

Wojciech GACH¹

Opiekun naukowy: Jacek RYSIŃSKI²

ZASTOSOWANIE ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO W PROCESIE FREZOWANIA

Streszczenie: Celem niniejszej pracy była budowa stanowiska doświadczalnego z głowicą frezującą przymocowaną do ramienia robota przemysłowego. Pracę podzielono na część projektową oraz badawczą. Przygotowano model 3D, który sprawdzono pod względem funkcjonalnym oraz wytrzymałościowym. Do budowy stanowiska wykorzystano m.in. robota przemysłowego, falownik oraz głowicę frezującą. Niektóre komponenty wykonano w technologii druku 3D.

Słowa kluczowe: robot przemysłowy, głowica frezująca

APPLICATION OF INDUSTRIAL ROBOT IN MILLING PROCESS

Summary: The aim of this work was to build a test rig with a milling head attached to an industrial robot arm. The work was divided into design and testing. A 3D model was prepared and checked for functionality and durability. The components used to build the station included an industrial robot, an inverter and a milling head. Some components were made using 3D printing technology.

Keywords: industrial robot, milling head

1. Wstęp

W dzisiejszym dynamicznym środowisku przemysłowym innowacje technologiczne i automatyzacja odgrywają kluczową rolę w poprawie efektywności produkcji oraz jakości wyrobów. Jednym z obszarów, który stale przyciąga uwagę przedsiębiorstw jest zastosowanie robotów przemysłowych do różnorodnych zadań w procesach obróbki materiałów. W niniejszej pracy przedstawiono projekt zrobotyzowanego stanowiska oraz badania doświadczalne głowicy frezującej, którą zamocowano do ramienia robota przemysłowego. Głównym celem projektu było zbadanie możliwości i potencjału zastosowania tego rozwiązania w procesach

¹ mgr inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Mechatronika
² dr inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, jrysinski@ubb.edu.pl

obróbki, co może przyczynić się do poprawy jakości wyrobów i zwiększenia efektywności produkcji [2, 6 – 11].

Współczesne przedsiębiorstwa przemysłowe muszą stawić czoło coraz większym wymaganiom dotyczącym precyzji, jakości i elastyczności produkcji. Roboty przemysłowe, ze względu na swoją zdolność do wykonywania precyzyjnych ruchów, stanowią potencjalne rozwiązanie dla wielu zadań obróbki materiałów. Głowica frezująca, przymocowana do ramienia robota daje możliwość dokładnej obróbki materiałów o zróżnicowanej twardości i kształtach.

Podczas realizacji projektu należy zmierzyć się z takimi wyzwaniami:

- jak zaprojektować i zbudować głowicę frezującą przymocowaną do ramienia robota o odpowiedniej precyzji?
- jakie oprogramowanie i narzędzia będą niezbędne do programowania ruchów i parametrów obróbki?
- jakie są najlepsze strategie sterowania, aby osiągnąć optymalne wyniki obróbki?

2. Robot frezujący

Roboty przemysłowe to zaawansowane urządzenia wykorzystywane w celu wykonywania powtarzalnych, złożonych lub niebezpiecznych zadań. Są w stanie wykonywać precyzyjne ruchy z dużą prędkością i dokładnością, co czyni je niezwykle przydatnymi w różnych zastosowaniach [2, 6 – 11].

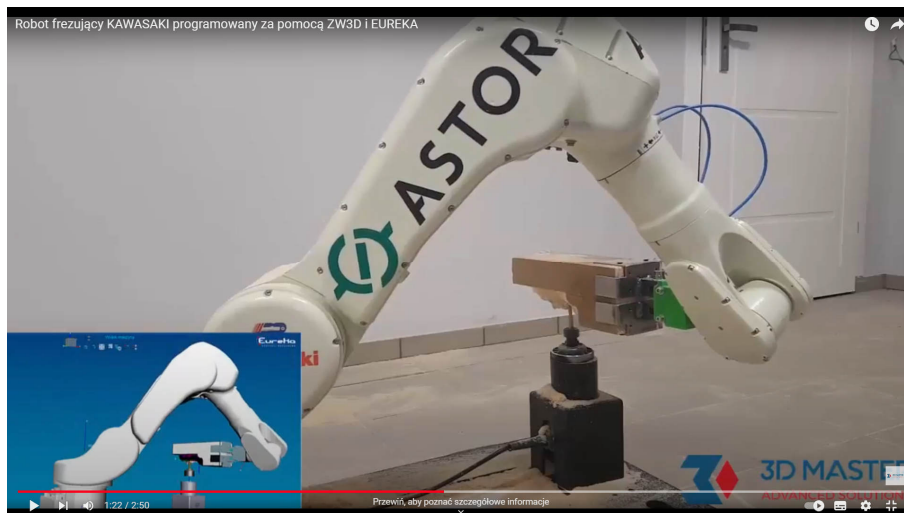
Nowoczesne roboty przemysłowe mają wiele możliwości integracji z zaawansowanymi środowiskami informatycznymi, co umożliwia im jeszcze większą automatyzację procesów produkcyjnych i zapewnia większą efektywność w pracy. Współczesne roboty przemysłowe są wyposażone w zaawansowane sensory i systemy wizyjne, co umożliwia im skuteczne rozpoznawanie otoczenia i dokładne planowanie ruchów. W połączeniu z odpowiednim oprogramowaniem i sieciami komputerowymi mogą być zintegrowane z różnymi systemami informatycznymi, takimi jak systemy zarządzania produkcją, systemy monitorowania i kontroli jakości, systemy CAD/CAM, itp.

Przykładowe możliwości integracji robota przemysłowego z zaawansowanymi środowiskami informatycznymi to [2, 4, 6 – 11].:

- wykorzystanie sieci komputerowych do zdalnego zarządzania robotem oraz zdalnego monitorowania jego pracy,
- wykorzystanie systemów CAD/CAM do automatycznego programowania ruchów robota oraz do projektowania narzędzi skrawających i procesów obróbki,
- wykorzystanie systemów monitorowania i kontroli jakości do automatycznego wykrywania błędów w procesie produkcyjnym oraz do przeprowadzania automatycznych testów jakościowych,
- wykorzystanie sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego do automatycznego uczenia robota i optymalizowania jego pracy.

Frezowanie przy użyciu robotów CNC daje możliwość większej swobody projektowania w porównaniu do tradycyjnych obrabiarek CNC. Roboty te mają niemalże nieograniczoną przestrzeń roboczą oraz zasięg pracy, co umożliwia ich łatwą rozbudowę o zewnętrzne osie. W związku z tym, roboty CNC są bardziej elastyczne i mogą być wykorzystane do wykonywania skomplikowanych cięć. Zastosowanie mniejszych wymiarów wrzeciona do frezowania robotem CNC

w porównaniu do obrabiarek CNC przyczynia się do uzyskania lepszych wyników obróbki. Roboty CNC umożliwiają wykonanie stanowisk, w których nieruchome jest wrzeciono o dużej mocy, a przemieszczaniem zajmuje się wyłącznie robot. Dzięki oprogramowaniu CAM możliwe jest dostosowanie narzędzi w taki sam sposób jak przy detalu, który jest mocowany poza robotem, a wrzeciono jest ruchome (Rys. 1).



Rysunek 1. Przykład aplikacji małego robota frezującego z wrzecionem roboczym zdefiniowanym jako narzędzie zewnętrzne [1]

Ponieważ precyzja wzrosła, a koszty produkcji spadły, roboty są szeroko stosowane w różnych dziedzinach przemysłu. W porównaniu z obrabiarkami sterowanymi komputerowo (CNC), roboty przemysłowe są dużo tańsze, cechują się dużą elastycznością w zastosowaniu oraz znaczną przestrzenią roboczą. Kluczowymi elementami konstrukcyjnymi są napędy wrzeciona, napędy posuwów, system sterowania oraz sztywność konstrukcji. Sztywność robotów przemysłowych zależy od wielu czynników. [2].

W robotach przemysłowych używa się przekładni stożkowych, harmoniczných, planetarnych, ślimakowych, zębatych oraz śrubowych. Poniżej (Rys. 2) przedstawiono rozwiązania różnych producentów robotów przemysłowych.



Fanuc



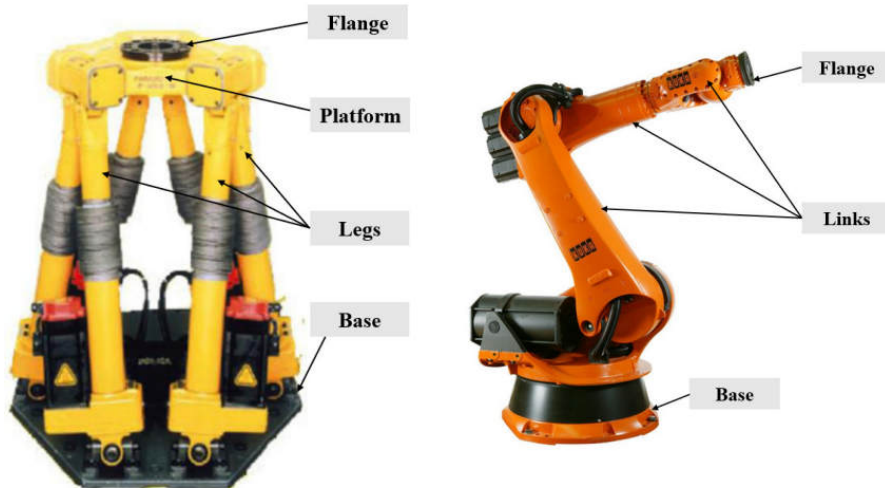
KUKA



Rysunek 2. Rozwiązania przekładni różnych producentów robotów przemysłowych [14]

Do tzw. obróbki skrawaniem, wykorzystywane są dwa typy robotów przemysłowych tj. roboty równoległe i roboty szeregowe. Robot równoległy to rodzaj struktury o zamkniętej pętli, która składa się z ruchomej platformy połączonej ze stałą podstawą za pomocą zestawu identycznych lub różnych równoległych łańcuchów kinematycznych (nóg). Robot szeregowy jest rodzajem struktury otwartej pętli. Składa się z systemu mechanicznego składającego się z wytrzymałych ogniów (ramion) połączonych przegubami obrotowymi lub translacyjnymi. Na kołnierzu można zamocować różne narzędzia do zadań obróbki [2].

Ze względu na konstrukcję pętli zamkniętej, robot równoległy charakteryzuje się dużą sztywnością i dokładnością pozycjonowania w porównaniu z robotem szeregowym. Jednak ta struktura ogranicza operacyjną przestrzeń roboczą robota i elastyczność. W procesie obróbki siła skrawania 500 N wprowadza do seryjnego robota błąd położenia 1 mm, podczas gdy błąd wprowadzany do obrabiarki CNC jest mniejszy niż 0,01 mm (Rys. 3).



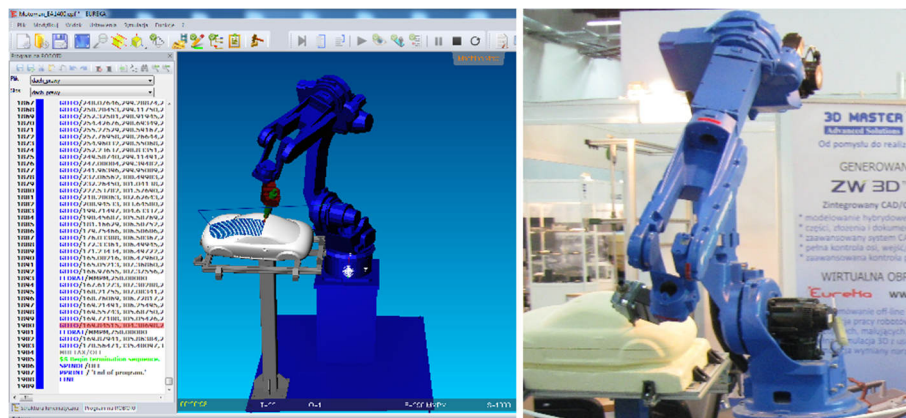
Rysunek 3. Robot równoległy oraz szeregowy [2]

Wyniki eksperymentów wskazują, że sztywność statyczna seryjnych robotów przemysłowych mieści się w przedziale $105\text{--}106 \frac{N}{m}$. Ponadto sztywność zmienia się

wraz ze zmianą konfiguracji postawy robota, skutkuje to nieliniowym rozkładem w przestrzeni roboczej, co prowadzi do niedokładnej obróbki. Dlatego większość robotów przemysłowych działa w dziedzinach o niskich wymaganiach dotyczących precyzji. Liczba robotów przemysłowych w branżach o wysokiej wartości dodanej i precyzyjnych jest znacznie niższa niż liczba obrabiarek CNC.

Zrobotyzowane stanowisko z głowicą frezującą znajduje szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu jak (Rys. 4):

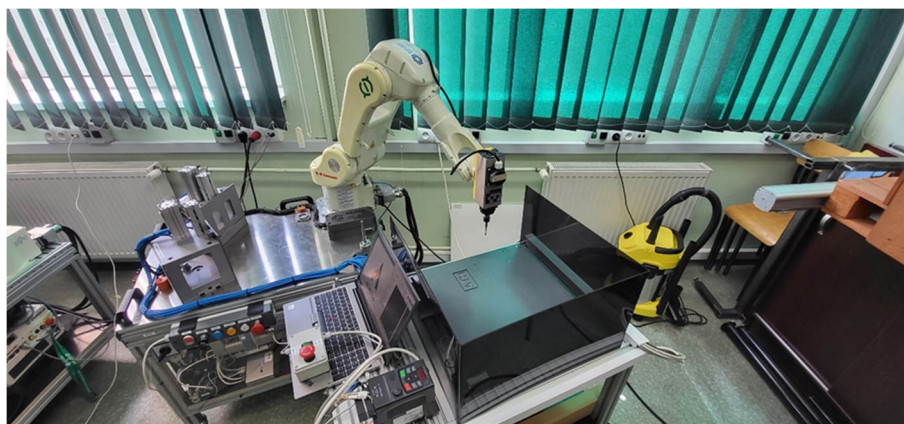
- obróbka metali - może być wykorzystywana do obróbki aluminium, stali nierdzewnej, czy tytanu w tym. Przykładowe zastosowania obejmują frezowanie rowków, otworów i powierzchni płaskich;
- obróbka drewna i tworzyw sztucznych - do frezowania kształtów i detali na meblach, drzwiach, oknach, a także w produkcji opakowań i elementów dekoracyjnych;
- przygotowanie powierzchni - usuwanie rdzy z elementów metalowych lub wykonanie rowków i powierzchni profilowych na betonie itp.;
- prototypowanie i produkcja jednostkowa - dzięki możliwości szybkiej zmiany programów i parametrów obróbki, głowica frezująca na ramieniu robota jest używana w procesie prototypowania i produkcji jednostkowej;
- i inne ...



Rysunek 4. Frezowanie robotem [5]

3. Zrobotyzowane stanowisko badawcze

Zaprojektowane oraz zbudowane stanowisko składa się z robota przemysłowego z przymocowaną głowicą frezującą, przemiennika częstotliwości, pulpitu sterowniczego oraz stołu roboczego. Podstawę wykonano z profili VSlot, natomiast stół mocujący z płyty rowkowanej (Rys. 5). Obszar pracy zabezpieczono osłonami z poliwęglanu. Nadmiar wiórów wyciągany jest odkurzaczem.



Rysunek 5. Stanowisko badawcze

3.1. Robot Kawasaki RS005L

Robot przemysłowy marki Kawasaki Robotics model RS005L posiada udźwig do 5 kg i zasięg do 903 mm. Został wyposażony w silniki z 17-bitowymi enkoderami. Lekkie ramię wraz z wysokoobrotowymi silnikami o dużej mocy zapewniają wysoką prędkość pracy, a smukła konstrukcja zajmuje mało przestrzeni na podłożu [3]. Seria robotów Kawasaki RS posiada wbudowane przewody pneumatyczne i wewnętrzne okablowanie dla czujników oraz zaworów elektromagnetycznych. Ponadto możliwy jest montaż dodatkowego okablowania, rurek lub wyposażenia. Sterowany za pomocą Teach Pendanta [4]. Tryb ręcznego sterowania nazywany jest Teach, natomiast tryb sterowania automatycznego nazywany jest Repeat. Aby przełączyć te tryby należy użyć przełącznika znajdującego się na kontrolerze robota oraz na przełączniku Teach Pendanta (Rys. 6).



Rysunek 6. Teach Pendant Kawasaki [opracowanie własne]

Robot Kawasaki RS005L może być programowany na dwa sposoby: za pomocą komputera PC oraz przy użyciu Block Step lub AS Language. Podczas wykonywania badań posługiwano się językiem AS. Do programowania używane było

oprogramowanie producenta o nazwie K-IDE – Kawasaki Robotics IDE wersji 1.1.3.0. Oprogramowanie to umożliwia łatwe połączenie sieciowe z robotem, pobieranie i wgrywanie programów oraz zdefiniowanych punktów w dowolnym układzie współrzędnych lub pomaga zaprojektować interfejs graficzny ułatwiający pracę z Teach Pendantem. W robocie ustalono adres IP 10.10.43.130 port 23. Ustawienia sieciowe komputera operatora zostały ustawione następująco: Adres IP: 10.10.43.65, Maska podsieci: 255.255.255.0, Brama domyślna: 10.10.43.1, Preferowany serwer DNS: 212.106.184.5, Alternatywny serwer DNS: 10.10.10.10. Oba urządzenia wpięto kablem sieciowym w infrastrukturę sieciową sali 204A.

Producent udostępnia również oprogramowanie symulacyjne K-ROSET. Podczas badań wykorzystano darmową serię „LITE” wersji programu 1.8.4. Oprogramowanie to wykorzystano do celów sprawdzających poprawność wygenerowanej trajektorii robota po obróbce CAM i postprocessingu. Zostało to szczegółowiej opisane w dalszej części pracy [3, 4].

3.2. Elektrowrzeciono Teknomotor 0,55 kW

Elektrowrzeciona marki Teknomotor zaprojektowano do pracy z „miękkimi” materiałami takimi jak: drewno, tworzywa sztuczne, pianki. Elektrowrzeciona posiadają pojedyncze łożyskowanie wału, co zapewnia optymalne warunki pracy dla niewielkich obciążeń osiowych, są fabrycznie wyważane dynamicznie, dostosowane do pracy ciągłej. Zakres dopuszczanych obrotów tych elektrowrzecion wynosi do 24000 obr/min (Rys. 7).

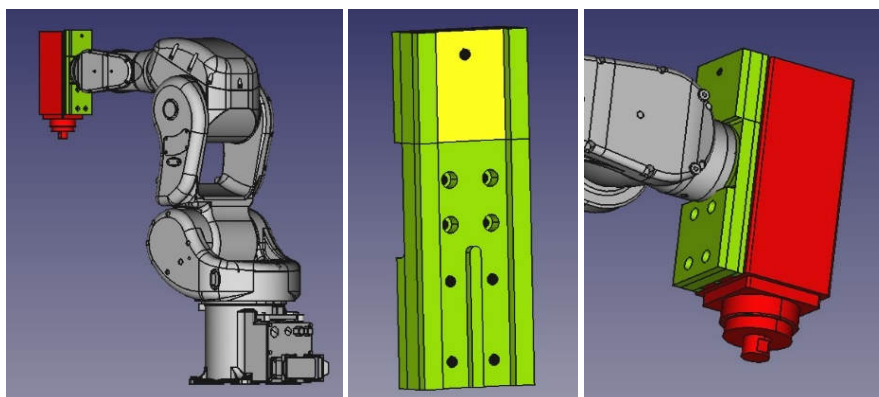


Rysunek 7. Elektrowrzeciono z zamontowanym uchwytem oraz frezem
[opracowanie własne]

Ze względu na bardzo mały udźwignięcie robota należy uwzględnić typ narzędzia obróbczego oraz jego zamocowanie. Środek ciężkości narzędzia należy zamontować jak najbliżej kiści robota.

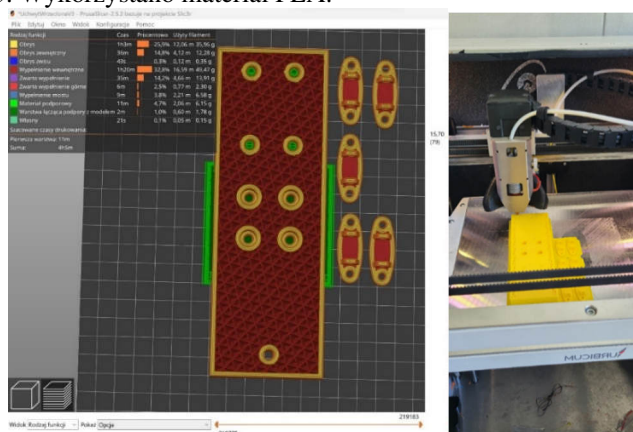
Zamodelowano uchwyt mocujący, który należy zamontować na kiść robota 4 śrubami M5, a następnie nasunąć na niego wrzeciono frezarskie i skrócić je 5 śrubami M6. Waga całkowita wrzeciona z uchwytem i śrubami wynosi 3700 g (Rys. 8).

Uchwyt zaprojektowano w programie FreeCad 0.20. Następnie wyeksportowano do pliku bryłowego .STL, wykonano translację na plik maszynowy .gcode w programie PrusaSlicer 2.5.2 oraz wydrukowano na Urbicum DX.



Rysunek 8. Projekt uchwyty w FreeCad 0.20 [opracowanie własne]

Oprócz uchwyty wrzeciona zaprojektowano oraz wykonano również uchwyty na kabel sterowniczy silnika do montażu na robota (Rys. 9). Wypełnienie uchwyty wynosi 35%. Wykorzystano materiał PLA.



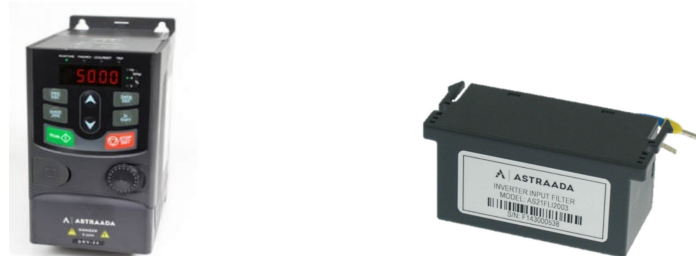
Rysunek 9. Model uchwyty w PrusaSlicer 2.5.2 oraz wydruk [opracowanie własne]

Do wrzeciona frezarskiego zamontowano frez uniwersalny do tworzyw sztucznych, marki Fenes, średnicy 5 mm o długości ostrza 30 mm, długość całego frezu to 100 mm, materiał frezu to HSS. Jest to frez grupy NFPo. Montowany jest on w tulei stożkowej o średnicy 8 mm, a następnie przykręcony nakrętką ER16 mini za pomocą klucza do tego przystosowanym.

3.3. Przemiennek częstotliwości Astraada DRV-24

Astraada DRV-24 (Rys. 10a) to seria falowników ogólnego przeznaczenia, które mogą sterować pracą silników w zakresie mocy 0.4~110 kW, zarówno w trybie skalarnym, jak również bezczujnikowym wektorowym. Przemienneki Astraada DRV-24 posiadają wbudowane wejście bezpieczeństwa STO (Safe Torque Off), umożliwiające uruchomienie procedury bezpiecznego stopu urządzenia.

Zastosowanie wejścia STO ogranicza konieczność stosowania dodatkowych elementów sterujących, a tym samym upraszcza budowę układu napędowego [12].



Rysunek 10. a - Przebieg częstotliwości Astraada model DRV-24 [12],
b - Filtr klasy C3 [12]

Do obsługi falownika wykorzystano narzędzie Astraada Drive Studio. Połączenie z przebiegiem odbywa się poprzez przejściówkę RS485 na USB, która wpięta jest w zaciski RS485 (+) oraz RS485 (-) na przebiegu częstotliwości. W oprogramowaniu można łatwo konfigurować sprzęt, logować wprowadzane zmiany, wyświetlać błędy, wykonywać proste programy dzięki wbudowanemu kontrolerowi PLC. Najważniejszą funkcją jest wbudowany oscyloskop, na którym wyświetlane i opracowywane zostały badania wykonywane w niniejszej pracy. Oscyloskop umożliwia również eksport monitorowanych wartości w zadanym czasie do plików .csv co znacznie ułatwia późniejszą analizę danych w popularnych programach kalkulacyjnych.

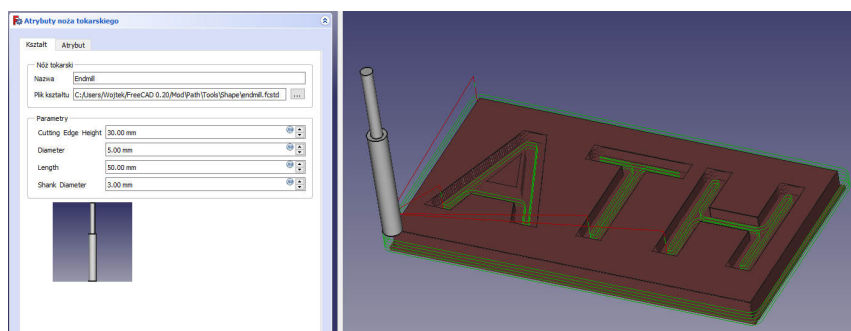
W celu redukcji zakłóceń do falownika zamontowano dodatkowo zalecany przez producenta filtr EMC klasy C3 AS24FLI2004 (Rys. 10b). Użyto kabli ekranowanych. Falownik zabezpieczono wyłącznikiem nadprądowym B10A. Z racji zasilania jednofazowego w przebiegu częstotliwości wrzeczono frezarskie podłączone na trójkąt. Falownik, wyłącznik nadprądowy oraz złącza elektryczne zamontowano na szynie DIN, którą z kolei przykręcono do stołu roboczego. Obok zamontowano pulpit sterowniczy z przyciskiem bezpieczeństwa, wpiętym w funkcję STO falownika (wciśnięcie przycisku sprawi awaryjne zatrzymanie silnika) oraz przyciskiem bistabilnym z oznaczeniami START/STOP, załączającym lub wyłączającym wrzeczono (złącze dyskretne S1 na przebiegu częstotliwości).

W przebiegu częstotliwości skonfigurowano odpowiednie parametry, zgodnie z dokumentacją producenta, na podstawie tabliczki znamionowej silnika oraz przeprowadzono autokalibrację dynamiczną silnika bez obciążenia.

3.4. Obróbka CAD/CAM

Do obróbki CAD/CAM wykorzystano otwarte oprogramowanie FreeCad wersji 0.20.2. Program ten daje możliwość przygotowania dokumentacji 2D/3D oraz posiada wiele darmowych dodatków takich jak, m.in. moduł Path do obróbki CAM, moduł architektoniczny czy moduł Points do analizy chmury punktów. Dodatkowo umożliwia rysowanie i obróbkę w konsoli za pomocą języka Python.

Elementem obrabianym była prostokątna płytko o wymiarach 95x50x5mm z wygrawerowanym na głębokość 3 mm napisem „ATH” czcionką Roboto-Bold (Rys.11).



Rysunek 11. Definiowanie atrybutów frezu [opracowanie własne]

Zdefiniowano wielkość bryły, a następnie określono właściwości freza. Ponieważ typ akcji to grawerowanie na powierzchni płyty z tworzywa sztucznego, wybrano 0 mm przyrostu w osi Z. W przypadku tej aplikacji najważniejszym parametrem narzędzia frezarskiego jest średnica frezu (5 mm) oraz długość ostrza roboczego (30 mm).

Jako działanie CAM wybrano obróbkę konturu. Wykonano cztery operacje tj. przejścia - najpierw obrzeża płytki, a następnie każdą literę napisu. Po każdej operacji ustalono, aby frez wracał do pozycji początkowej znajdującej się 5 mm nad początkiem układu współrzędnych. W każdej operacji ustala się wysokość warstwy obróbki – jest to parametr, który będzie zmieniany podczas badań.

Oprogramowanie posiada symulator CAM, który pozwala użytkownikowi ocenić poprawność pracy. Na tym etapie można wykryć wszelkie nieprawidłowości związane ze zbędnymi ruchami procesowymi lub na przykład brak odjazdów.

Wybrano procesor obróbki na „centroid” oraz system G54 dotyczący punktu zerowego maszyny obrabiającej. Domyślnie kod generowany jest w tzw. układzie bezwzględnym, czyli znaki określają, w której z czterech ćwiartek znajduje się punkt docelowy. Wygenerowano plik z instrukcjami ruchu i zapisano go z rozszerzeniem gcode.

3.5. Postprocesing gcode na język AS

W celu przeprowadzenia badań konieczne jest wykonanie autorskiego postprocesora, który przetłumaczy gcode na Język AS, interpretowany przez robota Kawasaki. Wykorzystano popularną aplikację Microsoft Office Excel z obsługą makr. Aplikacja ta jest wyjątkowo przydatna w symulacji ścieżki współrzędnych osi XY wykorzystując moduł do rysowania wykresów. W wygenerowanym pliku po obróbce CAM należy uwzględnić tylko komendy ruchu przestawczego G0, ruchu roboczego G1 i ruchy po okręgu G2 i G3.

```
G0 X17.5000 Y17.5000
G0 Z7.0000
G1 X17.5000 Y17.5000 Z2.0000
G1 X17.5000 Y2.5000 Z2.0000
```

Rysunek 12. Przykład gcode [opracowanie własne]

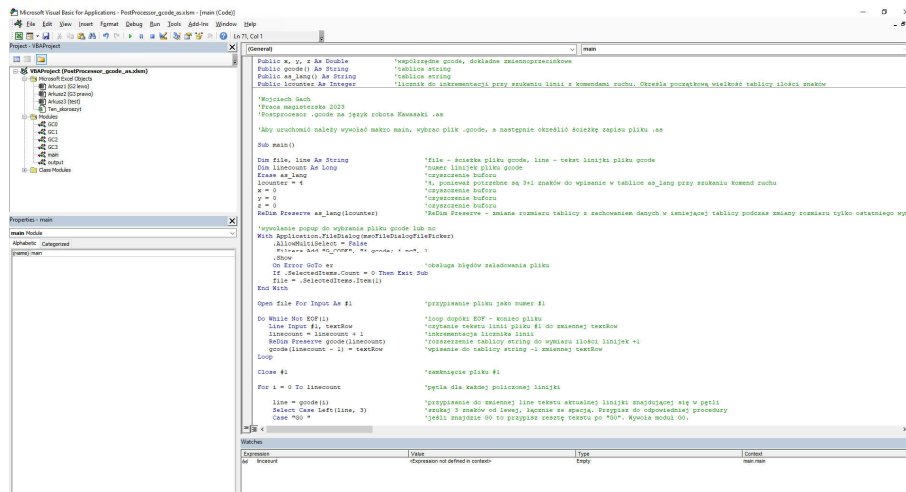
Powyższy gcode przedstawia ruch jałowy dojazdowy G0 nieuwzględniający procesu skrawania do punktu X17.5 Y17.5, następnie ruch w osi Z do punktu Z7.0. Później przejście ruchem liniowym procesowym do punktu X17.5, Y17.5, Z2.0 oraz X17.5, Y2.5, Z2.0. Język AS nie rozróżnia ruchu dojazdowego od roboczego i możliwe jest w nim przesuwanie narzędzia w interpolacji przegubowej (JMOVE) oraz liniowej kartezyjskiej (LMOVE). Prędkość ruchu w języku AS deklaruje się przed linią z rozkazem wykonania ruchu. Polecenia związane z przemieszczaniem w gcode odnoszą się do punktu zerowego układu współrzędnych, aby to wykorzystać w robocie można użyć funkcji TRANS(X,Y,Z,O,A,T), w której określa się punkty w układzie współrzędnych względem tego punktu zerowego. W składni tej funkcji określa się najpierw koordynaty XYZ, a następnie zmiany orientacji narzędzia OAT, które w przypadku frezarki 3-osiowej nie zmieniają się. Przykładowa konwersja przedstawiona jest na rysunku poniżej:

```
G2 X52.5000 Y-0.0000 Z-1.0000 I-1.7678 J-1.7678
G1 X52.5000 Y-95.0000 Z-1.0000
G2 X50.0000 Y-97.5000 Z-1.0000 I-2.5000 J0.0000

C1MOVE punkt + TRANS (52.3,0.95,-1,0,0,0)
C2MOVE punkt + TRANS (52.5,0,-1,0,0,0)
LMOVE punkt + TRANS (52.5,-95,-1,0,0,0)
C1MOVE punkt + TRANS (51.77,-96.77,-1,0,0,0)
C2MOVE punkt + TRANS (50,-97.5,-1,0,0,0)
```

Rysunek 13. Przykład składni programu [opracowanie własne]

Wygenerowany kod, zapisany do pliku z rozszerzeniem .as, należy zaimportować do K-IDE, przesłać do wcześniej skonfigurowanego robota, zmodyfikować pozycję #start w trybie Teach, a następnie uruchomić program w trybie Repeat z opcją jednokrotnego wykonania programu.



Rysunek 14. Fragment programu w Excel [opracowanie własne]

4. Badania doświadczalne

4.1. Badanie prędkości obrotowej wału silnika

Pierwszym wykonanym badaniem było porównanie prędkości obrotowej silnika zmierzonej za pomocą specjalistycznego czujnika do pomiaru prędkości – tachometru oraz prędkości obliczonej. Na wale silnika oryginalnie została umieszczona przez producenta szara taśma. Wykorzystano sterowanie skalarnie dla kilku zadanych częstotliwości.

Do wykonania pomiaru prędkości wykorzystano tachometr optyczno-stykowy Lutron DT1236L. Jego zakres pomiarowy wynosi 0,5 – 100 000 obr/min, dokładność 0,05%, rozdzielczość pomiaru 0,1 obr/min dla prędkości <1000 RPM.



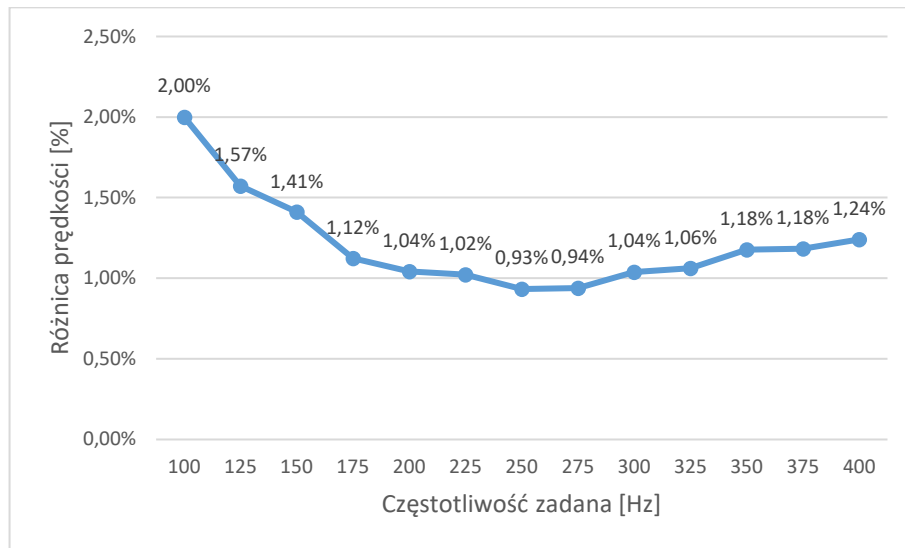
Rysunek 15. Pomiar prędkości tachometrem [opracowanie własne]

Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1 oraz rys. 16.

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów [opracowanie własne]

Częstotliwość zadana	Prędkość odczytana z tachometru	Prędkość obliczona	Różnica
[Hz]	[obr/min]		%
100	5880	6 000	2.00%
125	7382	7 500	1.57%
150	8873	9 000	1.41%
175	10382	10 500	1.12%
200	11875	12 000	1.04%
225	13362	13 500	1.02%
250	14860	15 000	0.93%
275	16345	16 500	0.94%
300	17813	18 000	1.04%
325	19 293	19 500	1.06%
350	20 753	21 000	1.18%
375	22 234	22 500	1.18%
400	23 702	24 000	1.24%

Producent nie podaje znamionowej prędkości obrotowej silnika, jaka występuje przy znamionowo obciążonym silniku, więc nie jest możliwe obliczenie poślizgu.

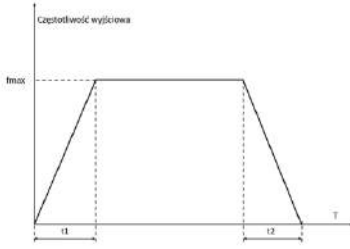
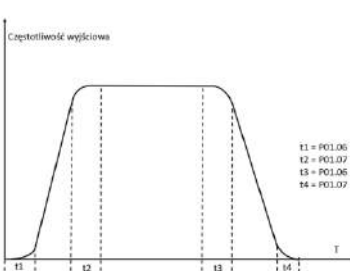


Rysunek 16. Zestawienie wyników badań prędkości obrotowej [opracowanie własne]

4.2. Badanie zatrzymania awaryjnego wrzeciona funkcją hamowania rampą

Hamowanie rampą czasową polega na tym, że po otrzymaniu sygnału STOP, falownik stopniowo zmniejsza częstotliwość wyjściową z aktualnej do 0 Hz, a następnie przechodzi w stan stop. Jednak należy zachować ostrożność przy korzystaniu z tego rodzaju hamowania, ponieważ w tym procesie silnik może działać jako prądnicą i zacząć ładować kondensatory w przemienniku. Jeśli napięcie na kondensatorach przemiennika wzrośnie zbyt szybko, może to spowodować błąd. W przemiennikach częstotliwości Astraada jest możliwość wyboru krzywej, według której nastąpi wyhamowywanie silnika. Jest to charakterystyka liniowa lub charakterystyka krzywej

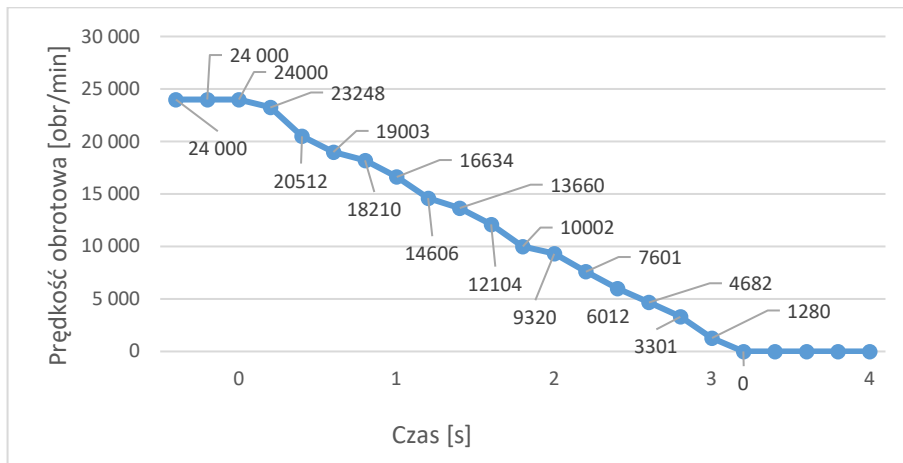
Badanie polegało na mierzeniu czasu zatrzymania z kilku wyznaczonych prędkości wrzeciona bez obciążenia oraz porównanie rzeczywistego czasu z zadaniem uwzględniając wartość prądu maksymalnego, a następnie wyznaczeniu charakterystyki liniowej dla prędkości maksymalnej wykorzystując dane z plików .csv wygenerowanych przez oscyloskop w Astraada Drive Studio. Czas t_2 charakterystyki liniowej ustawiono w parametrze P00.12, a czasy hamowania charakterystyki S w parametrach P01.06 i P01.07. To, według której charakterystyki napędzać i hamować ma silnik ustalono w parametrze P01.05 [13].

Kod	Nazwa	Opis funkcji	Wartość domyślna	Edycja
P01.05	Charakterystyka przyspieszenia i hamowania	<p>0: Liniowa Wyjściowa częstotliwość rośnie lub maleje liniowo.</p>  <p>1: Charakterystyka typu S. Jest powszechnie stosowana w zastosowaniach stopniowego, płynnego uruchamiania i zatrzymywania (np. w windach).</p>	0	⊙
P1.06	Czas etapu przyspieszania (początek charakterystyki S)	0.0-50.0s	0.1s	⊙
P1.07	Czas etapu hamowania (koniec charakterystyki S)	 <p>t1 = P01.05 t2 = P01.07 t3 = P01.06 t4 = P01.07</p>	0.1s	⊙

Rysunek 17. Parametry falownika - czas hamowania [13]

Tabela 2. Wyniki badań - charakterystyka liniowa [opracowanie własne]

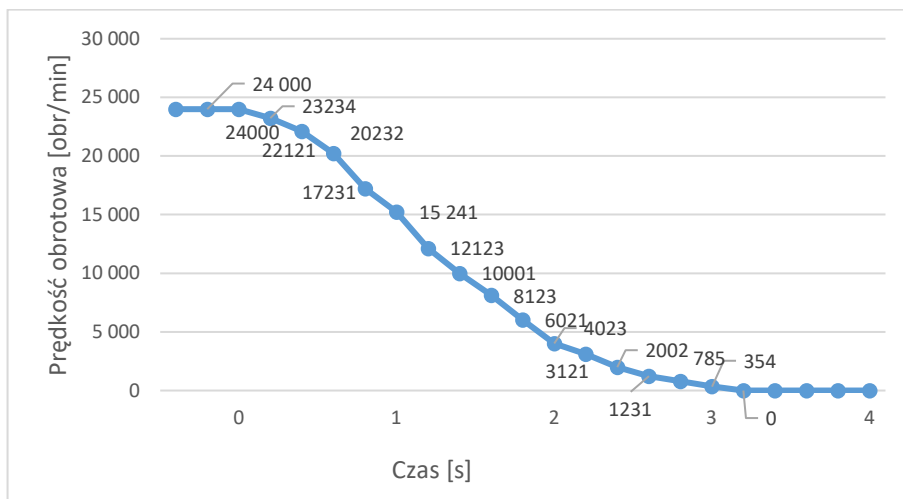
Charakterystyka liniowa				
Częstotliwość zadana	Prędkość odczytana	Czas zatrzymania zdefiniowany t2	Czas zatrzymania rzeczywisty	Prąd maksymalny
[Hz]	[obr/min]	[s]	[s]	[A]
400	24 000	3,0	3,2	0,7
375	22 500	3,0	3,2	0,6
350	21 000	3,0	3,1	0,6
325	19 500	3,0	2,9	0,6
300	18 000	3,0	3,1	0,6



Rysunek 18. Wyznaczona charakterystyka liniowa [opracowanie własne]

Tabela 3. Wyniki badań - charakterystyka krzywej S [opracowanie własne]

Charakterystyka krzywej S				
Częstotliwość zadana	Prędkość odczytana	Czas zatrzymania zdefiniowany t3+t4	Czas zatrzymania rzeczywisty	Prąd maksymalny
[Hz]	[obr./min]	[s]	[s]	[A]
400	24 000	0,5 + 0,5	3,2	0,7
375	22 500	0,5 + 0,5	3,1	0,6
350	21 000	0,5 + 0,5	3,1	0,6
325	19 500	0,5 + 0,5	3,0	0,6
300	18 000	0,5 + 0,5	2,9	0,6



Rysunek 19. Wyznaczona charakterystyka krzywej S [opracowanie własne]

4.3. Badanie parametrów frezowania

Przystępując do zadania, przygotowano w oprogramowaniu FreeCAD kilka programów w języku gcode dla różnych wysokości skrawania. Następnie każdy program przetłumaczono na język robota as. Kolejnym krokiem było uruchomienie tych programów w oprogramowaniu K-IDE, edycja prędkości posuwu robota w linijce „SPEED XX MM/S ALWAYS”, gdzie „XX” oznacza wartość wpisywaną przez operatora i integracja ich z programem symulacyjnym K-ROSET, aby ocenić poprawność wygenerowanych trajektorii robota - w tym brak kolizji. W kolejnym kroku wczytano programy na robota. Równolegle połączono się z oprogramowaniem przemiennika częstotliwości, na wbudowanym oscyloskopie wyświetlono parametry takie jak moc silnika (P17.08 według dokumentacji producenta), prąd wyjściowy (P17.04), prędkość obrotową (P17.05) oraz moment obrotowy (P17.09). Badano wpływ możliwości silnika oraz robota na zmiany prędkości skrawania w płytach z materiału PVC oraz PET. Zmierzono czas cyklu każdego programu, dobrano najbardziej optymalne wartości.

Obliczono obroty narzędzia oraz dedykowany posuw. Zestawienie obliczonych wartości znajduje się poniżej:

Tabela 4. Wstępnie dobrane parametry [opracowanie własne]

Materiał freza	Prędkość skrawania producenta vc [m/min]	Średnica freza [mm]	Obroty narzędzia obliczone [obr/min]	Posuw obliczony [mm/min]	Posuw obliczony [mm/s]	Posuw na ostrze fz [mm/ostrze]	Ilość ostrzy	Obroty narzędzia [obr/min]
HSS	150	5	9 549	458.37	7.64	0.048	1	9 549

Obliczona prędkość wrzeciona powinna wynosić około 10 000 [obr/min] przy prędkości liniowej robota około 7,5 [mm/s]. Wielu producentów podaje, że w przypadku frezowania tworzyw sztucznych materiałem frezu HSS można zwiększać obroty do prędkości maksymalnej, ponieważ są to na tyle miękkie materiały, że nie ryzykuje się zerwaniem frezu i łatwiej jest sterować samym posuwem i wysokością ścieżki.

Dla maksymalnej prędkości wrzeciona obliczenia wyglądają następująco – Tab. 5.

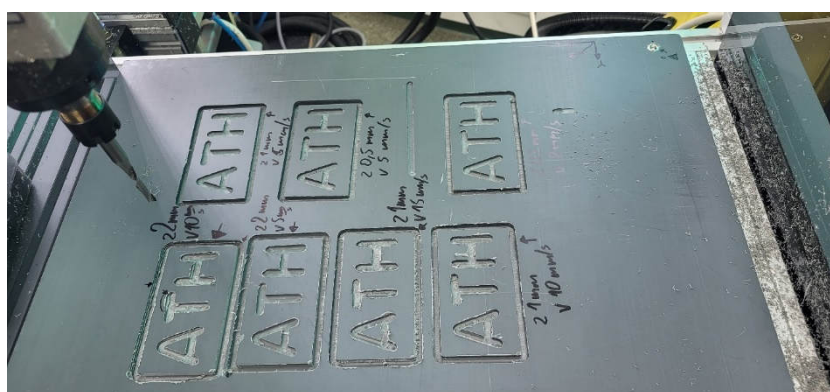
Tabela 5. Obliczone parametry przy maksymalnej prędkości wrzeciona [opracowanie własne]

Materiał freza	Prędkość skrawania obliczona [m/min]	Średnica freza [mm]	Obroty narzędzia [obr/min]	Posuw obliczony [mm/min]	Posuw obliczony [mm/s]	Posuw na ostrze fz [mm/ostrze]	Ilość ostrzy	Obroty narzędzia [obr/min]
HSS	377	5	24 000	1152	19.20	0.048	1	24 000

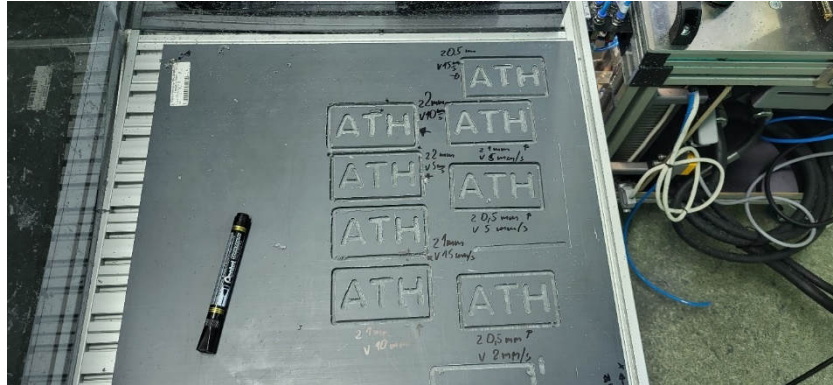
Jak widać posuw powinien wynosić ok. 20 mm/s. Dlatego, aby zbadać możliwości robota zaczęto od wysokości ścieżki 0,5 mm i prędkości 2 mm/s.



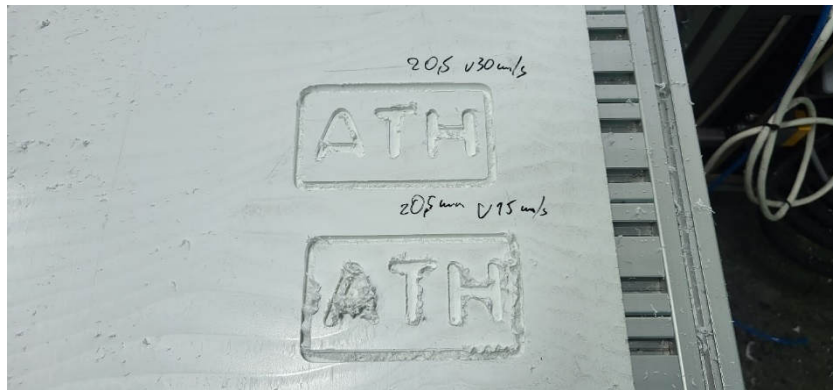
Rysunek 20. Zdjęcie grawerowanych napisów podczas testów [opracowanie własne]



Rysunek 21. Zdjęcie grawerowanych napisów podczas testów [opracowanie własne]



Rysunek 22. Porównanie wygrawerowanych próbek, ocena jakości [opracowanie własne]



Rysunek 23. Porównanie wygrawerowanych próbek, ocena jakości [opracowanie własne]



Rysunek 24. Monitorowanie parametrów falownika i silnika podczas badań [opracowanie własne]

Tabela 6. Wyniki badań parametrów frezowania [opracowanie własne]

Materiał	Wysokość ścieżki [mm]	Prędkość liniowa	Moc silnika max. [%]	Moc silnika max. [kW]	Moment obrotowy max. [%]	Moment obrotowy max. [Nm]	Prąd max. [A]	Czas cyklu [s]	Uwagi jakościowe
PVC	0.5	2	23.40%	0.13	22.60%	0.049	0.7	2732	Brak
PVC	0.5	5	23.70%	0.13	22.80%	0.050	0.7	1094	Brak
PVC	0.5	15	27.50%	0.15	32.50%	0.071	0.8	367	Brak
PET	0.5	15	23.80%	0.13	23.90%	0.052	0.8	367	Duży narost, nieczyste cięcie
PET	0.5	30	26.70%	0.15	29.60%	0.065	0.8	188	Narost, nieczyste cięcie
PVC	1	5	23.80%	0.13	26.10%	0.057	0.8	593	Brak
PVC	1	10	27.40%	0.15	31.80%	0.070	0.8	298	Lekka deformacja litery T
PVC	1	15	34.30%	0.19	36.30%	0.079	0.8	200	Widoczne poszarpania materiału
PVC	2	5	34.30%	0.19	35.80%	0.078	0.8	405	Widoczne krzywizny, drgania frezu
PVC	2	10	35.20%	0.19	36.30%	0.079	0.8	204	Widoczne krzywizny i przesunięcia stołu

Dodatkowe wnioski na temat oceny jakościowej przedstawiono w tabeli poniżej:

Tabela 7. Rozwiązania deformacji jakościowych [opracowanie własne]

Duże zużycie na powierzchni natarcia i przyłożenia	Deformacja krawędzi skrawającej	Tworzenie się narostu	Rysy prostopadłe do krawędzi skrawającej	Wykruszenia na krawędzi skrawającej	Złamanie płytki skrawającej	Zła jakość powierzchni	Drgania	
↓	↓	↑	↓	↑				prędkość skrawania
↑		↑		↑	↓	↓	↑	posuw

5. Podsumowanie

Celem niniejszej pracy była budowa stanowiska doświadczalnego z głowicą frezującą przymocowaną do ramienia robota przemysłowego. Monitorując wartości falownika nie stwierdzono żadnych przeciążeń silnika podczas badań. Moc dobranego wrzeciona jest wystarczająca do celów frezowania w tworzywach sztucznych, a nawet

i w aluminium. Jednakże w tym przypadku należało zmienić frez na mniejszy. Wiąże się z tym również konieczność dokładniejszego zabezpieczenia stanowiska. Badania prowadzono tak aby nie przeciążać robota.

Biorąc pod uwagę wykonane badania frezowania w różnych materiałach można dojść do następujących konkluzji:

- Oceniając czas cyklu w funkcji jakości powierzchni – najlepsze wyniki otrzymano dla PVC. Optymalnymi parametrami była wysokość ścieżki 0,5 mm przy prędkości 15 mm/s.

- Dla materiału PET wyniki badań były niezadowolające. Stan powierzchni po obróbce nie kwalifikował przedmiotu do dalszej pracy / montażu. Zrezygnowano z kolejnych prób ze względu na tworzenie się narostów. Aby wyeliminować ten problem, należałoby zwiększyć wartość posuwu - jednakże nie pozwalają na to możliwości konstrukcyjne robota przemysłowego. Można by go wyposażyć w frez kilkuostrzowy z węgla spiekane, a frezowanie zacząć od niższych prędkości obrotowych wrzeciona.

LITERATURA

1. Serwis internetowy: <https://www.youtube.com/watch?v=uQEaiQffJ9A> – 04.2023.
2. WU K., LI J., ZHAO H., ZHONG Y.: Review of Industrial Robot Stiffness Identification and Modelling. Applied Sciences 12(2022)17, 8719; <https://doi.org/10.3390/app12178719>.
3. Serwis internetowy: <https://kawasakirobotics.com/eu-africa/products-robots/rs005l/?wovn=pl> - 04.2023.
4. Kawasaki Heavy Industries,LTD. Kawasaki Robot Controller E Series, Installation and Connection Manual – 2016.
5. Serwis internetowy: <https://iautomatyka.pl/czy-roboty-przemyslowe-zastapija-obrabiarki-cnc/> - 04.2023.
6. SCHMID D., BAUMANN A., KAUFMANN H., PAETZOLD H., ZIPPEL B.: Mechatronika, REA 2009.
7. JI W., WANG L.: Industrial robotic machining: A review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Springer 103(2019), 1239-1255.
8. ZAEH M.F., ROESCH O.: Improvement of the machining accuracy of milling robots, Production Engineering 8(2014), 737–744.
9. De LUCA A.: Robot components, Sapienza Universita Di Roma 2012, https://www.diag.uniroma1.it/deluca/rob1_en/04_CompsSensorsProprio.pdf.
10. ANDERSON G. D.: Variable Frequency Drives: Installation and Troubleshooting, Gary D. Anderson, 2020.
11. GIRI F.: AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Applications, Wiley-IEEE Press 2013.
12. Serwis internetowy: <https://www.astor.com.pl/> - 04.2023
13. Instrukcja obsługi Przemienniki częstotliwości Astraada DRV-24 – ASTOR, 8.2020.
14. Serwis internetowy: <https://www.youtube.com/shorts/u1pYJRRgK9U> - 04.2023
15. GACH W.: Projekt oraz badania doświadczalne głowicy frezującej przymocowanej do ramienia robota przemysłowego, praca magisterska, Bielsko-Biała 2023.