

# Projekt integrujący

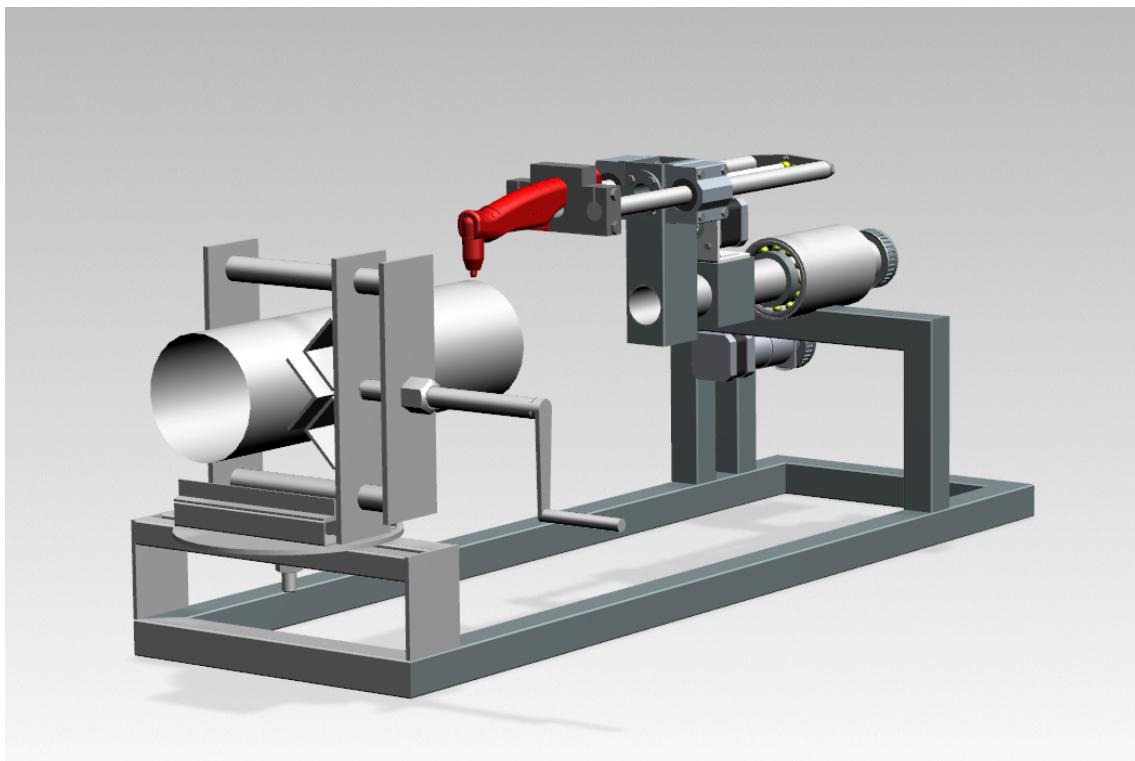
*Wycinarka plazmowa do rur  
sterowana z Arduino*

## Raport końcowy

Zespół:

1. Jakub Garbacik
2. Jacek Korbel
3. Krzysztof Chodara

Część projektu	Ocena	Data
Model 3D		
MES		
Układ sterowania \\ Wykonanie		



Warszawa, 2017/18

# Spis treści

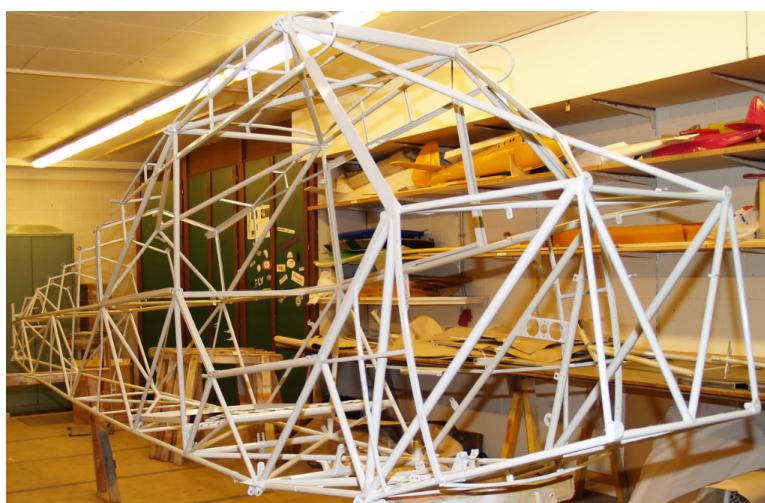
1	Wprowadzenie.....	3
1.1	Spawanie.....	3
1.2	Przygotowanie rur do spawania.....	3
2	Cel i założenia projektu.....	5
2.1	Cel projektu.....	5
2.2	Założenia.....	5
3	Proces projektowania – część mechaniczna.....	6
3.1	Wykorzystanie oprogramowania CAD.....	6
3.2	Uchwyt mocujący rurę.....	6
3.3	Ramię głowicy.....	7
3.4	Rama.....	8
4	Weryfikacja części mechanicznej – analiza MES drgań własnych.....	9
4.1	Opis teoretyczny.....	9
4.2	Model geometryczny i zastosowane uproszczenia.....	9
4.3	Model obliczeniowy.....	11
4.4	Wyniki analizy modalnej.....	12
4.5	Wnioski.....	14
5	Prace warsztatowe.....	15
5.1	Wykonanie mocowania i ramy.....	15
5.2	Wykonanie ramienia.....	15
5.3	Składanie.....	16
6	Przygotowanie układu sterowania.....	17
6.1	Założenia.....	17
6.2	BOM.....	17
6.3	Składanie układu.....	18
6.4	Kod programu.....	19
6.5	Tryb odczytu.....	20
6.6	Tryb wprowadzania.....	21
6.7	Przygotowanie G-Code.....	25
7	Wnioski.....	26
8	Załączniki.....	27

# 1 Wprowadzenie

## 1.1 Spawanie

Spawanie, czyli spajanie materiałów poprzez ich miejscowe stopienie i zestalenie, jest bardzo popularną metodą łączenia różnych elementów często z różnych materiałów. Dzięki temu możliwe jest trwałe, mocne i pewne łączenie fragmentów o różnych właściwościach materiałowych bądź geometrycznych lub tworzenie bardziej skomplikowanych geometrii. Dzięki czemu możliwe jest w ogóle wykonanie wielu konstrukcji bądź pozwala unikać długotrwałej, czasochłonnej obróbki skrawaniem skutkującą pozostawieniem wielu odpadów z kosztownego materiału.

Spawanie znalazło szerokie zastosowanie w wielu różnych przemysłach. Elementy spawane znajdziemy zarówno w konstrukcjach, w których dąży się do redukcji wagi np. w samolotach (Rysunek 1) czy promach kosmicznych jak i tam gdzie wymagana jest bardzo duża wytrzymałość np. budynki, mosty.



Rysunek 1 Rama samolotu Piper Pa-18. Dzięki niskiej wadze posiada znakomite właściwości lotne. Została ona uzyskana dzięki spawanym łączeniom profili, najczęściej okrągłych, o różnych średnicach, pod różnymi kątami

## 1.2 Przygotowanie rur do spawania

Spawanie łączy materiały znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie. Dlatego wymagane jest takie przygotowanie fragmentów do spawania, najczęściej poprzez cięcie, tak aby po ustawieniu ich w wymaganej pozycji tak aby powierzchnia styku była jak największa. Gdy spaw musi znaleźć się na płaszczyźnie wtedy cięcie można wykonać korzystając z podstawowych narzędzi. Trudniej natomiast wykonać cięcie, gdy chcemy wykonać nie osiowe spawanie dwóch rur (Rysunek 1).



Rysunek 1 Przygotowane rury do spawania prostopadłego. Uwagę zwraca skomplikowany kształt, o zmiennym promieniu (wraz z zmiennym punktem jego zaczepienia)

Wycięcie takiego kształtu, ze względu na jego zmienną geometrię, jest bardzo trudne z wykorzystaniem standardowych narzędzi. Ręczne wykonanie zazwyczaj jest mało precyzyjne, co powoduje pogorszenie jakości połączenia prowadząc do zmniejszonej wytrzymałości konstrukcji.

Jednym z rozwiązań może być zakupienie gotowej wypałarki do rur sterowanej numerycznie. Niestety uniwersalne maszyny kosztują kilkadziesiąt tysięcy złotych. Tańsze maszyny posiadają wąskie zakresy wymiarów cięcia i bardzo niską precyzję.

Wykonanie cięcia można zlecić zewnętrznej firmie. Jednak może spowodować duże opóźnienia ze względu na czas transportu i oczekiwanie w kolejce oraz, w przypadku cięcia małej ilości elementów, duży koszt przestawienia maszyn.

Na drugim końcu skali znajdują się wycinarki wykonane samodzielnie, lecz zamiast elektronicznych układów sterowania posiadające krzywki, które sterują ruchem głowicy tnącej. Minusem jest problem wytworzenia odpowiedniej ilości krzywek o odpowiednim kształcie. Ponieważ dla każdej średnicy, do jakiej będzie dospawawiana wycinana rura wymagany jest inny zestaw krzywek.

## 2 Cel i założenia projektu

### 2.1 Cel projektu

Celem projektu było zbudowanie wycinarki, która była by alternatywą dla rozwiązań opisanych w poprzednim akapicie.

Do dyspozycji zespołu była, znajdująca się na wyposażeniu warsztatu, przecinarka plazmowa o uchwycie ręcznym.

Zakresem projektu było zbudowanie maszyny, korzystającej z przecinarki ręcznej, wycinającą odpowiednio koniec rury umożliwiając jej przyspawanie do powierzchni innej rury.

### 2.2 Założenia

Wobec tego projektu zostały nałożone następujące wymagania:

- Precyzyjne wycinanie rur na ich końcach w kształt potrzebny do dospawania rury na powierzchni innej rury.
- Szybkie i łatwe przebrajanie maszyny - wysoka wydajność maszyny przy zmiennych parametrach cięcia.
- Średnica rury: od 30 do 100mm
- Niski koszt wykonania.
- Możliwość cięcia już wygiętych rur lub nie idealnie osiowych

Zespół korzystając ze swojej wiedzy i doświadczenia określił następujące wymagania wobec procesu projektowania:

- Mocowanie umożliwiające utwierdzenie rur o średnicy: od 30 do 100mm. Mocowanie powinno mieć możliwość obrotu.
- Ruch głowicy przecinarki odbywał się będzie w dwóch osiach: wokół osi obrabianej rury oraz wzdłuż osi rury o zakresie co najmniej 130mm. Dzięki ruchowi głowicy wokół rury, precyza obróbki nie jest uzależniona od osiowości rury.
- Sterowanie osiami elektroniczne, z wykorzystaniem samodzielnego wykonanego sterowania opartego o Arduino, pozwalającego zachować wysoką precyzję przy niskim koszcie zbudowania sterowania, szybkie przebrajanie maszyny (zmiana programu w pamięci zamiast mechanicznej ingerencji w maszynę), uproszczenie mechanicznej części projektu.
- Elementami wykonującymi ruchy głowicy będą silniki krokowe również zapewniające wysoką precyzję.
- Operator posiada elementarną wiedzę na temat obsługi komputera.
- Wykorzystanie standardowych prefabrykatów - gwarantująca niskie koszty wykonania w stosunku do alternatywnych rozwiązań. Wysoka niezawodność.

### 3 Proces projektowania – część mechaniczna

#### 3.1 Wykorzystanie oprogramowania CAD

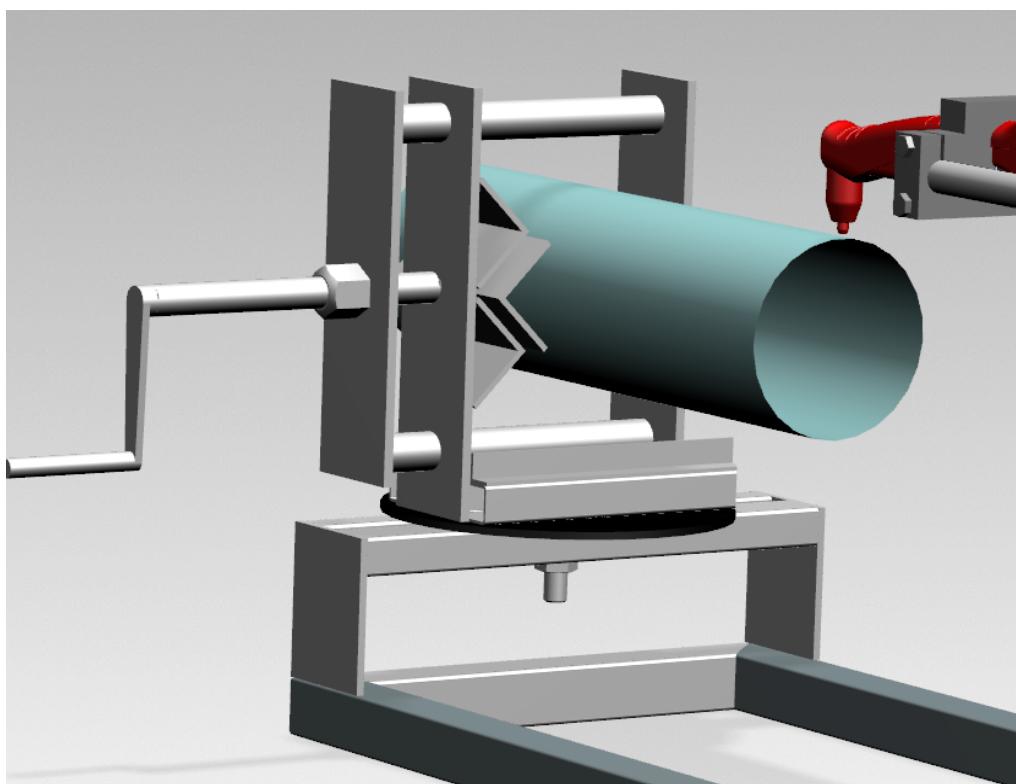
Prace projektowe postanowiono wykonać w programie CAD. Dzięki czemu możliwe było ułatwienie procesu projektowania, uniknięcie wielu błędów konstrukcyjnych, zredukowanie wymiarów urządzenia, optymalne wykorzystanie materiałów, szybkie wykonanie dokumentacji technicznej czy też upewnienie się czy ramie główicy nie koliduje z ramą.

#### 3.2 Uchwyt mocujący rurę

Ze względu na fakt, że to głowica obraca się wokół obiektu obrabianego, rura musiała zostać zabezpieczona przed ruchem we wszystkich stopniach swobody. Jednocześnie podczas projektowania mocowania (Rysunek 1) uwzględniono fakt zmiennej średnicy rury. Została ona, zatem wyposażona w korbę, którą reguluje się odstęp szczęk umożliwiając mocowanie rury w zakresie stawianym przez wymagania.

Centrowanie osi rury, względem osi ramienia z głowicą, odbywa się poprzez przesuwanie całego mocowania względem ramy po poluzowaniu śruby widocznej na dolnej części Rysunek 1. Stabilność mocowania została uzyskana poprzez krążek na dole mocowania.

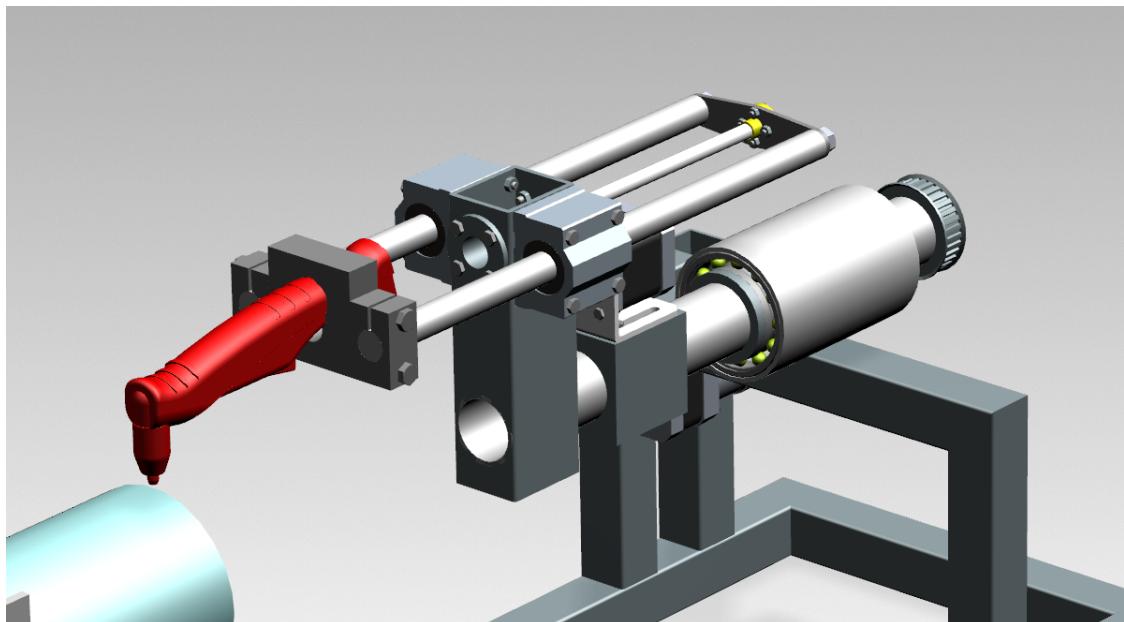
Dzięki mocowaniu do ramy z wykorzystaniem jednej śruby możliwe jest obrócenie całości mocowania możliwa jest obróbka rury, która została wcześniej wygięta nawet w bezpośrednim pobliżu końca.



Rysunek 1 Mocowanie rury

### 3.3 Ramię głowicy

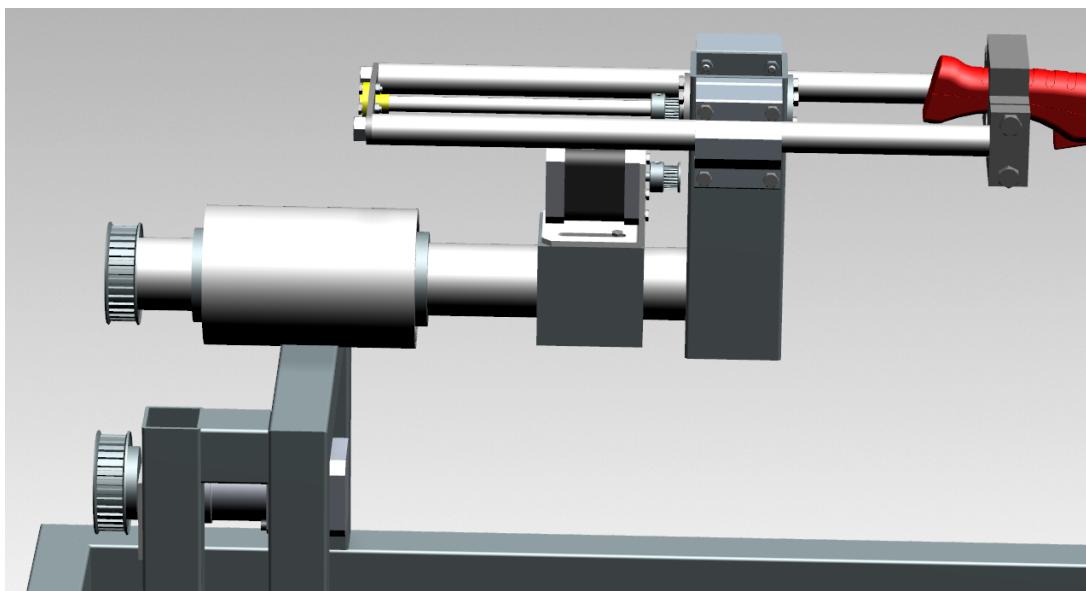
Ramię głowicy (Rysunek 1) zostało zaprojektowane tak, aby uwzględnić założenia dotyczące ruchu w dwóch osiach. Dlatego ramię oparto na wale pozwalając na obrót głowicy wokół obrabianej rury. Mocowanie do ramy odbywa się poprzez przyspawanie tulei, w której znajdują się łożyska umożliwiające ruch obrotowy wału.



Rysunek 1 Ramię głowicy

Ruch mocowania głowicy wzdłuż osi rury odbywa się poprzez obrót śruby trapezowej, której nakrętka przesuwa prowadnice, na których zamontowano mocowanie głowicy przecinarki. Ruch prowadnic jest kierowany przez łożyska liniowe.

Sterowanie ruchem odbywa się poprzez ruch dwóch silników krokowych (Rysunek 1), poprzez pasy zębate poruszające kołami zębatymi umieszczonymi na śrubie trapezowej i na walce.

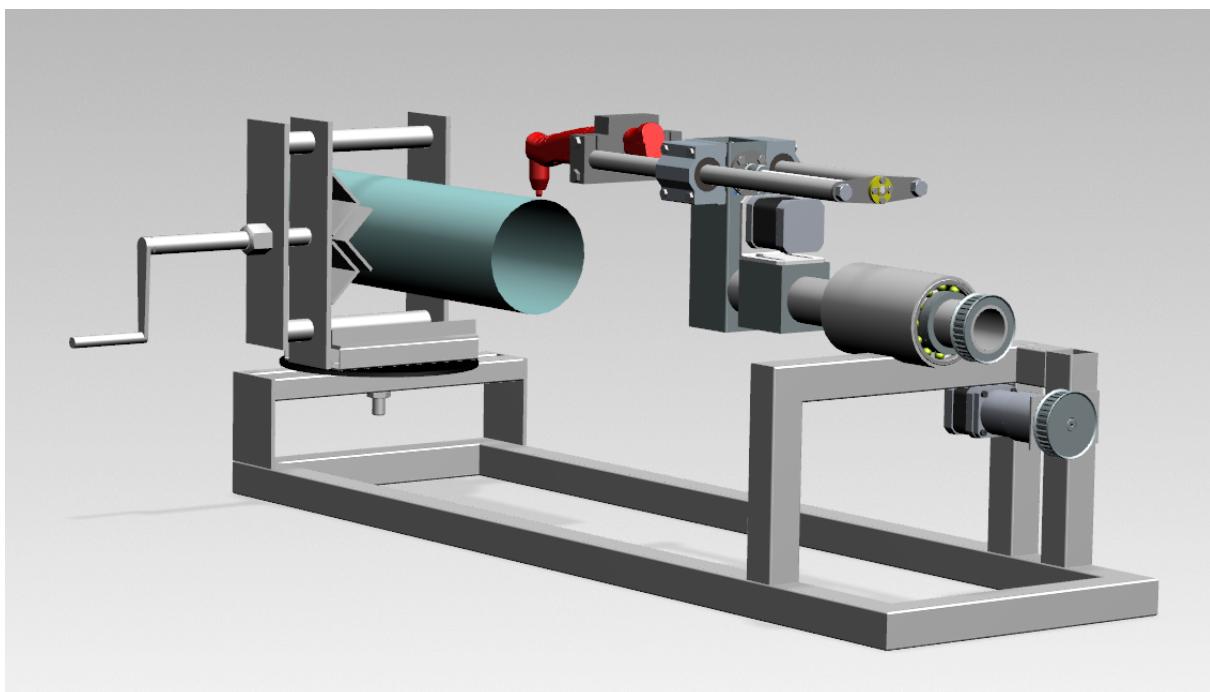


Rysunek 1 Silniki sterujące ruchem głowicy

### 3.4 Rama

Rama (Rysunek 1) została zaprojektowana tak, aby poprawnie pełniła funkcję łącznika pomiędzy ramieniem a mocowaniem rury. Została zaprojektowana solidnie, aby ruch ramienia nie powodował jej ugięcia w stopniu mającym wpływ na proces obróbki.

Do wykonania ramy zostały wykorzystane standardowe profile i blacha. Mocowanie wszystkich materiałów zostało zaprojektowane poprzez spawanie.



Rysunek 1 Rama widoczna w złożeniu całego urządzenia

## 4 Weryfikacja części mechanicznej – analiza MES drgań własnych

### 4.1 Opis teoretyczny

Model w metodzie elementów skończonych stanowi układ dyskretny o skończonej liczbie stopni swobody. Teoria drgań opisuje drgania takiego układu jako:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F(t)$$

Gdzie M, C i K są macierzami, odpowiednio masową, tłumienia i sztywności; q jest wektorem stopni swobody, a F(t) jest wektorem sił zewnętrznych. Jeżeli w konstrukcji nie ma tłumienia oraz wektor F(t) jest zerowy, to drgania układu nazywane są drganiami własnymi.

$$M\ddot{q} + Kq = 0$$

Rozwiązań ogólnego wyżej wymienionego równania ma postać:

$$q(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t$$

$$\dot{q} = -\omega^2 C_1 \cos \omega t - \omega^2 C_2 \sin \omega t = -\omega^2 q$$

Wstawiając wyżej wymienione wyrażenia na wektor przemieszczeń i jego drugą pochodną po czasie do równania opisującego drgania własne konstrukcji, otrzymujemy uogólnione zagadnienie własne.

$$(K - \omega^2 M)q = 0$$

W praktyce analiza drgań własnych wiąże się z oszacowaniem ryzyka występowania rezonansu

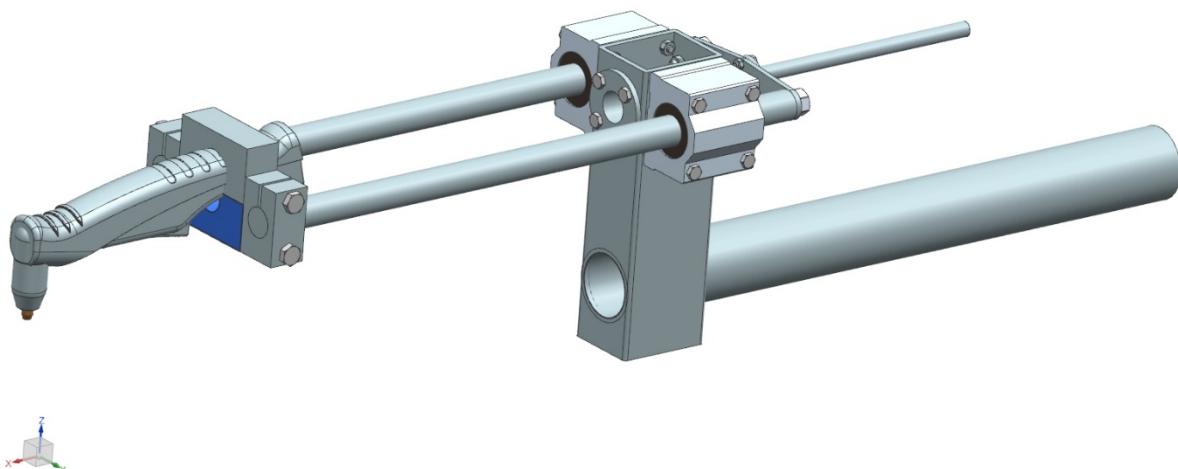
w układach sprężystych. Gdy częstotliwość wymuszeń zbliża się do częstotliwości drgań własnych znacząco wzrasta amplituda drgań własnych. Zjawisko rezonansu może doprowadzić do zniszczenia konstrukcji.

### 4.2 Model geometryczny i zastosowane uproszczenia

Elementem, który został poddany analizie metodą elementów skończonych było ramię Zakładano,

że ze względu na dużą długość elementu podatny będzie on na drgania. Zadecydowano,

że niezbędne jest poddanie go analizie modalnej, która pozwala wyznaczyć częstotliwości oraz postaci drgań własnych.

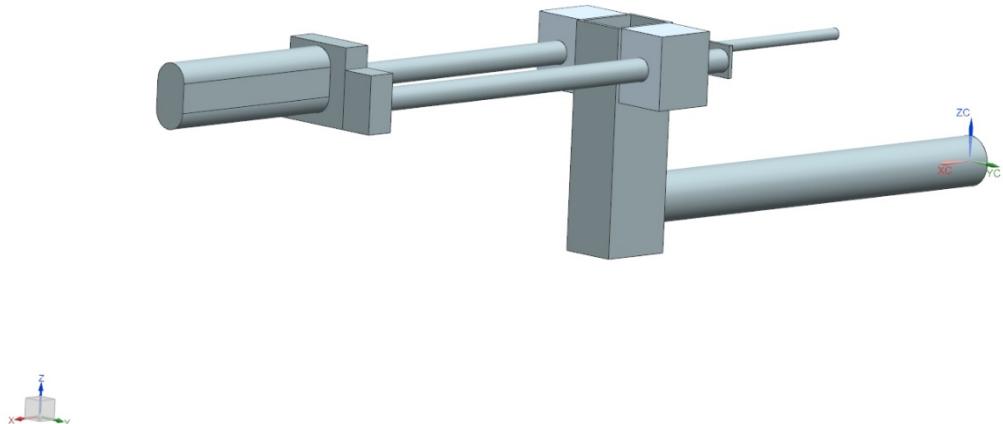


Rysunek 1 Model ramienia wycinarki plazmowej

Geometrię (Rysunek 1) zaczerpnięto z trójwymiarowego modelu urządzenia. Składa się ona z:

1. rury ø38x2 mm,
2. profilu o przekroju kwadratowym 40x40x3 mm,
3. dwóch łożysk liniowych,
4. dwóch prowadnic liniowych,
5. śruby trapezowej Tr8,
6. łącznika śruby oraz prowadnic,
7. mocowania palnika wycinarki plazmowej,
8. palnika.

Z racji złożonej geometrii układu należało uprościć wszystkie elementy. Bryły zastąpione zostały przez prostopadłościany oraz walce (Rysunek 1). Dodatkowo wszystkie elementy konstrukcji podzielono pionowymi i poziomymi płaszczyznami stycznymi do elementów walcowych. Zabieg ten pozwolił na stworzenie strukturalnej siatki obliczeniowej.



Rysunek 1 Uproszczona geometria ramienia

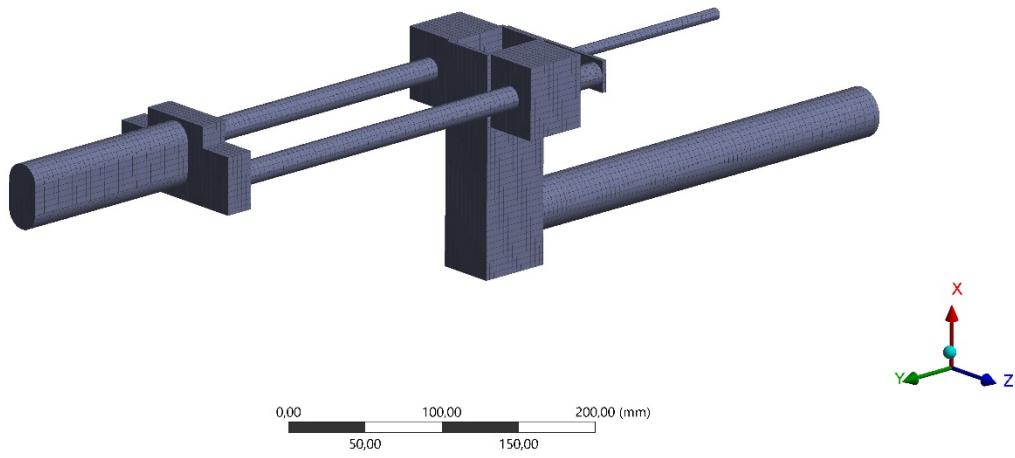
### 4.3 Model obliczeniowy

Analizę numeryczną przeprowadzono w programie ANSYS Workbench. Na początku wybrano analizę modalną (moduł obliczeniowy *Modal*). Badane elementy w większości wykonano ze stali, dlatego też w karcie *Engineering Data* posłużyono się domyślnym modelem materiału Steel. Jego dane materiałowe opisuje (Tabela 1).

Dane materiałowe	Wartość
Moduł Younga [MPa]	$2 \times 10^5$
Liczba Poissona [-]	0,3
Gęstość [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	7850

Tabela 1 Dane materiałowe dla stali

Uproszczony model geometryczny importowano ze stworzonego w NX pliku. Następnie stworzono podział geometrii na elementy skończone. Zastosowano opcję tworzenia węzłów między wierzchołkami elementów (elementy dwudziestowęzłowe), co odpowiada elementowi *Solid186* znanego z ANSYS Mechanical APDL. Ponadto wymuszono tworzenie siatki strukturalnej na wszystkich powierzchniach modelu. Dodatkowo określono globalną wielkość elementu na powierzchni równą 4 mm. Otrzymana siatka (Rysunek 1) posiada około 28,5 tysiąca elementów.

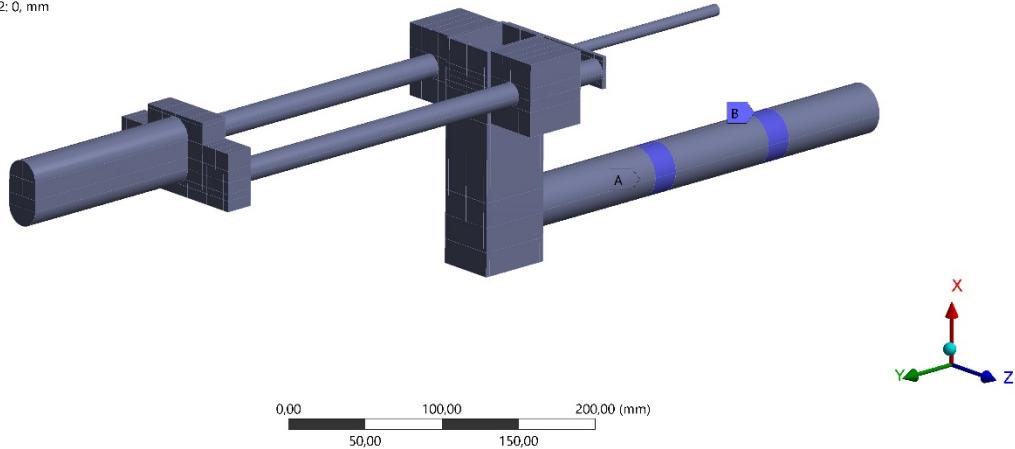


Rysunek 1 Siatka obliczeniowa

Następnym krokiem było narzucenie warunków brzegowych. Rura ø38 łożyskowana jest za pomocą dwóch łożysk kulowych typu 6008. Łożyska te znajdują się w odległości odpowiednio 5 i 16 cm od swobodnego krańca rury. Łożyskowanie zasymulowano narzucając warunki podpory cylindrycznej, blokującej ruchy osiowe (Rysunek 1). Kolorem niebieskim zaznaczone są powierzchnie na których zastosowano wyżej wymienione warunki brzegowe.

**A: Modal**  
 Cylindrical Support  
 Frequency: N/A  
 04.02.2018 12:19

**A** Cylindrical Support: 0, mm  
**B** Cylindrical Support 2: 0, mm



Rysunek 1 Warunki brzegowe narzucone na model obliczeniowy

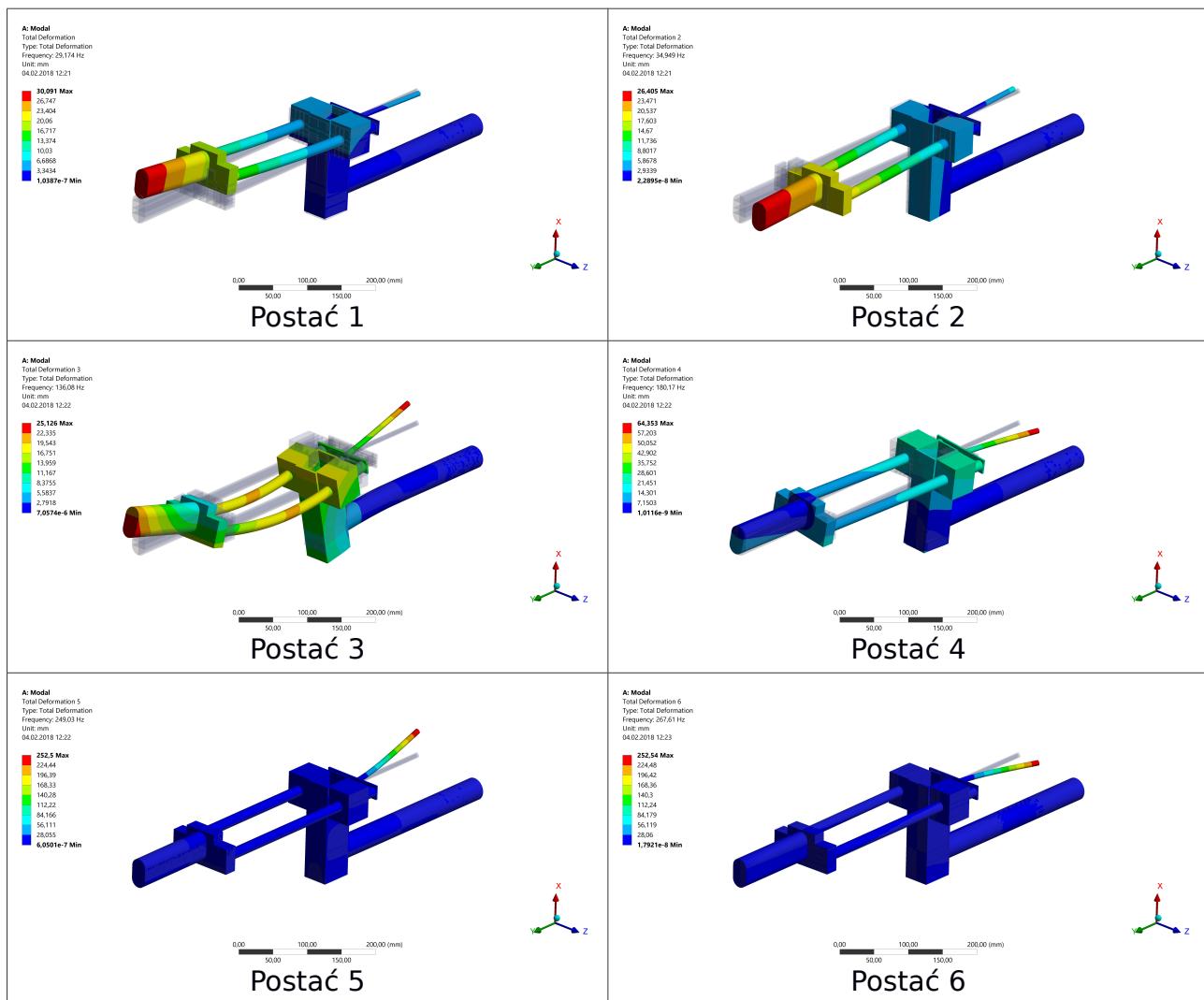
#### 4.4 Wyniki analizy modalnej

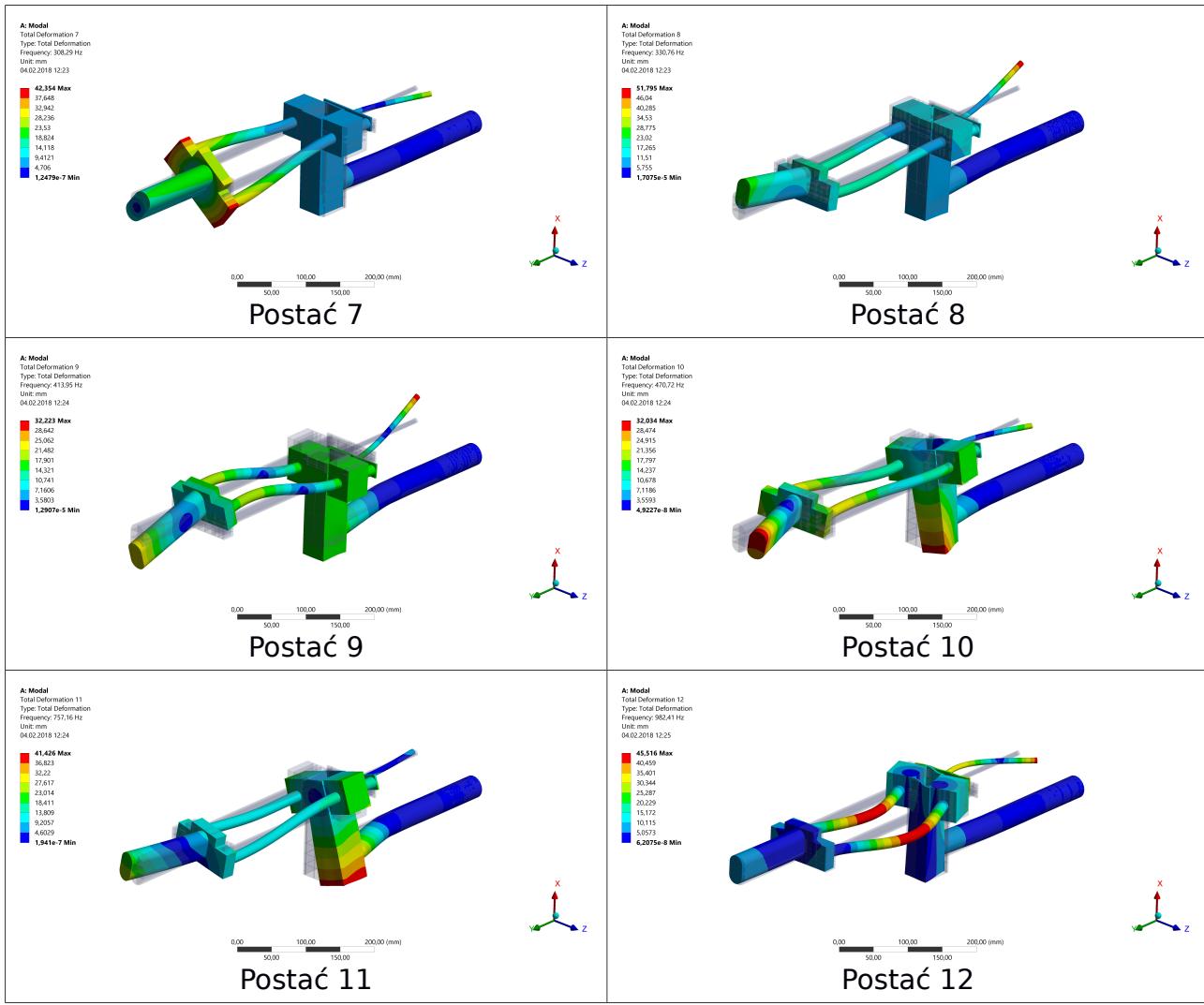
Założono, że znalezione zostaną wartości częstości dla pierwszych 12 postaci drgań. Wyniki symulacji modalnej (Tabela 1) wskazują na duże ryzyko wzbudzenia drgań własnych – wiele postaci ma częstość pokrywającą się z częstotliwością impulsowania silnika krokowego.

<b>Postać drgań</b>	<b>Częstość [Hz]</b>	<b>Postać drgań</b>	<b>Częstość [Hz]</b>
1	29,2	7	308,3
2	35,0	8	330,8
3	136,0	9	414,0
4	180,1	10	470,7
5	249,0	11	757,2
6	267,6	12	982,4

Tabela 1 Częstości drgań odpowiadające poszczególnym postaciom

Poniższe rysunki przedstawiają postaci drgań własnych ramienia wycinarki plazmowej.





Analizując powyższe rysunki, można zauważać złożoność i różnorodność drgań konstrukcji. Na przykład postaci 1 i 2 są prostymi drganiami giętnymi w płaszczyznach odpowiednio XY i YZ. Ich niska częstotliwość wzbudzania powoduje, że są najbardziej niebezpieczne dla konstrukcji. Postaci 10 i 11 są złożonymi drganiami giętno-skrętnymi, lecz ze względu na ich wysokie częstotliwości ryzyko wzbudzenia jest minimalne.

#### 4.5 Wnioski

Analizując częstotliwości drgań własnych układu można zauważać, że wiele z nich ma niskie wartości. Silniki krokowe, które napędzają urządzenie, są w stanie pracować z takimi właśnie częstotliwościami impulsowania. Wskazane jest zatem zbadanie, czy obecnie zaprojektowane sterowanie wpływa na wzbudzanie się drgań własnych w konstrukcji.

Drgania, w badanym przypadku, nie muszą doprowadzić do zniszczenia konstrukcji. Silniki krokowe zmieniają częstotliwość impulsowania dynamicznie, więc wiele z powstających drgań własnych może być szybko tłumiona. Należy jednak pamiętać, że powstawanie oscylacji prowadzi do zmniejszenia dokładności urządzenia.

Dodatkowo, należy zwrócić uwagę na fakt, iż badany model był jedynie uproszczeniem rzeczywistego. Ważne jest przetestowania gotowego urządzenia pod kątem występowania drgań podczas działania i ewentualnej ich minimalizacji.

## 5 Prace warsztatowe

### 5.1 Wykonanie mocowania i ramy

Wykonanie mocowania i ramy polegało na przygotowaniu ich części poprzez cięcie znormalizowanych materiałów do budowy (Rysunek 1) a następnie ich spawanie. Część spawania nie została jeszcze wykonana.



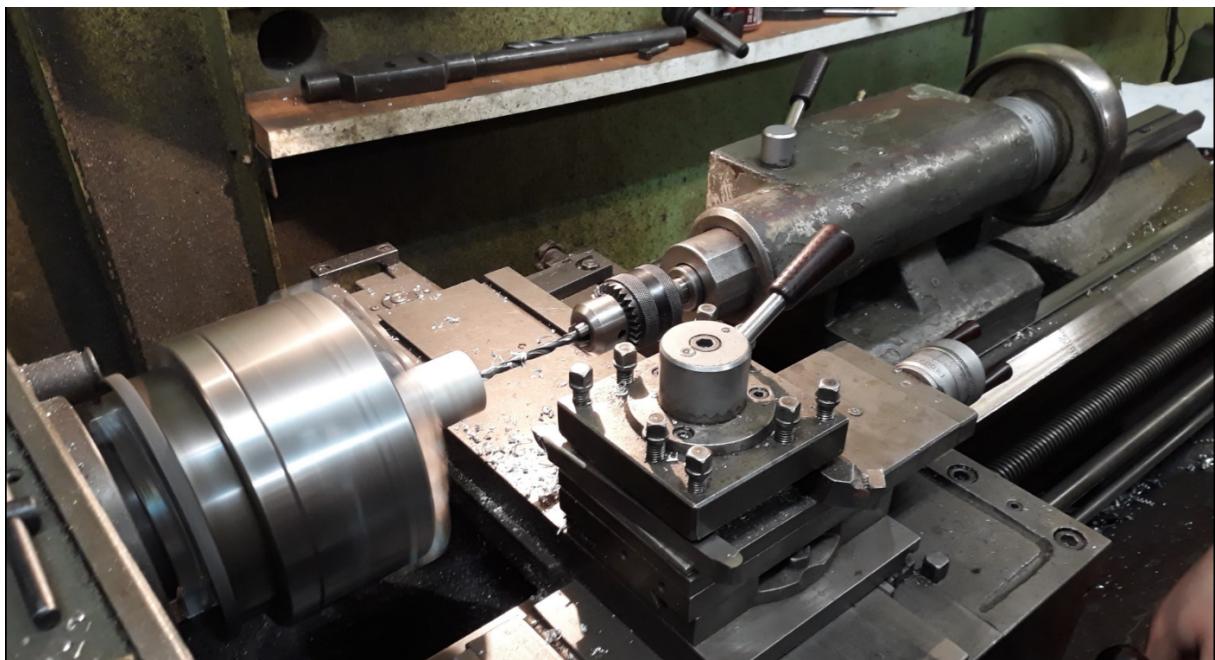
Rysunek 1 Wycinanie fragmentu ramy

### 5.2 Wykonanie ramienia

Wykonanie elementów ramienia wymagało wiercenia, wyfrezowania (Rysunek 1), wytoczenia (Rysunek 1) i szlifowania kilku elementów prowadzących i mocowań.



Rysunek 1 Frezowanie fragmentu mocowania głowicy za pomocą frezarki z funkcją automatycznego posuwu stołu



Rysunek 1 Wiercenie otworu w osi tulei za pomocą tokarki

### 5.3 Składanie

Składanie nie zostało w 100% ukończone ze względu na opóźnienia w wykonaniu niektórych części. Elementy dotychczas ukończone zostały wykonane bardzo dokładnie a ich składanie było precyzyjne.

Dotychczasowe prace warsztatowe pochłonęły ponad 145 roboczych godzin.

## 6 Przygotowanie układu sterowania

### 6.1 Założenia

Przed rozpoczęciem prac na elektroniką i oprogramowanie do wycinarki plazmowej dokonano założeń jak ma wyglądać ich praca i jakie warunki muszą spełniać.

Założono, że:

- Projekt jest niskobudżetowy
- Należy wykorzystać jak najwięcej elementów dostępnych u opiekuna pracy
- Elektronika i oprogramowanie ma być w miarę uniwersalne i modułowe
- Łatwy demontaż i wymiana części
- Prosty kod, który zrozumie każdy, kto będzie chciał rozbudowywać i modyfikować wycinarkę
- Oprogramowanie ma mieć zastosowanie do różnej średnicy rur i mieć możliwość przerobienia na wycinarkę do płyt
- Brak ingerencji w elektronikę wycinarki
- Wycinarka ma pracować w oparciu o GCode, który jest uniwersalnym językiem w obróbce materiałów
- Wycinarka ma pracować bez połączenia z zewnętrznym komputerem
- Ma posiadać interfejs umożliwiający wprowadzanie danych/czytanie danych wprost z maszyny

Wobec tych założeń zdecydowano, że:

- Sercem elektroniki będzie płytka Arduino Mega 2560, bowiem Arduino jest niskobudżetowym rozwiązaniem, ale wystarczającym do amatorskiej maszyny, przy tym Arduino posiada prosty język programowania oparty na C, z dużą liczbą bibliotek ułatwiających pracę z elementami elektronicznymi oraz niezliczoną rzeszę użytkowników, których projekty można zaadaptować do własnych celów
- Kod w GCodzie będzie dostarczany do maszyny za pomocą karty SD
- Wycinarka będzie załączana za pomocą serwomechanizmu
- Napęd będą stanowić 2 silniki krokowe
- Układ będzie wyposażony w wyświetlacz LCD i klawiaturę umożliwiającą interakcję z użytkownikiem

### 6.2 BOM

Wobec stawianych założeń skompletowano następujące części:

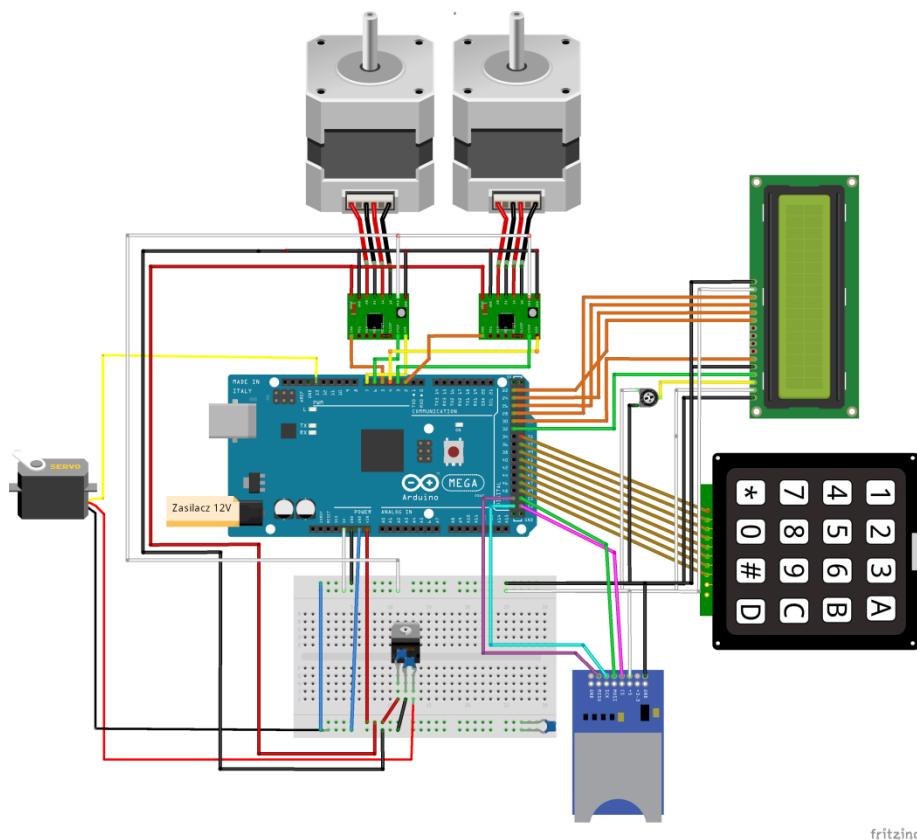
- Płytką Arduino Mega 2560, która jest odpowiedzialna za sterowanie całym układem
- 2 silniki krokowe do napędu osi X (ruch głowicy wzdłuż osi symetrii rury) i osi Y (obrót wokół rury, gdzie Y to współrzędna wynikająca z rozwinięcia rury) odpowiednio 42BYGHW609 i 42BYGHW811, przy czym te silniki są

zbyt słabe i mają zostać wymienione na silniki o większej mocy, wyposażone dodatkowo w motoreduktor

- Serwomechanizm Hitec HS 311 pełni rolę automatycznegołącznika głowicy plazmowej. Po odpowiedniej komendzie w kodzie programu serwomechanizm za pomocą ramienia naciska nałącznik głowicy plazmowej.
- Aby było możliwe łatwe sterowanie silnikami krokowymi użyto sterowników A4988 StepStick, które zapewniają sterowania liczbą kroków, prędkością i kierunkiem silnika oraz umożliwiają korzystanie z mikrokroków (do 1/16 kroku).
- Wyświetlacz LCD 2x16 (model 1602AV20), by wyświetlać informacje i ułatwić odczyt i wprowadzanie danych na maszynę
- Klawiatura membranowa 4x4 do wprowadzania danych
- Czytnik kart microSD, by wprowadzać program bez użycia komputera
- Stabilizator napięcia LM7805, 2 kondensatory ceramiczne 470nF, by zapewnić napięcie 5V na serwomechanizmie
- Kondensator 100nF do tłumienia zakłóceń na zasilaniu
- Płytką prototypową PCB, by przylutować do niej sterowniki silników
- Liczne przewody
- Endstop optyczny do osi Y
- Endstop mechaniczny do osi X

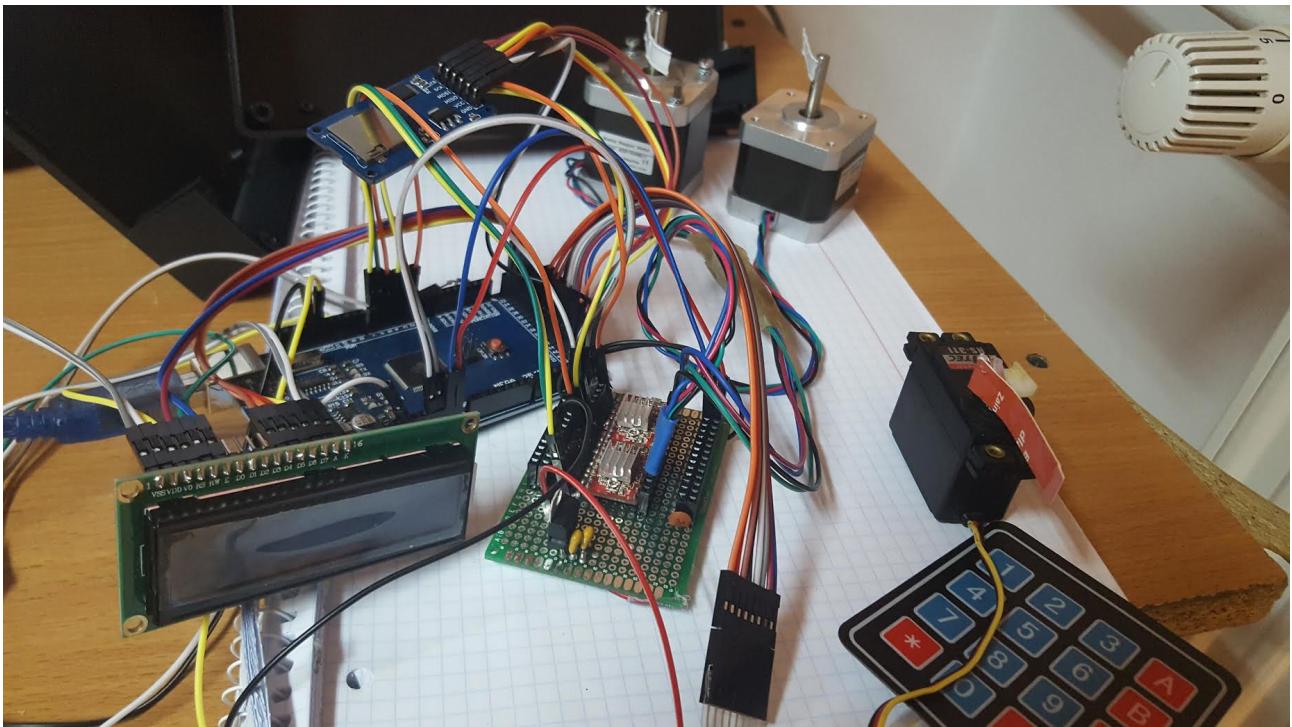
### 6.3 Składanie układu

Układ (Rysunek 1) zasadniczo wymagał tylko wyregulowania napięcia na sterownikach silników, które zależy od rodzaju silnika i wpięcia odpowiednich przewodów w odpowiednie piny. Dodatkowo, aby pozbyć się niezliczonej ilości przewodów postanowiono przylutować sterowniki silnika do płytki prototypowej PCB. Poniżej przedstawiono projekt układu sterowania w programie Fritzing.



fritzing

Rysunek 1 Projekt układu sterowania



Rysunek 1 Układ sterowania po wstępny złożeniu

Układ (Rysunek 1) jest sprawny, możliwy jest ruch silnikami, serwomechanizmem, wprowadzanie informacji za pomocą klawiatury i wyświetlanie informacji na wyświetlaczu. Nie ma możliwość ostatecznego sprawdzenia poprawności układu, gdyż wycinarka nie została jeszcze złożona od strony mechanicznej. Elektronika ma być ostatecznie zamknięta w plastikowej obudowie. Na płycie dołączonej do pracy załączono plik PDF z rysunkiem układu w wyższej rozdzielcości i plik z programu Fritzing, kod programu i filmik z testowej pracy.

#### 6.4 Kod programu

Przed napisaniem programu został wykonany przegląd dostępnych programów, które pracowałyby w maszynie zbliżonej kinematycznie do projektowanej wycinarki. Jedynymi zbliżonymi maszynami były zabawkowe EggBoty, które służą do malowania jajek. Zdecydowano się znaleźć oprogramowanie, które byłoby łatwe do modyfikacji. Niestety większość programów nie interpretowała GCode bezpośrednio na Arduino, lecz były na stałe połączone z komputerem i za pomocą innego oprogramowania, które interpretowało GCode były wysyłane tylko komendy na ostatecznych ruch silników czy serwa. Stanowiło to więc znaczną przeszkodę, bo wycinarka miała sama interpretować GCode i pracować bez zewnętrznego komputera.

Ostatecznie znaleziono program SphereBot (<https://github.com/zaggo/SphereBot>), który stał się jądrem do dalszej pracy z programem. Program był dość prymitywny i umożliwiał tylko ruch po prostej, szybki i roboczy, załączanie serwa, ruch po okręgu tylko przeciwnie do wskazówek zegara, przesył komend tylko z komputera, ale umożliwiaj bezpośrednią interpretację GCode już na Arduino. Funkcje programu zostaną opisane na koniec tego rozdziału.

Wprowadzono szereg zmian w programie SphereBot, by mógł pracować w projektowanej wycinarce. Najważniejsze zmiany to zmiana źródła, z którego dostarczany jest GCode. W obecnym programie dodano odpowiednie funkcje checkSD(), która sprawdza i otwiera kartę SD, getFileName(), która pobiera nazwę pliku z GCode, który ma być otworzony. Wprowadzono zmiany w funkcji getCommand(), by kolejne komendy były czytane z pliku na karcie, a nie żeby program oczekiwiał na komendy w terminalu od użytkownika. Program został wyposażony w komendy wyświetlane na LCD, które kierują użytkownika krok po kroku co ma wpisywać.

Na samym początku wyświetlone jest menu startowe(start menu()), które daje możliwość użytkownikowi tryb pracy. Dostępne są 2 tryby - tryb odczytu gotowego, zapisanego na karcie microSD programu i tryb „interaktywny” wprowadzania, który umożliwia wycinanie prostych kształtów na podstawie wprowadzonych parametrów.

Zasadniczo warto tylko pamiętać, że wszystkie nazwy i wybory dokonujemy za pomocą cyfr (należy pamiętać, by plik z GCode był nazwany za pomocą cyfr i bez rozszerzenia). Anulowanie i kasowanie jest możliwe za pomocą ‘\*’, a zatwierdzanie za pomocą '#'. Wymienione wyżej tryby zostaną opisane w poniższych rozdziałach.

## 6.5 Tryb odczytu

Tryb ten bazuje na odczycie przygotowanego wcześniej GCode na karcie microSD.

Algorytm postępowania jest następujący:

1. Napisz swój GCode
2. Zapisz go na karcie microSD za pomocą cyfr i bez rozszerzenia
3. Włóż kartę do czytnika maszyny
4. Po sprawdzeniu karty wcisnij 1 – tryb odczytu
5. Zatwierdź #
6. Wpisz nazwę pliku za pomocą cyfr i zatwierdź
7. Program uruchomi się automatycznie, jeśli znajdzie taki plik

Program potrafi interpretować następujące komendy:

X-to współrzędne z ruchem posuwistym równolegle do osi rury [0 jest dla położenia głowicy najbliżej silników)

Y-to współrzędne związane z ruchem obrotowym, Y to rozwinięcie powierzchni zewnętrznej rury ( $Y=\alpha * r$ , gdzie  $\alpha$  to kąt, a  $r$  połowa średnicy rury), [Y=0 to górnego położenie głowicy].

Tabela 1 Komendy Gcode

G0 X...Y...	Szybki ruch na współrzędne X i Y
G1 X...Y...F...	Ruch roboczy na współrzędne X i Y, F-szybkość posuwu w mm/min
G3 X...Y...I...J...	Ruch po okręgu przeciwnie do wskazówek zegara, do punktu X,Y o środku w I,J

G4P...	Przerwa ... milisekund
G90	Pozycjonowanie absolutne
G91	Pozycjonowanie przyrostowe
M300S...	Ustawienie serwa od 0-180
M400S...	Dopasowanie ruchu silnika od osi X do nowej średnicy
M401S...	Dopasowanie ruchu silnika od osi Y do nowej średnicy
M18	Wyłączenie silników

Tabela 1 Przykładowy Gcode

G90	Układ absolutny
M401S50	Przypisanie średnicy 50mm
G0X9	Szybki ruch na X 9mm
M300S45	Ruch serwa na 45stopni, załączenie wycinarki
G1X10Y10	Ruch roboczy na X=10mm i Y=10mm
G3I9J11X10Y12	Ruch po okręgu przeciwnie do wskazówek zegara, okrąg o środku I=9mm,J=11mm, do punktu X=10mm i Y=12mm
G0X0Y0	Ruch powrotny na początek układu
M300S0	Ruch serwa na 0; wyłącznie wycinarki
M18	Wyłączenie silników

Program ma jeszcze wiele błędów, nie ma ograniczenia maksymalnego Y, więc program może robić wiele obrotów wokół rury. Nie wprowadzono ograniczenia także na maksymalny X, brak m.in. G2. Wiele parametrów w pliku config także będzie można dopiero określić po zamontowaniu układu sterowania w wycinarce i sprawdzeniu jej poprawności. Określenie punktów zerowych nastąpi także dopiero po montażu.

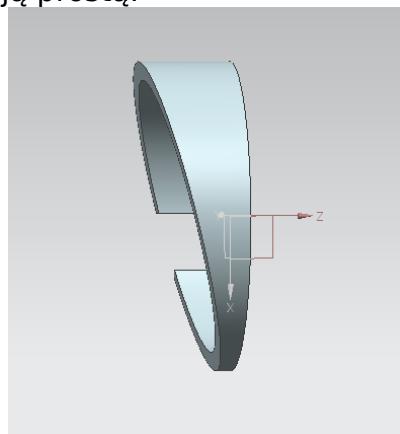
## 6.6 Tryb wprowadzania

Tryb wprowadzania umożliwia cięcie prostych kształtów dzięki wprowadzeniu kilku parametrów. Funkcja odpowiedzialna za ten tryb nazywa się CamModule().

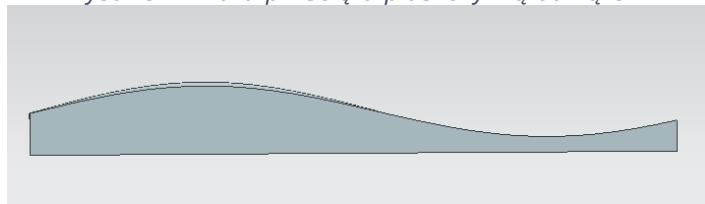
1. Aby uruchomić ten tryb, należy po wyświetleniu się menu wybrać tryb wprowadzania (klawisz '2') i zatwierdzić '#'.
2. Wprowadzić początkowe położenie X od którego zacznie się cięcie
3. Wprowadzić początkowe położenie Y od którego zacznie się cięcie
4. Następnie należy podać średnicę rury (i o każdym wprowadzeniu zatwierdzić '#')
5. Podać kąt jaki tworzy płaszczyzna, która obcina rurę z płaszczyzną prostopadłą do osi rury
6. Podać promień wycięcia (UWAGA! Jeśli wycinany jest okrąg to nie działa cięcie płaszczyzną)

Aby zrozumieć idę działania tego programu należy najpierw sobie wyobrazić jak wygląda przecięcie rury płaszczyzną. Na poniższym rysunku 16 widoczna jest pseudo-rura ucięta skośnie, a na rysunku 17 jej

rozwięcie. Widoczne jest, że jest to linia sinusoidalna, dlatego nie możliwe jest przybliżyć ją prostą.



Rysunek 1 Rura przecięta płaszczyzną od kątem



Rysunek 1 Rozwinięcie rury z rys. 12, widoczna sinusoida

Wzór na krzywą przecięcia płaszczyzny pod kątem z cylindrem można znaleźć w opracowaniu [Unwrapping Curves from Cylinders and Cones Tom M. Apostol and Mamikon A. Mnatsakanian]

I wyraża się on następująco:

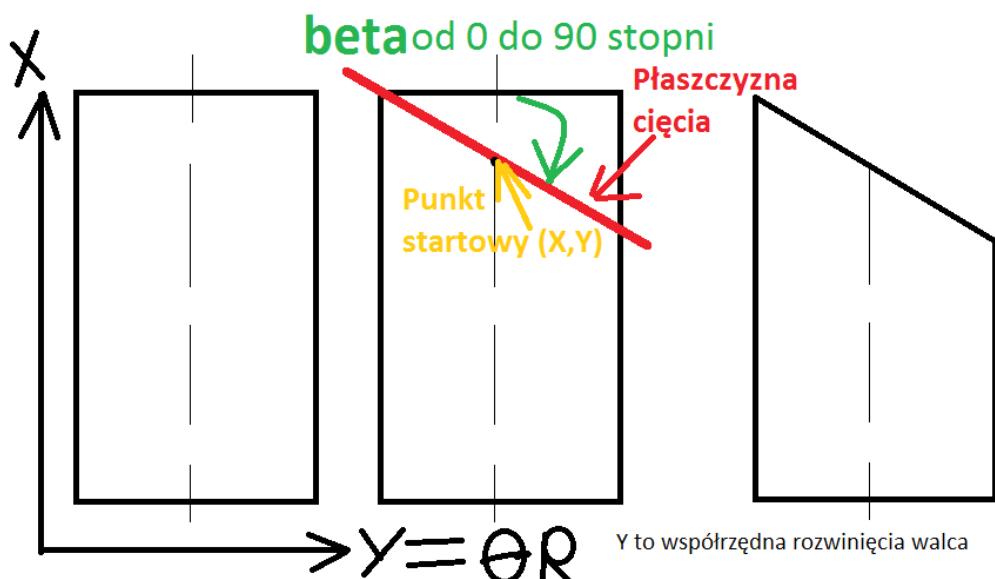
$$u(y) = \frac{D}{2} \tan(\beta) \sin\left(\frac{2y}{D}\right)$$

Gdzie:

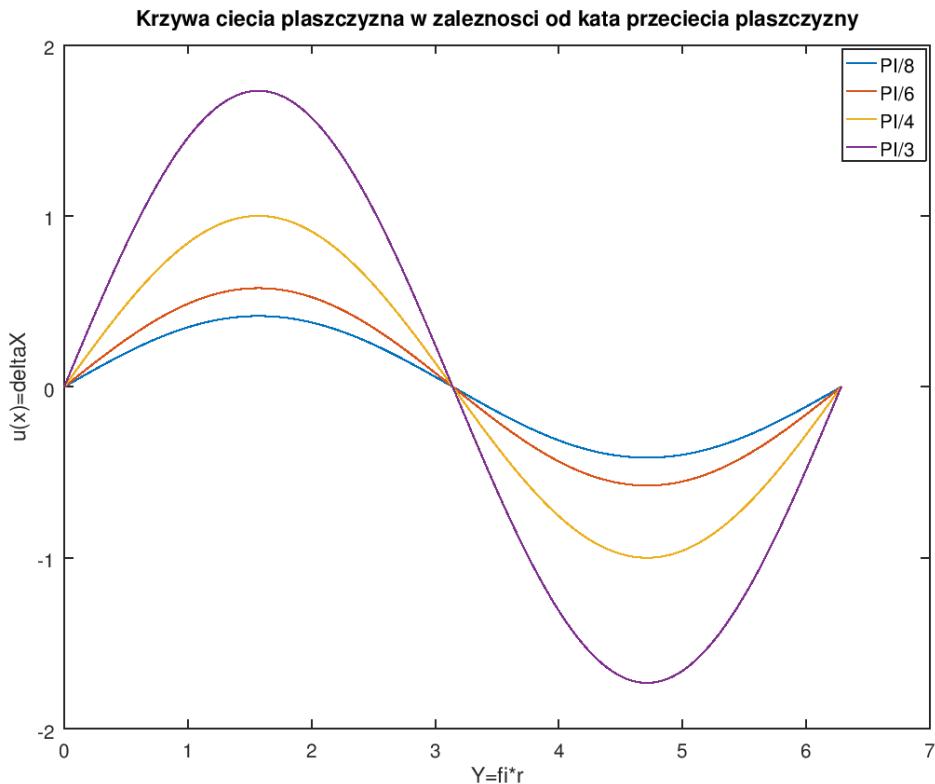
y-to współrzędna rury w rozwinięciu  $y = \frac{\theta D}{2}$ , gdzie D to średnica,  $\theta$  - kąt jaki

tworzy wektor łączący oś rury z danym punktem na jej powierzchni

$\beta$  -kąt jaki tworzy płaszczyzna przecinająca rurę, z płaszczyzną prostopadłą do osi rury



Rysunek 1 Schemat obliczeń cięcia płaszczyzną



Rysunek 1 Wpływ kąta beta - ustawienia płaszczyzny cięcia

Na Rysunek 1 widoczny jest wpływ kąta ustawienia płaszczyzny, widoczne jest, że czym większy kąt to tym bardziej nie można pominać kształtu sinusoidy.

Funkcja  $u(y)$  jest przyrostem współrzędnej  $X$  w funkcji zmiennej  $Y$ , która jest współrzędną rury w rozwinięciu. Schemat działania programu jest prosty, na podstawie zadanej średnicy, kąta cięcia beta, oblicza on funkcję  $u(y)$ , która jest tak naprawdę funkcją kąta  $\theta$ , więc program oblicza współrzędną  $X$  jako sumę początkowego podanego  $X$  i funkcji  $u(\theta)$ , gdzie  $\theta$  zmienia się od  $0$  do  $360^\circ$  z pewnym krokiem.  $Y$  jest natomiast funkcją  $Y = \frac{\theta D}{2} + Y_{\text{początkowe}}$ .

Funkcja CamModule() działa zasadniczo bardzo prosto. Oblicza współrzędne  $X$  i  $Y$  następnie w pętli for zapisuje GCode z odpowiednimi przedrostkami (G1X...Y...) do pliku, dodając przy tym GCode odpowiedzialny za wymiar średnicy, ruch początkowy, włączenie głowicy, wyłączenie silników itp. Następnie zmienia nazwę pliku, z którego program ma czytać GCode na ten dopiero stworzony. Wycinarka wykonuje kod i po ponownym uruchomieniu modułu plik jest kasowany i zapisywany jest nowy.

Kolejną możliwością jest cięcie otworu o osi prostopadłej do osi rury. Zgodnie za opracowaniem [Unwrapping Curves from Cylinders and Cones Tom M. Apostol and Mamikon A. Mnatsakanian].

Rozwinietą krzywą przecięcia 2 rur możemy wyrazić wzorem:

$$u^2(y) = a^2 - \left( d - \frac{D}{2} \sin\left(\frac{2y}{D}\right) \right)^2$$

Gdzie:

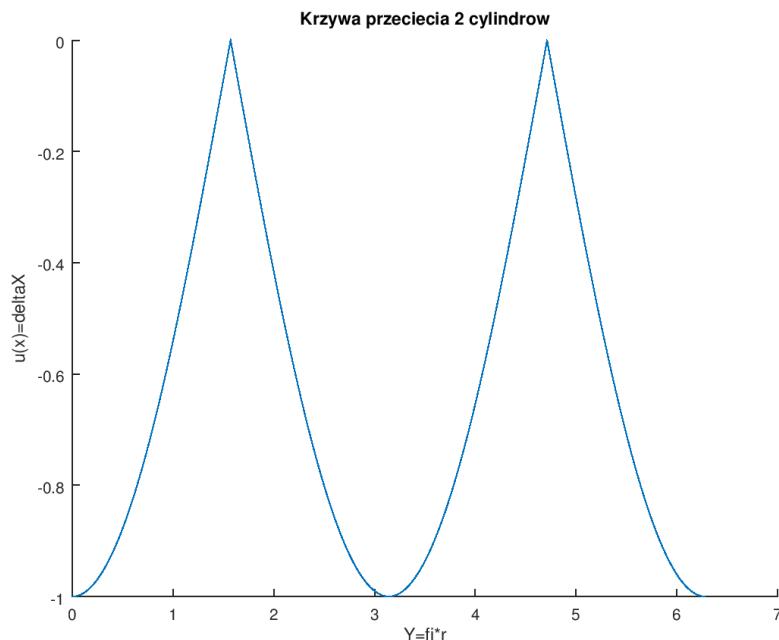
$u(y)$  - zmiana współrzędnej X, w zależności od Y

a - promień otworu

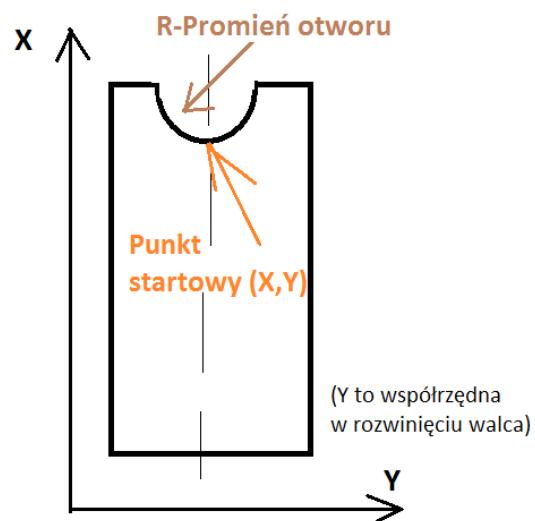
d - odległość między osią otworu, a osią rury

Dla uproszczenia przyjęto, że wycinane będzie tylko pół okręgu na końcu rury, typowy kształt przy łączeniu rur. Zatem interesująca jest tylko ujemna część wyniku:

$$u(y) = -\sqrt{a^2 - \left(d - \frac{D}{2} \sin\left(\frac{2y}{D}\right)\right)^2}$$



Rysunek 1 Przykładowa rozwinięta krzywa przecięcia końca rury i połowy "rury"



Rysunek 1 Podejście do cięcia otworu w rurze

Kod programu jest analogiczny jak w przypadku cięcia płaszczyzną. Do współrzędnej X początkowej dodaje się  $u(y)$  w zależności od kąta i Y także w zależności od kąta, a następnie zapisuje do pliku w postaci GCode i później odczytuje.

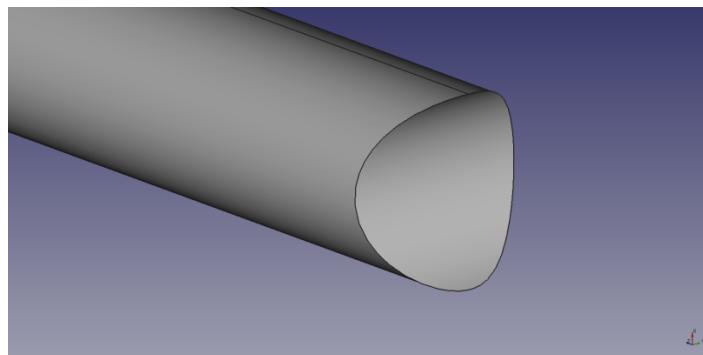
Zaprezentowany moduł jest dosyć ubogi, ale matematyczne wyznaczenie różnych krzywych przecięć rozwiniętych także nie należy do najprostszych.

## 6.7 Przygotowanie GCode

Układ sterowania, do poprawnego sterowania ruchem głowicy podczas obróbki, wymaga GCode, określającego jak powinna poruszać się głowica wokół rury.

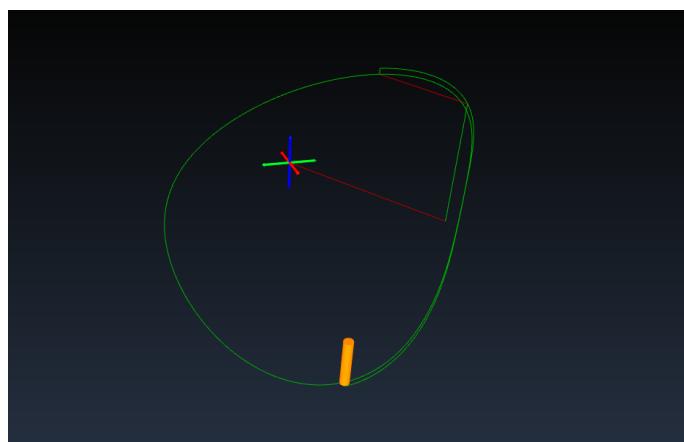
Prace nad jego uzyskaniem rozpoczęto od zamodelowania cylindra w programie CAD, który wybrano ze względu na posiadany przez niego moduł do generowania ścieżek obróbkowych.

W programie zamodelowano cylinder a następnie od jego końca odjęto drugi cylinder, którego osią była pod kątem prostym (Rysunek 1).



Rysunek 1 Cylinder z wymagany kształtem

Wygenerowaną ścieżką, testowo, uruchomiono w programie do symulacji wykonywania instrukcji ruchu zawartych w GCode (Rysunek 1).



Rysunek 1 Ścieżka obróbkowa określona w G-Code

Pomimo wygenerowania ścieżki, nie udało się wykorzystać generowanego kodu z FreeCada w module wycinarki plazmowej. Ścieżka tam generowana jest dla 3-osi, a nie 2. Dodatkowo nie udało się rozwiniąć cylindra z przecięciem, by móc wygenerować GCode dla rozwiniętej powierzchni. Generowany kod jest dodatkowo „za gęsty” kroki są bardzo małe i wycinarka plazmowa oparta na

Arduino nie mogłaby przejść przez tyle lini kodu. Konieczny byłby dodatkowy program, który przeliczałby 3 osi, na 2: X i Y, który stanowi rozwinięcie. Chwilowo porzucono pomysł generacji GCode z FreeCada. Alternatywą może być użycie płatnego oprogramowania do generowania DXF-ów z rozwiniętymi profilami, a jeśli takie oprogramowanie nie możliwości generowania GCode, to zastosować Inkspace z wtyczką GCodeTools.

## 7 Wnioski

- Dzięki uczciwej, prędzej i solidnej pracy kompetentnego zespołu wyposażenie wydziałowego warsztatu zostanie wyposażone w precyzyjną, wydajną i prostą w obsłudze wycinarkę do rur. Dzięki niej możliwe będzie lepsze, szybsze i dokładniejsze wykonywanie kolejnych projektów wymagających spawania rur.
- Zaletą ruchu głowicy wokół rury jest brak wpływu nieosiowej rury na precyzję cięcia.
- Dzięki sterowaniu poprzez mikrokontroler możliwe jest szybkie przeobrażanie maszyny.
- Mocowanie uchwytu do ramy umożliwia wycinanie wygiętych już wcześniej rur oraz nieosiowych.
- Dotychczas wykonane prace warsztatowe zostały wykonane wzorowo.
- Wszystkie wymagania wobec projektu zostały spełnione.

## 8 Załączniki