER.M3-XD.M3:GND	
	DIR	/9.1				=ROB+CAB0-DRIVER.M3-XD.M3:DIR	
	ENABLE	/9.2				=ROB+CAB0-DRIVER.M3-XD.M3:ENABLE	





## Zestawienie zacisków PLC

Nazwa projektu MK.0							
Identyfikator aparatu PLC	Adres	Umieszczenie	Tekst funkcyjny	Zębatka	Moduł	Adres symboliczny	Zacisk
	A-	/9.5				=ROB+CAB0-L5A:X2	
	A+	/9.5				=ROB+CAB0-L5A:X1	
	B-	/9.5				=ROB+CAB0-L5B:X2	
	B+	/9.6	M5			=ROB+CAB0-L5B:X1	



