



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

WYDZIAŁ INŻYNIERII METALI I INFORMATYKI PRZEMYSŁOWEJ

Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania

Praca dyplomowa magisterska

Implementacja oprogramowania sterującego oraz monitorującego proces ciągnięcia drutu oraz realizacja procesu ciągnięcia cynku

Implementation of software for control and monitoring of wire drawing process and realization of zinc drawing process

Autor: inż. *Kacper Pawlikowski*
Kierunek studiów: *Informatyka Stosowana*
Opiekun pracy: dr. Inż. *Piotr Kustra*

Kraków, 2020

„Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.): „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystyczne wykonanie albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.) „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej "sądem koleżeńskim"”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.”

Kraków, dnia

Podpis dyplomanta

Spis treści

Spis treści.....	3
Wstęp.....	5
1. Cel pracy	6
2. Proces ciągnięcia drutu	7
2.1. Realizacja procesu ciągnięcia.....	7
2.2. Budowa typowych ciągarok.....	8
2.2.1. Ciągarki bębnowe	8
2.2.2. Ciągarki ławowe	9
3. Biozgodne stopy metali	9
3.1. Biozgodność magnezu oraz jego stopów.....	11
3.2. Biozgodność cynku oraz jego stopów	11
4. Stanowisko do ciągnięcia drutu	12
4.1. Komponenty mechaniczne oraz elektroniczne	13
4.1.1. Serwomotor 1kW LiteON LMM102N2LN07.....	13
4.1.2. Sterowniki cyfrowe ISA-7.....	14
4.1.3. Panel HMI 7" LiteON EasyLynk EZ070-WGA40 Ethernet	15
4.1.4. Przekładnia Eldar WVRB-115-10-P2	16
4.2. Okablowanie oraz komunikacja między komponentami.....	17
4.2.1. Standard RS-485.....	17
4.2.2. Protokół Modbus	19
4.2.3. Podłączenie przewodów komunikacyjnych	20
5. Programowanie sterowników oraz panelu kontrolnego	22
5.1. Użyte oprogramowanie.....	22
5.2. Rejestry sterowników ISA-7	22
5.2.1. Podział parametrów	23
5.2.2. Modyfikowanie parametrów przy pomocy oprogramowania	23

5.3.	Konfiguracja połączenia	24
5.4.	Ustawienie trybu pracy sterowników	27
5.5.	Konfiguracja cyfrowych wejść kontrolerów	30
5.5.1.	Funkcja włączająca serwo	31
5.5.2.	Funkcje prędkości.....	32
5.5.3.	Funkcje momentu	33
5.5.4.	Funkcja kierunku obrotu.....	34
5.5.5.	Funkcja awaryjnego zatrzymania oraz limit obrotów	34
5.6.	Zaprojektowanie graficznego interfejsu użytkownika.....	37
5.6.1.	Sterowanie prędkością ciągnięcia	38
5.6.2.	Hamulec.....	40
5.6.3.	Odczyt momentu oraz zapis do pliku	42
6.	Realizacja testowego ciągnięcia.....	47
6.1.	Użyty materiał wsadowy	47
6.2.	Parametry ciągnięcia	47
6.3.	Przebieg procesu ciągnięcia	47
7.	Badanie drutu uzyskanego podczas testów stanowiska	50
7.1.	Przeprowadzenie próby dwukierunkowego przeginania drutu	50
7.2.	Analiza uzyskanych wyników	52
7.3.	Dyskusja wyników	55
8.	Podsumowanie	56
9.	Bibliografia.....	57

Wstęp

Za sprawą dynamicznego rozwoju badań nad różnymi rodzajami materiałów do zastosowań medycznych a co za tym idzie znacznego poszerzenia wiedzy naukowej w dziedzinie materiałoznawstwa, powraca się do starszych koncepcji, których realizacja wcześniej nie była możliwa ze względu na brak odpowiedniej technologii. Jednym z pomysłów, który przeżywa obecnie renesans jest użycie biozgodnych stopów metali do produkcji wszelkiego rodzaju implantów do zastosowań chirurgicznych. Naukowcy zajmujący się tymi zagadnieniami w pierwszej połowie ubiegłego wieku natrafili na problemy związane ze zbyt gwałtowną degradacją implantów w organizmach żywych, niezadawalającymi właściwościami mechanicznymi uzyskanych materiałów czy też zbyt dużą toksycznością użytych stopów. Dodatkowo na tamten okres przypadł gwałtowny rozwój materiałów nie podlegających erozji, między innymi stali nierdzewnej, która znalazła się w centrum zainteresowań świata medycznego i zaprzestano badań nad kłopotliwymi stopami biozgodnymi. Obecnie naukowcy dysponują znacznie nowocześniejszymi metodami tworzenia nowych materiałów. Aparatura badawcza jest bardziej precyzyjna a badania nad nowymi stopami przebiegają dużo sprawniej. Każdego miesiąca opisuje się nowe materiały o unikalnych właściwościach a pierwsze implanty z biozgodnych stopów metali doczekały się już komercyjnych zastosowań.

Jednym z innowatorskich zastosowań biozgodnych stopów metali, nad którym prowadzone są obecnie badania [1,2], jest wykorzystanie ich do produkcji nici chirurgicznych przy zastosowaniu procesu ciągnięcia drutu. Jest to szczególnie wymagające ponieważ oprócz warunku biozgodności materiał z którego ma być wykonana nić musi spełnić szereg wymagań co do właściwości mechanicznych. Do prowadzenia badań o tej tematyce. oprócz zaplecza naukowego oraz szeregu urządzeń pomiarowych, potrzebna jestciągarka, która pozwoli na sprawne wykonanie próbnycyągów oraz monitorowanie całego procesu. Dodatkowo, takie stanowisko wymaga zaimplementowania oprogramowania, które umożliwi sterowanie procesem oraz zbieranie danych pozyskanych w trakcie ciągnięcia.

1. Cel pracy

Celem pracy magisterskiej jest implementacja oprogramowania sterującego procesem ciągnięcia drutu oraz monitorującego jego przebieg. Stworzony system ma realizować proces ciągnięcia drutu z biogodnych materiałów.

Do zrealizowania głównego celu pracy postawiono następujące cele szczegółowe:

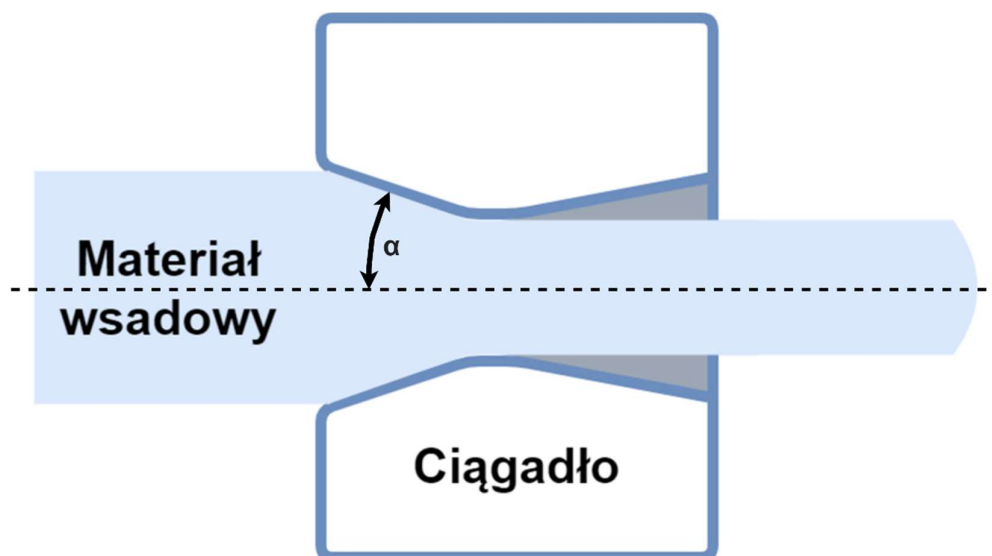
- Skonfigurowanie połączenia sieciowego pomiędzy panelem HMI a sterownikami serwowatorów,
- Implementacja oprogramowania sterującego oraz wykonanie graficznego interfejsu użytkownika przeznaczonego dla panelu HMI,
- Realizacja testowego ciągnięcia drutu oraz przeprowadzenie próby dwustronnego zginania i analiza wyników.

2. Proces ciągnięcia drutu

Ciągnięcie [3] jest jednym z procesów przeróbki plastycznej w wyniku którego zmiana ulega przekrój (zmniejszenie jego powierzchni czy też zmiana kształtu) materiału podlegającego przeciąganiu. Proces ten może być realizowany zarówno na zimno jak i na ciepło lub gorąco. Ciągnięcie jest stosowane do produkcji drutów, prętów, kształtowników czy też rur.

2.1. Realizacja procesu ciągnięcia

Głównym celem ciągnięcia drutu jest uzyskanie produktu o określonym rozmiarze. Efekt ten uzyskuje się poprzez przeciąganie materiału wsadowego przez stożkowy otwór o przekroju mniejszym od przekroju materiału wsadowego tak jak zostało to przedstawione na rysunku 2.1. Narzędzie, przez które przeciągany jest drut w procesie ciągnięcia nazywane jest ciągadłem.



Rysunek 2.1. Schemat procesu ciągnięcia, α – kąt ciągnięcia

Należy pamiętać, że redukcja rozmiaru przekroju materiału wsadowego jest limitowana przez maksymalną siłę ciągnięcia jaką można przyłożyć do drutu bez jego przerwania a ta jest zależna zarówno od własności materiału wsadowego, jego kształtu, wielkości i prędkości odkształcenia, geometrii ciągadła czy też stosowanych smarów. Z tego powodu zazwyczaj w celu otrzymania drutu o żądanych wymiarach przeciąga się go kolejno przez serię ciągałek o coraz mniejszych wymiarach otworu, tak aby jednorazowa redukcja przekroju nie przekroczyła granicy wyznaczonej przez odkształcenie jednostkowe granicznie, czyli maksymalne

odkształcenie jakie można zadać danemu materiałowi w trakcie pojedynczego ciągu bez naruszenia spójności materiału.

2.2. Budowa typowych ciągarek

Obecnie w powszechnym użyciu występują dwa rodzaje ciągarek:

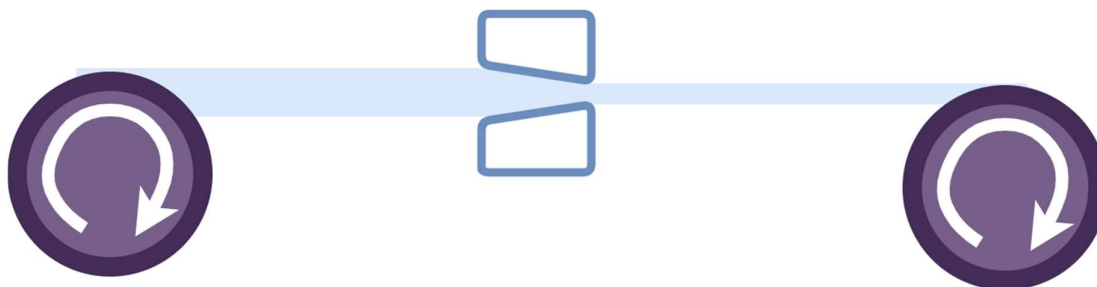
- Ciągarki łańcuchowe,
- Ciągarki bębnowe.

2.2.1. Ciągarki bębnowe

Są to urządzenia, które służą do ciągnięcia materiału, który nadaje się do zwijania na bębnie. Ciągarki bębnowe są powszechnie wykorzystywane do wytwarzania drutów czy też rur o niewielkich średnicach. Urządzenia te dzielimy ze względu na ilość bębnow roboczych a co za tym idzie ilość ciągadeł, przez które jest przeciągany materiał wsadowy w czasie pojedynczego ciągu. W ten sposób wyróżniamy:

- Ciągarki jednostopniowe (jednociągi, ciągarki jednobębnowe) – redukcja średnicy podczas ciągu jest uzyskiwana tylko na jednym ciągadle a maszyna posiada jeden bęben roboczy,
- Ciągarki wielostopniowe (wielociągi, ciągarki wielobębnowe) – materiał wsadowy jest przeciągany przez wiele ciągadeł przy pomocy wielu bębnow roboczych. Umożliwiają uzyskanie znacznie większej redukcji przekroju niż ma to miejsce w przypadku ciągarek jednostopniowych.

Uproszczony schemat ciągarki bębnowej przedstawiono na rysunku 2.2.

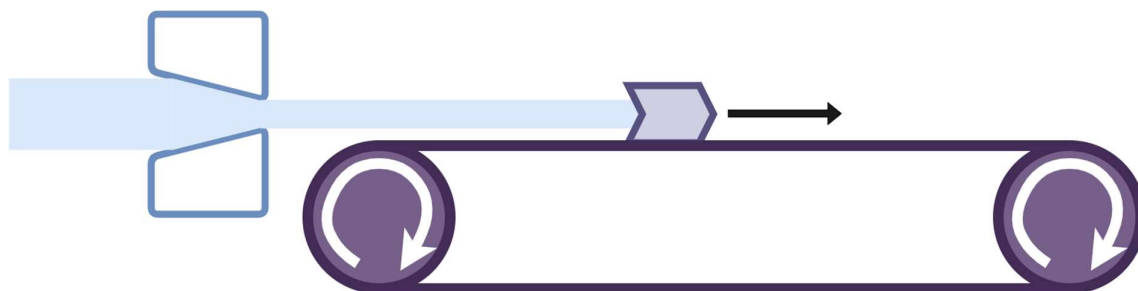


Rysunek 2.2. Uproszczony schemat ciągarki bębnowej, jednostopniowej

2.2.2. Ciągarki ławowe

W odróżnieniu od wariantu bębnowegociągarki ławowe przykładają siłę ciągnięcia przy pomocy liniowo poruszającego się mechanizmu. Zazwyczaj urządzenia te składają się z nieruchomego ciągadła oraz elementu mocującego materiał wsadowy, który poruszając się po liniowych prowadnicach przeciąga materiał. W zależności od sposobu przykładania siły ciągnięcia rozróżnia sięciągarki zębatkowe, linowe, hydrauliczne, łańcuchowe [4]. Sposób działania typowejciągarki ławowej został przedstawiony na rysunku 2.3.

Urządzenia te wykorzystuje się wszędzie tam gdzie produkt uzyskany w wyniku ciągnięcia nie może być nawijany (pręty, kształtowniki, grubsze rury). Maksymalna długość wyrobów jest ograniczona rozmiarami urządzenia.



Rysunek 2.3. Uproszczony schematciągarki ławowej

3. Biozgodne stopy metali

Badania nad zastosowaniem implantów z biozgodnych stopów metali były prowadzone już w pierwszej połowie XX wieku [5, 6]. Jednym z pierwszych metali badanych pod tym kątem był magnez oraz jego stopy. Początkowo eksperymenty nie rokowały zbyt dobrze – czysty magnez miał słabe właściwości mechaniczne co utrudniało jego przeróbkę plastyczną i powodował podrażnienie tkanki znajdującej się wokół. Dodatkowo podczas reakcji magnezu z tkanką dochodziło do ulatniania się wodoru, który spowalniał leczenie ran. Dopiero badania nad różnymi stopami magnezu przyniosły lepsze rezultaty[6]. Eksperymentowano z różnymi składami stopów aby poprawić ich właściwości mechaniczne i spowolnić ich absorpcję przez organizm. Niestety nie opracowano wtedy zadowalającej technologii a wprowadzenie stali nierdzewnej do zastosowań chirurgicznych jeszcze bardziej zmniejszyło zainteresowanie stopami metali, które są rozpuszczalne w żywym organizmie. Dopiero w ostatnich latach ponownie doceniono możliwości biozgodnych stopów metali w

zastosowaniach medycznych i można ponownie zaobserwować zainteresowanie tymi materiałami.

Implanty czy też powłoki wykonane z biogodnych stopów metali mogą być stosowane w chirurgii wszędzie tam gdzie leczona tkanka potrzebuje czasowego wzmocnienia w celu regeneracji powstałych w niej uszkodzeń. Ich wykorzystanie nie wymaga wykonania powtórnych operacji w celu usunięcia implantów gdy proces leczenia zachodzący dzięki ich obecności dobiegnie końca. Równoległe do procesu degradacji takiego implantu zachodzi proces regeneracji tkanki, która stopniowo zastępuje metal.

Dodatkowo stopy metali mogą mieć znacząco lepsze właściwości mechaniczne w porównaniu do wykorzystywanych teraz powszechnie biodegradowalnych materiałów, takich jak specjalne polimery czy ceramika. Przykładowo, stosując odpowiednie stopy możemy uzyskać implanty o module Younga oraz wytrzymałości na rozciąganie bardziej zbliżonej do tej jaką charakteryzuje się tkanka kostna[7], dlatego jednym z obszarów gdzie znajdują zastosowanie takie materiały jest wytwarzanie implantów do zabiegów chirurgicznych na kościach. W tabeli 3.1 zestawiono materiały stosowane w implantologii oraz tkankę kostną z odpowiadającą im wytrzymałością na rozciąganie.

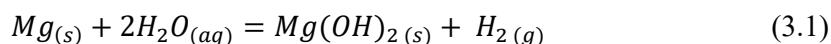
Tabela 3.1. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie wybranych materiałów [1,7]

Tkanka/materiał	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
istota zbita kości	35 - 283
istota gąbczasta kości	1,5 - 38
ściana tętnicy	0,5 - 1,72
tytan (TiAl6V4, odlew)	830 - 1025
tytan (TiAl6V4, kuty)	896 - 1172
stal nierdzewna 316L	480 - 620
Syntetyczny hydroksyapatyt	40-200
szkło bioaktywne	40-60
DL-PLA	29 - 35
Mg0.8Ca	428
Mg(0-4)Ca	210 - 240
Cynk	95 - 120

3.1. Biozgodność magnezu oraz jego stopów

Magnez jest metalem występującym naturalnie w organizmie człowieka i w niewielkich ilościach jest wręcz niezbędny do jego prawidłowego funkcjonowania. Z tego powodu był to jeden z pierwszych materiałów, który zaczęto badać pod kątem wykonania z niego biozgodnych implantów w całości rozpuszczalnych w ludzkim Ciele. Obecnie biozgodne implanty z magnezu doczekały się już komercyjnej produkcji ale w środowisku naukowców wciąż istnieją obawy spowodowane gwałtowną korozją tego materiału w ludzkim ciele[8].

Magnez oraz jego stopy ulegają korozji w środowisku wodnym. W wyniku reakcji magnezu z wodą powstaje wodorotlenek magnezu oraz wodór zgodnie z reakcją 3.1[7].



$Mg(OH)_2$ w normalnych warunkach tworzy na powierzchni magnezu warstwę ochronną, która spowalnia dalszą korozję metalu. Niestety gdy stężenie chlorków w otoczeniu przekroczy 30 mmol/l[7,8] dochodzi do przemiany wodorotlenku magnezu w wysoce rozpuszczalny chlorek magnezu. Ponieważ płyny ustrojowe w ludzkim ciele zawierają około 150 mmol/l chlorków, implanty wykonane z czystego magnezu ulegają w nim szybkiej korozji. Już wczesne badania wykazywały, że w okolicach implantów z magnezu formują się pęcherzyki gazu wydzielanego podczas korozji, które mogą mieć niekorzystny wpływ na regenerację tkanki [3].

3.2. Biozgodność cynku oraz jego stopów

Cynk charakteryzuje się niską temperaturą topnienia wynoszącą 420°C i niską reaktywnością w stanie płynnym co sprawia, że wytwarzanie i obróbka elementów z tego metalu jest stosunkowo prosta.

Cynk jest jednym z mikroelementów niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania naszego organizmu. Wspiera on między innymi funkcje immunologiczne, syntezę białek, poprawne działanie niektórych enzymów, ekspresję genów oraz wiele innych [7, 8]. Zalecane dzienne spożycie cynku dla dorosłego człowieka wynosi około 10 mg na dzień chociaż większe spożycie nie jest dla człowieka bardzo toksyczne i może on przyjąć nawet 100 mg na dzień przez okres kilku dni [8,9].

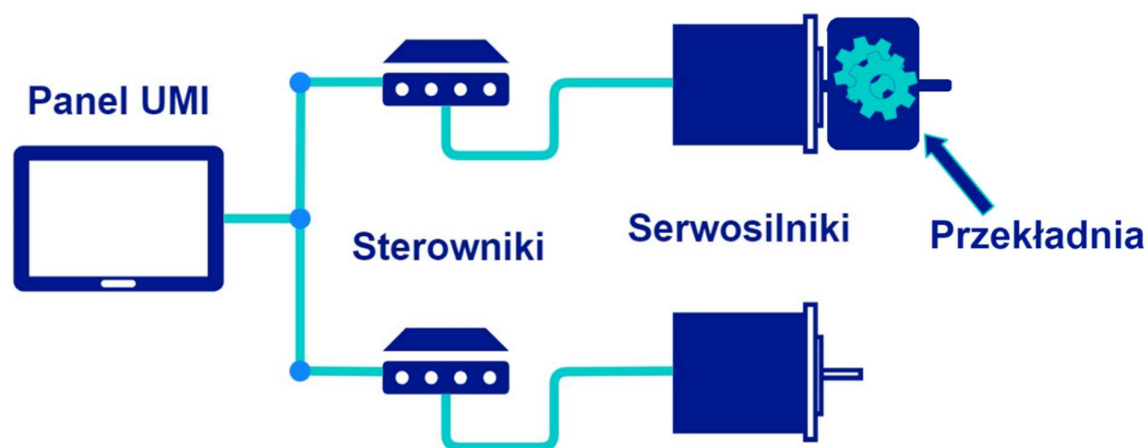
Cynk oraz jego stopy charakteryzują się znacznie większą odpornością na korozję niż ma to miejsce w przypadku magnezu [10], co rozwiązuje problem podrażnienia tkanki w

wyniku gwałtownej degradacji. Sprawia to również, że może on być stosowany w aplikacjach wymagających dłuższej obecności implantu w organizmie. W przypadku stopów cynku z magnezem zauważono, że wraz ze wzrostem zawartości magnezu w stopie rośnie twardość stopu (przedział 0-8%), prawdopodobnie za sprawą wytwarzającej się fazy międzymetalicznej Mg_2Zn_{11} [10].

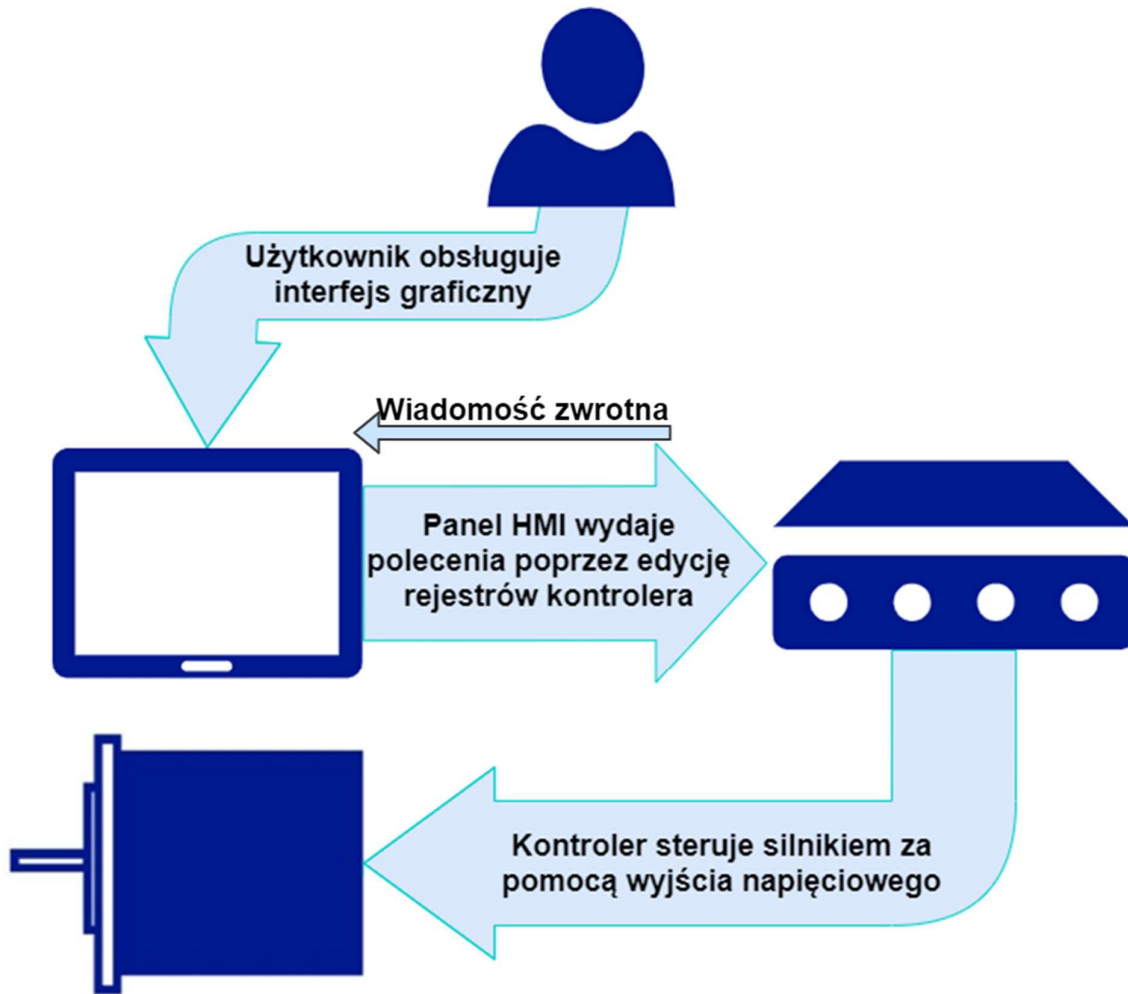
4. Stanowisko do ciągnięcia drutu

Stanowisko do ciągnięcia drutu, na którym realizowano projekt składa się z dwóch serwowmotorów, jeden służy do przeciągania materiału wsadowego przez ciągadło natomiast drugi ma za zadanie kontrolować rozwijanie materiału z rolki tak aby nie doszło do zaplątania się i zaklinowania drutu a w efekcie uszkodzenia materiału. Ponieważ urządzenie posiada tylko jeden bęben służący do przeciągania drutu a drugi służy tylko i wyłącznie do podawania materiału, ciągarce tę można sklasyfikować jako ciągarce bębnową, jednostopniową.

Do sterowania każdym z silników służą dedykowane sterowniki cyfrowe a do wprowadzania odpowiednich ustawień oraz monitorowania procesu ciągnięcia użyto panel HMI (ang. human-machine interface) z dotykowym ekranem. Dodatkowo na silniku ciągnącym drut zamontowano przekładnię w celu zwiększenia momentu. Uproszczony schemat połączenia poszczególnych urządzeń na stanowisku przedstawiono na rysunku 4.1, natomiast rysunek 4.2 przedstawia w uproszczeniu proces od podjęcia działania przez użytkownika do realizacji zamierzonego efektu przez silnik.



Rysunek 4.1. Schemat połączenia urządzeń na stanowisku do ciągnięcia drutu



Rysunek 4.2. Przepływ informacji pomiędzy komponentami stanowiska do ciągnięcia drutu

4.1. Komponenty mechaniczne oraz elektroniczne

Wśród elementów składających się na stanowisko do ciągnięcia drutu możemy znaleźć dwa przemysłowe serwomotory wraz z dedykowanymi sterownikami oraz panel HMI służący do sterowania urządzeniami. Dodatkowo do jednego z silników przytwierdzono przekładnię planetarną.

4.1.1. Serwomotor 1kW LiteON LMM102N2LN07

Serwomotory to urządzenia, które generują ruch umożliwiając równocześnie precyzyjne kontrolowanie pozycji, prędkości i momentu. Mechanizmy te składają się z odpowiedniego silnika oraz sensora pozwalającego określić pozycję w jakiej znajduje się układ napędowy. Serwomotory wymagają znacznie bardziej złożonych sterowników niż ma to miejsce w przypadku tradycyjnych silników elektrycznych.

Urządzenie wykorzystane w projekcie jest typowym napędem stosowanym w systemach automatyki przemysłowej (rysunek 4.3). Moc znamionowa wynosi 1000 W co przekłada się na moment znamionowy wynoszący 4.77 Nm i prędkość znamionową 2000 obr/min natomiast maksymalne wartości prędkości i momentu obrotowego wynoszą odpowiednio 3000 obr/min i 14.3 Nm [11]



Rysunek 4.3. Serwomotor 1kW LiteON LMM102N2LN07 [11].

4.1.2. Sterowniki cyfrowe ISA-7

Do sterowania pracą użytych serwowmotorów służą dedykowane sterowniki cyfrowe z serii ISA-7 firmy LITEON (rysunek 4.4). Ich działanie opiera się na sterowaniu tranzystorami IGBT (insulated gate bipolar transistor) w taki sposób aby wytworzyć odpowiedni napięciowy sygnał wyjściowy umożliwiający precyzyjne sterowanie silnikiem.



Rysunek 4.4. Sterownik cyfrowy z serii ISA-7 [11]

4.1.3. Panel HMI 7" LiteON EasyLynk EZ070-WGA40 Ethernet

Ergonomiczny panel operatorski z siedmiocalowym ekranem dotykowym o rozdzielczości 800x480 pikseli (rysunek 4.5). Posiada złącza USB umożliwiające łatwe programowanie z poziomu komputera oraz porty komunikacyjne obsługujące transmisję danych w standardach RS232, RS422 oraz RS485. Wraz z urządzeniem dostarczono dedykowane oprogramowanie narzędziowe EZ Studio pozwalające na tworzenie graficznego interfejsu użytkownika.



Rysunek 4.5. Panel HMI 7" LiteON EasyLynk EZ070-WGA40 Ethernet [11]

4.1.4. Przekładnia Eldar WVRB-115-10-P2

Aby uzyskać wyższy moment dla silnika odpowiedzialnego za przeciąganie materiału wsadowego wyposażono go w przekładnię o przełożeniu 1:10.

Eldar WVRB-115-10-P2 (rysunek 4.6) to precyzyjna, jednostopniowa przekładnia planetarna o momencie znamionowym wynoszącym 230 Nm. Sprawność przekładni wynosi 97 % a żywotność, przy założeniu prawidłowego użytkowania oszacowano na 20000 godzin.



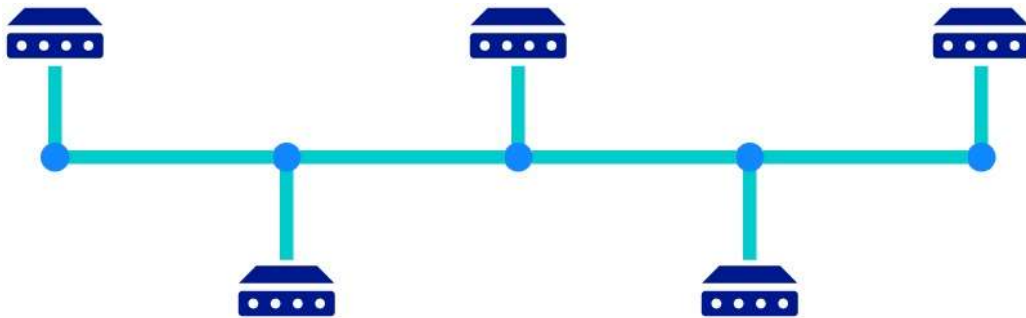
Rysunek 4.6. Przekładnia z serii Eldar WVRB [11]

4.2. Okablowanie oraz komunikacja między komponentami

Komunikacja pomiędzy panelem UMI a sterownikami serwośilników w implementowanym systemie odbywa się pod względem warstwy fizycznej zgodnie ze standardem RS-485 [12]. Wiadomości są przesyłane przy użyciu protokołu modbus [13].

4.2.1. Standard RS-485

RS-485 to standard wykorzystywany do szeregowej transmisji danych typu multipoint. Oznacza to, że w komunikacji uczestniczą dwa lub więcej urządzeń a każdy komunikat jest adresowany do konkretnego odbiorcy. Taka architektura sprawia, że nie jest możliwe nadanie tej samej wiadomości do wielu odbiorców bez jej kopiowania i retransmisji do każdego urządzenia końcowego z osobna. Maksymalna ilość urządzeń jaka może być równocześnie skomunikowana przy pomocy tego standardu wynosi 32. Topologia sieci, która najlepiej sprawdza się dla komunikacji w standardzie RS-485 to topologia magistrali (rysunek 4.7). Charakteryzuje się ona podłączeniem wszystkich urządzeń do wspólnej szyny przesyłu danych.

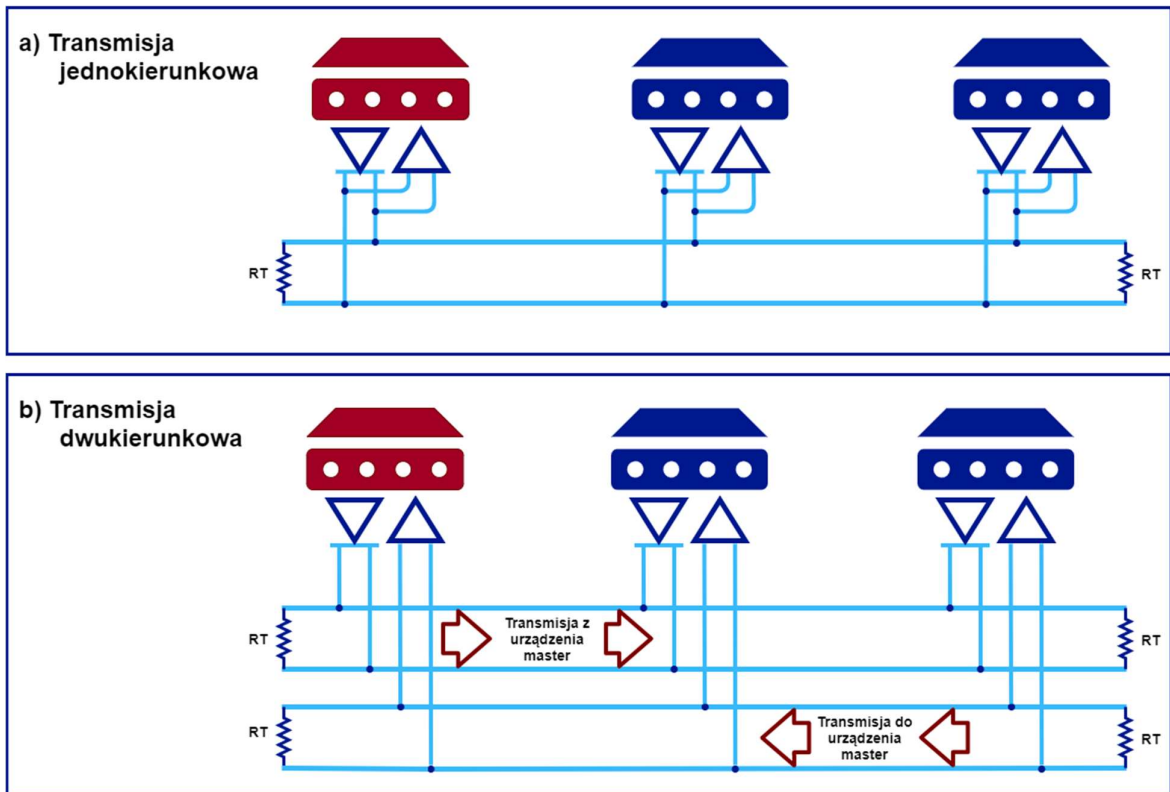


Rysunek 4.7. Topologia magistrali

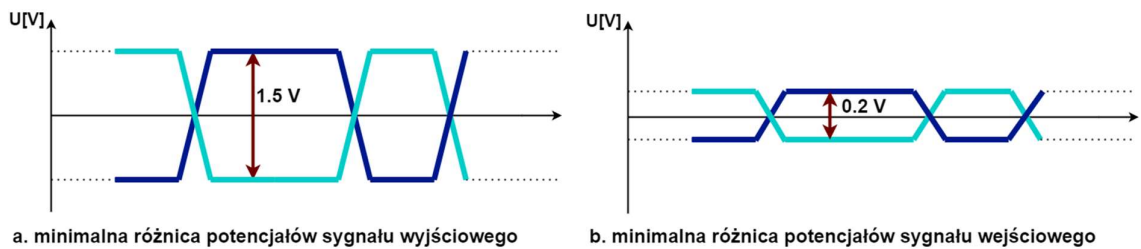
Transmisja może się odbywać zarówno w obu kierunkach równocześnie (duplex) jak i naprzemiennie (half duplex). Do transmisji typu half-duplex potrzebna jest jedna para kabli (rysunek 4.8a) natomiast duplex wymaga zastosowania dwóch par (rysunek 4.8b). W przypadku transmisji jednokierunkowej nadawanie i odbieranie informacji nie może odbywać się w tym samym czasie jako że obie te czynności dzielą tą samą fizyczną linię transmisyjną. W przypadku komunikacji dwukierunkowej wysyłanie i odbieranie informacji odbywa się za pośrednictwem osobnych połączeń fizycznych i z tego powodu może odbywać się w tym samym czasie. Oba typy komunikacji w standardzie RS-485 wymagają zaimplementowania mechanizmów zabezpieczających przed jednoczesnym dostępem kilku urządzeń do danej magistrali.

Standard RS-485 zakłada, że dane będą przesyłane przy pomocy symetrycznego sygnału różnicowego. Oznacza to, że przez oba kable stanowiące magistralę do komunikacji jest przesyłany sygnał kodowany prądem o tym samym napięciu ale odwrotnym potencjale. Minimalna różnica potencjałów sygnału różnicowego dla wyjścia wynosi 1.5 V natomiast dla wejścia 0.2 V. Charakterystykę sygnału wejściowego oraz wyjściowego przedstawiono na rysunku 4.9. Dzięki temu, że odbiornik wymaga od sygnału różnicowego znacznie mniejszej różnicy potencjałów niż nadajnik, połączenie jest bardziej odporne na zakłócenia.

Dodatkowo każda para kabli przesyłająca sygnał powinna być skręcona ze sobą aby wpływ zakłóceń ze środowiska oddziaływał w jednakowym stopniu na sygnały. Mechanizm ten sprawia, że niezależnie od tego jak zostaną zmodyfikowane oba sygnały podczas transmisji, różnica pomiędzy ich potencjałami pozostaje nie zmieniona i odbiornik jest w stanie bez przeszkód poprawnie odczytać przesyłane dane.



Rysunek 4.8. Połączenia w standardzie RS-485, gdzie RT oznacza rezystor terminujący (terminator) zapobiegający odbijaniu się sygnału na końcu kabla



Rysunek 4.9. Charakterystyka napięciowa sygnałów a) wejściowych oraz b) wyjściowych w standardzie RS-485

4.2.2. Protokół Modbus

Protokół Modbus jest jednym z najstarszych obecnie stosowanych protokołów komunikacyjnych. Największą popularnością cieszy się w rozwiązaniach przemysłowych z racji na stosunkowo prostą architekturę, łatwość wdrażania, możliwość łatwego modyfikowania sieci oraz niskie koszty implementacji. Modbus opiera się na architekturze master-slave. W całej sieci może znajdować się tylko jedno urządzenie nadrzędne (master),

które jako jedyne może inicjować komunikację wysyłając polecenia i odbierając wiadomości zwrotne od urządzeń podrzędnych (slave).

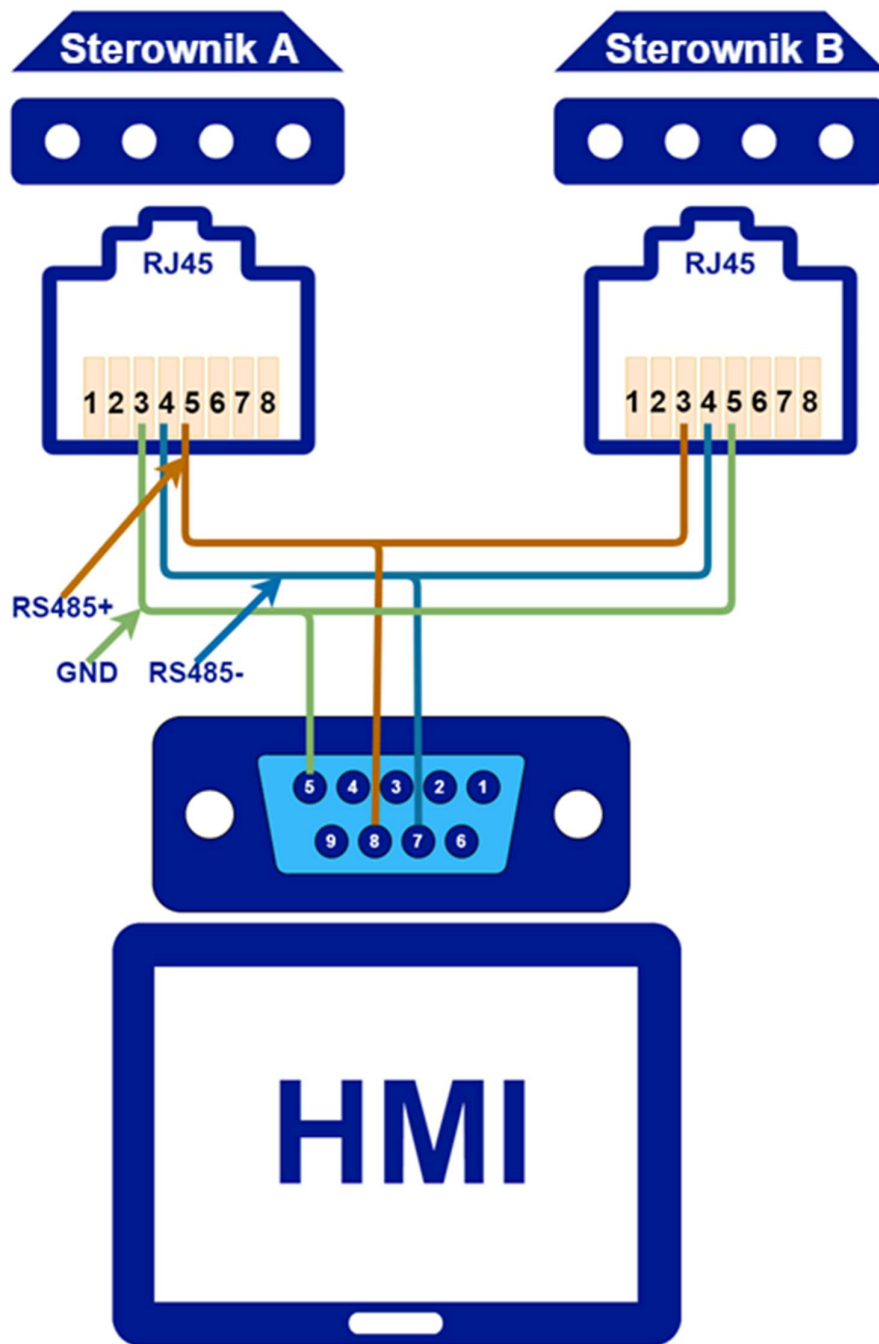
Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje Protokołu[13]:

- Modbus ASCII – każdy bajt w przesyłanej wiadomości jest reprezentowany przez dwa znaki ASCII,
- Modbus RTU (Remote Terminal Unit) – każdy bajt w przesyłanej wiadomości jest reprezentowany przez dwa 4-bitowe znaki z systemu szesnastkowego.

Każdy bajt w modbus ASCII jest reprezentowany aż przez dwa bajty, ponieważ każdy z dwóch znaków ASCII przypadających na pojedynczy bajt informacji jest kodowany przez 8 bitów. Z tego powodu Modbus ASCII umożliwia przesłanie dwukrotnie mniejszej ilości informacji co modbus RTU przy tej samej prędkości transmisji.

4.2.3. Podłączenie przewodów komunikacyjnych

Panel kontrolny posiada złącze komunikacyjne w postaci D-Sub DE-9 (dziewięćpinowe gniazdo) natomiast sterowniki posiadają fizyczne porty do komunikacji typu RJ45. Z tego powodu do połączenia urządzeń wykorzystano typową skrętkę 4-parową podłączając do złączy tylko niezbędną ilość kabli. Schemat połączenia kabli pomiędzy złączami przedstawiono na rysunku 4.10. Ponieważ do komunikacji pomiędzy panelem kontrolnym a sterownikami postanowiono wykorzystać transmisję danych typu half-duplex, wykorzystano 2 kable, które służą jako dodatnia i ujemna linia transmisyjna oraz 1 kabel łączący masy urządzeń uczestniczących w transmisji.



Rysunek 4.10. Połączenie przewodowe pomiędzy panelem HMI a sterownikami serw

5. Programowanie sterowników oraz panelu kontrolnego

Stworzone oprogramowanie ma za zadanie sterować pracą Dwoch serwo-silników (rysunek 5.1). Silnik A odpowiada za przeciąganie materiału wsadowego natomiast silnik B ma podawać materiał wsadowy w taki sposób aby drut był delikatnie naprężony co ma ograniczyć ryzyko zbyt szybkiego rozwijania się szpuli w trakcie procesu ciągnięcia, którego przyczyną są naprężenia wewnętrzne w drucie. Oprogramowanie umożliwia:

- sterowanie prędkością silnika A,
- odczyt momentu obrotowego na wale silnika A,
- ustawienie siły przeciwciągu na silniku B.

Dodatkowo panel kontrolny powinien prezentować wykres momentu oraz zapisywać pomiar do pliku tekstowego.



Rysunek 5.1. Silniki programowanej ciągarki

5.1. Użyte oprogramowanie

Do implementacji oprogramowania sterującego dla panelu HMI wykorzystano dostarczone przez producenta środowisko EZ Studio. Program ten umożliwia stworzenie graficznego interfejsu użytkownika dedykowanego pod konkretny panel kontrolny oraz pisanie skryptów realizujących zadania związane z obsługą sterowników cyfrowych.

5.2. Rejestry sterowników ISA-7

Działanie sterownika ISA-7 kontroluje się poprzez modyfikowanie wartości rejestrów urządzenia zwanych też parametrami. Parametry mogą być modyfikowane i odczytywane przy pomocy wyświetlacza i przycisków umieszczonych na sterowniku jak i przez zewnętrzne urządzenie (takie jak komputer czy panel HMI) za pośrednictwem połączenia sieciowego. Warto tutaj zaznaczyć, że z racji 16-bitowej architektury sterownika każdy rejestr odpowiada

16-bitowej komórce pamięci. Ponieważ część parametrów jest 32-bitowa, wszystkie składają się z dwóch rejestrów i z tego powodu dla pojedynczego parametru podaje się dwa adresy rejestrów. Przykładowo, parametrowi PD-00 odpowiadają adresy 0300_{Hex} i 0301_{Hex}. Mimo tego określeń parametr i rejestr używa się zamiennie ponieważ każdy parametr jest definiowany przez adres pierwszego rejestru.

5.2.1. Podział parametrów

Wszystkie parametry sterowników dostępne dla użytkownika są podzielone na cztery podstawowe grupy:

- **Grupa A** – Parametry Podstawowe. Odpowiadają za realizowanie głównych funkcjonalności serwomotoru. Można nimi między innymi sterować prędkością, momentem obrotowym, kierunkiem obrotu.
- **Grupa B** – Parametry filtrujące. Służą do zaawansowanej regulacji parametrami pracy serwomotoru. Umożliwiają one między innymi ustawienie jak gwałtownie powinien przebiegać proces rozpędzania i zatrzymywania wału czy też zmiany w charakterystyce pracy urządzenia, które mogą zniwelować drgania silnika spowodowane zjawiskiem rezonansu równocześnie zmniejszając generowany poziom hałasu.
- **Grupa C** – Parametry do konfiguracji wejścia/wyjścia. Dzięki tym rejestrów możliwe jest konfiguracja cyfrowych wejść i wyjść sterownika.
- **Grupa D** – Parametry komunikacji. Rejestry te umożliwiają wybór protokołu komunikacji oraz określenie jego parametrów, konfigurację informacji prezentowanych na wyświetlaczu sterownika.

5.2.2. Modyfikowanie parametrów przy pomocy oprogramowania

Oprogramowanie sterujące panelu HMI może modyfikować wartości parametrów sterownika odwołując się do adresów konkretnych rejestrów. W dokumentacji sterownika znajduje się spis wszystkich parametrów wraz z typem przyjmowanej wartości oraz adresem podawanym w systemie szesnastkowym.

Wprowadzenie wartości do rejestru odbywa się poprzez symbol przypisania „=” zgodnie z formatem: `\[identyfikator_urządzenia]\W[adres_rejestru (dec)] = wartość`. Przykładowo, `\0\W514 = 257d(UD)` oznacza, że dla sterownika o identyfikatorze 0 zostanie

przypisana wartość jego rejestrowi pod adresem 0202_{Hex} (514 w systemie dziesiętnym) wartość 257 (przyrostek d przy liczbie oznacza, że wprowadzana jest wartość w systemie dziesiętnym).

Identyfikator urządzenia pozwala określić, który ze sterowników podłączonych do sieci ma być adresatem przypisania. Adres rejestru należy podać w systemie dziesiętnym dlatego trzeba przeliczyć wartość podaną w dokumentacji. Przykładowo, z dokumentacji dowiadujemy się, że parametr PD-22 odpowiedzialny za monitorowanie wejścia analogowego znajduje się pod adresem 032C. Chcąc mu przypisać wartość 0 dla sterownika o identyfikatorze 0 musimy w skrypcie umieścić następujące przypisanie: $\backslash 0 \backslash W812 = 0d(UD)$, gdzie 812 to wartość dziesiętna adresu.

5.3. Konfiguracja połączenia

Aby komunikacja pomiędzy panelem kontrolnym a sterownikami była możliwa należy zadbać o ustawienie spójnych parametrów transmisji dla wszystkich urządzeń.

W pierwszej kolejności wprowadzono dane konfigurujące połączenie do sterowników cyfrowych. Wszystkie ustawienia są wprowadzone do urządzeń poprzez modyfikację wartości odpowiednich rejestrów. W tabeli 5.1 przedstawiono spis modyfikowanych parametrów wraz z wprowadzonymi wartościami. Ponieważ wiadomości są przesyłane wspólną magistralą do wszystkich urządzeń, należy zadbać o to aby każdy ze sterowników miał unikalny identyfikator służący do adresowania komunikatów. Dla silników A i B ustawiono wartości identyfikatorów kolejno jako 1 i 2. Następnie w obu urządzeniach zdefiniowano prędkość transmisji danych na 115200 Bps. Kolejnym krokiem był wybór protokołu. Na potrzeby projektu wybrano modbus RTU.

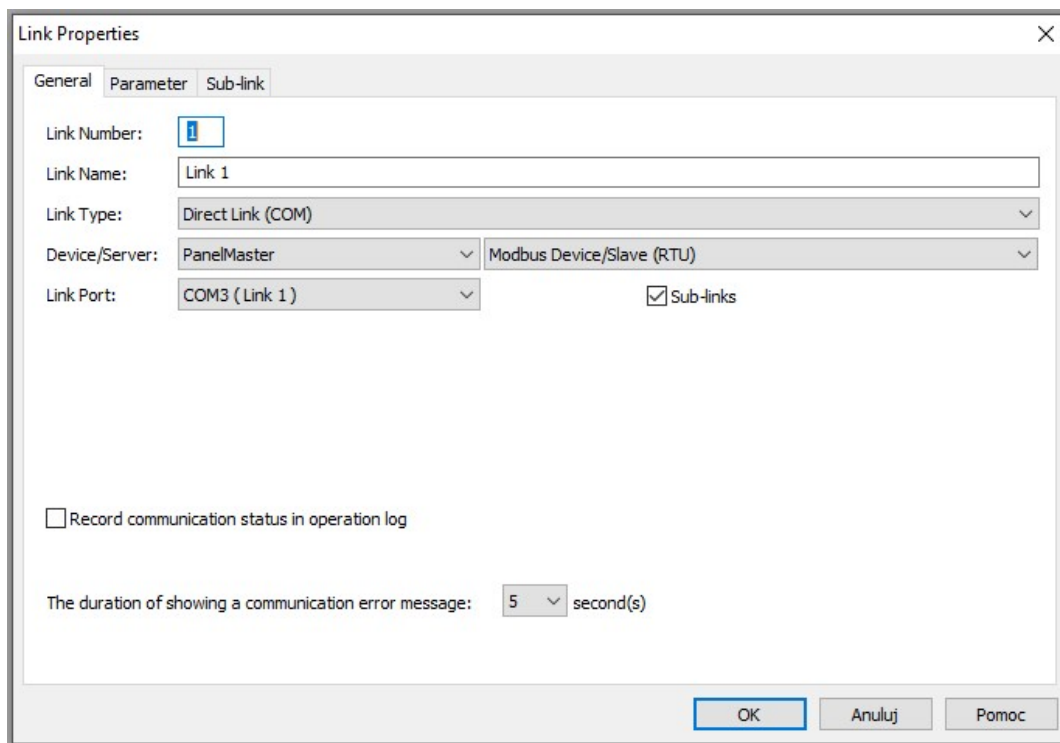
Po skonfigurowaniu sterowników przystąpiono do wprowadzania analogicznych ustawień dla implementowanego oprogramowania sterującego. W projekcie stworzonym przy pomocy oprogramowania EZ Studio dodano nowe połączenie o nazwie Link 1. Ogólną konfigurację połączenia przedstawiono na rysunku 5.2.

W przypadku użytego panelu HMI do komunikacji przy pomocy standardu RS485 jest przeznaczony port COM3 dlatego ustawiono połączenie typu Direct link (COM) oraz wybrano odpowiedni port. Oprócz tego ustanowiono protokół komunikacji MODBUS RTU zgodnie z ustawieniami wprowadzonymi do sterowników. Ważnym punktem konfiguracji było

ustawienie możliwości obsługi wielu urządzeń za pośrednictwem jednego połączenia poprzez zaznaczenie pola wyboru o nazwie Sub-links.

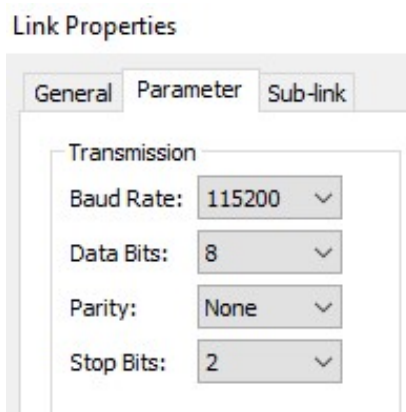
Tabela 5.1. Konfiguracja połączenia po stronie sterowników

Parametr	adres	Wartość	opis												
PD-00 Ustawienie identyfikatora	0300H 0301H	Silnik A: 1 Silnik B: 2	Wartość wprowadzona w systemie szesnastkowym służy jako adres do komunikacji. Wykorzystanie tego samego identyfikatora w kilku urządzeniach może skutkować błędami podczas przesyłania danych siecią.												
PD-01 Prędkość transmisji danych	0302H 0303H	5	Rejestr przyjmuje wartości od 0 do 5. Każdej z liczb odpowiada prędkość transmisji zgodnie z poniższą tabelą: <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr><td>0</td><td>4800 Bps</td></tr> <tr><td>1</td><td>9600 Bps</td></tr> <tr><td>2</td><td>19200 Bps</td></tr> <tr><td>3</td><td>38400 Bps</td></tr> <tr><td>4</td><td>57600 Bps</td></tr> <tr><td>5</td><td>115200 Bps</td></tr> </table>	0	4800 Bps	1	9600 Bps	2	19200 Bps	3	38400 Bps	4	57600 Bps	5	115200 Bps
0	4800 Bps														
1	9600 Bps														
2	19200 Bps														
3	38400 Bps														
4	57600 Bps														
5	115200 Bps														
PD-02 Protokół komunikacji	0304H 0305H	6	Wartość przyjmuje wartości 6, 7 lub 8 w zależności od wybranego protokołu. Możliwe warianty: <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr><td>6</td><td>8, N, 2(MODBUS, RTU)</td></tr> <tr><td>7</td><td>8, E, 1(MODBUS, RTU)</td></tr> <tr><td>8</td><td>8, O, 1(MODBUS, RUT)</td></tr> </table> <p>Protokoły opisane są zgodnie z formatem: ilość bitów na znak, bit parzystości [N-brak, E-parzysty, O-nieparzysty] bity stopu[ilość](protokół). Przykładowo, 8, N, 2(MODBUS, RTU) oznacza komunikację opartą o protokół MODBUS RTU, w której długość jednego znaku ma 8 bitów, nie występuje bit parzystości i posiada dwa bity stopu.</p>	6	8, N, 2(MODBUS, RTU)	7	8, E, 1(MODBUS, RTU)	8	8, O, 1(MODBUS, RUT)						
6	8, N, 2(MODBUS, RTU)														
7	8, E, 1(MODBUS, RTU)														
8	8, O, 1(MODBUS, RUT)														



Rysunek 5.2. konfiguracja połączenie po stronie panelu HMI – ustawienia ogólne

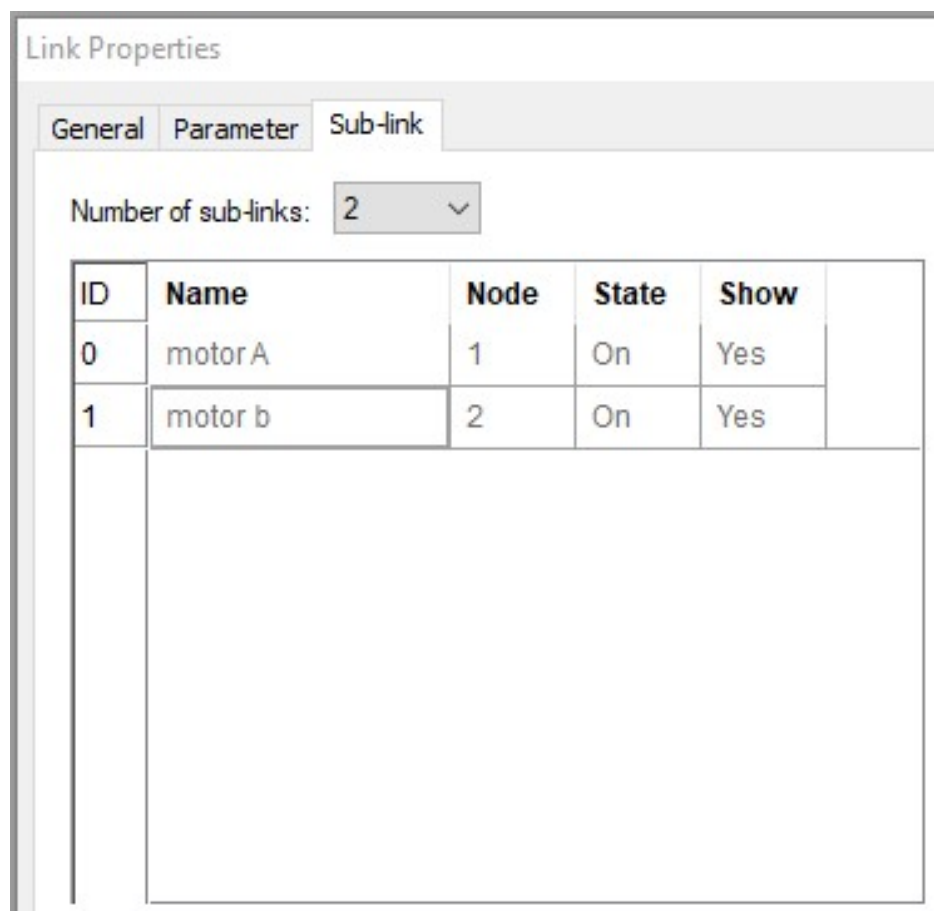
Kolejnym etapem konfigurowania połączenia było ustawienie parametrów transmisji (rysunek 5.3). Dobrano wartości zgodne z wcześniej wprowadzonymi do kontrolerów za pośrednictwem rejestrów PD-1 i PD-2.



Rysunek 5.3. konfiguracja połączenia po stronie panelu HMI – parametry transmisji danych

Na koniec do właściwości połączenia dodano dwa urządzenia o identyfikatorach odpowiadających tym wprowadzonym do obu kontrolerów przy pomocy rejestru PD-0 (rysunek 5.4). W oprogramowaniu EZ studio adresy używane do identyfikowania urządzeń podczas komunikacji nazywane są węzłami (ang. node). Do każdego węzła przypisany jest

unikalny identyfikator, do którego programista odnosi się podczas implementowania programu sterującego.



Rysunek 5.4. Nadanie numerów identyfikacyjnych sterownikom.

5.4. Ustawienie trybu pracy sterowników

Sterownik może pracować w 3 różnych trybach (tabela 5.2). Możliwe są również kombinacje dwóch trybów.

Ustawienie trybu pracy umożliwia parametr PA-00. Oprócz tego rejestr ten odpowiada za kierunek odczytu momentu obrotowego. Konfigurację trybu pracy oraz kierunku odczytu momentu silników za pomocą tego rejestru przedstawiono w tabeli 5.3.

Dane wprowadzane są w systemie szesnastkowym. Dwie najmniej znaczące cyfry odpowiadają za tryb pracy natomiast najbardziej znacząca za kierunek odczytu momentu. W tabeli 5.4 zestawiono możliwe tryby wraz z odpowiadającymi im wartościami rejestrów.

Tabela 5.2. Tryby pracy sterowników ISA-7

Tryb	Opis
Tryb pozycji (position mode)	Sterownik oczekuje komendy z pozycją i następnie steruje pracą silnika tak aby ten obrócił rotor do wskazanego położenia.
Tryb prędkości (speed mode)	<p>Sterownik po otrzymaniu komendy z prędkością steruje pracą silnika do momentu uzyskania wskazanej prędkości. Prędkość może być wskazana zarówno poprzez wewnętrzny rejestr jak i za sprawą analogowego wejścia, do którego w tym celu należy przyłożyć napięcie z zakresu -10V – 10V w zależności od oczekiwanej prędkości.</p> <p>Istnieje również drugi analogiczny tryb, który nie zezwala na wprowadzenie prędkości poprzez wejście analogowe.</p>
Tryb momentu (torque mode)	<p>Sterownik po otrzymaniu komendy z wartością momentu kontroluje pracę silnika tak aby ten wytwarzał wskazany moment obrotowy. Docelowy moment może zostać wskazany zarówno poprzez wewnętrzne rejestry urządzenia jak i analogowe wejście za sprawą napięcia z przedziału -10V do 10V.</p> <p>Istnieje również drugi analogiczny tryb, który nie zezwala na wprowadzenie momentu poprzez wejście analogowe.</p>

Tabela 5.3. Konfiguracja trybu pracy oraz kierunku odczytu momentu

Parametr	adres		wartość	opis
PA-00 Ustawienie identyfikatora	0000H	Silnik	008	tryb prędkości bez możliwości sterowania
	0001H	A		wejściem analogowym, moment odczytywany zgodnie z ruchem wskazówek zegara
		Silnik	109	tryb momentu bez możliwości sterowania
		B		wejściem analogowym, moment odczytywany przeciwnie do ruchu wskazówek zegara

Tabela 5.4. Dopuszczalne tryby pracy sterowników. S – tryb prędkości, T – tryb momentu, P – tryb położenia, n – zablokowanie wejścia analogowego

Tryb pracy	Wartość rejestru
P	00
S	01
T	02
PS	05
PT	06
ST	07
Sn	08
Tn	09

Odczyt momentu może odbywać się zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara lub przeciwnie. Wyboru można dokonać ustawiając wartość rejestru zgodnie z tabelą 5.5. Sposób w jaki odczytywany jest moment jest zależny zarówno od kierunku, w który odbywa się praca silnika jak i wartości ustawionej w rejestrze.

Ponieważ silnik A będzie odpowiadał za przeciąganie materiału wsadowego ze wskazaną przez operatora prędkością został on skonfigurowany do pracy w trybie prędkości. Oprócz tego odczyty z tego silnika pozwolą monitorować moment z jakim przeciągany jest drut. Będzie on działał na silnik przeciwnie do kierunku ciągnięcia, co oznacza, że biorąc pod uwagę pracę silnika przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, rejestr odpowiedzialny za kierunek odczytu powinien zostać ustawiony na wartość 0.

Silnik B podając materiał wsadowy będzie pracował w tym samym kierunku co silnik A. Ponieważ silnik ten ma za zadanie utrzymywać delikatne naprężenie ciągniętego drutu musi on monitorować z jakim momentem materiał wsadowy jest pobierany aby móc przykładać stałą wartość siły w przeciwną stronę. Z tego powodu kierunek odczytu został ustawiony zgodnie z kierunkiem pracy silnika poprzez wpisanie do rejestru wartości 1.

Tabela 5.5. Konfiguracja kierunku odczytu momentu

Wartość rejestru Kierunek pracy silnika	0	1
Silnik obraca wałem zgodnie z ruchem wskazówek zegara.	Odczyt momentu działającego przeciwnie do ruchu wskazówek zegara	Odczyt momentu działającego zgodnie z ruchem wskazówek zegara
Silnik obraca wałem przeciwnie do ruchu wskazówek zegara	Odczyt momentu działającego zgodnie z ruchem wskazówek zegara	Odczyt momentu działającego przeciwnie do ruchu wskazówek zegara

5.5. Konfiguracja cyfrowych wejść kontrolerów

Kontrolery ISA7 posiadają dziewięć Cyfrowych wejść. Do każdego z nich można podłączyć jedną funkcję. Przydzielanie funkcji do cyfrowych wejść (DI0-DI9) odbywa się po przez ustawienie odpowiednich wartości rejestrów od PC-01 do PC-09. Każdy z nich przyjmuje wartości w systemie szesnastkowym składające się z trzech cyfr gdzie najbardziej znacząca to tak zwany atrybut portu wejściowego natomiast dwie pozostałe odpowiadają za wybór funkcji przypisanej do danego wejścia.

Rejestr odpowiedzialny za atrybut portu wejściowego może przyjąć dwie wartości – 0 lub 1. Jeżeli zostanie ustawiona wartość 0 port wejściowy zostanie ustawiony w tryb NC (ang. normally closed). Oznacza to, że dany port jest zamknięty (stan logiczny 1) jeżeli bit sterujący danym portem przyjmie wartość 0. W przypadku gdy do rejestru wprowadzimy wartość 1 port wejściowy będzie w trybie NO (ang. normally open). Port znajdujący się w tym trybie pozostaje otwarty (stan logiczny 0) w przypadku gdy bit sterujący ma wartość 0. Określenia, że port jest otwarty/zamknięty należy kojarzyć z przełącznikiem w układzie elektrycznym, przez który płynie prąd gdy przełącznik jest zamknięty. Analogicznie dana funkcja jest aktywna jeżeli port, do którego została przypisana jest zamknięty.

Konfiguracja wejść cyfrowych jest wprowadzana do sterownika za sprawą skryptu, który jest wykonywany jednorazowo bezpośrednio po każdym uruchomieniu oprogramowania panelu HMI (listing 5.1). Dzięki temu można mieć pewność, że sterownik będzie zawsze działał

zgodnie z oczekiwaniami niezależnie od tego czy wcześniej zostały wprowadzone zmiany do jego rejestrów.

```
\0\W514 = 257d(UD) //DI1 Servo On
\0\W516 = 7d(UD) //DI2 Torque Limit
\0\W518 = 8d(UD) //DI3 Speed Limit
\0\W520 = 11d(UD) //DI4 TCM0
\0\W522 = 9d(UD) //DI5 SPD0
\0\W524 = 6d(UD) //DI6 command reverse input
\0\W526 = 277d(UD) //DI7 Emergency Stop
\0\W528 = 22d(UD) //DI8 Limit reverse
\0\W530 = 279d(UD) //DI9 Limit foward

\1\W514 = 257d(UD) //DI1 Servo On
\1\W516 = 7d(UD) //DI2 Torque Limit
\1\W518 = 8d(UD) //DI3 Speed Limit
\1\W520 = 11d(UD) //DI4 TCM0
\1\W522 = 9d(UD) //DI5 SPD0
\1\W524 = 262d(UD) //DI6 command reverse input
\1\W526 = 277d(UD) //DI7 Emergency Stop
\1\W528 = 22d(UD) //DI8 Limit reverse
\1\W530 = 279d(UD) //DI9 Limit foward
```

Listing 5.1 Konfiguracja wstępna wejść cyfrowych

5.5.1. Funkcja włączająca serwo

Funkcja włączająca serwo została ustawiona dla obu kontrolerów na wyjściu DI1 tak jak przedstawiono w tabeli 5.6. W momencie uruchomienia sterownik zawsze sprawdza czy układy elektryczne serwa pracują poprawnie. Jeżeli zostaną wykryte problemy na ekranie sterownika pojawi się kod błędu. W przeciwnym razie port z przypisaną funkcją włączania serwa zostanie aktywowany. Ponieważ urządzenie ma być gotowe do działania zaraz po uruchomieniu port DI1 został skonfigurowany w trybie NO. Oznacza to, że w chwili gdy sterownik potwierdzi sprawność silnika i aktywuje port DI1, port zostanie zamknięty a funkcja uruchamiająca zostanie aktywowana. Włączenie silnika sprawia, że cewka silnika jest w stanie wzbudzonym a rotorem serwa nie można już swobodnie obracać.

Tabela 5.6. Ustawienie parametru włączającego serwo dla obu silników

Parametr	Adres	Atrybut portu	Numer funkcji	Aktywacja
PC-01 (DI1)	0200H 0201H	1 (NO)	01 (Servo on)	Port jest aktywowany gdy sterownik potwierdzi, że układ elektryczny serwa działa bez zastrzeżeń

5.5.2. Funkcje prędkości

Zgodnie z założeniami projektu serwo A będzie sterować prędkością ciągnięcia drutu. Regulowanie prędkości obrotowej należy aktywować za pomocą dwóch funkcji prędkości (SPD0, SPD1). W zależności od kombinacji stanów logicznych obu komend docelowa prędkość będzie ustawiana na podstawie innego parametru (tabela 5.7).

Tabela 5.7. Ustawienie źródła funkcji prędkości

SPD1	SPD0	Źródło prędkości
0	0	Wejście analogowe
0	1	PA-14 (001CH, 001DH)
1	0	PA-15 (001EH, 001FH)
1	1	PA-15 (0020H, 0021H)

Ponieważ w przypadku tego projektu występuje tylko jedno urządzenie (panel HMI), które wyznacza prędkość silnika, nie ma potrzeby przełączania źródła prędkości i można go ustawić na stałe w dowolnym z trzech dostępnych parametrów. Do przekazywania wartości prędkości wybrano rejestr PA-14 i z tego powodu do wyjścia cyfrowego DI2 przypisano funkcję SPD1 z atrybutem NC (konfiguracja przedstawiona w tabeli 5.8). Port domyślnie nie jest aktywny dlatego gdy będzie w trybie NC wartość logiczna będzie wynosić 1. Ponieważ SPD1 ma mieć wartość 0 nie jest wymagane przypisanie funkcji SPD1 w celu jej modyfikacji gdyż w takiej sytuacji będzie ona domyślnie zwracała 0. Dzięki tym ustawieniom oprogramowanie HMI będzie mogło kontrolować prędkość serwa A modyfikując wartość rejestru PA-14.

Tabela 5.8. Przypisanie funkcji prędkości do silnika A

Parametr	Adres	Atrybut portu	Numer funkcji	Aktywacja
PC-02 (DI2)	0202H 0203H	0 (NC)	09 (SPD0)	Port z przypisanymi funkcjami prędkości jest domyślnie nie aktywny.

Warto wspomnieć, że gdyby wcześniej kontroler był ustawiony w tryb momentu to wspomniane w tym rozdziale funkcje SPD1 i SPD0 służyły by do ustawienia maksymalnej dopuszczalnej wartości prędkości. Takie zachowanie jest logiczne, ponieważ w przypadku gdy sterowanie odbywa się poprzez ustawienie docelowego momentu użytkownik nie ma bezpośredniego wpływu na prędkość i dlatego możliwość ustawienia jej górnego limitu może być pożądana.

5.5.3. Funkcje momentu

Serwo B, w porównaniu do serwa A, nie będzie sterowane poprzez przekazanie prędkości a za sprawą ustawienia momentu obrotowego jaki urządzenie ma przeciwstawić ciągniętemu materiałowi w celu utrzymania jego naprężenia. Analogicznie do tego jak to miało miejsce w przypadku funkcji prędkości, do dyspozycji programisty zostały oddane dwie funkcje wyboru momentu (TCM0, TCM1). Ich możliwe konfiguracje zostały przedstawione w tabeli 5.9.

Ponieważ za sterowanie momentem odpowiada tylko panel HMI, tak samo jak to miało miejsce w przypadku prędkości jako źródło momentu wybrano na stałe jeden z trzech dostępnych parametrów. Do przekazywania docelowej wartości momentu wybrano rejestr PA-03 i dlatego do wyjścia cyfrowego DI3 przypisano funkcję TCM1 z atrybutem NC Konfiguracja zaprezentowana w tabeli 5.10. Port domyślnie nie jest aktywny dlatego gdy będzie w trybie NC wartość logiczna będzie wynosić 1. Ponieważ TCM 1 ma mieć wartość 0 nie jest wymagane przypisanie funkcji TCM 1 w celu jej modyfikacji gdyż w takiej sytuacji będzie ona domyślnie zwracała 0. Z takimi ustawieniami sterownika oprogramowanie panelu HMI będzie mogło ustawić docelową wartość momentu poprzez modyfikowanie wartości rejestru PA-03.

Analogicznie jak to miało miejsce w przypadku funkcji prędkości, funkcje TCM0 i TCM1 mogą posłużyć do ustawienia limitu momentu jeżeli sterownik znajduje się w trybie kontroli prędkości.

Tabela 5.9. Ustawienie źródła funkcji momentu

TCM1	TCM0	Źródło prędkości
0	0	Wejście analogowe
0	1	PA-03 (0006H, 0007H)
1	0	PA-04 (0008H, 0009H)
1	1	PA-05 (000AH, 000BH)

Tabela 5.10. Przypisanie funkcji momentu do silnika B

Parametr	Adres	Atrybut portu	Numer funkcji	Aktywacja
PC-02 (DI2)	0202H 0203H	1 (NC)	0B (TCM0)	Port z przypisanymi funkcjami momentu jest domyślnie nie aktywny.

5.5.4. Funkcja kierunku obrotu

Ponieważ układ stanowiska do ciągnięcia drutu sprawia, że domyślnie silniki będą pracowały w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara skorzystano z funkcji, która odwraca sterowanie kierunkiem obrotu silnika. Dzięki temu dodatnie wartości prędkości będą odpowiadały pracy silników w kierunku zgodnym z kierunkiem ciągnięcia. Ustawienia wprowadzono dla obu sterowników zgodnie z tabelą 5.11.

Tabela 5.11. Przypisanie funkcji odwrócenia kierunku obrotu

Parametr	Adres	Atrybut portu	Numer funkcji	Aktywacja
PC-06 (DI6)	020CH 020DH	0 (NC)	06 (CMDV)	Port z przypisanymi funkcjami momentu jest domyślnie nie aktywny.

5.5.5. Funkcja awaryjnego zatrzymania oraz limit obrotów

Kontroler posiada możliwość dodania awaryjnego wyłącznika, którego aktywowanie pozwala odciąć dopływ prądu do urządzenia. W projekcie nie skorzystano z tej opcji ponieważ stanowisko posiada przełącznik, który w razie potrzeby odetnie wszystkie urządzenia od zasilania. Konieczne było jednak przypisanie funkcji awaryjnego zatrzymania oraz jej domyślne aktywowanie co odpowiada sytuacji gdy taki awaryjny wyłącznik jest podłączony do

urządzenia. W przeciwnym razie sterownik zwrócił by ze względów bezpieczeństwa błąd i nie było by możliwe uruchomienia silnika.

Dodatkowo istnieją dwie funkcje umożliwiające nałożenie limitu ilości obrotów w danym kierunku. Jest to przydatne w wypadku gdy serwa zostały wykorzystane w taki sposób, że przekroczenie pewnej ilości obrotów w danym kierunku może spowodować uszkodzenia urządzeń przemysłowych czy też wykonywanych produktów albo stanowić zagrożenie dla osób przebywających w otoczeniu. Przykładem takiej sytuacji może być frezarka laserowa, która w przypadku wykonania zbyt dużej ilości obrotów przez silnika opuści przystosowaną przestrzeń roboczą. Ponieważ w przypadku stanowiska do ciągnięcia drutu nie występuje ryzyko spowodowane brakiem ograniczenia ruchu silników obie funkcje trzeba było dezaktywować.

Pełna konfiguracja opisanych funkcji, która została wprowadzona do obu silników została przedstawiona w tabeli 5.12.

Tabela 5.12. Przypisanie funkcji awaryjnego zatrzymania, limitu obrotów w przód oraz limitu obrotów w tył

Funkcja awaryjnego zatrzymania				
Parametr	Adres	Atrybut portu	Numer funkcji	Aktywacja
PC-07	020EH	1	15	Port z przypisaną funkcją awaryjnego wyłączenia jest domyślnie aktywny
(DI7)	020FH	(NO)	(EMG)	
Funkcja limitu obrotów w przód				
Parametr	Adres	Atrybut portu	Numer funkcji	Aktywacja
PC-08	0210H	1	16	Port z przypisaną funkcją limitu obrotów w tył jest domyślnie aktywny
(DI8)	0211H	(NO)	(NL)	
Funkcja limitu obrotów w tył				
Parametr	Adres	Atrybut portu	Numer funkcji	Aktywacja
PC-09	0212H	1	17	Port z przypisaną funkcją limitu obrotów w tył jest domyślnie nieaktywny
(DI9)	0213H	(NO)	(PL)	

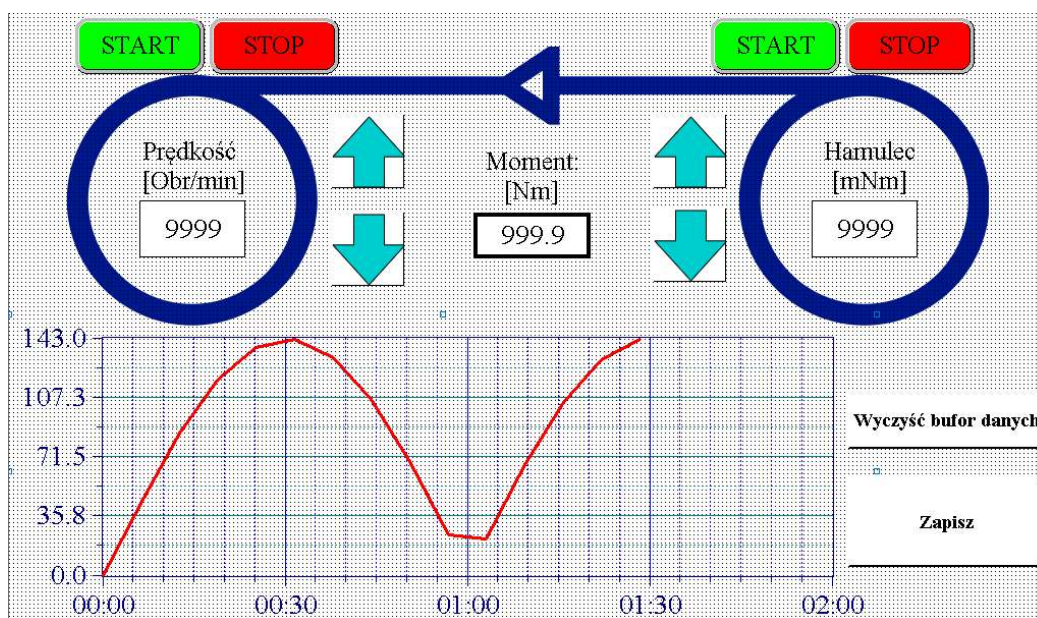
5.6. Zaprojektowanie graficznego interfejsu użytkownika

Sterowanie stanowiskiem do ciągnięcia drutu odbywa się za pośrednictwem Panelu HMI, który jest wyposażony w 7-calowy dotykowy wyświetlacz LCD. Interfejs wykonany na potrzeby projektu jest przystosowany do wygodnego korzystania przy pomocy dotyku. Całość została wykonana przy pomocy dedykowanego oprogramowania EZ Studio.

Interfejs graficzny zaprojektowany w EZ Studio składa się z tak zwanych obiektów, które można nanieść na projekt interfejsu korzystając z menu obiektów. W skład takich obiektów wchodzi wszelkiego rodzaju przyciski, pola do wprowadzania danych, graficzne reprezentacje danych w postaci wszelkiego rodzaju wykresów i diagramów i wiele innych. Każdy z takich komponentów posiada predefiniowany wygląd, który można edytować i dostosować do wymagań projektu.

Na rysunku 5.5 przedstawiono główny panel sterowania. Można wyróżnić 3 podstawowe części, z których składa się interfejs graficzny:

- Sterowanie prędkością ciągnięcia,
- Sterowanie hamulcem,
- Wyświetlanie oraz zapis zmierzonych wartości momentu.

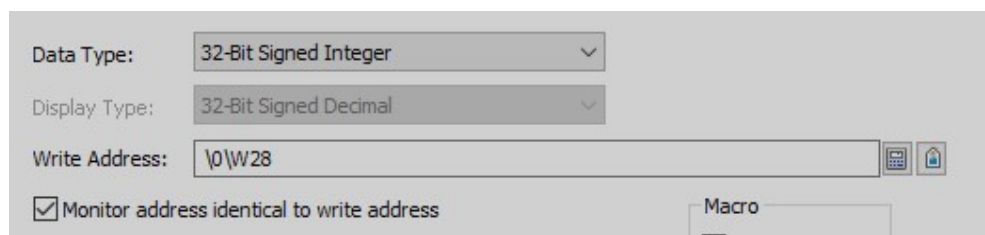


Rysunek 5.5. Panel sterowania ciągarą

5.6.1. Sterowanie prędkością ciągnięcia

Zgodnie z wcześniejszymi ustawieniami prędkość obrotową serwa A można ustawić przy pomocy parametru PA-14 o adresie 001C. Parametr ten przyjmuje wartości z przedziału od -50000 do 50000. Jednostką wprowadzanych danych jest 0.1 obrotu/min. Dane powinny być wprowadzane w postaci 32-bitowych zmiennych całkowitych.

Prędkość ta może być wprowadzona za pośrednictwem wejścia numerycznego znajdującego się w interfejsie graficznym. Na rysunku 5.6 przedstawiono konfigurację zapisu i odczytu dla tego obiektu. Dane będą wprowadzane w formie 32-bitowych liczb typu signed integer do rejestru o adresie 28 ($1C_{Hex}$) do serwa A (id: 0). Pole będzie wyświetlać wartość znajdującą się pod tym samym adresem co rejestr zapisu.



Rysunek 5.6. Konfiguracja wejścia numerycznego sterującego prędkością ciągnięcia

Aby umożliwić wygodniejsze posługiwanie się panelem, prędkość należy wprowadzić w obrotach na minutę (obr/min). Biorąc pod uwagę to, że kontroler przyjmuje prędkość w 10-krotnie mniejszej jednostce oraz biorąc pod uwagę przełożenie przekładni zamontowanej na serwie A, które wynosi 10:1, wprowadzoną wartość prędkości należało powiększyć 100-krotnie aby rotor obracał się z zamierzoną prędkością. Oprogramowanie EZ Studio umożliwia skalowanie wartości wprowadzanych za pośrednictwem wejść numerycznych na dwa sposoby (rysunek 5.7):

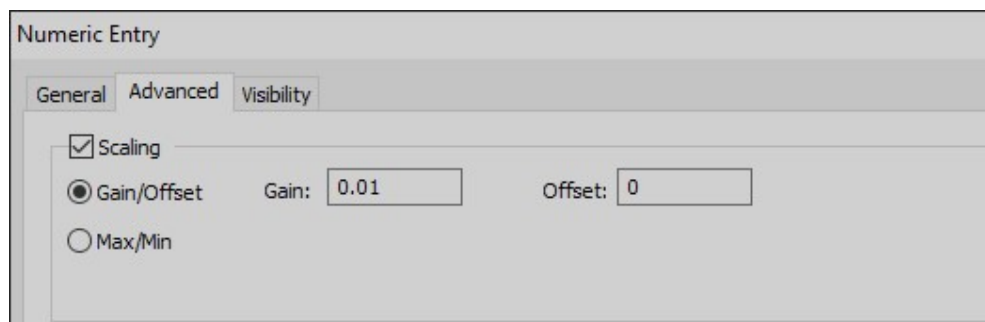
- Gain/Offset – wartość odczytana ze wskazanego rejestru jest skalowana przed wyświetleniem zgodnie z równaniem (5.1), natomiast wartość wprowadzana przez użytkownika przed wpisaniem do rejestru zgodnie z formułą (5.2).

$$\text{Wyświetlona wartość} = \text{odczytana wartość} \cdot \text{mnożnik} + \text{przesunięcie} \quad (5.1)$$

$$\text{Wpisana wartość} = \frac{\text{odczytana wartość}}{\text{mnożnik}} - \text{przesunięcie} \quad (5.2)$$

- Max/Min – wyświetlana wartość oraz wartość wprowadzana do rejestru są skalowane na podstawie podanych wartości minimalnych i maksymalnych dla obu przypadków.

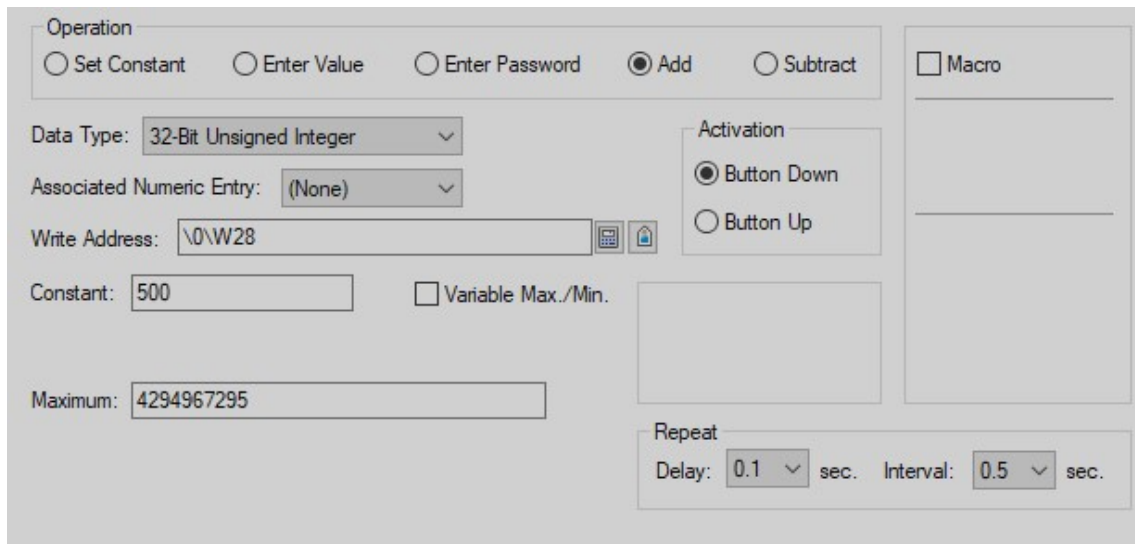
W przypadku opisanym powyżej znacznie bardziej intuicyjne jest zastosowanie pierwszego wariantu skalowania. Ponieważ wartość wpisana do rejestru ma być 100-krotnie większa od wprowadzonej przez użytkownika wartość stałej offset wynosi 0.01. Stała offset wynosi 0, ponieważ skalowanie nie wymaga wprowadzenia żadnego dodatkowego przesunięcia.



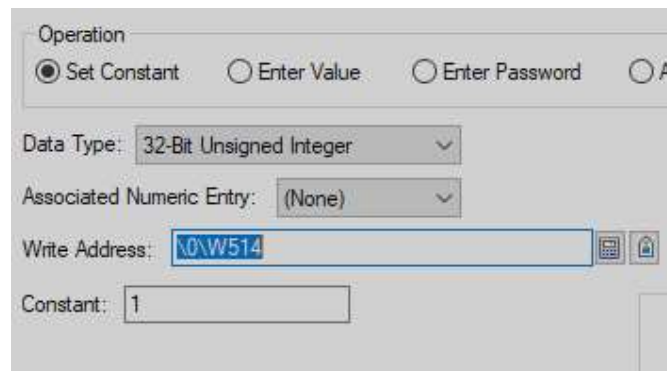
Rysunek 5.7. Skalowanie wartości pola numerycznego

Oprócz wprowadzania dokładnej wartości poprzez pole numeryczne użytkownikowi zapewniono możliwość skokowej zmiany prędkości za pośrednictwem strzałek góra, dół. W tym celu wykorzystano obiekty interfejsu typu word buton. Ten typ przycisku umożliwia wykonanie stałej operacji na wartości wybranego rejestru. W przypadku dwóch opisywanych przycisków było to wykonanie dodania/odjęcia wartości 500 na parametrze PA-14 (rysunek 5.8). Wartość 500 przy uwzględnieniu jednostki wprowadzania prędkości do rejestru oraz przełożenia przekładni odpowiada prędkości 5 obrotów na minutę. Operacja jest aktywowana po 0.1 s od chwili wciśnięcia przycisku. W przypadku przytrzymania go, co każde kolejne 0.5 sekundy operacja jest ponawiana.

W celu uruchomienia lub zatrzymania serwa należy skorzystać z przycisków start, stop. Oba przyciski to obiekty typu word buton, które wprowadzają stałą do parametru PC-01, do którego podczas konfiguracji wstępnej przypisano funkcję uruchamiania serwa, co omówiono w rozdziale 4.5.1. Przycisk start wpisuje do rejestru wartość 1 co aktywuje funkcję włączającą serwo (rysunek 5.9) natomiast stop wprowadza wartość 257 aby zatrzymać urządzenie. Wartość prędkości może być modyfikowana zarówno przed uruchomieniem silnika jak i w trakcie jego działania.



Rysunek 5.8. Konfiguracja stałej operacji na wybranym parametrze

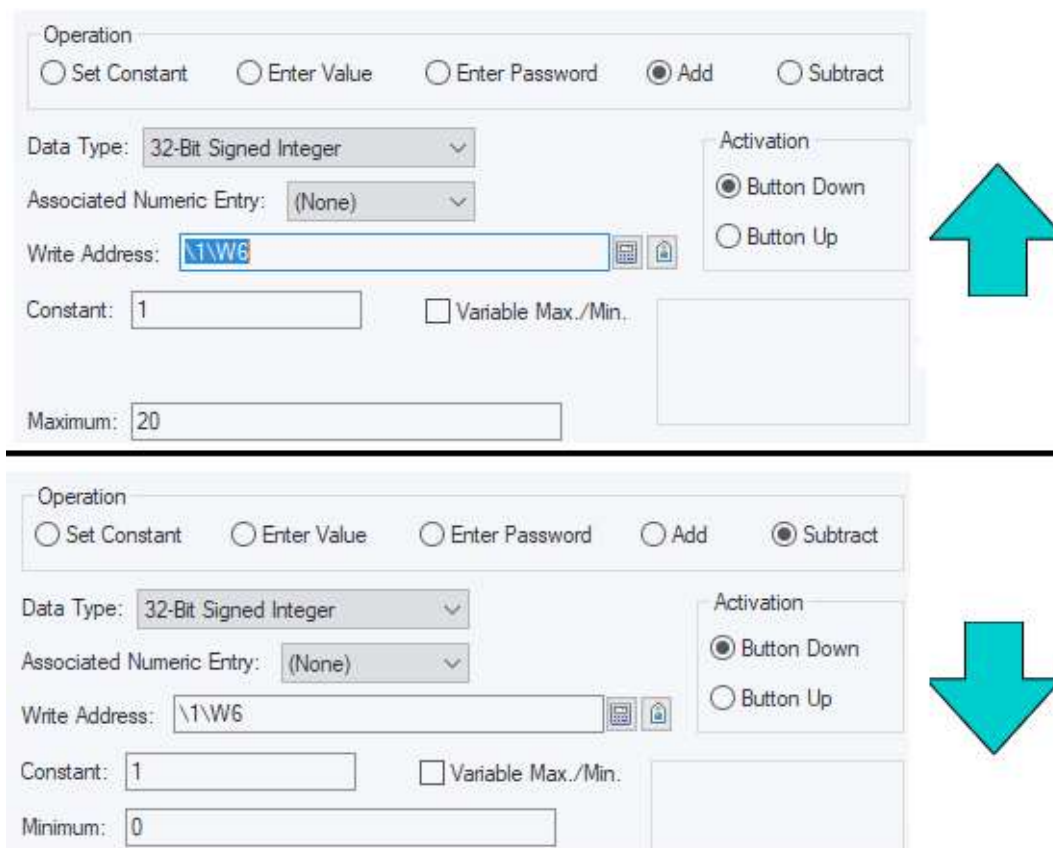


Rysunek 5.9. Konfiguracja przycisku włączającego serwo

5.6.2. Hamulec

Silnik B ma za zadanie podawać materiał wsadowy w taki sposób aby drut był delikatnie naprężony co będzie zapobiegać jego niekontrolowanemu rozwijaniu się. Zgodnie z wcześniejszymi ustawieniami opisanymi w rozdziale 5.5. moment obrotowy, jaki serwo będzie przeciwstawiać, jest ustawiany za pośrednictwem Parametru PA-03 (adres: 0006_{Hex}). Przyjmuje on wartości całkowite, które są interpretowane jako % maksymalnego momentu silnika, który wynosi 14.3 Nm. Na rysunku 5.10 przedstawiono konfigurację przycisków „góra”, „dół”, które służą po zwiększania/zmniejszania oporu stawianego przez silnik. Wpływają one na ten parametr po przez dodanie lub odjęcie stałej wartości równej 1 od rejestru PA-03. Minimalną wartość możliwą do ustawienia przy pomocy przycisku zmniejszającego

ustawiono na 0 natomiast maksymalną wartość dla przycisku zwiększającego ustawiono na 20 aby zminimalizować ryzyko wywołania szkód przez wprowadzenie zbyt dużych wartości momentu.



Rysunek 5.10. Konfiguracja przycisków odpowiedzialnych za regulację oporu stawianego przez silnik B

Aktualna wartość momentu generowanego przez serwo silnik jest wyświetlana użytkownikowi przy pomocy komponentu typu *numeric display*. Wartość jest podawana w mN. W celu przekształcenia momentu wyrażonego w % na wartość wyrażaną w mNm skorzystano z opcji skalowania zgodnie z formułą 5.1 tak jak zostało to przedstawione na rysunku 5.11.

Data Type: 32-Bit Unsigned Integer

Display Type: 32-Bit Unsigned Decimal

Monitor Address: \1\W6

Scaling

Gain/Offset

Gain: 143 Offset: 0

Max/Min

Rysunek 5.11. Skalowanie wartości momentu z mNm na %

5.6.3. Odczyt momentu oraz zapis do pliku

Sterowniki ISA-7 posiadają cztery rejestry (PD-15 – PD-19) za pośrednictwem których można odczytać wyniki pomiarów wykonywanych przez urządzenie. Ponieważ sterownik jest w stanie monitorować aż osiemnaście różnych parametrów, takich jak temperatura silnika, prędkość obrotowa, napięcie uzwojenia, konieczne jest zadeklarowanie jakie wyniki mają być w danej chwili dostępne do pobrania z wcześniej wspomnianych rejestrów. Służy do tego pięć parametrów (PD-23 – PD-27), z których każdy odpowiada jednemu z parametrów do odczytu. Wyboru dokonuje się poprzez wprowadzenie identyfikatora pomiaru.

Do odczytu momentu wybrano rejestr PD-15 o adresie 031EH. W tym celu do parametru PD-23 (032EH = 814Dec) wprowadzono liczbę 13, która jest identyfikatorem funkcji pomiaru momentu. Wartość momentu, jaką można odczytać z sterownika jest podawana w procentach i mówi nam jaki moment jest generowany przez silnik w stosunku do maksymalnego momentu urządzenia, który dla tego modelu wynosi 14.3 Nm. Przypisanie funkcji pomiaru momentu odbywa się w skrypcie wykonywanym każdorazowo podczas uruchamiania oprogramowania sterującego.

Aby móc zbierać i zapisywać pomiary momentu w pamięci panelu HMI należało dodać rejestrator danych (ang. data logger). Każda aplikacja może zawierać do szesnastu rejestratorów danych.

Na potrzeby przechowywania odczytów momentu do projektu dodano rejestrator danych o nazwie moment (konfiguracja przedstawiona na rysunku 5.12). Czyta on dwa wyrazy (32-bity) danych z parametru PD-15 sterownika serwa A. Aby było możliwe wychwycenie również drobnych zmian w sile ciągnięcia próbkowanie odbywa się w stałym interwale czasowym wynoszącym 0.2 s. Rejestrator jest w stanie pomieścić 12000 pomiarów co odpowiada 40 minutom ciągłego prowadzenia pomiarów. Dane są zapisywane w pamięci ram z podtrzymywaniem baterijnym dzięki czemu pomiary nie zostaną utracone w przypadku przerwania zasilania.

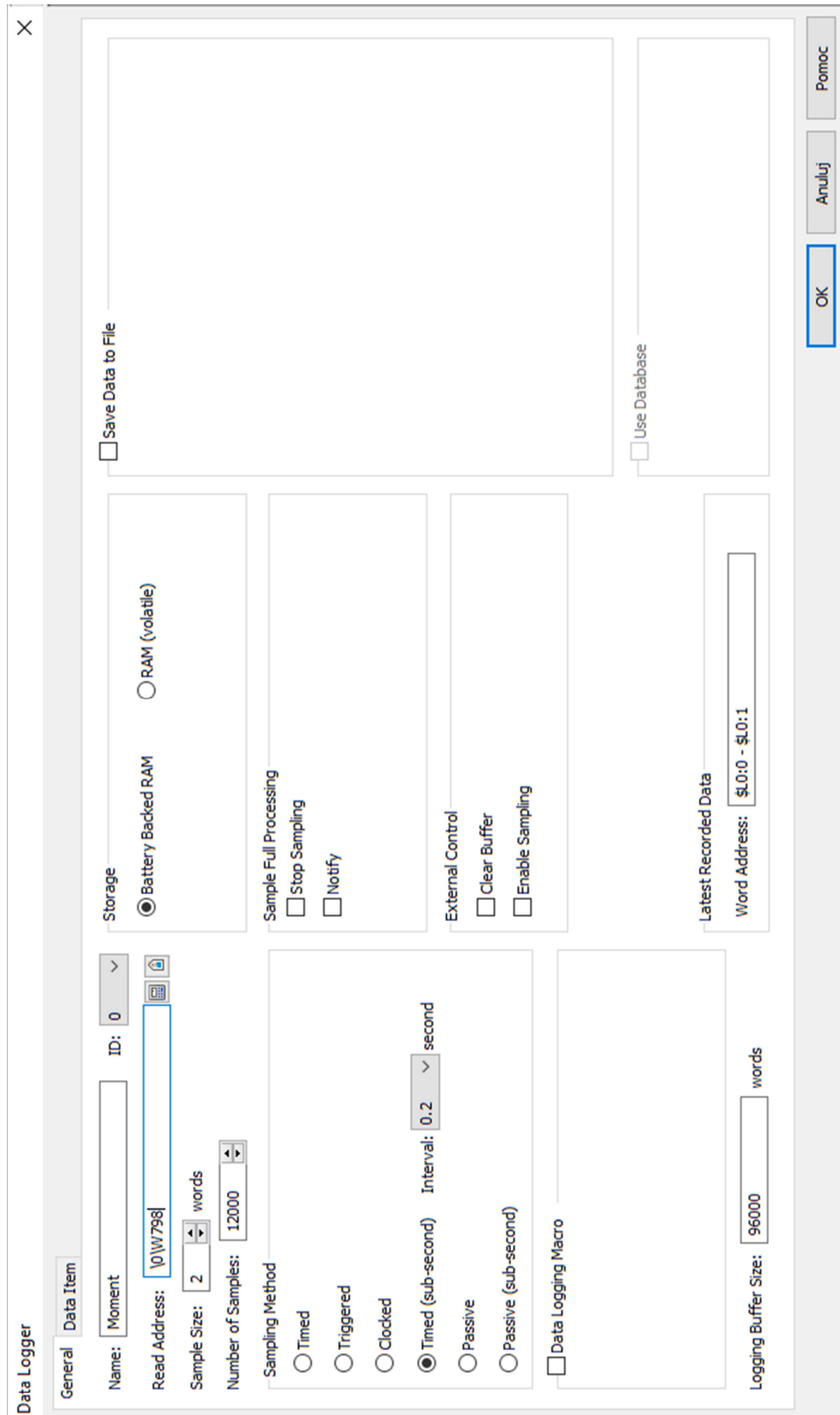
Aby gromadzone pomiary były łatwiejsze do dalszego przetworzenia przez aplikację skorzystano z funkcji skalowania udostępnionej przez rejestrator danych. W wyniku jej działania rejestrator zwraca wartości zgodnie z formułą (5.3).

$$\text{Wartość_zwracana} = \text{wartość_pobrana} \cdot \text{mnożnik} + \text{przesunięcie} \quad (5.3)$$

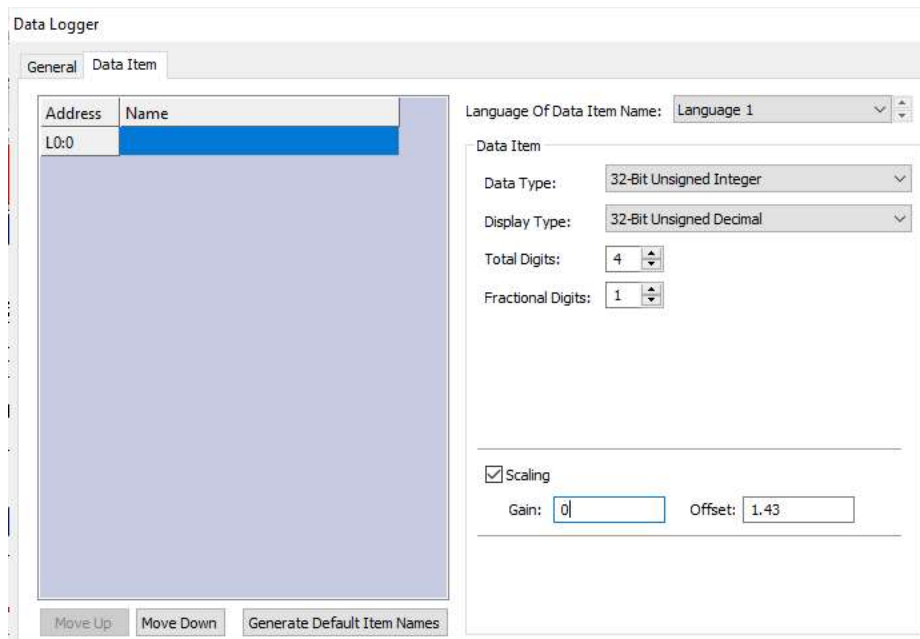
Pamiętając, że sterownik mierzy wartość momentu w procentach w stosunku do momentu maksymalnego, który dla użytego serwa wynosi 14.3 Nm oraz mając na uwadze zastosowaną przekładnię o przełożeniu 1:10 wartość offset ustawiono na 1.43. Dzięki temu moment zwracany przez rejestrator będzie miał wartość z zakresu od 0 do 143 co będzie się pokrywać z rzeczywistym momentem działającym na wał serwa. Wartości będą zaokrąglane do jednego miejsca po przecinku. Konfigurację dotyczącą zapisu pomiarów w rejestratorze przedstawiono na rysunku 5.13.

Aby osoba przeprowadzająca ciągnięcia na stanowisku miała szybki wgląd w aktualne odczyty momentu w aplikacji umieszczono obiekt numeric display czyli wyjście numeryczne wyświetlające ostatni zanotowany pomiar oraz obiekt typu historic trend graph, który prezentuje dane z większego okresu w postaci wykresu momentu od czasu.

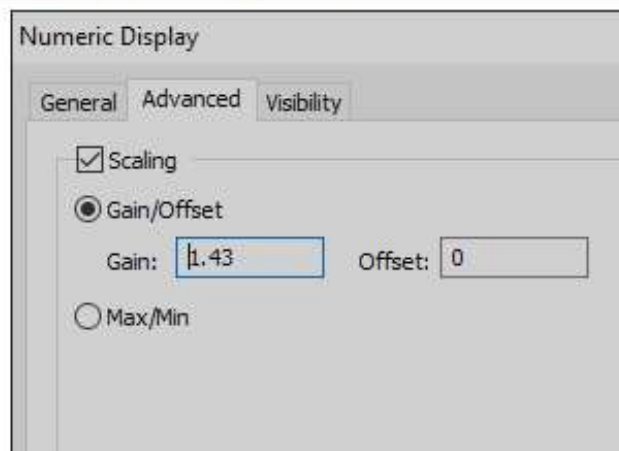
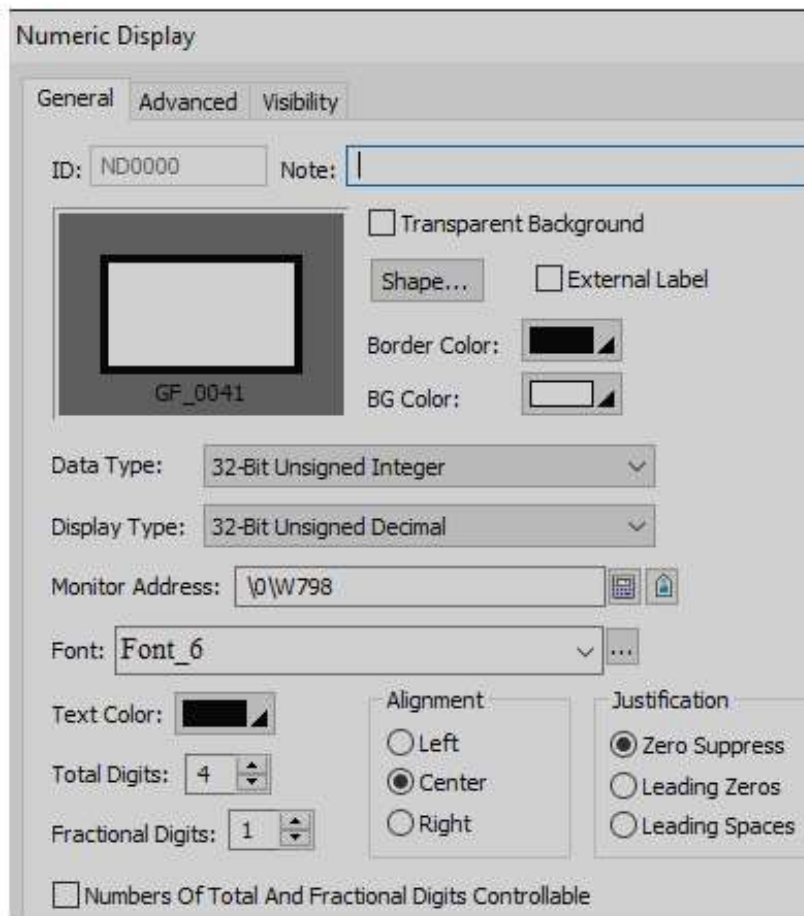
Konfigurację wyjścia numerycznego przedstawiono na rysunku 5.14. Obiekt odczytuje aktualną wartość bezpośrednio z parametru PD-15 i wyświetla z 1-cyfrowym rozwinięciem dziesiętnym. Tak jak w przypadku rejestratora danych tutaj również skorzystano ze skalowania wyświetlanej wartości tak aby odpowiadała ona rzeczywistemu momentowi podanemu w Nm.



Rysunek 5.12. Ustawienia ogólne rejestratora danych "moment"



Rysunek 5.13. Skalowanie wartości zapisywanych przez rejestrator danych



Rysunek 5.14. Konfiguracja wyjścia numerycznego odpowiedzialnego za wyświetlanie momentu ciągnięcia drutu

6. Realizacja testowego ciągnięcia

W celu sprawdzenia czy ciągarka wraz z zaimplementowanym oprogramowaniem działają poprawnie wykonano testowe ciągnięcia drutu.

6.1. Użyty materiał wsadowy

Materiałem wsadowym były biozgodne druty z cynku (99.995% Zn) wytworzone metodą Properzi w ZM Silesia S.A. Wykorzystano dwie różne średnice drutu – 1.54 mm oraz 2.0 mm a następnie porównano produkty ciągnięcia z tych dwóch materiałów w celu określenia wpływu metody ich wytwarzania na wynik próby przeginania.

6.2. Parametry ciągnięcia

Ciągnięcie zostało wykonane metodą na zimno. Wydłużenie w trakcie jednego ciągu wynosiło 20 % a kąt ciągnięcia wynosił 5 stopni. Jako smar wykorzystano mydło. Ciągnięcie przeprowadzono z prędkością 1.0 m/s.

6.3. Przebieg procesu ciągnięcia

Na przygotowanym stanowisku (rysunek 6.1) wykonano szereg kolejnych ciągnięć dla obu przygotowanych średnic początkowych materiału wsadowego. Drut szpicowany przy wykorzystaniu szlifierki typu Dremel i zaciągany szczypcami. W przypadku materiału o średnicy 2.0 mm wykonano zestaw prób uzyskując finalnie drut o średnicy 1.0 mm. W przypadku materiału o średnicy początkowej 1.54 mm produkt końcowy miał średnicę 0.833 mm. Schemat ciągnięcia podano w tabeli 6.1.

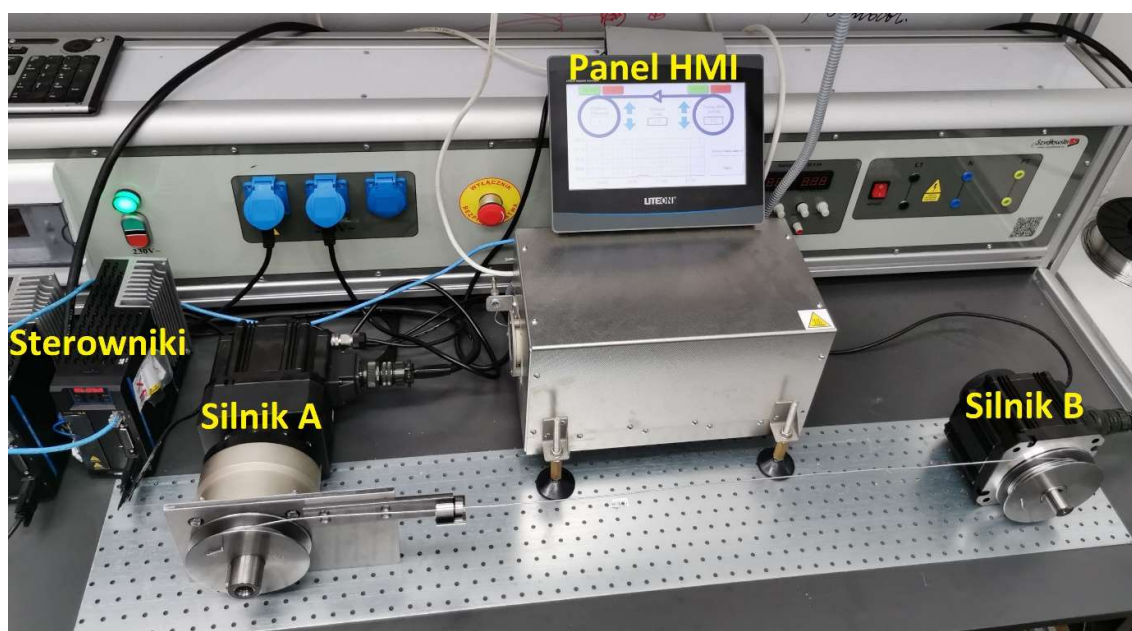
Przed wykonaniem właściwej próby ciągnięcia sprawdzono czy oprogramowanie realizuje wszystkie początkowe założenia projektu. Wprowadzano różne prędkości ciągnięcia, regulowano siłę naciągu drutu, obserwowano wyświetlany przez panel HMI wykres momentu, dokonywano zapisu zmierzonych wartości momentu do pliku.

Gdy potwierdzono, że urządzenie działa poprawnie przystąpiono do realizacji ciągnięcia drutów z cynku. W trakcie prób definiowano prędkość ciągnięcia oraz siłę przeciwciągu. Na rysunku 6.2 przedstawiono wyświetlacz panelu kontrolnego podczas jednej z prób po około 50 sekundach od rozpoczęcia ciągu. Jak widać wszystkie parametry ciągnięcia

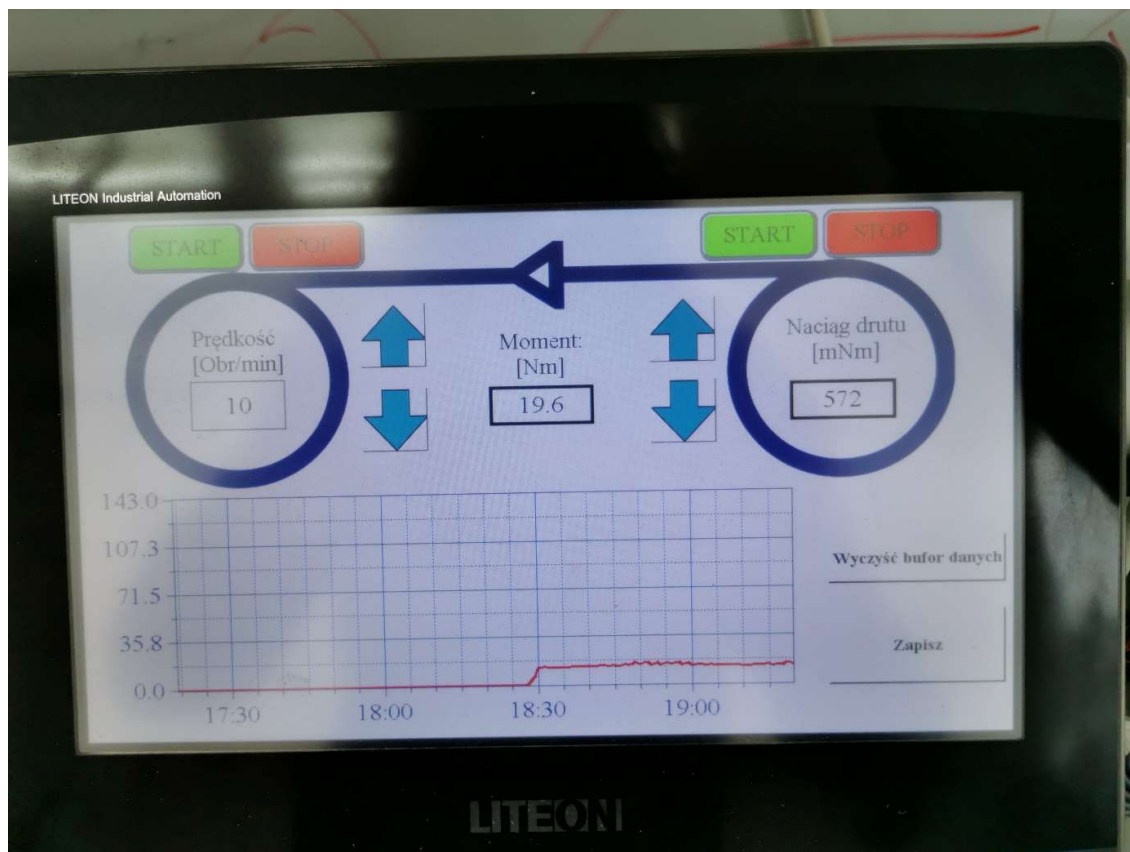
wyświetlają się poprawnie. Widoczny jest również wykres momentu, który zarejestrował wzrost siły działającej na silnik w chwili rozpoczęcia ciągnięcia.

Tabela 6.1. Schemat procesu ciągnięcia

Ciąg nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Średnica [mm]	1,811	1,64	1,485	1,345	1,219	1,104	1,00	0,913	0,833



Rysunek 6.1. Stanowisko do ciągnięcia podczas przeprowadzania procesu ciągnięcia



Rysunek 6.2. Panel kontrolny podczas jednego z przeprowadzonych ciągów

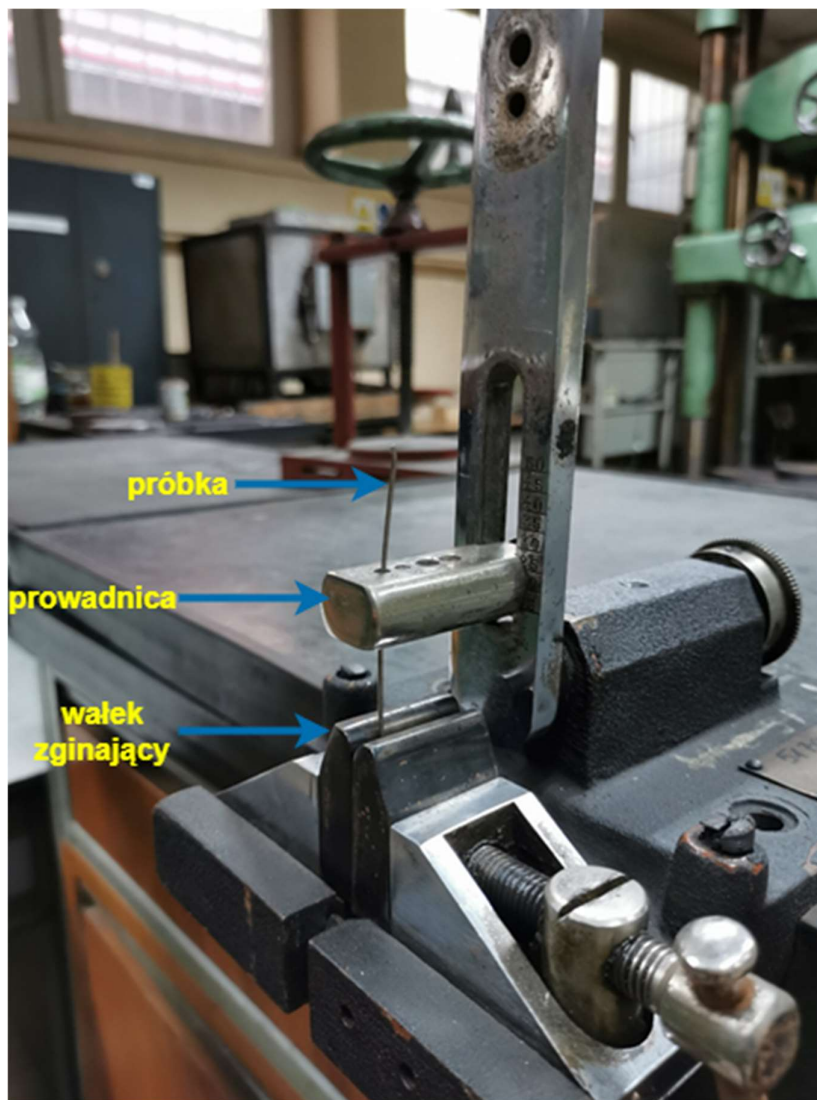
7. Badanie drutu uzyskanego podczas testów stanowiska

Ponieważ uzyskany drut ma mieć zastosowanie podczas zabiegów chirurgicznych i z jego udziałem chirurg będzie wykonywał węzły w celu łączenia uszkodzonych tkanek, materiał musi spełnić szereg wymagań dotyczących właściwości fizycznych. Wśród nich kluczowym jest na tyle duża odporność na przeginanie aby drut nie uległ uszkodzeniu podczas wykonywania na nim węzłów chirurgicznych.

Podczas przeprowadzania ciągów po każdym z nich pobierano próbki drutu aby zbadać je przy pomocy próby dwukierunkowego przeginania drutu. Dzięki temu możliwe było porównanie właściwości drutu w zależności od jego średnicy.

7.1. Przeprowadzenie próby dwukierunkowego przeginania drutu

Próba dwukierunkowego przeginania została zrealizowana zgodnie z normą PN-75/M-80002. Jest ona stosowana do drutów i walcówki o grubości przekraczającej 0.3 mm. Na rysunku 7.1 przedstawiono urządzenie wykorzystane do testów wraz z umieszczoną w nim próbką drutu. Urządzenie umożliwia zmianę trzech parametrów próby: średnicy otworu prowadnicy, promienia wałka zginającego oraz odległości pomiędzy wałkiem i prowadnicą. Wielkości te dobiera się w zależności od średnicy badanej próbki zgodnie z tabelą 7.1. Próbę wykonuje się poprzez przeginanie badanego drutu na przemian w prawo oraz lewo o 90 stopni do momentu jego złamania (rysunek 7.2).



Rysunek 7.1. Stanowisko do przeprowadzania próby przeginania

Tabela 7.1. Podstawowe wymiary próby dwukierunkowego przeginania[Norma PN-75/M-80002]

Średnica nominalna lub grubość drutu d [mm]	Promień wałka zginającego r [mm]	Odległość h [mm]	Średnica otworu prowadnicy d_g [mm]
$0.3 \leq d(a) \leq 0.5$	1.25 ± 0.05	15	2.0
$0.5 < d(a) \leq 0.7$	1.75 ± 0.05	15	2.0
$1.7 < d(a) \leq 1.0$	2.50 ± 0.05	15	2.0
$1.0 < d(a) \leq 1.5$	3.75 ± 0.1	20	2.0
$1.5 < d(a) \leq 2.0$	5.00 ± 0.1	20	2.0 i 2.5
$2.0 < d(a) \leq 3.0$	7.50 ± 0.1	25	2.5 i 3.5
$3.0 < d(a) \leq 4.0$	10.00 ± 0.1	35	3.5 i 4.5
$4.0 < d(a) \leq 6.0$	15.00 ± 0.1	50	4.5 i 7.0
$6.0 < d(a) \leq 8.0$	20.00 ± 0.1	75	7.0 i 9.0
$8.0 < d(a) \leq 10.0$	25.00 ± 0.1	100	9.0 i 11.0



Rysunek 7.2. Próbką po próbie dwukierunkowego przeginania

7.2. Analiza uzyskanych wyników

Dla każdej z badanych średnic wykonano po kilka prób przeginania drutu. Próbki uzyskane z ciągnięcia materiału wsadowego o średnicach 2.0 mm i 1.54 mm analizowano osobno a wyniki zebrano w tabelach 7.2 oraz 7.3.

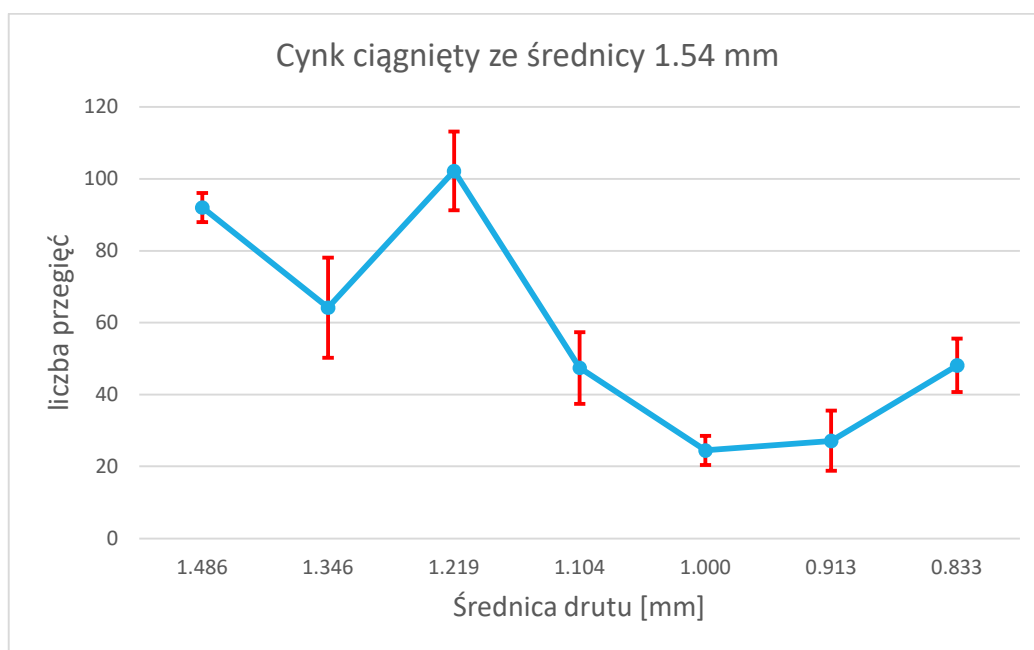
Na podstawie zebranych danych sporządzono wykresy średniej liczby przegięć uzyskanych w próbie przeginania w zależności od średnicy drutu. Na rysunku 7.3 przedstawiono tą zależność dla cynku ciągniętego ze średnicy 1.54 mm, natomiast na rysunku 7.4 dla cynku ciągniętego ze średnicy 2.0 mm. Na rysunku 7.5 zestawiono razem wyniki ciągnięć dla obu średnic początkowych.

Tabela 7.2. Wyniki prób przeginania dla drutów ciągniętych ze średnicy 1.54 mm

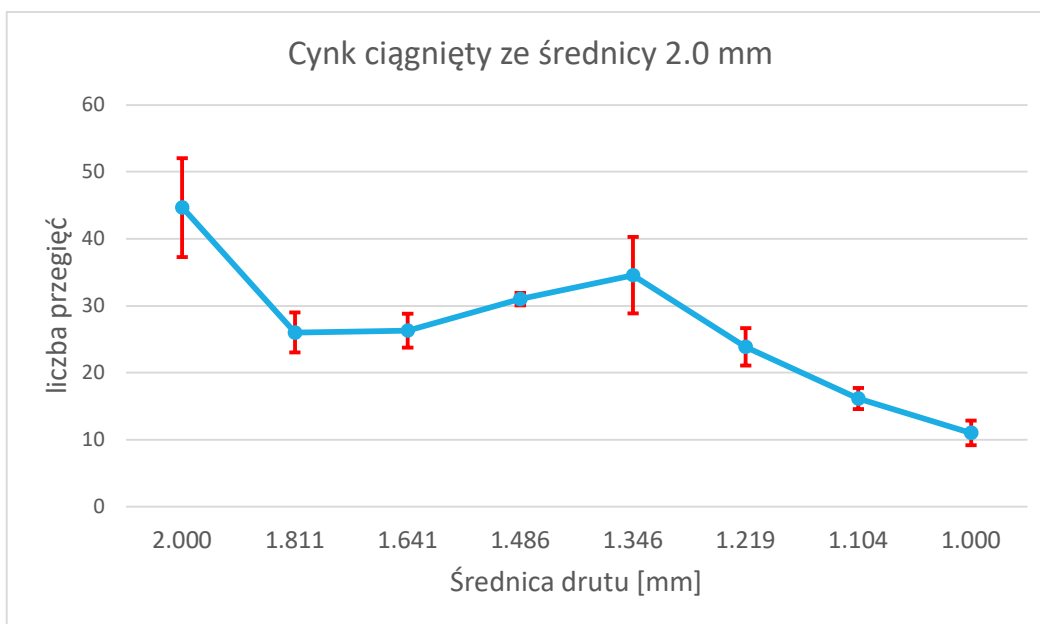
	Średnica	R[mm]	H[mm]	1	2	3	4	5	6	7	średnia
1	1.486	3,75	20	82	92	86	102	84	106		92
2	1.346	3,75	20	70	21	94	108	31	61		64
3	1.219	3,75	20	111	77	109	137	64	115		102
4	1.104	3,75	20	28	75	24	54	18	46	87	47
5	1.000	2,5	15	12	21	15	32	31	36		25
6	0.913	2,5	15	8	18	22	13	63	39		27
7	0.833	2,5	15	53	61	34	76	31	34		48

Tabela 7.3. Wyniki prób przeginania dla drutów ciągniętych ze średnicy 2 mm

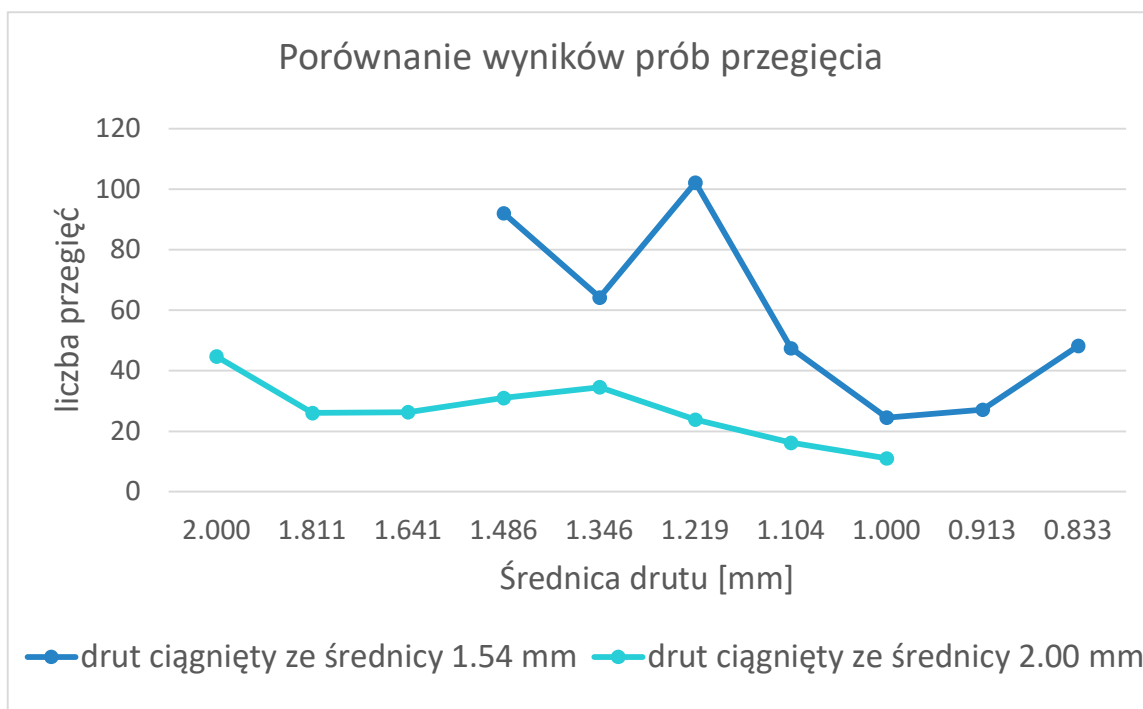
	Średnica	R[mm]	H[mm]	1	2	3	4	5	6	7	średnia
1	2.000	5	20	52	70	59	30	28	29		45
2	1.811	5	20	22	21	26	39	19	29		26
3	1.641	5	20	14	23	31	30	32	27	27	26
4	1.486	5	20	31	32	31	34	27	31		31
5	1.346	3,75	20	41	25	31	54	15	31	45	35
6	1.219	3,75	20	16	25	18	28	35	18		24
7	1.104	3,75	20	20	12	12	20	20	13		16
8	1.000	2,5	15	16	7	8	6	16	9	15	11



Rysunek 7.3. Zależność uzyskanej średniej ilości przegięć od średnicy badanego drutu dla średnicy początkowej równej 1.54 mm z zaznaczonym błędem standardowym



Rysunek 7.4. Zależność uzyskanej średniej ilości przegięć od średnicy badanego drutu dla średnicy początkowej równej 2.0 mm z zaznaczonym błędem standardowym



Rysunek 7.5. Zależność uzyskanej ilości przegięć od średnicy badanego drutu dla średnicy początkowej równej 1.54 oraz 2.0 mm

7.3. Dyskusja wyników

Wykonane testy dostarczyły wielu ważnych informacji na temat właściwości uzyskanych drutów. Wstępnie należy zaznaczyć, iż drutu o średnicy rzędu 1.0 mm są obecnie wykorzystywane do procesu spajania pękniętych kości u zwierząt domowych. Z przeprowadzonej analizy wyraźnie widać, że mimo iż skład chemiczny drutów ciągniętych ze średnicy 2.0 mm oraz 1.54 mm był taki sam, ich odporność na przeginanie znacząco się różniła dla tych samych średnic. W przypadku zaimplementowanej techniki ciągnięcia drut o średnicy 1.0 mm ciągnięty z 1.54 mm ma minimalną ilość przegięć rzędu 25 przy 11 dla drutu ciągniętego ze średnicy 2.0 mm. O ile wyniki dla cieńszego materiału wsadowego są możliwe do zaakceptowania o tyle dla drugiego mogą okazać się niewystarczające podczas wiązania węzła chirurgicznego.

Ciekawa jest też duża rozbieżność wyników dla próbek o tej samej średnicy pochodzących z tego samego ciągu. Sugeruje to, że uzyskany drut nie jest izotropowy wzdłuż całej swojej długości.

Na wykresie 7.5 dla mniejszej średnicy początkowej można wyraźnie zaobserwować, że dla średnicy drutu w okolicach 1.0 mm występuje minimum. Prawdopodobnie może to wynikać ze zmiany orientacji krystalograficznej w materiale ale aby to potwierdzić konieczne są dalsze badania. Dodatkowo można zauważyć, iż przy redukcji średnicy z 1.0 mm do 0.833 mm ilość przegięć rośnie z około 24 do 48. W związku z tym można wnioskować, że dalszy proces ciągnięcia może poprawić własności plastyczne tego materiału. Niestety biorąc pod uwagę niską wytrzymałość tego materiału rzędu 100MPa, drut o mniejszych średnicach (poniżej 0.8 mm) nie może być wykorzystany w procesie spajania kości.

8. Podsumowanie

W ramach niniejszej pracy udało się zrealizować wszystkie cele szczegółowe przez co zrealizowano główny cel pracy czyli zaimplementowano oprogramowanie sterujące procesem ciągnięcia drutu oraz monitorujące jego przebieg. Stworzono w pełni funkcjonalne stanowisko do realizacji procesu ciągnięcia drutów, które może posłużyć do badań nad różnymi rodzajami materiałów. Wykonano oraz skonfigurowano połączenie pomiędzy panelem HMI a sterownikami serwomotorów a następnie zaimplementowano oprogramowanie, które umożliwia sterowanie procesem ciągnięcia oraz monitorowanie jego parametrów. Stworzono graficzny interfejs użytkownika dedykowany dla użytego panelu HMI, który umożliwia łatwą obsługę urządzenia.

Po wykonaniu projektu przeprowadzono niezbędne testy realizując proces ciągnięcia cynku. Próby wykazały, że wszystkie założenia dotyczące stworzonego systemu zostały spełnione i umożliwiają prawidłowe wykonanie procesu ciągnięcia. Stworzony interfejs użytkownika umożliwia kontrolę nad najważniejszymi parametrami ciągnięcia oraz analizę i eksport danych dotyczących momentu ciągnięcia.

Druty wykonane przy użyciu ciągarci poddano próbom dwukierunkowego przeginania a następnie opracowano wyniki. Pomiary wykazały, że w przypadku drutów z cynku istotny jest nie tylko skład chemiczny materiału ale również średnica z której materiał jest ciągniony oraz liczba przeprowadzonych ciągów. Dodatkowo wykazano, że materiał nie jest izotropowy po długości przez co właściwości drutu mogą się znacząco różnić w zależności od badanego fragmentu.

9. Bibliografia

- [1] Milenin A., Kustra P., Byrska-Wójcik D., Wróbel M., Packo M., Sulej-Chojnacka J., Matuszyńska S., 2020 *Production of zinc wire for use as a high strength biodegradable surgical threads*, 18th International Conference Metal Forming 2020
- [2] Milenin, A., Kustra, P., Byrska-Wójcik, D., Grydin, O., Schaper, M., Mentlein, T., Nürnberger, F. (2016). *Analysis of Microstructure and Damage Evolution in Ultra-Thin Wires of the Magnesium Alloy MgCa0.8 at Multipass Drawing*. *JOM*, 68(12), 3063–3069. doi:10.1007/s11837-016-2127-3
- [3] D. Halaczek, *Ciągnienie drutu – podstawy teoretyczne i ćwiczenia laboratoryjne*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012
- [4] <http://www.metalplast.pwr.wroc.pl/old/pliki/lab5.pdf>
- [5] Lespinasse, V. D., Fisher, G. C., & Eisenstaedt, J., (1910). *A Practical Mechanical Method of End-to-end Anastomosis of Blood-vessels*. *Journal of the American Medical Association*, 55(21), 1785.
- [6] McBride, E. D. (1938). *Absorbable Metal in Bone Surgery*. *Journal of the American Medical Association*, 111(27), 2464.
- [7] Witte, F., Hort, N., Vogt, C., Cohen, S., Kainer, K. U., Willumeit, R., & Feyerabend, F. (2008). *Degradable biomaterials based on magnesium corrosion*. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 12(5-6), 63–72. doi:10.1016/j.cossms.2009.04.001
- [8] Kubásek, J., Vojtěch, D., Jablonská, E., Pospíšilová, I., Lipov, J., & Ruml, T. (2016). *Structure, mechanical characteristics and in vitro degradation, cytotoxicity, genotoxicity and mutagenicity of novel biodegradable Zn–Mg alloys*. *Materials Science and Engineering: C*, 58, 24–35.
- [9] Bowen, P. K., Drelich, J., & Goldman, J. (2013). *Zinc Exhibits Ideal Physiological Corrosion Behavior for Bioabsorbable Stents*. *Advanced Materials*
- [10] J. Kubasek, I. Pospíšilová, D. Vojtěch, E. Jablonská, T. Ruml, Structural, mechanical and cytotoxicity characterization of as-cast biodegradable Zn–xMg (x = 0.8–8.3 %) alloys
- [11] <https://www.eldar.biz/>
- [12] Kugelstad T., *The RS-485 Design Guide, Application Report SLLA272C*–February 2008–Revised October 2016
- [13] Modbus Application Protocol Specification V1.1b
https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf