

# POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

## WYDZIAŁ MECHANICZNY

---

KIERUNEK: MECHATRONIKA

### PRACA DYPLOMOWA

### INŻYNIERSKA

Konstrukcja robota mobilnego napę-  
dzanego dwiema półsferami

Two HOG wheel mobile robot  
construction

AUTOR:

Damian Nikodem Góral

PROMOTOR:

dr inż. Robert Muszyński

OCENA PRACY:



*Dla rodziców*



# Spis treści

<b>1. Wprowadzenie.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Konstrukcja mechaniczna.....</b>	<b>11</b>
2.1 Korpus .....	11
2.2 Mechanizmy poruszania półsfery .....	12
2.3 Półsfery .....	17
2.4 Dobór napędów.....	21
2.4.1 Napędy wychylające .....	21
2.4.2 Napędy wprowadzające półsfery w ruch wirowy .....	22
<b>3. Propozycja sterowania.....</b>	<b>25</b>
<b>4. Złożenie i podstawowe własności jezdne.....</b>	<b>27</b>
<b>5. Podsumowanie.....</b>	<b>31</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>33</b>
<b>A. Dokumentacja techniczna .....</b>	<b>35</b>



# 1. Wprowadzenie

Pierwsze wzmianki o robotyce można znaleźć już w starożytności, kiedy to konstruowane były automaty napędzane parą dla zabawiania gości. Za narodziny współczesnej robotyki można uznać rok 1898 w którym Nikola Tesla, serbski inżynier i wynalazca, stworzył pierwszy na świecie zdalnie sterowany model łodzi [1]. Wynalazek ten zapoczątkował myśl o zdalnym sterowaniu maszynami i odciążeniu człowieka od mozolnej i ciężkiej pracy. Ogromny rozwój technologii i stale powiększająca się wiedza doprowadziła do powstawania coraz to bardziej skomplikowanych konstrukcji. Słowo „robot” pierwszy raz użyte przez czeskiego pisarza Karel Čapka [1] na dobre zagościło wśród konstruktorów z całego świata.

Obecnie szczególną popularnością cieszą się roboty mobilne, które wykorzystywane są m.in. do transportu, eksplorowania trudno dostępnych miejsc czy też zabawy. Każdy robot mobilny składa się z następujących układów [2]:

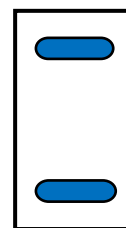
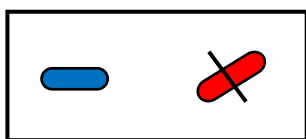
- układ napędowy,
- układ sterowania,
- układ zasilania,
- korpus,
- zestaw czujników,
- wyposażenie dodatkowe.

Głównym kryterium podziału robotów mobilnych jest sposób przemieszczania się, i tak wyróżniamy roboty [2]:

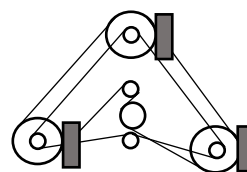
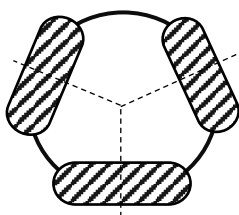
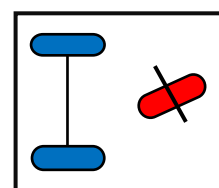
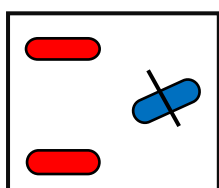
- kołowe,
- gąsienicowe,
- kroczące,
- pełzające,
- latające,
- pływające,
- hybrydowe.

Najbardziej rozpowszechniony, ze względu na jego prostotę i efektywność, jest napęd kołowy. Rozróżnić można wiele konfiguracji kół, które przedstawiono schematycznie na rysunkach 1.1-1.3. Na schematach tych kolorem niebieskim oznaczono koła napędowe, kolorem czerwonym sterujące a koła szwedzkie lub sferyczne zakreskowano.

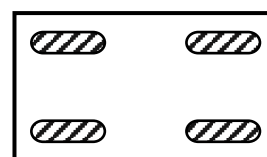
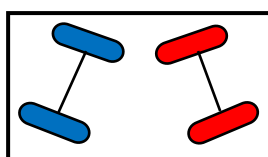
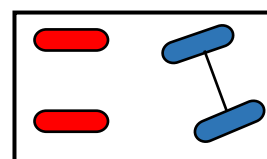
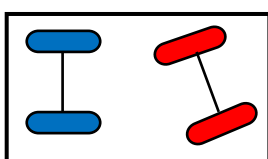
Pomimo dostępności wielu sprawdzonych rozwiązań napędu ciągle powstają konstrukcje, które dla osiągnięcia danych własności odbiegają od tych spopularyzowanych. Jedną z nich jest napęd półsferyczny, zaprezentowany w latach 30 XX wieku w [3]. Elementem przenoszącym napęd w takim układzie jest wirująca półsfera. Taka półsfera, wprawiona w ruch wirowy wokół osi prostopadłej do podłoża, pełni funkcję rezerwuaru energii kinematycznej. W momencie każdego odchylenia osi półsfery, zgromadzona energia służy do wprawienia w ruch postępowy napędzany pojazd. Oczywiście energia półsfery jest nieustannie uzupełniana przez napędzający ją silnik. Dzięki temu pojazd jest w stanie poruszać się z dużym przyspieszeniem, z niemal nieograniczoną możliwością natychmiastowej zmiany jego kierunku. W [3] można odnaleźć wzmiankę o próbie budowy pojazdu z takim napędem (zobacz rysunek 1.4), niestety ówczesna technologia nie pozwoliła na zbudowanie precyzyjnej konstrukcji, którą można byłoby sprawnie sterować.



Rysunek 1.1 Konfiguracje kół robotów dwukołowych

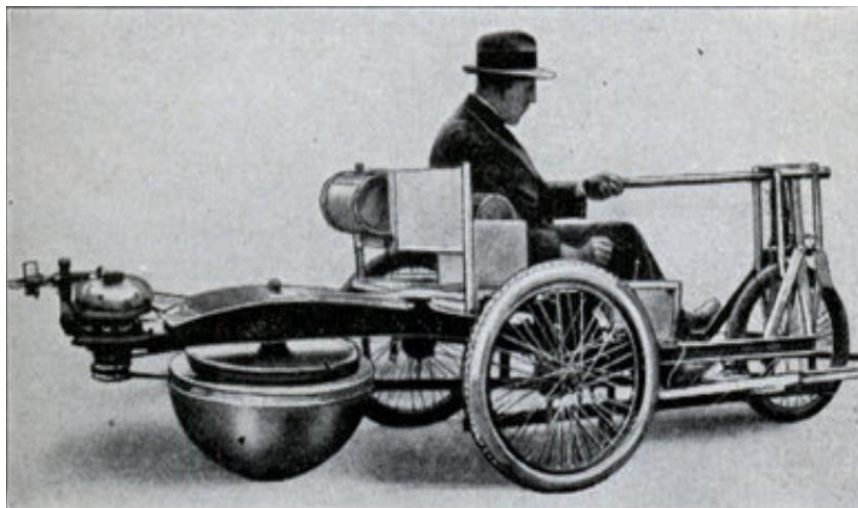


Rysunek 1.2 Konfiguracje kół robotów trzykołowych



Rysunek 1.3 Konfiguracje kół robotów czterołowych



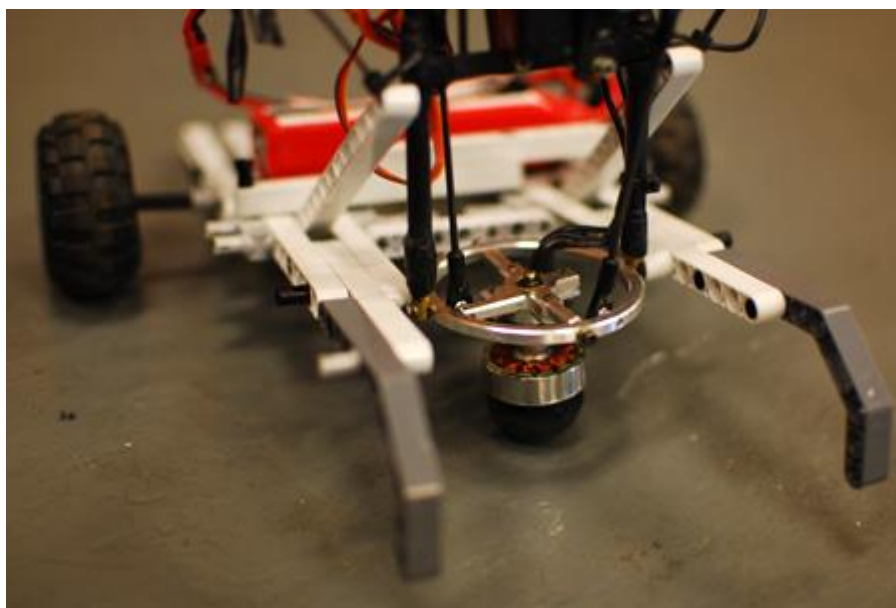


Rysunek 1.4 Pojazd o napędzie półsferycznym [3]

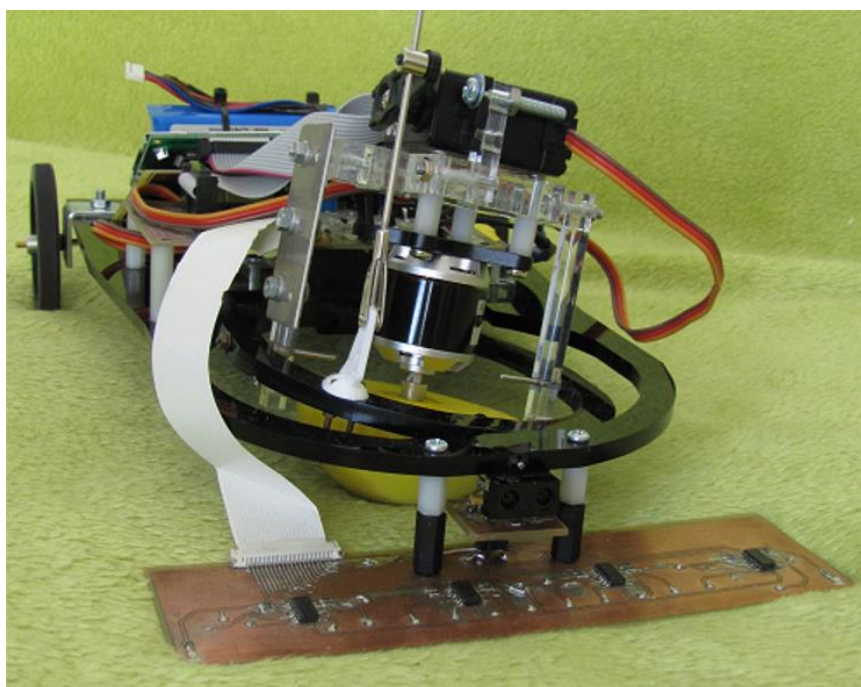
Temat został wznowiony w XXI wieku, kiedy to amatorzy robotyki z zadowalającymi skutkami podejmują się budowy robotów napędzanych wirującą półsferą [4, 5]. Przykładowe konstrukcje takich robotów pokazano na rysunkach 1.5, 1.6. Tak napędzane roboty o średnicy sfery rzędu kilku centymetrów potrafią rozwinąć prędkości ponad 100 km/h będąc przy tym bardzo zwrotnymi. Chcąc spotęgować zalety płynące z tego rodzaju napędu należałoby zastanowić się nad napędem złożonym z dwóch wirujących półsfer. W efekcie powstała praca inżynierska, w której wyprowadzono model kinematyki opisujący ruch robota napędzanego dwiema wirującymi półsferami [6]. Efekty pracy pozwalają na sterowanie tak skomplikowanym robotem, jak robotem o dwóch kołach skrętnych. Wykonane w [7] symulacje pokazują, że robot ten może poruszać się po zadanych trajektoriach bez większych odstępstw. W przytoczonych pracach rozpatrywano jedynie model kinematyki robota, stąd w celu weryfikacji uzyskanych tam rezultatów pojawia się potrzeba opracowania fizycznego modelu, na którym można byłoby przetestować wpływ dynamiki robota na jego zachowanie, łatwość unikania poślizgów, wibracje. Naprzeciw czemu wychodzi niniejsza praca.

Celem pracy jest zaprojektowanie oraz wykonanie konstrukcji platformy mobilnej napędzanej dwiema półsferami wraz z przykładowym układem sterowania. Po uruchomieniu przetestowane zostaną jej podstawowe właściwości jezdne.

Układ pracy jest następujący. W rozdziale drugim przedstawiono konstrukcję mechaniczną robota wraz z opisem wykonania poszczególnych części. Rozdział 3 zawiera opis proponowanego układu sterowania. W rozdziale 4 pokazano wykonanego robota oraz opisano jego podstawowe własności jezdne. Całość podsumowuje rozdział 5.



Rysunek 1.5 Amatorski robot z napędem półsferycznym [4]



Rysunek 1.6 Robot mobilny Hogger [5]

## 2. Konstrukcja mechaniczna

Konstrukcja mechaniczna platformy mobilnej składa się z korpusu zawierającego wszystkie elementy nośne i mocujące, mechanizmów wprowadzających w ruch półsfery oraz dwóch półsfery. W tym rozdziale opisane zostały projekty każdego z powyższych elementów oraz proces ich wytworzenia. Przy opracowaniu konstrukcji przyjęto następujące założenia:

- prędkość maksymalna robota rzędu 30 m/s,
- przyspieszenie robota rzędu 10 m/s<sup>2</sup>,
- możliwość wprowadzenia półsfery w ruch wirowy z dużą prędkością,
- możliwość wychylania każdej z półsfery względem dwóch wzajemnie prostopadłych osi, prostopadłych do osi silnika wprowadzającego półsfery w ruch wirowy – punkt przecięcia osi w środku półsfery<sup>1</sup>,
- sposób wychylania półsfery ma umożliwiać pełny zakres ruchów robota,
- sztywność konstrukcji ma zapewnić realizowalność zadawanych ruchów robota,
- wymiary robota zbliżone do wymiarów robotów klasy Linefollower,
- możliwie mała waga robota.

Do opracowania modeli 3D poszczególnych części robota jak i jego złożenie zastosowano oprogramowanie Autodesk Inventor [8]. Na potrzeby konstrukcji przyjęto, że do wprowadzania półsfery w ruch wirowy używane będą silniki bezszczotkowe używane w modelach RC, natomiast do ich wychylania serwomechanizmy typu standard. Wymiary wymienionych napędów mają istotny wpływ na konstrukcję mechaniczną, a parametry dostępnych modeli pozwolą na spełnienie poczynionych założeń.

### 2.1 Korpus

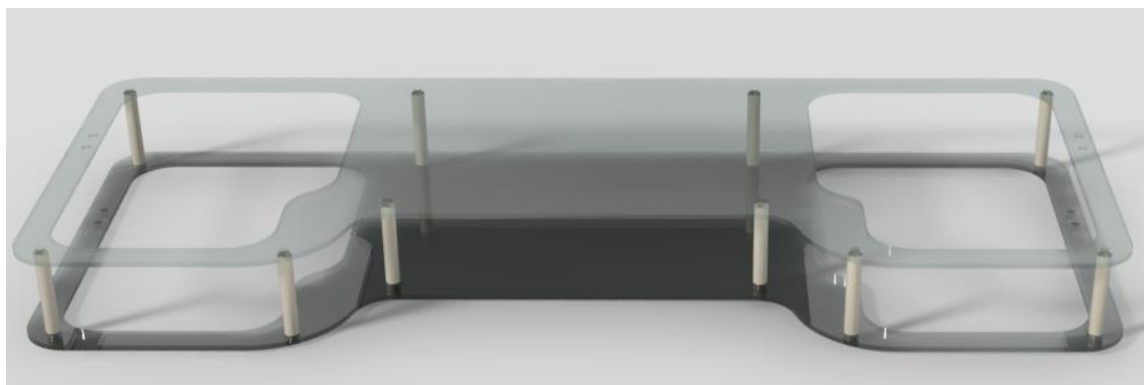
W przypadku projektowanej platformy mobilnej jej korpusem jest rama, która stanowi podstawę do symetrycznego zamocowania mechanizmów obrotu sfer wraz z napędami oraz układów elektroniki. Rama składa się z dwóch płyt połączonych ze sobą poprzez dystanse i połączenia śrubowe. Model 3D korpusu pokazano na rysunku 2.1.

Istotą zachowania wymaganych własności robota jest dobranie odpowiedniego materiału z którego wykonane będą jego elementy nośne. Ze względu na wymaganą małą wagę robota, wykluczone zostaje ich wykonanie z metali<sup>2</sup>. Materiały kompozytowe oraz tworzywa sztuczne spełniają ten warunek oferując przy tym wymaganą sztywność. Parametry najpopularniejszych z nich zebrano w tabeli 2.1. Porównanie przedstawionych parametrów pozwala stwierdzić, że najlepszym rozwiązaniem jest wykorzystanie włókna węglowego. Wyróżnia się ono wysoką sztywnością i małą wagą. Największą jego wadą jest jednak cena i trudny proces obróbki (konieczność stosowania frezarki sterowanej numerycznie, szybkie zużywanie się dedykowanych

---

<sup>1</sup> Środkiem półsfery będziemy nazywać środek jej koła wielkiego.

<sup>2</sup> Wyjątkiem mogą być metale szlachetne np. tytan, które nie są brane pod uwagę ze względu na wysoką cenę i trudną dostępność.



Rysunek 2.1 Model 3D korpusu robota

Material	Gęstość [g/m <sup>3</sup> ]	Moduł sprężystości E [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie Rr [MPa]
Polichlorek winylu PVC (twardy)	1,35 – 1,55	2410 - 4140	34,5 - 62
Polimetakrylan metylu PMMA	1,17 – 1,20	1800 - 3100	48 - 76
Włókno węglowe	1,6 – 2,0	230 000	2800 - 5000
Włókno szklane	2.5 – 2.6	80 000 – 90 000	1500 - 2700

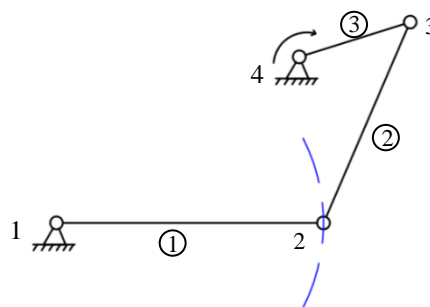
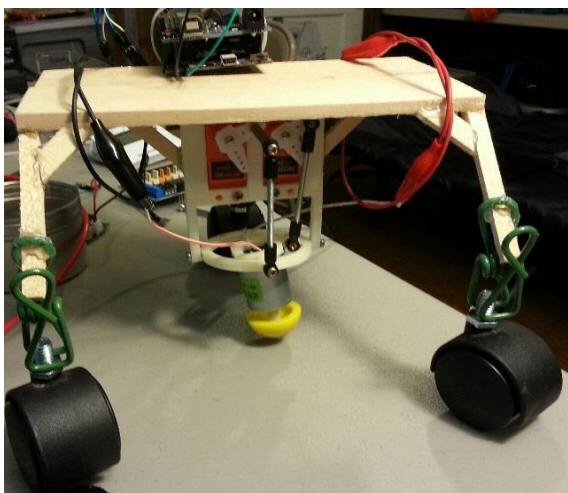
Tabela 2.1 Własności wybranych materiałów [9]

frezów oraz często występujące rozwarstwianie się materiału podczas cięcia). Stąd na potrzeby pracy wybrano materiał PMMA, ze względu na jego dostępność, cenę oraz własności, które na potrzeby pracy są wystarczające. Płytę wycięto metodą cięcia laserowego z materiału o grubości 4mm.

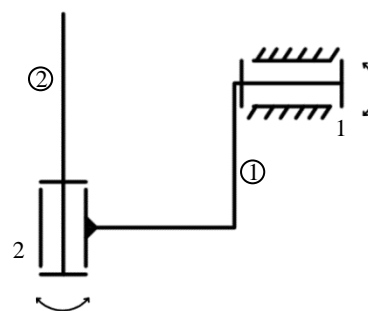
## 2.2 Mechanizmy poruszania półsfery

Zgodnie z założeniami zdefiniowanymi we wstępie niniejszego rozdziału, mechanizm poruszania półsfery musi umożliwiać wprowadzenie półsfery w ruch wirowy oraz wychylać je względem ich środka. Dokonując przeglądu rozwiązań mechanizmów spełniających założoną funkcjonalność wyodrębniono dwa z nich. Pierwszy to mechanizm wychylający półsferę poprzez cięgna wprowadzane w ruch przez serwomechanizmy (rysunek 2.2). Zaletą takiego rozwiązania jest dowolne umieszczenie serwomechanizmów w osi pionowej, określone przez długości cięgien. Niestety w rozwiązaniu tym występuje wiele połączeń w których mogą powstawać luzy, a używane cięgna zmniejszają sztywność konstrukcji wraz ze wzrostem ich długości.

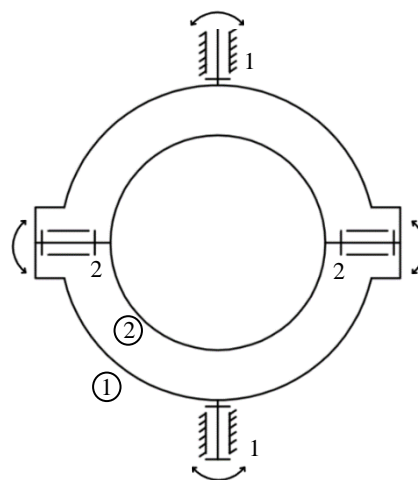
Drugą metodą wychylenia sfery jest ta używana w gimbalach służących do stabilizacji ruchu kamery [10]. Tego typu rozwiązania są obecnie często spotykane w dronach wykorzystywanych do rejestracji obrazu z lotu ptaka. Występujące podczas lotu drgania uniemożliwiają rejestrację stabilnego obrazu. Mechanizm gimbalu zapewnia dynamiczny obrót kamery w dwóch osiach przy zachowaniu odpowiedniej sztywności i wytrzymałości, pozwalając tym samym na eliminację drgań obrazu. Wyróżniamy gimbal o otwartym łańcuchu kinematycznym przedstawione na rysunku 2.3, oraz o łańcuchu zamkniętym (rysunek 2.4). Mechanizm stosowany w gimbalu o zamkniętym układzie kinematycznym spełnia wszystkie wymagane założenia konstrukcyjne.



Rysunek 2.2 Amatorski robot z mechanizmem ciągnowym [11] oraz schemat układu kinematycznego (kolorem niebieskim zaznaczono ścieżkę jej wychYLENIA)

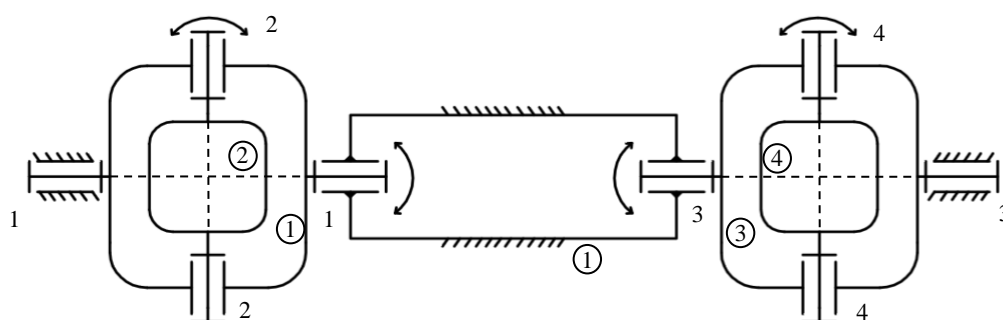
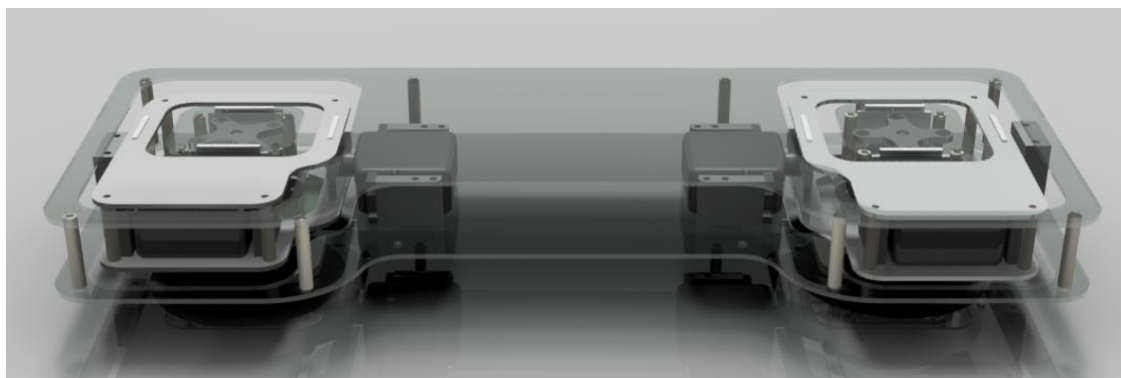


Rysunek 2.3 Gimbal o otwartym łańcuchu kinematycznym [12] oraz jego schemat



Rysunek 2.4 Gimbal o zamkniętym łańcuchu kinematycznym [13] oraz jego schemat

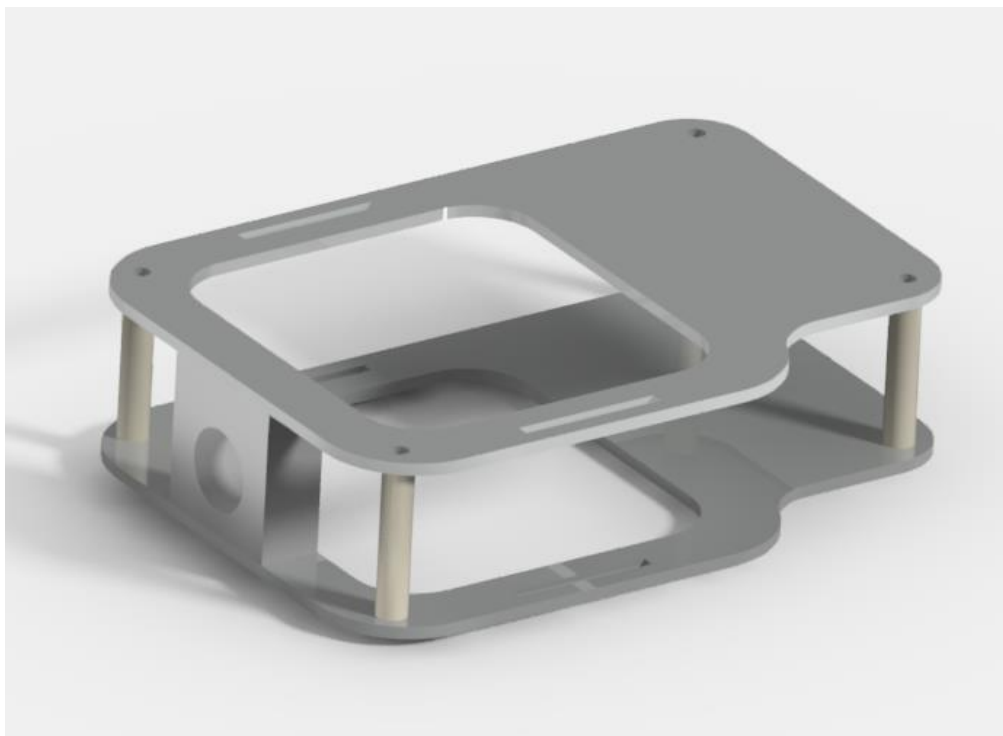




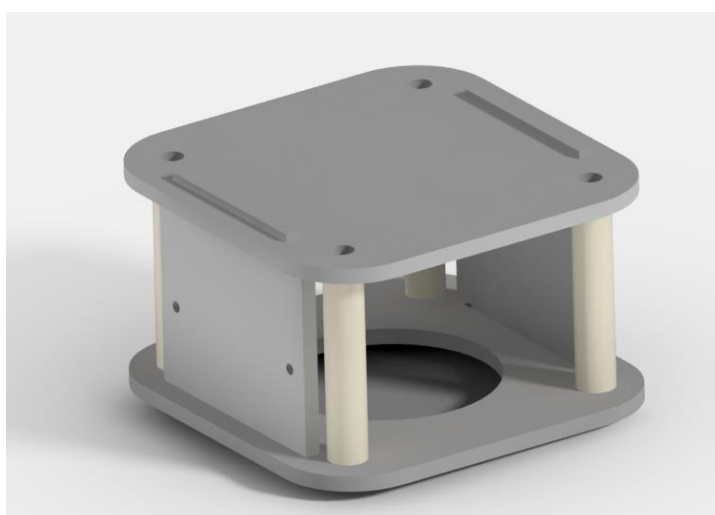
Rysunek 2.5 Model 3D złożonego robota oraz schemat układu kinematycznego mechanizmu obrotu półsfery

Na podstawie drugiego rozwiązania zaprojektowano mechanizm składający się z dwóch przestrzennych ramek, mocowanych do korpusu. Każda ramka umożliwi wychylenie półsfery względem jednej z dwóch wzajemnie prostopadłych osi, prostopadłych do osi silnika wprowadzającego półsferę w ruch wirowy, przecinających się w punkcie środka półsfery. Pierwsza z nich (zewnątrzna) składa się z dwóch poziomych płyt, z miejscem na ramkę wewnętrzną, połączonych dystansami (rys 2.6).

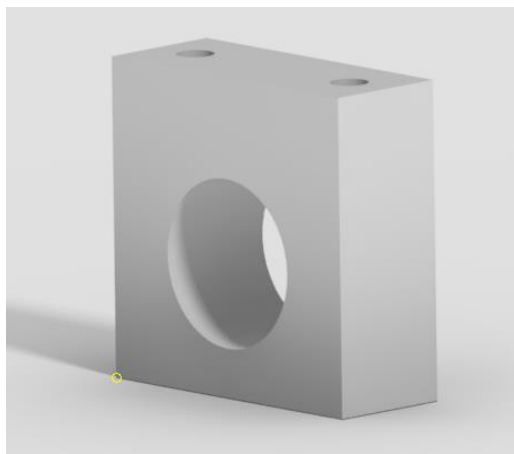
Wewnętrzna ramka ma kształt sześciianu i znajdują się w niej otwory montażowe oraz otwór na umiejscowienie silnika wprowadzającego półsferę w ruch wirowy. Na rys 2.7 przedstawiono jej model 3D. Ramkę wewnętrzną oraz zewnętrzną wykonano z wyciętych laserem płyt, z materiału PMMA, połączonych dystansami. Każda z ramek połączona jest z napędzającym je serwomechanizmem. W celu zapewnienia całej konstrukcji odpowiedniej sztywności, po przeciwnej stronie serwomechanizmów umieszczono orczyki z łożyskowanymi trzpieniami zamocowanymi w podporach. W konstrukcji mechanizmu użyto także elementy mocujące takie jak: podpory łożyska, orczyki, mocowania serwomechanizmów. Elementy te zaprojektowano a następnie wykonano z użyciem druku 3D (zobacz rysunek 2.8-2.10). Analiza powstałej konstrukcji pozwoliła zauważyć, że w momencie wychylania półsfery robot może nie być stabilny i ulec przechyleniu. Na potrzeby pracy i testów został on wyposażony w kółka samonastawne w celu podparcia. Całość pokazano na rysunku złożeniowym w dodatku A16.



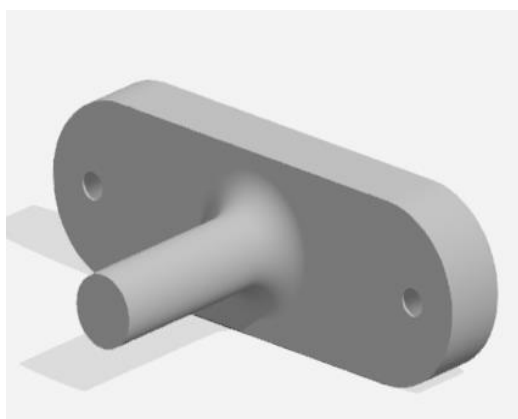
Rysunek 2.6 Model 3D zewnętrznej ramki mechanizmu wychylania półsfery



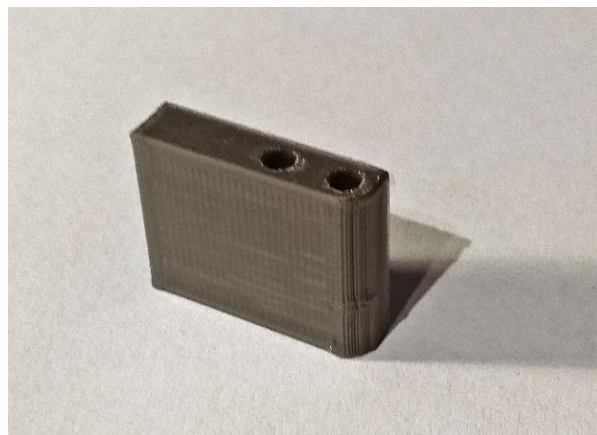
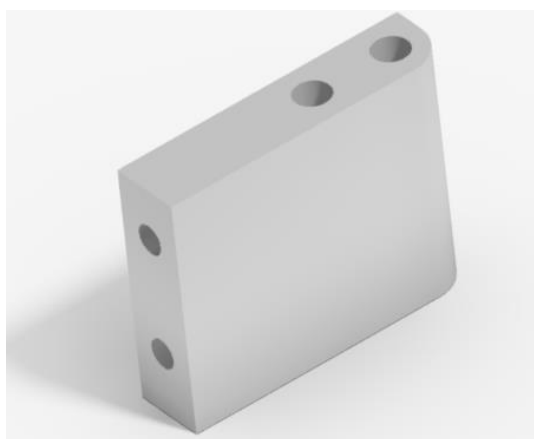
Rysunek 2.7 Model 3D wewnętrznej ramki mechanizmu wychylania półsfery



Rysunek 2.8 Model 3D podpory łożyska oraz zdjęcie wykonanego elementu wraz z łożyskiem



Rysunek 2.9 Model 3D orczyka oraz zdjęcie wykonanego elementu



Rysunek 2.10 Model 3D mocowania serwomechanizmu oraz zdjęcie wykonanego elementu



## 2.3 Półsfery

Mając zaprojektowane mechanizmy wychylania półsfery, należało zaprojektować same półsfery. Dobrano ich parametry geometryczne (wymiary, parametry mocowania) i materiały z których zostaną wykonane. Na wstępie tego rozdziału przyjęto że do wprowadzania półsfery w ruch zostaną użyte standardowe silniki bezszczotkowe [12]. Wymiary takiego silnika naniesiono na zwymiarowany rysunek złożeniowy ramki wewnętrznej (zobacz rysunek 2.11). Na rysunku wykreślono zarys koła o środku w odległości 10.5mm (odległość osi wału standardowego serwo-mechanizmu od jego podstawy) od płaszczyzny korpusu. Analiza tak nakreślonej konstrukcji pozwala wyznaczyć minimalny promień półsfery na poziomie 33mm. Uwzględnienie wymiarów zastosowanych mocowań powiększa tą wartość do około 50mm.

Na wstępie założono, że wartości maksymalnego wychylenia półsfery muszą umożliwiać swobodne poruszanie się robota w każdym kierunku. Teoretycznie założenie to spełnia nawet mały kąt wychylenia półsfery, jednakże w celu ułatwienia sterowania nim warto pozwolić na jego zmianę w jak największym zakresie. Z drugiej zaś strony zbyt duży kąt wychylenia półsfery może powodować kontakt ramki z podłożem. I tak, ze względów konstrukcyjnych wydaje się, że rozsądnym założeniem jest przyjęcie kąta wychylenia półsfery nie przekraczającego  $30^\circ$  (zobacz rys 2.12). W związku z tym wystarczy by półsfery miały formę odcinków kuli<sup>3</sup> opartych na kącie środkowym o wartości  $60^\circ$  (zobacz rysunek 2.13). Minimalna wysokość odcinka kuli  $h$  została obliczona na podstawie, następujących zależności trygonometrycznych:

$$\cos \alpha = \frac{r-h}{r}, \quad (2.1)$$

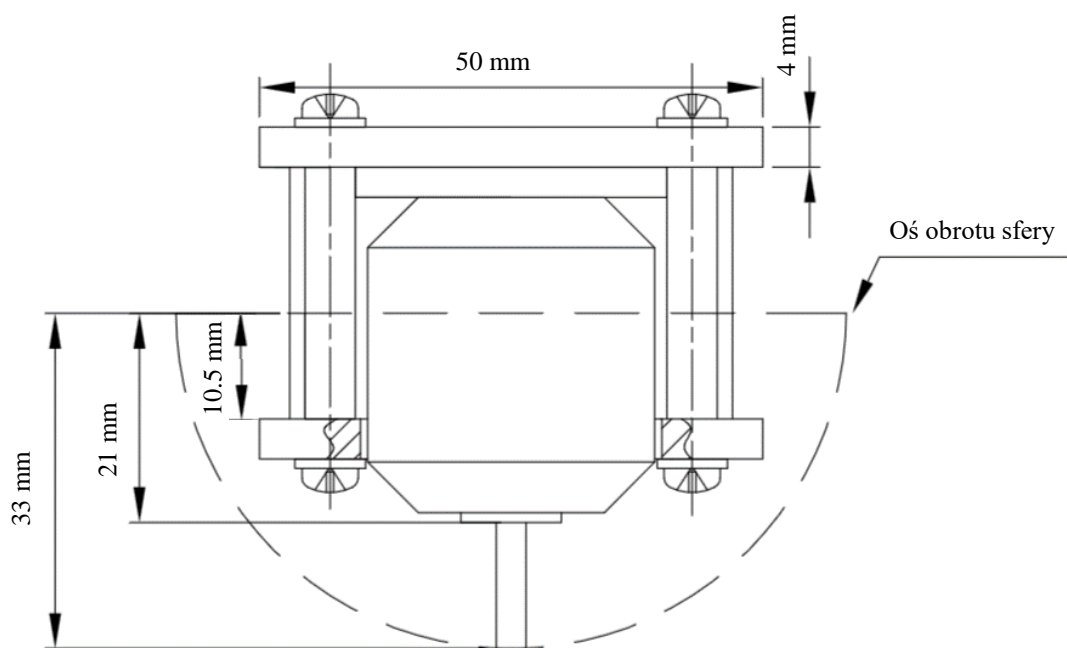
$$h = r - r \cos \alpha, \quad (2.2)$$

gdzie  $\alpha$  oznacza przyjęte maksymalne wychylenie a  $r$  – promień półsfery.

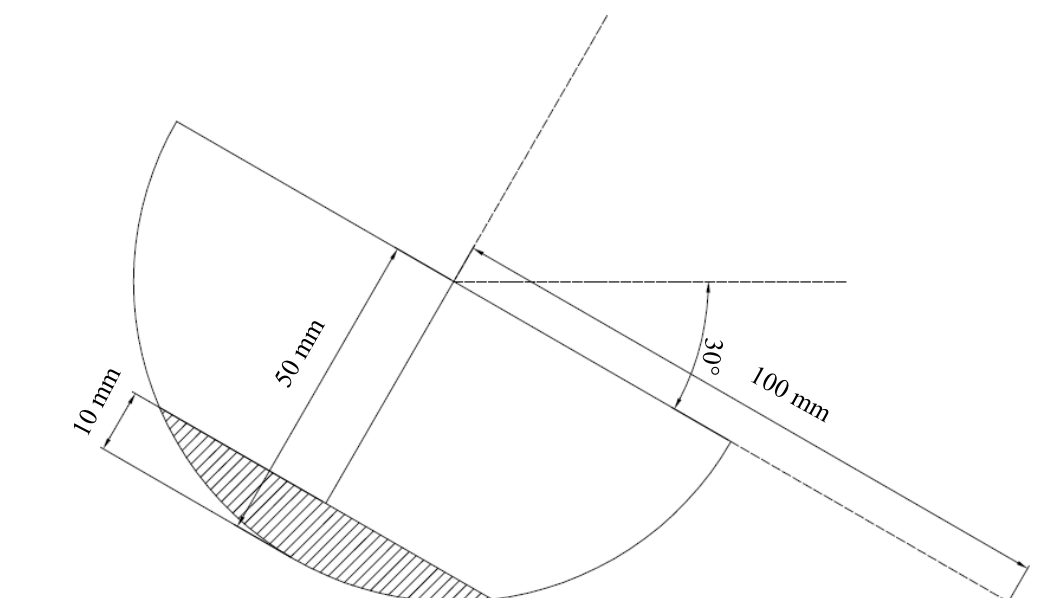
Tak obliczona wysokość minimalna odcinka kuli wynosi 7mm, ze względu na proces wytwarzania została zwiększona do 10mm.

Znając wymiary docelowe półsfery, przystąpiono do ich projektowania. Powierzchnie półsfery muszą wykazywać się odpowiednią przyczepnością oraz odpornością na ścieranie zachowując przy tym wymaganą sztywność mocowania do mechanizmu robota. W związku z tym półsfery składają się z dwóch części, rdzenia oraz pokrycia. Rdzeń ma formę odcinka kuli o promieniu 45mm z osiowo umiejscowionym trzpieniem służącym do lepszego utrzymania się pokrycia oraz do umiejscowienia haba mocującego wał silnika (zobacz rysunek 2.14-2.15). Całość została wydrukowana z użyciem drukarki 3D. Pokrycie półsfery o grubości 5mm zostało wykonane z kauczuku poliuretanowego Vyta Flex o twardości 60 w skali A Shore'a [15]. Kauczuk ten wykazuje się dużą odpornością (dzięki zawartości polimeru V-polymer), niską lepkością oraz łatwością formowania. Materiał ten stosowany jest do tworzenia form i matryc do produkcji elementów betonowych.

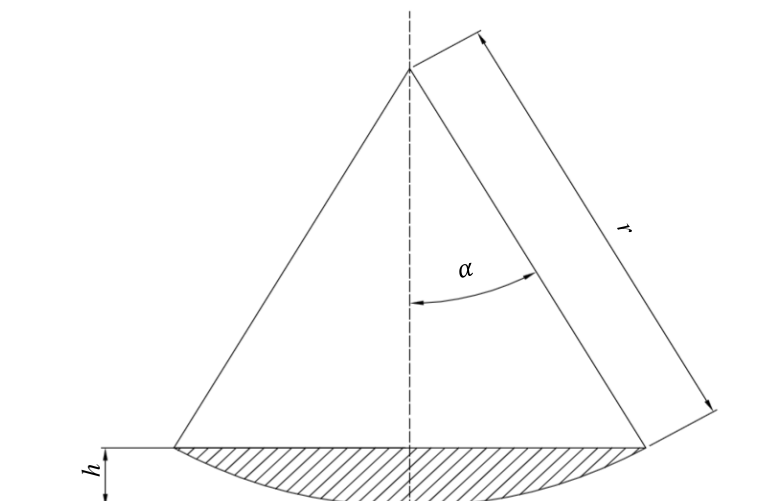
<sup>3</sup> By uniknąć mnożenia pojęć, w dalszej części pracy taki odcinek kuli z zamocowaniem będzie wciąż nazywany półsferą a jego środek rozumiany będzie jako środek koła wielkiej półsfery – przyjęta forma półsfery w postaci odcinków kuli jest jedynie szczegółem konstrukcyjnym nie wpływającym na funkcjonalność całości.



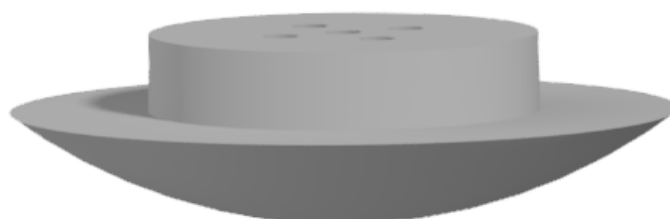
Rysunek 2.11 Ramka wewnętrzna – rzut z przodu z nakreślonym zarysem półsfery (linie przerywane)



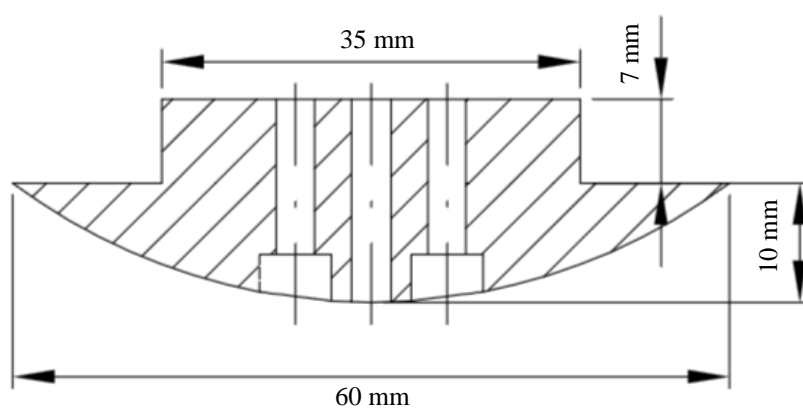
Rysunek 2.12 Wychylona półsfera



Rysunek 2.13 Wymagany odcinek kuli



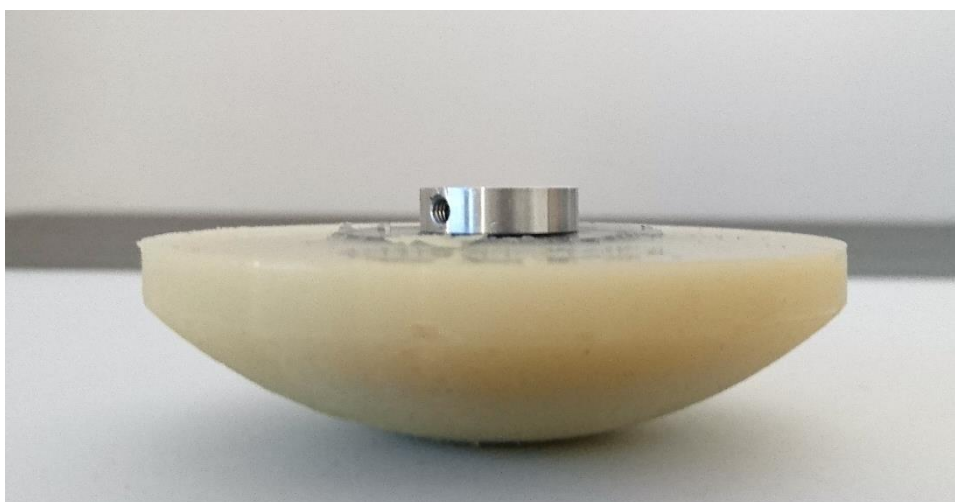
Rysunek 2.14 Model 3D rdzenia półsfery



Rysunek 2.15 Przekrój rdzenia półsfery

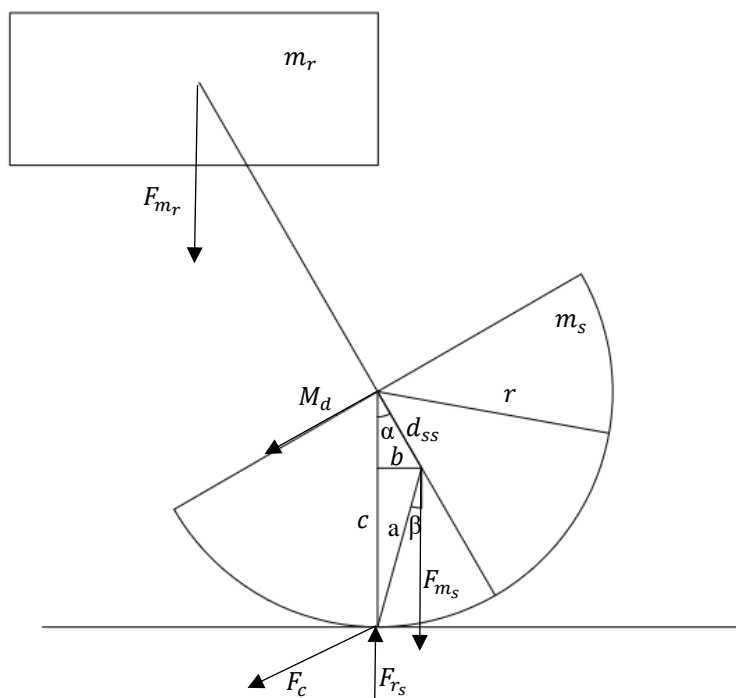


Rysunek 2.16 Model 3D formy półsfery



Rysunek 2.17 Wykonana półsfera

Tak zaprojektowany i wykonany rdzeń należało pokryć dobranym materiałem Vyta flex 60. W tym celu zaprojektowano formę którą wydrukowano z użyciem druku 3D. następnie po centrycznym umieszczeniu w niej rdzenia dokonano odlewu powierzchni półsfery. Model 3D formy jak i zdjęcia wynikowej półsfery pokazano na rysunkach 2.16-2.17, dokładna dokumentacja znajduje się w dodatku A.



Rys. 2.17 Rozkład sił działających na półsfery.

## 2.4 Dobór napędów

W robocie wyróżniamy dwa rodzaje napędów: napędy wprawiające półsfery w ruch wirowy oraz napędy je wychylające. Projektując korpus oraz mechanizm poruszania półsfery założono, że stosowanymi napędami będą silniki bezszczotkowe oraz serwomechanizmy. W tej części pracy, na podstawie obliczeń dobrano konkretne silniki.

### 2.4.1 Napędy wychylające

Znając wymiary półsfery i ich masę, masę ramek mocujących i korpusu oraz wstępne założenia dotyczące silników można dokonać obliczeń wymaganego momentu serwomechanizmu  $M$ , który musi być większy od momentu  $M_{r_s}$  wymaganego do wychylenia półsfery dla robota znajdującego się w spoczynku oraz momentu  $M_d$  wymaganego do utrzymania pozycji półsfery przy przyspieszeniu  $a_r = 10 \frac{m}{s^2}$ . Obliczenia zostały wykonane przy następujących parametrach: maksymalne wychylenie  $\alpha = 30^\circ$ , masa całkowita robota  $m_c = 1\text{kg}$ , masa półsfery  $m_s = 0.2\text{kg}$ , średnica półsfery  $r = 0.05\text{m}$ . Oznaczenia użyte we wzorach pokazano na rysunku 2.17.

Wartość momentu  $M_{r_s}$  wyznaczamy z zależności

$$M_{r_s} = aF_{m_s} \sin\beta. \quad (2.1)$$

zasilane	4,8 V - 6,0 V
zakres	180°, ok. 0.98° na krok
prędkość	0,16 s/60°.
moment	17 kGcm
wymiary	40,7 x 20,5 x 39,5 mm
masa	60 g

Tabela 2.2 Parametry serwomechanizmu PowerHD - 1501MG [16]

Jak widać, moment  $M_{r_s}$  zależy od długości odcinka  $a$ , wartości kąta  $\beta$  oraz ciężaru półsfery  $F_{m_s}$ . I tak długość odcinka  $a$  wyliczono z twierdzenia cosinusów w postaci

$$a^2 = d_{ss}^2 + r^2 - 2rd_{ss}\cos\alpha, \quad (2.2)$$

gdzie  $d_{ss}$  określa środek ciężkości półsfery i wynosi  $\frac{3}{8}r$ .

W celu wyliczenia kąta  $\beta$  wyznaczono

$$b = d_{ss}\sin\alpha, \quad (2.3)$$

oraz

$$c = r - d_{ss}\cos\alpha, \quad (2.4)$$

i stąd

$$\beta = \arctg \frac{b}{c}. \quad (2.5)$$

Dla skrajnej wartości kąta  $\alpha$  otrzymano  $\beta = 15.8^\circ$ . Wyliczając dalej z II zasady dynamiki Newtona ciężar półsfery

$$F_{m_s} = m_s G, \quad (2.6)$$

gdzie  $G$  – przyspieszenie ziemskie, przyjęte jako  $10 \frac{m}{s^2}$ ,

otrzymujemy  $M_{r_s} = 0.019 [Nm]$ .

Do obliczenia wartości momentu  $M_d$  wykorzystano zależność:

$$M_d = F_c r s \sin\alpha. \quad (2.7)$$

Siła ciągu wynosi

$$F_c = \frac{1}{2} m_c a_r. \quad (2.8)$$

W efekcie  $M_d = 0.25 [Nm] = 12.5 [kGcm]$ .

$$(2.9)$$

Z powyższych obliczeń wynika, że z dwóch wyliczonych powyżej momentów  $M_{r_s}$  i  $M_d$  większy jest ten drugi. Tak więc wymagany moment silnika  $M$  przy maksymalnym przyspieszeniu  $a_r = 10 \frac{m}{s^2}$  wynosi 12.5kGcm. Na tej podstawie dobrano serwomechanizmy PowerHD HD-1501MG – standard (rysunek 2.18) o parametrach przedstawionych w tabeli 2.2.

#### 2.4.2 Napędy wprowadzające półsfery w ruch wirowy

Do wprowadzenia półsfery w ruch wirowy wybrano silniki bezczotkowe, których zaletą jest duży stosunek momentu do masy silnika, duża sprawność, brak elementów zużywających się oraz prosty układ sterowania. Silnik dobrano na podstawie założonej na początku tego rozdziału, prędkości maksymalnej robota rzędu 30 m/s.



Rysunek 2.18 Od lewej: serwomechanizm MG1501 [16], silnik bezszczotkowy Silnik EMAX BL2215/25 [14].

liczba ogniw zasilających	2 – 3 LiPo
współczynnik KV	950 obr./V
moc maksymalna	208 W
maksymalny pobór prądu	16.05 A
masa	59 g
ciąg maksymalny <sup>4</sup>	950 g

Tabela 2.3 Parametry silnika EMAX BL2215/25 [14].

Wymagana liczba obrotów wału silnika na minutę  $n$  potrzebna do uzyskania prędkości  $V = 30$  m/s wynosi:

$$n = \frac{V}{L} 60 \quad (2.10)$$

gdzie  $L = 2\pi r$  – obwód koła.

Na podstawie tych zależności wyznaczono  $n = 9480 \frac{m}{s^2}$ , i tak dobrano silnik bezszczotkowy EMAX BL2215/25 (rysunek 2.18) o parametrach zawartych w tabeli 2.3.

<sup>4</sup> Ciąg podawany jest dla napędzanego standardowego śmigła używanego w modelach RC





### 3. Propozycja sterowania

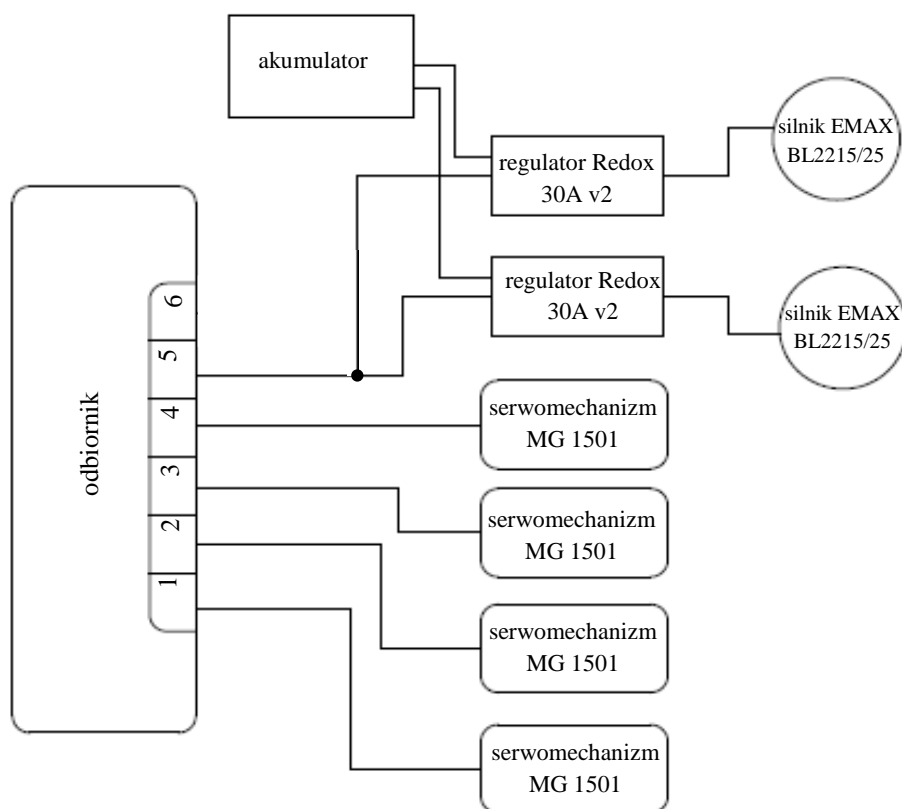
W celu sprawdzenia podstawowych własności jezdnych robota, zastosowano do jego sterowania aparaturę modelarską, używaną do zdalnego poruszania modelami pojazdów, samolotów, łodzi itd. Uniwersalność, możliwość szybkiego podłączenia silników oraz łatwość obsługi aparatury pozwala na sprawne i bezpieczne uruchomienie platformy. W celu pełnego działania robota należy sterować 4 serwomechanizmami realizującymi wychylenia każdej z 4 ramek oraz dwoma silnikami bezszczotkowymi wprawiającymi półsfery w ruch wirowy. Z tego wynika, że wymagana aparatura powinna posiadać minimum 6 kanałów.

Użyty w pracy model aparatury to Radiolink T6EAP [17] (zobacz rys. 3.1), składa się z nadajnika oraz 6 kanałowego odbiornika. Nadajnik zawarty w ergonomicznej obudowie wyposażony jest w dźwignie sterujące, które użyte zostały do sterowania wychyleniem półsfer. Informacje o ruchach dźwigni przekazywane są drogą radiową do odbiornika, który przetwarza je na odpowiednie impulsy elektryczne odpowiadające za dany kąt obrotu serwomechanizmu. Obroty silników wprowadzających w ruch wirowy półsfery włączane są za pomocą przełącznika. Obydwa silniki są ze sobą sprzęgnięte a ich prędkość obrotowa nastawiana jest za pomocą funkcji zawartych w nadajniku. Na potrzeby testów nadajnik zaprogramowano w taki sposób aby ruchy mechanizmu lewej półsfery były sprzęgnięte z ruchami prawej. I tak, ruch prawego drążka do przodu i do tyłu wychyla obie ramki zewnętrzne odpowiednio w prawo i w lewo, co umożliwia ruch robota do przodu i do tyłu. Wychylenie drążka prawego na boki, wychyla ramki wewnętrzne do przodu lub do tyłu, co odpowiada jeździe w bok. Lewy drążek po wychyleniu w prawo lub w lewo umożliwia obrót robota wokół własnej osi, powodując wychylenie ramek wewnętrznych w przeciwnych kierunkach.

Odbiornik aparatury zamocowano w korpusie robota oraz podłączono do niego wszystkie napędy. Serwomechanizmy podłączono bezpośrednio do odbiornika, natomiast do podłączenia silników bezszczotkowych użyto regulatory prądu Redox 30A v2 [18]. Do zasilania całego układu zastosowano akumulator litowo-polimerowy Kokam SLPB 1500mAh [19]. Schemat połączenia zamieszczono na rysunku 3.2.



Rysunek 3.1 Nadajnik aparatury Radiolink T6EAP [20]



Rysunek 3.2 Schemat połączenia układu sterowania

## 4. Złożenie i podstawowe własności jezdne

Po zaprojektowaniu i wykonaniu wszystkich części złożono robota, czego efekt pokazano na rysunkach 4.1-4.6. Analiza powstałej konstrukcji pozwala stwierdzić, że robot wykazuje się wystarczająco dużą sztywnością oraz brakiem poważniejszych luzów, co przekłada się na jego stabilność. Robota poddano testom w celu sprawdzenia jego podstawowych własności jezdnych. Testy przeprowadzono przy małych i średnich prędkościach obrotowych silników wprowadzających półsfery w ruch wirowy<sup>5</sup>.

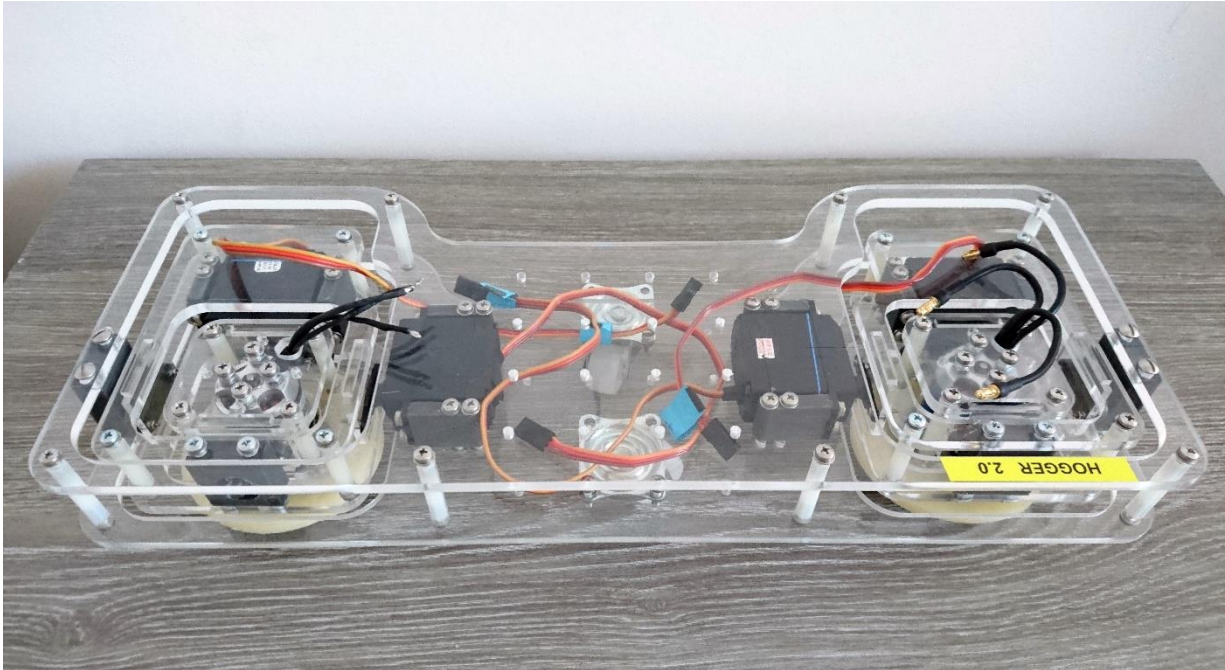
Uruchomienie ruchu wirowego w robocie uniesionym w powietrzu pozwala na zaobserwowanie drgań całej konstrukcji wynikających z nieidealnego wyważenia jego półsfer. Drgania są obserwowane także po umieszczeniu robota na podłożu, po którym ma się przemieszczać, gdy przyjmuje on konfigurację neutralną, tj. przy nie wychylonych półsferach, jednakże po ich wychyleniu powodującym przemieszczanie się robota, drgania stają się mniej zauważalne. Półsfery powinny być idealnie centryczne oraz wyważone, czego przy zastosowanym procesie ich wytworzenia nie udało się osiągnąć. Poziom drgań nie jest jednak na tyle duże, aby utrudniał wirowanie sfer z dużymi prędkościami i magazynowanie energii.

Zgodnie z oczekiwaniami wychylenie półsfer powoduje ruch robota w zamierzonym kierunku – jazda do przodu, do tyłu, na boki oraz obrót robota wokół własnej osi odbywają się bez większych odstępstw i z dużą łatwością. Robot wykazuje ogromną dynamikę jazdy, potrafi natychmiast zmienić kierunek ruchu, wszystko z bardzo wysokimi przyspieszeniami. Jako wadę konstrukcji należy jednakże postrzec to, że zbyt gwałtowne jej przyspieszanie/hamowanie doprowadza do przewrócenia się robota do góry półsferami.

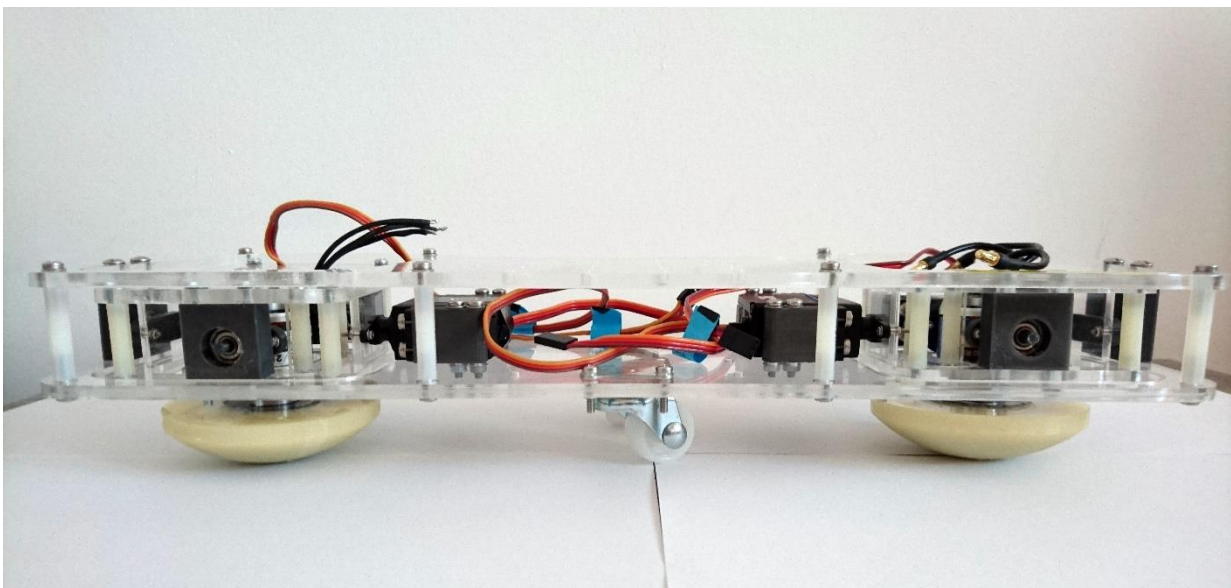
Do wad konstrukcji należy także zaliczyć własności niektórych z jej elementów wykonanych techniką druku 3D. Materiał wykorzystany do druku 3D okazał się zbyt miękki, przez co ulega dość szybkiemu ścieraniu. Szczególnie są na to podatne trzpienie zamocowane w łożyskach, które po serii testów starły się na tyle, że w połączeniach pojawiły się luzy. Wynika stąd, że w celu udoskonalenia konstrukcji należałoby wydrukować te elementy z twardszego materiału lub wykonać z metalu.

---

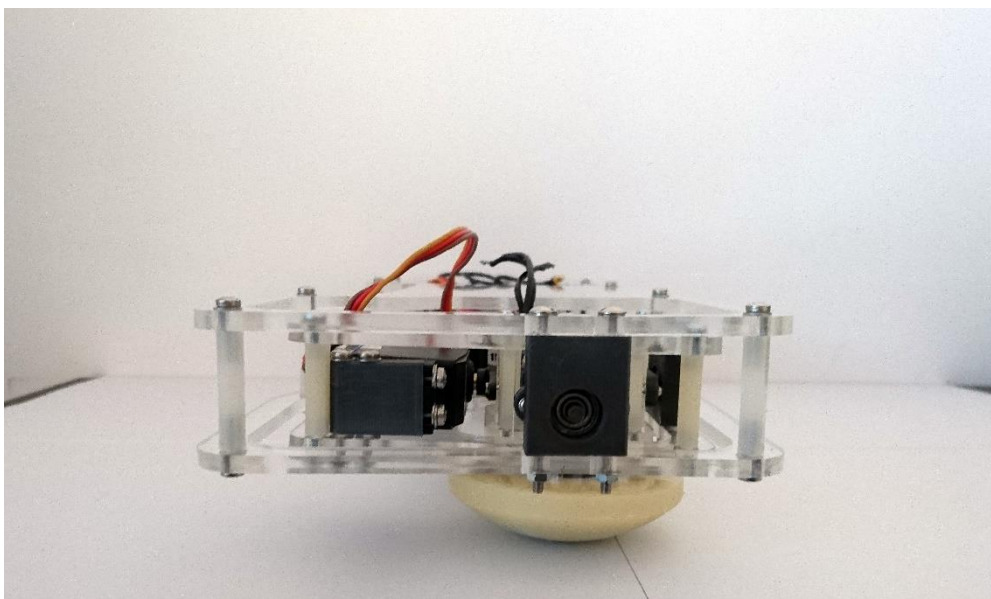
<sup>5</sup> Powierzchnia pomieszczenia w którym przeprowadzono testy (ok. 100m<sup>2</sup>) nie pozwoliła niestety na ruch z większymi prędkościami.



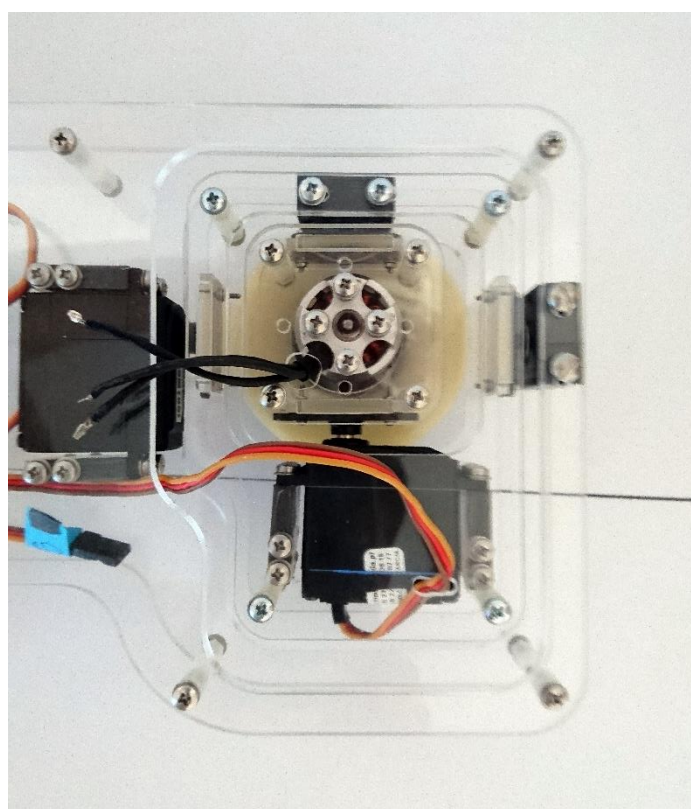
Rysunek 4.1 Zdjęcie wykonanego robota



Rysunek 4.2 Zdjęcie wykonanego robota, widok z przodu



Rysunek 4.3 Zdjęcie wykonanego robota, widok z boku



Rysunek 4.4 Mechanizm wychylający półsfery



## 5. Podsumowanie

Celem pracy było zaprojektowanie oraz wykonanie robota napędzanego dwiema wirującymi półsferami, spełniającego określone w rozdziale 2 założenia. Po wykonaniu należało sprawdzić jego podstawowe własności jezdne oraz porównać je z założeniami.

Zaprojektowany mechanizm spełnia założenia związane z możliwością wychylania półsfer względem ich środka oraz możliwością wirowanie z prędkością ok. 10000 obr/min. Zakres wychylania półsfer także jest zgodny z założeniami a rozdzielczość serwomechanizmów pozwala na swobodne wychylanie ramek o skrajny kąt  $30^\circ$ . Korpus robota jak i ramki mechanizmu dzięki przestrzennej konstrukcji zachowują wymaganą sztywność a zastosowane mocowania eliminują luzy. Przeprowadzone testy pokazują, że robot rozwija duże prędkości w krótkim czasie, które jednak nie zostały dokładnie zmierzone ze względu na brak warunków umożliwiających pełne przetestowanie tak szybkiego robota. Można jednak zauważyć, iż pomimo tak wysokiego przyspieszenia robot pozostaje zwrotny a jego sztywność pozwala na przełożenie zadawanych ruchów na rzeczywistą trajektorię. Podczas testów zauważono także że robot porusza się bez problemu po powierzchniach o różnych własnościach. Przejazd po chropowatej jak i nierównej powierzchni był równie sprawny co w przypadku powierzchni płaskiej. W celu poprawienia własności konstrukcji należałoby usprawnić proces wytwarzania półsfer oraz wymienić elementy drukowane na metalowe.

Robot może być podstawą do dalszych badań nad tego rodzaju napędem. Do pełnego poznania rzeczywistych zachowań robota należałoby wprowadzić układ sterowania z zaimplementowanymi algorytmami wyprowadzonymi w [7], pozwalającymi wychylać niezależnie każdą z półsfer oraz możliwość balansowania na samych półsferach z wyłączeniem kół podpierających. Możliwości dalszego rozwoju wydają się być nieograniczone, począwszy od udoskonalenia niniejszej konstrukcji po dokończenie dzieła rozpoczętego w latach 30 XXw. budując pojazd pasażerski z tak nietypowym napędem.





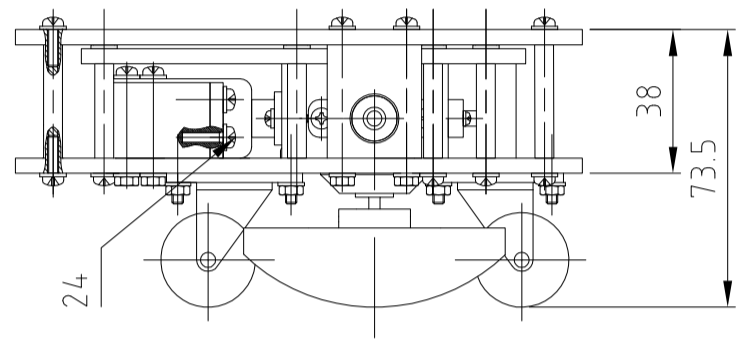
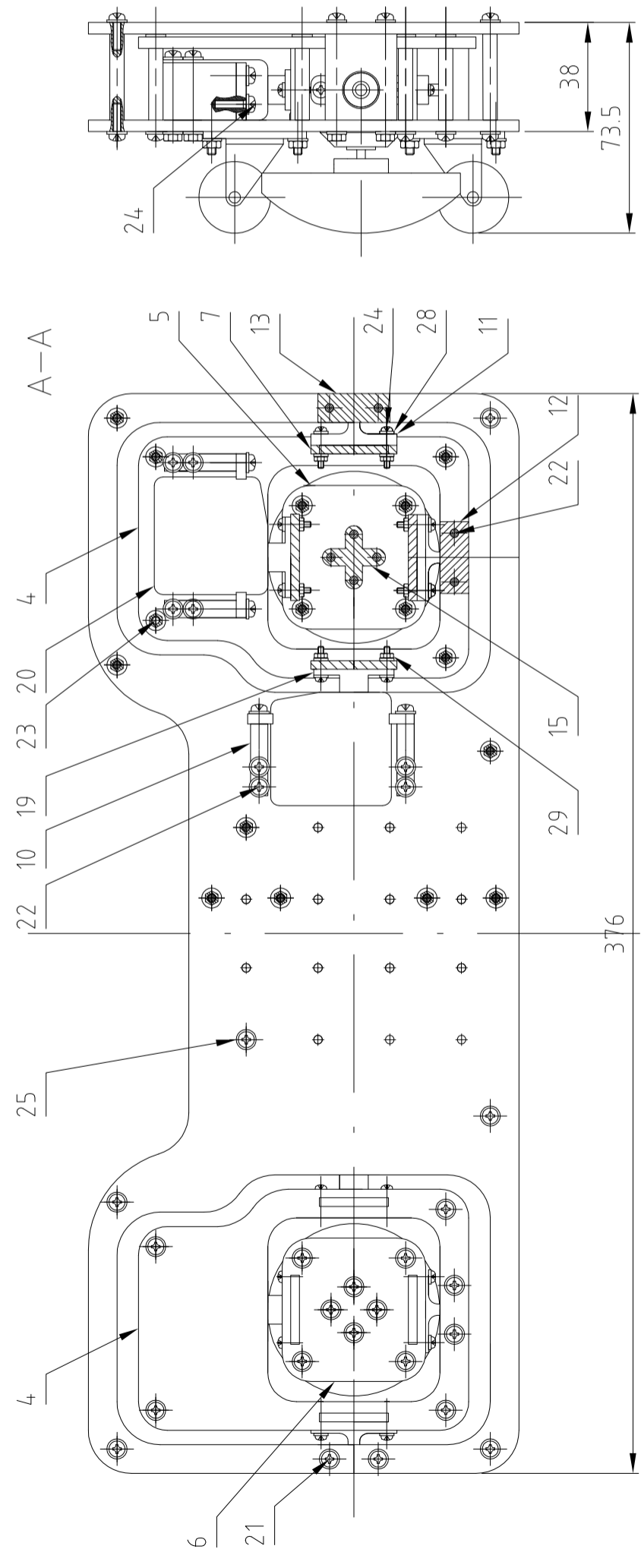
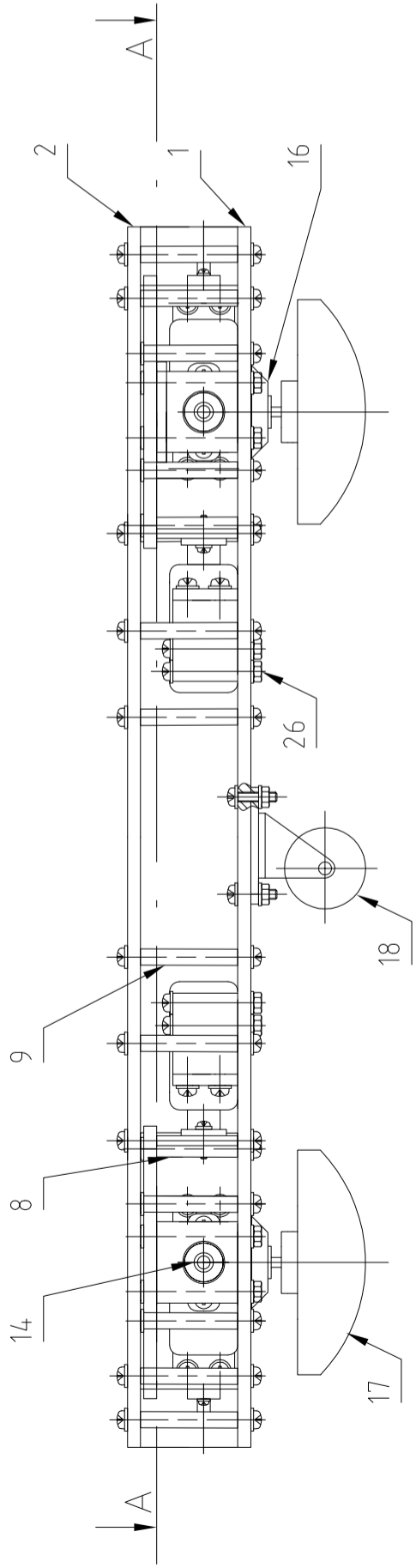
# Bibliografia

- [1] Asimo.pl, Historia robotyki do roku 1969 [http://www.asimo.pl/historia/robotyka\\_kalendarium\\_1969.php](http://www.asimo.pl/historia/robotyka_kalendarium_1969.php)
- [2] Roland Siegwart, Illah R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots, 2004.
- [3] Unknown. Hemisphere drive speedster. Mechanics and Handicraft, 1938, wolumen 5, numer 9, s. 23,73. Przez Modern Mechanix, <http://blog.modernmechanix.com/hemisphere-drive-speedster/>.
- [4] E. Ackerman. You've never seen a robot drive system like this before. IEEE Spectrum, <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/diy/youve-never-seen-a-drive-system-like-this-before>, Jul, 2011.
- [5] M. Rybczynski. Model robota mobilnego napędzanego za pośrednictwem półsfery. Praca inżynierska, Politechnika Wrocławska, 2011.
- [6] P. Joniak. Badania symulacyjne zachowania robota mobilnego napędzanego dwiema półkami. Praca inżynierska, Politechnika Wrocławska 2014.
- [7] P. Joniak. Zadanie sterowania robota mobilnego napędzanego dwiema półkami. Praca magisterska, Politechnika Wrocławska 2016.
- [8] Autodesk Inventor. <http://www.autodesk.pl/products/inventor/overview>
- [9] D.Capanidis, W.Wieleba, Przegląd tworzyw sztucznych - wykład, Politechnika Wrocławska, [http://www.ikem.pwr.wroc.pl/pkmit/pliki/strony/pod%20strony/download/twrzywa/tsz2\\_wyklad\\_234.pdf](http://www.ikem.pwr.wroc.pl/pkmit/pliki/strony/pod%20strony/download/twrzywa/tsz2_wyklad_234.pdf)
- [10] Jonathan Strickland, What is a gimbal - and what does it have to do with NASA? <http://science.howstuffworks.com/gimbal1.html>
- [11] Letsmakerobots.com, <http://letsmakerobots.com/node/38074>
- [12] Drone-configurator, product catalog <http://www.drone-configurator.com/catalog/gimbal/>
- [13] Overhead filmworks, <http://overheadfilmworks.com/>
- [14] Slupeks, katalog produktów, <http://slupeks.pl/silnik-emax-bl221525-p-2675.html>
- [15] Kauposil, Vyta flex, <https://kauposil.com/vyta-flex/>
- [16] Botland, <https://botland.com.pl/serwa-typu-standard/1444-serwo-powerhd-hd-1501mg-standard.html>
- [17] abcrc.pl, Instrukcja obsługi T6EAP, [http://www.abcrc.pl/templates/images/files/995/Instrukcja\\_Obsugi\\_T6EAP.pdf](http://www.abcrc.pl/templates/images/files/995/Instrukcja_Obsugi_T6EAP.pdf)
- [18] modele.sklep.pl, Regulator Redox 30A v2, <http://www.modele.sklep.pl/pl/Katalog/WY-POSAZENIE-RC/REGULATORY/REDOX-REG-30A.html?ob=p.priceAn&od=ASC>
- [19] kokam, <http://kokam.com/cell/?PHPSESSID=d86e2c203f5a184cb2dc3665ff34582b>
- [20] maksa24.eu, <http://www.maxa24.eu/Radiolink-T6EAP-p44321>



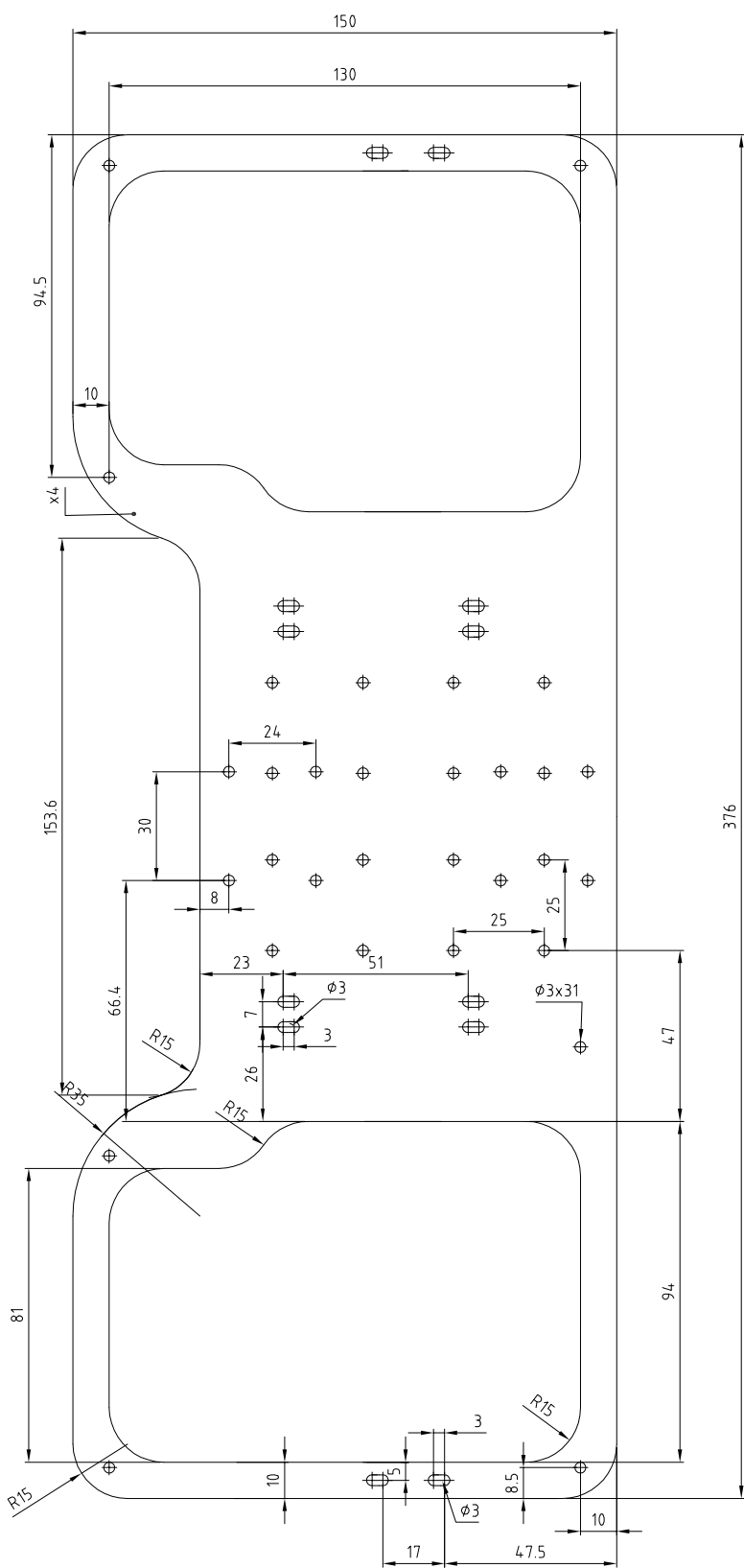
# A. Dokumentacja techniczna

W tym dodatku zawarto całkowitą dokumentację techniczną zaprojektowanego robota.



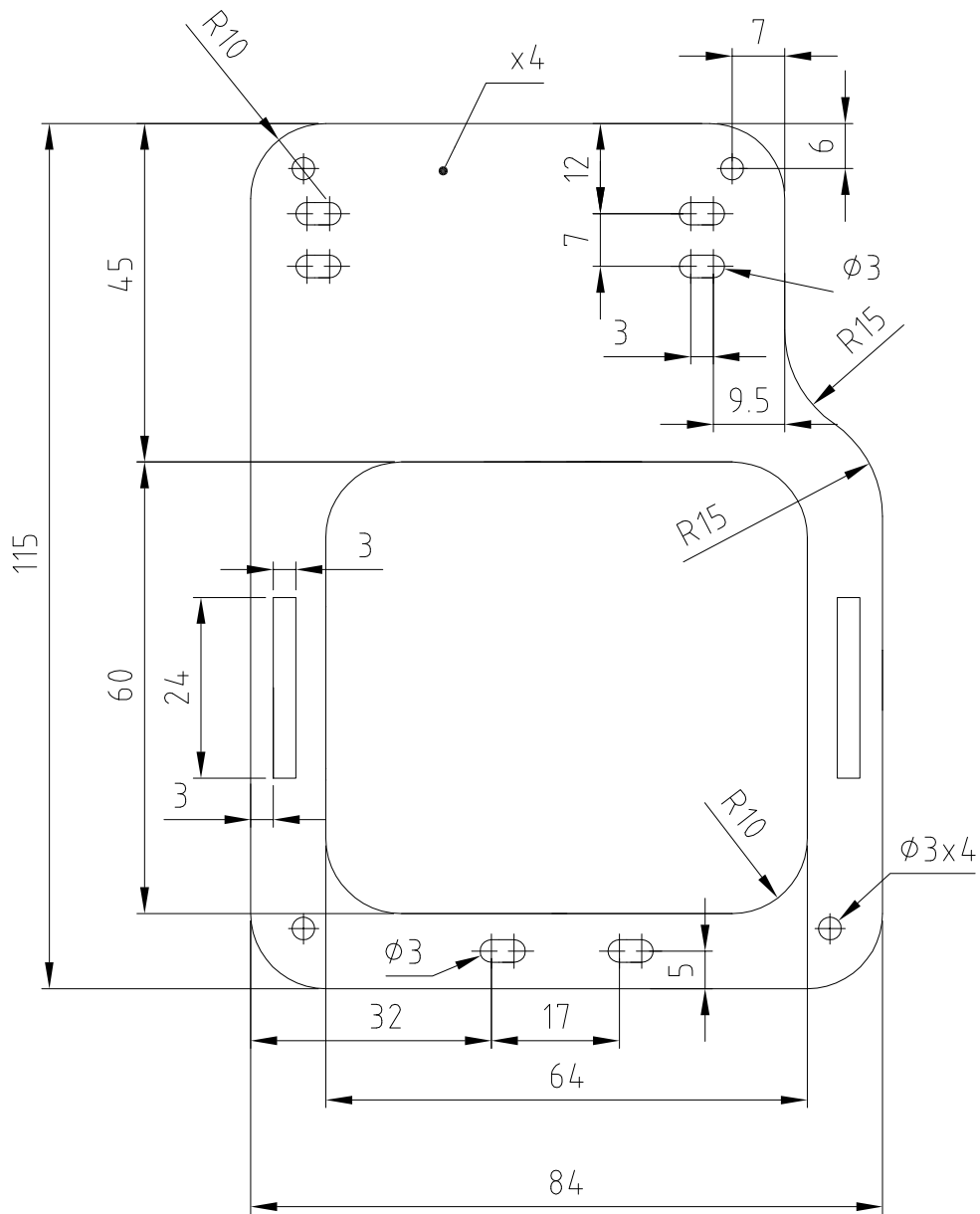
29	16	Nakrętka sześciokątna M1.6	aluminium
28	32	Podkładka płaska M1.6	aluminium
27	16	Śruba z łbem walcowym krzyżakowym M1.6 10mm	aluminium
26	66	Nakrętka sześciokątna M3	aluminium
25	174	Podkładka płaska M3	aluminium
24	40	Śruba z łbem walcowym krzyżakowym M3 10mm	aluminium
23	44	Śruba z łbem walcowym krzyżakowym M3 14mm	aluminium
22	16	Śruba z łbem walcowym krzyżakowym M3 30mm	aluminium
21	8	Śruba z łbem walcowym krzyżakowym M3 40mm	aluminium
20	4	Serwomechanizm PowerHD HD-1501MG - standard	
19	4	Orczyk serwomechanizmu	tworzywo sztuczne
18	2	kółka samonastawne	tworzywo sztuczne
17	2	Półsfera	ABS/Wyła rys. 15
16	2	Silnik bezszczotkowy EMAX BL2215/25	
15	2	Orczyk silnika	tworzywo sztuczne
14	4	łożysko	aluminium
13	2	Podpora łożyska 30mm	ABS
12	2	Podpora łożyska 25mm	ABS
11	4	Orczyk	ABS
10	8	Mocowanie serwomechanizmu	ABS
9	10	Dystans 30mm	tworzywo sztuczne
8	16	Dystans 25mm	tworzywo sztuczne
7	8	Ścianka	PMMA
6	2	Płyta górna ramki wewnętrznej	PMMA
5	2	Płyta dolna ramki wewnętrznej	PMMA
4	2	Płyta górna ramki zewnętrznej	PMMA
3	2	Płyta dolna ramki zewnętrznej	PMMA
2	1	Płyta górna korpusu	PMMA
1	1	Płyta dolna korpusu	PMMA
nr	ilość	nazwa	materiał

NAZWA PLIKU	ARKUSZ	SKALA
Rysunek A1	1	1:2
RYSOWAŁ	Damian Góral	
ZATW.	Rysunek złożeniowy	
	Robot napędzany dwiema półsferami	
	NR RYS. 1	

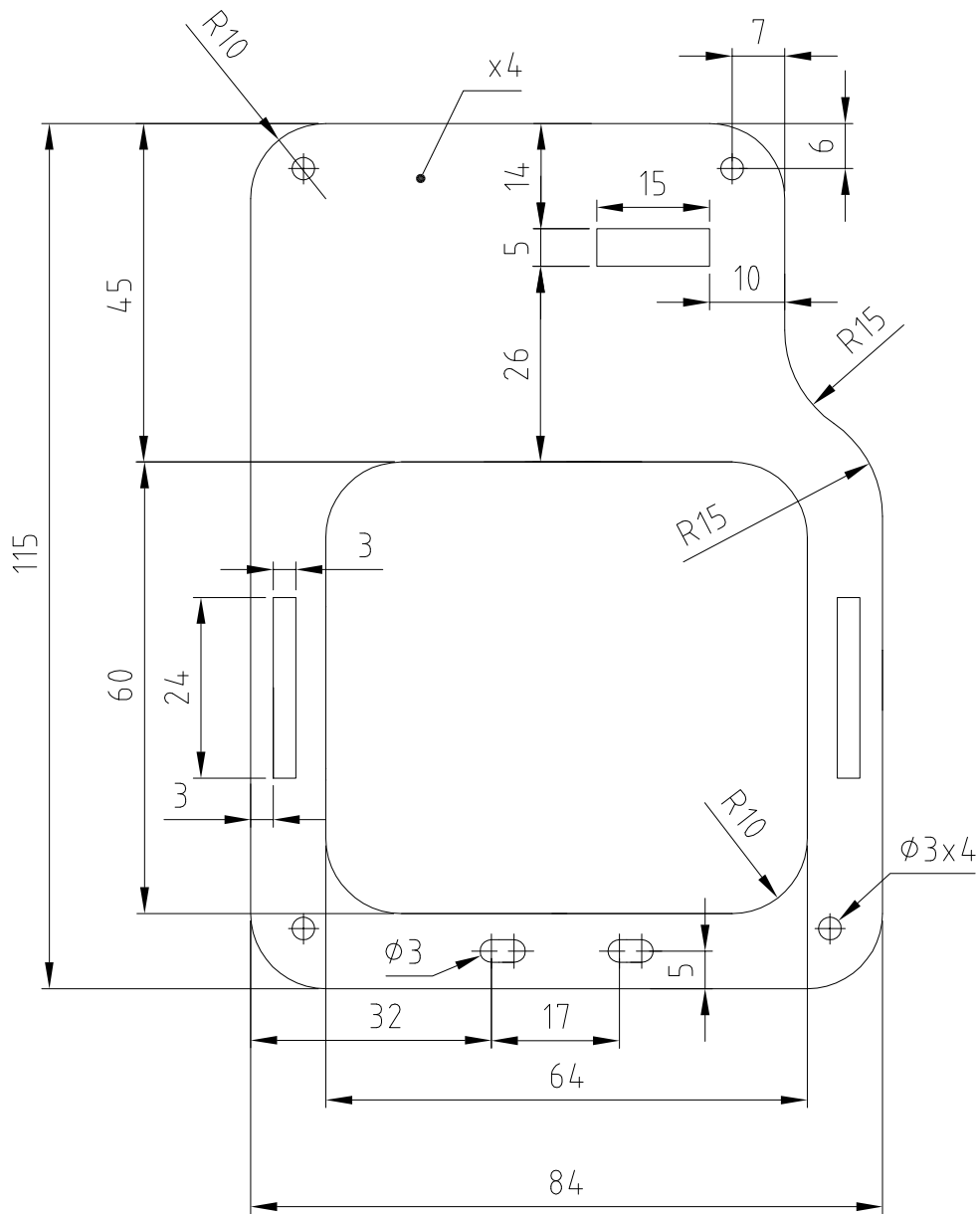


NAZWA PLIKU Rysunek A2	ARKUSZ 1	SKALA 1:2
RYSOWAŁ Damian Góral	NR RYS. 2	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Damian Góral Płyta dolna korpusu Robot napędzany dwiema półsferami	



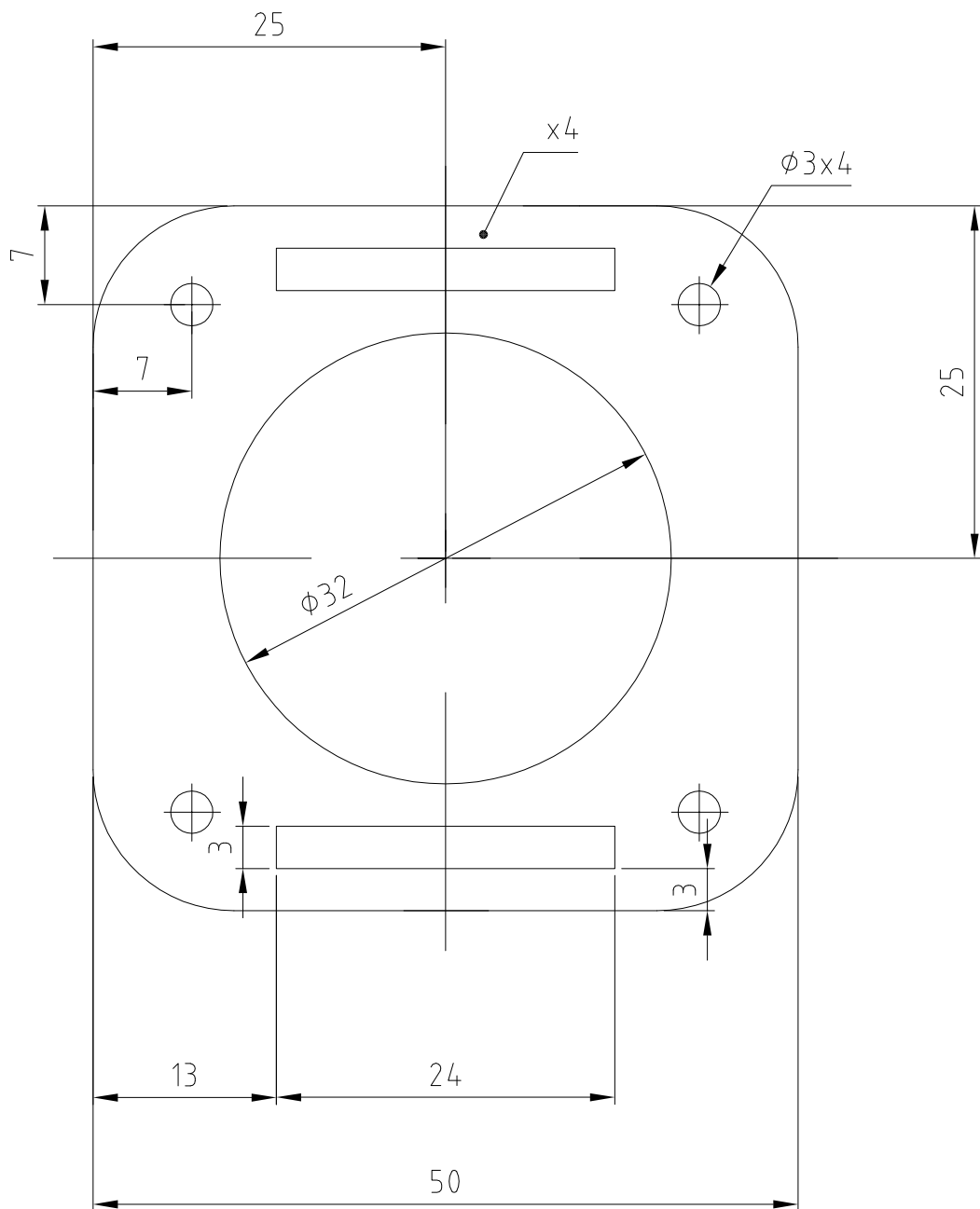


NAZWA PLIKU Rysunek A4	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 1:1
RYSOWAŁ Damian Góral	Płyta dolna ramki zewnętrznej	NR RYS. 4	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		

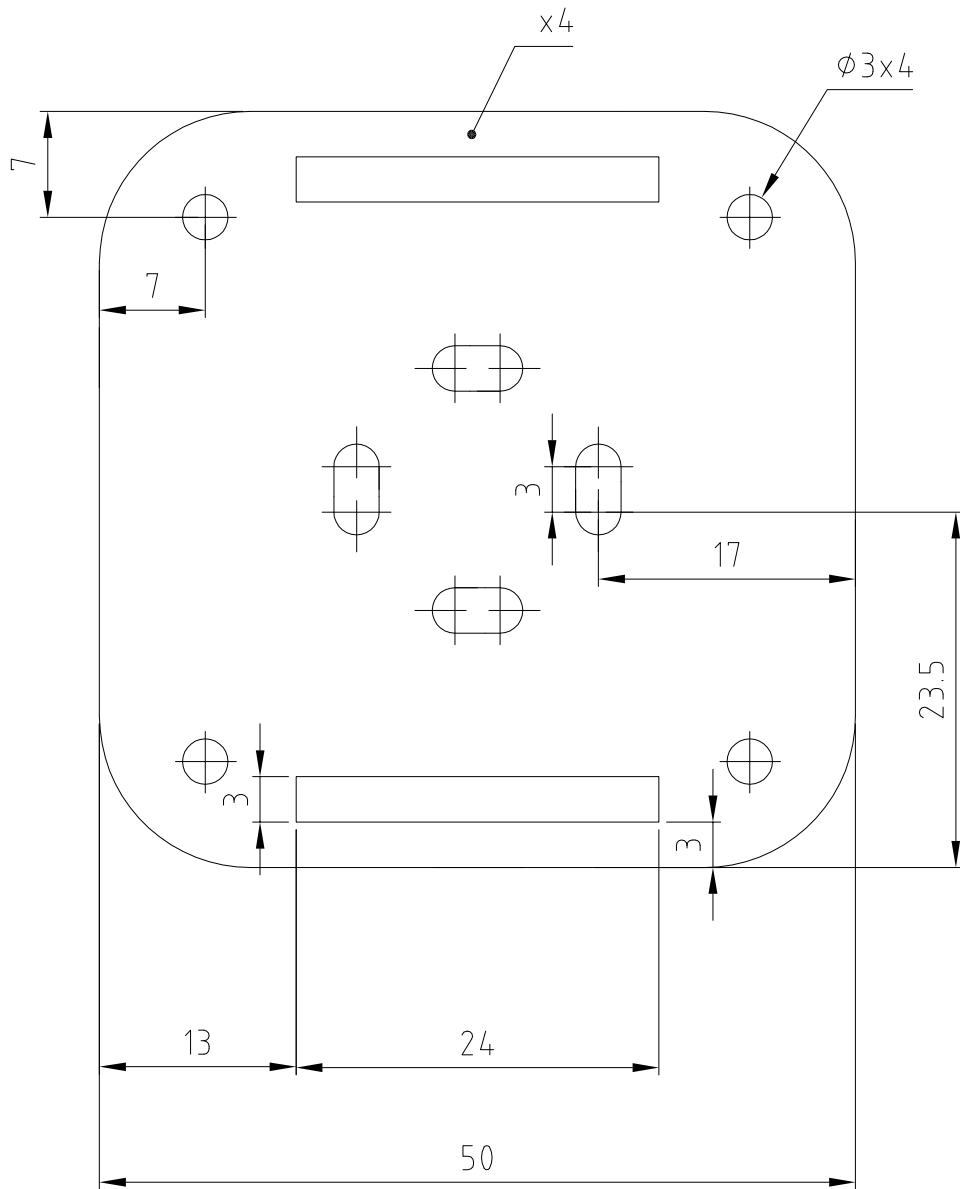


NAZWA PLIKU Rysunek A5	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 1:1
RYSOWAŁ Damian Góral	Płyta górna ramki zewnętrznej	NR RYS. 5	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		

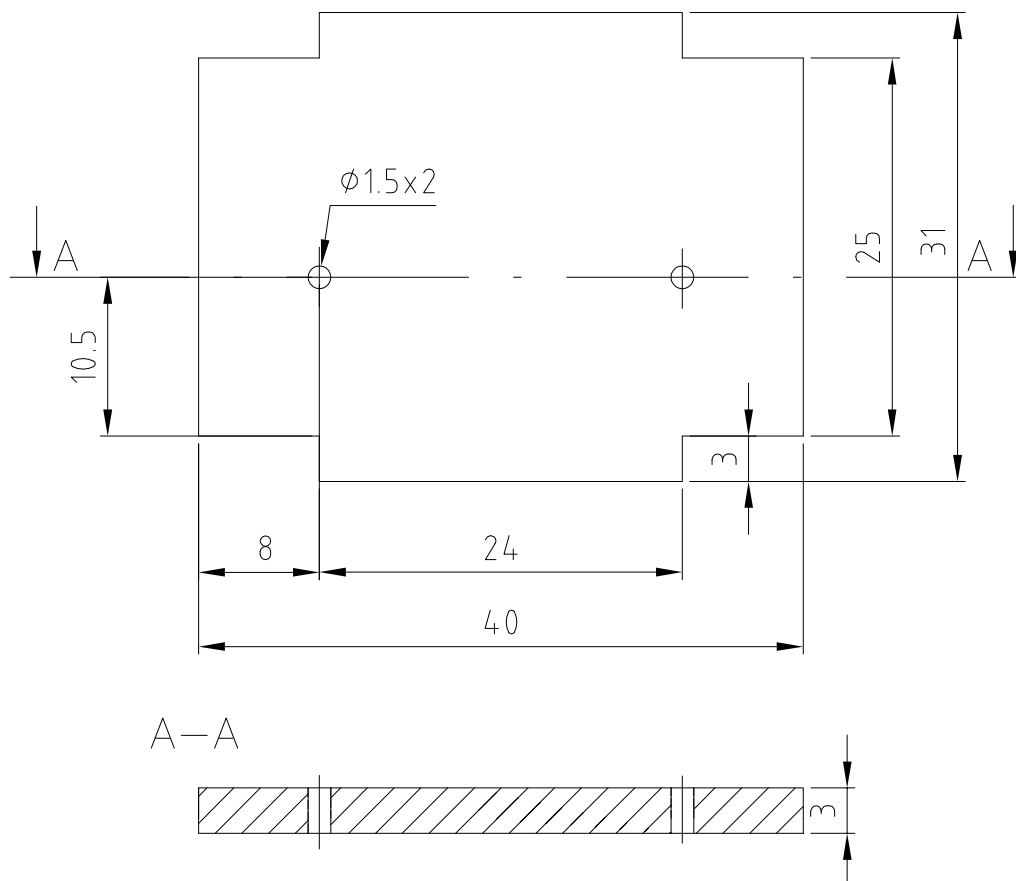




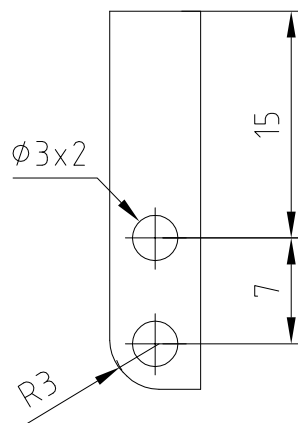
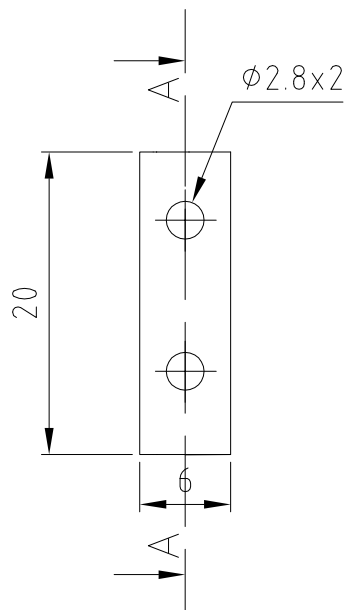
NAZWA PLIKU Rysunek A6	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 2:1
RYSOWAŁ Damian Góral	Płyta dolna ramki wewnętrznej	NR RYS. 6	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		



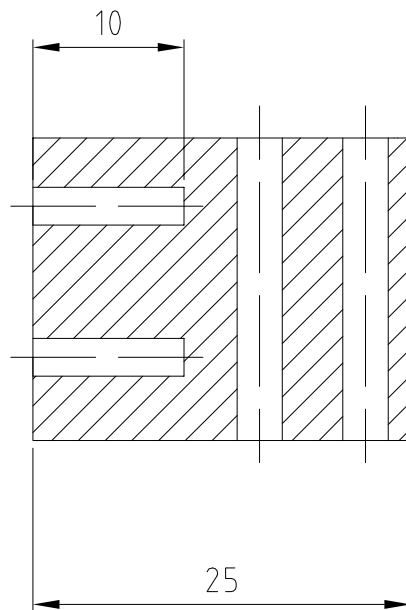
NAZWA PLIKU Rysunek A7	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 2:1
RYSOWAŁ Damian Góral	Płyta górna ramki wewnętrznej	NR. RYS. 7	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		



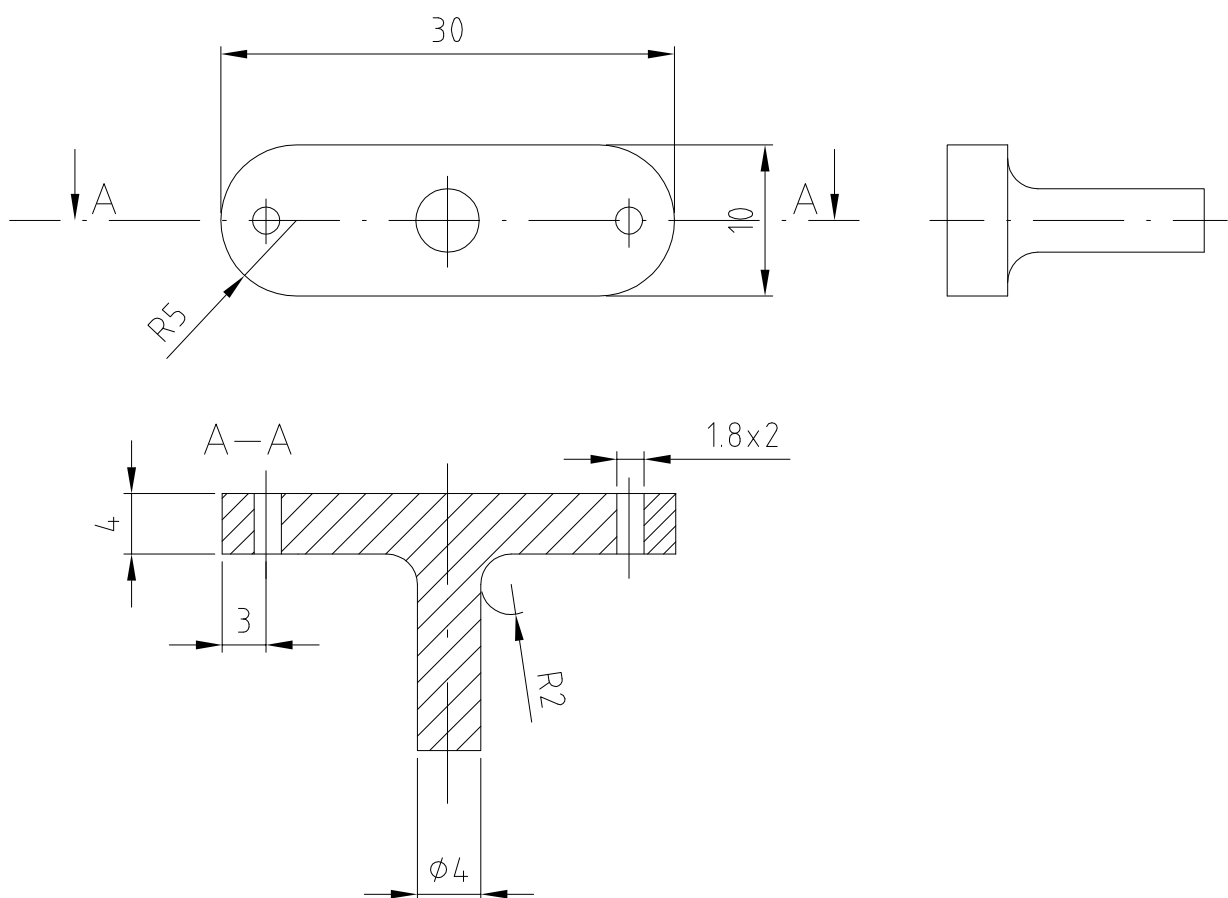
NAZWA PLIKU Rysunek A8	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 2:1
RYSOWAŁ Damian Góral	ścianka	NR RYS. ∞	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		



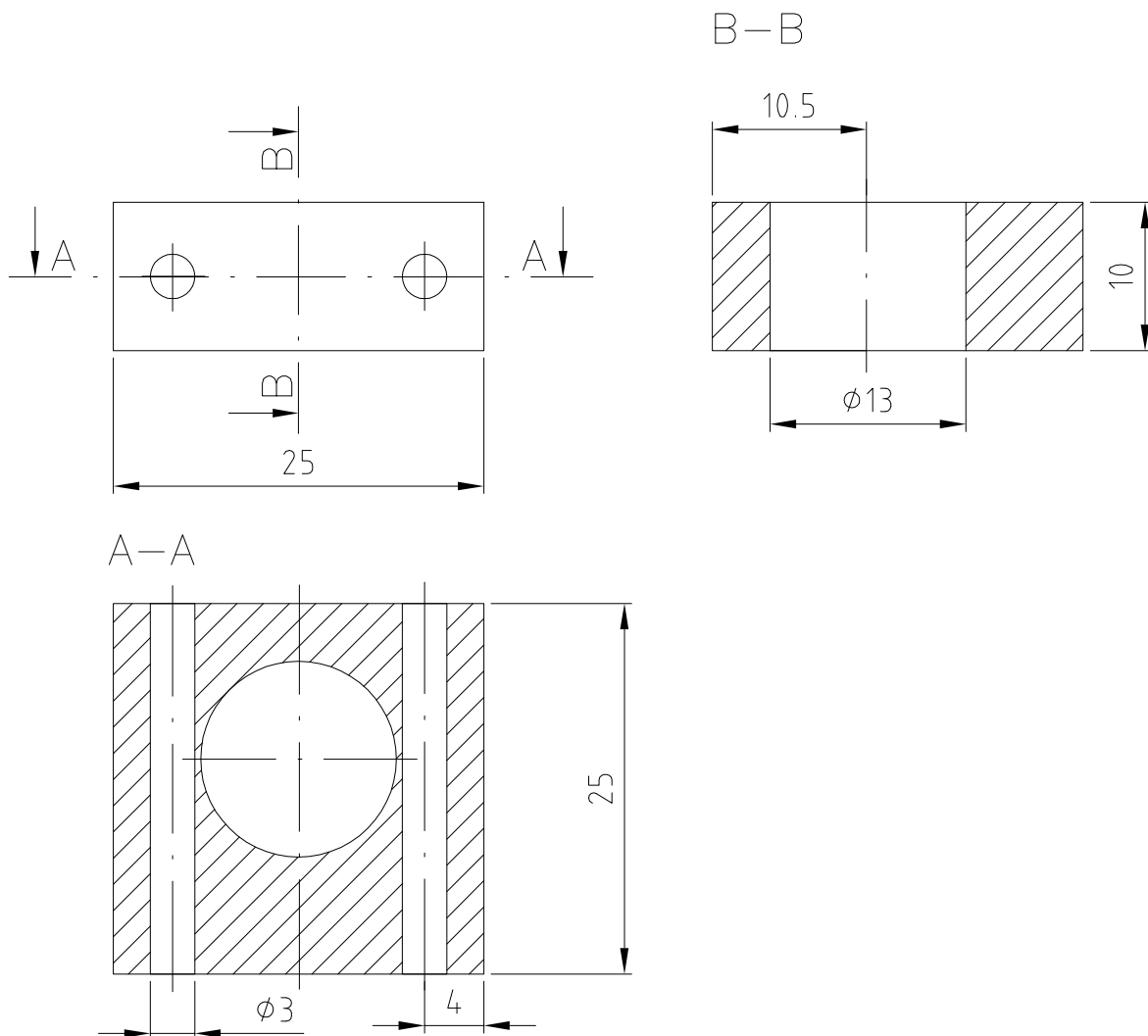
A-A



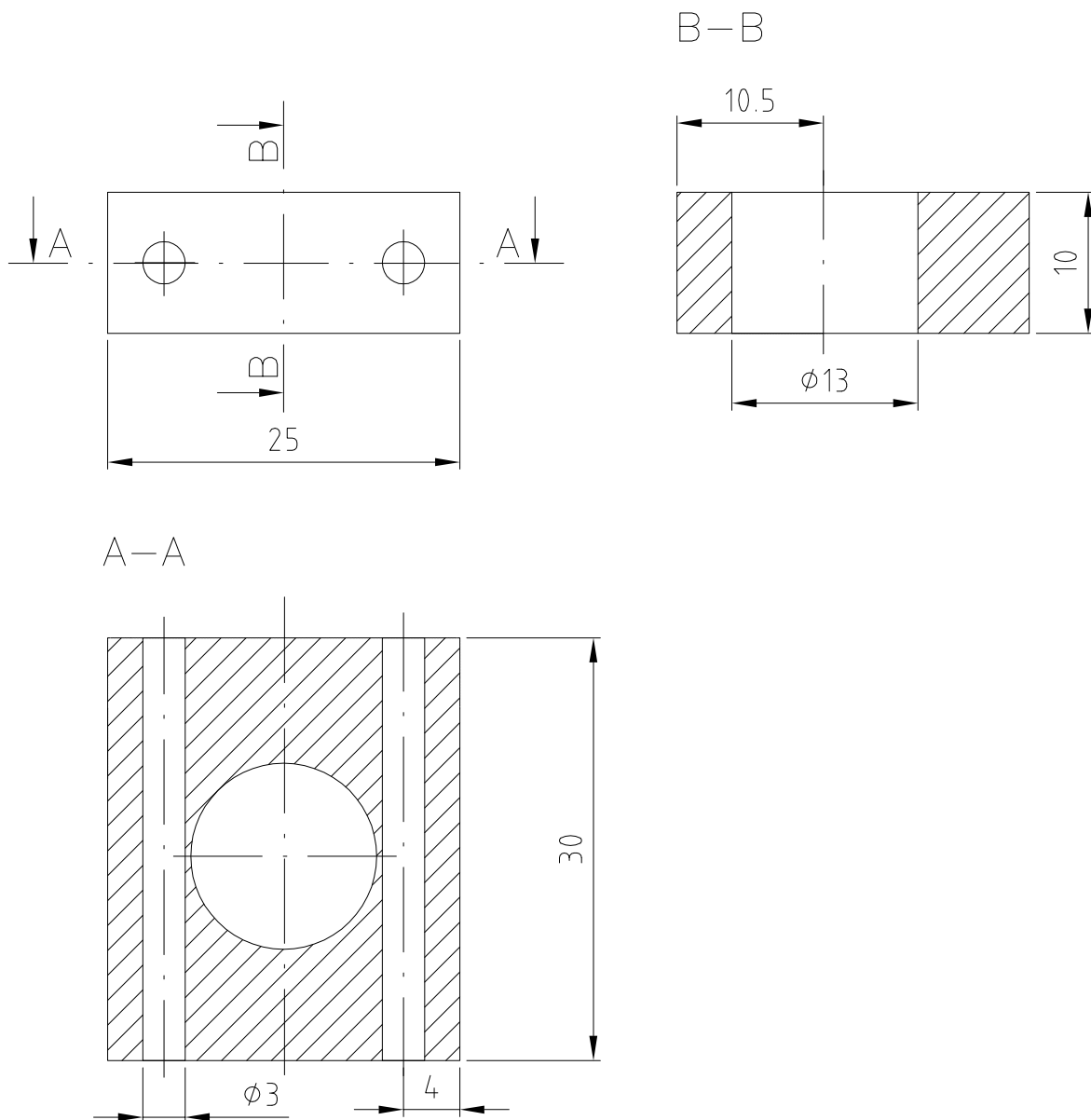
NAZWA PLIKU Rysunek A9	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 2:1
RYSOWAŁ Damian Góral	mocowanie serwomechanizmu	NR RYS.	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami	9	



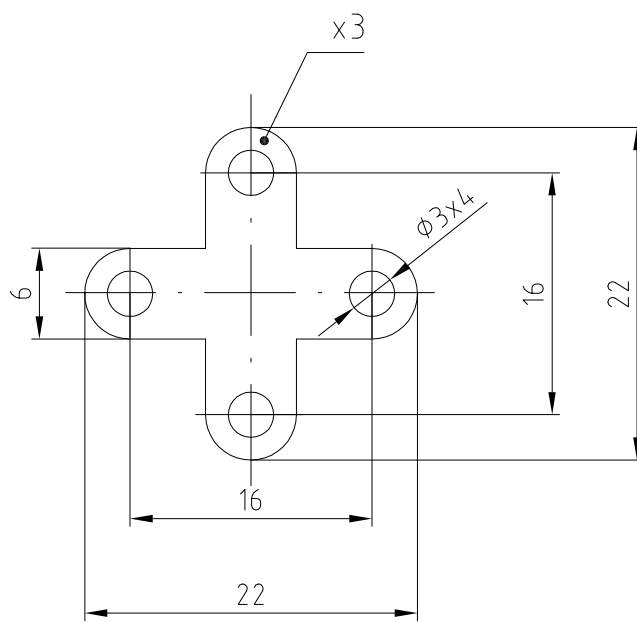
NAZWA PLIKU Rysunek A10	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 2:1
RYSOWAŁ Damian Góral	orczyk	NR RYS. 10	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		



NAZWA PLIKU Rysunek A11	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 2:1
RYSOWAŁ Damian Góral	podpora łożyska 25mm	NR RYS. 11	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		

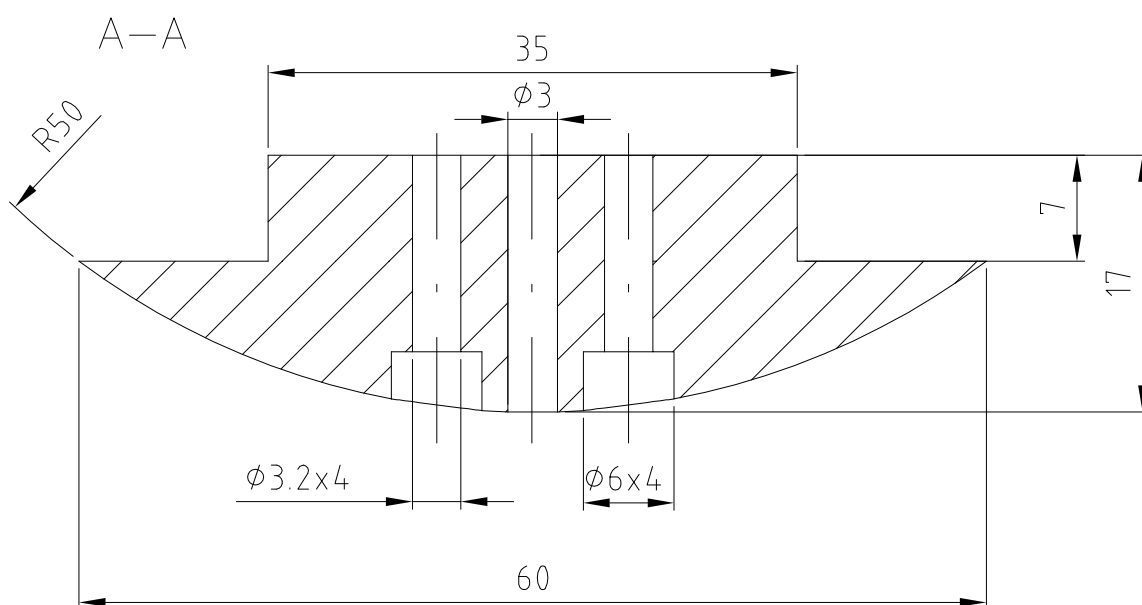
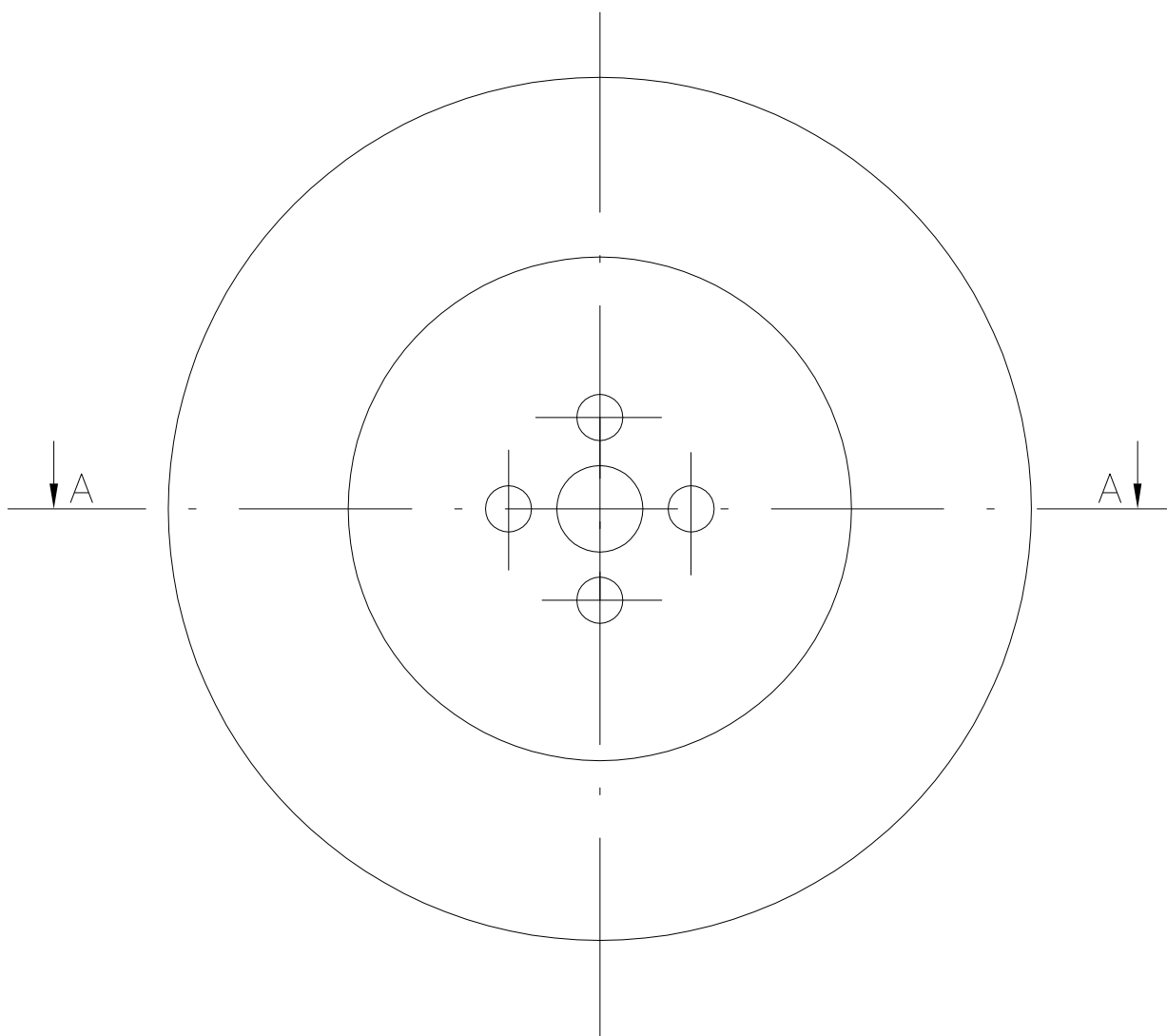


NAZWA PLIKU Rysunek A12	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 2:1
RYSOWAŁ Damian Góral	podpora łożyska 25mm	NR RYS. 12	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		

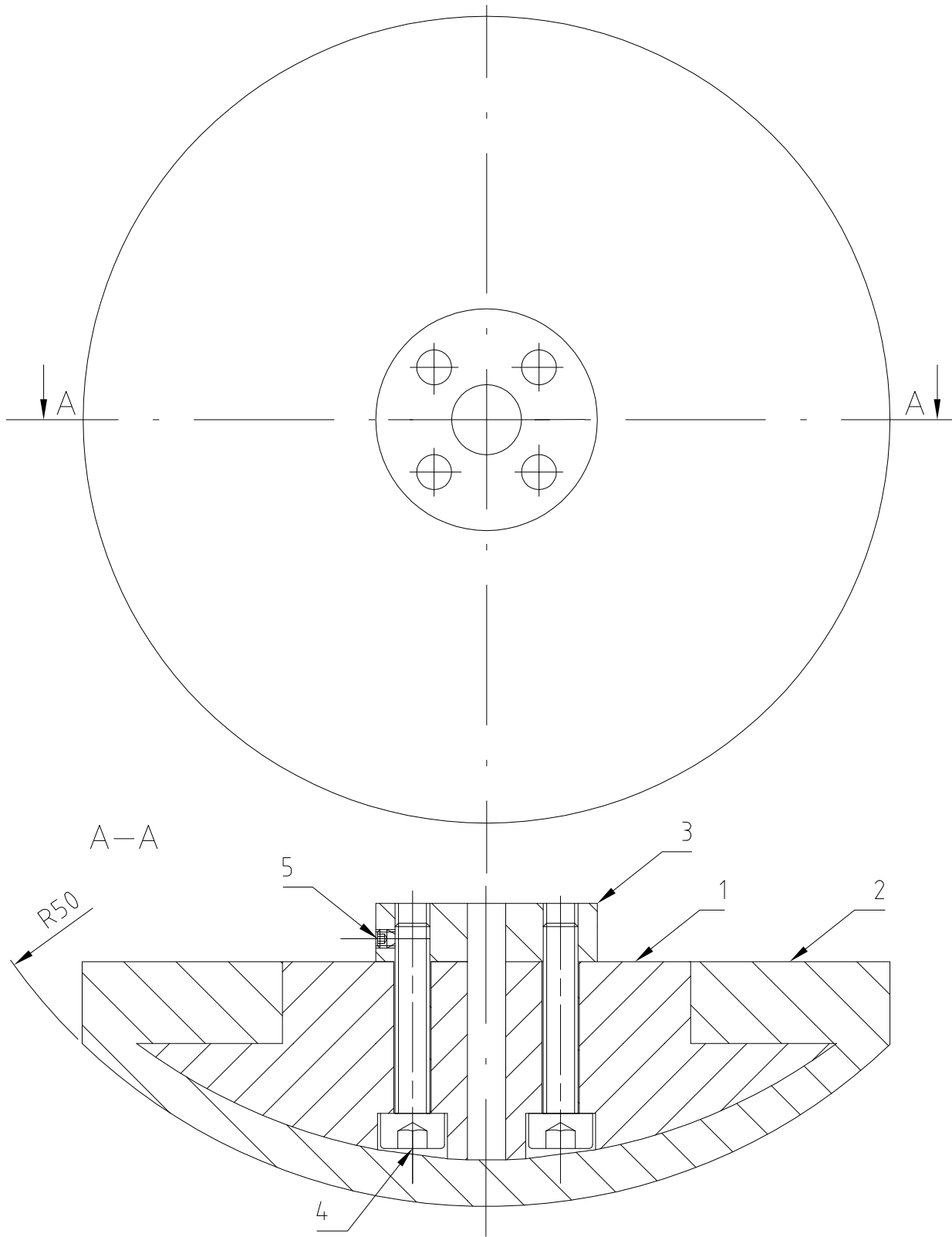


NAZWA PLIKU Rysunek A13	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 2:1
RYSOWAŁ Damian Góral	orczyk silnika	NR RYS. 13	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		



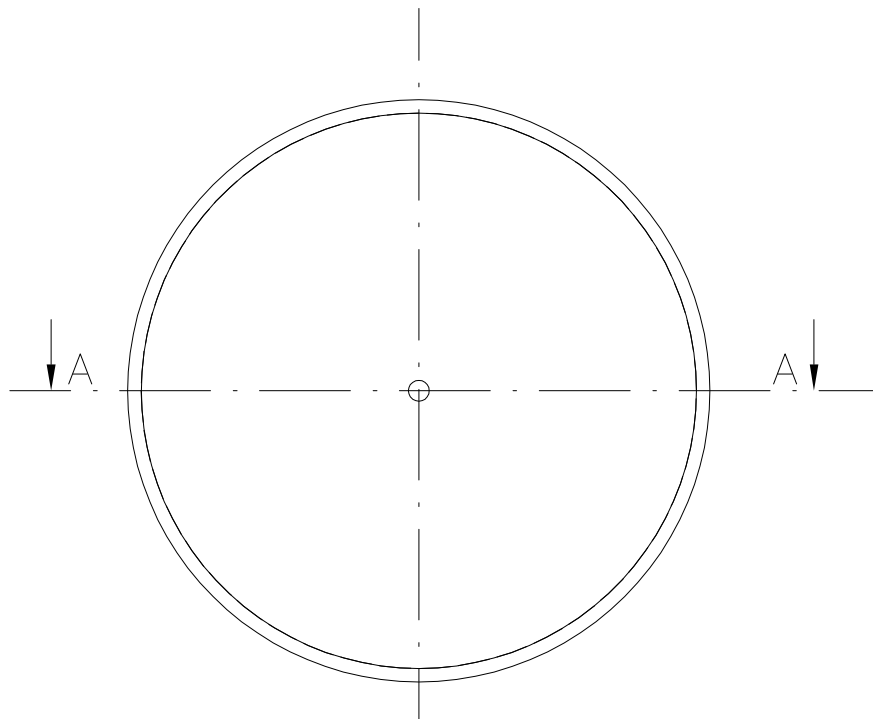


NAZWA PLIKU Rysunek A14	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 2:1
RYSOWAŁ Damian Góral	rdzeń półsfery	NR RYS. 14	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		

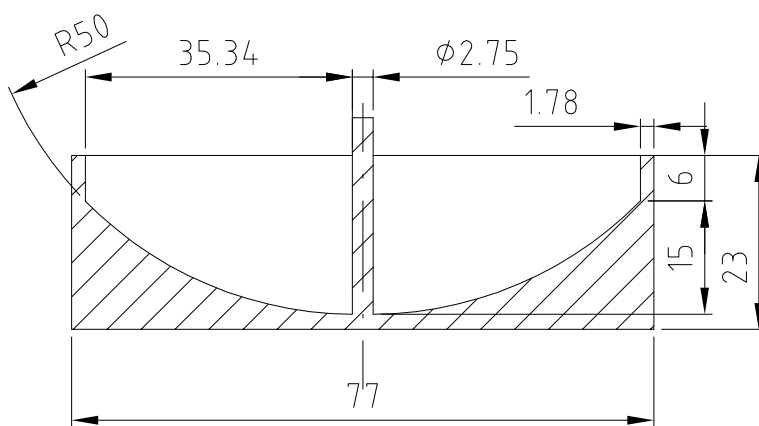


5	1	Wkręt dociskowy M3	Aluminium	
4	4	Śruba z łbem walcowym imbusowym M3	Aluminium	
3	1	hub mocujący	Aluminium	
2	1	Pokrycie półsfery	Vyta Flex 60	
1	1	Rdzeń półsfery	ABS	rys. 13
nr	ilość	nazwa	materiał	opis

NAZWA PLIKU Rysunek A15	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 2:1
RYSOWAŁ Damian Góral	półsfery	NR RYS. 15	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		



A-A



NAZWA PLIKU Rysunek A16	Damian Góral	ARKUSZ 1	SKALA 1:1
RYSOWAŁ Damian Góral	Forma półsfery	NR RYS. 16	
ZATW. dr inż Robert Muszyński	Robot napędzany dwiema półsferami		