



**Politechnika  
Śląska**

## **PRACA MAGISTERSKA**

Opracować stanowisko dydaktyczne z serwonapędem pneumatycznym  
z mikrokontrolerem o otwartej architekturze

**Paweł MIKOŁAJ**

**291467**

**Kierunek:** Automatyka i Robotyka Przemysłowa (AiRP)

**Ścieżka dyplomowania/specjalność:** Zaawansowane układy sterowania  
maszyn i procesów (AC7)

**PROMOTOR**

**dr inż. Klaudiusz Klarecki**

**Katedra Automatyzacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych  
Systemów Wytwarzania – RMT2**

**Wydział Mechaniczny Technologiczny**

**GLIWICE 2025**



**Tytuł pracy:**

Opracować stanowisko dydaktyczne z serwonapędem pneumatycznym z mikrokontrolerem o otwartej architekturze.

**Streszczenie:**

Autor pracy obrał za cel zbudowanie stanowiska dydaktycznego z serwonapędem pneumatycznym sterowanym za pomocą mikrokontrolera o architekturze otwartej. Kluczowym elementem projektu była integracja elementów przemysłowych pracujących na napięciu 24VDC z elementem hobbyistycznym w postaci modułu Arduino UNO pracującego na napięciu 5VDC. Zbudowany serwonapęd pneumatyczny wyróżniał się nietypowym zastosowaniem zaworów o krótkim czasie przełączania do sterowania pozycją tłoczyka siłownika. Do sterowania elektrozaworami wykorzystano sygnał PWM z zmiennym procentem wypełnienia stanem wysokim, regulowanym poprzez programowy regulator położenia PID.

**Słowa kluczowe:**

pneumatyka, serwonapęd, PWM, mikrokontroler, szybko-przełączające

**Thesis title:**

Develop a teaching station with a pneumatic servo drive and an open architecture microcontroller

**Abstract:**

The author of the paper aimed to build a didactic workstation featuring a pneumatic servo-drive controlled by an open-architecture microcontroller. A key aspect of the project was integration of industrial components operating at 24VDC with a hobby-grade element in the form of Arduino UNO module operating at 5VDC. Constructed pneumatic servo-drive stands out by unconventional use of fast-switching valves for controlling the actuator rod position. The solenoid valves were driven by a PWM signal with a variable duty cycle, regulated by software PID position controller.

**Keywords:**

pneumatics, servo-drive, PWM, microcontroller, fast-switching



# **Spis treści**

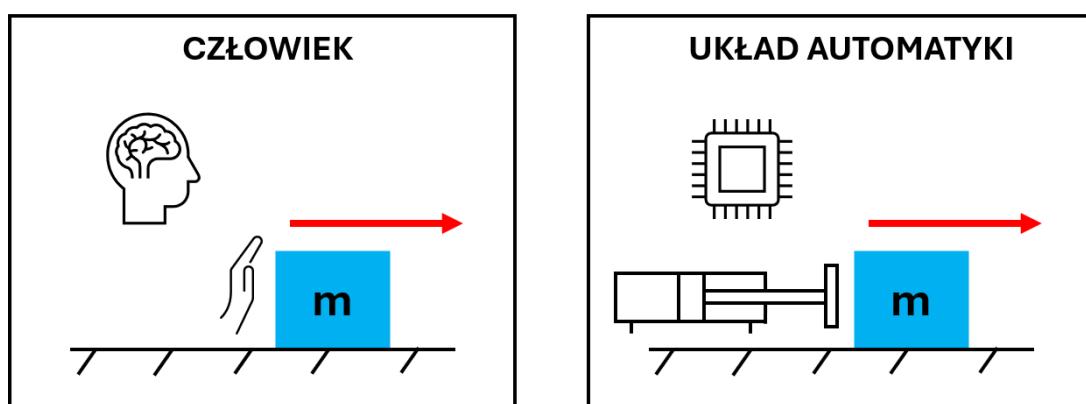
1. Wprowadzenie .....	7
2. Cel i zakres pracy.....	9
3. Wstęp teoretyczny .....	10
3.1. Serwonapęd - definicja .....	10
3.2. Napędy pneumatyczne .....	10
3.3. Sterowanie pneumatyczne .....	12
3.4. Regulatory .....	13
3.5. Mikrokontrolery .....	15
3.6. Urządzenia pomiarowe .....	16
4. Wstępne założenia projektu.....	18
4.1. Założenia klasycznego serwonapędu opartego na napędzie substancialnym.	18
4.2. Sposób sterowania w zależności od doboru kluczowych elementów .....	20
4.3. Przegląd mikrokontrolerów o architekturze otwartej.....	22
5. Projekt stanowiska .....	24
5.1. Układ pneumatyczny.....	24
5.2. Urządzenie pomiarowe i więzy mechaniczne .....	28
5.3. Mikrokontroler .....	30
5.4. Układ elektryczny, algorytm sterowania i komunikacja.....	30
6. Badania przeprowadzone na stanowisku.....	43
7. Podsumowanie i wnioski.....	48
Bibliografia .....	50
Załącznik 1. Dokumentacja serwisowa stanowiska. .....	53
Załącznik 2. Instrukcja obsługi stanowiska.....	77
Załącznik 3. Instrukcja ćwiczenia laboratoryjnego.....	89
Załącznik 4. Wzorcowe sprawozdanie z ćwiczenia laboratoryjnego.....	99



# 1. Wprowadzenie

Istotą automatyzacji przemysłu jest zastąpienie pracy ludzkiej pracą maszyn i urządzeń, główne cele automatyzacji obejmują eliminację potencjalnych błędów wynikających z czynnika ludzkiego podczas wykonywania pracy, zwiększenie efektywności wykonywanej pracy, zmniejszenie kosztów wynikających z zatrudnienia oraz poprawę bezpieczeństwa zakładu pracy pod względem potencjalnych urazów wynikających z pracy fizycznej.

W dużym skrócie automatyzacja czynności wykonywanych wcześniej przez człowieka odbywa się poprzez zastąpienie czynności umysłowych i fizycznych pozwalających na wykonanie schematu działań potrzebnych do wykonania określonego procesu logiką sterowania (algorytmem sterowniczym) oraz układem wykonawczym (rys. 1). Układ wykonawczy można przedstawić jako zbiór elementów mechanicznych nadających wszystkim elementom układu odpowiednie więzy (np. prowadnice, konstrukcja stalowa, itp.) oraz zbiór napędów pozwalający na wykonanie zamierzonych ruchów w układzie.



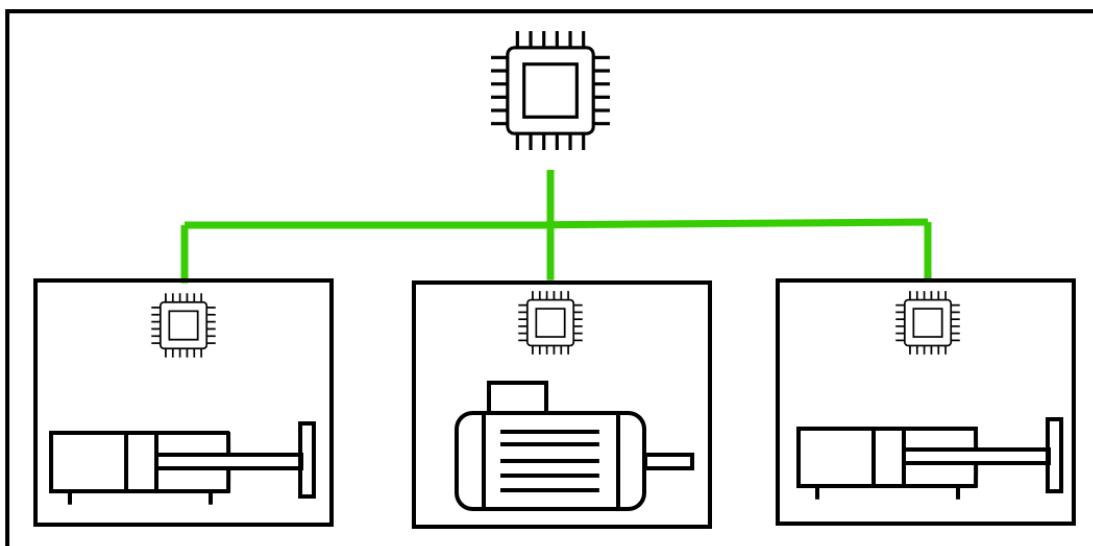
Rys. 1. Człowiek i układ automatyki realizujący to samo zadanie.

Wśród napędów jakie można spotkać w przemyśle wyróżnia się napędy elektryczne oraz substancialne, klasyfikacja ta zależy od rodzaju energii dostarczanej do napędu w celu wykonania pracy mechanicznej, pozwalającej na wykonanie zamierzonego ruchu. Jak sama nazwa wskazuje napęd elektryczny wykonuje pracę mechaniczną kosztem dostarczonej energii elektrycznej, w przypadku napędów substancialnych natomiast energią niezbędną do wykonania pracy jest medium robocze w postaci gazu (napędy pneumatyczne) lub cieczy (napędy hydrauliczne).

Napędy w układzie automatyki niezależnie od rodzaju dostarczanej do nich energii można sklasyfikować również pod względem możliwości kontroli oraz regulacji ruchu wykonywanego przez napęd, i tak napędy z automatyczną regulacją położenia nazywa się serwonapędami. Główną cechą serwonapędu jest wysoka precyzaja pozycjonowania, przyczynia się temu zasada jego działania, otóż układ serwonapędu działa w sposób, w którym wielkością zadaną jest przemieszczenie lub położenie

a wykonywanie ruchu, aby osiągnąć wielkość zadaną odbywa się wraz z monitorowaniem rzeczywistego położenia lub przemieszczenia i automatycznej regulacji tych wartości.

Jak wspomniano wcześniej czynności układu automatyki wykonywane są na podstawie logiki sterowania, logika ta wykonywana jest za pomocą jednostki sterującej (np. sterownik PLC), i tak ruch napędów układu jest kontrolowany właśnie przez jednostkę sterującą, ale w przypadku serwonapędów jedynie w sposób pośredni, gdyż układ serwonapędu posiada również swoją własną jednostkę sterującą spełniającą zazwyczaj również funkcję regulatora (rys. 2).



Rys. 2. Uproszczona przykładowa struktura sterowania układu automatyki z trzema serwonapędami.

Serwonapędy, czyli układy napędowe działające w sprzężeniu zwrotnym w postaci pozycji ze względu na swoją wysoką dokładność pozycjonowania oraz automatyczną regulację położenia odgrywają istotną rolę w automatyzacji przemysłu.

## **2. Cel i zakres pracy**

Celem pracy było opracowanie projektu serwonapędu pneumatycznego, ze sterownikiem w postaci mikrokontrolera o architekturze otwartej realizującym programowo funkcję regulatora położenia. Opracowany serwonapęd miał służyć celom dydaktycznym.

Zakres prac obejmował dogłębną analizę serwonapędów pneumatycznych oraz wyznaczenie kluczowych jego elementów i ich wpływu na charakterystykę serwonapędu. Ponadto przedmiotem prac był przegląd mikrokontrolerów o architekturę otwartej pod kątem pełnienia funkcji programistycznego regulatora oraz sterownika serwonapędu oraz opracowanie algorytmu sterowania jak i więzów mechanicznych, co ostatecznie składało się na pełny projekt stanowiska dydaktycznego.

### 3. Wstęp teoretyczny

#### 3.1. Serwonapęd - definicja

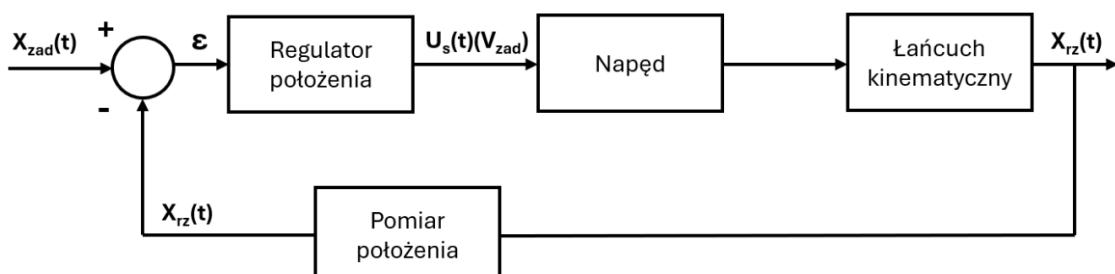
Jak wspomniano wcześniej serwonapędem definiuje się zamknięty układ automatycznej regulacji. Wielkość regułowana to najczęściej położenie lub prędkość, w przypadku serwonapędu z jedynie regułowanym położeniem, zadana wartość (przez np. główną jednostkę sterującą) przemieszczenia lub położenia regułowana jest w każdym momencie, kiedy różnica pomiędzy wartością rzeczywistą  $X_{rz}$  a zadaną  $X_{zad}$  położenia jest większa od dopuszczalnej dla danej aplikacji. Tą różnicę nazywa się uchybem położeniowym  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = X_{zad} - X_{rz} \quad (3.1)$$

, a więc dopóki zależność

$$\varepsilon > \varepsilon_{dop} \quad (3.2)$$

jest prawdziwa to układ serwonapędu realizuje regulację położenia lub przemieszczenia w celu uzyskania zamierzonej dokładności pozycjonowania  $\varepsilon_{dop}$ . Łatwo zauważyć, iż w celu realizacji pokazanego wyżej zadania układ serwonapędu potrzebuje informacji o aktualnym rzeczywistym położeniu, co przekłada się na wymog istnienia pomiaru położenia wchodzącego w skład układu serwonapędu. Układ serwonapędu możemy więc przedstawić jako zamknięty układ kontroli pozycji łańcucha kinematycznego dołączonego do napędu w pętli sprzężenia zwrotnego którym jest wspomniany pomiar rzeczywistej pozycji (rys. 3) [1].



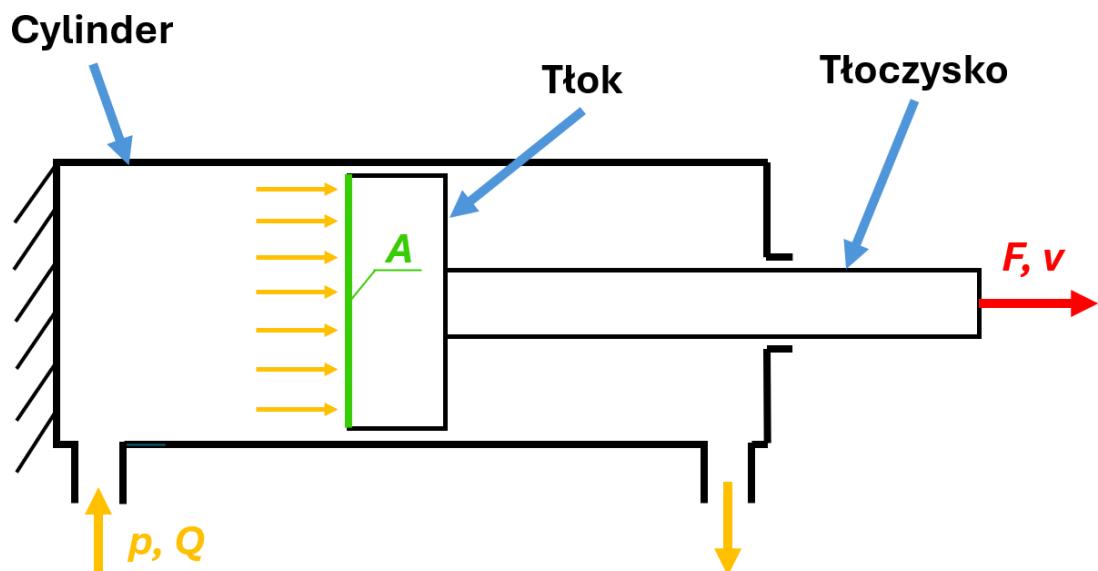
Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy serwonapędu analogowego.

#### 3.2. Napędy pneumatyczne

Miano najczęściej spotykanych w przemyśle napędów przyjmują napędy elektryczne, zaraz po nich drugim z najczęściej spotykanym w przemyśle napędem jest napęd pneumatyczny, jak sama nazwa wskazuje jest to napęd substancialny wykorzystujący jako swoje medium robocze gaz. Ze względu na dostępność, mniejsze koszty za samo medium robocze w porównaniu do innych gazów, przystępniejsze wymogi

utylizacyjne oraz bezpieczeństwo napędy pneumatyczne przystosowane są do pracy z ogólnie-dostępnym (w atmosferze) powietrzem [2].

Klasyfikacji napędów pneumatycznych dokonuje się głównie pod względem zasad ich działania, to jest sposobu w jaki realizują one zamierzony ruch, ich cech konstrukcyjnych oraz też samego rodzaju wykonywanego ruchu. Główna klasyfikacja obejmuje podział względem rodzaju ruchu roboczego, dzieli się tutaj dane napędy na silniki obrotowe realizujące obrotowy ruch roboczy oraz siłowniki, zwane inaczej aktuatorami których cechą jest liniowy sposób pracy (ruch liniowy). Klasyczny podział siłowników obejmuje siłowniki beztłoczkowe i tłoczkowe, różnica w ich budowie polega jak sama nazwa wskazuje na obecność bądź brak tłoczyska w konstrukcji aktuatora. Kolejną klasyfikacją jest podział ze względu na możliwość sterowania kierunkiem ruchu aktuatora, mówi się tutaj o siłownikach jednostronnego oraz dwustronnego działania [1-3]. Na potrzeby tej pracy przyjrzało się konstrukcji oraz zachowaniu jednego z najbardziej powszechnych siłowników pneumatycznych, to jest siłownika tłoczkowego dwustronnego działania (rys. 4).



Rys. 4. Konstrukcja oraz parametry siłownika tłoczkowego dwustronnego działania.

Jak można zauważyć na powyższym rysunku ruch tłoczyska siłownika odbywa się na wskutek siły nacisku na tło, siła nacisku w cylindrze siłownika powstaje poprzez doprowadzenie do jego komory sprężonego powietrza, wartość ciśnienia jest ustalanyzowana i waha się zazwyczaj pomiędzy 6 a 8 bar. Wartość siły  $F$  jaka jest generowana podczas ruchu siłownika zależna jest od pola powierzchni tła A na które działa ciśnienie sprężonego powietrza  $p$ , wspomnianą siłę można wyznaczyć według następującej zależności:

$$F = A p \quad [N = m^2 Pa] \quad (3.3)$$

, łatwo zauważyć, iż w przypadku siłownika tłoczkowego dwustronnego działania przy tym samym ciśnieniu roboczym wartość siły pchającej tłoczyko będzie inna (większa) niż

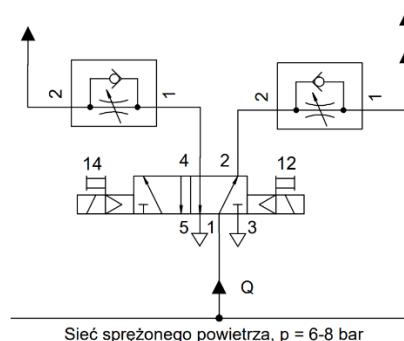
siła ciągnąca, wynika to z mniejszej o powierzchnię zajmowaną przez tłoczyko powierzchni tłoka aktuatora. Jak można się domyślić zjawisko to nie występuje w siłownikach beztłoczkowych. Prędkość v tłocyska siłownika zależy od przepływu (natężenia) strumienia sprężonego powietrza  $Q$  oraz pola powierzchni tłoka  $A$ , wartość prędkości można wyznaczyć korzystając z następującej zależności [1,3]:

$$v = \frac{Q}{A} \left[ \frac{m}{s} = \frac{\frac{m^3}{h}}{\frac{m^2}{m^2}} \right] \quad (3.4)$$

Podana wyżej zależność wskazuje jakoby siłownik pracował w sposób liniowy, gdzie prędkość tłocyska jest proporcjonalna do natężenia przepływu. W rzeczywistości jednak podany wzór nie bierze pod uwagę wpływu ściśliwości powietrza, różnic w objętości komór siłownika czy też tarcia pomiędzy elementami aktuatora. Faktyczny model pracy siłownika jest bardziej skomplikowany i wynika między innymi z równania stanu gazu doskonałego i II zasady dynamiki Newtona. Zależność (3.4) jest więc bardzo dużym uproszczeniem a klasyczny siłownik cechuje się nieliniową pracą [4,11].

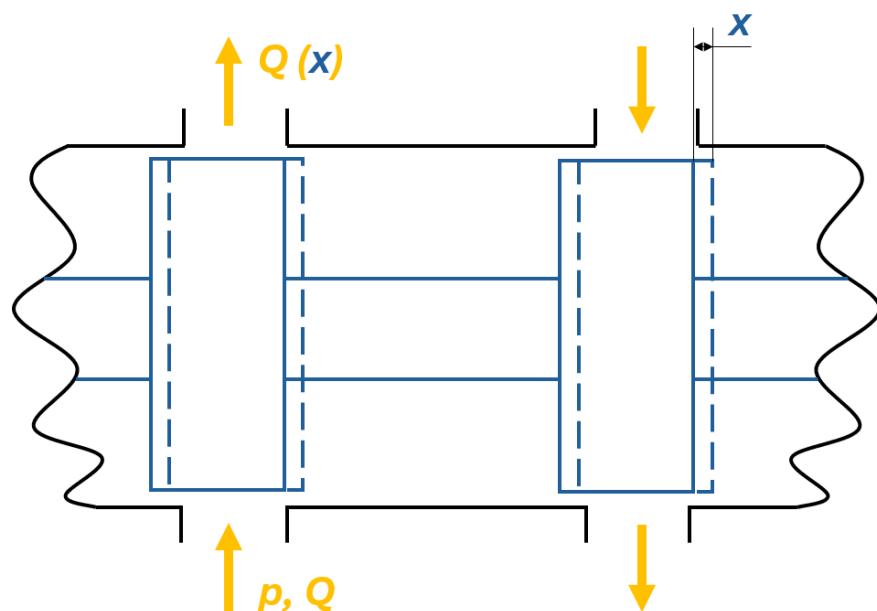
### 3.3. Sterowanie pneumatyczne

Nieodłącznym elementem układu z siłownikiem pneumatycznym jest zawór, jest to element, dzięki któremu można kontrolować kierunek, natężenie przepływu oraz wartość ciśnienia czynnika roboczego, tj. sprężonego powietrza, co pozwala nam na sterowanie oraz dostrojenie (dostosowanie do obsługiwanej aplikacji) napędu pneumatycznego. Klasyczne aktuatora pneumatyczne działają w sposób dwustanowy, gdzie zawór spełnia zadanie przesterowania tłocyska siłownika z stanu wysuniętego do schowanego i na odwrót, czynność ta jak można się domyślić odbywa się poprzez przekierowanie sprężonego powietrza po jednej stronie tłoka siłownika i udrożnienie drugiej. Zawory odpowiedzialne za sterowanie kierunkiem zasilania medium roboczego (sprężonego powietrza) nazwane są rozdzielaczami lub zaworami rozdzielającymi. Układ z siłownikiem pneumatycznym oprócz rozdzielacza posiada zazwyczaj również zawory dławiące pozwalające użytkownikowi dostosować wartość natężenia przepływu sprężonego powietrza (rys. 5) [1-3].



Rys. 5. Przykład układu zaworu rozdzielającego z dwoma zaworami dławiąco-zwrotnymi służący do sterowania dwustanowego siłownika.

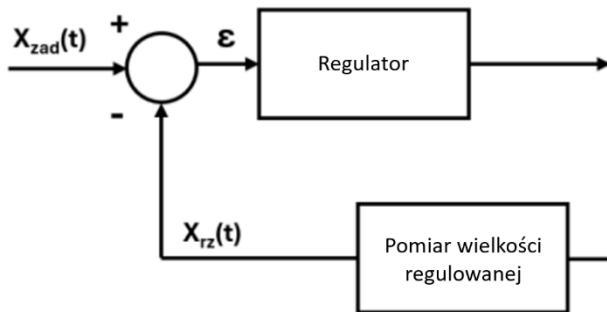
Szczególnym przypadkiem rozdzielacza jest rozdzielacz (zawór) proporcjonalny, który to w pewien sposób łączy w sobie działanie zaworu rozdzielającego oraz dławiącego pozwalając na sterowanie napędem pneumatycznym w sposób ciągły. Zawory proporcjonalne zazwyczaj cechuje budowa suwakowa. W rozdzielaczu proporcjonalnym wartość przepływu sprężonego powietrza jest funkcją zależną od aktualnego wymiaru szczeliny powstałej pomiędzy suwakiem a komorą zaworu (rys. 6). Pozycja suwaka zazwyczaj wymuszona jest elektromagnetycznie. Rozróżnia się rozdzielacze proporcjonalne przepływowe i ciśnieniowe w zależności od kontrolowanej wielkości, warto tutaj wspomnieć, iż sterowanie przepływem  $Q$  pozwala na kontrolę prędkości siłownika co wynika z zależności (3.4). Analogicznie sterowanie ciśnieniem  $p$  pozwala na kontrolę siły z jaką operuje siłownik co natomiast można wywnioskować na podstawie zależności (3.2) [1,2,4].



Rys. 6. Uproszczona budowa i zasada działania suwakowego zaworu proporcjonalnego.

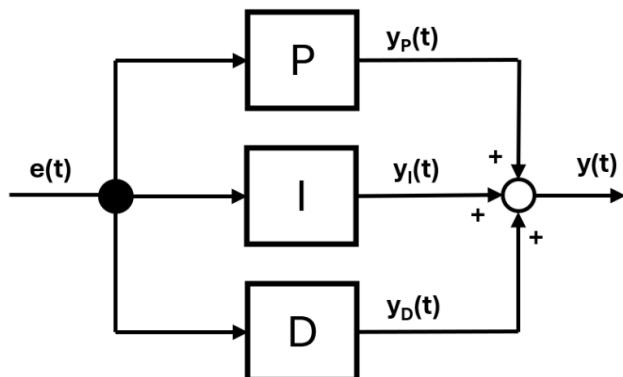
### 3.4. Regulatorzy

Układ automatycznej regulacji do prawidłowego działania potrzebuje regulatora, którego zadaniem jest sterowanie urządzeniem wykonawczym układu. Istotną funkcją regulatora jest dostrojenie sygnału sterującego w taki sposób, aby obiekt regulacji osiągnął zadaną wartość sterowanej wielkości (pozycje, przemieszczenie, siłę...). Realizacja tej funkcji odbywa się na podstawie informacji o wartości zadanej sterowanej wielkości (np. od głównej jednostki sterującej) oraz na podstawie informacji o rzeczywistej wartości przekazywanej do regulatora za pomocą urządzenia pomiarowego (rys. 7).



Rys. 7. Część schematu blokowego układu automatycznej regulacji.

Idea regulacji polega na wyznaczeniu uchybu wielkości sterowanej (regulowanej) – równanie (3.1), oraz zastosowanie odpowiednich algorytmów do wzmacnienia lub wygaszenia sygnału sterującego urządzeniem wykonawczym. Algorytmy te definiują to jak będzie wyglądała charakterystyka sygnału sterującego w funkcji czasu. Algorytmy regulatorów składają się zazwyczaj z kilku członów (rys. 8), wyróżnia się tutaj człon proporcjonalny (P), całkujący (I) oraz różniczkujący (D), i tak można przykładowo spotkać regulatory P, PI, PD lub PID [5,6].



Rys. 8. Schemat blokowy przykładowego regulatora PID.

Algorytm regulatora PID w dziedzinie czasu przedstawia się jako funkcję:

$$y(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_C} \int_0^t e(t) dt + T_R \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

, gdzie:  $K_p$  – wzmacnienie (człon P),  $e$  – uchyb regulacji,  $T_C$  – stała czasowa akcji całkującej (człon I),  $T_R$  – stała czasowa akcji różniczkującej (człon D).

Transmitancja operatorowa więc regulatora PID wygląda następująco:

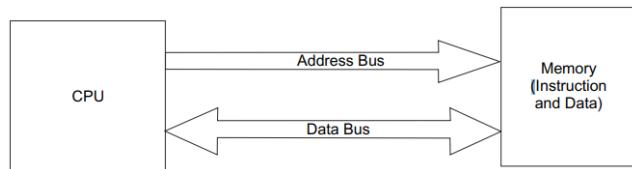
$$G(s) = K_p + \frac{1}{sT_C} + sT_R \quad (3.6)$$

Podane powyżej równania tyczą się regulatora PID o strukturze równoległej niezależnej, w praktyce spotkać można również regulatorów o innych strukturach dla których funkcja w dziedzinie czasu jak i co za tym idzie transmitancja operatorowa przyjmą inną postać [5,6].

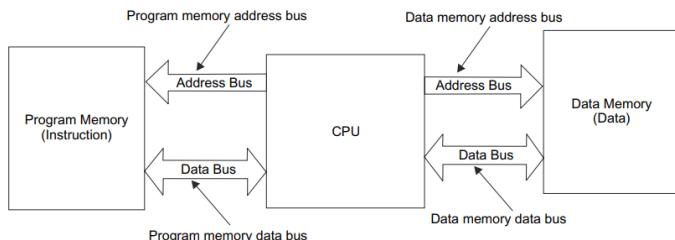
### 3.5. Mikrokontrolery

Mikrokontroler jest to układ scalony przystosowany do sprawowania kontroli nad innymi układami elektronicznymi, łatwo więc się domyślić, iż najważniejszym podzespołem mikrokontrolera jest procesor, który to sprawuje funkcje przetwarzania danych oraz modyfikacji sygnałów sterujących innymi układami elektronicznymi. Funkcje te działają według ustalonego programu określonego przez użytkownika, co narzuca wymóg obecności pamięci typu ROM w układzie scalonym służącej do przechowywania programu sterującego, jak i pamięci typu RAM służącej do przechowywania danych. Komunikacja z otoczeniem odbywa się przy użyciu układu wejść/wyjść w jaki musi być wyposażony mikrokontroler, rodzące wymienianych sygnałów zazwyczaj pozwalają sklasyfikować dany mikrokontroler pod względem możliwości sterowania innymi układami. Obecnie poza podstawowymi sygnałami cyfrowymi w układzie scalonym omawianego kontrolera zazwyczaj dostępny jest również odbiór jak i wyprowadzenie sygnałów analogowych, co znacznie rozszerza jego zastosowanie [7,8].

Wymiana danych pomiędzy procesorem (CPU) a pamięcią ROM i RAM w mikrokontrolerze odbywa się zazwyczaj według architektury Von Neumanna lub według architektury Harwardzkiej. Architektura Von Neumanna cechuje się jednym nośnikiem danych przechowującym zarówno pamięć programu jak i pamięć danych (rys. 9). Inaczej jest w przypadku architektury Harwardzkiej, w której to można znaleźć rozdział pamięci ROM od pamięci RAM (rys. 10). Przewagą architektury Harwardzkiej jest szybszy dostęp do pamięci programu oraz pamięci danych [9].



Rys. 9. Architektura Von Neumanna [9].



Rys. 10. Architektura Harwardzka [9].

Jednym z kluczowych cech mikrokontrolera jest jego architektura pod względem możliwości wprowadzenia modyfikacji/ulepszeń przez użytkownika, klasyfikuje się więc mikrokontroler pod względem jego otwartej lub zamkniętej architektury, zarówno od strony hardware'u jak i software'u [10]. Otwarta architektura kontrolera pozwala na przystosowanie go do potrzeb aplikacji bez ograniczeń narzuconych przez producenta

chociażby w postaci doboru komponentów. Kontrolery o architekturze zamkniętej są często przystosowane do jednego celu określonego odgórnie przez producenta, niemniej jednak oferują one większe bezpieczeństwo i niezawodność. Reasumując mikrokontrolery o architekturze otwartej odnajdują swoje zastosowanie wszędzie tam, gdzie potrzebna jest elastyczność i potrzeba modyfikacji, bez konieczności zapewnienia wysokiej niezawodności, przykładami mogą być prototypy różnych koncepcji czy też aplikacje o niskich wymaganiach realizowane w celach hobbyistycznych.

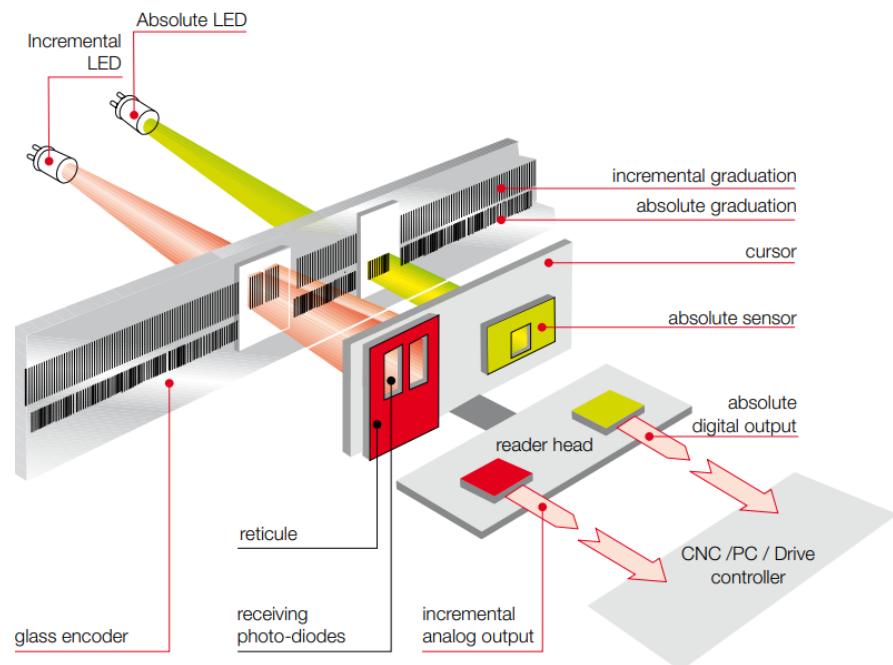
### **3.6. Urządzenia pomiarowe**

W przypadku napędów substancialnych można mówić zarówno o ruchu obrotowym, co przekłada się na silniki substancialne oraz napędy wahadłowe jak i o ruchu liniowym, na który składają się siłowniki. Na potrzeby tej pracy skupiono się na siłownikach wykonujących ruch liniowy. W przypadku tego rodzaju ruchu wyróżnia się dwie własności: pozycję oraz przemieszczenie. Pozycja oznacza nic innego jak miejsce w zakresie pomiarowym w którym znajduje się badany punkt w odniesieniu do całego zakresu pomiarowego. Przemieszczenie natomiast oznacza różnicę pomiędzy punktem końcowym ruchu a początkowym, na podstawie tych własności pomiarowych można w sposób pośredni wyznaczyć prędkość wykorzystując znany czas przejazdu. W automatyce wyróżnia się ruch zarówno absolutny (do zadanej pozycji, niezależnie od punktu początkowego ruchu) jak i ruch inkrementalny (określona wartość przemieszczenia, np. ruch w prawo o 20 mm). W obu przypadkach pomiar może odbywać poprzez szereg komponentów składających się na systemy pomiaru położenia. Systemy te klasyfikuje się w zależności od sposobu wykonywania pomiaru, wyróżnia się tutaj urządzenia pomiarowe wykorzystujące zjawisko magnetostrykcyjne, w których tłok układu wyposażony jest w magnes pomiarowy którego pole elektromagnetyczne reaguje na pole elektromagnetyczne impulsu napięciowego wysyłanego przez układ co określona ilość czasu. Interakcja ta powoduje odkształcenie w materiale magnetostrykcyjnym, z którego zbudowane jest tloczysko systemu pomiarowego, a co za tym idzie powstaje fala uderzeniowa, wykrycie fali przez układ jest podstawą do wyznaczenia pozycji [4,12].

Innym sposobem pomiaru położenia tłoka siłownika o ruchu liniowym są układy pomiarowe bazujące na potencjometrach liniowych działające w sposób kontaktowy, gdzie za sprawą zmiany rezystancji na ścieżce, po której porusza się suwak układu pomiarowego wyznaczamy jego pozycję. Wyróżnić można również inne systemy pomiaru położenia takie jak na przykład optyczne czujniki odległości. Wybór odpowiedniego systemu jest kluczowy pod względem prawidłowego działania serwonapędu, gdyż wybrany system pomiaru położenia narzuca określony sposób montażu jak i samej konstrukcji układu serwonapędu oraz definiuje możliwości pod względem funkcjonalności stanowiska [12].

Liniowy pomiar położenia może odbywać się również za pomocą enkoderów liniowych inkrementalnych oraz absolutnych. Wyróżnia się tutaj enkodery optyczne oraz magnetyczne. Oba rodzaje enkoderów bazują na odpowiednio wyprofilowanym (zakodowanym) pasku, przez który w przypadku enkodera optycznego przechodzi wiązka światła wysyłana przez nadajnik, dającą informację o ruchu lub pozycji (rys. 11).

Enkodery magnetyczne działają w podobny sposób, jednakże do odczytu pozycji lub ruchu wykorzystują one pole magnetyczne [19].



Rys. 11. Przykład budowy i działanie enkodera liniowego optycznego [19].

Jednym z dość nietypowych sposobów pomiaru liniowego może być użycie odbiciowego czujnika optycznego (dalmierza), mierzącego odległość na podstawie wysłanej w stronę badanego obiektu wiązki światła. Odbita wiązka światła przetworzona jest na odległość badanego obiektu od czujnika na przykład na podstawie czasu jaki był jej potrzebny na dotarcie z powrotem do czujnika.

## **4. Wstępne założenia projektu**

Istotą tej pracy było stworzenie projektu stanowiska serwonapędu pneumatycznego przy użyciu mikrokontrolera o architekturze otwartej, w tym celu w pierwszej kolejności przyjrzano się standardowym rozwiązań serwonapędu opartego na napędzie substancialnym.

### **4.1. Założenia klasycznego serwonapędu opartego na napędzie substancialnym**

Serwonapęd może spełniać kilka podstawowych funkcji, wyróżnić tu można funkcje ciągłej kontroli położenia, funkcje ciągłej kontroli prędkości lub funkcje pozycjonera. Ciągła kontrola prędkości znajdzie swoje zastosowanie wszędzie tam, gdzie napęd może napotkać zmienne stany obciążenia i powinien utrzymać zadaną prędkość niezależnie od czynników zewnętrznych, taką funkcjonalność można najczęściej znaleźć w przypadku ruchu obrotowego. Ciągła kontrola położenia oznacza nic innego jak regulacja położenia serwonapędu w sposób nadążny (nadąża za wartością zadaną) w każdej chwili jego działania co przekłada się na dynamiczne dostosowywanie jego pozycji, taka funkcjonalność znajdzie swoje zastosowanie na przykład w ruchu synchronizowanym czy też w układach, dla których przewiduje się duże zakłócenia mechaniczne. Inna sytuacja dotyczy funkcjonalności typu pozycjoner, w której to układ automatycznej regulacji spełnia swoje zadanie jedynie w czasie trwania ruchu, to jest po uzyskaniu zadanej pozycji napęd się zatrzymuje a jego położenie nie jest regulowane aż do momentu zmiany wartości zadanej [15].

Serwonapędy oparte na napędach substancialnych mogą w teorii przyjąć każdą z wymienionych wyżej funkcjonalności, w praktyce jednak funkcjonalność ciągłej kontroli prędkości spotkać można głównie w serwonapędach opartych na napędach elektrycznych lub hydraulicznych, które często mają do czynienia z zmiennymi stanami obciążenia i nieprzerwaną pracą. Natomiast aplikacje wykorzystujące funkcjonalność ciągłej kontroli położenia czy też funkcjonalność pozycjonera można często spotkać również w serwonapędach z napędem pneumatycznym. Wybór odpowiedniej funkcjonalności serwonapędu zależy od założeń dotyczących jego zastosowania. Wybrana funkcjonalność serwonapędu definiuje to jakie komponenty powinny wejść w skład jego układu. Kluczowe elementy serwonapędu pneumatycznego, mające bezpośredni wpływ na jego możliwości, to urządzenie pomiarowe i urządzenie wykonawcze (w odniesieniu do rys. 7).

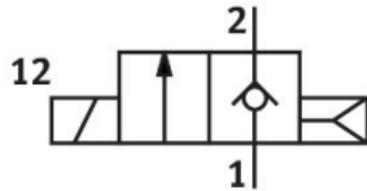
Jak wynika z rozdziału 3.6 urządzenie pomiarowe w układzie serwonapędu pneumatycznego z siłownikiem o ruchu liniowym może występować w różnych formach. Jednakże należy tutaj zaznaczyć, iż, przyjęte rozwiązanie dotyczące urządzenia pomiarowego będzie miało istotny wpływ na możliwą do uzyskania dokładność pomiaru

a co za tym idzie na regulację położenia serwonapędu. Układy pomiarowe takie jak systemy wykorzystujące zjawisko magnetostrykcyjne czy enkodery liniowe cechują się zazwyczaj wyższą dokładnością oraz też rozdzielczością pomiaru, jako drugie w kolejce można zaliczyć układy pomiarowe bazujące na potencjometrach liniowych. Ostatnim, cechującym się najmniejszą dokładnością pomiaru są układy bazujące na optycznym czujniku odbiciowym, które zarówno są też bardziej podatne na zakłócenia pomiaru wynikające z otwartego otoczenia w jakim działają (wymienione wyżej systemy pomiaru w przeciwnieństwie do dalmierza dokonują pomiaru zazwyczaj w zamkniętym otoczeniu, oddzielonym od reszty stanowiska) [4,12,19].

Jak wynika z wcześniejszej analizy dotyczącej zaworów używanych do kontroli napędów substancialnych, można wynioskować, iż serwonapęd oparty na silowniku o ruchu liniowym mógłby pełnić funkcje zarówno kontroli pozycji jak i siły, w praktyce jednak w związku z zależnościami występującymi pomiędzy natężeniem przepływu  $Q$  a ciśnieniem  $p$  stosuje się jedynie jeden rodzaj kontroli, najczęściej pozycji [11,13-14].

Miano urządzenia wykonawczego w układzie serwonapędu opartego na napędzie substancialnym przyjmuje zawór lub układ zaworów sterujących silownikiem. Zawór jest najbardziej istotnym elementem klasyfikującym dany serwonapęd, gdyż jego szybkość reakcji na sygnał od regulatora jak i szybkość zmiany wielkości sterowanej (parametrów medium zasilającego wejścia silownika) ma bezpośredni wpływ na możliwości serwonapędu. Pełna kontrola nad prędkością i przyspieszeniem silownika możliwa będzie do uzyskania tylko przy użyciu komponentów cechujących się właśnie szybką reakcją na sygnał sterujący i równie szybkim działaniem. Serwonapęd z definicji powinien działać w sposób ciągły, co pozwala na nieprzerywaną kontrolę jego pozycji, prędkości i siły (lub momentu w przypadku ruchu obrotowego) z jaką operuje. Zaworem jaki pozwoli na takie działanie serwonapędu jest rozdzielacz proporcjonalny. Rozdzielacz ten powinien przyjąć formę przepływową dla kontroli prędkości lub ciśnieniowej do kontroli siły (lub momentu) napędu. Budowa proporcjonalnego zaworu rozdzielającego sprawia, że wartość natężenia przepływu lub ciśnienia jest funkcją zależną od wymiaru szczeliny  $x$  (rozdz. 3.3), wynikającą od położenia suwaka. Pozycja suwaka zazwyczaj kontrolowana jest elektromagnetycznie z czego wynika zależność pomiędzy pozycją suwaka a prądem przepływającym przez elektromagnes zaworu. W takim więc układzie wartość sterująca natężeniem prądu elektromagnesu suwaka jest wielkością regulowaną w układzie serwonapędu i decyduje ona o pozycji, prędkości lub sile silownika w sposób ciągły. Innym sposobem osiągnięcia kontroli nad prędkością, a co za tym idzie pozycją serwonapędu opartego na napędzie substancialnym może być zastosowanie zaworów o krótkim czasie przełączania (ang. fast-switching valve), jednakże w ich wypadku wartość natężenia przepływu nie jest zależna od wartości sterującej, zawór operuje w dwóch stanach – włączony lub wyłączony (rys. 12). Użycie takiego zaworu sprawia, że w układzie serwonapędu nie istnieje już pełna kontrola nad natężeniem przepływu w sposób ciągły, niemniej jednak jest możliwa do uzyskania funkcjonalność ciągłej kontroli prędkości ze względu na krótki czas przełączania pomiędzy jednym stanem a drugim zaworu – rzędu 1 ms. W aplikacjach w których przyjęta funkcjonalność typu pozycjoner jest wystarczająca dla analizowanego serwonapędu, nie istnieje konieczność zastosowania zaworu proporcjonalnego lub zaworów o krótkim czasie przełączania. Wynika to z faktu, iż obecnie produkowane klasyczne zawory rozdzielające posiadają

zazwyczaj wystarczający czas przełączania dla serwonapędu spełniającego jedynie funkcje pozycjonera [1-6,11,17-18, 20].

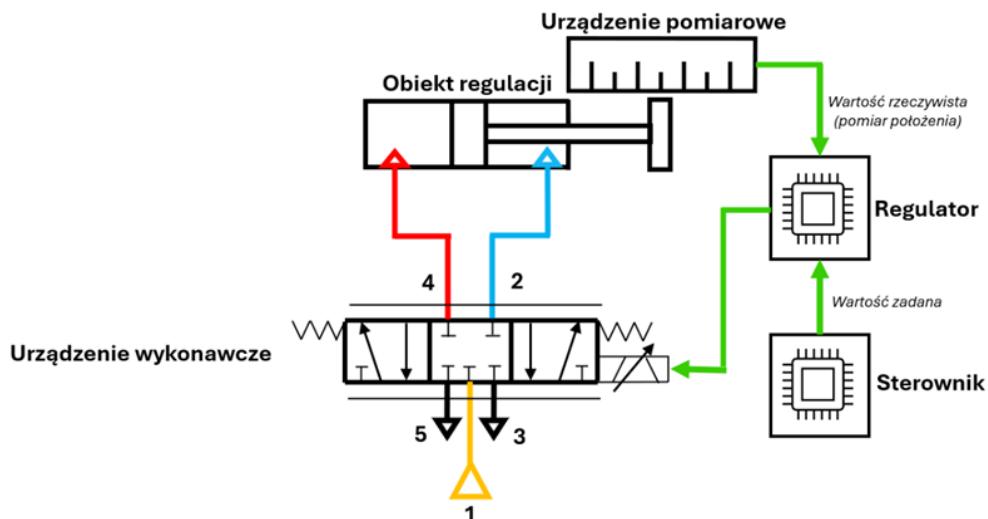


Rys. 12. Elektrozawór o krótkim czasie przełączania MHJ10-S-2,5-QS-6-HF firmy FESTO [20].

Pokazany przykładowo powyżej elektrozawór o krótkim czasie przełączania cechuje się przepływem nominalnym na poziomie 160 l/min, maksymalną częstotliwością przełączania na poziomie 500 Hz oraz czasem reakcji wynoszącym około 1,2 ms dla przejścia do stanu przepływu sprężonego powietrza oraz 0,6 ms dla przejścia do stanu odcięcia przepływu [20].

## 4.2. Sposób sterowania w zależności od doboru kluczowych elementów

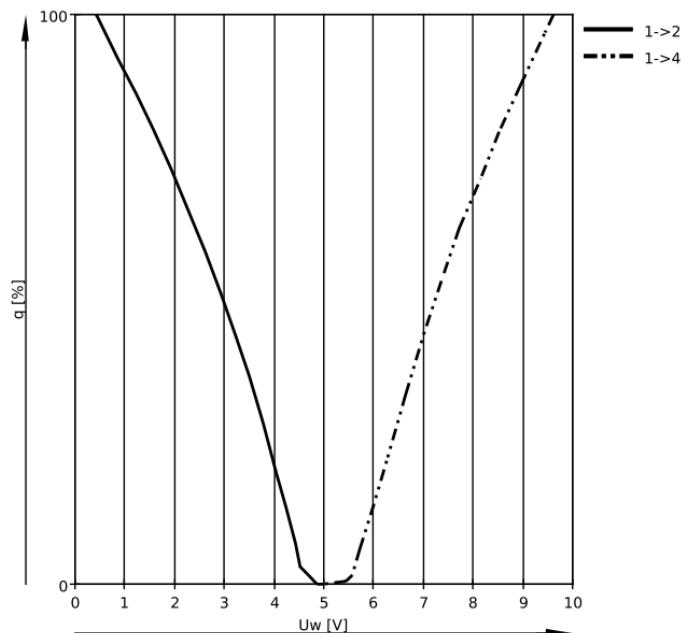
Bazując na przedstawionych do tej pory rozważaniach, klasyczny serwonapęd oparty na napędzie pneumatycznym przy założeniu silownika o ruchu liniowym jako obiekt regulacji, można przedstawić tak jak na rysunku 13 [5,16].



Rys. 13. Uproszczony schemat przykładowego układu serwonapędu pneumatycznego z zaworem proporcjonalnym przepływu zamkniętym 5/3 o konstrukcji tłoczkowo-suwakowej.

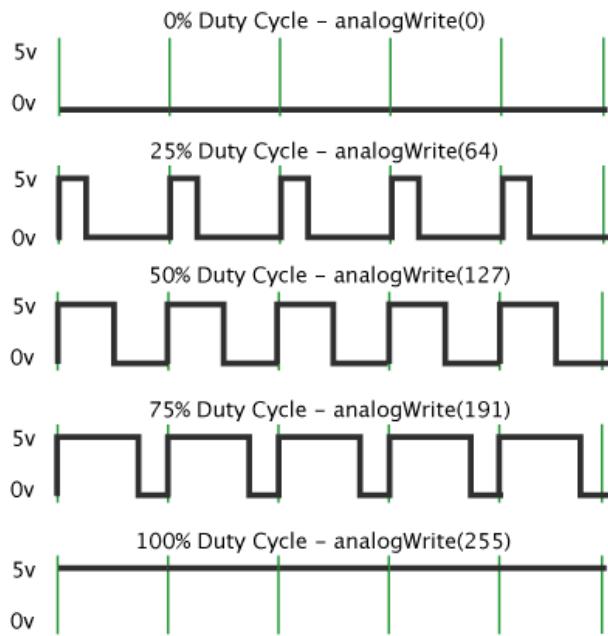
Przedstawiony serwonapęd posiada dwa kluczowe elementy pod względem jego funkcjonalności i możliwej do osiągnięcia dokładności pozycjonowania: urządzenie wykonawcze (zasilanie oraz bezpośrednia kontrola nad silownikiem) oraz urządzenie

pomiarowe (moduł sprzężenia zwrotnego). Jak wynika z poprzednich rozważań funkcje urządzenia wykonawczego może przykładowo spełniać rozdzielacz proporcjonalny, zawory o krótkim czasie przełączania lub klasyczny zawór rozdzielający, w zależności od przyjętej funkcjonalności serwonapędu. Funkcje urządzenia pomiarowego mogą natomiast przykładowo przyjąć takie komponenty jak enkoder liniowy, układ pomiaru bazujący na potencjometrze, system wykorzystujący zjawisko magnetostrykcyjne czy też optyczny czujnik odbiciowy. Dobrany moduł zasilania siłownika dyktuje sposób w jaki odbywać się będzie samo sterowanie modulem i tak w przypadku rozdzielacza proporcjonalnego bezpośrednie sterowanie odbywać się może poprzez sygnał analogowy prądowy lub napięciowy, co wskazuje na zbliżoną do liniowej zależność pomiędzy wartością sygnału sterującego a przepływem sprężonego powietrza (rys. 14), a co za tym idzie prędkością i pozycją siłownika (nie uwzględniając zakłóceń mechanicznych samego zaworu jak i obiektu regulacji) [16-18,21].



Rys. 14. Charakterystyka przepływu w zależności od sygnału sterującego (analogowego) w rozdzielaczu proporcjonalnym [24]

W przypadku, kiedy dobranym modelem zasilania okazałby się układ zaworów o krótkim czasie przełączenia lub klasyczny zawór rozdzielający, sygnał sterujący przyjmuje formę sygnału cyfrowego. Co oznacza, że zależność pomiędzy prędkością i pozycją siłownika a sygnałem sterującym przyjmuje formę wysoce odbiegającą od liniowej, co przekłada się na dużo mniejszą dokładność serwonapędu. Dokładność pozycjonowania w takim układzie można poprawić poprzez zastosowanie odpowiedniej strategii sterowania, a dokładniej przyjęcie sygnału PWM (ang. pulse width modulation) jako sygnału sterującego zaworem. Metoda sterowania PWM polega na modyfikacji charakterystyki przebiegu sygnału cyfrowego poprzez ciągłe przełączanie pomiędzy stanem wysokim a niskim z określona przez użytkownika częstotliwością i procentem wypełnienia sygnału (rys. 15) [16-18,21].



Rys. 15. Charakterystyka przebiegu sygnału PWM w zależności od zadanego procentu wypełnienia sygnału stanem wysokim [21].

Sposób odbioru sygnału stanowiącego informację o rzeczywistej pozycji siłownika za pomocą dobranego urządzenia pomiarowego, zależy w głównej mierze od producenta komponentu. Standardowa wysyłka danych o pozycji lub ruchu wykrytej na urządzeniu pomiarowym obejmuje sygnał analogowy prądowy lub rzadziej napięciowy oraz protokoły komunikacyjne takie jak Profinet, Profibus, CAN, lub inne.

### 4.3. Przegląd mikrokontrolerów o architekturze otwartej

Mikrokontroler o architekturze otwartej mający pełnić funkcję software'owego regulatora serwonapędu pneumatycznego winien cechować się odpowiednią mocą obliczeniową, modułowością i elastycznością (skalowalnością). Większość, jak nie wszystkie mikrokontrolery o architekturze otwartej dostępne na rynku posiadają moc obliczeniową przewyższającą tą wymaganą do pełnienia funkcji jednocześnie regulatora oraz sterownika w stanie z serwonapędem pneumatycznym. Wynika to z coraz większego rozwoju w technologii mikroprocesorowej. Pod pojęciem modułowości mikrokontrolera kryje się możliwość wymiany lub naprawy przez użytkownika elementów które mogły zostać uszkodzone podczas eksploatacji. Elastyczność mikrokontrolera decyduje o jego możliwej skalowalności i dostosowania do wybranej przez użytkownika aplikacji poprzez dodanie pożądanych komponentów. Wśród mikrokontrolerów obecnych aktualnie na rynku wyróżniamy *AVR*, *8052*, *PIC*, *ESP32* oraz *STM32*. Jak podaje [22] każdy z wymienionych mikrokontrolerów posiada swoje unikalne zalety pod względem zużycia energii, wydajności, prostoty w użyciu, skalowalności,

niskiego kosztu, łączności przy użyciu standardu Bluetooth czy WiFi czy też integracji z inną elektroniką [10,22].

W kontekście mikrokontrolerów, na rynku konsumentkim najczęściej można je spotkać w gotowych już zestawach na płytce PCB zawierających podstawowe lub rozszerzone moduły pełniące określone funkcje takie jak np. moduł cyfrowych sygnałów wejścia/wyjścia, moduł WiFi, moduł z potencjometrem i tym podobne (rys. 16).



Rys. 16. Płytnka PCB Arduino Zero ABX00003 z mikrokontrolerem ATSAMD21G18 [23]

## **5. Projekt stanowiska**

### **5.1. Układ pneumatyczny**

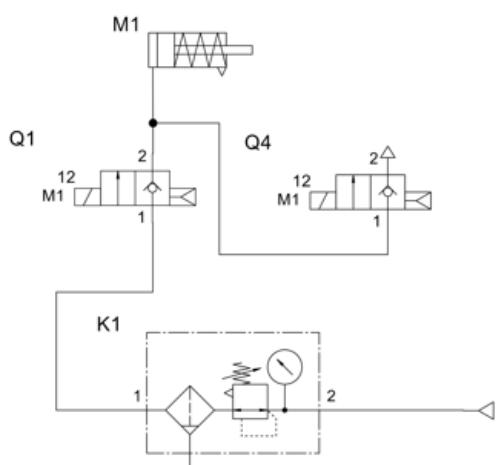
Jak wynika z poprzednich rozważań klasyczny układ serwonapędu pneumatycznego opiera się na rozdzielaczu proporcjonalnym przepływu (rozdz. 3.3, 4.1 i 4.2), takie zawory sprzedawane są głównie już razem z zintegrowaną jednostką sterującą, co znacznie ogranicza możliwość ingerencji użytkownika w algorytm sterujący zaworem. Pomimo więc sporej kontroli zostawionej użytkownikowi w postaci np. dostrojenia członów regulatora, jaki zawór posiada, jest to system o zamkniętej architekturze. W związku z tym jak i biorąc pod uwagę konkurencyjną cenę w stosunku do zaworów proporcjonalnych przepływu, jako urządzenie wykonawcze stanowiska przyjęto zawór rozdzielający o krótkim czasie przełączania. Dostępne na rynku zawory tego rodzaju cechuje zazwyczaj możliwość bezpośredniego sterowania cewką elektryczną która przełącza stan zaworu (użytkownik ma dostępne dwa przewody, każdy podpięty pod jedną ze stron cewki). Taka cecha zaworu pozwala na pełną dowolność w wyborze koncepcji sterowania.

Na podstawie przeglądu rynku w poszukiwaniu dostępnych rozwiązań zaworów o krótkim czasie przełączania stworzono trzy koncepcje układu pneumatycznego stanowiska. Każdy układ posiadał stację przygotowania sprężonego powietrza, urządzenie (urządzenia) wykonawcze w postaci zaworów o krótkim czasie przełączania oraz obiekt regulacji w postaci siłownika. Wszystkie koncepcje przedstawiono na rys. 17.

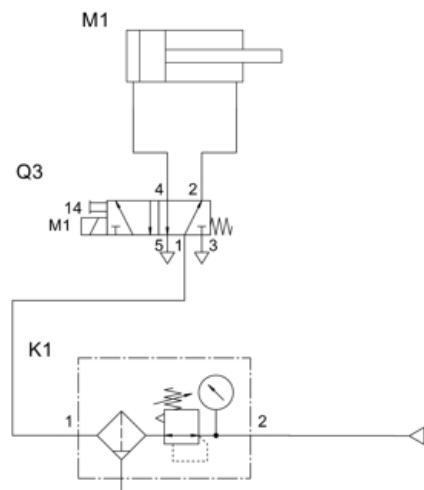
Pierwsza koncepcja zakłada jako obiekt wykonawczy siłownik jednostronnego działania ze sprężyną powrotną oraz dwa zawory 2/2 monostabilne jako urządzenie wykonawcze. Jeden z zaworów miał służyć do wysuwania tłocyska siłownika, drugi natomiast do udrażniania komory, co miało się przekładać na chowanie się tłocyska. Koncepcja ta została jednak odrzucona ze względu na mały dostępny zakres obiektu regulacji (na rynku nie znaleziono siłowników jednostronnego działania o skoku powyżej 50 mm). Druga koncepcja przyjmuje siłownik dwustronnego działania, sterowany za pomocą zaworu 5/2 monostabilnego. Ta koncepcja jednak została odrzucona ze względu na brak stanu, w którym zawór blokowałby przepływ do i z siłownika, a co za tym idzie zawór musiałby ciągle być przełączany w celu utrzymania pozycji tłocyska siłownika.

Ostateczna koncepcja jest w pewnym rodzaju połączeniem dwóch poprzednich koncepcji, znaleźć tu można siłownik o dwustronnym działaniu, sterowany za pomocą czterech zaworów 2/2 monostabilnych. Koncepcja zakłada podział tych zaworów na dwie pary, jedna para to Q5 oraz Q4, druga natomiast to Q1 oraz Q6. Odpowiednia para zaworów ma być uruchamiana w zależności od kierunku ruchu tłocyska siłownika. W każdej parze jeden zawór odpowiada za przemieszczenie tłocyska siłownika, drugi natomiast odpowiada za udrożnienie przepływu z naprzeciwnej komory siłownika. Taka koncepcja pozwala na wypożyczonowanie tłocyska siłownika oraz utrzymanie osiągniętej pozycji poprzez odpuszczenie zasilania podawanego na zawory.

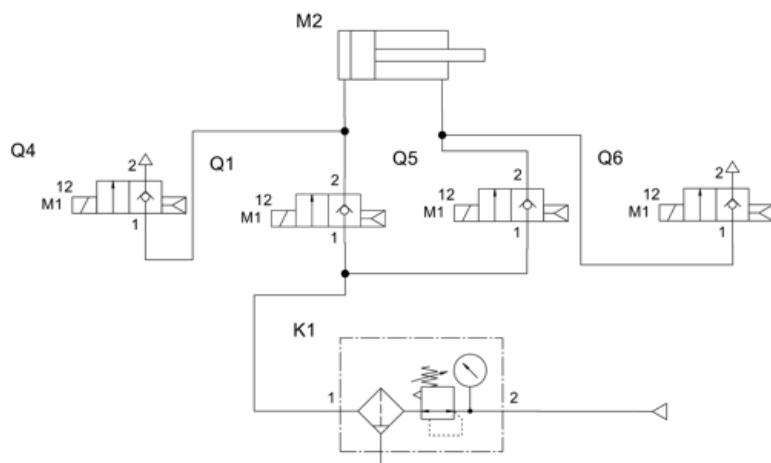
### KONCEPCJA 1



### KONCEPCJA 2



### KONCEPCJA 3



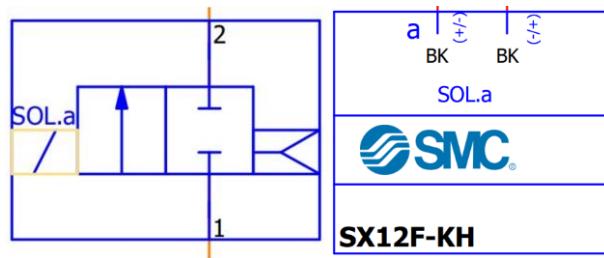
Rys. 17. Koncepcje układu pneumatycznego stanowiska.

Do realizacji wybranej koncepcji dobrano siłownik znormalizowany (ISO15552) dwustronnego działania o skoku wynoszącym 200 mm i średnicy tłoka 32 mm. Rolę urządzenia wykonawczego natomiast przyjęły elektrozawory o krótkim czasie przełączania firmy SMC, a dokładniej zawory SX12F-KH (rys. 18).



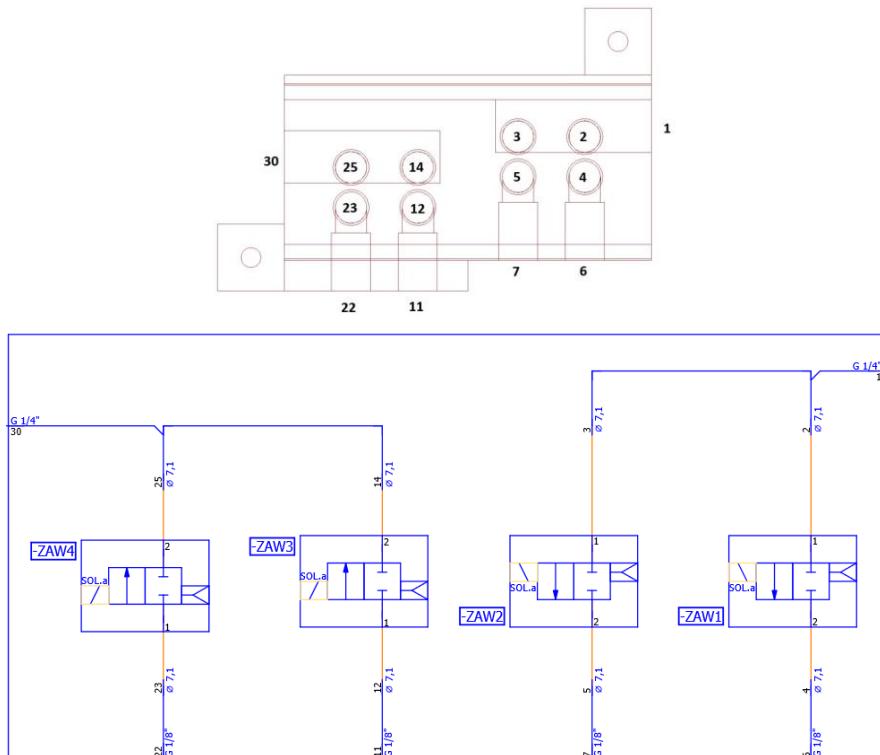
Rys. 18. Zawory z serii SX10 firmy SMC w konfiguracji szybkozłącznej [25]

Wybrane elektrozawory cechuje prosta budowa w postaci suwaka przełączającego stan zaworu do pozycji przepływu, suwak pozycjonowany jest poprzez cewkę, do której użytkownik ma dostęp w postaci dwóch przewodów. Jest to zawór monostabilny, za utrzymanie zaworu w pozycji zamykającej przepływ odpowiedzialna jest sprężyna pneumatyczna (rys. 19). Zawory posiadają przepływ nominalny na poziomie 150 l/min przy zasilaniu sprężonym powietrzem z ciśnieniem 2,5 bar. Producent deklaruje czas reakcji zaworu na poziomie 0,8 ms w przypadku załączania oraz 0,75 ms w przypadku odcięcia przepływu przez zawór. Producent deklaruje również maksymalną częstotliwość roboczą wynoszącą 500 Hz oraz pobór mocy na poziomie 40 W [25]. Dane techniczne wybranych elektrozaworów są prawie identyczne do opisywanych wcześniej zaworów firmy FESTO, a zestawienie w formie tabelarycznej można znaleźć w dalszej części pracy (str. 35).



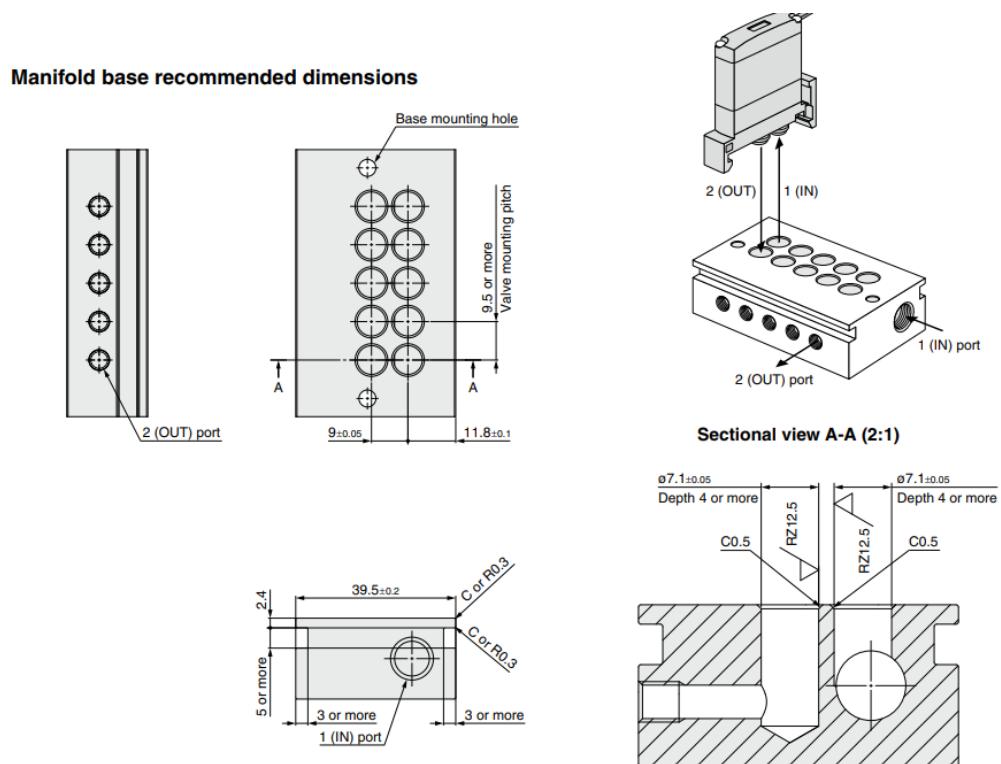
Rys. 19. Schemat zaworu z serii SX10.

Jak widać na rys. 18 wybrane elektrozawory potrzebują specjalnej płyty montażowej w celu doprowadzenia sprężonego powietrza zarówno do samych zaworów jak i do siłownika, w tym celu wykonano projekt druku 3D, który miał spełniać rolę rozprowadzenia sprężonego powietrza w układzie pneumatycznym stanowiska (rys. 20).



Rys. 20. Płyta montażowa zaworów stanowiska.

Port 1 płyty montażowej odpowiedzialny jest za dostarczenie sprężonego powietrza do zaworów ZAW1 oraz ZAW2, które mają za zadanie wysuwać lub chować tłocysko siłownika. ZAW3 oraz ZAW4 natomiast odpowiedzialne są za udrożnienie komór siłownika podczas ruchu, jak już wspomniano wcześniej zawory pracują parami (jeden zawór napełnia komórkę siłownika, drugi udrażnia komórkę po przeciwej stronie). Port 30 płyty montażowej otwarty jest do atmosfery, jego zadanie to odbiór powietrza z udrożnionych komórek siłownika. Jako że w fazie projektowej spodziewano się przeregulowania tłocyska siłownika podczas pozycjonowania, aby więc zapobiec pełnego udrożnienia komory siłownika po przeciwej stronie podczas ruchu, port 30 wyposażony został w fazie projektowej w zawór dławiaczo-zwrotny oraz tłumik, co pozwoliło na kontrolę przepływu po stronie zaworów udrażniających komory siłownika. Płyta montażowa została zaprojektowana zgodnie z zaleceniami producenta (rys. 21).



Rys. 21. Zalecenia dotyczące płyty montażowej dla zaworów z serii SX10 w konfiguracji szybkołącznej firmy SMC [25].

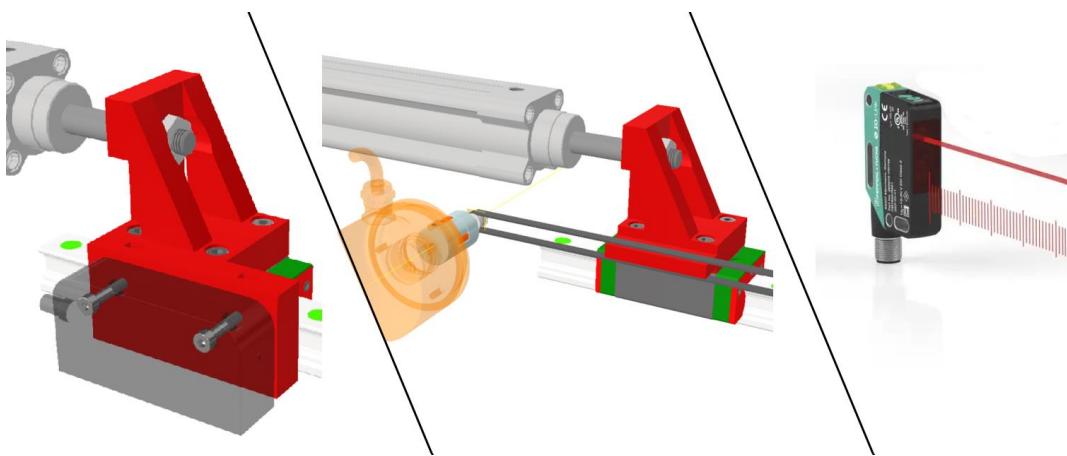
Układ pneumatyczny poza siłownikiem oraz zaworami wyposażony został również w układ przygotowania sprężonego powietrza w postaci filtra, manometru, reduktora ciśnienia oraz zaworu kulowego.

Na potrzeby projektu przyjęto, że zawory sterowane będą poprzez użycie sygnału PWM o zmiennej częstotliwości i procencie wypełnienia sygnału stanem wysokim (rozdz. 4.2.). Procent wypełniania sygnału sterującego będzie wartością poddaną regulacji.

## 5.2. Urządzenie pomiarowe i więzy mechaniczne

Aby najlepiej zilustrować pozycjonowanie tłocyska siłownika na stanowisku, projekt zakładał przymocowanie tłocyska do prowadnicy i wózka, obok którego zamieszczona została miara. Jako prowadnicę wykorzystano szynę kulkową producenta HIWIN o numerze HGR20R250H, wózek natomiast przyjął numer HGH20CAZ0H. Sama konstrukcja siłownika zamocowana została w dwóch podporach, jedną stałą, gdzie siłownik został zamocowany połączeniem śrubowym oraz jedną ruchomą, gdzie siłownik był jedynie podtrzymywany. Podpora ruchoma została wykorzystana w celu zniwelowania wyboczenia tłocyska siłownika podczas pozycjonowania w dalszym zakresie ruchu. Wybrana prowadnica kulkowa nie pozwalała na osiągnięcie pełnego zakresu wysuwu tłocyska siłownika, dlatego też na końcu prowadnicy zamieszczono stopery dla wózka, aby uniknąć sytuacji, w której kulki z niego wypadną.

Dobór koncepcji pomiaru położenia odbył się za pomocą trzech koncepcji (rys.22). Pierwsza koncepcja zakładała użycie enkodera liniowego absolutnego z taśmą magnetyczną, takie rozwiązanie oferuje łatwą integrację oraz montaż, niemniej jest to rozwiązanie droższe. Druga koncepcja bazowała na enkoderze absolutnym obrotowym, który to wymaga dodatkowej konstrukcji w postaci układu pasowego. Trzecia koncepcja przyjęła formę odbiornika optycznego (dalmierza), w tym rozwiązaniu zająłby on najmniej miejsca w stosunku do pozostałych koncepcji, niestety jednak kosztem dokładności pomiaru i odporności na zakłócenia.

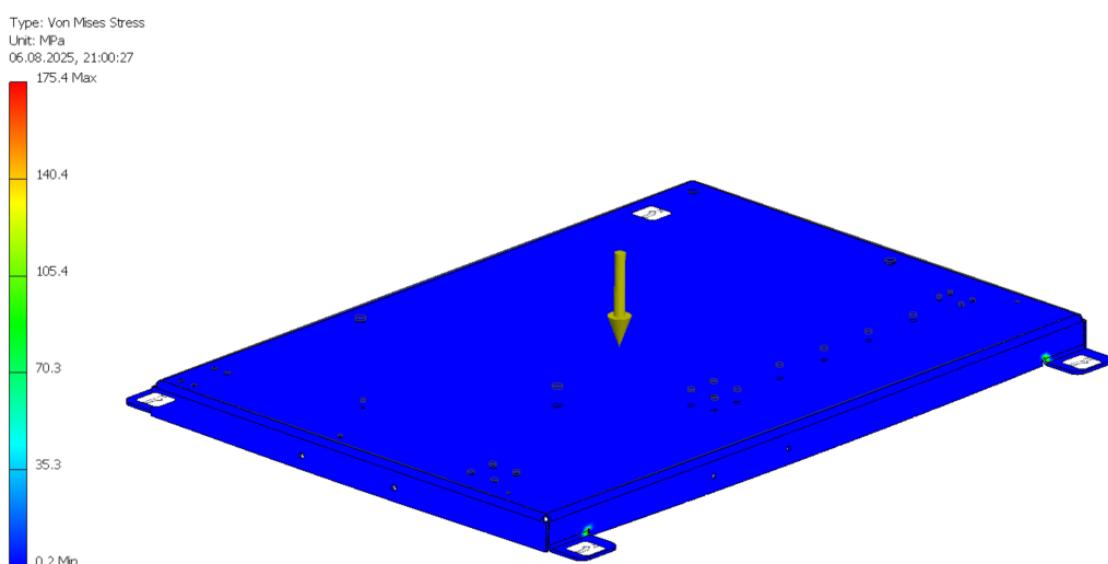


Rys. 22. Koncepcje pomiaru położenia tłocyska silownika.

Ostatecznie wybraną koncepcję okazała się koncepcja pierwsza, czyli enkoder absolutny liniowy z taśmą magnetyczną. Wybranym systemem pomiaru drogi został zespół głowicy absolutnej firmy Lika SMAX-AI1-PRG-L2 z taśmą magnetyczną absolutną MTAX-680-50-1. Zespół cechuje się wyjściem analogowym prądowym w zakresie 4-20 mA, rozdzielcość pomiaru natomiast wyniosła 10 bitów (1024 działań zakresu pomiarowego). Enkoder cechuje się również dokładnością odczytu pozycji na poziomie

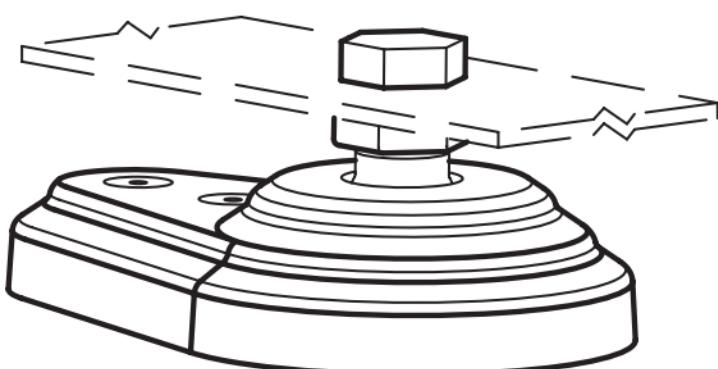
0,5% oraz odczytem co 100  $\mu$ s, wyróżnia się także funkcją programowania zakresu pomiarowego [26].

Dla całego stanowiska opracowano konstrukcję w postaci płyty montażowej z stali nierdzewnej, rozmiar płyty wyniósł 730x584 mm, ma ona umożliwić zamocowanie wszystkich elementów wchodzących w skład stanowiska z uwzględnieniem również szafy sterowniczej stanowiska. Nie znając dokładnej wagi wszystkich elementów płyta została przygotowana na obciążenie 80 kg w samym środku stanowiska przy współczynniku bezpieczeństwa wynoszącym 1,25 (rys. 23). Stanowisko zostało również wyposażone w tabliczkę informującą o autorze projektu, promotorze oraz firmach wspierających.



Rys. 23. Analiza MES płyty montażowej stanowiska.

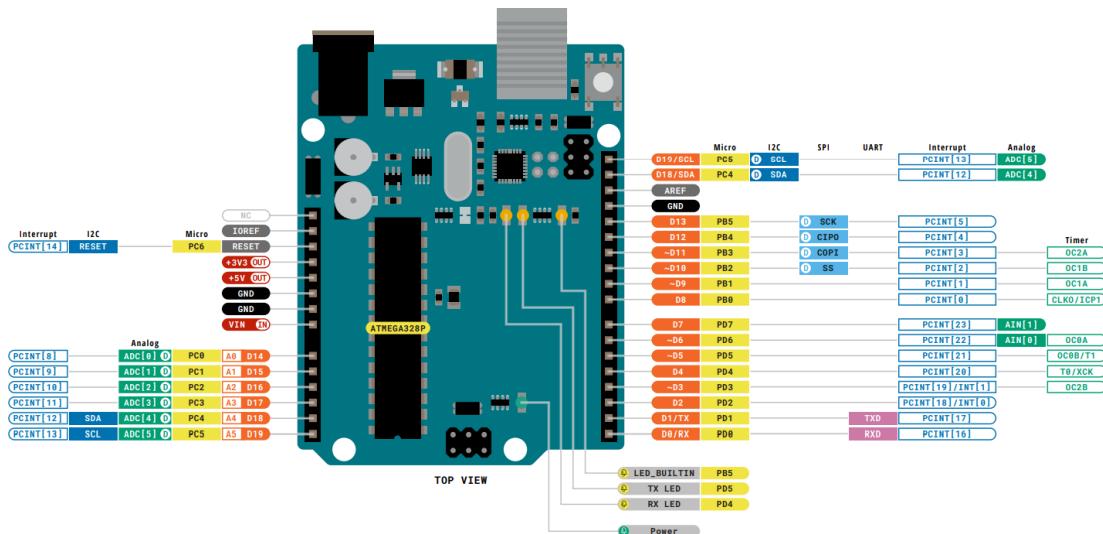
Dodatkowo w celach ergonomicznych umieszczono również uchwyty, ułatwiające przenoszenie stanowiska, w celach montażowych natomiast cztery wystające krawędzie stanowiska zostały wyposażone w stopy wahliwe z możliwością zamocowania do podłoża (rys. 24).



Rys. 24. Przegub kulowy z gwintem wewnętrznym firmy Elesa+Ganter [27].

## 5.3. Mikrokontroler

W projekcie założono, iż funkcje regulatora oraz sterownika stanowiska pełnić będzie mikrokontroler o architekturze otwartej. Dobranym mikrokontrolerem okazał się AVR ATmega328 zintegrowany z płytą Arduino Uno Rev3 (A000066). Zestaw posiada 14 cyfrowych wejść/wyjść, z czego 6 z nich można wykorzystać jako wyjścia PWM, dodatkowo zestaw wyposażony jest w 6 wejść analogowych. Piny zestawu współpracują z napięciem 5VDC. Napięcie zasilania płytki wynosi od 7 do 12VDC, częstotliwość zegara mikrokontrolera określona jest na 16 MHz, dostępna pamięć Flash (przechowująca program sterujący) wynosi 32 kB, pamięć SRAM natomiast (zmienne programu) wynosi 2kB. Komunikacja z modułem odbywa się za pomocą gniazda USB A. Rozdział wejść/wyjść płytki zaprezentowano na rys. 25 [28].



Rys. 25. Rozdział pinów zestawu A000066 firmy Arduino [28].

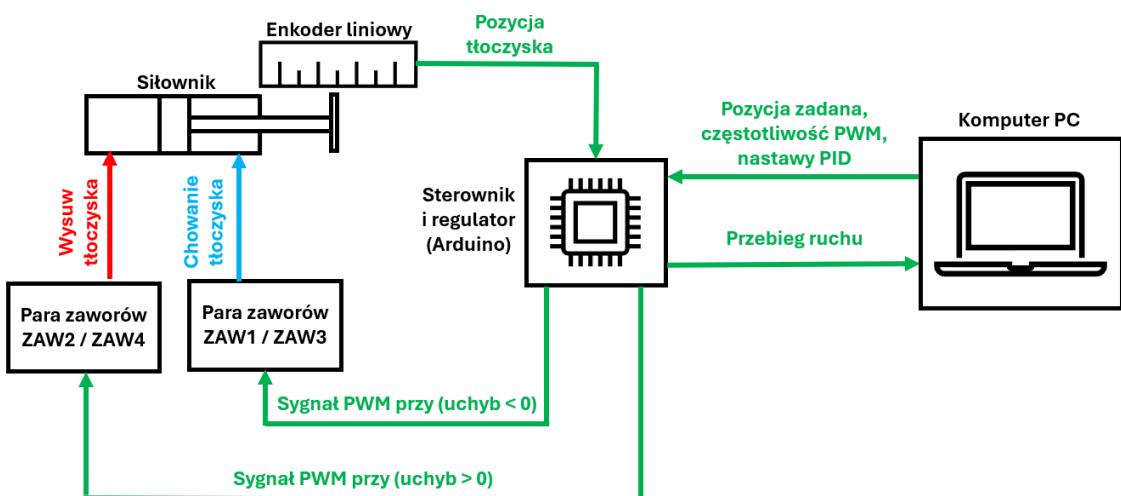
## 5.4. Układ elektryczny, algorytm sterowania i komunikacja

Jednym z największych wyzwań projektu była integracja elementów przemysłowych pracujących z napięciem 24VDC z elementami hobbyistycznymi w postaci zestawu mikrokontrolera, który pracuje z napięciem 5VDC. Na potrzeby projektu wykonano dokumentację serwisową składającą się na dokumentację szafy sterowniczej stanowiska oraz układ pneumatyczny w pełnej formie. Dokumentację umieszczono w Załączniku 1.

Szafę sterowniczą wyposażono w przełącznik ON-OFF, odpowiedzialny za włączenie lub wyłączenie głównego zasilania (230VAC), komponenty zasilane są z dwóch źródeł, jedno to zasilacz 24VDC o mocy 240 W, drugie natomiast to zasilacz 12VDC

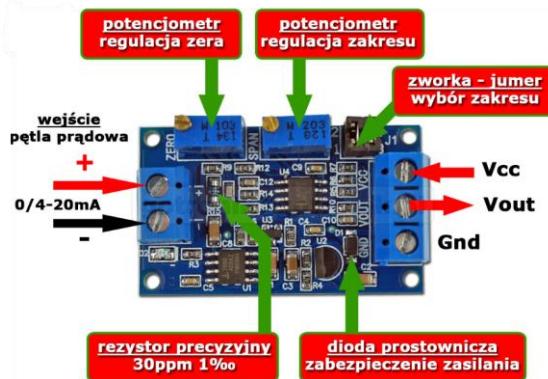
o mocy 20 W. Każdy z zasilaczy jak i główne zasilanie wyposażone zostały w zabezpieczenie w postaci wyłącznika nadprądowego.

Algorytm sterowania zakłada sterowanie urządzeniem wykonawczym (cztery zawory 2/2 monostabilne) za pomocą sygnału PWM z określona częstotliwością oraz zmiennym regulowanym procentem wypełnienia sygnału stanem wysokim. Za sprzężenie zwrotne układu odpowiedzialny jest sygnał z enkodera liniowego informujący o aktualnej pozycji tłocyska siłownika. Na tej podstawie opracowano uproszczony schemat strategii sterowania i komunikacji serwonapędu (rys. 26). Funkcjonalność serwonapędu określono na ciągłą kontrolę pozycji.



Rys. 26. Strategia sterowania i komunikacji serwonapędu.

Ze względu na różnicę napięcia w jakim pracuje enkoder liniowy a napięcie w jakim pracują wejścia analogowe zestawu z mikrokontrolerem nie jest możliwy bezpośredni odczyt pętli prądowej, stanowiącej odczyt pozycji tłocyska siłownika. W związku z tym należało dokonać konwersji pętli prądowej 4-20 mA 24VDC na sygnał analogowy napięciowy 0-5 V, w tym celu użyto konwertera pętli prądowej XY-IT0V firmy BTE (rys. 27). Ze względu na użytą prowadnice kulkową zakres pomiarowy wynikający z więzów mechanicznych tłocyska siłownika wynosił 0-177 mm, zakres pomiarowy na konwerterze prądowym ustawiono na 0,1-4,9 V (rys. 28).

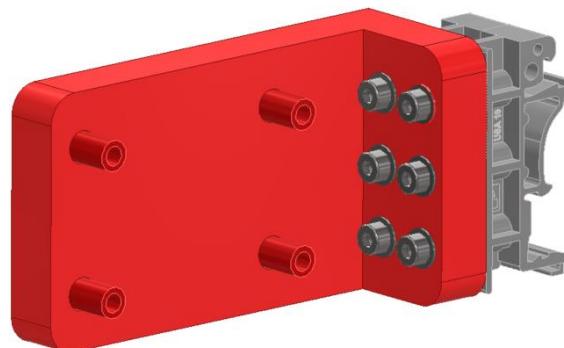


Rys. 27. Konwerter pętli prądowej XY-IT0V firmy BTE [29].



Rys. 28. Zakres sygnału analogowego po konwersji pętli prądowej.

Umieszczenie konwertera pętli prądowej w szafie sterowniczej odbyło się za pomocą zaprojektowanej podstawki montażowej z druku 3D oraz adaptera do szyny DIN firmy Phoenix Contact o numerze 1201578 (rys. 29).



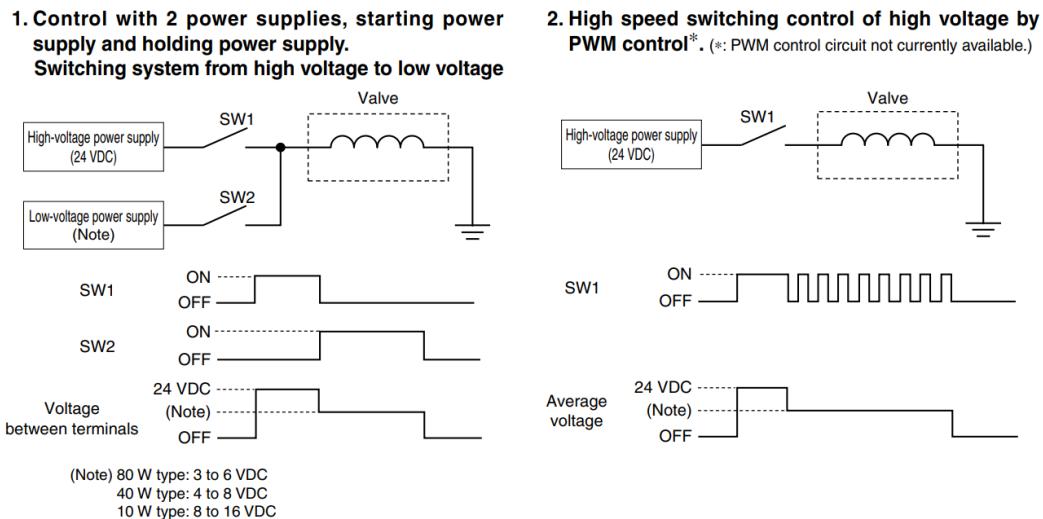
Rys. 29. Zespół montażowy konwertera pętli prądowej.

Podczas pierwszych testów odczytu sygnału przez zestaw mikrokontrolera, zauważono niestabilność w pozycji tłocyska, po przeprowadzeniu pomiarów wywnioskowano, iż problem z niestabilnością leży po stronie analizy sygnału przez zestaw mikrokontrolera. W związku z tym zastosowano software'owy filtr w postaci uśredniania odczytu analogowego, wykorzystano w tym celu gotową bibliotekę *ReadFilter.h*, konfiguracja użytej biblioteki zakłada średnią z 20 pomiarów z odstępem co 100 µs (Listing 1).

Listing 1. Kod programu odpowiedzialny za odczyt sygnału analogowego.

```
#include <ReadFilter.h>
...
#define ANA0 3
...
double currentPos = 0;
...
ReadFilter rf(20,0,1023,false,1,100); // 2 ms measure
...
void updatePos() {
    unsigned long currentMillis = millis();
    int raw = rf.avg(ANA0);
    if (raw < 20) raw = 20;
    if (raw > 1003) raw = 1003;
    currentPos = (177.0 / 983.0) * ((double)raw - 20.0);
}
```

Jak wspomniano wcześniej zawory użyte w projekcie cechują się prostą budową i bezpośrednim dostępem użytkownika do zasilania cewki sterującej suwakiem zaworu. Ze względu na brak zintegrowanego układu przełączającego zasilanie cewki na niższe napięcie niż napięcie pobudzające cewkę, firma SMC zaleca podjęcie pewnych kroków zapobiegających przed uszkodzeniem cewki zaworu wskutek przekroczenia możliwości termicznych cewki (rys. 30) [25].



Rys. 30. Zalecenia dotyczące zasilania zaworów z serii SX-10 firmy SMC [25].

Aby spełnić zalecenia dotyczące zasilania i zapobiec uszkodzeniu termicznemu cewki, procent wypełnienia sygnału PWM sterującego zaworami musiał zostać ograniczony, tak aby średnie napięcie podane na cewkę zaworu nie przekroczyło 8 VDC. W tym celu opracowano zakres procentu wypełnienia sygnału PWM, przy którym cewka

jest w stanie zareagować i wysterować suwak zaworu a jednocześnie przy tym nie zostać uszkodzona wskutek przegrzania. Założono, iż dostępne dla użytkownika częstotliwości sygnału PWM będą znajdować się w przedziale zawierającym 2, 5, 10, 20 oraz 50 Hz. Specyfikacja zaworów zakłada wysterowanie zaworu z stanu zamkniętego przepływu w przeciągu 0,8 ms (tab. 1), dla tej wartości przyjęto współczynnik bezpieczeństwa równy 1,5. Wyniki opracowania maksymalnych oraz minimalnych wartości procentu wypełnienia sygnału PWM przedstawiono w tabeli 2.

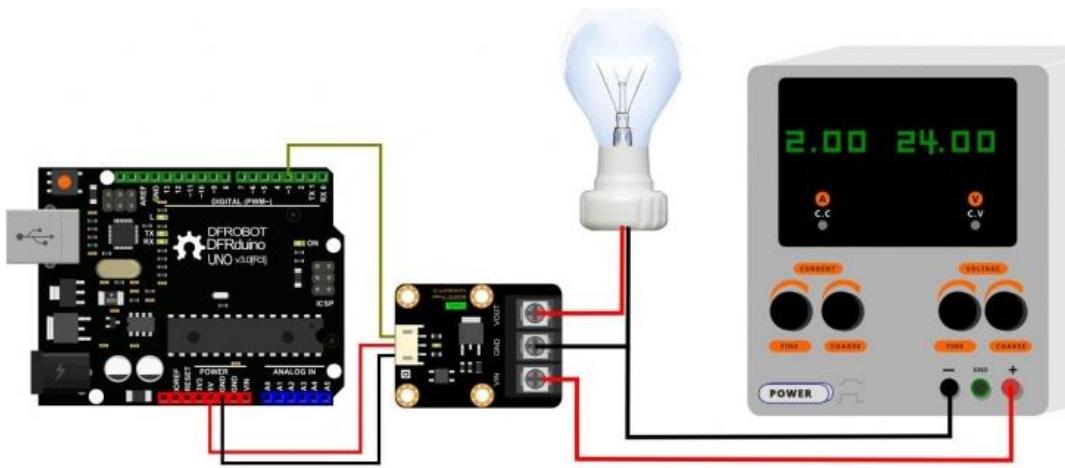
Tab. 1. Specyfikacja zaworów z serii SX-10 firmy SMC [25].

Flow rate (L/min) [at 0.25 MPa]	50				100				150			
Power consumption (W)	80	40	10	4	80	40	10	4	80	40	10	4
Flow rate characteristics	C [dm <sup>3</sup> /(s/bar)]				0.24				0.47			
	b				0.24				0.28			
	Cv				0.06				0.12			
Response time (ms) [at 0.25 MPa]	ON	0.45	0.55	0.9	1.25	0.55	0.7	1.1	1.7	0.6	0.8	1.35
	OFF	0.4	0.4	0.4	0.4	0.55	0.55	0.55	0.55	0.75	0.75	0.75
Max. operating frequency (Hz) [at 0.25 MPa]				1,200	1,000	550	350	650	550	300	200	600
										500	250	150

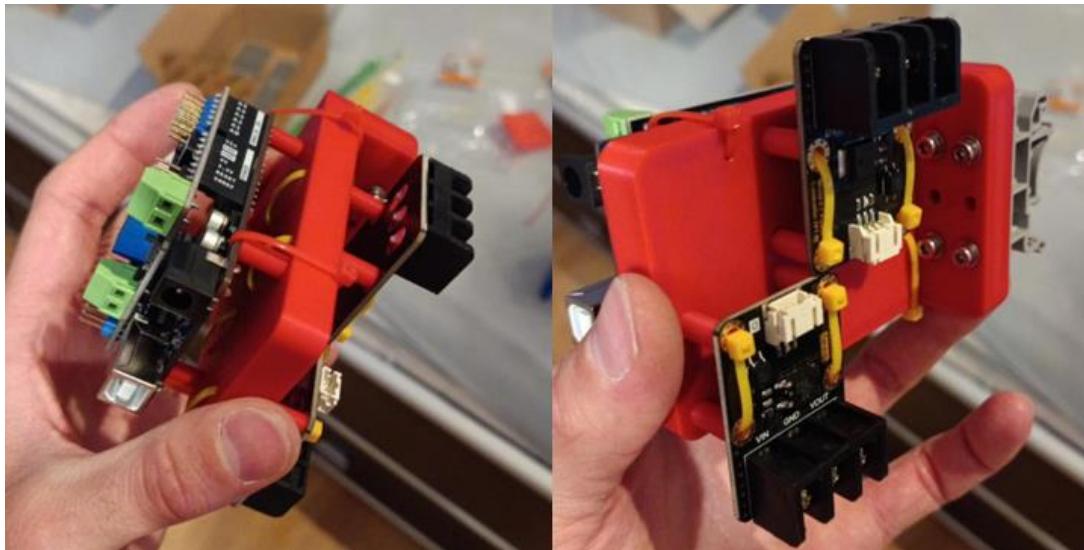
Tab. 2. Opracowanie ograniczeń wypełnienia sygnału PWM stanem wysokim.

Częstotliwość sygnału PWM [Hz]	Minimalny procent wypełnienia sygnału PWM [%]	Maksymalny procent wypełnienia sygnału PWM [%]	Średnie napięcie zasilania cewki przy maksymalnym procentie wypełnienia [V]
50	6	32	7,68
20	3		
10	2		
5	1		
2	1		

Ze względu na sterowanie zaworami sygnałem PWM o częstotliwościach do 50 Hz integracja z wybranym zespołem mikrokontrolera nie mogła odbyć się za pomocą standardowego przekaźnika, wskutek zbyt długiego czasu reakcji. Należało więc wykorzystać przekaźnik mocy z tranzystorem typu MOSFET, układ elektryczny wyposażono więc w dwa przekaźniki firmy DF-Robot o numerze DFR0457. Prekaźniki te cechuje prosta integracja z zestawem mikrokontrolera firmy Arduino (rys. 31). Producent deklaruje częstotliwość przełączania modułu na poziomie 0-1 kHz oraz czas przełączenia na poziomie 20 µs w przypadku włączenia oraz 50 µs w przypadku wyłączenia sygnału. Użycie dwóch przekaźników firmy DF-Robot spowodowało wymóg użycia również płyty rozszerzającej wejścia/wyjścia modułu z mikrokontrolerem, wymóg ten powstał ze względu na sposób zasilania i doprowadzenia sygnału PWM do modułów z przekaźnikiem typu MOSFET. Moduł mikrokontrolera, dwa moduły przekaźnika oraz moduł rozszerzenia I/O DF-Robot DFR0265 umieszczone na zaprojektowanej płycie montażowej z druku 3D analogicznie do modułu konwertera pętli prądowej (rys. 32) [30].

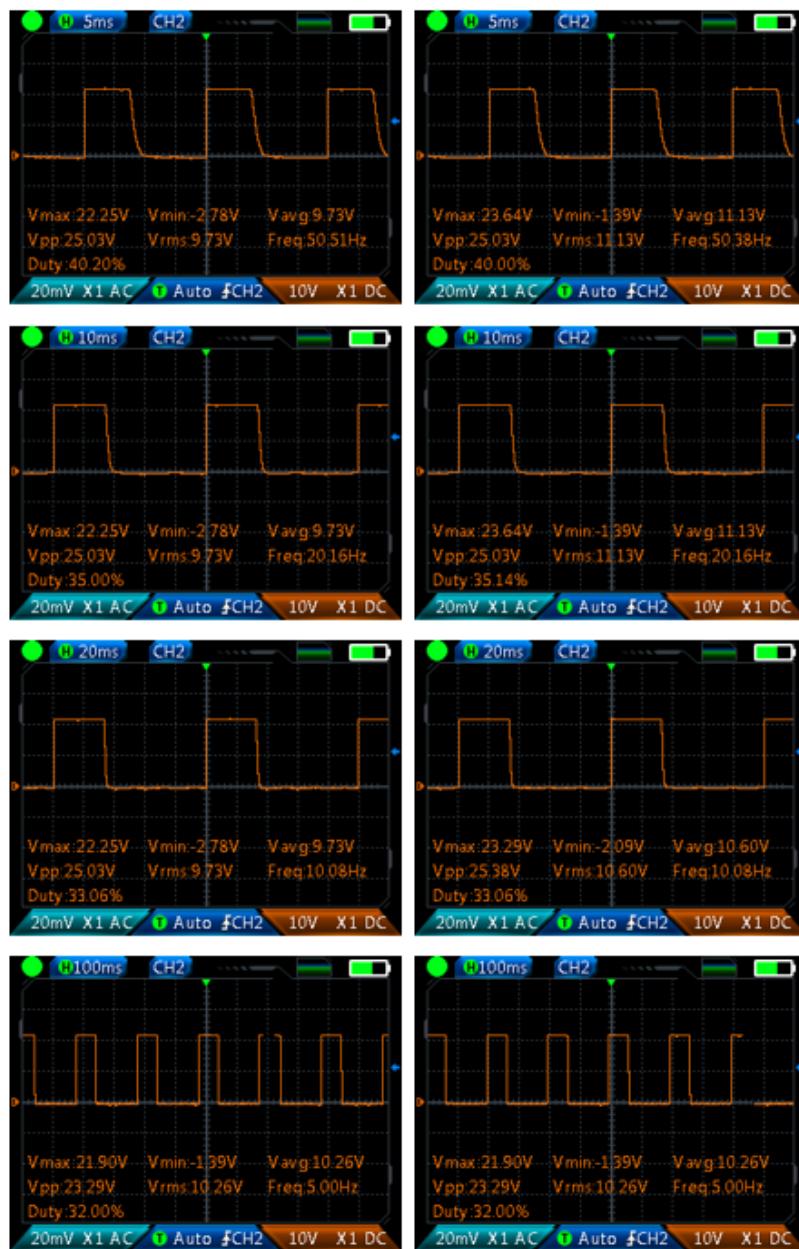


Rys. 31. Integracja elementów zasilanych innym napięciem niż modułu Arduino za pomocą DF-Robot DFR0457 [30].



Rys. 32. Płyta montażowa dla modułu mikrokontrolera i elementów firmy DF-Robot.

Aby zbadać charakterystykę sygnału PWM wygenerowanego przez moduł z przekaźnikiem typu MOSFET wykonano pomiary oscyloskopem obu modułów przy maksymalnym poziomie wypełnienia dla każdej z wymienionych powyżej częstotliwości dostępnych dla użytkownika stanowiska (rys. 33). Na podstawie uzyskanych przebiegów sygnału PWM stwierdzono, iż charakterystyka opadania sygnału sugeruje większy poziom wypełnienia sygnału stanem wysokim niż zadany przez mikrokontroler. Dlatego też pomimo znacznego zmniejszania się napięcia po odsunięciu sygnału przez mikrokontroler a co za tym idzie nieprawidłowymi wyliczeniami faktycznego poziomu wypełnienia sygnału PWM stanem wysokim, zdecydowano się na większe ograniczenie procentu wypełnienia, zgodnie z opracowaną tabelą 3.



Rys. 33. Badanie oscyloskopem sygnału PWM przy nadanym wypełnieniu 32%.

Tab. 3. Wyznaczony maksymalny procent wypełnienia sygnału PWM po badaniu oscyloskopem.

Częstotliwość sygnału PWM [Hz]	Maksymalny procent wypełnienia sygnału PWM [%]
50	24
20	29
10	31
5	32
2	

Kontrola wyjścia sygnałów PWM mikrokontrolera odbywa się poprzez użycie biblioteki *PWM.h*, dzięki której możliwa jest zmiana częstotliwości sygnału PWM generowanego przez zestaw mikrokontrolera oraz dynamiczna zmiana procentu wypełnienia stanem wysokim. Algorytm sterowania zakłada również regulację sygnału sterującego przy zmiennych nastawach, w tym celu użyto bibliotekę *PID\_v1.h*. Program sterujący zakłada wybór pary zaworów w zależności od znaku uchybu, wyliczanego na podstawie pozycji zadanej i aktualnej, operacje związane z pozycjonowaniem tloczyska z poziomu mikrokontrolera przedstawiono w Listing 2.

Listing 2. Kod programu odpowiedzialny za pozycjonowanie tloczyska silownika.

```
#include <PWM.h>
#include <PID_v1.h>
...
#define ZAPWM1 9
#define ZAPWM2 10
...
int32_t frq = 20;
double accuracy = 1.0;
double currentPos = 0;
double setpoint = 0;
double uchyb = 0;
int maxSetFRQ [] = {32,32,31,29,24};
int minSetFRQ [] = {1,1,2,3,6};
double Kp = 0.5;
double Ki = 0.1;
double Kd = 0.01;
double outPWM = 0;
bool pozwolenie = false;
PID pid(&currentPos, &outPWM, &setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
...
unsigned long previousMillis = 0;
const unsigned long interval = 50; // ms
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(ZAPWM1, OUTPUT);
    pinMode(ZAPWM2, OUTPUT);
    pinMode(ANA0, INPUT);
    InitTimersSafe();
    SetPinFrequencySafe(ZAPWM1, frq);
    SetPinFrequencySafe(ZAPWM2, frq);
    pid.SetSampleTime(interval/2);
    pid.SetOutputLimits((double)minSetFRQ[3], (double)maxSetFRQ[3]);
    pid.SetMode(AUTOMATIC);
    updatePos();
    setpoint = currentPos;
    pwmWrite(ZAPWM1, 0);
    pwmWrite(ZAPWM2, 0);
```

```

pozwolenie = false;
}
void loop() {
    handleSerialInput();
    unsigned long currentMillis = millis();
    if ((currentMillis - previousMillis) >= interval) {
        updatePos();
        uchyb = setpoint - currentPos;
        if (((uchyb > accuracy) or (uchyb < (accuracy*(-1.0)))) and
pozwolenie) {
            int outPWM2 = 0;
            if (uchyb < 0) {
                pid.SetControllerDirection(REVERSE);
                pid.Compute();
                outPWM2 = (int)((outPWM/100.0) * 255.0);
                pwmWrite(ZAPWM1, outPWM2);
                pwmWrite(ZAPWM2, 0);
            } else if (uchyb > 0) {
                pid.SetControllerDirection(DIRECT);
                pid.Compute();
                outPWM2 = (int)((outPWM/100.0) * 255.0);
                pwmWrite(ZAPWM2, outPWM2);
                pwmWrite(ZAPWM1, 0);
            }
        } else {
            pwmWrite(ZAPWM1, 0);
            pwmWrite(ZAPWM2, 0);
        }
        if (pozwolenie) {
            Serial.print(millis());
            Serial.print(";");
            Serial.print(currentPos);
            Serial.print(";");
            Serial.print(setpoint);
            Serial.print(";");
            Serial.println(uchyb);
        }
        previousMillis = currentMillis;
    }
}

```

Jak można też zauważyć w Listing 2, program wykonuje również wysyłkę danych dotyczących przebiegu ruchu serwonapędu, cała komunikacja serwonapędu z komputerem odbywa się za pomocą transmisji szeregowej (ang. *Serial*) poprzez przewód USB A – USB B podłączony do płytki Arduino. Program sterujący dopuszcza również odbiór komend przez użytkownika według listy w tab. 4. Przetwarzanie komend od użytkownika odbywa się analogicznie do kodu zaprezentowanego w Listing 3.

Tab. 4. Lista komend stanowiska.

Komenda	Funkcja
<b>p:</b>	Nastawa członu proporcjonalnego software'owego regulatora
<b>i:</b>	Nastawa członu całkującego software'owego regulatora
<b>d:</b>	Nastawa członu różniczkującego software'owego regulatora
<b>FRQ:</b>	Nastawa częstotliwości sygnału PWM
<b>setpoint:</b>	Nastawa pozycji zadanej tloczyska siłownika
<b>default</b>	Zatrzymanie pracy serwonapędu oraz ustawienie domyślnych wartości nastaw P, I, D, FRQ
<b>sleep</b>	Ustawienie domyślnych wartości nastaw P, I, D, FRQ oraz przejazd do pozycji domyślnej
<b>stop</b>	Zatrzymanie pracy serwonapędu oraz odczytu przebiegu ruchu
<b>start</b>	Kontynuacja pracy serwonapędu oraz odczytu przebiegu ruchu
<b>acc:</b>	Nastawa dokładności pozycjonowania serwonapędu

Listing 3. Kod programu odpowiedzialny za przetworzenie komendy „p:” użytkownika.

```
void handleSerialInput() {
    static String input = "";

    while (Serial.available()) {
        char c = Serial.read();

        if (c == '\n' || c == '\r') {
            if (input.length()) {
                processCommand(input);
                input = "";
            }
        } else {
            input += c;
        }
    }
}

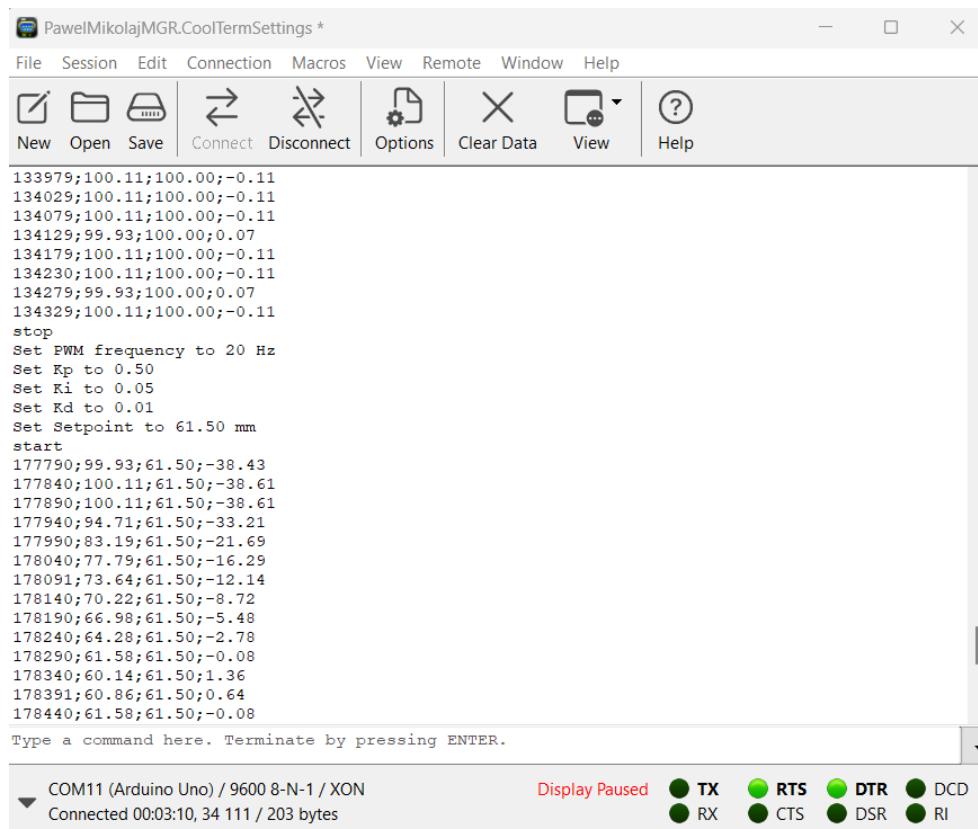
void processCommand(String cmd) {
    cmd.trim();
}
```

```

if ((cmd.startsWith("P:")) or (cmd.startsWith("p:"))){
    String valStr = cmd.substring(2);
    if (isNumber(valStr)){
        double val = valStr.toDouble();
        Kp = val;
        pid.SetTunings(Kp, Ki, Kd);
        Serial.print("Set Kp to ");
        Serial.println(pid.GetKp());
    }
} else {Serial.println("Invalid number. Remember to use '.' not ','");}

```

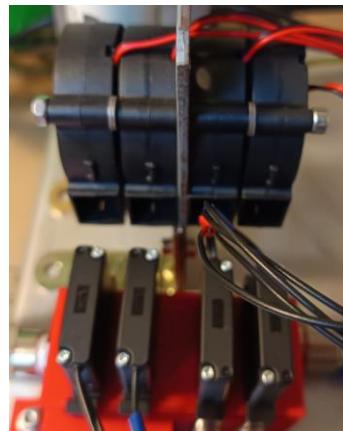
Narzędziem wykorzystanym do nadawania komend oraz odczytu danych przebiegu ruchu okazał się program *CoolTerm*, pozwalający również na zapis danych otrzymanych z mikrokontrolera do pliku w formacie .txt (rys. 34).



Rys. 34. Obsługa serwonapędu z poziomu komputera PC.

Zawory z serii SX-10 firmy SMC posiadają też zalecenia dotyczące zasilania sprężonym powietrzem, otóż firma SMC zaleca, aby nie dopuścić do sytuacji, w której podany jest prąd na cewkę zaworu, a jednocześnie nie ma przepływu sprężonego powietrza. Zalecenie to wynika z faktu, iż przepływ sprężonego powietrza odprowadza

ciepło zgromadzone na cewce zaworu podczas jej zasilania. Minimalne zalecane ciśnienie zasilania sprężonym powietrzem dla zaworów z serii SX-10 wynosi 0,15 MPa. W związku z tym zdecydowano się na umieszczenie dodatkowego chłodzenia w postaci dmuchawy wentylatorowej dla dwóch zaworów które nie mają bezpośredniego kontaktu z sprężonym powietrzem (zawory, które mają za zadanie udrożnić komorę siłownika w kierunku ruchu tłocyska). Niemniej jednak po przeprowadzeniu pierwszych testów stanowiska na podstawie temperatury zaworów tłoczących powietrze do komór siłownika stwierdzono, że dla nich też należy zastosować dodatkowe chłodzenie (rys. 35).



Rys. 35. Dodatkowe chłodzenie zaworów.

Końcowy efekt projektu w postaci stanowiska dydaktycznego z serwonapędem pneumatycznym z mikrokontrolerem o architekturze otwartej zaprezentowano na rysunkach 36 oraz 37. W załączniku 2 natomiast przedstawiono instrukcje użytkowania stanowiska.



Rys. 36. Stanowisko dydaktyczne z serwonapędem pneumatycznym z mikrokontrolerem o architekturze otwartej.



Rys. 37. Szafa sterownicza stanowiska.

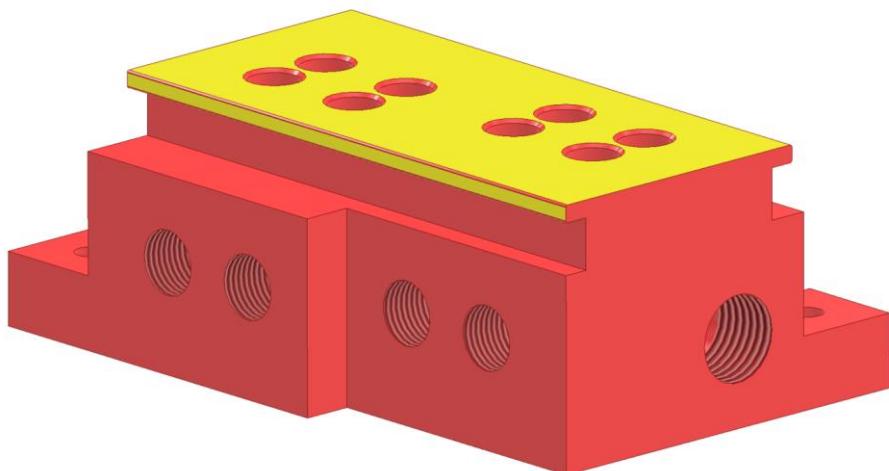
Warto również nadmienić, iż do stanowiska dodany został przycisk realizujący komendę „stop”, aby pozwolić na szybką reakcję użytkownika (rys. 38).



Rys. 38. Przycisk realizujący komendę "stop".

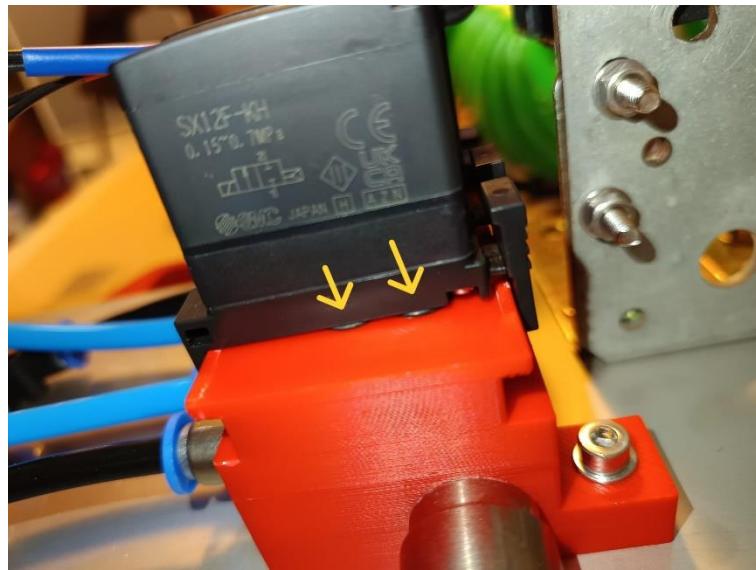
## 6. Badania przeprowadzone na stanowisku

Pierwsze uruchomienie stanowiska wykazało problemy z stabilnością układu pneumatycznego. Doszło do sytuacji, w której tłoczyko siłownika samoistnie pozycjonowało się na końcu lub początku zakresu swojego ruchu. Ponadto zauważono wyciek sprężonego powietrza przez zespół zaworu dławiąco-zwrotnego z tłumikiem na wyjściu płyty montażowej elektrozaworów. Analizując projekt układu pneumatycznego (rys. 20) stwierdzono, iż sytuacja ta nie powinna mieć miejsca, jako że sprężyny pneumatyczne zaworów powinny zamknąć przepływ sprężonego powietrza na wylocie płyty montażowej aż do momentu, kiedy na cewki zaworów nie podany zostanie prąd. W związku z tym dokładnie przeanalizowano fizycznie układ pneumatyczny i stwierdzono, iż problem wyniknął z nieszczelności połączenia zaworów z ich płytą montażową. Nieszczelność ta najpewniej spowodowana jest niewystarczającą płaskością powierzchni, z którą stykają się zawory w wykonanej w technologii druku 3D płycie montażowej. Ponadto stwierdzono, iż krawędzie mające za zadanie docisnąć zawory do powierzchni styku nie posiadają wystarczającej sztywności (uginają się). Z tych względów powstaje wyciek powietrza przy samej powierzchni styku zaworów z płytą montażową co powoduje nieprawidłowe działanie sprężyn pneumatycznych zaworów a co za tym idzie niestabilny układ pneumatyczny (rys. 39).



Rys. 39. Płyta montażowa zaworów z zaznaczoną powierzchnią oraz krawędzią z których wynika nieprawidłowe działanie układu pneumatycznego.

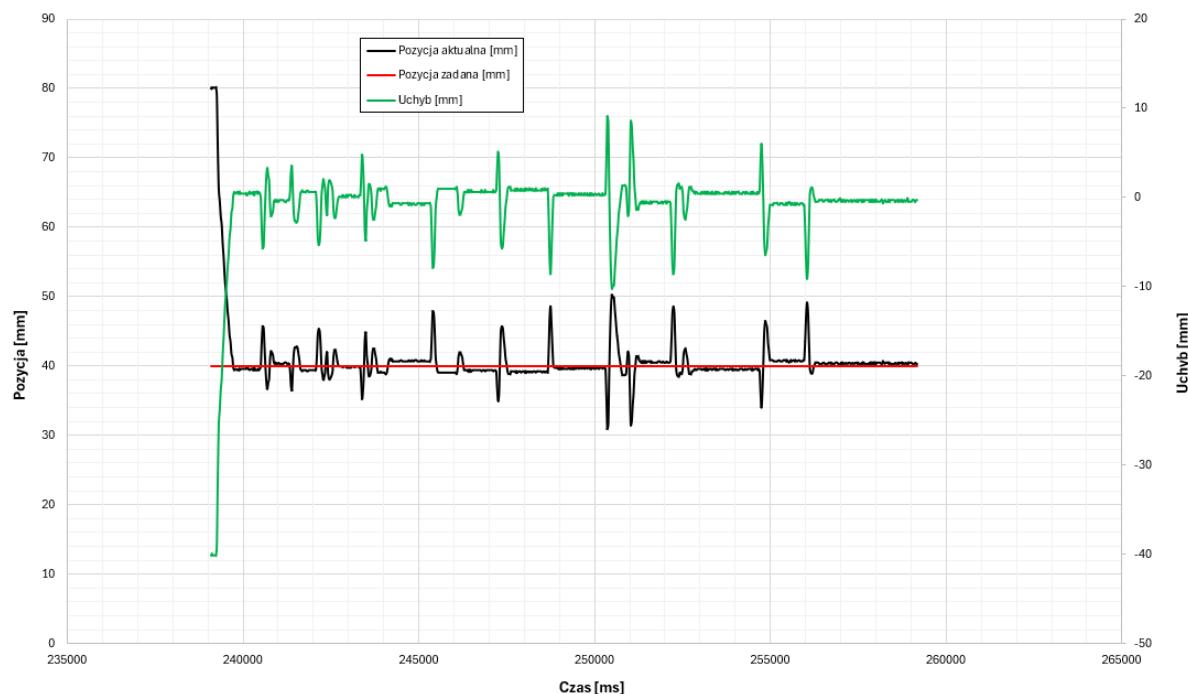
Niemniej jednak w miarę usprawniania układu pneumatycznego poprzez dodanie dodatkowych pierścieni uszczelniających (rys. 40) oraz manipulacją ustawieniem przepływu zaworu dławiąco-zwrotnego udało się utrzymać tłoczyko siłownika w jednej pozycji, tym samym doprowadzając układ pneumatyczny do stabilności pozwalającej na wykonanie przejazdów serwonapędu oraz osiągnięcie pozycji zadanej wraz z utrzymaniem jej.



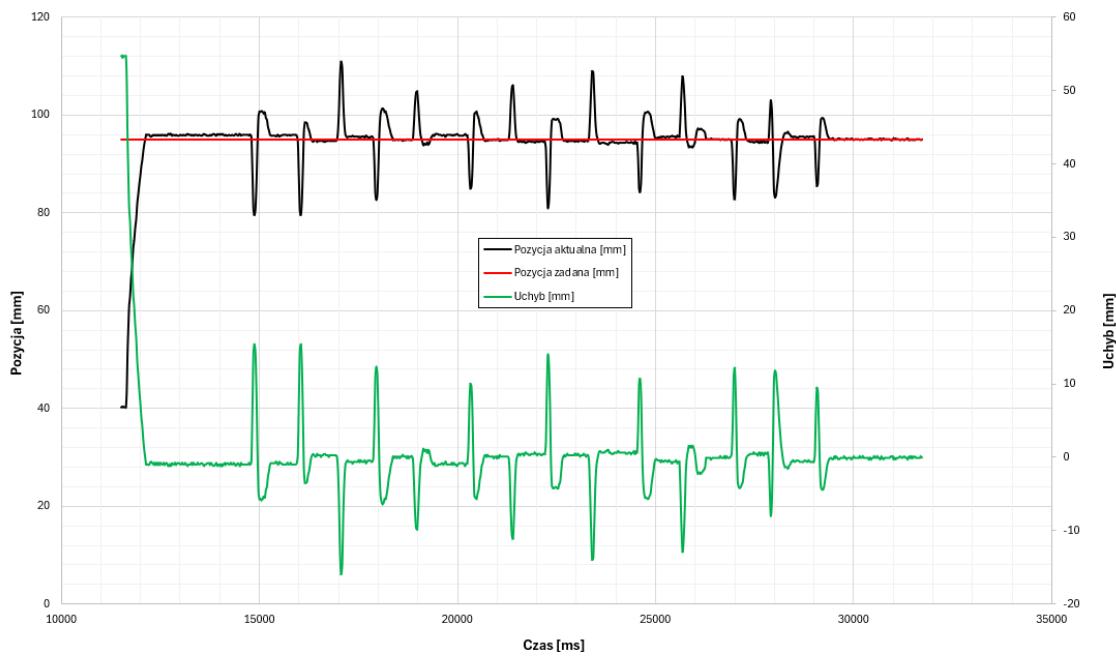
Rys. 40. Dodatkowe uszczelnienie na płycie montażowej zaworów.

Jak wcześniej wspomniano, funkcjonalność serwonapędu określona została na ciągłą kontrolę pozycji, w związku z tym wykonano testy pozwalające określić, czy serwonapęd spełnia swoją funkcjonalność. W tym celu nadano pozycję 40, 95 oraz 120 mm i dla każdej pozycji wykonano parę ręcznych (dłonią) przesunięć wózka w celu sprawdzenia czy tłoczyko siłownika wróci na swoją pozycję. Wyniki tych testów zaprezentowano na rys. 41-43. Ustawienia software'owego regulatora a zarazem sterownika serwonapędu podczas badania zostały w domyślnych nastawach (zgodnie z instrukcją obsługi stanowiska). Filmik z przykładowego badania spełnienia funkcjonalności serwonapędu można znaleźć pod linkiem:

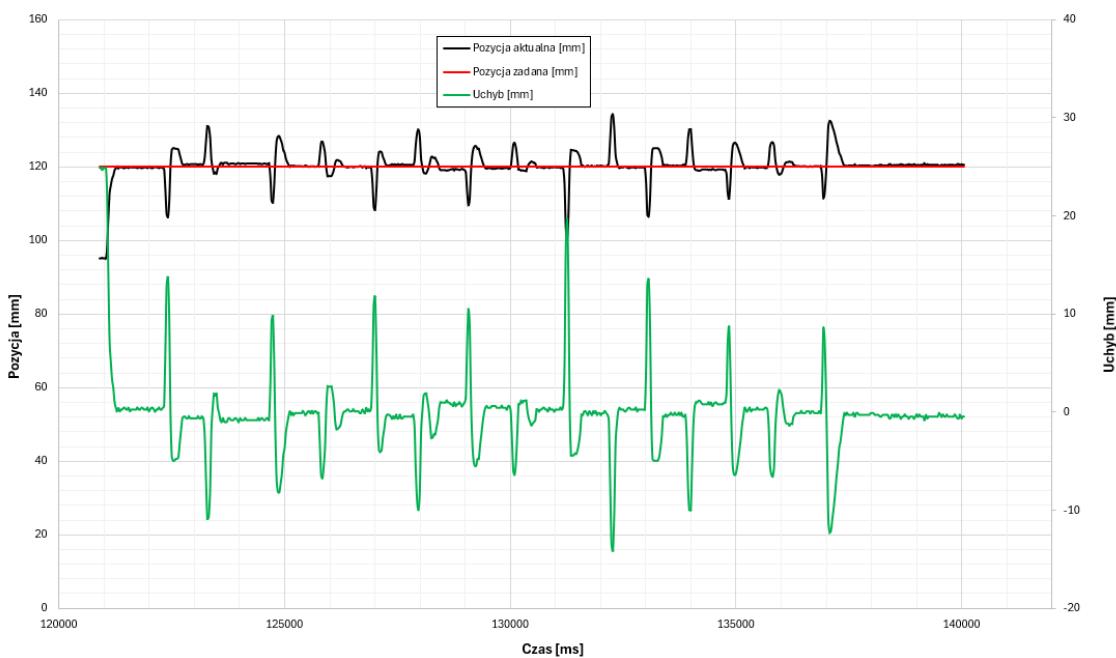
<https://youtu.be/TZkyX65cFyl>



Rys. 41. Badanie funkcjonalności serwonapędu, pozycja zadana = 40 mm.



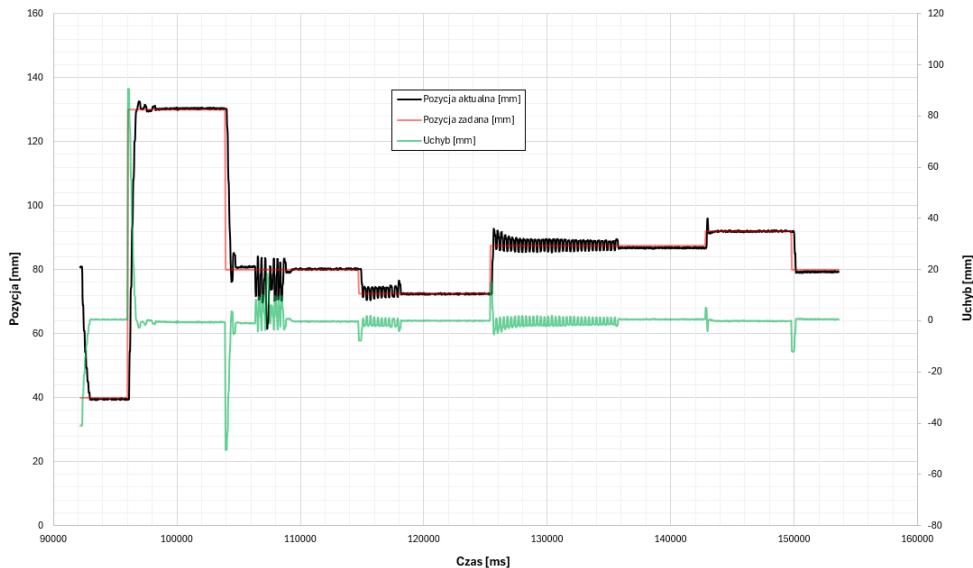
Rys. 42. Badanie funkcjonalności serwonapędu, pozycja zadana = 95 mm.



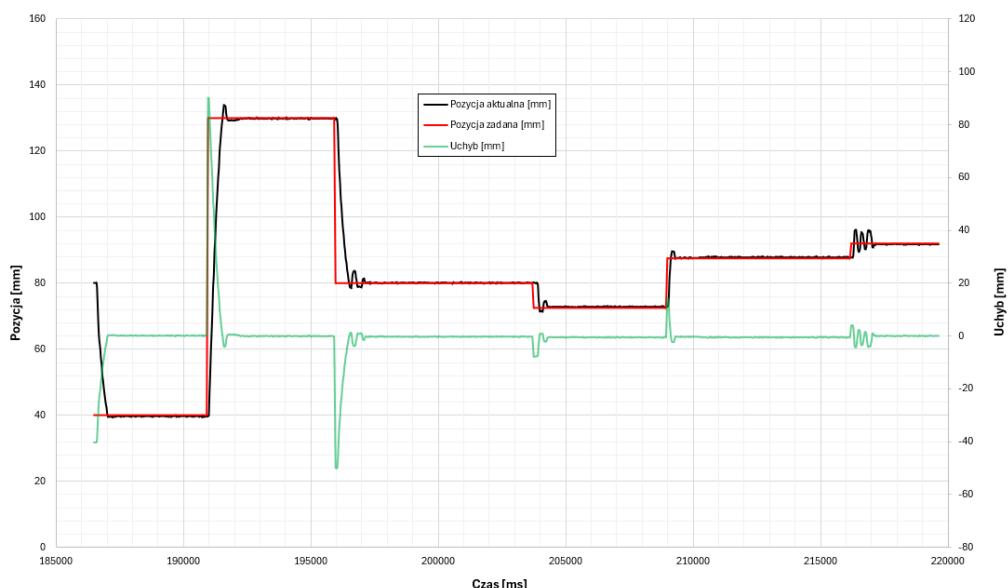
Rys. 43. Badanie funkcjonalności serwonapędu, pozycja zadana = 120 mm.

Na podstawie uzyskanych podczas badania przebiegów ruchu stwierdzono, iż serwonapęd spełnia swoją funkcjonalność w postaci ciągłej kontroli pozycji. Warto tutaj nadmienić, iż badania przeprowadzone zostały z dokładnością pozycjonowania na poziomie 1 mm (zatrzymanie pracy zaworów po osiągnięciu pozycji zadanej z dokładnością do 1 mm w obie strony), co stanowi mniej niż 1 % zakresu ruchu tłoczyska siłownika. Dlatego też stwierdzono, iż ogólna dokładność pozycjonowania zaprojektowanego serwonapędu wynosi mniej niż 1% zakresu ruchu.

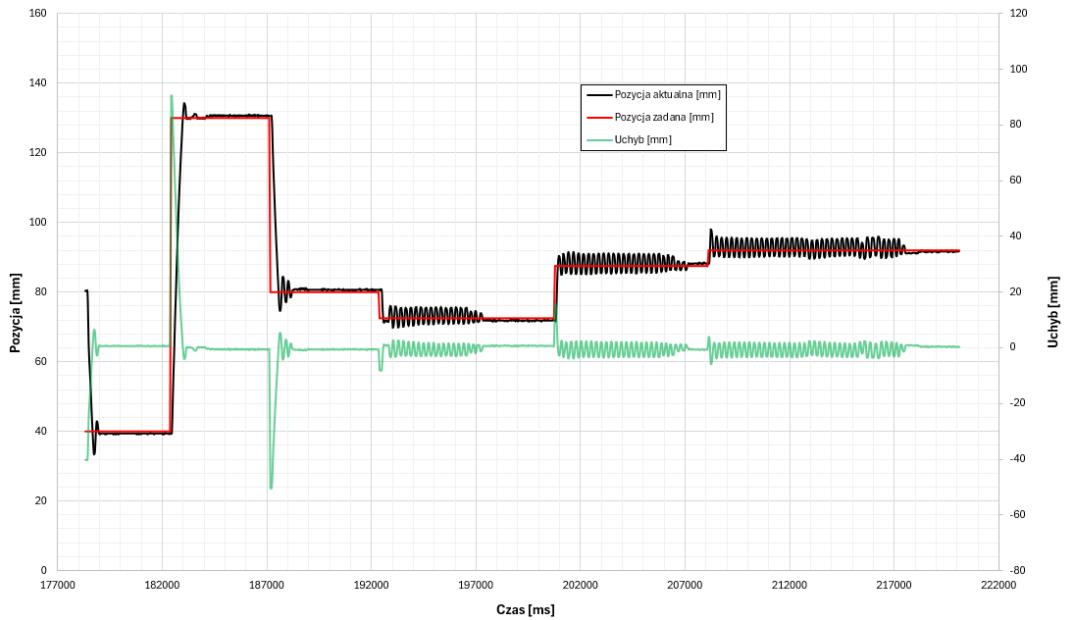
Kolejne badanie zakładało ogólną analizę zachowania serwonapędu przy różnych nastawach częstotliwości sygnału PWM, w tym celu nadawano 6 różnych wartości pozycji zadanej dla wszystkich nastaw częstotliwości sygnału PWM dla których stanowisko zostało skonfigurowane (2, 5, 10, 20, 50 Hz). W przypadku częstotliwości wynoszących 10, 20 oraz 50 Hz określono, iż serwonapęd realizował swoją funkcję zgodnie z przeznaczeniem na domyślnych nastawach software'owego regulatora PID i domyślnej dokładności pozycjonowania (rys. 44-46). Niemniej jednak zauważono, iż serwonapęd uzyskał najmniejsze przeregulowanie w przypadku częstotliwości sygnału PWM wynoszącej 20 Hz. Ponadto zaobserwowano, iż największe przeregulowanie wystąpiło przy częstotliwości 50 Hz w momencie, kiedy różnica pomiędzy pozycją zadaną a początkową była niewielka.



Rys. 44. Przebieg ruchu dla różnych pozycji zadanych serwonapędu przy częstotliwości sygnału PWM wynoszącej 10 Hz.

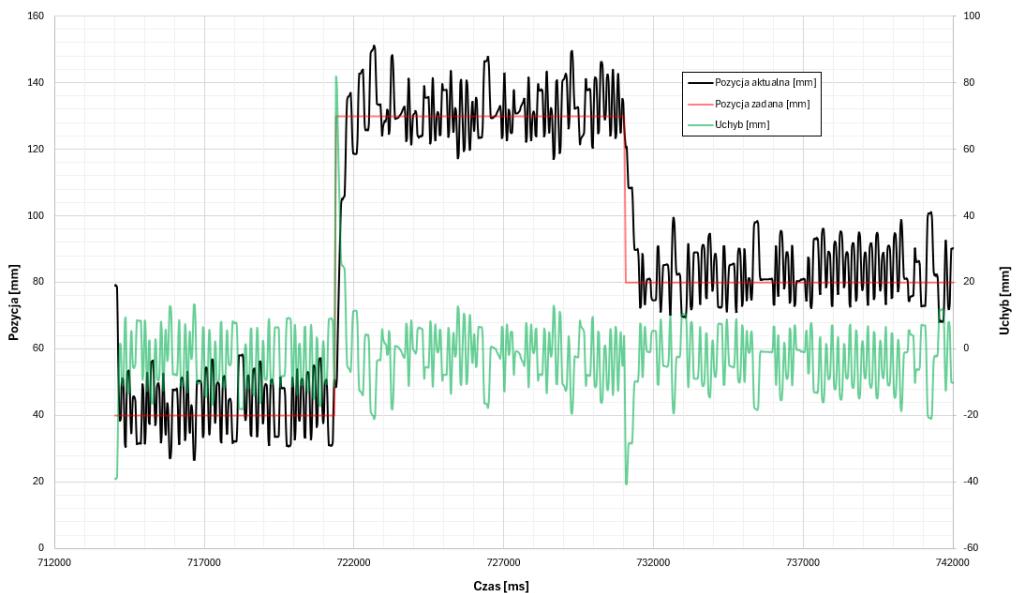


Rys. 45. Przebieg ruchu dla różnych pozycji zadanych serwonapędu przy częstotliwości sygnału PWM wynoszącej 20 Hz.



Rys. 46. Przebieg ruchu dla różnych pozycji zadanych serwonapędu przy częstotliwości sygnału PWM wynoszącej 50 Hz.

W przypadku mniejszych częstotliwości natomiast (2 i 5 Hz), zauważono przeregulowanie o wiele wyższe niż w przypadku poprzednio badanych częstotliwości, na poziomie uniemożliwiającym wypożyczanie tłoczyska siłownika (rys. 47). Ponadto stwierdzono gwałtowny wzrost temperatury elektrozaworów, w związku z czym częstotliwości te zostały usunięte z konfiguracji serwonapędu.



Rys. 47. Przebieg ruchu dla różnych pozycji zadanych serwonapędu przy częstotliwości sygnału PWM wynoszącej 5 Hz.

Jako że zaprojektowane i zbudowane stanowisko ma za zadanie pełnić funkcję dydaktyczną opracowano instrukcję dotyczącą ćwiczenia laboratoryjnego jakie może być przeprowadzone na stanowisku wraz z wzorcowym sprawozdaniem z ćwiczenia. Oba dokumenty przedstawiono w załączniku 3 i 4.

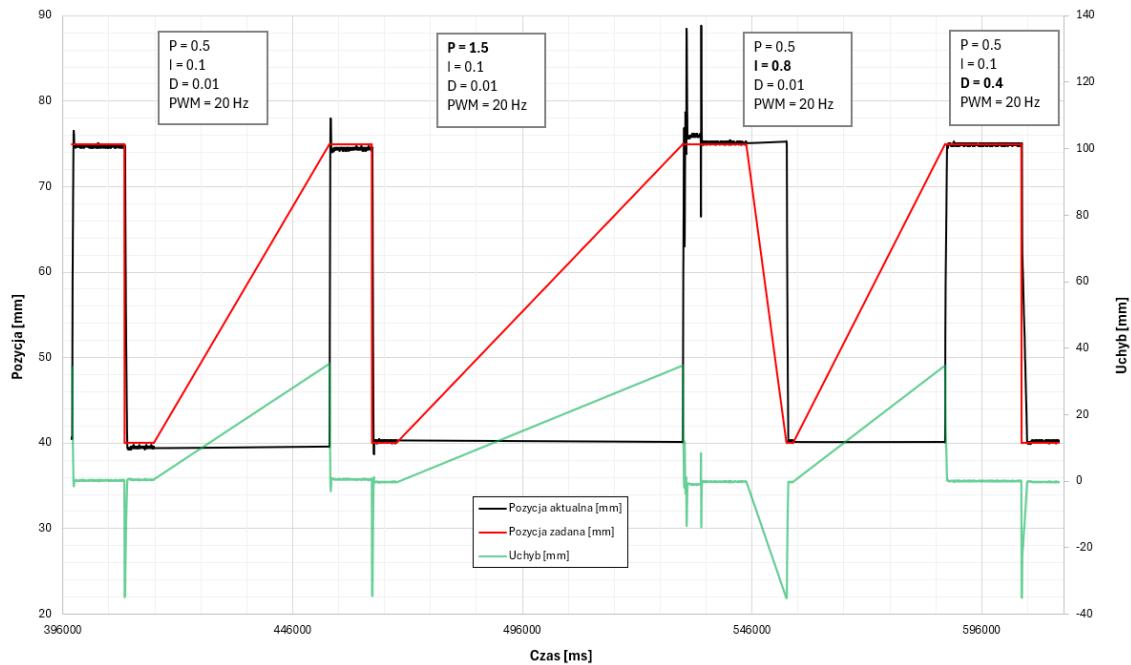
## 7. Podsumowanie i wnioski

Wszystkie dokumenty oraz pliki związane z zbudowanym stanowiskiem dydaktycznym można znaleźć pod linkiem:

[https://github.com/MikolajPawel/PneumaticServoDrive\\_Arduino\\_byPM](https://github.com/MikolajPawel/PneumaticServoDrive_Arduino_byPM)

Pomimo problemów z szczelnością układu pneumatycznego a co za tym idzie stabilnością zbudowanego serwonapędu, stwierdzono, iż stanowisko spełnia swoją funkcję dydaktyczną. Przeprowadzone ćwiczenie laboratoryjne umieszczone w załączniku wraz z instrukcją pokazuje wpływ nastaw regulatora PID na zachowanie serwonapędu zgodnie z przyjętymi normami wpływu poszczególnych parametrów regulatora na pozycjonowanie serwonapędu. Tym samym potwierdzono prawidłowe działania software'owego regulatora serwonapędu. Reakcja serwonapędu na zmianę nastaw programowego regulatora położenia została również przedstawiona poglądowo na rys. 48 oraz na filmiku pod linkiem:

<https://youtu.be/fm1s1yKPOr8>

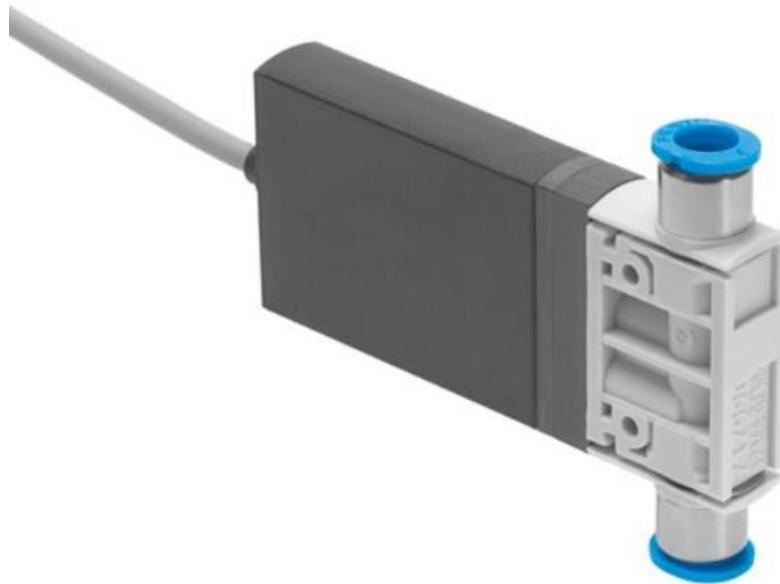


Rys. 48. Wpływ nastaw programowego regulatora położenia na pozycjonowanie serwonapędu pneumatycznego.

Zastosowanie w stanowisku elementów hobbystycznych reprezentowanych głównie przez moduł mikrokontrolera o architekturze otwartej Arduino UNO, który spełniał rolę sterownika realizującego również funkcję programowego regulatora dowiodło możliwość integracji świata przemysłu z elementami hobbystycznymi. Potwierdza tą tezę też fakt, iż zbudowany serwonapęd cechuje się dokładnością pozycjonowania wynoszącą mniej niż 1% zakresu ruchu.

Aby zbudowane stanowisko mogło w pełni spełniać swoją rolę dydaktyczną, zostaje ono przekazane Politechnice Śląskiej z nadzieją, iż będzie miało pozytywny wpływ na proces dydaktyczny związany z tematyką serwonapędów pneumatycznych, programowych regulatorów PID oraz sposobów sterowania napędami.

Niemniej jednak, aby stanowisko jak najlepiej pełniło swoją rolę dydaktyczną, należy zaadresować wyróżniający się problem stanowiska w postaci niskiej stabilności wynikającej najpewniej z nieszczelności układow pneumatycznego. W tym celu zaleca się wykonanie płyty montażowej w technologii frezowania CNC. Obecny projekt płyty montażowej zostaje udostępniony wraz z resztą plików w podanym na początku tego rozdziału repozytorium. Innym rozwiązaniem problemu szczelności może być również zastosowanie analogicznych zaworów, ale o innym sposobie podłączenia, na przykład omawiane w rozdz. 4 zawory MHJ10-S-2,5-QS-6-HF firmy FESTO (rys. 49).



Rys. 49. Zdjęcie poglądowe przedstawiające elektrozawór o krótkim czasie przełączania MHJ10-S-2,5-QS-6-HF firmy FESTO [20].

# Bibliografia

- [1] Kosmol Jan, *Napędy mechatroniczne*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013
- [2] Tomasiak Edward, *Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2001
- [3] Baier Andrzej, Kost Gabriel, Sękala Agnieszka, Świder Jerzy i Zdanowicz Ryszard, *Podstawy syntezy pneumatycznych i elektropneumatycznych układów sterowania*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2018
- [4] Micheal Brian Thomas, *Advanced servo control of pneumatic actuator*, The Ohio State University, 2003
- [5] Kuźnik Jerzy, *Regulatory i układy regulacji*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002
- [6] Brzózka Jerzy, *Regulatory i układy automatyki*, Wyd. PWN-Mikom, Warszawa, 2004
- [7] Jakubiec Jerzy, *Podstawy techniki mikroprocesorowej*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2014
- [8] Jakubiec Jerzy, Krupanek Beata i Bogacz Ryszard, *Narzędzia programowania mikrokontrolerów*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2017
- [9] Soumitra Kumar Mandal, *Mircoprocesors and Microcontrollers Architecture, Programming and Interfacing using 8085, 8086, 8051*, Wyd. McGraw Hill, New Delhi, 2011
- [10] Proctor, F.M., Damazo, B., Yang, C., Frechette, S., *Open architectures for Machine Control*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1998
- [11] Blackburn,J. F.,G.Reethof, J. L.Shearer, *Fluid Power Control*, The Technology Presss of M.I.T. i Wyd. John Wiley & Sons, Inc., Nowy York i Londyn, 1960
- [12] Systemy pomiaru drogi – materiały firmy FESTO,  
[https://www.festo.com/pl/pl/c/produkty/napedy/serwopneumatyczne-systemy-pozycjonowania/systemy-pomiaru-polozenia-id\\_pim231/?page=0](https://www.festo.com/pl/pl/c/produkty/napedy/serwopneumatyczne-systemy-pozycjonowania/systemy-pomiaru-polozenia-id_pim231/?page=0) (dostęp: 05.02.2025)
- [13] Szenajch Wiesław, *Napędy i sterowanie pneumatyczne*, Wyd. WNT, Warszawa, 1997
- [14] Lisowski Edward, Filo Grzegorz, Rajda Janusz, *Adjustment of Proportional Control Valve Characteristics via Pressure Compensation Using Flow Forces*, Energies 2024, 17, 1546, <https://doi.org/10.3390/en17071546>
- [15] Radosław Krzyżanowski, *SIMATIC Motion Control*, Wyd. Helion, Gliwice, 2021
- [16] Jakub Takosoglu, Ryszard Dindorf, Paweł Łaski, Piotr Woś, *Pozycjonowanie serwonapędu elektropneumatycznego z bezpośrednim pomiarem przemieszczenia i prędkości tłoka siłownika*, Acta Mechanica et Automatica 4 (2010): 86-91
- [17] Behrouz Najjari, Muhammed Özdemir, Mousa Vaezipour, *Theoretical and Empirical Improvement of a Fast-Switching Electro-Pneumatic Valve by Using Different Methods*, Acta Mechanica et Automatica 16 (2022): 91-97

- [18] Zeljko Situm, Tihomir Zilic, Mario Esser, *High speed solenoid valves in pneumatic servo applications*, Mediterranean Conference on Control and Automation (2007): T06-001
- [19] *Linear encoders* – materiały firmy FAGOR Automation, [http://www.fagorautomation.co.kr/pub/kor/pdf/catalogos/Measuring%20systems/catalog\\_linear\\_encoders.pdf](http://www.fagorautomation.co.kr/pub/kor/pdf/catalogos/Measuring%20systems/catalog_linear_encoders.pdf) (dostęp: 05.02.2025)
- [20] *Elektrozawór MHJ10-S-2,5-QS-6-HF* – karta danych firmy FESTO, <https://www.festo.com/pl/pl/a/download-document/datasheet/567503> (dostęp: 05.02.2025)
- [21] *Basics of PWM (Pulse Width Modulation)* – materiały szkoleniowe firmy Arduino, <https://docs.arduino.cc/learn/microcontrollers/analog-output/> (dostęp: 05.02.2025)
- [22] Muhammad Samiullah, Muhammad Zohaib Irfan, Abid Rafique, *Microcontrollers: A Comprehensive Overview and Comparative Analysis of Diverse Types*, National University of Sciences & Technology, Islamabad, 2023, <http://dx.doi.org/10.31224/3228>
- [23] Oficjalny sklep producenta Arduino, <https://store.arduino.cc/> (dostęp: 05.02.2025)
- [24] *Proportional pressure regulators and valves VPPM, VPPE, MPPE, MPPES, MPYE and the new VPPM-MPA* – materiały firmy FESTO <https://www.festo.com/assets/attachment/pl/143037> (dostęp: 05.08.2025)
- [25] *High Speed 2 Port Valve SX10 Series* – Katalog produktu/Karta danych firmy SMC <https://static.smc.eu/pdf/SX10.pdf> (dostęp: 05.08.2025)
- [26] *LINCOD Absolute linear encoder Series SMAX SMAZ* – Katalog produktu/Karta danych firmy Like <https://www.eldar.biz/amfile/file/download/file/468/product/1174/> (dostęp: 05.08.2025)
- [27] *LV.FO+SJF* – Katalog produktu/Karta danych firmy Elesa+Ganter
- [28] *UNO R3* – dokumentacja firmy Arduino <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/> (dostęp: 06.08.2025)
- [29] Strona dystrybutora elektroniki <https://www.gotronik.pl/> (dostęp: 06.08.2025)
- [30] *Gravity MOSFET Power Controller SKU DFR0457* – dokumentacja firmy DF-Robot [https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_MOSFET\\_Power\\_Controller\\_SKU\\_DFR0457](https://wiki.dfrobot.com/Gravity_MOSFET_Power_Controller_SKU_DFR0457) (dostęp: 07.08.2025)



## **Załącznik 1. Dokumentacja serwisowa stanowiska.**





Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechnika Śląska

Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Poland

Phone

Company / customer

## Project description

Job number

Commission

Serwonapęd z mikrokontrolerem o architekturze otwartej i zaworach szybko-przełączających

Manufacturer (company)

Project name

Make

Type

## Responsible for project

Part feature

- 9 -

14.08.2025 Edit date

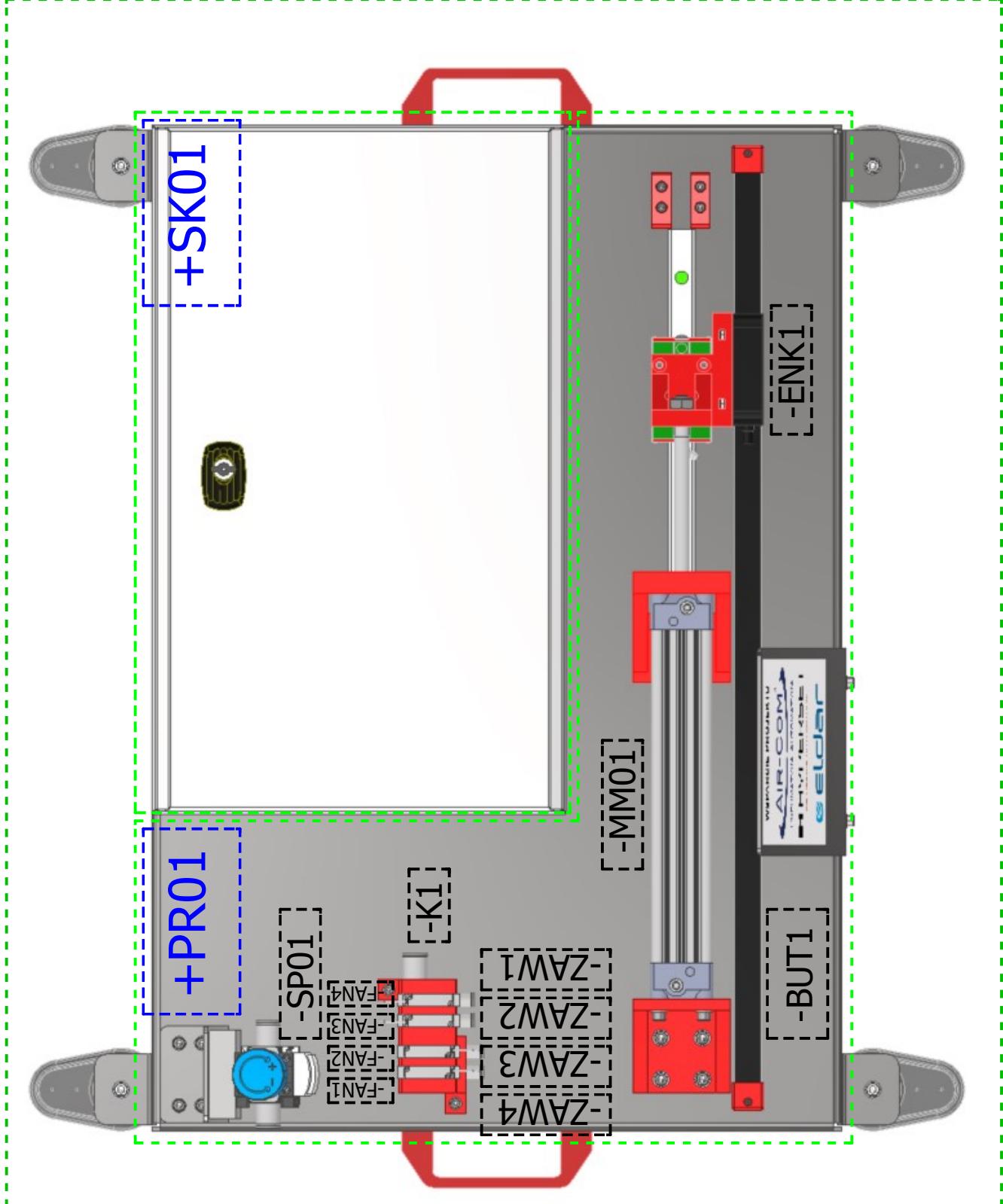
by (short name) Paweł Mikolaj

20

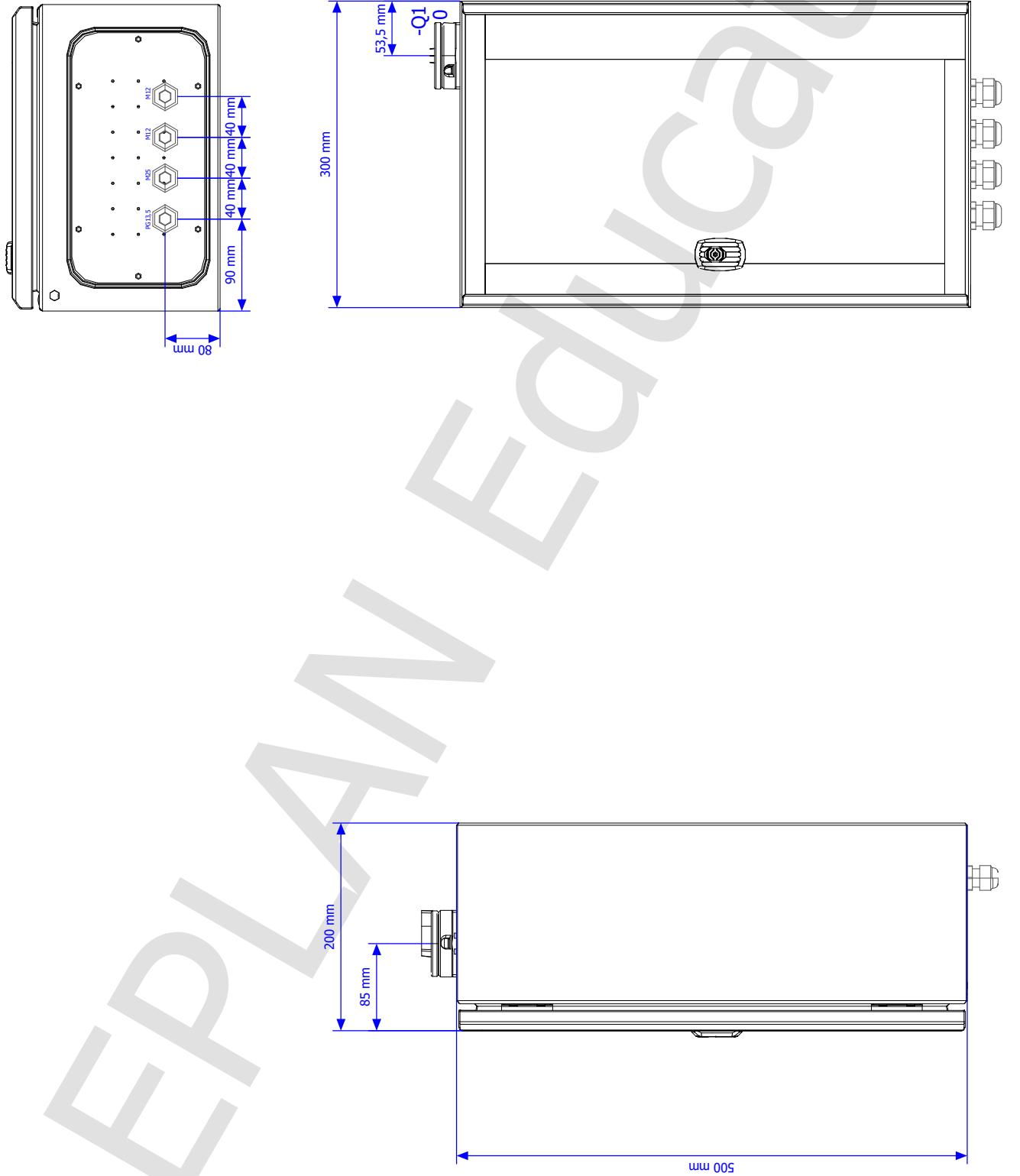
		Date 19.06.2025	Ed. Paweł Mikołaj	Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Technologii i Inżynierii Materiałowej	Strona tytułowa
--	--	--------------------	----------------------	---	-----------------

Page	Page type	Page description	Date	Edited by
=MGR+DOC/1	Title page / cover sheet	Strona tytułowa	19.06.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+DOC/2	Table of contents	Spis treści	14.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+DOC/3	Topology	Schemat technologiczny	14.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+PRO1/1	Fluid power schematic	Schemat pneumatyczny	05.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/1	Model view	Widok szafy SK01	25.07.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/2	Panel layout	Rozmieszczenie aparatów SK01	25.07.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/3	Schematic multi-line	Zasilanie 230V - wyłącznik główny	26.07.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/4	Schematic multi-line	Zasilanie 24VDC i 12VDC	14.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/5	Schematic multi-line	24VDC - zaciski	25.07.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/6	Schematic multi-line	Arduino i przekąski typu MOSFET	14.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/7	Schematic multi-line	Konwerter pętli prądowej	07.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/8	Schematic multi-line	Enkoder	11.07.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/9	Schematic multi-line	Zawory	05.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/10	Schematic multi-line	Przycisk STOP	14.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/11	Terminal diagram	Terminal diagram = MGR+SK01-X2AV1	14.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/12	Terminal diagram	Terminal diagram = MGR+SK01-XENK1	14.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/13	Terminal diagram	Terminal diagram = MGR+SK01-XENK2	14.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/14	Terminal diagram	Terminal diagram = MGR+SK01-XM1	14.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/15	Terminal diagram	Terminal diagram = MGR+SK01-XPE	14.08.2025	Paweł Mikołaj
=MGR+SK01/16	Terminal diagram	Terminal diagram = MGR+SK01-XZAW	14.08.2025	Paweł Mikołaj

## **Stanowisko dydaktyczne =MGR**



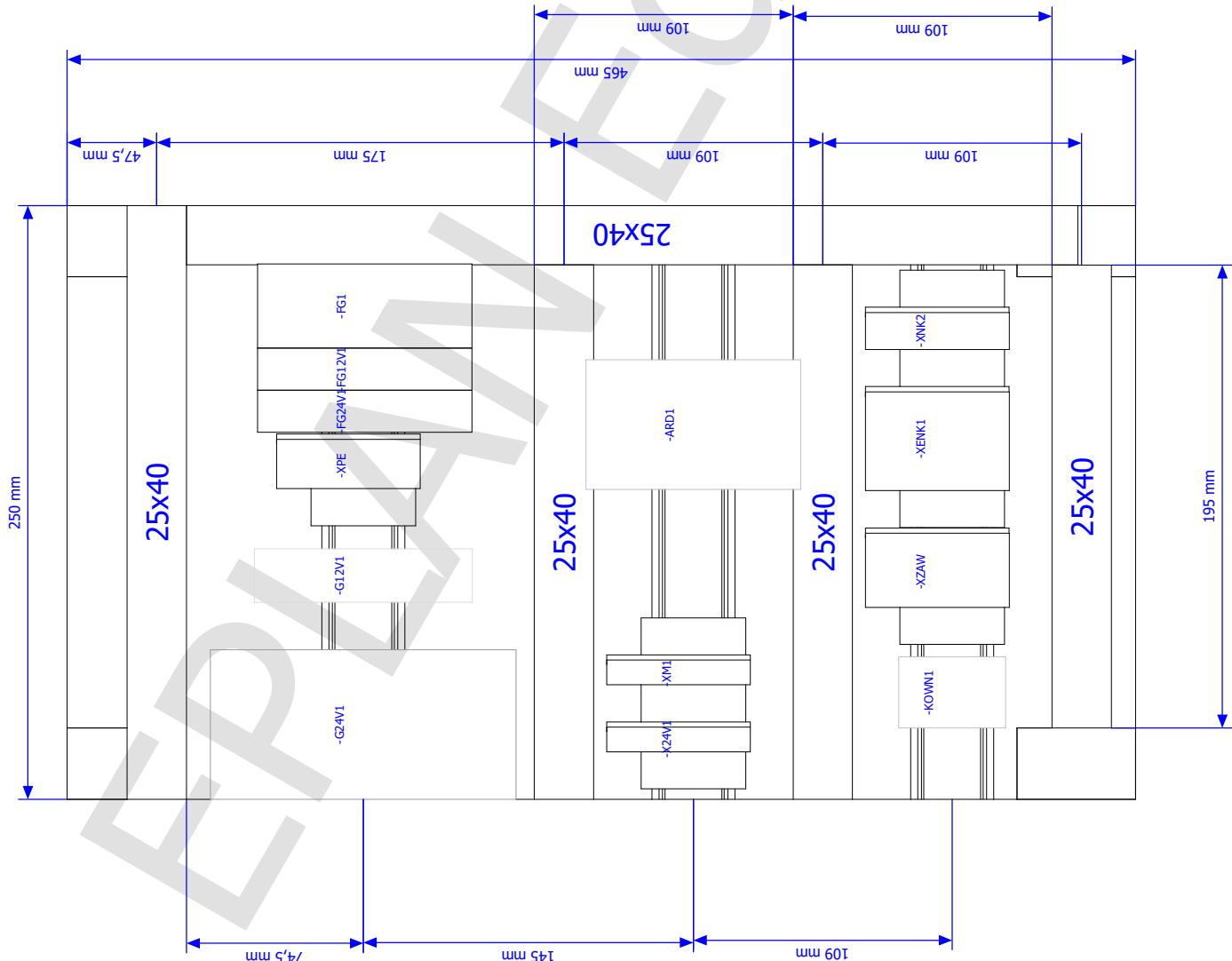




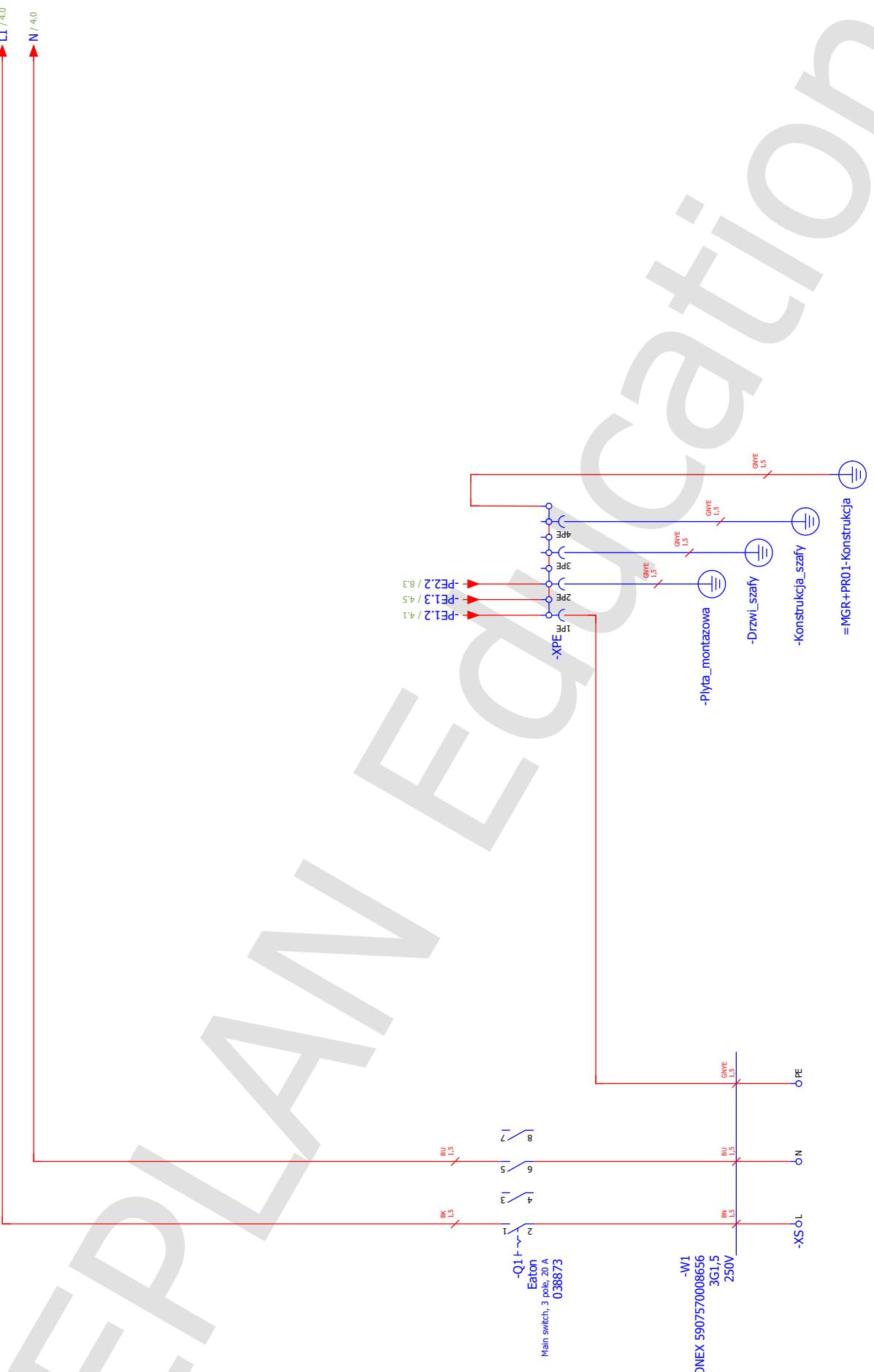
+PRO1/1			Date 25.07.2025 Ed. Paweł Mikulaj	Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Sekretariat Szkoły Kształcącej = MGR + Sk01	Page 1
Modification	Date	Name	Original	Replaced by	Page 5 / 20

## Legenda szafy sterowniczej

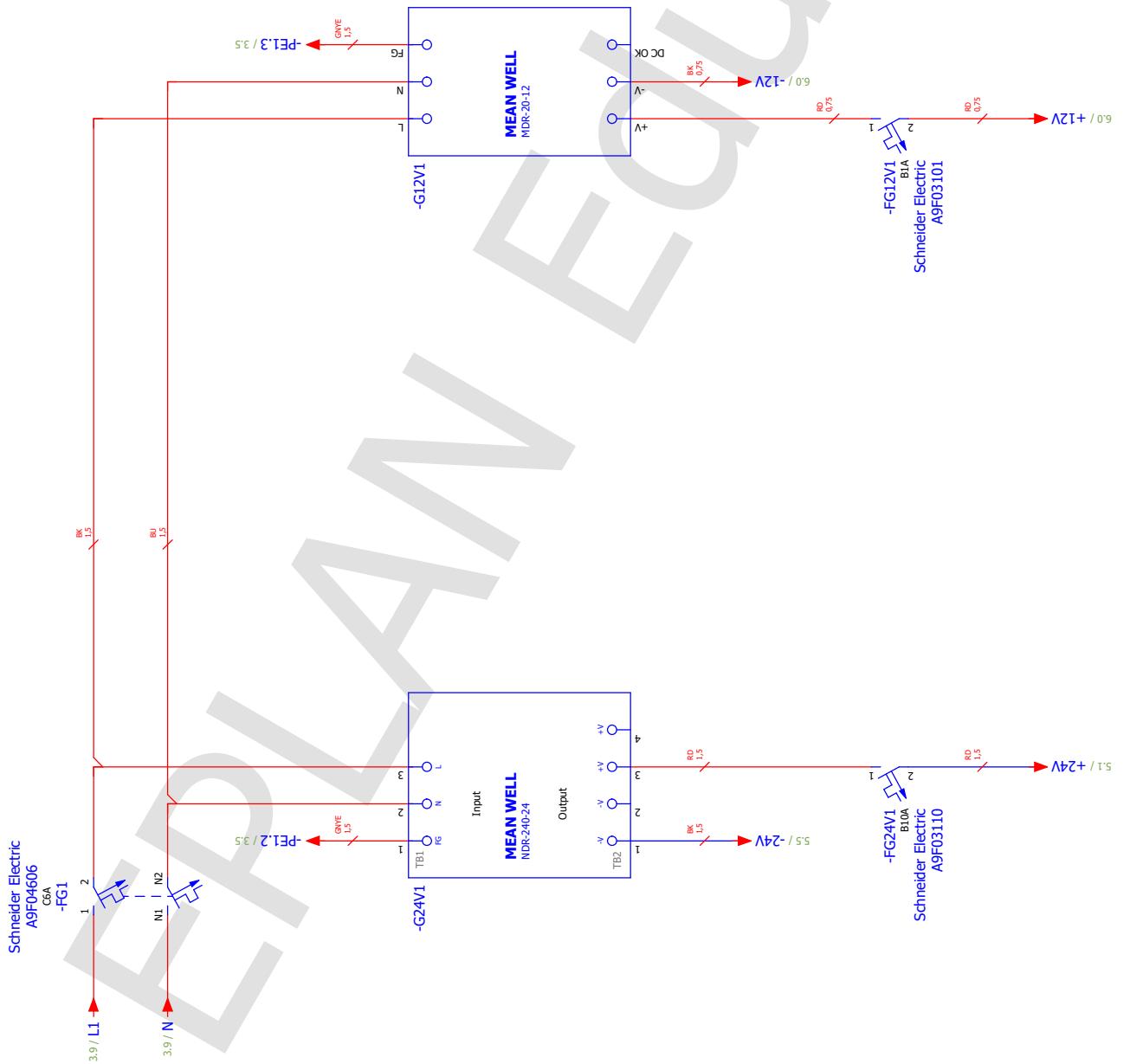
legenda_szafy			
Pozycja	Identyfikator	Producent	Numer typu
0	Ul	EATON	038873
1	G4V1	MEAN WELL	NDR-240-24
2	GL2V1		MNR-20-12
3	FG24V1	Schneider Electric	A9F03110
4	FG12V1	Schneider Electric	A9F03101
5	FG1	Schneider Electric	A9F04606
6	ARD1		Arduino A000066 + 2x DFRobot DFR0457
7	KOWNL		BTE XY-110V

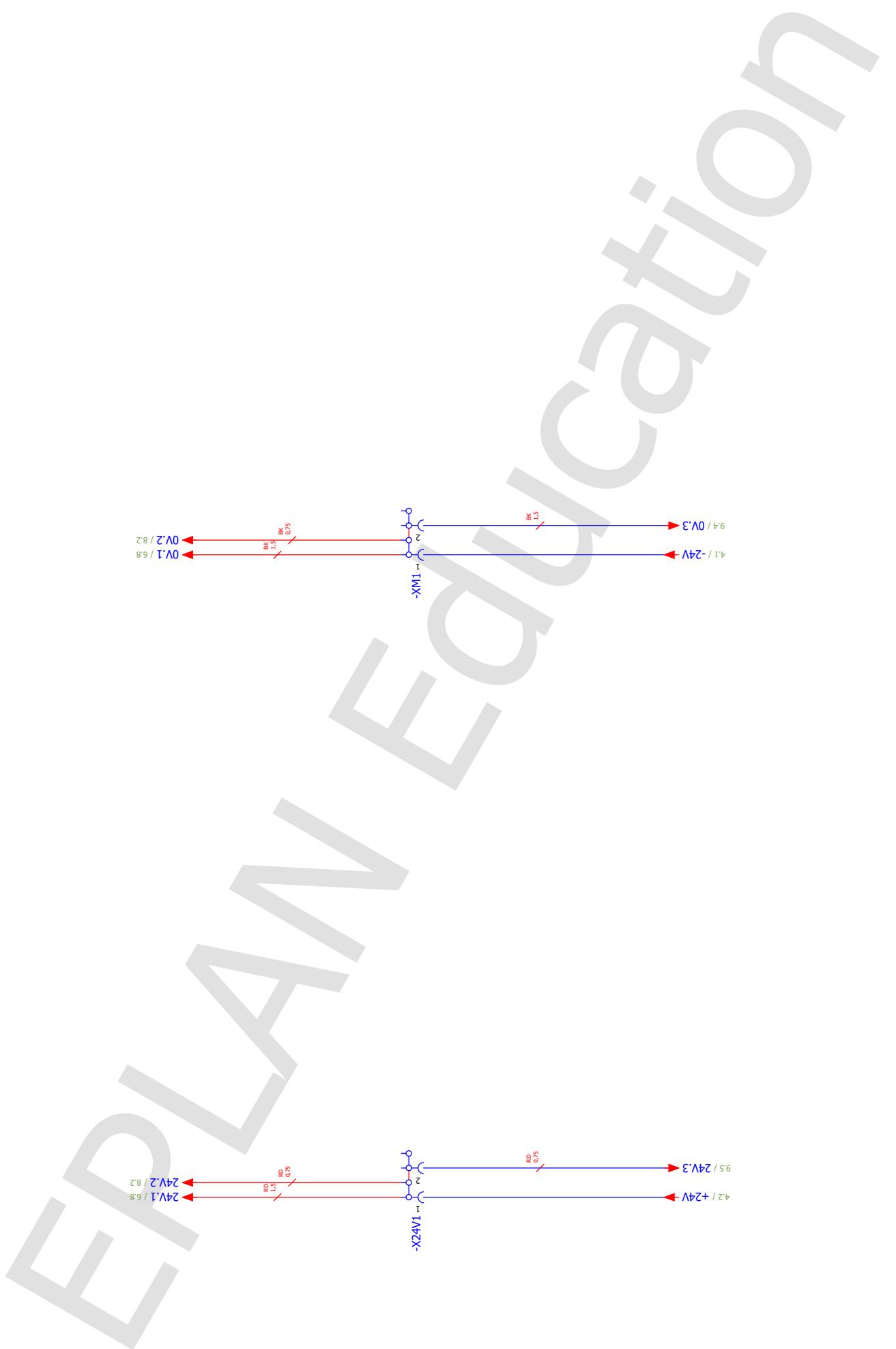


Modification	Date	Name	Date	Ed.	25.07.2025	Rozmieszczenie aparatów SK01	Katedra RMTT Wydział Mechaniczny Technologiczny Sewonapad z mikrokontrolerem o architekturze otwartej i zaopatrzeniem w komponenty Sączkaczajacych	= MGR + Sk01
				Appr.	Pawel Mikolaj			Page / 20



Modification	Date	Name	Date	Name	Ed.	Appl.	Original	Replaced by	Replacement of	Page	Page	Page
										= MGR		
										+ Sk01		



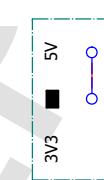
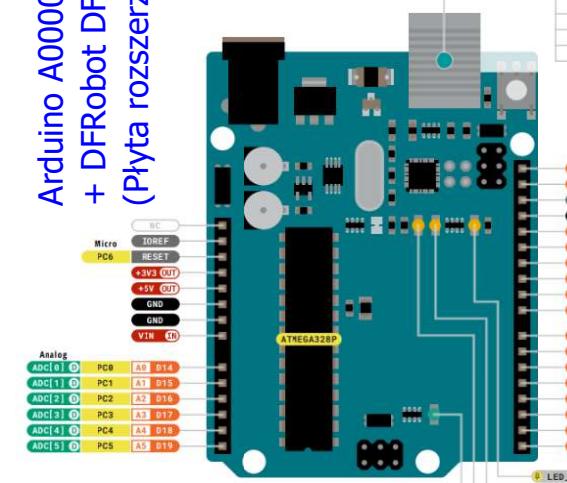
		Date	25.07.2025	Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Szczecinie	MGR + Sk01	Page 5
		Ed.	Pawel Mikolaj			
		Apr.				
Modification	Date	Name	Original	Replaced by	Replacement of	Page 9 / 20

4.5 / +12V  
4.5 / -12V

5.1 / 24V.1  
5.5 / 0V.1

L7

**Arduino A000066**  
+ DFRobot DFR02991  
(Płyta rozszerzająca IO)

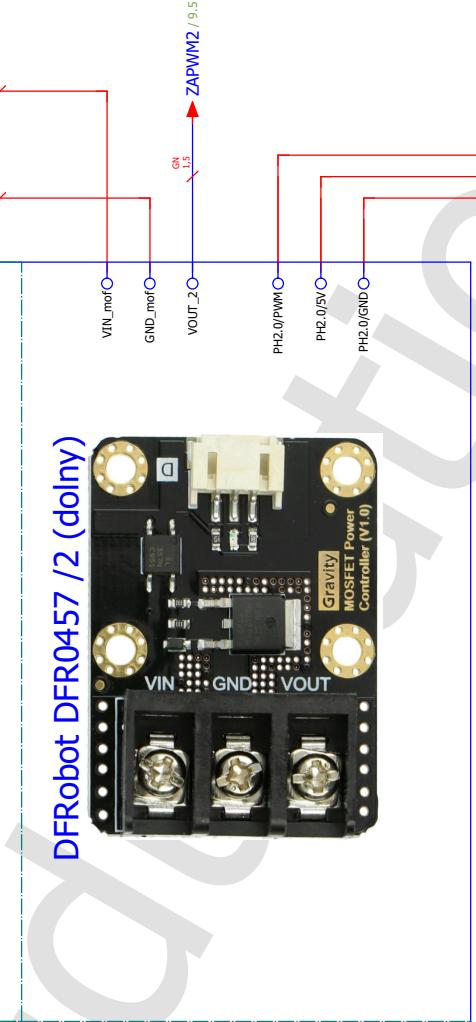


-ARD1  
3V3 ■ 5V

**DFRobot DFR0457 / 1 (górnny)**



**DFRobot DFR0457 / 2 (dolny)**

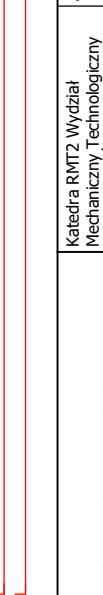


DIG1 / 10.4

-W2  
DFRobot FT0011  
3x0.5 BK

-W3  
DFRobot FT0011  
3x0.5 BK

ARDUINO  
ARDUINO



Modification	Date	Name	Original	Replaced by	Page / 10 / 20
				= MGR + Sk01	Page 7

Page 6

Page 7

Page 8

Page 9

Page 10

Page 11

Page 12

Page 13

Page 14

Page 15

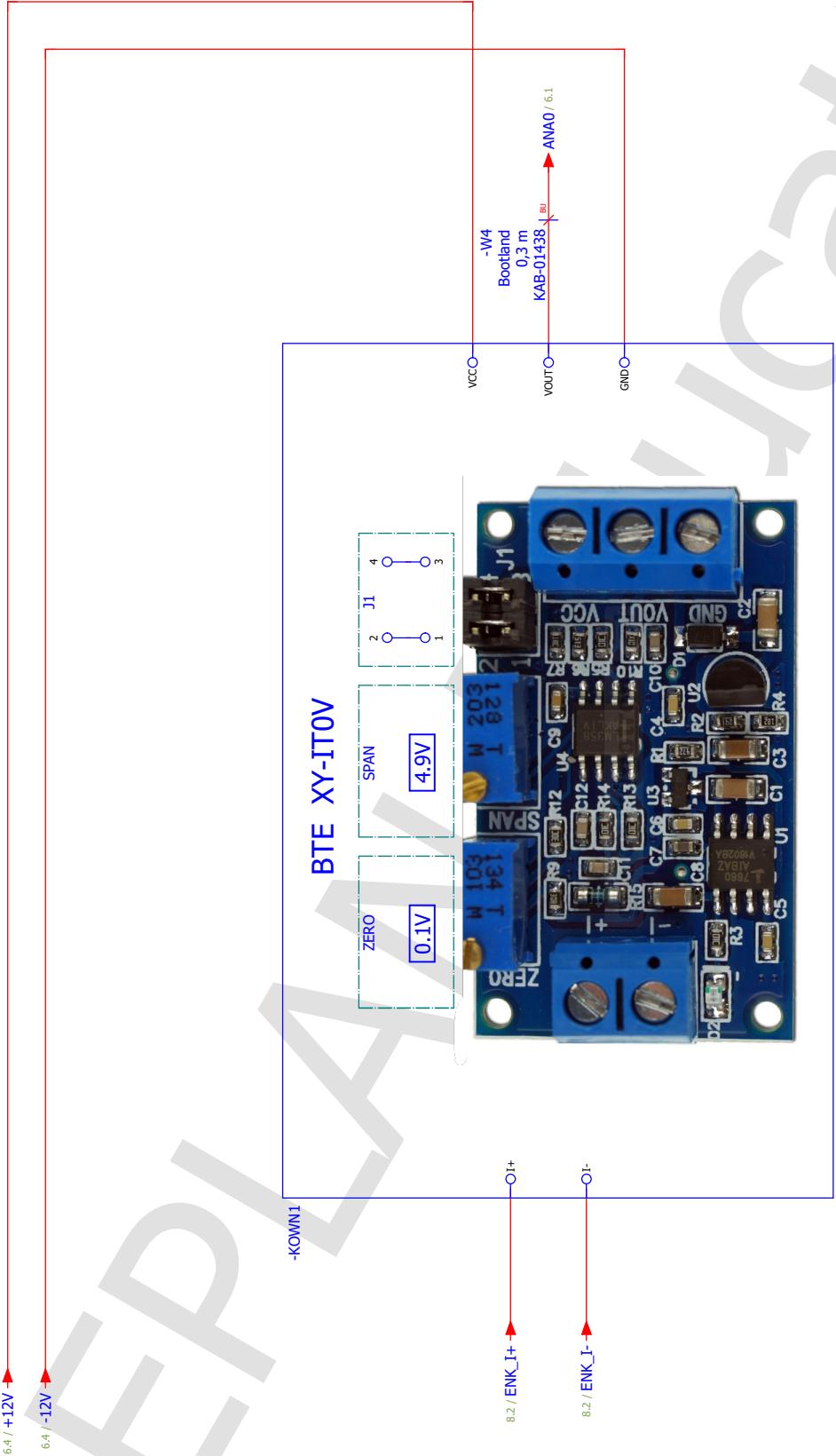
Page 16

Page 17

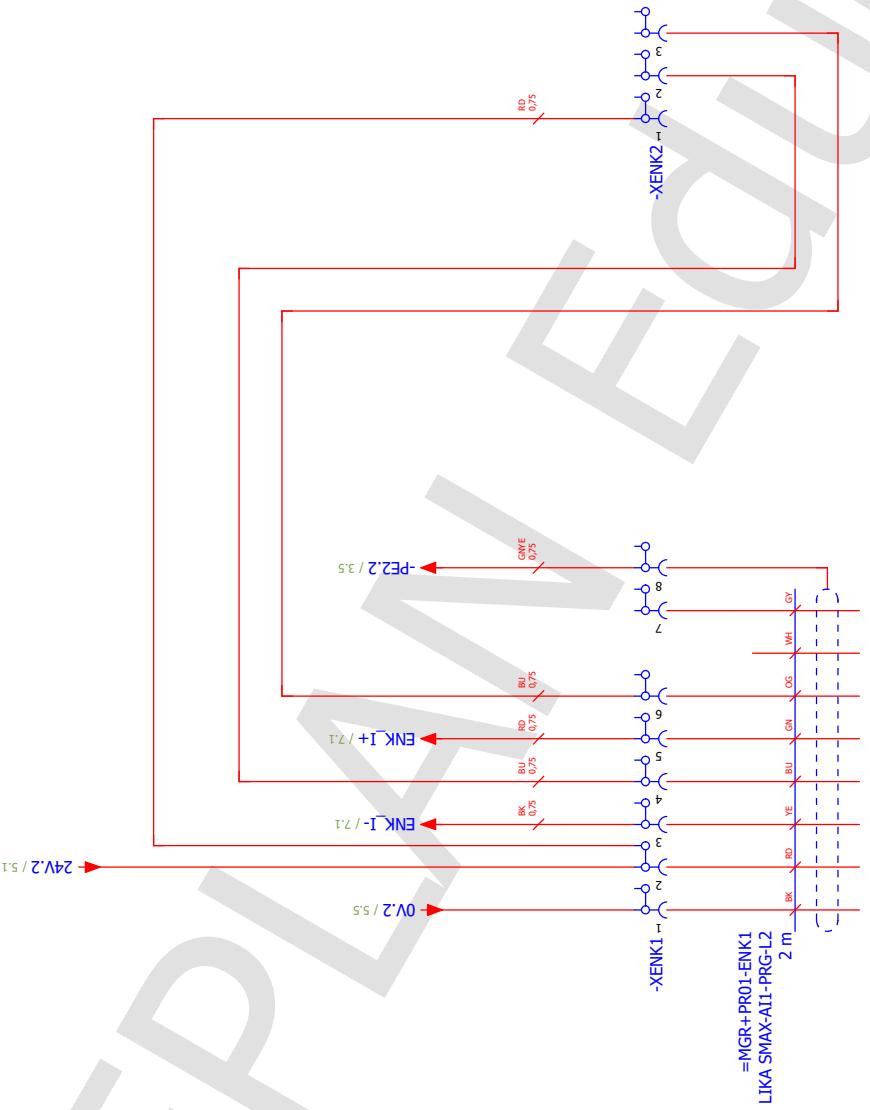
Page 18

Page 19

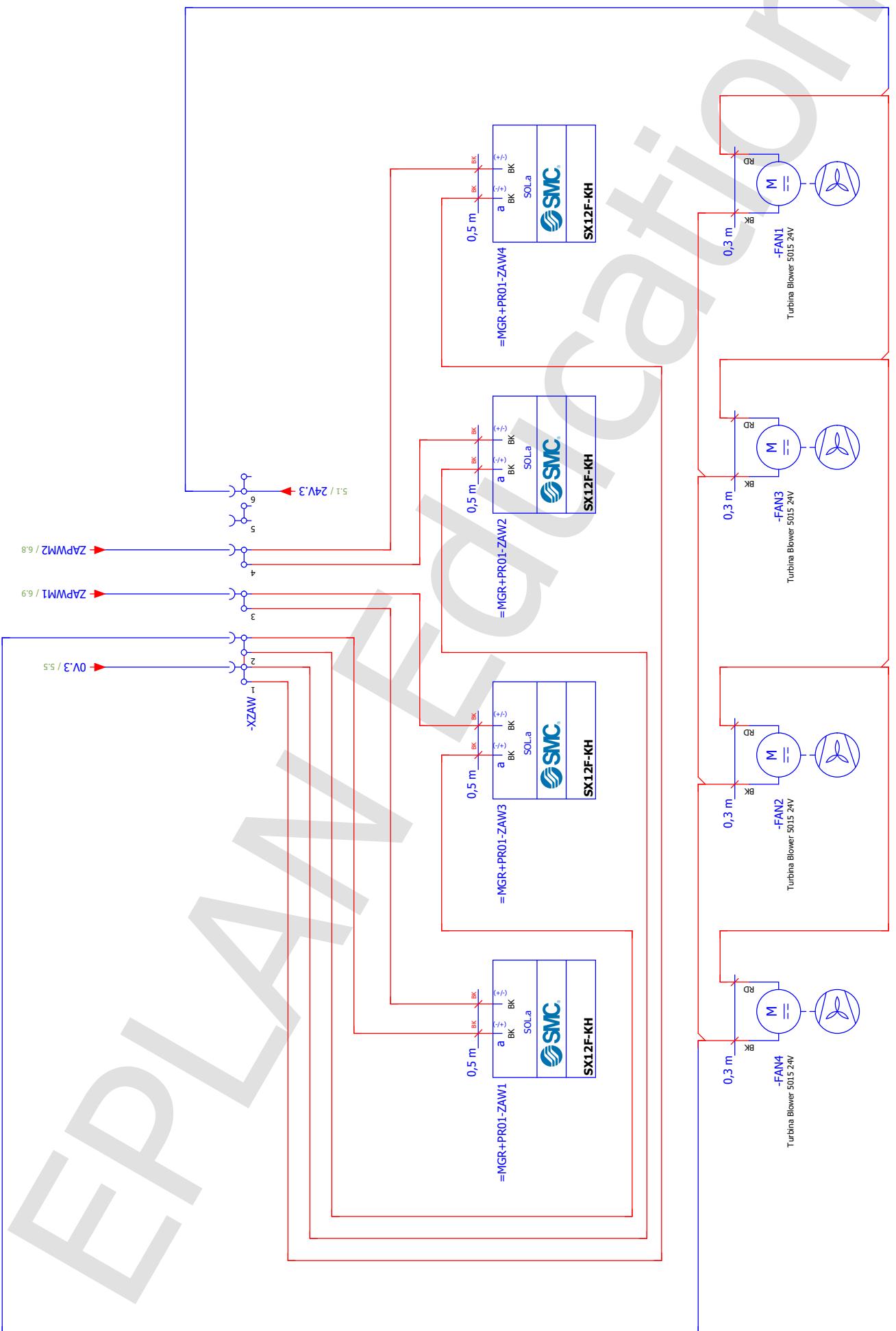
Page 20



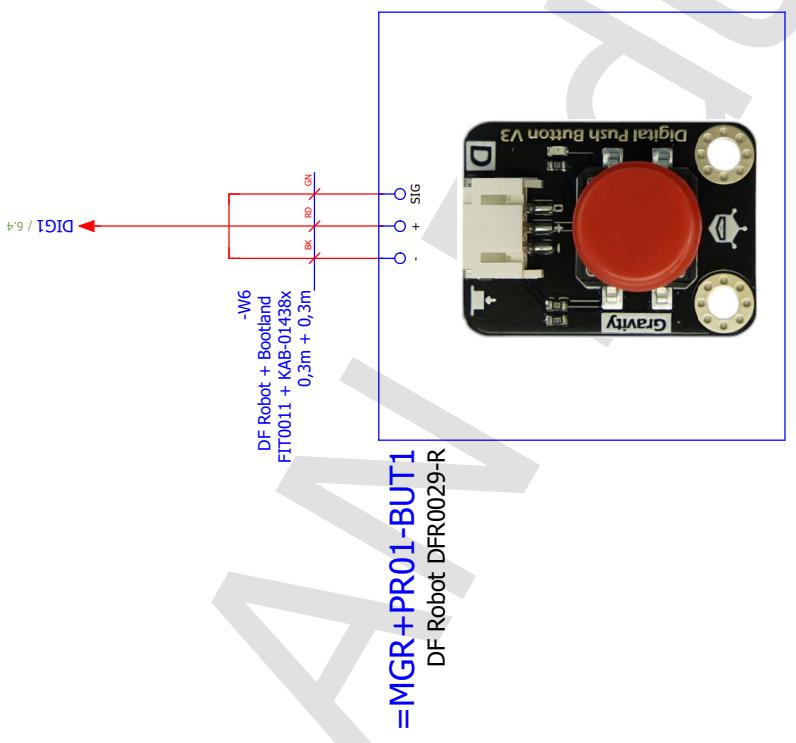
		Date	07.08.2025	Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Sekretariat: Sekretarzających
		Ed.	Paweł Mikołaj	
		Apr.		
Modification	Date	Name	Original	Replaced by



		Date	11.07.2025	Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Mechaniki i Sztukozajazdowych		
		Ed.	Paweł Mikołaj			
		Apr.				
Modification	Date	Name	Original	Enkoder		
					= MGR + Sk01	
						Page 12 / 20
						Page 8
						Page 9



Modification	Date	Name	Date	Ed.	Appl.	Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Sekcja Systemów Sterujących i Zaworów	Mechaniczny Technologiczny Sekcja Systemów Sterujących i Zaworów	Page
						= MGR + Sk01		Page 9 Page 13 / 20



Katedra RMT2 Wydział  
Mechaniczny Techniczny o architekturze otwartej i zaopatrzeniu  
Przycisk STOP

Sewonapad z mikrokontrolerem o architekturze otwartej i zaopatrzeniu  
Replaced by

Modification Date Name Original Replaced by  
Page 14 / 20

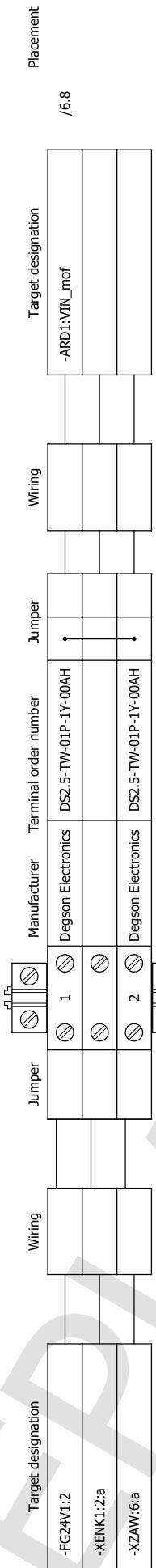
= MGR  
+ Sk01  
Page 10  
Page 11

## Terminal diagram

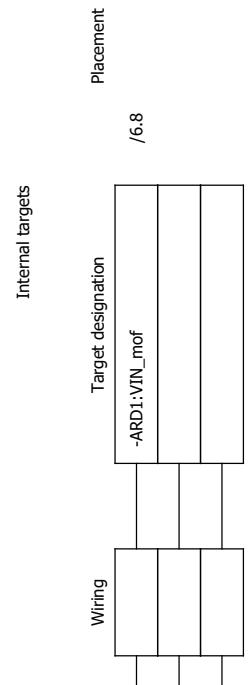
F13\_003

External targets  
Target designation  
-FG24V1:2  
-XENK12:a  
-XZAW:6:a

Strip  
=MGR+SK01-X24V1



Internal targets



Placement

/6.8

		Date	14.08.2025	Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Sewonaped z mikrokontrolerem o architekturze otwartej i zaopatrzeniem do projektowania i konstruowania skrzynie złączających	Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Sewonaped z mikrokontrolerem o architekturze otwartej i zaopatrzeniem do projektowania i konstruowania skrzynie złączających	= MGR + SK01
Modification	Date	Name	Original	Replaced by	Replaced by	Page 15 / 20
						Page 11

## Terminal diagram

F13\_003

External targets  
=MGR+SK01-XENK1

Target designation	Wiring	Jumper	Manufacturer	Terminal order number	Jumper	Wiring	Target designation	Placement
-XENK2:1:a			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-0DAH	-		-XM1:1:c	/5.5
				2	=		-X2AV1:1:c	/5.1
				3	=		-K0WN1:i-	/7.2
				4	=		-XENK2:2:b	/8.5
				5	=		-K0WN1:i+	/7.2
				6	=		-XENK2:3:b	/8.6
				7	=			
				8	=			
							-XP:2PE:a	/3.5

Internal targets

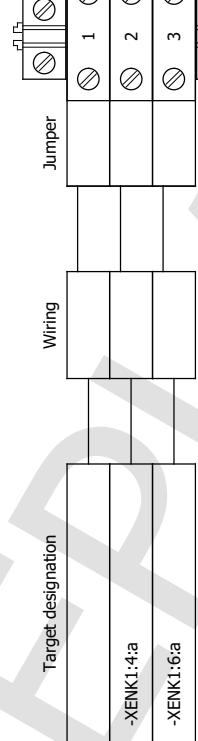
Target designation	Wiring	Jumper	Manufacturer	Terminal order number	Jumper	Wiring	Target designation	Placement
			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-0DAH	-		-XM1:1:c	/5.5
				1	=		-X2AV1:1:c	/5.1
				2	=		-K0WN1:i-	/7.2
				3	=		-XENK2:2:b	/8.5
				4	=		-K0WN1:i+	/7.2
				5	=		-XENK2:3:b	/8.6
				6	=			
				7	=			
				8	=			

Modification	Date	Name	Date	Ed.	14.08.2025	Pawel Mikolaj	Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Sewonaped z mikrokontrolerem o architekturze otwartej i załączonym do projektów edukacyjnych	Terminal diagram = MGR+SK01-XENK1	MGR + SK01
				Apr.		Original	Replaced by	Replacement of	Page 16 / 20

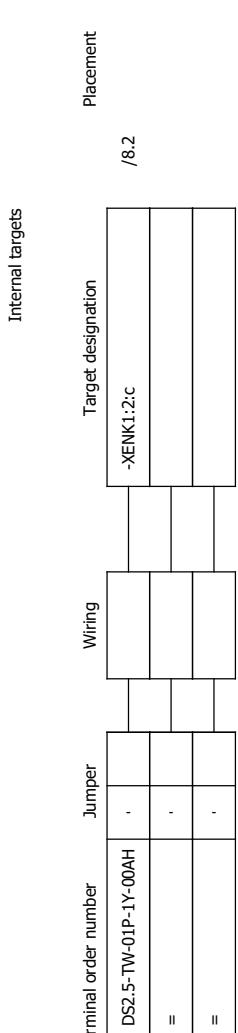
## Terminal diagram

F13\_003

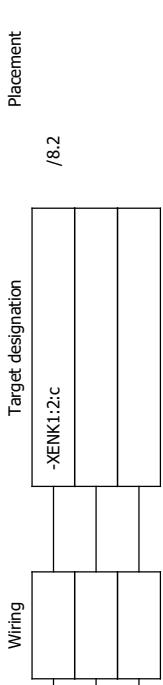
External targets  
Target designation  
Wiring  
Jumper  
Manufacturer  
Terminal order number  
DS2.5-TW-01P-1Y-0DAH  
Degson Electronics



Strip  
=MGR+SK01-XENK2



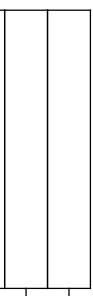
Internal targets



Placement

/8.2

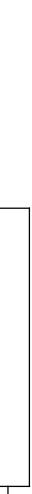
Target designation



Target designation

-XENK12:c

Wiring



Wiring

Jumper

1

=



1

2

=



2

3

=



3

Wiring

Jumper

DS2.5-TW-01P-1Y-0DAH

-



DS2.5-TW-01P-1Y-0DAH

Manufacturer

Degson Electronics

Terminal order number

DS2.5-TW-01P-1Y-0DAH

-

Target designation

-XENK12:c

Placement

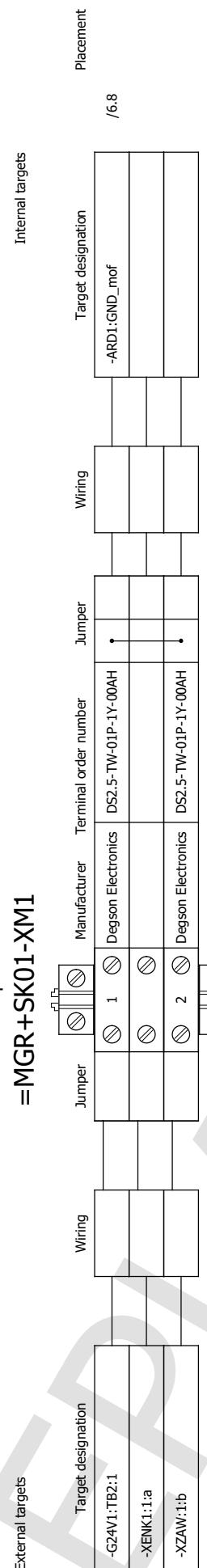
/8.2

		Date	14.08.2025	Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Sewonapad z mikrokontrolerem o architekturze otwartej i zaopatrzeniem w komponenty Sąsiadujące zajączymi	Terminal diagram = MGR+SK01-XENK2			
Modification	Date	Ed.	Paweł Mikulaj	Replaced by				
		Name	Original					
		Apr.		Replacement of				

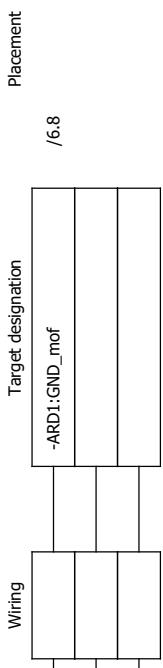
## Terminal diagram

F13\_003

Strip  
=MGR+SK01-XM1



Internal targets



Placement

/6.8

		Date	14.08.2025	Katedra RMT2 Wydział Mechaniczny Technologiczny Sekretarz techniczny Skierującą Sewonapad z mikrokontrolerem o architekturze otwartej i zaopatrzeniem Replaced by	MGR + Sk01
Modification	Date	Name	Original	Replaced by	
					Page 18 / 20



## Terminal diagram

F13\_003

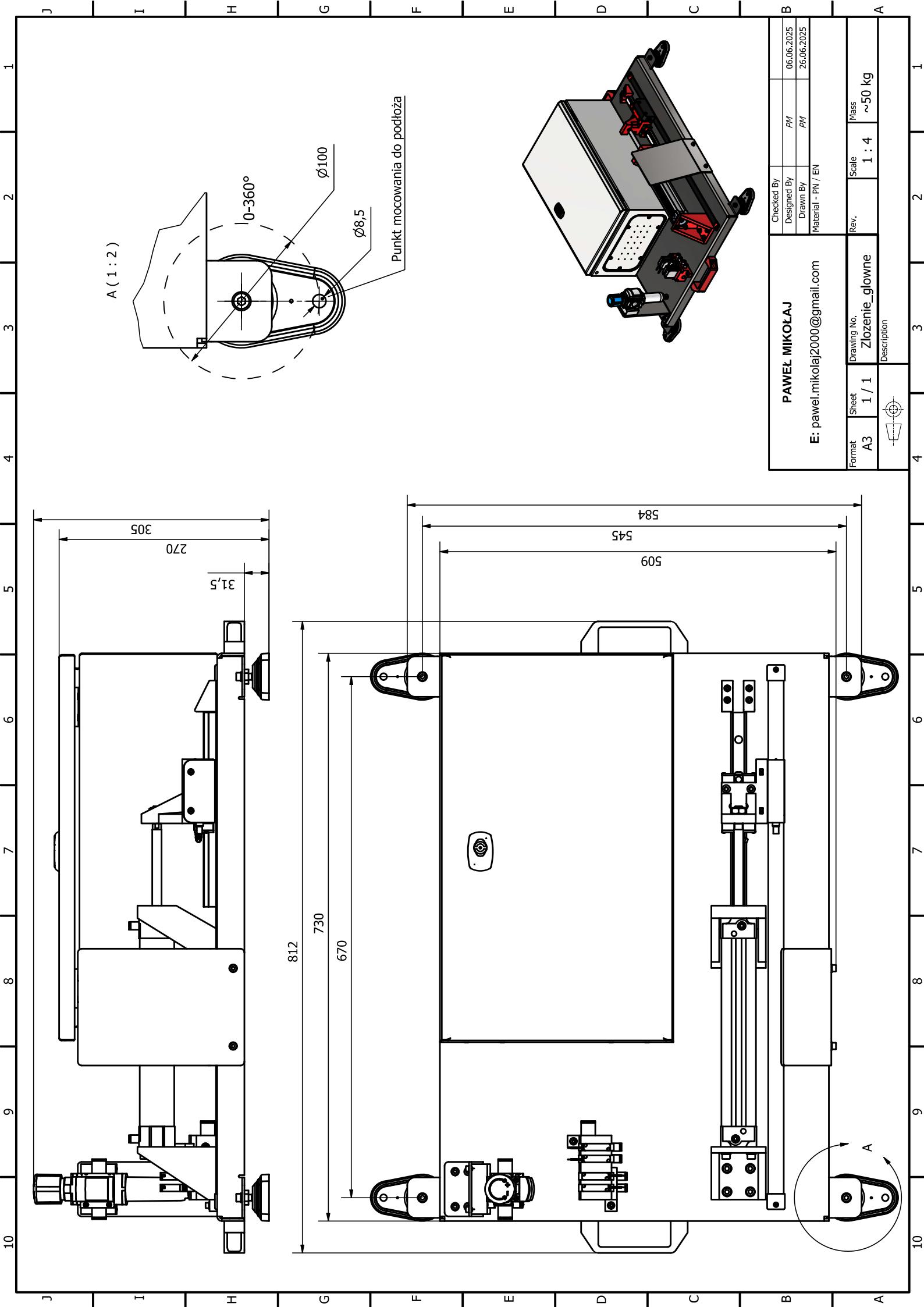
External targets  
Strip  
=MGR+SK01-XZAW

Target designation	Wiring	Jumper	Manufacturer	Terminal order number	Jumper	Wiring	Target designation	Placement
-XM1:2:b			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-00AH			+PR01-ZAW2:a:BK	/9.5
+PR01-ZAW4:a:BK								
-FAN4:BK			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-00AH			+PR01-ZAW1:a:BK	/9.2
+PR01-ZAW3:a:BK								
VOUT_1			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-00AH			+PR01-ZAW3:a:BK	/9.4
+PR01-ZAW1:a:BK								
-ARD1:VOUT_2			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-00AH			+PR01-ZAW4:a:BK	/9.7
+PR01-ZAW2:a:BK								
-FAN1:D			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-00AH			-X24V1:2:b	/5.1
					=			

Internal targets

Target designation	Wiring	Jumper	Manufacturer	Terminal order number	Jumper	Wiring	Target designation	Placement
-XM1:2:b			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-00AH			+PR01-ZAW2:a:BK	/9.5
+PR01-ZAW4:a:BK								
-FAN4:BK			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-00AH			+PR01-ZAW1:a:BK	/9.2
+PR01-ZAW3:a:BK								
VOUT_1			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-00AH			+PR01-ZAW3:a:BK	/9.4
+PR01-ZAW1:a:BK								
-ARD1:VOUT_2			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-00AH			+PR01-ZAW4:a:BK	/9.7
+PR01-ZAW2:a:BK								
-FAN1:D			Degson Electronics	DS2.5-TW-01P-1Y-00AH			-X24V1:2:b	/5.1
					=			

Internal targets





## **Załącznik 2. Instrukcja obsługi stanowiska.**





Politechnika  
Śląska

# Instrukcja obsługi stanowiska serwonapędu pneumatycznego z mikrokontrolerem o architekturze otwartej i zaworach szybko- przełączających



Paweł Mikołaj

Katedra Automatyzacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych  
Systemów Wytwarzania – RMT2  
Wydział Mechaniczny Technologiczny

GLIWICE 2025



## **Spis treści**

1. Opis stanowiska .....	4
2. Uruchomienie stanowiska.....	6
3. Obsługa stanowiska.....	8
4. Wyłącznie stanowiska .....	10

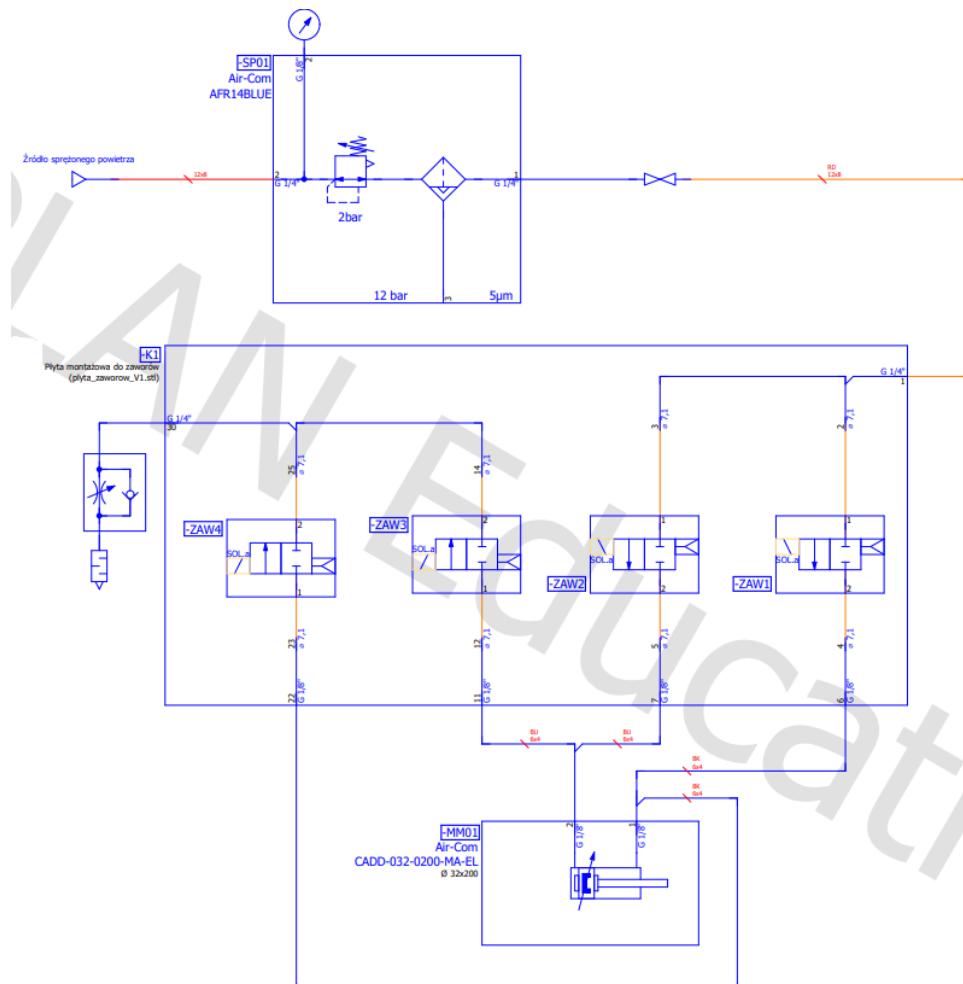
# 1. Opis stanowiska

Stanowisko zostało zbudowane w celach dydaktycznych, głównym celem było zbadanie serwonapędu pneumatycznego opartego na zaworach o krótkim czasie przełączania oraz sprawdzenie możliwości integracji elementu hobbystycznego (zestaw z mikrokontrolerem - Arduino UNO) wraz z elementami przemysłowymi w postaci zaworów szybko-przełączających oraz enkodera liniowego.

Dokumentacje stanowiska wraz z plikami konfiguracyjnymi oraz pracą magisterską (ograniczoną, ze względu na ćwiczenia laboratoryjne) napisaną na jego podstawie można znaleźć pod linkiem:

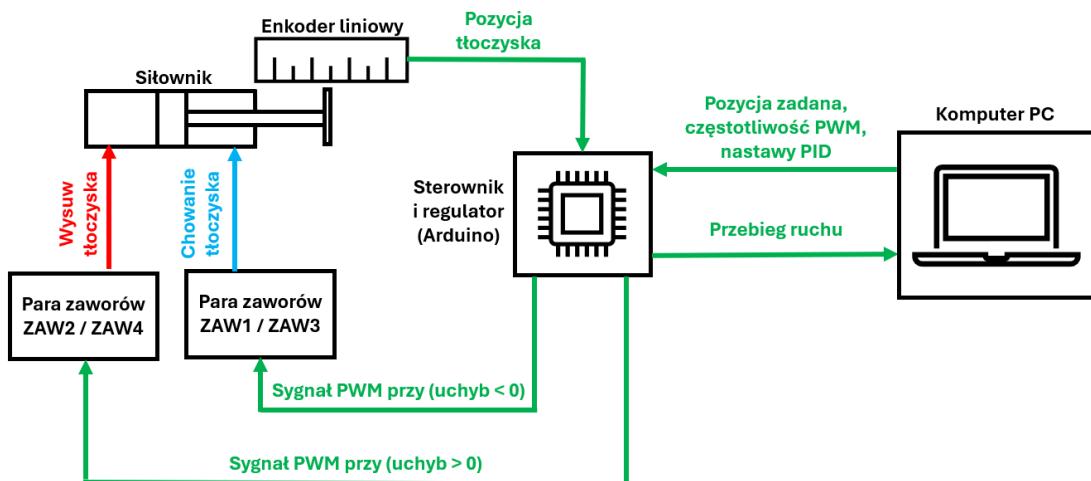
[https://github.com/MikolajPawel/PneumaticServoDrive\\_Arduino\\_byPM](https://github.com/MikolajPawel/PneumaticServoDrive_Arduino_byPM)

Stanowisko pełni funkcję serwonapędu w następującym (rys. 1) układzie pneumatycznym, zestaw z mikrokontrolerem Arduino UNO pełni funkcję sterownika oraz regulatora PID serwonapędu.



Rys. 1. Układ pneumatyczny stanowiska.

Strategia sterowania serwonapędem oraz odbioru danych odbywa się według rys. 2.



Rys. 2. Strategia sterowania i komunikacji serwonapędu.

Sygnal PWM sterujący zaworami posiada ograniczenie procentu wypełnienia stanem wysokim ze względu na wytrzymałość termiczną cewek zaworów. Ograniczenie to jest różne w zależności od wybranej częstotliwości sygnału.

Ze względu na niestabilność układu pneumatycznego spowodowaną nieprawidłową płaskością powierzchni styku zaworów oraz nieprawidłowym dociśnięciem zaworów do tej powierzchni zakres operacyjny serwonapędu ograniczony został programowo do **30-117 mm**.

**UWAGA: Stanowisko należy obsługiwać tylko przez personel, który został zapoznany z niniejszą instrukcją obsługi.**

**UWAGA: Stanowisko posiada szafę sterowniczą podpiętą pod źródło napięcia 230VAC, zabrania się otwierania szafy sterowniczej, podczas kiedy urządzenie jest podpięte do źródła napięcia. Zabrania się również uruchamiania stanowiska, jeżeli stan szafy sterowniczej nie jest zgodny z dokumentacją serwisową.**

**UWAGA: Podczas pracy stanowiska zabrania się kontaktu z tłoczykiem silownika oraz elementami współpracującymi. Nie należy również zbliżać się do tych elementów, jeśli użytkownik posiada niezabezpieczone części ubioru lub ciała (np. luźne rękawy, włosy, biżuterię), które mogą zostać wciągnięte lub uwięzione przez ruchome części układu.**

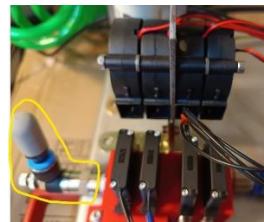
**UWAGA: Stanowisko przeznaczone jest do celów dydaktycznych. Należy jednak pamiętać, że wartości nastaw regulatora PID oraz dokładność pozycjonowania muszą być dobrane rozważnie, z uwzględnieniem bezpiecznej pracy układu.**

## 2. Uruchomienie stanowiska

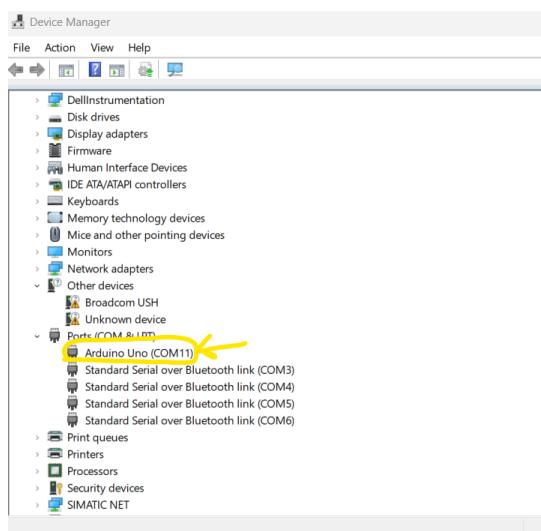
Do obsługi stanowiska potrzebny jest komputer PC z systemem **Windows**, na którym zainstalowany jest program **CoolTerm** (<https://coolterm.en.lo4d.com/download>) wraz z plikiem konfiguracyjnym **PawelMikolajMGR.CoolTermSettings**. Aby uruchomić stanowisko należy postępować według poniżej wypisanych kroków:

1. Należy upewnić się, że stanowisko jest podpięte pod źródło zasilania sprężonym powietrzem, a filtroreduktor (-SP01) ustawiony jest na wartość **ok. 2,5 bara przy zamkniętym zaworze kulowym** umieszczonym po wyjściowej stronie filtroreduktora.
2. Należy upewnić się, że szafa sterownicza stanowiska (+SK01) jest zamknięta i stanowisko jest podłączone pod źródło zasilania 230VAC, **przy czym nie należy jeszcze włączać zasilania szafy sterowniczej!**
3. Należy upewnić się, że przewód z końcówką USB-B jest odłączony od komputera PC, **nie należy jeszcze go podłączać!**
4. Otworzyć zawór kulowy stanowiska włączając tym samym **zasilanie sprężonego powietrza**. **UWAGA:** wyciek sprężonego powietrza z okolic zaworu dławiąco-zwrotnego jest zjawiskiem typowym dla omawianego stanowiska, **nie należy dokonywać żadnych kroków w celu usunięcia wycieku**.
5. Upewnić się, że wskazanie manometru filtroreduktora (-SP01) znajduje się w zakresie **od 1,8 do 2,2 bar**, **w razie potrzeby zmienić ustawienia reduktora**.
6. Jeżeli układ pneumatyczny jest niestabilny (tłoczysko siłownika wykonało przejazd na początek *0 mm* lub koniec *177 mm* zakresu pomiarowego **lub tłoczysko siłownika stawia spory opór przy próbie ręcznego przesunięcia**) należy dokonać regulacji przepływu powietrza przez zawór dławiąco-zwrotny umieszczony na płycie montażowej (-K1) do której dołączone są zawory (-ZAW). Proces regulacji odbywa się poprzez **próbe wypożycjonowania ręcznego tłocyska siłownika oraz odpowiednie ustawienie zaworu dławiąco-zwrotnego** (rys. 3) w taki sposób, aby tłoczysko siłownika utrzymało swoją pozycję **przy włączonym zasilaniu sprężonym powietrzem**.
7. **Po weryfikacji stabilności układu pneumatycznego** należy przystąpić do **włączenia zasilania szafy sterowniczej stanowiska** i upewnić się czy wszystkie turbiny wentylatorowe umieszczone przy zaworach (-ZAW) są aktywne.
8. Następnie należy podłączyć przewód USB-B do wolnego wejścia w komputerze PC oraz zweryfikować numer portu, do którego został podłączony serwonapęd używając w tym celu menedżera urządzeń (rys. 4).
9. Należy uruchomić plik konfiguracyjny **PawelMikolajMGR.CoolTermSettings** i wybrać odpowiedni port, do którego podłączony jest serwonapęd w ustawieniach pliku konfiguracyjnego (rys. 5) oraz połączyć się z sterownikiem serwonapędu .
10. Serwonapęd jest gotowy do użytku.

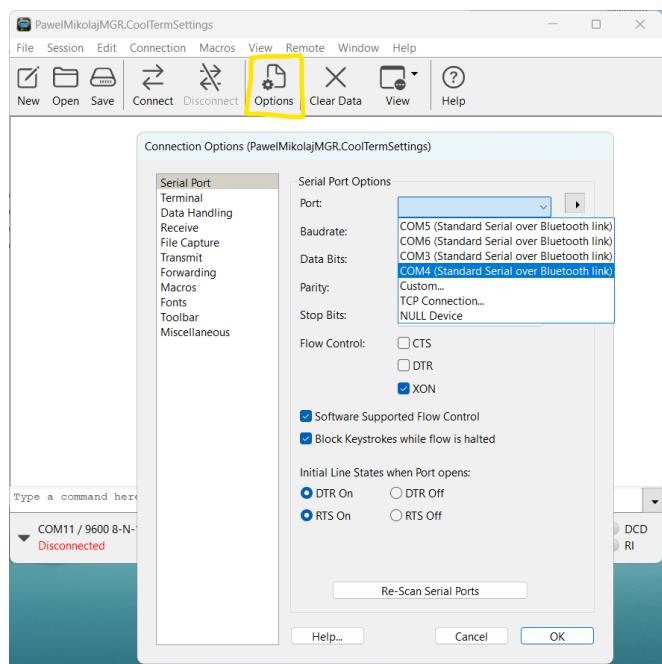
**UWAGA: Pominięcie kroków lub niezastosowanie odpowiedniej kolejności procedury uruchomienia stanowiska może spowodować uszkodzenie zaworów serwonapędu!!!**



Rys. 3. Zawór dławiąco-zwrotny z tłumikiem płyty montażowej zaworów.



Rys. 4. Rozpoznanie portu, do którego podłączony jest sterownik serwonapędu.



Rys. 5. Ustawienia pliku konfiguracyjnego - wybranie portu.

### 3. Obsługa stanowiska

Stanowisko obsługiwane jest za pomocą komend wysyłanych za pośrednictwem komunikacji transmisji szeregowej (ang. *Serial*). W tym celu do odbioru danych oraz sterowania serwonapędem zaleca się korzystanie z programu *CoolTerm*, dostępne dla użytkownika komendy wymieniono w tab. 1 wraz z domyślnymi nastawami. Warto nadmienić, iż stanowisko posiada również jeden fizyczny przycisk **STOP**, który wykonuje zadanie komendy „stop”.

Tab. 1. Lista komend serwonapędu.

Komenda	Funkcja	Dozwolone wartości	Domyślna wartość
p:	Nastawa członu proporcjonalnego software'owego regulatora	-	0,5
i:	Nastawa członu całkującego software'owego regulatora	-	0,1
d:	Nastawa członu różniczkującego software'owego regulatora	-	0,01
FRQ:	Nastawa częstotliwości sygnału PWM	10; 20; 50	20
setpoint:	Nastawa pozycji zadanej tłocyska siłownika	30 - 117	80
stop	Zatrzymanie pracy serwonapędu oraz odczytu przebiegu ruchu	-	-
default	Zatrzymanie pracy serwonapędu oraz ustawienie domyślnych wartości nastaw P, I, D, FRQ	-	-
sleep	Ustawienie domyślnych wartości nastaw P, I, D, FRQ oraz przejazd do pozycji domyślnej	-	-
start	Kontynuacja pracy serwonapędu oraz odczytu przebiegu ruchu	-	-
acc:	Nastawa dokładności pozycjonowania serwonapędu	-	1

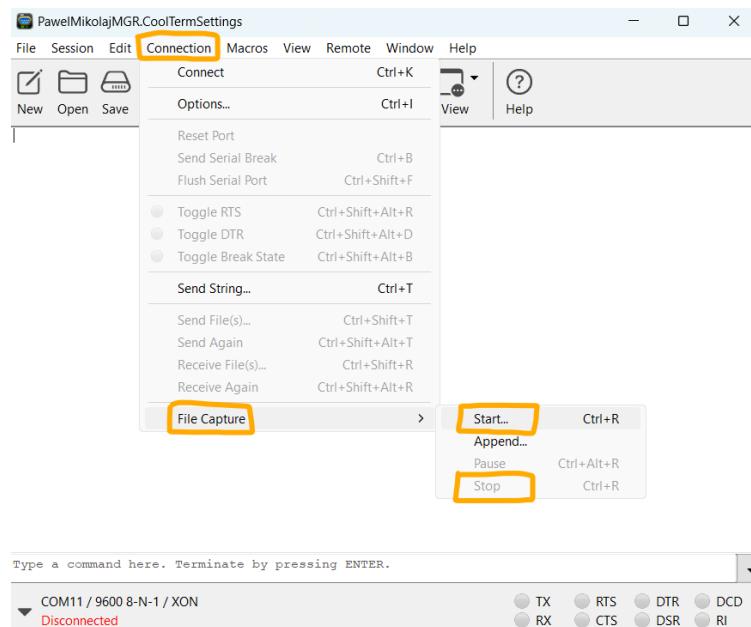
Funkcjonalność serwonapędu określona jest na ciągła kontrolę pozycji, co oznacza, że w każdym momencie pracy pozycja tłocyska siłownika jest monitorowana i w przypadku, kiedy odbiega ona o wartość ustawionej dokładności serwonapędu od pozycji zadanej serwonapęd wykona czynności zapewniające ponowne osiągnięcie zadanej wartości.

Obsługa serwonapędu (nadawanie komend) odbywa się poprzez wysłanie danej komendy wraz z ustawianą wartością (np. „acc:1.5”). Należy pamiętać, aby nie używać spacji po wpisaniu komendy w terminalu narzędzia do obsługi komunikacji z serwonapędem. Wartości zmiennoprzecinkowe w module Arduino UNO mogą pobrać wartości do dwóch miejsc po przecinku! Wartości zmiennoprzecinkowe należy zapisywać w formacie stanowiącym kropkę jako oddzielenie wartości całkowej od wartości zmiennoprzecinkowej!

Przykładowy pomiar przebiegu ruchu wraz z zmianą wartości nastaw serwonapędu odbywa się według następującej procedury:

1. Należy wysłać komendę „stop” lub użyć przycisku **STOP**.
2. Należy ustawić parametry software'owego regulatora PID, dokładności pozycjonowania oraz częstotliwości sygnału (**jeżeli poprzednio ustawione wartości nie są pożądane**).
3. Należy ustawić **pozycję zadaną**.
4. Należy włączyć zapis transmisji szeregowej do pliku .txt (**rys. 6**) – jeżeli nie jest on już włączony lub pożądany jest inny plik dla nowej konfiguracji nastaw serwonapędu.
5. Należy wysłać komendę „start”.
6. Po zatrzymaniu tłocyska siłownika (wpozycjonowaniu) lub **ciągłym przeregulowaniu** należy wysłać komendę „stop” lub użyć przycisku **STOP**.
7. Należy zakończyć zapis transmisji szeregowej (**opcjonalne**).
8. Należy powtórzyć kroki 1-7 w celu wykonania kolejnego pomiaru.

**UWAGA:** W przypadku, kiedy układ pneumatyczny utracił stabilność (**tłocysko siłownika wykonało przejazd na początek 0 mm lub koniec 177 mm zakresu pomiarowego**) należy niezwłocznie wysłać komendę „stop”, zaniechanie tej czynności **może spowodować uszkodzenie zaworów serwonapędu!!!**



Rys. 6. Rozpoczęcie i zatrzymanie zapisu transmisji szeregowej do pliku .txt

**UWAGA:** Uzyskany za pomocą transmisji szeregowej plik .txt posiada następującą strukturę: **(czas);(pozycja aktualna);(pozycja zadana);(uchyb)**

## 4. Wyłącznie stanowiska

Aby wyłączyć stanowisko należy:

1. Jeżeli układ pneumatyczny nie utracił stabilności – należy wysłać komendę „sleep”.
2. Wysłać komendę „stop” lub użyć przycisku **STOP**.
3. Należy wyłączyć transmisję szeregową  Disconnect oraz odłączyć przewód z końcówką USB-B od komputera PC.
4. Należy wyłączyć zasilanie szafy sterowniczej stanowiska.
5. Należy zamknąć zawór kulowy umieszczony po wyjściowej stronie filtreduktora (-SP01), pozabawiając tym samym stanowiska zasilania sprężonym powietrzem.
6. Stanowisko jest wyłączone z pracy.

**UWAGA: Pominięcie kroków lub niezastosowanie odpowiedniej kolejności procedury wyłączenia stanowiska może spowodować uszkodzenie zaworów serwonapędu!!!**

### **Załącznik 3. Instrukcja ćwiczenia laboratoryjnego.**





Politechnika  
Śląska

**Badanie wpływu nastaw software'owego  
regulatora PID oraz częstotliwości sygnału PWM  
na serwonapęd pneumatyczny  
z mikrokontrolerem o architekturze otwartej oraz  
zaworami o krótkim czasie przełączania**



**Paweł Mikołaj**

**Katedra Automatyzacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych  
Systemów Wytwarzania – RMT2**  
**Wydział Mechaniczny Technologiczny**

**GLIWICE 2025**



# 1. Ćwiczenie laboratoryjne

Ćwiczenie należy przeprowadzić na stanowisku dydaktycznym serwonapędu pneumatycznego z mikrokontrolerem o architekturze otwartej oraz zaworach o krótkim czasie przełączania. W tym celu w pierwszej kolejności należy zapoznać się z instrukcją obsługi stanowiska.

Po zapoznaniu się z instrukcją obsługi należy uruchomić stanowisko przy użyciu procedury włączania, a następnie wykonać testowy przejazd na pozycje 40 mm. Jeżeli nie stwierdzono przeciwskaźników do dalszej pracy stanowiska (np. zupełnie niestabilny układ pneumatyczny lub przykładowo gwałtowny wzrost temperatury elektrozaworów) należy użyć komendy „sleep”, po czym zatrzymać pracę serwonapędu (przycisk *STOP*). Następnie należy przejść do wykonania ćwiczenia laboratoryjnego.

## W ramach ćwiczenia należy:

1. Zarejestrować dane przebiegów ruchu serwonapędu pneumatycznego przy różnych nastawach software'owego regulatora PID – zaleca się tutaj wykorzystanie tab. 1.
2. Zarejestrować dane przebiegów ruchu serwonapędu pneumatycznego przy różnych nastawach częstotliwości sygnału PWM – zaleca się tutaj wykorzystanie tab. 1.
3. Opracować wyniki badań – należy w szczególności przedstawić w sprawozdaniu uzyskane przebiegi ruchu w formie wykresów pozycji zadanej, pozycji aktualnej oraz uchybu w funkcji czasu – zaleca się tutaj wykorzystanie informacji z rozdz. 2.
4. Należy dokonać analizy uzyskanych wyników w celu zbadania wpływu poszczególnych nastaw software'owego regulatora PID na zachowanie serwonapędu.
5. Należy dokonać analizy wyników w celu zbadania wpływu częstotliwości sygnału PWM sterującego elektrozaworami na zachowanie serwonapędu.
6. Należy opracować edytorsko sprawozdanie z ćwiczenia.

Rejestracja przebiegów ruchu serwonapędu może odbywać się według schematu umieszczonego w instrukcji obsługi stanowiska, z tym, że zaleca się zapisanie 3 przejazdów (np. 80 → 40; 40 → 130; 130 → 80), w jednym pliku .txt dla każdego pomiaru (dla jednego zbioru nastaw).

Tab. 1. Zalecane wartości nastaw.

Lp. pomiaru	Nastawa członu P	Nastawa członu I	Nastawa członu D	Częstotliwość sygnału PWM [Hz]
<b>1</b>	0.5	0.1	0.01	20
<b>2</b>	1.0	0.1	0.01	20
<b>3</b>	0.1	0.1	0.01	20
<b>4</b>	0.5	0.2	0.01	20
<b>5</b>	0.5	0.01	0.01	20
<b>6</b>	0.5	0.1	0.05	20
<b>7</b>	0.5	0.1	0.1	20
<b>8</b>	0.5	0.1	0.01	10
<b>9</b>	0.5	0.1	0.01	50

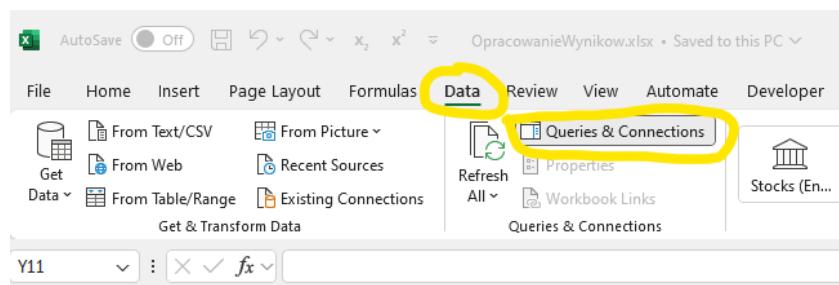
## 2. Opracowanie wyników

Uzyskane w pliku .txt wyniki należy przedstawić w formie wykresów ukazujących przebieg ruchu serwonapędu. W tym celu zaleca się skorzystanie z gotowego pliku .xlsx, który można znaleźć pod linkiem:

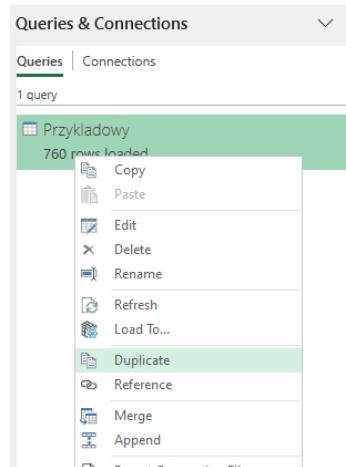
[https://github.com/MikolajPawel/PneumaticServoDrive\\_Arduino\\_byPM](https://github.com/MikolajPawel/PneumaticServoDrive_Arduino_byPM)

Aby skorzystać z gotowego pliku .xlsx w celu opracowania wyników należy:

1. Z plików .txt usunąć wiersze komend takich jak: „start”, „stop”, „Set setpoint to 130 mm” itp.
2. Przejść do pliku .xlsx oraz włączyć widoczność listy kwerend (rys. 1).
3. Zduplikować istniejącą kwerendę „Przykładowy” (rys. 2) po czym zmienić nazwę zduplikowanej kwerendy zgodnie z interpretowanym plikiem .txt oraz otworzyć ją.
4. Zmienić ścieżkę źródła w zduplikowanej kwerendzie (rys. 3) zgodnie z ścieżką odwołującą do interpretowanego pliku .txt
5. W zależności od ustawionego separatora w programie MS Excel należy zostawić lub usunąć konwersję z kropki na przecinek (rys. 4).
6. Zamknąć i załadować nowo powstałą kwerendę (rys. 5) – ta operacja powinna skutkować nowo powstałym arkuszem o nazwie kwerendy wraz z umieszczoną w nim tabelą.
7. Skopiować wykres z arkusza „Przykładowy” do nowo powstałego arkusza oraz zmienić dane wykresu na te z nowo wygenerowanej tabeli, po czym odpowiednio skonfigurować zakresy osi wykresu (rys. 6).
8. Wszystkie kroki należy powtórzyć dla każdego uzyskanego podczas ćwiczenia pliku .txt osobno.



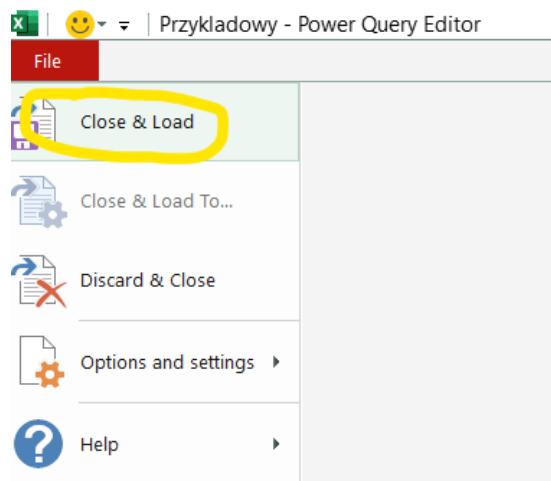
Rys. 1. Funkcja widoczności kwerend i połączeń - MS Excel.



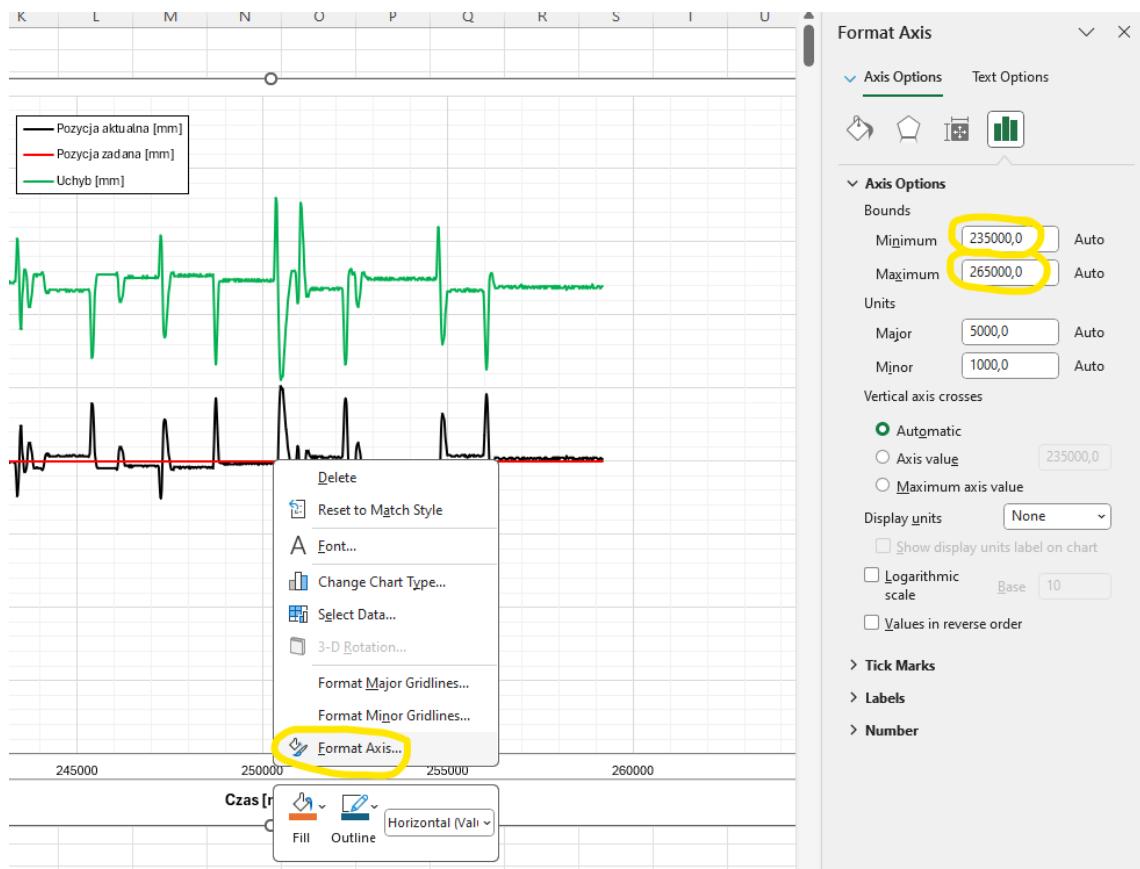
Rys. 2. Duplikacja kwerendy - MS Excel.

Rys. 3. Zmiana ścieżki źródła w kwerendzie - MS Excel.

Rys. 4. Dezaktywacja konwersji z kropki na przecinek.



Rys. 5. Zamknięcie edycji kwerendy.



Rys. 6. Edycja osi wykresu - MS Excel.



**Załącznik 4. Wzorcowe sprawozdanie z ćwiczenia  
laboratoryjnego.**

