

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

KATEDRA AUTOMATYKI I ROBOTYKI

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

TEMAT: Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku
na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

WYKONAWCA: Jakub Bączyk
Imię i nazwisko

PODPIS: Jakub Bączyk

PROMOTOR: dr inż. Andrzej Koszewnik
Imię i nazwisko

PODPIS: Andrzej Koszewnik

BIAŁYSTOK 2017 ROK

Karta dyplomowa

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA Wydział Mechaniczny Katedra Automatyki i Robotyki	Studia stacjonarne <small>stacjonarne/niestacjonarne</small> I stopnia <small>studia I stopnia/ studia II stopnia</small>	Nr albumu studenta 93076
		Rok akademicki 2016/2017
		Kierunek studiów Automatyka i robotyka Specjalność Automatyzacja i informatyzacja procesów

Jakub Bączyk
 Imię i nazwisko studenta

TEMAT PRACY DYPLOMOWEJ:

**Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku
 na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC**

Zakres pracy:

1. Opis stanowiska laboratoryjnego Festo MPA
2. Projektowanie regulatora PID na sterownik PLC
3. Implementacja prawa sterowania na sterownik PLC
4. Badania testowe
5. Podsumowanie i wnioski

Słowa kluczowe (max 5): Festo MPA, regulator PID, sterownik PLC, sterowanie ciśnieniem

Andrzej Koszewnik

dr inż. Andrzej Koszewnik

Imię i nazwisko, stopień/ tytuł promotora – podpis

KIEROWNIK
 KATEDRY AUTOMATYKI I ROBOTYKI
Z. Cosiowski
 prof. dr hab. inż. Zdzisław Cosiowski
 profesor zwyczajny

Imię i nazwisko kierownika katedry - podpis

Andrzej Koszewnik
 15.06.2016

Data wydania tematu pracy dyplomowej
 - podpis promotora

Regulaminowy termin złożenia pracy dyplomowej

Data złożenia pracy dyplomowej
 - potwierdzenie dziekanatu

(5,0) bardzo dobry
 Ocena promotora

[Podpis]
 Podpis promotora

Imię i nazwisko, stopień/ tytuł recenzenta

Ocena recenzenta

Podpis recenzenta

Streszczenie

Głównym celem postawionym w pracy było wykorzystanie sterownika PLC do sterowania ciśnieniem powietrza w zbiorniku na stanowisku Festo MPA. Pierwszym etapem pracy było poznanie zasady działania stanowiska i jego elementów w układzie regulacji przy użyciu arkuszy danych i katalogów producentów. Kolejnym krokiem było zamodelowanie układu w oparciu o wyznaczone eksperymentalnie charakterystyki statyczne i dynamiczne odpowiednich elementów automatyki w układzie sterowania oraz w oparciu o literaturę. Identyfikacja obiektu sterowania była niezbędna w celu wykonania prawidłowej symulacji działania układu sterowania. Dobrane nastawy regulatora w procesie analizy komputerowej pozwoliły na zaimplementowanie opracowanego prawa sterowania na sterownik PLC. Badania testowe przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym, pozwoliły zweryfikować dobrane parametry regulatora. Dodatkowo, nastawy dobrane metodą eksperymentalną na stanowisku za pośrednictwem złącza Easy Port, zostały sprawdzone na sterowniku PLC. Przeprowadzone testy umożliwiły porównanie parametrów symulacyjnych i eksperymentalnych oraz potwierdzenie autentyczności zaprojektowanego regulatora PID na prawdziwym stanowisku.

Thesis title: Designing of controlling system of pressure in the tank on Festo MPA workstation by using PLC

Keywords: Festo MPA, PID controller, PLC, controlling of pressure

Abstract

The main purpose of this thesis was using PLC during controlling of continuous process on example of controlling of pressure signal on Festo MPA workstation. First step was find out how work workstation and its elements in closed-loop controlling system using data sheets and catalogues of producers. The next step was modeling of controlling system based on static and dynamic characteristics and literature. Identification was necessary to design computer simulation and find proper parameters of PID controller. Then, chosen parameters have been implemented on PLC. Researches have been carried to check out if parameters fulfill required indicators of dynamic quality. In addition, parameters chosen in experimental way on workstation by interface Easy Port were also checked on PLC. Tests allowed to compare parameters of simulation and researches and to confirm authenticity of designed PID controller on real workstation. This issue was helpful to define differences in the operation between the controlling systems and computer simulation.

Jakub Bączyk
imię i nazwisko studenta

93076

nr albumu

AiR, 1st, studia stacjonarne

kierunek i forma studiów

dr inż. Andrzej Kaszaniuk

promotor pracy dyplomowej

Białystok, dnia 26.01.2017r.

OŚWIADCZENIE

Przedkładając w roku akademickim 2016/2017. Promotorowi dr inż. Andrzej Kaszaniuk pracę dyplomową pt.: Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na domowiskim Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC, dalej zwaną pracą dyplomową,

oświadczam, że:

- 1) praca dyplomowa stanowi wynik samodzielnej pracy twórczej,
- 2) wykorzystując w pracy dyplomowej materiały źródłowe, w tym w szczególności: monografie, artykuły naukowe, zestawienia zawierające wyniki badań (opublikowane, jak i nieopublikowane), materiały ze stron internetowych, w przypisach wskazywałem/am ich autora, tytuł, miejsce i rok publikacji oraz stronę, z której pochodzą powoływane fragmenty, ponadto w pracy dyplomowej zamieściłem/am bibliografię,
- 3) praca dyplomowa nie zawiera żadnych danych, informacji i materiałów, których publikacja nie jest prawnie dozwolona,
- 4) praca dyplomowa dotychczas nie stanowiła podstawy nadania tytułu zawodowego, stopnia naukowego, tytułu naukowego oraz uzyskania innych kwalifikacji,
- 5) treść pracy dyplomowej przekazanej do dziekanatu Wydziału Mechanicznego jest jednakowa w wersji drukowanej oraz w formie elektronicznej,
- 6) jestem świadomy/a, że naruszenie praw autorskich podlega odpowiedzialności na podstawie przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t. j.: Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.), jednocześnie na podstawie przepisów ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t. j.: Dz. U. z 2012 r. poz. 572 z późn. zm.) stanowi przesłankę wszczęcia postępowania dyscyplinarnego oraz stwierdzenia nieważności postępowania w sprawie nadania tytułu zawodowego,
- 7) udzielam Politechnice Białostockiej nieodpłatnie licencji na korzystanie z pracy dyplomowej w celu realizacji przeprowadzenia procedury antyplagiatowej przyjętej w Uczelni oraz na przekazanie pracy do Ogólnopolskiego Repozytorium Prac Dyplomowych, jak również udostępnianie i przechowywanie jej w Bibliotece Politechniki Białostockiej przez okres 50 lat od obrony pracy dyplomowej.

Jakub Bączyk
czytelny podpis studenta

Na podstawie art. 24 ust. 1 ustawy z dnia 29 sierpnia 1997 roku o ochronie danych osobowych (j.t. z 2014 r., poz. 1182 z późn. zm.) informuję, że administratorem danych jest Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok. Dane będą przetwarzane w celach realizacji procedury antyplagiatowej przyjętej w Politechnice Białostockiej i nie będą udostępniane odbiorcom danych w rozumieniu art. 7 pkt 6 ustawy o ochronie danych osobowych. Osobie, której dane dotyczą, przysługuje prawo dostępu do treści swoich danych oraz ich poprawiania. Podanie danych jest obowiązkowe (art. 167b ustawy z dnia 27 lipca 2005 roku Prawo o szkolnictwie wyższym j.t. Dz.U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.).

SPIS TREŚCI

WYKAZ OZNACZEŃ	6
WSTĘP	7
CEL I ZAKRES	8
1. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO FESTO MPA.....	9
1.1. STANOWISKA FESTO MPA ORAZ JEGO PODSTAWOWE KOMPONENTY	10
1.2. CHARAKTERYSTYKA I PARAMETRY URZĄDZEŃ	12
1.2.1. Charakterystyka zbiornika ciśnieniowego.....	13
1.2.2. Charakterystyka pompy	14
1.2.3. Charakterystyka czujnika ciśnienia	14
1.2.4. Charakterystyka zaworu proporcjonalnego	15
1.2.5. Charakterystyka systemu rurociągu	16
1.3. SCHEMAT UKŁADU REGULACJI CIŚNIENIA	17
1.4. PRZEPROWADZANIE POMIARÓW NA STANOWISKU	20
1.4.1. Złącze do pomiarów- Easy Port	20
1.4.2. Oprogramowanie stanowiska Festo MPA- Fluid Lab.....	21
2. MODELOWANIE ELEMENTÓW AUTOMATYKI W UKŁADZIE STEROWANIA.....	26
2.1. POMIAR CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH I DYNAMICZNYCH ELEMENTÓW AUTOMATYKI	26
2.2. WYZNACZENIE MODELU MATEMATYCZNEGO UKŁADU STEROWANIA.....	30
2.2.1. Założenia przyjęte podczas projektowania modelu matematycznego	30
2.2.2. Wyznaczenie modelu zbiornika ciśnieniowego.....	31
2.2.3. Wyznaczenie modelu pompy odśrodkowej.....	32
2.2.4. Wyznaczenie modelu czujnika ciśnienia	34
2.2.5. Wyznaczenie modelu przewodów przepływowych.....	35
2.3. BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU OTWARTEGO	41
2.3.1. Utworzenie modelu układu w programie Simulink	41
2.3.2. Analiza układu otwartego.....	42
3. DOBÓR REGULATORA PID	44

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

3.1.	BUDOWA REGULATORA PID	44
3.2.	DOBÓR NASTAW REGULATORA PID METODĄ <i>PIDTUNE</i>	45
3.2.1.	<i>Przeprowadzenie symulacji z wykorzystaniem dobranych nastaw</i>	47
3.3.	WYZNACZENIE NASTAW REGULATORA PID METODĄ ZIEGLERA-NICHOLSA	49
4.	IMPLEMENTACJA PRAWA STEROWANIA NA STEROWNIK PLC.....	53
4.1.	STEROWNIK SIMATIC S7-300 MODEL: CPU 315F-2PN/DP	53
4.2.	ŚRODOWISKO PROGRAMOWE I KONFIGURACJA STEROWNIKA.....	55
4.3.	OMÓWIENIE PROGRAMU STERUJĄCEGO NA STEROWNIKU PLC.....	56
4.3.1.	<i>Omówienie działania bloku OB1</i>	57
4.3.2.	<i>Omówienie działania bloku OB35</i>	58
4.4.	URUCHOMIENIE I OBSŁUGA APLIKACJI WIZUALIZACYJNEJ W ŚRODOWISKU WINCC.....	63
4.4.1.	<i>Okno główne aplikacji</i>	63
4.4.2.	<i>Prezentacja zmiennych występujących w programie</i>	64
4.4.3.	<i>Okno programu w trybie Runtime</i>	65
5.	BADANIA TESTOWE	67
5.1.	BADANIA TESTOWE Z WYKORZYSTANIEM NASTAW <i>PIDTUNE</i>	67
5.2.	BADANIA TESTOWE Z WYKORZYSTANIEM NASTAW ZIEGLERA-NICHOLSA	69
5.3.	BADANIA TESTOWE Z WYKORZYSTANIEM ZŁĄCZA EASY PORT	71
5.4.	BADANIA TESTOWE NASTAW DOBRANYCH EKSPERYMENTALNIE ZAIMPLEMENTOWANYCH NA STEROWNIK PLC	73
5.5.	PORÓWNANIE PRZEBIEGÓW	75
5.6.	ANALIZA OTRZYMANYCH PRZEBIEGÓW	77
	PODSUMOWANIE	80
	BIBLIOGRAFIA.....	82
	WYKAZ ZAŁĄCZNIKÓW	84

WYKAZ OZNACZEŃ

A – pole przekroju poprzecznego [m^2]

d – średnica przewodu [m]

e – podstawa logarytmu naturalnego (liczba Eulera) = 2,718

g - wartość przyspieszenia ziemskiego = 9,81 [m/s^2]

h - wysokość, długość [m]

h_l – straty liniowe [m]

h_m – straty miejscowe [m]

h_s - suma strat [m]

k – współczynnik wzmocnienia

l – długość przewodu [m]

p – ciśnienie [Pa], [bar]

Re - liczba Reynoldsa

Q - natężenie przepływu [l/min], [m^3/s]

R – promień krzywizny łuku [m]

T - stała czasowa [s]

U - napięcie [V]

V - objętość [m^3]

v - prędkość [m/s]

α - współczynnik Coriolisa

δ - kąt łuku kolanka [$^\circ$]

ζ - współczynnik oporów miejscowych [-]

λ - współczynnik oporów liniowych [-]

ρ - gęstość [m^3/kg]

ν - lepkość kinematyczna [m^2/s]

WSTĘP

Automatyka to nauka o metodach i układach sterowania. Rozwój tej dziedziny sprawił, że jest ona szeroko stosowana w automatyzacji procesów przemysłowych, jak również w produktach użytkowych. Zastosowanie technik sterowania, pomiarów, regulacji, kontroli oraz sygnalizacji pozwoliło wyeliminować lub ograniczyć do minimum udział człowieka w sterowaniu procesami technologicznymi. Procesy dzieli się na ciągłe oraz dyskretne. Współczesne systemy sterowania działają w czasie rzeczywistym oraz charakteryzują się dużą liczbą zmiennych procesowych [7]. Czynności precyzyjne, niebezpieczne lub powtarzalne można zastąpić pracą maszyn i urządzeń. Przyczynia się to do zwiększenia efektywności produkcji, zmniejszenia kosztów wytwarzania i wzrostu bezpieczeństwa pracy. Człowiek jako operator danej maszyny nie zawsze szybko jest w stanie zareagować na gwałtowne zmiany sygnałów i zakłóceń. W związku z tym do sterowania pracą różnych maszyn coraz częściej zaczęto aplikować systemy sterowania automatycznego bazujące na wstecznym oddziaływaniu wielkości mierzonej na wielkość sterującą. [10].

W niniejszej pracy zostało przedstawione sterowanie ciągłe z wykorzystaniem regulatora PID ciśnieniem w zbiorniku zamontowanym na stanowisku *Festo MPA Didactic* w Katedrze Automatyki i Robotyki Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej. Do sterowania ciśnieniem w pętli zamkniętej wykorzystano sterownik PLC firmy *Siemens S7-300*. Symulacja działania układu przeprowadzona w środowisku *Matlab/Simulink* umożliwiła sprawdzenie dynamiki układu i dobór odpowiednich nastaw regulatora. Wyniki zweryfikowano, porównując je z pomiarami eksperymentalnymi dokonanyymi na stanowisku.

CEL I ZAKRES

Celem pracy jest opracowanie układu sterowania ciśnieniem na stanowisku *Festo MPA* z wykorzystaniem sterownika PLC *Siemens S7-300*. Regulacja odbędzie się w sposób ciągły z wykorzystaniem regulatora PID. W celu doboru odpowiednich nastaw regulatora, zostanie przeprowadzona symulacja działania układu w oparciu o modele identyfikacyjne poszczególnych elementów automatyki wchodzących w skład układu regulacji na podstawie wartości eksperymentalnych uzyskanych ze stanowiska *Festo MPA*.

W zakres pracy wchodzi:

1. Wyznaczenie charakterystyki układu otwartego stanowiska *Festo MPA* na podstawie dołączonej do niego dokumentacji technicznej.
2. Modelowanie obiektu metodami identyfikacji na podstawie eksperymentalnych charakterystyk statycznych i dynamicznych.
3. Przeprowadzenie symulacji zachowania się modelu w programie *Matlab/Simulink*.
4. Projektowanie regulatora PID.
5. Implementacja regulatora PID na sterowniku PLC *Siemens S7-300*.
6. Przeprowadzenie badań testowych.
7. Weryfikacja i podsumowanie wyników.

1. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO FESTO MPA

Stanowisko *Didactic Festo MPA* zostało zaprojektowane głównie do celów szkoleniowych. Można na nim uczyć się jak praktycznie zastosować wiedzę związaną z automatyką i rozwiązywać problemy pojawiające się podczas wykonywania ćwiczenia. Pracując ze stanowiskiem, rozwija się umiejętności z zakresu pneumatyki (montaż elementów pneumatycznych), mechaniki (rozmieszczenie i montaż urządzeń), elektrotechniki (podłączenie przewodów zasilających) czy odczytywania dokumentacji technicznej. Użytkownik urządzenia spotyka się z praktycznymi problemami takimi jak: montaż urządzeń, dobór pętli sterowania czy dobór regulatora oraz jego nastaw [3].



Rys. 1.1. Widok stanowiska dydaktycznego *Festo MPA* (opracowanie własne)

1.1. Stanowiska Festo MPA oraz jego podstawowe komponenty

Stanowisko *Festo MPA* łączy w sobie cztery układy sterowania. Za jego pomocą możliwe jest przy użyciu wbudowanego regulatora PID lub sterownika PLC zbadanie i przetestowanie czterech oddzielnych układów sterowania: poziomem cieczy w zbiorniku, przepływem, ciśnieniem w zbiorniku i temperaturą [3].

Rodzaj układu zamkniętego zależy od wybranych czujników, elementów wykonawczych oraz kombinacji położenia zaworów. Ważnymi czynnikami są również odpowiednia konfiguracja, parametryzacja i zaprogramowanie układu przy pomocy sterownika PLC lub systemu sterującego.

Na stanowisku można zrealizować następujące funkcje [3]:

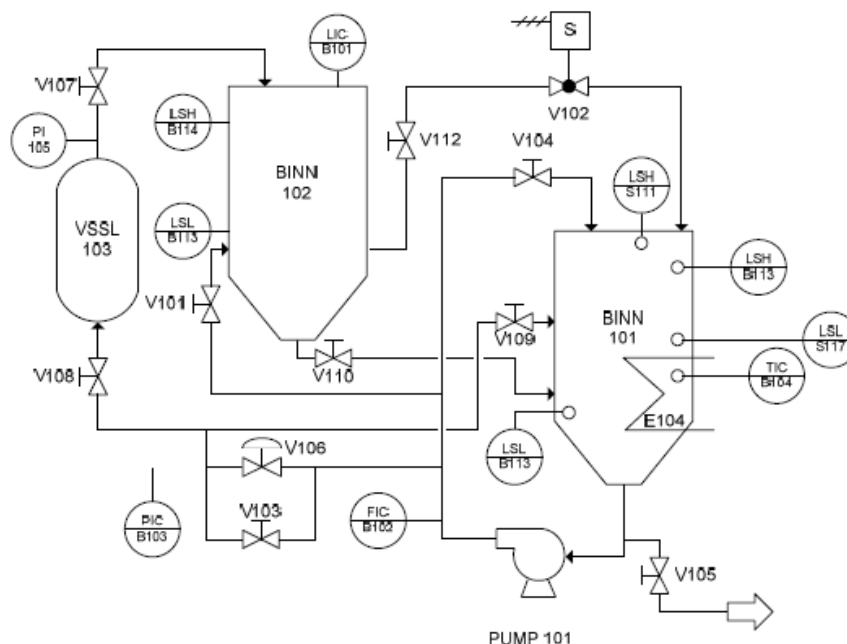
- regulacja dwupołożeniowa poziomu w zbiorniku cieczy z wykorzystaniem standardowego sygnału analogowego,
- regulacja ciągła poziomu cieczy w zbiorniku z wykorzystaniem standardowego sygnału analogowego,
- regulacja ciągła przepływu przy pomocy pompy z wykorzystaniem impulsowego sygnału do pomiaru częstotliwości,
- regulacja ciągła przepływu przy pomocy zaworu proporcjonalnego z wykorzystaniem impulsowego sygnału do pomiaru częstotliwości,
- regulacja ciągła przepływu przy pomocy pompy z wykorzystaniem standardowego sygnału analogowego,
- regulacja ciągła przepływu przy pomocy zaworu proporcjonalnego z wykorzystaniem standardowego sygnału analogowego,
- regulacja ciągła ciśnienia przy pomocy pompy z wykorzystaniem standardowego sygnału analogowego,
- regulacja ciągła ciśnienia przy pomocy zaworu proporcjonalnego z wykorzystaniem standardowego sygnału analogowego,
- regulacja dwupołożeniowa temperatury z wykorzystaniem standardowego sygnału analogowego.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

Do podstawowych komponentów wchodzących w skład stanowiska należą [3]:

- analogowy czujnik ultradźwiękowy,
- częstotliwościowy czujnik przepływu,
- piezorezystancyjny czujnik przepływu
- wskaźnik ciśnienia o zakresie 0-1 bar,
- czujnik temperatury PT100,
- 2 pojemnościowe czujniki zbliżeniowe do pomiaru minimalnego i maksymalnego poziomu cieczy w niższym zbiorniku,
- przełącznik przepływu dla ustawienia progu w wyższym zbiorniku,
- przełącznik przepływu dla ustawienia alarmu w niższym zbiorniku w przypadku przelewu,
- przełącznik przepływu jako zabezpieczenie przed przegrzaniem układu,
- pompa odśrodkowa,
- regulator silnika pompy,
- zawór proporcjonalny z możliwością elektrycznego sterowania,
- system podgrzewania z zintegrowanym sterowaniem przekaźnikowym,
- 2W zawór kulkowy z pneumatycznym napędem obrotowym,
- terminal wyjść/wejść
- terminal sygnałów analogowych
- przetwornik sygnałów: prądowego na napięciowy, częstotliwościowego na napięciowy, PT100 na napięciowy
- sterownik PLC lub regulator,
- panel kontrolny,
- system rurociągów zawierający 4 oddzielne obiegi,
- zbiornik ciśnieniowy,
- zbiorniki z wodą,
- zawory ręczne,
- zawór ręczny kulkowy umożliwiający opróżnienie układu,
- jednostka serwisowa,
- 19” rama do mocowania komponentów,
- wózek.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC



Rys. 1.2. Schemat automatyzacji stanowiska *Festo MPA*, [3]

1.2. Charakterystyka i parametry urządzeń

W niniejszej tabeli podano dane techniczne stanowiska *Festo MPA* oraz specyfikację poszczególnych urządzeń z podziałem na obiegi sterowania [3].

Tab. 1.1. Dane techniczne stanowiska *Festo MPA*

Parametry ogólne stanowiska	
Parametr	Wartość
maksymalne ciśnienie w układzie	50 kPa (0,5 bar)
napięcie zasilania	24 V DC
wymiary	700 x 700 x 907 mm
wielkość przepływu pompy	~5 l/min
objętość zbiornika	maksymalnie 10 l
średnica rurek	15 mm
wejścia cyfrowe	7
wyjścia cyfrowe	5
wejścia analogowe	4
wyjścia analogowe	2
Parametry urządzeń sterujących	
pompa odśrodkowa (0-24 V DC)	0-10 V
2/2-drogowy zawór proporcjonalny	0-10 V
element grzewczy 230 VAC (moc 1000 W)	włączony/wyłączony (sterowanie przekaźnikiem 24 V DC)

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

Sterowanie poziomem cieczy	
zakres dla sterowania poziomem cieczy	0-10 l/min
zakres pomiarowy czujnika poziomu	0-9,0 l/min
zakres pomiarowy sygnału czujnika poziomu	4-20 mA
Sterowanie przepływem	
zakres dla sterowania przepływem	0-7 l/min
zakres pomiarowy czujnika przepływu	0,3-9,0 l/min
zakres pomiarowy sygnału czujnika przepływu	0-1200 Hz
Sterowanie ciśnieniem	
zakres dla sterowania ciśnieniem	0-30 kPa
zakres pomiarowy czujnika ciśnienia	0-10 kPa
zakres napięcia czujnika ciśnienia	0-10 V
Sterowanie temperaturą	
zakres dla sterowania temperaturą	0-60 °C
zakres pomiarowy czujnika temperatury	-50°C do +150°C
rodzaj czujnika	rezystancyjny PT100

1.2.1. Charakterystyka zbiornika ciśnieniowego

Zbiornik ciśnieniowy wykonany jest z wysokoprocentowej stali nierdzewnej. Można go zamontować w dowolnej pozycji. Jego objętość wynosi 2 l, a ciśnienie robocze mieści się w granicach od 0,95 bar do 16 bar. Medium roboczym może być sprężone powietrze lub azot. Temperatura, zarówno otoczenia, jak i medium wewnątrz zbiornika, mieści się w granicach od -10°C do 100°C.



Rys. 1.3. Zbiornik ciśnieniowy CRVZS-2, [2]

1.2.2. Charakterystyka pompy

Pompa odśrodkowa P101 jest urządzeniem wykonawczym w układzie regulacji. Pompa rozprowadza ciecz po układzie ze zbiornika B101 poprzez system rurek. Pompa oraz zespół ssący powinny być w całości wypełnione medium, gdyż jej długotrwałe działanie (>30 min) bez odpowiedniego wypełnienia jej cieczą może doprowadzić do jej uszkodzenia.



Rys. 1.4. Pompa odśrodkowa, [2]

Wydajność pompy osiągana jest poprzez zmianę wartości napięcia sterującego. Sygnałem wejściowym jest napięcie w zakresie 0-24 V DC zaś sygnałem wyjściowym jest napięcie od 0 do 10 V DC.

1.2.3. Charakterystyka czujnika ciśnienia

Analogowy czujnik ciśnienia jest piezorezystancyjnym czujnikiem względnym z zintegrowanym wzmacniaczem i wbudowanym pochłaniaczem temperatury w aluminiowej obudowie.

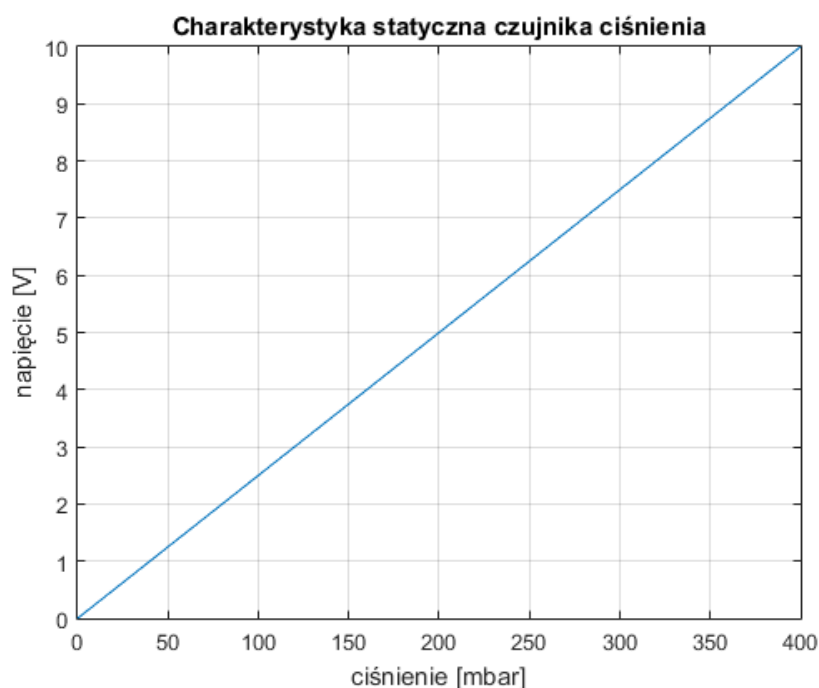
Ciśnienie jest mierzone przy pomocy piezorezystancyjnego elementu, którego rezystancja zmienia się w zależności od ciśnienia. Zmieniający się sygnał wyjściowy jest emitowany poprzez zintegrowany wzmacniacz pod postacią napięcia na wtyczce. Maksymalna wartość na wyjściu to 10 V DC. Sygnał wyjściowy może być mierzony za pomocą woltomierza.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

Temperatura mierzonego medium musi mieścić się w przedziale od -25°C do 100°C . Zakres czujnika mieści się w granicach od 0 do 100 mbar lub od 0 do 400 mbar, zależnie od typu czujnika.



Rys. 1.5. Czujnik ciśnienia, [2]



Rys. 1.6. Charakterystyka statyczna czujnika ciśnienia, (opracowanie własne)

1.2.4. Charakterystyka zaworu proporcjonalnego

Zawór proporcjonalny ułatwia kontrolę przepływu gazów neutralnych i płynów. Może być stosowany jako zdalnie sterowany końcowy element sterujący lub w zamkniętych pętlach sterowania. Zawór proporcjonalny jest normalnie zamknięty. Oznacza to, że w przypadku

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

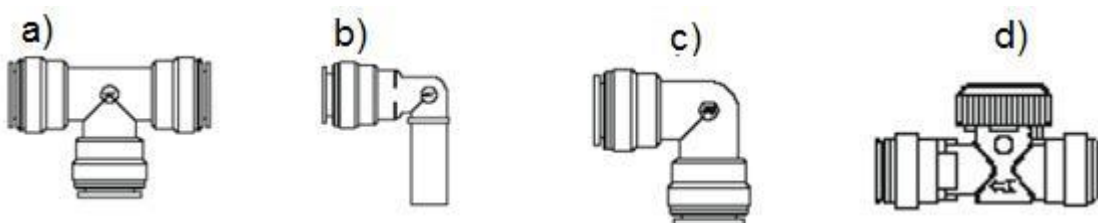
pojawienia się prądu płynącego przez cewkę dojdzie do jego otwarcia a jego stopień otwarcia będzie zależeć od wartości prądu płynącego przez cewkę. Zależność pomiędzy prądem i otwarciem zaworu powinna być idealnie liniowa. Zawór zamyka się i otwiera proporcjonalnie do napięcia z zakresu od 0 do 10 V. Działanie zaworu wymaga zasilania 24 V DC. Maksymalny przepływ przez zawór wynosi 2,3 l/min.



Rys. 1.7. Zawór proporcjonalny 2/2-drogowy, [2]

1.2.5. Charakterystyka systemu rurociągu

Przewody hydrauliczne w układzie tworzą elastyczne, plastikowe rurki połączone ze sobą na wcisk za pomocą elementów przedstawionych poniżej. Zapobiega to wyciekowi cieczy oraz umożliwia łatwy i szybki montaż oraz demontaż układu. Średnica zewnętrzna elementów wynosi 15 mm.



Rys. 1.8. Prezentacja elementów połączeniowych przewodów hydraulicznych, a- rozdzielacz trójdrogowy, b, c, - kolanka 90°, d- zawór ręczny w postaci dźwigni, [2]



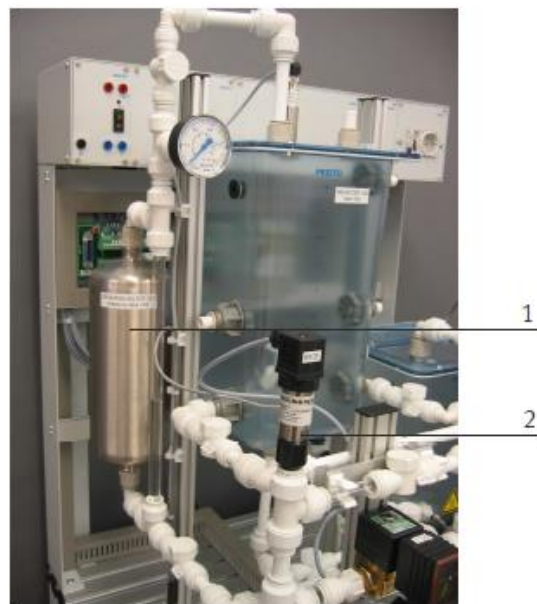
Rys. 1.9. Podgląd plastikowej rurki wchodzącej w skład układu, [2]

1.3. Schemat układu regulacji ciśnienia

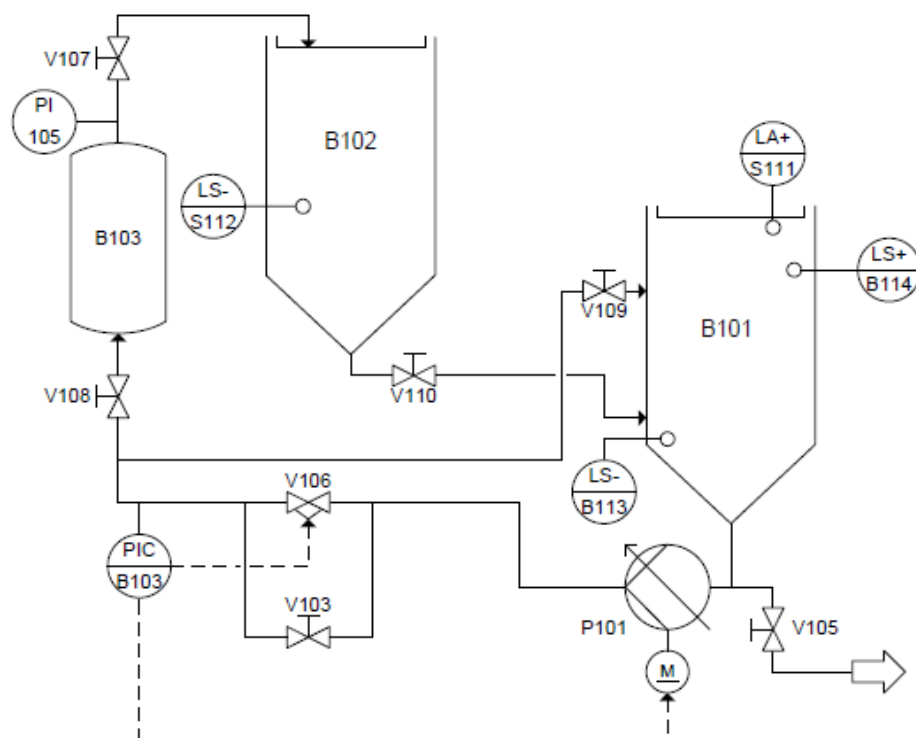
W oparciu o Rys. 1.11 pompa P101 poprzez system rurek dostarcza ciecz z rezerwuaru do zbiornika ciśnieniowego B103. Ciśnienie gazu w zbiorniku jest wykrywane poprzez działanie piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia. Pomiar wartości rzeczywistej powinien być kontynuowany przy pewnym określonym ciśnieniu, ponieważ mogą wystąpić zakłócenia lub zmiany wartości zadanej.

Ilość cieczy w zbiorniku ciśnieniowym może wzrosnąć poprzez otwarcie lub zamknięcie zaworu wylotowego V107, jeśli pompa P101 jest uruchomiona przed użyciem sterowania. Zaleca się ustawienie poziomu wody w zbiorniku ciśnieniowym do połowy zbiornika przy użyciu zaworu V107. Jest to najoptymalniejszy poziom dla procesu sterowania. Zbiornik ciśnieniowy jest częściowy wypełniony powietrzem, dlatego jest to układ magazynowania energii [3].

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC



Rys. 1.10. Podgląd układu regulacji ciśnienia, 1 - zbiornik ciśnieniowy B103, 2 - czujnik ciśnienia B103, [3]



Rys. 1.11. Schemat automatyzacji układu sterowania ciśnieniem, [3]

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

Występują dwa sposoby sterowania ciśnieniem [3]:

- przy użyciu pompy P101 – wówczas wartością zadaną jest napięcie sterujące pompą, które ustawia odpowiednią prędkość obrotową pompy,
- przy użyciu zaworu proporcjonalnego V106. Wartością zadaną jest napięcie na cewce zaworu, które ustawia suw tłoka zaworu. Pompa P101 obraca się wówczas ze stałą prędkością obrotową.

Aby wprowadzić do układu zakłócenia możliwe jest częściowe lub całkowite otwarcie ręcznego zaworu V109. Dodatkowo wartość w zbiorniku ciśnieniowym może być odczytana z ciśnieniomierza. Aby opróżnić zbiornik, należy otworzyć ręczne zawory V109, V108 i V107 oraz wyłączyć pompę P101. Poziom wody w zbiorniku ciśnieniowym nie może spaść poniżej poziomu niższego w zbiorniku B101. Czasem konieczne jest przepompowanie wody z niższego zbiornika do zbiornika wyższego B102. Ciecz z całego układu można spuścić przy pomocy zaworu V105.

Aby utworzyć układ regulacji ciśnienia, trzeba ustawić zawory ręczne w odpowiednim położeniu. Kombinacja zaworów przedstawiona jest w Tab. 1.2.

Tab. 1.2. Położenie poszczególnych elementów układu w pętli sterowania ciśnieniem, [3]

Element	Układ regulacji ciśnienia przy pomocy pompy P101	Układ regulacji ciśnienia przy pomocy zaworu V106
Miejsce pomiaru Czujnik	PIC 103 B103	
pompa P101	element wykonawczy	cyfrowo włączona
zawór proporcjonalny V106	wyłączony	element wykonawczy
element grzewczy E104	wyłączony	wyłączony
zawór ręczny V101	zamknięty	zamknięty
zawór kulkowy V102	zamknięty	zamknięty
zawór ręczny V103	otwarty	zamknięty
zawór ręczny V104	zamknięty	zamknięty
zawór spustowy V105	zamknięty	zamknięty
zawór ręczny V107	zamknięty	zamknięty
zawór ręczny V108	otwarty	otwarty
zawór ręczny V109	otwarty/ zamknięty	otwarty/ zamknięty
zawór ręczny V110	zamknięty	zamknięty
zawór ręczny V112	zamknięty	zamknięty

1.4. Przeprowadzanie pomiarów na stanowisku

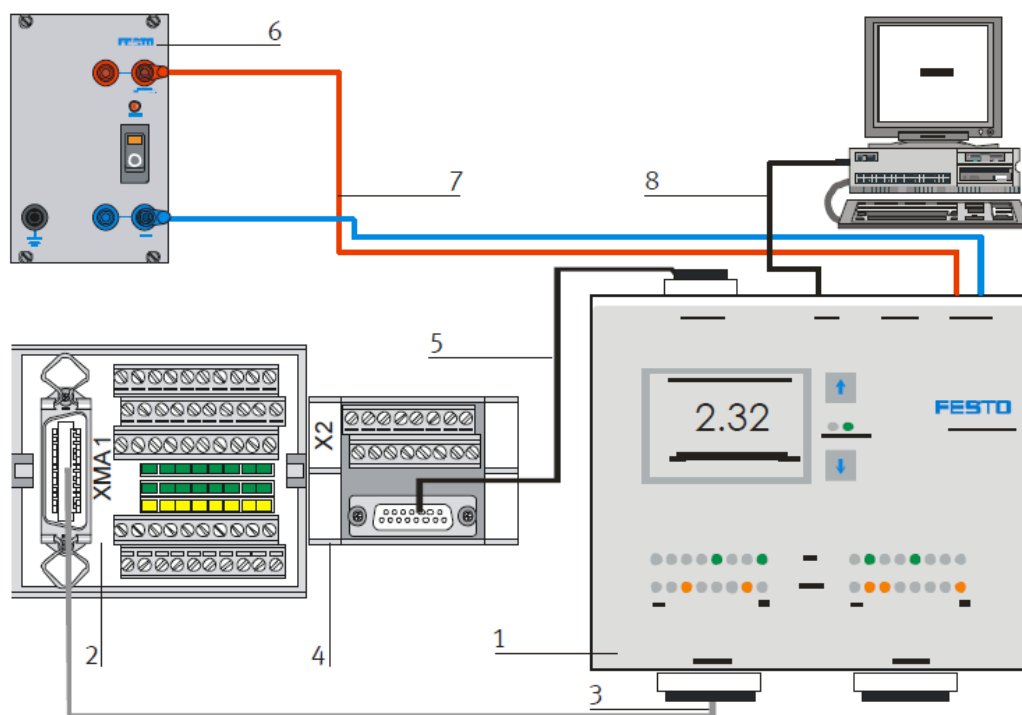
Przeprowadzenie pomiarów na stanowisku *Festo MPA* możliwe było poprzez zastosowanie złącza *Easy Port* oraz aplikacji *Fluid Lab*. Pomiar charakterystyk statycznych i dynamicznych odpowiednich elementów automatyki układu sterowania na stanowisku posłużył do wyznaczenia ich modeli matematycznych, wykonania badań symulacyjnych i zaprojektowaniu regulatora PID. Tak dobrane nastawy regulatora zostały zweryfikowane na stanowisku laboratoryjnym poprzez przeprowadzenie badań testowych.

1.4.1. Złącze do pomiarów- *Easy Port*

Złącze *Easy Port* poprzez wbudowany port USB umożliwia komunikację pomiędzy stanowiskiem a komputerem PC. Tym samym za pośrednictwem złącza USB możliwe było dokonywanie rejestracji odpowiednich analogowych i cyfrowych sygnałów pomiarowych i sterujących. [20]. Dodatkowo zamontowany na nim wyświetlacz LCD daje możliwość podglądu pracy urządzenia w zakresie wyboru kanału pomiarowego jak również o wartości mierzonego sygnału [16].

Schemat podłączenia złącza *Easy Port* (1) z komputerem PC i stanowiskiem dydaktycznym przedstawia Rys. 1.12. Urządzenie jest zasilane napięciem 24 V DC i podłączone do zasobnika (6) przy pomocy 4 mm wtyczek o zaciskach śrubowych (7). Z komputerem PC komunikuje się przez kabel USB (8). Cyfrowe sygnały wejściowe i wyjściowe są pobierane ze stanowiska poprzez 24-pinową wtyczkę SysLink IEE448 (3) podłączoną do terminalu wejść/wyjść XMA1 (2). Sygnały analogowe są przesyłane przez 15-pinową wtyczkę D-Sub (5) podłączoną do terminalu wejść/wyjść analogowych X2 (4).

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

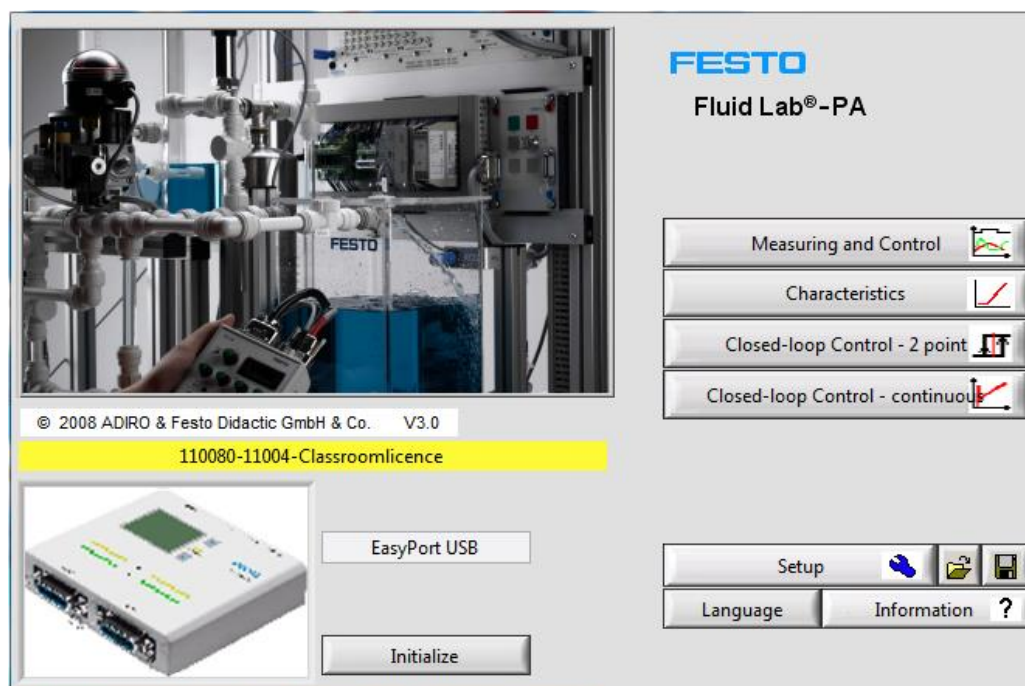


Rys. 1.12. Schemat podłączenia *Easy Port* na stanowisku *Festo MPA*, [3]

1.4.2. Oprogramowanie stanowiska *Festo MPA- Fluid Lab*

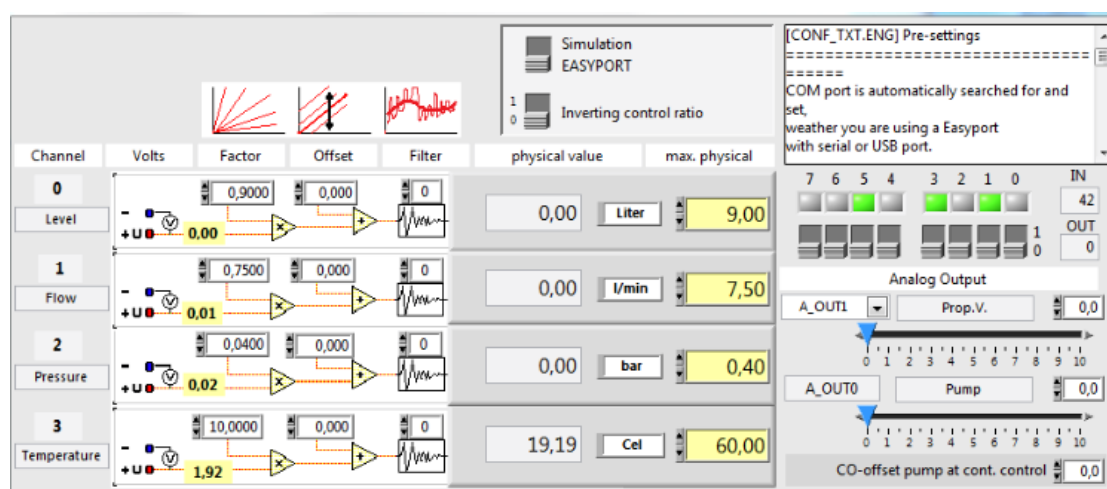
Oprogramowanie *Fluid Lab* dołączone do stanowiska *Festo MPA* umożliwia wykonanie pomiarów, charakterystyk, regulacji dwupołożeniowej oraz regulacji ciągłej [20]. W oknie głównym aplikacji istnieje możliwość zmiany języka, zapisania lub otwarcia konfiguracji oraz wyświetlenia dodatkowych informacji (Rys. 1.13). Do wykonania pomiarów niezbędne jest zainicjowanie komunikacji z *Easy Portem*. Wszystkie wyświetlone przebiegi można zapisać do pliku tekstowego.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC



Rys. 1.13. Okno główne aplikacji *Fluid Lab*

Kolejnym krokiem podczas wykonywania pomiarów jest odpowiednia konfiguracja elementów pomiarowych stanowiska (Rys. 1.14). Aby otworzyć okno konfiguracji, należy wejść w zakładkę *Setup*. Z tego poziomu ustawia się współczynniki wzmocnienia (*Factor*) oraz przesunięcia (*Offset*), żeby prawidłowo przedstawić wielkości fizyczne. Istnieje również możliwość tłumienia sygnału przy pomocy wartości średniej (*Filter*), odwrócenie kierunku regulacji, czy ustawienie przesunięcia sygnału sterującego. W tym oknie można również sterować wyjściami dyskretnymi i analogowymi (pompą i zaworem proporcjonalnym). Służą do tego bity 0-3 [16]. Opis poszczególnych wyjść przedstawia Tab. 1.3.



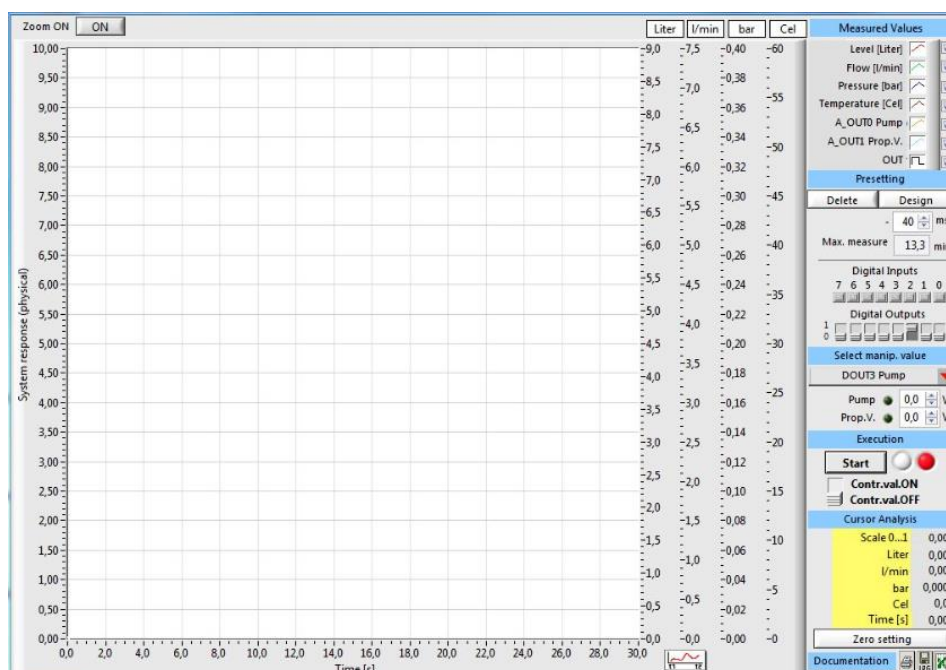
Rys. 1.14. Okno konfiguracji pomiarów w aplikacji *Fluid Lab*

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

Tab. 1.3. Wyjścia dyskretne wykorzystywane we *Fluid Lab*, [16]

Bit wyjściowy	Opis
0	Sterowanie grzałką: <ul style="list-style-type: none"> • Stan wysoki (Wyjście 1 = 1): włączenie grzałki • Stan niski (Wyjście 1 = 0): wyłączenie grzałki
1	Wybór sterowania pompą: <ul style="list-style-type: none"> • Stan wysoki (Wyjście 2 = 1): analogowe sterowanie pompą • Stan niski (Wyjście 2 = 0): dyskretne sterowanie pompą
2	Dyskretne sterowanie pompą, jeśli spełniony jest warunek Wyjście 2 = 0
3	Sterowanie zaworem proporcjonalnym napięciem 0-10 V

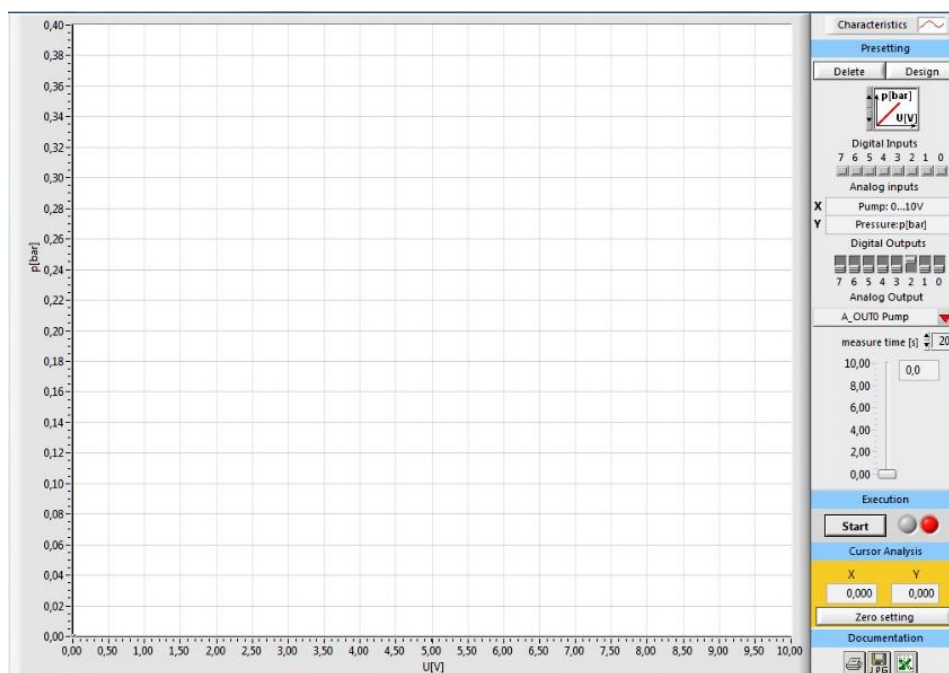
W menu okna pomiarów i sterowania (Rys. 1.15) użytkownik stanowiska ma możliwość zarejestrowania sygnałów cyfrowych oraz analogowych pochodzących z czujników i wyświetlenia interesujących go przebiegów. Istnieje również możliwość zadania wymuszenia na elementy wykonawcze (pompą, zawór proporcjonalny) czy zmiany czasu próbkowania.



Rys. 1.15. Okno pomiarów i sterowania

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

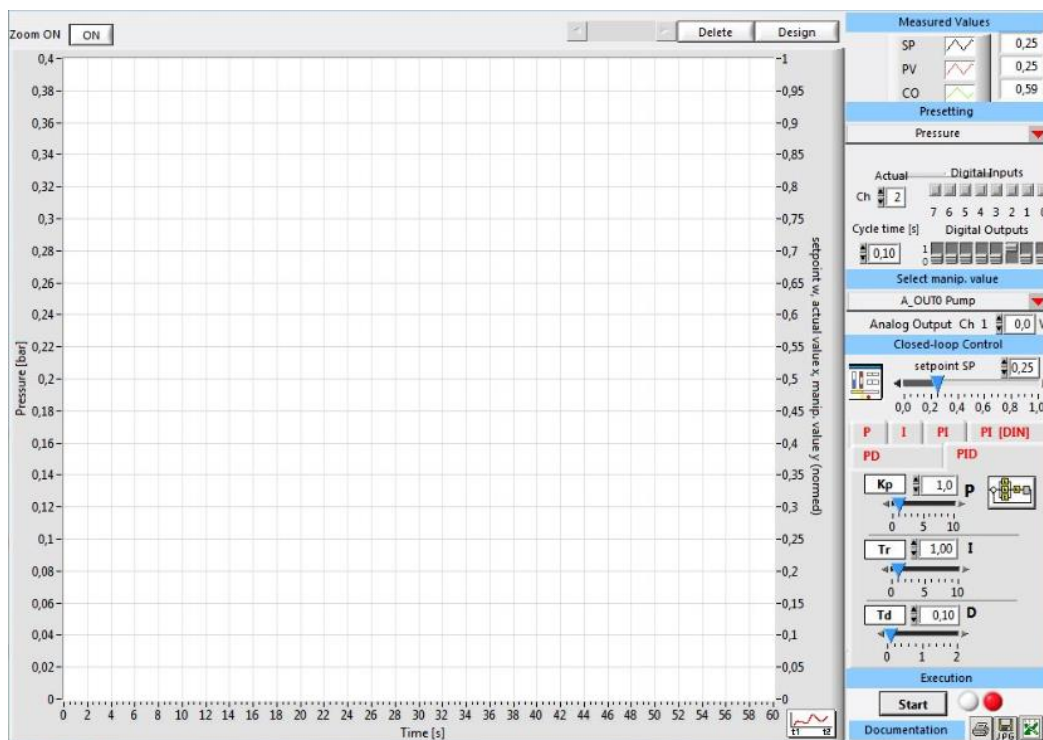
Menu okna pomiarów charakterystyk (Rys. 1.16) umożliwia dokonanie pomiarów charakterystyk statycznych elementów wykonawczych. Dostępne są 3 typy charakterystyk statycznych: natężenia przepływu od napięcia $Q=f(U)$, ciśnienia od napięcia $p=f(U)$ oraz ciśnienia od natężenia przepływu $p=f(Q)$. Wszystkie charakterystyki są mierzone jednocześnie. Istnieje możliwość zmiany czasu pomiaru.



Rys. 1.16. Okno pomiaru charakterystyk

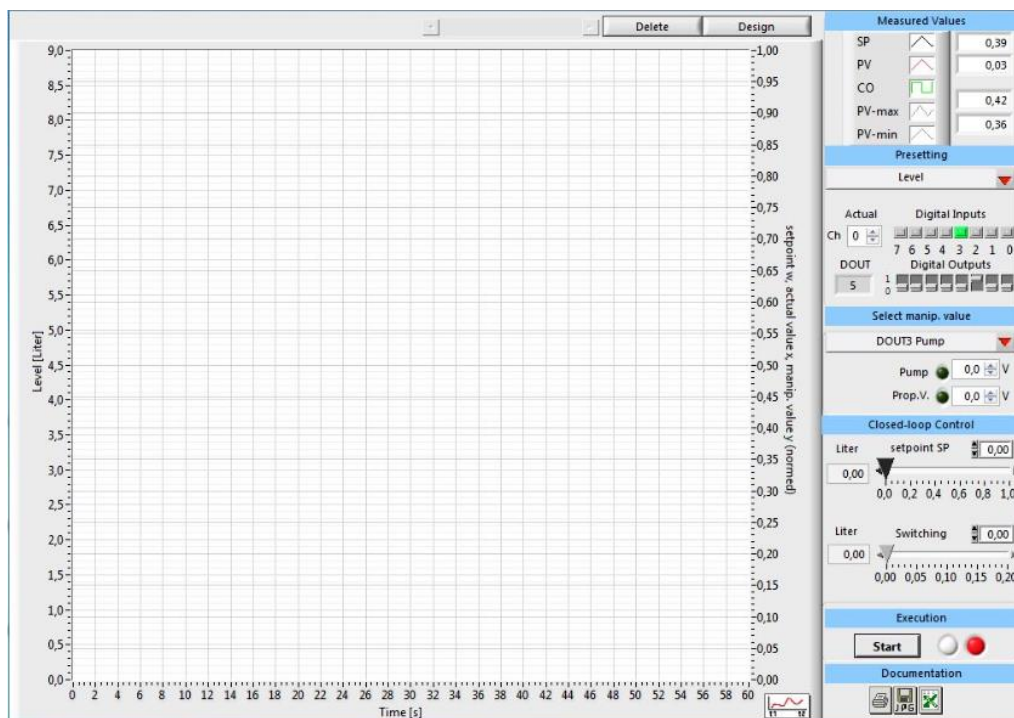
Okno regulacji ciągłej (Rys. 1.17) umożliwia rejestrację przebiegów z wykorzystaniem regulatorów ciągłych typu P, I, PI, PD, PID oraz PI (DIN)- zgodnym z normami niemieckimi. Z tego poziomu można zmienić nastawy regulatorów oraz zarządzać wejściami i wyjściami cyfrowymi. Na wykresie wyświetlana jest wartość zadana (SP), wartość mierzona (PV) oraz sygnał sterujący (CO). Wartość zadaną ustawia się w przedziale 0-1 zgodnie z konfiguracją ustawioną w zakładce *Setup*.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC



Rys. 1.17. Okno regulacji ciągłej

W oknie regulacji dwupołożeniowej (Rys. 1.18) ustawia się wartość zadaną oraz progi przełączania regulatora. Ten typ regulacji najczęściej stosuje się do regulacji temperatury oraz poziomu cieczy w zbiorniku (jeśli są dostępne czujniki pływakowe).



Rys. 1.18. Okno regulacji dwupołożeniowej

2. MODELOWANIE ELEMENTÓW AUTOMATYKI W UKŁADZIE STEROWANIA

Pierwsza metoda polega na analitycznym opisie dynamiki układu za pomocą praw fizycznych. Jest ona przedstawiana za pomocą równań różniczkowych lub transmitancji operatorowych. Nie jest to jednak opis rzeczywisty tylko uproszczony. Aby otrzymać dokładne odwzorowanie modelu, często trzeba rozwiązać skomplikowane równania. Dlatego należy pamiętać o kompromisie pomiędzy uproszczeniem równań, a zachowaniem satysfakcjonującej dokładności umożliwiającej rozwiązanie danego problemu [1]. Często modele uproszczone wystarczają do otrzymania pożądanego rozwiązania. Uproszczenia mogą polegać na linearyzacji modelu, obniżeniu rzędu równania różniczkowego lub pominięcia pewnych interakcji z otoczeniem. Zazwyczaj dąży się do otrzymania modelu o liniowych parametrach skupionych. Przydatność modelowania matematycznego można określić po porównaniu go z modelowaniem identyfikacyjnym [10].

Często okazuje się, że zamodelowanie rzeczywistego układu jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Skorzystać można wtedy z identyfikacji układu na podstawie zależności pomiędzy sygnałami wejściowymi i wyjściowymi. Taki model eksperymentalny posiada większą dokładność niż matematyczny, ponieważ nie stosuje się w nim uproszczeń, tylko wykorzystuje wartości rzeczywistych sygnałów występujących w danym układzie [6].

Aby opracować układ sterowania ciśnieniem, stanowisko *Festo MPA* zostanie zamodelowane metodą identyfikacji, na podstawie charakterystyk statycznych i dynamicznych. Następnie zostanie przeprowadzona symulacja w celu zbadania zachowania układu oraz doboru nastaw regulatora. W skład pętli regulacji wchodzi następujące elementy: pompa, rurociąg, zbiornik ciśnieniowy oraz czujnik ciśnienia.

2.1. Pomiar charakterystyk statycznych i dynamicznych elementów automatyki

Charakterystyka statyczna jest zależnością wielkości wyjściowej y od wielkości wyjściowej x w stanie ustalonym. Jest to taki stan, w którym nie występują zmiany wartości wielkości określających stan elementu, czyli $x=\text{const}$, $y=\text{const}$. Charakterystyki statyczne dzielimy na liniowe i nieliniowe. W modelach liniowych na podstawie charakterystyk

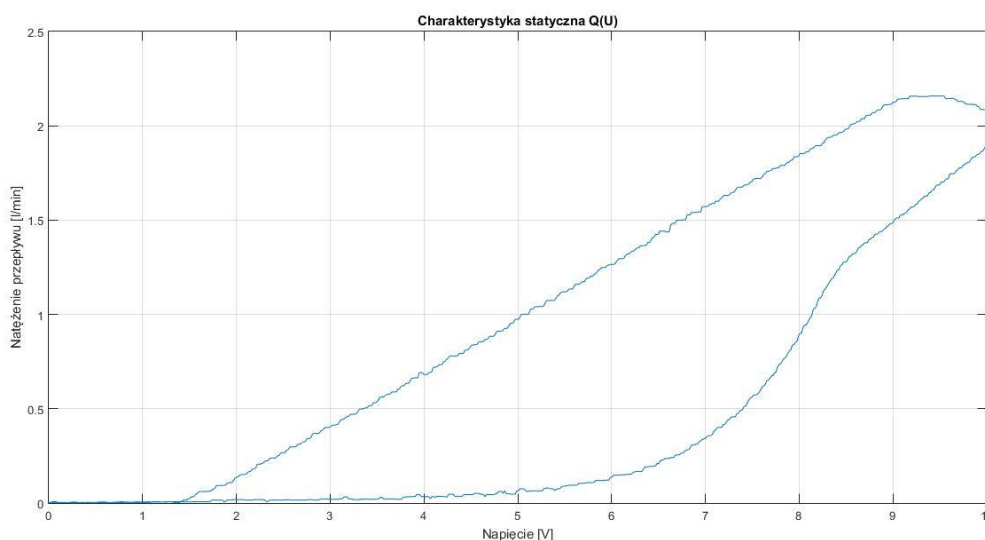
Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

statycznych stosuje się pewne uproszczenia, które zachowują jednak najważniejsze cechy układu. Często w modelach nieliniowych stosuje się linearyzację w otoczeniu punktu pracy [10].

Charakterystyki dynamiczne obrazują zachowanie się układu w funkcji czasu lub częstotliwości w odpowiedzi na zadane wymuszenia. Analiza zachowania się układu ułatwia opracowanie układu sterowania.

Charakterystyki zostały wykreślone w programie *Matlab* na podstawie rzeczywistych wartości pobranych i zapisanych podczas eksperymentu do plików tekstowych. Pomiary zostały przeprowadzone dla pętli sterowania ciśnieniem. Na ich podstawie opracowano model symulacyjny układu. Skrypt z wygenerowania wykresów przedstawiono w Załączniku nr 1.

Pierwsza charakterystyka statyczna przedstawiona na Rys. 2.1 ukazuje zależność natężenia przepływu cieczy przez pompę w funkcji napięcia sterującego zmieniającego się w zakresie od 0 V do maksymalnej wartości 10 V. Zgodnie z załączonym obrazem widać, że w wyniku pomiarów została otrzymana histereza pomiarowa świadcząca o przyjmowaniu różnych wartości wyjściowych przy dociążaniu i odciążaniu układu.

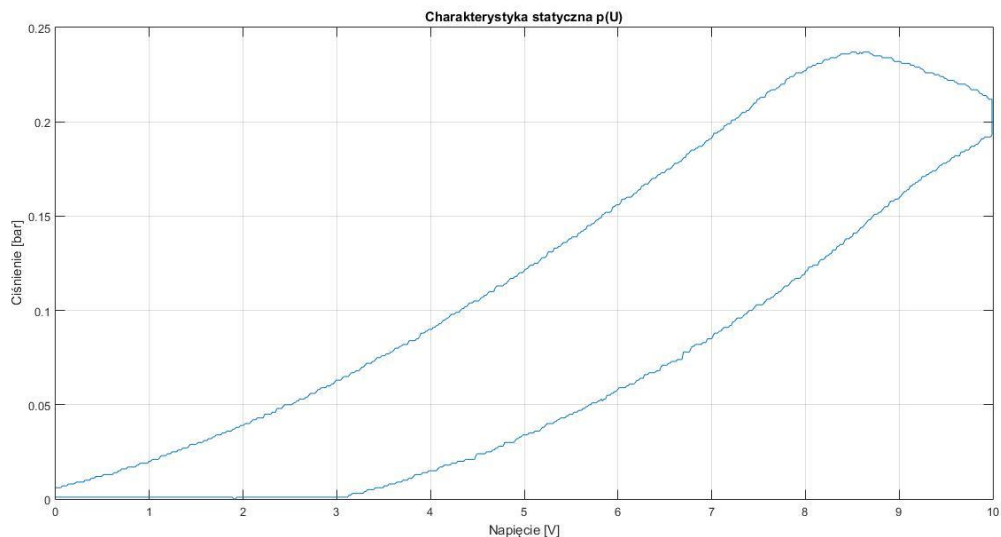


Rys. 2.1. Charakterystyka statyczna zbiornika. Zależność $Q = f(U)$

Kolejną charakterystyką statyczną wyznaczoną podczas pomiarów jest zależność ciśnienia od napięcia. Po jej wyznaczeniu (patrz Rys. 2.2) można także dostrzec

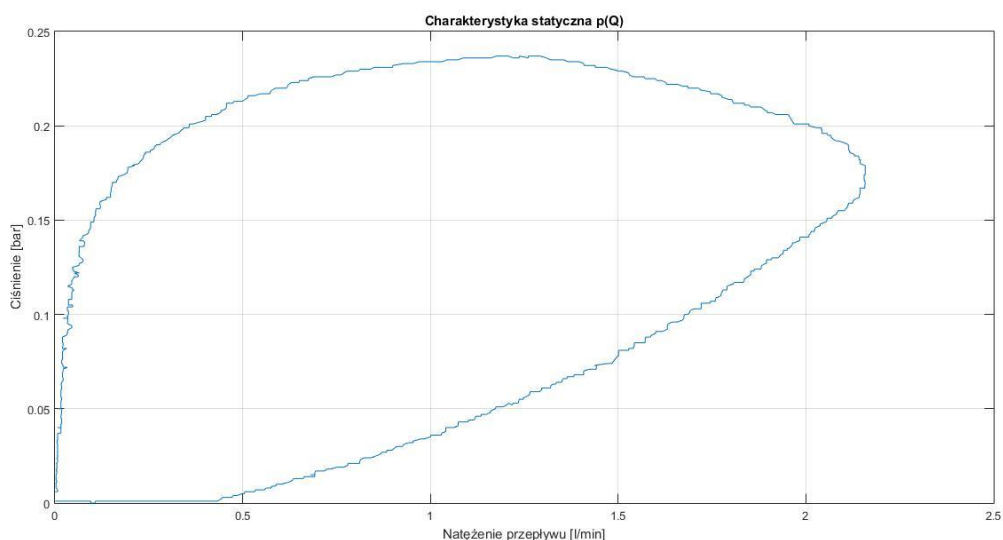
Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

występowanie histerezy pomiarowej. W tym przypadku narastanie i opadanie sygnału jest w przybliżeniu liniowe.



Rys. 2.2. Charakterystyka statyczna zbiornika. Zależność $p = f(U)$

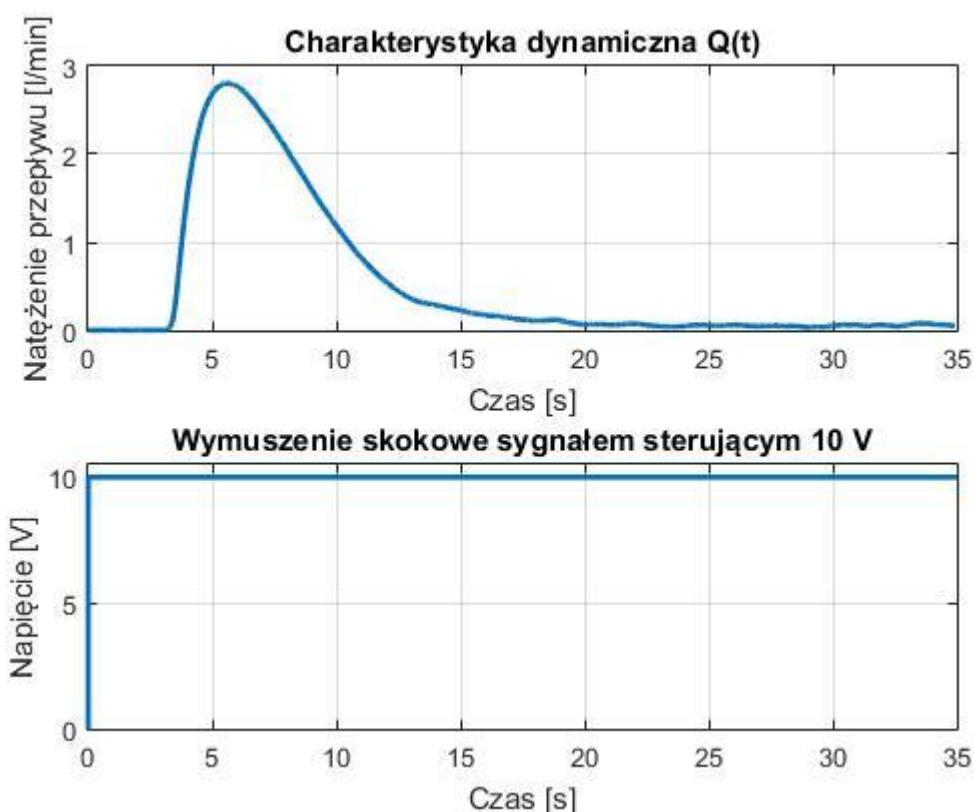
Ostatnią charakterystyką statyczną wyznaczaną na potrzeby realizacji pracy jest zależność ciśnienia od natężenia przepływu. Z wykresu widać, że ciśnienie w układzie gwałtownie rośnie osiągając wartość maksymalną przy niewielkim natężeniu przepływu. Narastanie sygnału jest nieliniowe, powrót sygnału w uproszczeniu można potraktować jako liniowy.



Rys. 2.3. Charakterystyka statyczna zbiornika. Zależność $p = f(Q)$

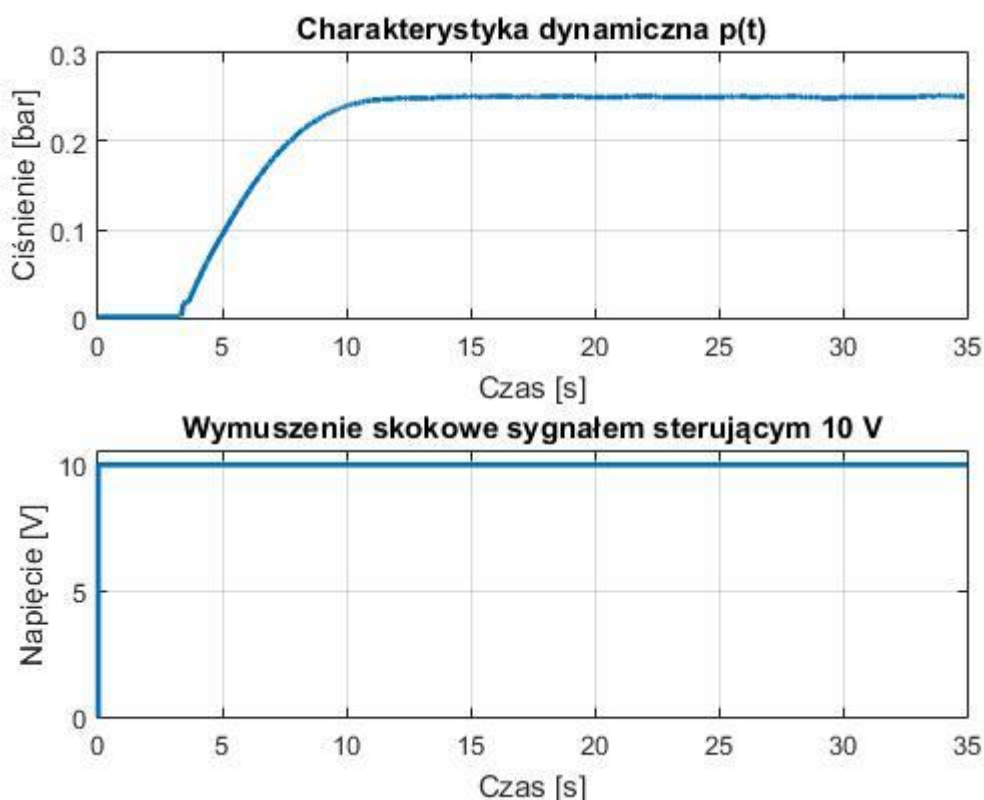
Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

Z wykresu charakterystyki dynamicznej natężenia przepływu widać, że w układzie występuje pewne opóźnienie wynoszące ok. 3,5 s związane z przepływem medium przez rurki. Opóźnienie to zostało uwzględnione przy modelowaniu przewodów. Następnie wartość przepływu gwałtownie rośnie osiągając maksymalną wartość w bardzo krótkim czasie, po czym stopniowo opada. Po upływie ok. 20 s spada praktycznie do 0 i utrzymuje dalej taką samą wartość. Świadczy to o tym, że układ dosyć szybko osiąga maksymalną wartość ciśnienia i pompa nie musi stale pracować, aby utrzymać w obiegu zadane ciśnienie.



Rys. 2.4. Charakterystyka dynamiczna natężenia przepływu

Charakterystyka dynamiczna zbiornika ciśnieniowego pokazuje zmianę ciśnienia w czasie. Z przebiegu widać, że w układzie występuję podobne opóźnienie jak podczas pomiaru charakterystyki dynamicznej natężenia przepływu. Opóźnienie jest spowodowane przepływem cieczy przez rurociąg. Po ok. 12 s sygnał osiąga maksymalną wartość 0,25 bar, która utrzymuje się dalej na stałym poziomie.



Rys. 2.5. Charakterystyka dynamiczna ciśnienia w zbiorniku

2.2. Wyznaczenie modelu matematycznego układu sterowania

Poszczególne elementy wchodzące w skład układu zostały wyznaczone metodą identyfikacji i przedstawione przy pomocy transmitancji operatorowych. Umożliwiło to późniejszą syntezę układu i przeprowadzenie symulacji w środowisku *Matlab/Simulink*.

2.2.1. Założenia przyjęte podczas projektowania modelu matematycznego

Przy projektowaniu modelu zastosowano pewno uproszczenia. Można było z nich skorzystać na podstawie następujących założeń:

- pompa jest traktowana jako człon inercyjny pierwszego rzędu [5],
- rozpatrywana w układzie ciecz jest wodą destylowaną o stałej gęstości 1000 kg/m^3 nie zawierającą żadnych zawiesin ani drobin,
- przepływ cieczy przez rurociąg jest turbulentny,
- bezwładność cieczy jest pomijana (brak cofania się cieczy po wyłączeniu pompy),
- ciśnienie panujące przed pompą jest pomijane,

- przewody hydrauliczne rozpatrywane jako sztywna całość bez podziału na segmenty,
- rury traktowane są jako gładkie (mają małą średnicę, a PEM ma bardzo małą chropowatość [4]) mające jednakową średnicę na całej długości rurociągu,
- rurociąg jest przedstawiony jako człon opóźniający,
- temperatura przepływu jest stała i nie oddziałuje na przepływającą ciecz.

2.2.2. Wyznaczenie modelu zbiornika ciśnieniowego

Pierwszym zamodelowanym elementem jest zbiornik ciśnieniowy, który jest w układzie obiektem regulacji. Zbiorniki otwarte o dopływie z góry i swobodnym odpływie można potraktować podczas modelowania jako człon całkujący [1]. W takim zbiorniku sygnałem wejściowym jest natężenie przepływu, a wyjściowym objętość (poziom cieczy). Stała czasowa jest tożsama z przekrojem poprzecznym zbiornika [17]. Jednak zbiornik ciśnieniowy na stanowisku *Festo MPA* jest zbiornikiem zamkniętym o dopływie znajdującym się na dole tego zbiornika. Sygnałem wejściowym jest tutaj natężenie przepływu, a wyjściowym ciśnienie dlatego w modelowaniu potraktowano go jako człon inercyjny (2.2), a nie całkujący (2.1) [1].

Transmitancja członu całkującego

$$G(s) = \frac{1}{Ts} \quad (2.1)$$

Transmitancja członu inercyjnego

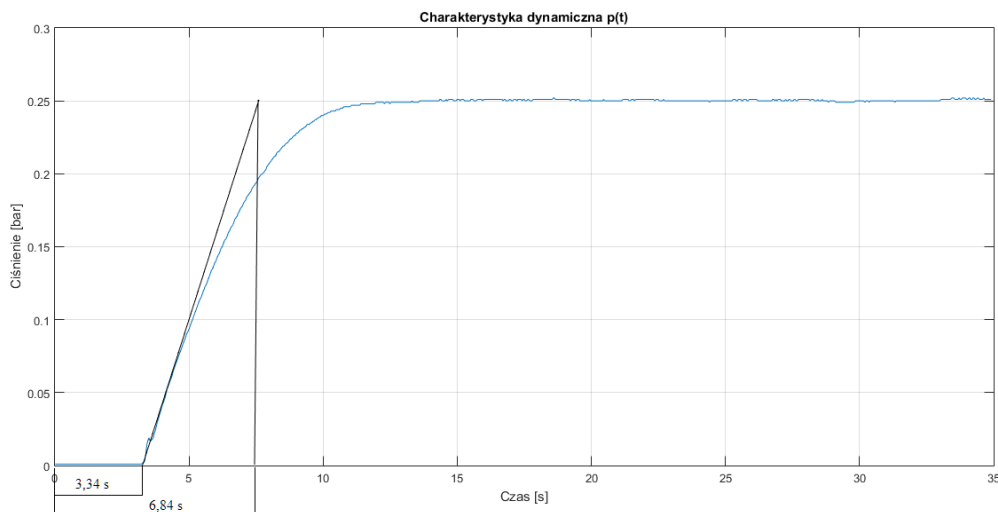
$$G(s) = \frac{k}{Ts + 1} \quad (2.2)$$

Wzmocnieniem k_z w transmitancji zbiornika jest stosunek wartości wyjściowej do wejściowej, a więc ciśnienia do natężenia przepływu. Maksymalne ciśnienie możliwe do zarejestrowania w układzie wynosi według dokumentacji technicznej 0,275 bar. Wartość natężenia przepływu została wzięta z charakterystyki dynamicznej (Rys. 2.4). Zależność została wyrażona wzorem (2.3).

$$k_z = \frac{p}{Q} = \frac{0,275 [\text{bar}]}{2,73 \left[\frac{l}{\text{min}} \right]} = 0,101 \left[\frac{\text{bar} \cdot \text{min}}{l} \right] \quad (2.3)$$

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

Stała czasowa zbiornika T_z (2.4) została wyznaczona na podstawie charakterystyki dynamicznej ciśnienia (Rys. 2.6).



Rys. 2.6. Charakterystyka dynamiczna $p(Q)$

$$T_z = 6,84 - 3,34 = 3,5[s] \quad (2.4)$$

Transmitancję zbiornika przedstawia wzór (2.5)

$$G_{zbiornik}(s) = \frac{0,101}{3,5s + 1} \quad (2.5)$$

Podczas napełniania zbiornika od dołu, ciecz znajdująca się już wewnątrz zbiornika spowalnia ten proces. Wytwarza się również ciśnienie hydrostatyczne. Zbiornik ma ok. 30 cm wysokości, a więc maksymalne ciśnienie hydrostatyczne znajdującej się w nim cieczy wynosi ok. 0,03 bar. Jest to wielkość o rząd niższa niż maksymalne ciśnienie, które może wygenerować układ i w modelowaniu została pominięta.

2.2.3. Wyznaczenie modelu pompy odśrodkowej

Literatura podaje, że w pewnym przybliżeniu pompę można potraktować jako człon inercyjny. Przy wydajności pompy większej niż połowa wydajności nominalnej jej czołowym aspektem jest inercyjność [5]. Transmitancję takiego członu wyraża się poniższym wzorem (2.6).

$$G_{pompa}(s) = \frac{k_{pom}}{T_{pom}s + 1} \quad (2.6)$$

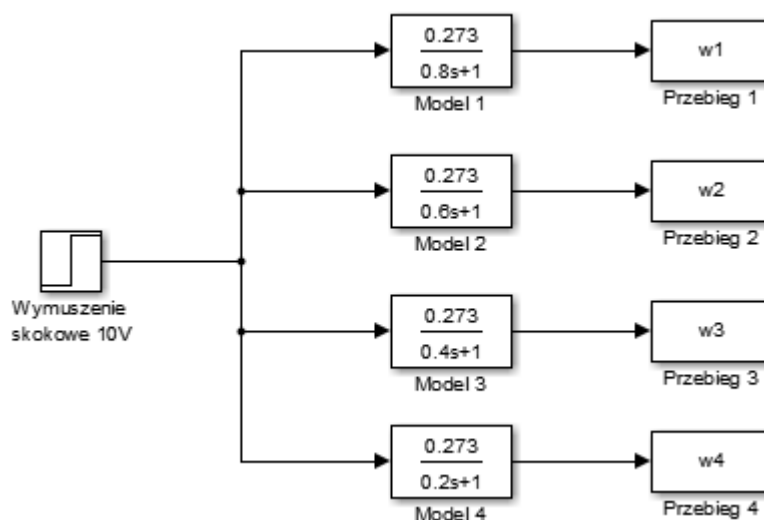
Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

Sygnałem sterującym pompą jest napięcie z zakresu 0-10 V DC, a sygnałem wyjściowym natężenie przepływu w l/min. Wartość natężenia przepływu została wzięta z charakterystyki dynamicznej (Rys. 2.4). Współczynnik wzmocnienia statycznego k_{pom} odpowiada za odpowiednie przeskalowanie sygnału wejściowego z zachowaniem odpowiednich jednostek. Otrzymana wartości umożliwiają obliczenie współczynnika wzmocnienia k_{pom} (2.7).

$$k_{pom} = \frac{Q}{U} = \frac{2,73}{10} = 0,273 \left[\frac{l}{\text{min} \cdot V} \right] \quad (2.7)$$

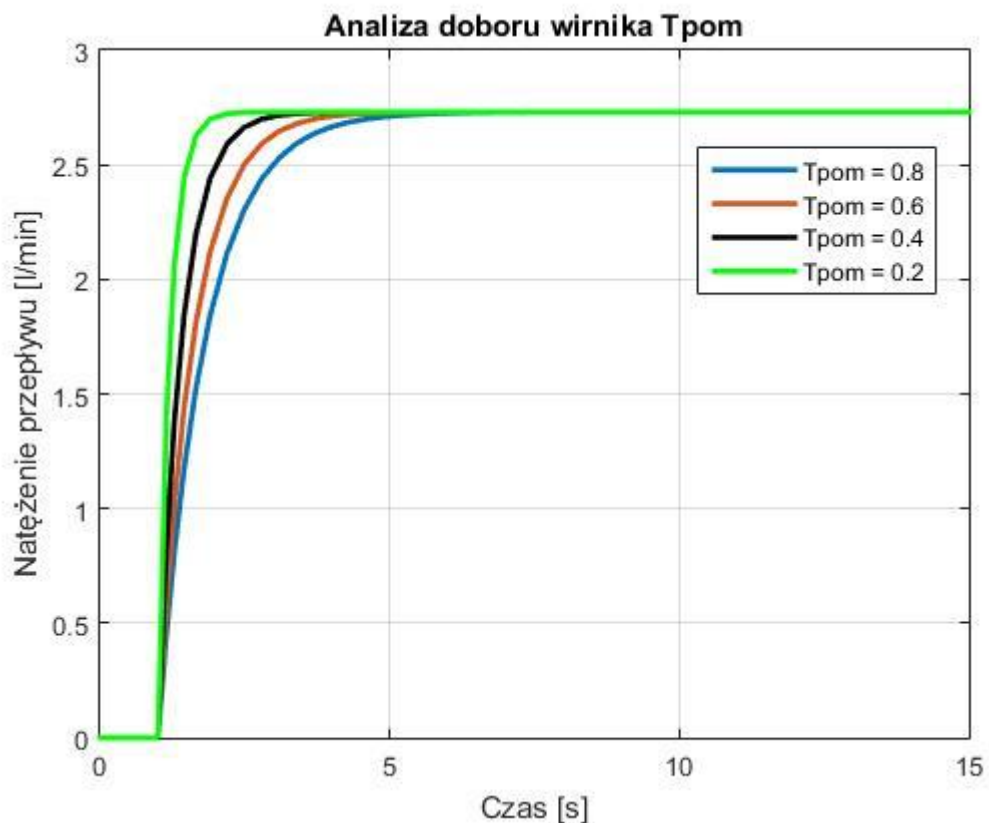
Drugim elementem znajdującym się w transmitancji jest bezwładność wirnika pompy T_{pom} . W dokumentacji technicznej dołączonej do stanowiska nie zawarto jednak informacji o danych tego typu.

Jednym ze sposobów wyznaczenia bezwładności wirnika jest wyliczenie jej za pomocą metody drgań skrętnych. Polega ona na wyznaczeniu bezwładności na podstawie współczynnika sztywności rotacyjnej przy zastosowaniu okresu drgań skrętnych [25]. W niniejszej pracy zastosowano metodę eksperymentalną, analizując odpowiedź modelu pompy na wymuszenie skokowe równe 10 V. Schemat porównawczy zbudowany w środowisku *Simulink* przedstawiona na Rys. 2.7.



Rys. 2.7. Schemat do analizy zachowania się układu przy różnych wartościach T_{pom}

Z przebiegu charakterystyki dynamicznej widać, że sygnał przepływu narasta bardzo gwałtownie i $T_{pom} < 1$ s. Bezwładność wirnika została zatem przedstawiona w czterech zakresach: 0,8 s, 0,6 s, 0,4 s i 0,2 s. Otrzymane odpowiedzi zestawiono na Rys. 2.8.



Rys. 2.8. Analiza wartość bezwładności wirnika T_{pom} wyznaczonego metodą eksperymentalną

Analizując otrzymane powyżej dane i porównując je z rzeczywistym przebiegiem pracy pompy, stwierdzono że bezwładność wirnika $T_{pom} = 0,4$ s. Otrzymana wartość najbardziej odpowiada rzeczywistej charakterystyce pompy.

Ostatecznie transmitancję pompy wraz z wyznaczonymi parametrami wyraża wzór (2.8).

$$G_{pompa}(s) = \frac{0,273}{0,4s + 1} \quad (2.8)$$

2.2.4. Wyznaczenie modelu czujnika ciśnienia

Piezorezystancyjny czujnik ciśnienia traktuję jako człon inercyjny pierwszego rzędu. Jego stała czasowa wynosi 20 ms. Wzmocnienie k_c czujnika zostało wyznaczone z liniowej zależności napięcia od ciśnienia przedstawionego na Rys. 1.6. Zakres napięcia mieści się w granicach od 0 do 10 V DC, a ciśnienia od 0 do 0,4 bar.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

Wyznaczenie współczynnika wzmocnienia (2.9).

$$k_c = \frac{10V}{0,4bar} = 25 \left[\frac{V}{bar} \right] \quad (2.9)$$

Wyznaczenie stałej czasowej (2.10).

$$T_c = 20ms = 0,02s \quad (2.10)$$

Transmitancja czujnika (2.11).

$$G_{czujnik}(s) = \frac{25}{0,02s + 1} \quad (2.11)$$

2.2.5. Wyznaczenie modelu przewodów przepływowych

Ciecz w układzie transportowana jest od pompy do zbiornika przy pomocy układu przewodów hydraulicznych. W jego skład wchodzi odcinki proste, zawory ręczne, rozdzielacze oraz kolanka. Elementy są wykonane z tworzywa sztucznego PE. Podczas modelowania połączenie jest traktowane jako sztywny przewód o jednakowej średnicy.

Wymienione elementy mogą powodować w układzie powstawanie zakłóceń oraz opóźnień. Jednym z efektów takiego działania może być zmniejszenie natężenia przepływu cieczy w rurociągu.

Do zamodelowania przepływu płynu w stanie ustalonym można posłużyć się równaniem Bernoulliego. Jego interpretacja informuje, że w ruchu ustalonym cieczy idealnej energia poruszających się w strudze cząstek płynu jest stała (2.12) [4].

$$E = \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + hz = const \quad (2.12)$$

Po podzieleniu obu stron równania przez przyspieszenie ziemskie g otrzymano wzór (2.13).

$$\frac{\alpha v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (2.13)$$

Człony wzoru oznaczają kolejno wysokości prędkości, ciśnienia i położenia wyrażone w [m].

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

Równanie rozpatruje przepływ cieczy doskonałej, a więc nielepkiej i nieściśliwej. Modelując rzeczywisty przepływ należy uwzględnić lepkość płynu i wynikające z niej opory. Ciecz traci wtedy energię mechaniczną na ich pokonanie. W równaniu Bernoulliego należy uwzględnić wtedy sumę wysokości strat h_s . Jest to suma strat hydraulicznych linowych występujących na długości przewodu oraz strat miejscowych, które występują na kolanku lub zaworze [14]. Rozszerzone równanie Bernoulliego ma następującą postać (2.14).

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \Sigma h_s \quad (2.14)$$

Podczas projektowania układu sterowania należy uwzględnić zmianę parametrów w czasie. Modelowanie z wykorzystaniem równania Bernoulliego wykorzystuje się do modelowania w stanie ustalonym, a więc modeli statycznych. Nie jest to zatem najefektywniejsze rozwiązanie.

Jednym ze sposobów modelowania przepływu cieczy jest potraktowanie rurociągu jako członu opóźniającego [10, 12]. Za potwierdzeniem takiego wyboru modelu dynamicznego przemawia niewielkie ciśnienie występujące w układzie oraz fakt, że modelowana linia jest odcinkiem o małej długości, nie wprowadzającym znaczących zmian w układzie. Transmitancję takiego członu przedstawia wzór (2.15).

$$G_{przewód}(s) = ke^{-Ts} \quad (2.15)$$

Opóźnienie T będzie opóźnieniem wynikającym z czasu przepływu cieczy przez rurociąg. Współczynnik wzmocnienia k wyraża straty występujące na przepływie.

Stałą T można wyznaczyć na podstawie czasu potrzebnego na przepływ cieczy przez rurociąg. Wykorzystano do tego jeden z podstawowych wzorów fizycznych (2.16):

$$T = \frac{s}{v} \quad (2.16)$$

gdzie:

s - jest długością przewodu [s],

v - prędkością przepływu płynu przez przewód [m/s].

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

Założyć można, że jest to prędkość średnia, którą dla ruchu turbulentnego wyraża wzór (2.17).

$$v_{sr} = 0,83 v_{\max} \quad (2.17)$$

Założenie występowania ruchu turbulentnego wynika z obliczenia granicznej prędkości dla przepływu laminarnego (2.18). Można ją wyznaczyć korzystając z krytycznej liczby Reynoldsa (2.19).

Wyznaczenie prędkości granicznej

$$v_{gr} = 2320 \frac{\nu}{d} = 2320 \frac{0,89 \cdot 10^{-6}}{0,015} = 0,138 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.18)$$

Liczba Reynoldsa (2.19):

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (2.19)$$

gdzie: v - prędkość charakterystyczna płynu (m/s), l - wymiar charakterystyczny zagadnienia (m), ν – lepkość kinematyczna płynu (m²/s). W badanym układzie jako lepkość kinematyczną przyjmuje się lepkość kinematyczną wody w temperaturze 25°C, a jako wymiar charakterystyczny średnicę rurociągu w układzie $d = 0,015$ m.

Znając prędkość graniczną oraz mając daną średnicę przewodu obliczono wartość granicznego natężenia przepływu (2.20).

$$Q_{gr} = v_{gr} \cdot A = 0,138 \cdot \pi \frac{0,015^2}{4} = 2,44 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (2.20)$$

Po zamianie otrzymanego z wzoru (2.20) granicznego natężenia przepływu na l/min otrzymano wartość przepływu równą 1,46 l/min. Na tej podstawie można wywnioskować, że charakter przepływu będzie w dużej mierze burzliwy.

Prędkość maksymalna (2.17) jest prędkością maksymalną przy maksymalnym natężeniu pompy. Wartość prędkości średniej została wyznaczona z powyższego wzoru (2.21) [14].

$$v_{sr} = 0,83 \frac{4Q_{\max}}{\pi d^2} = 0,83 \frac{4 \cdot (0,00007)}{\pi \cdot 0,015^2} = 0,33 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.21)$$

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

W powyższym wzorze (2.21) uwzględniono przeliczenia jednostek natężenia przepływu z l/min na m^3/s . Związek prędkości rzeczywistej z prędkością średnią wyraża wzór (2.22).

$$v_{rz} = \alpha_v v_{sr} \quad (2.22)$$

Współczynnik α_v dobiera się z zakresu $\langle 0,96; 0,99 \rangle$. W obliczeniach przyjęto jego graniczną górną wartość. Wartość prędkości rzeczywistej przedstawia wzór (2.23) [14].

$$v_{rz} = 0,99 \cdot 0,33 = 0,327 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.23)$$

Obliczona wartość prędkości z (2.23) umożliwia wyznaczenie stałej czasowej T przy długości przewodu równej 1,1 m.

$$T = \frac{l}{v_{rz}} = \frac{1,1}{0,327} = 3,36[s] \quad (2.24)$$

Z obliczeń widać, że wartość opóźnienia (2.21) podczas przepływu wynosi ponad 3 s.

Wartość wzmocnienia statycznego można wyliczyć na podstawie równania Bernoulliego (2.14). Prędkość wejściowa jest wtedy prędkością maksymalną jaką może wygenerować pompa. Na tej podstawie stwierdzono, że w przepływie w układzie będzie miał charakter turbulentny. Wiąże się to z doбором współczynnika Coriolisa α . Jest to stosunek energii rzeczywistej do energii średniej występującej podczas przepływu. Wartości współczynników α_1 i α_2 wynoszą 1,026, ponieważ wybrano ich graniczną wartość dla przepływu burzliwego z zakresu $\langle 1,26; 1,08 \rangle$ [14].

Kolejnym etapem podczas modelowania rurociągu jest obliczenie sumy strat na podstawie strat liniowych (w oparciu o wzór Darcy-Weisbacha) (2.25) oraz strat miejscowych (2.26).

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} [m] \quad (2.25)$$

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g} [m] \quad (2.26)$$

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

Straty należy wówczas obliczyć dla siedmiu odcinków prostych oraz pięciu kolanek. Do obliczeń wykorzystano prędkość rzeczywistą obliczoną w (2.23).

Współczynnik oporu dla łuków kołowych ζ można obliczyć ze wzoru Weisbacha (2.27) [14].

$$\zeta = \left[0,131 + 0,159 \left(\frac{d}{R} \right)^{3,5} \right] \frac{\delta}{180^\circ} \quad (2.27)$$

Współczynnik oporu (2.28) będzie stały, ponieważ wszystkie 5 kolanek jest identycznych. Straty na pojedynczym kolanku wyraża wzór (2.29), a całkowitą sumę strat miejscowych wzór (2.30).

$$\zeta = \left[0,131 + 0,159 \left(\frac{0,015}{0,04} \right)^{3,5} \right] \frac{90^\circ}{180^\circ} = 0,068 \quad (2.28)$$

$$h_m = 0,068 \frac{0,327^2}{2 \cdot 9,81} = 0,000371 [m] \quad (2.29)$$

$$\Sigma h_m = 0,00186 [m] \quad (2.30)$$

Wyznaczenie współczynnika strat liniowych jest bardzo często kłopotliwe. Wykorzystuje się do tego kilka wzorów empirycznych w zależności od liczby Reynoldsa [4, 14]. Nową liczbę Reynoldsa, przyjętą do obliczania strat liniowych przedstawia wzór (2.31).

$$\text{Re} = \frac{v_{rz} d}{\nu} = \frac{0,327 \cdot 0,015}{0,89 \cdot 10^{-6}} = 5506 \quad (2.31)$$

Dla tej wartości można skorzystać ze wzoru Blasiusa (2.32) [14], ponieważ podana wartość mieści się w wyznaczonym przedziale $\langle 4 \cdot 10^3; 1 \cdot 10^5 \rangle$, a rury plastikowe mają bardzo małą chropowatość. Wartość współczynnika strat liniowych przedstawia wzór (2.33).

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad (2.32)$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{5506^{0,25}} = 0,0367 \quad (2.33)$$

Korzystając ze wzoru (2.25) obliczono wartość h_l . Stary liniowe obliczono dla sześciu przewodów: trzech o długości 0,1 m, jednemu o długości 0,2 m, jednemu o długości 0,25 m i jednemu o długości 0,35 m (2.34).

$$\begin{aligned} h_{l1,2,3} &= 0,0367 \frac{0,10}{0,015} \cdot \frac{0,327^2}{2 \cdot 9,81} = 0,00133[m] \\ h_{l4} &= 0,0367 \frac{0,20}{0,015} \cdot \frac{0,327^2}{2 \cdot 9,81} = 0,00134[m] \\ h_{l5} &= 0,0367 \frac{0,25}{0,015} \cdot \frac{0,327^2}{2 \cdot 9,81} = 0,00333[m] \\ h_{l6} &= 0,0367 \frac{0,35}{0,015} \cdot \frac{0,327^2}{2 \cdot 9,81} = 0,00467[m] \end{aligned} \quad (2.34)$$

Całkowita suma strat liniowych wynosi (2.35).

$$\Sigma h_l = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 = 0,0107[m] \quad (2.35)$$

Uwzględniając wzory (2.30) i (2.35) można wyliczyć całkowitą sumę strat wyrażoną wzorem (2.36).

$$\Sigma h_s = \Sigma h_l + \Sigma h_m = 0,0107 + 0,00186 = 0,0126[m] \quad (2.36)$$

Podstawiając obliczone wartości do wzoru (2.14) można wyliczyć prędkość na końcu przewodu, a następnie współczynnik k_{przew} jako jej stosunek do prędkości na początku przewodu.

Innym sposobem jest obliczenie współczynnika k_{przew} na podstawie przepływu rzeczywistego wyznaczonego z pomiarów, którego wartość na końcu przewodu wynosi 2,48 l/min.

Wzmocnienie statyczne k_{przew} wynosi wtedy:

$$k_{przew} = \frac{2,48 \frac{l}{min}}{2,73 \frac{l}{min}} = 0,91 \quad (2.37)$$

Wstawiając wartości (2.24) i (2.37) do wzoru otrzymano transmitancję przewodu (2.38).

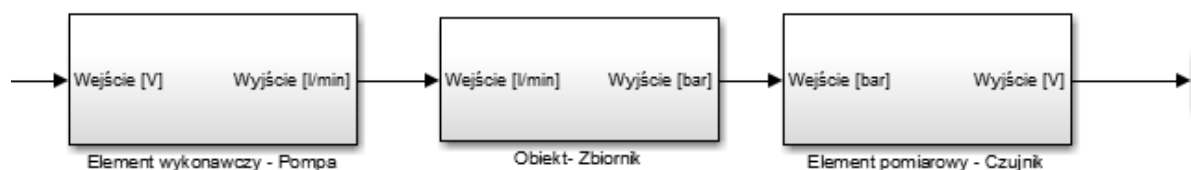
$$G_{\text{przewód}}(s) = 0,91e^{-3,36s} \quad (2.38)$$

2.3. Badania symulacyjne układu otwartego

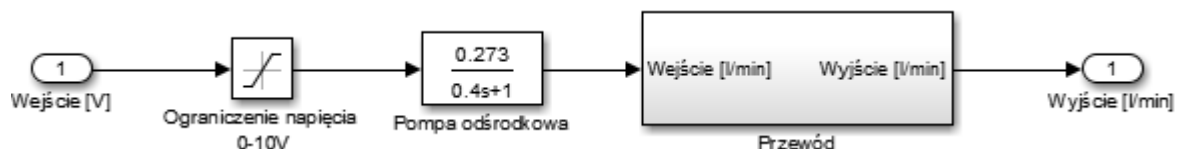
Na podstawie symulacji można zbadać zachowanie się układu na różne wymuszenia oraz przebieg sygnałów wejściowych i wyjściowych w układzie. Pozwoli to na analizę układu otwartego i zamkniętego oraz sprawdzenie takich kwestii jak stabilność układu. W oparciu o symulację można dobrać parametry regulatora PID, co jest kluczową kwestią podczas opracowania układu sterowania ciśnieniem. Symulację przeprowadzono na podstawie rzeczywistego stanowiska *Festo MPA*, a więc niektóre elementy takie jak rodzaj sygnałów, zmienne sterujące czy ilość urządzeń zostały z góry narzucone.

2.3.1. Utworzenie modelu układu w programie *Simulink*

Model symulacyjny został stworzony w oparciu o elementy zamodelowane w rozdziale 2.2. Do utworzenia symulacji wykorzystano środowisko *Matlab/Simulink*. Poszczególne elementy wchodzące w skład układu sterowania zostały przedstawione za pomocą transmitancji operatorowych. Wykorzystano do tego standardowe bloki programu takie jak: *Transfer Function* (zapis transmitancji operatorowej), *Gain* (wzmocnienie), *Transport Delay* (opóźnienie transportowe), *Saturation* (ograniczenie sygnału sterującego pompą). Poniższe rysunki (2.9–2.13) przedstawiają zamodelowanie poszczególnych elementów. Skrypt dotyczący analizy układu przedstawiono w Załączniku nr 2.



Rys. 2.9. Schemat układu otwartego zamodelowanego w programie *Simulink*

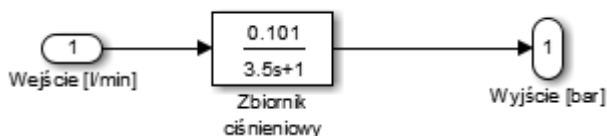


Rys. 2.10. Schemat podsystemu Element wykonawczy- Pompa

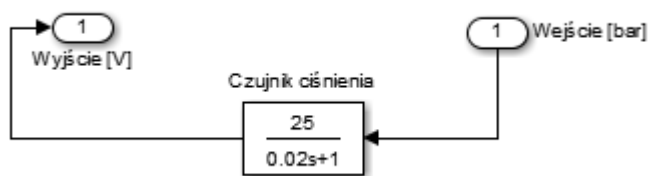
Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC



Rys. 2.11. Schemat podsystemu Przewód



Rys. 2.12. Schemat podsystemu Obiekt- Zbiornik

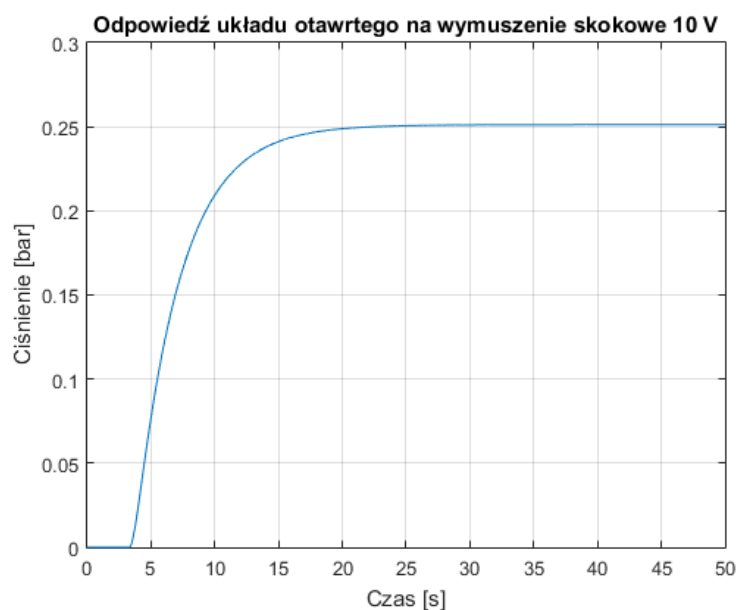


Rys. 2.13. Schemat podsystemu Element pomiarowy- Czujnik

2.3.2. Analiza układu otwartego

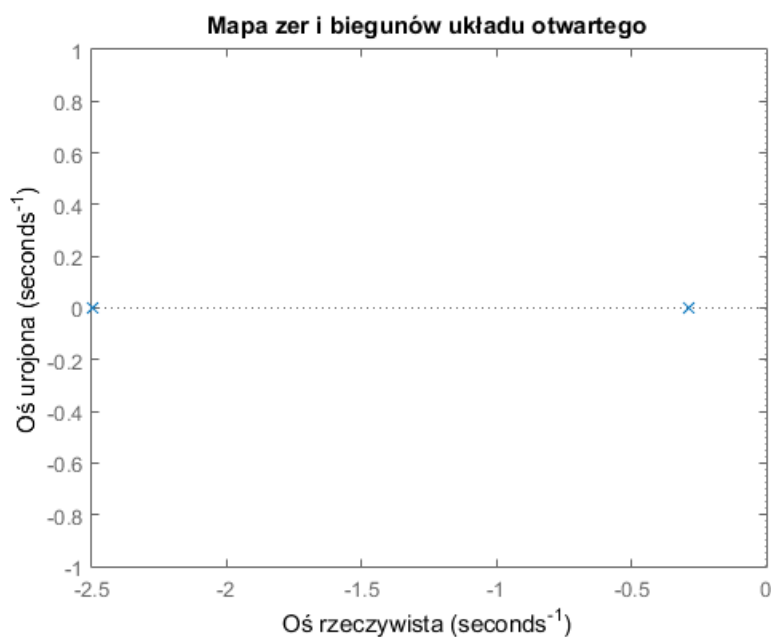
Analizując działanie układu otwartego można sprawdzić jego reakcję na wartość zadaną oraz zbadać stabilność. Rys. 2.15. przedstawia odpowiedź układu otwartego na wymuszenie skokowe maksymalnym sygnałem 10 V. Z przebiegu widać, że po pewnym czasie ciśnienie stabilizuje się na maksymalnym poziomie 0,25 bar, co świadczy o stabilności tego układu.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC



Rys. 2.15. Odpowiedź układu otwartego na wymuszenie skokowe sygnałem 10 V

Kolejnym krokiem jest zbadanie stabilności układu na podstawie map zer i biegunów. Z Rys. 2.16. widać, że kryterium stabilności w tym przypadku zostało również spełnione, ponieważ bieguny znajdują się w lewej półpłaszczyźnie wykresu, czyli po ujemnej stronie osi rzeczywistej [10, 20].



Rys. 2.16. Mapa zer i biegunów układu otwartego

3. DOBÓR REGULATORA PID

Regulator PID (*ang. Proportional- Integral- Derivative Controller*) jest najczęściej stosowanym regulatorem stosowanym do regulacji procesów ciągłych. Jego zadaniem jest utrzymywanie wartości zadanej na stałym poziomie poprzez sprowadzanie do zera uchybu regulacji. Ten typ regulatora stosuje się do regulacji procesów w obiektach, które są poddawane wpływom zakłóceń o dużych i gwałtownych zmianach [18]. Uzasadnia to wybór właśnie takiego regulatora podczas procesu sterowania ciśnieniem.

3.1. Budowa regulatora PID

Regulator PID składa się z członu proporcjonalnego P o wzmacnieniu k_p , członu całkującego I o czasie zdwojenia T_i oraz członu różniczkującego D o czasie wyprzedzenia T_d .

Transmitancja idealnego regulatora PID opisana jest równaniem (3.1):

$$G_{PID}(s) = k_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (3.1)$$

Idealne różniczkowanie jest nierealizowane fizycznie [18].

Transmitancja rzeczywistego regulatora PID (3.2):

$$G_{PID}(s) = k_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{K_d} + 1} \right] \quad (3.2)$$

gdzie K_d jest wzmacnieniem dynamicznym części różniczkującej.

Regulator poprzez zwiększenie akcji proporcjonalnej P jest w stanie szybciej zmniejszyć uchyb regulacji, ale nie jest możliwe sprowadzenie go do zera. Zbyt duże zwiększenie nastawy k_p może jednak doprowadzić do przeregulowania i wprowadzenia oscylacji w układzie, a w rezultacie utratę jego stabilności.

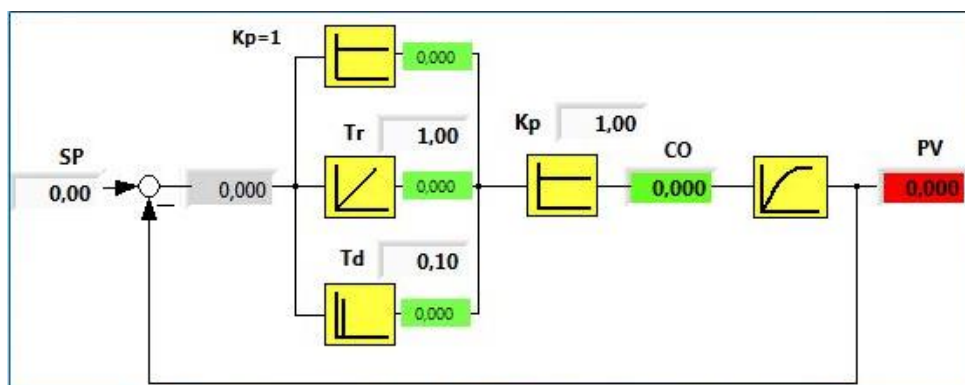
Akcja całkująca I sumuje kolejne uchyby od pewnej wartości sprowadzając je do zera.

Akcja różniczkująca D przeciwdziała szybkim zmianom sygnału błędu, co działa stabilizująco na układ. Umożliwia to intensywniejsze i szybsze działanie pozostałych

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

akcji [18]. Nie zapewnia jednak likwidacji uchybu, zatem ten człon nie może występować samodzielnie [6].

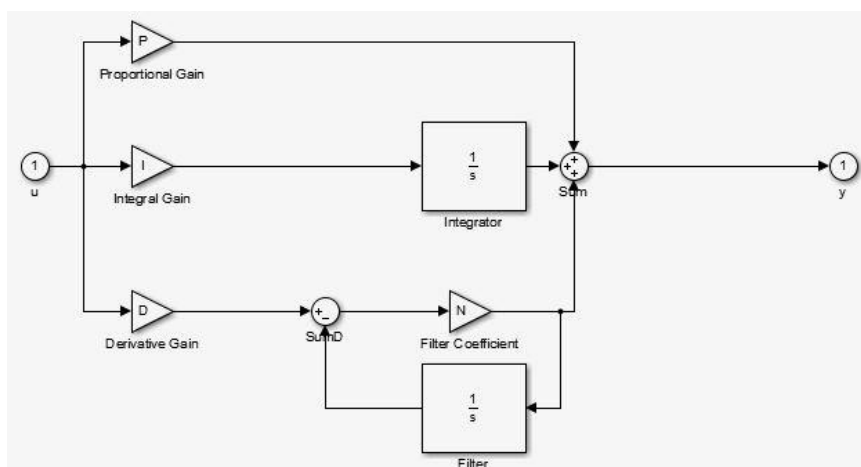
Poniższy rysunek (3.1) przedstawia budowę układu regulacji wykorzystywanego na stanowisku *Festo MPA* z użyciem wbudowanego regulatora PID. Na jego podstawie można stwierdzić, że na stanowisku występuje idealny regulator PID.



Rys. 3.1. Schemat blokowy układu regulacji z regulatorem PID wbudowanym w oprogramowaniu *Fluid Lab*

3.2. Dobór nastaw regulatora PID metodą *Pidtune*

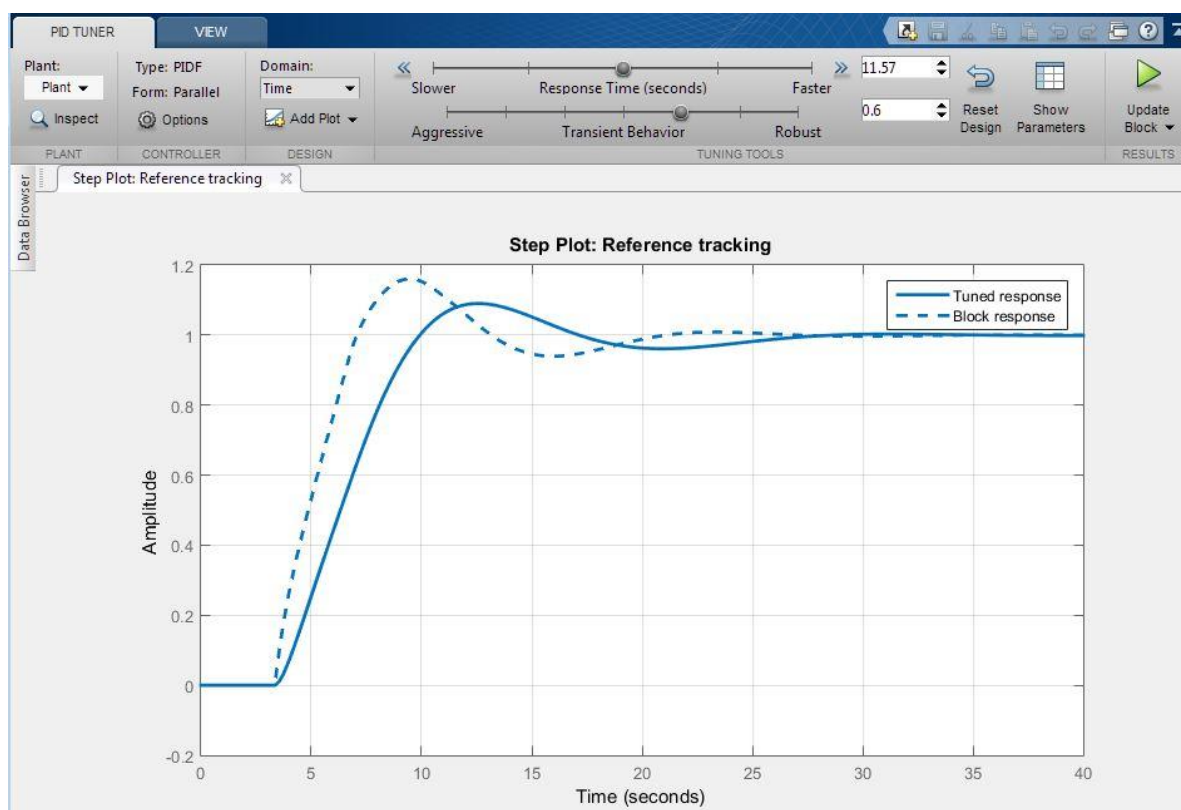
Oprogramowanie *Simulink* zawiera wbudowany blok regulatora PID (*PID Controller*). Budowę regulatora przedstawiono na Rys. 3.2. Widać, że jest to regulator PID rzeczywisty, zawierający stałą różniczkowania, a wzmacnienia podawane są oddzielnie dla każdego z członów (odpowiednio P, I, D). Jego budowa różni się zatem od regulatora występującego na stanowisku *Festo MPA* (Rys. 3.1).



Rys. 3.2. Budowa regulatora PID w środowisku *Matlab/Simulink*

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

Ciekawą i przydatną opcją jest funkcja *Pidtune* (dostrajanie), która umożliwia automatyczne dobranie parametrów regulatora na podstawie przebiegu wykresu funkcji. Linia przerywana przedstawia poprzedni przebieg funkcji, a ciągła aktualnie dostrajany. Parametry są dobierane w zależności od szybkości reakcji układu oraz agresywności lub odporności układu. Pozwala to osiągnąć kompromis pomiędzy czasem narastania sygnału, a charakterem jego odpowiedzi (wyeliminowaniem oscylacji i przeregulowań).



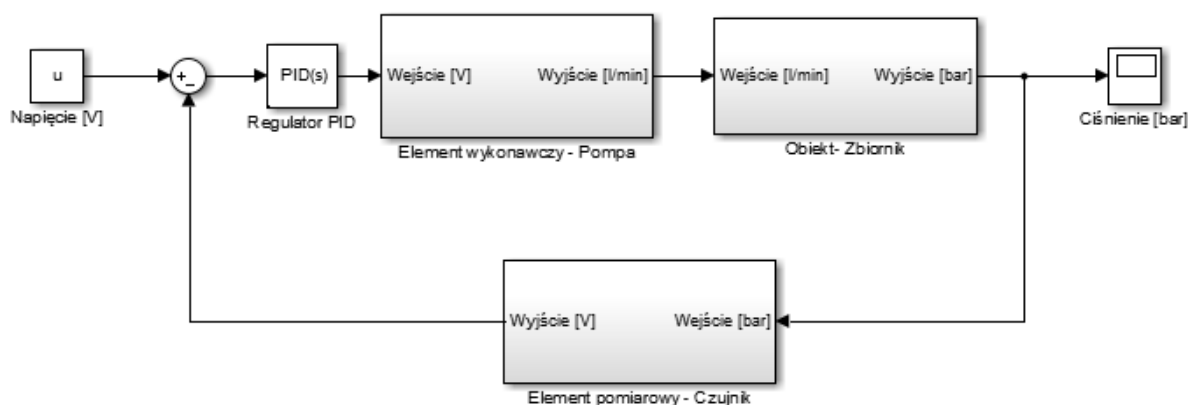
Rys. 3.3. Okno doboru nastaw regulatora PID metodą *Pidtune* w programie *Simulink*

Używając funkcji *Pidtune*, dobrano następujące parametry regulatora PID (3.3).

$$\begin{aligned} P &= 1,41 \\ I &= 0,242 \\ D &= 0,426 \\ N &= 20,71 \end{aligned} \tag{3.3}$$

3.2.1. Przeprowadzenie symulacji z wykorzystaniem dobranych nastaw

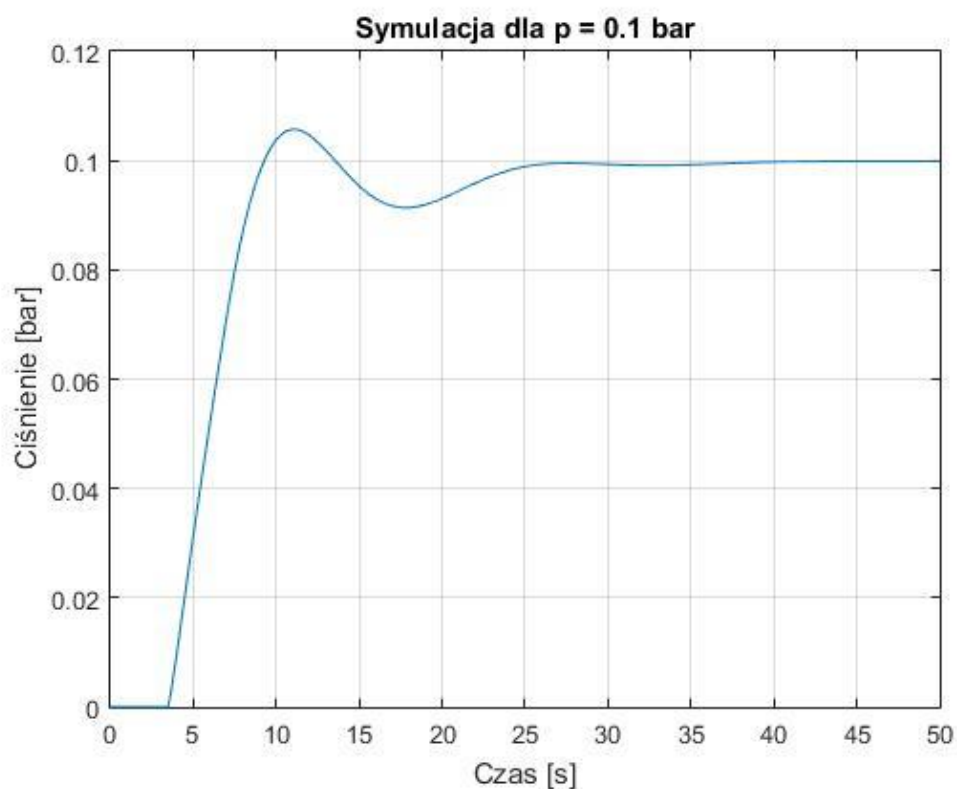
Podczas dokonywania pomiarów, na stanowisku *Festo MPA* jako wartość zadaną podaje się ciśnienie. Wartością zadaną w modelowanym układzie jest natomiast napięcie. Wynika to z faktu, że w rzeczywistości charakterystyka ciśnienia od napięcia jest nieliniowa (Rys. 2.2) i trudno jest tę zależność określić wzorem, aby zastosować odpowiedni przelicznik wartości. Można ją jednak potraktować jako liniową na pewnym przedziale, co wykorzystano podczas symulacji układu. Schemat układu regulacji ciśnienia z regulatorem PID przedstawiono na Rys. 3.4.



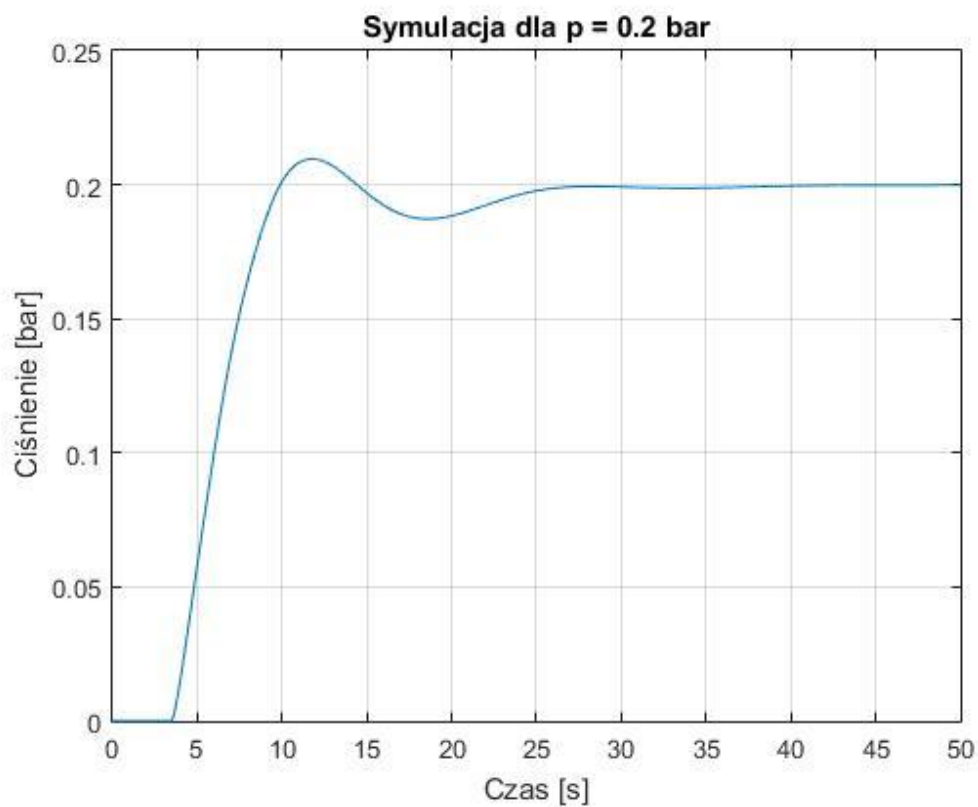
Rys. 3.4. Schemat układu regulacji z regulatorem PID

Symulacja została przeprowadzona dla trzech wartości zadanych ciśnienia (w): 0,1 bar, 0,2 bar i 0,3 bar. W regulatorze wykorzystano nastawy otrzymane we wzorze (3.3).

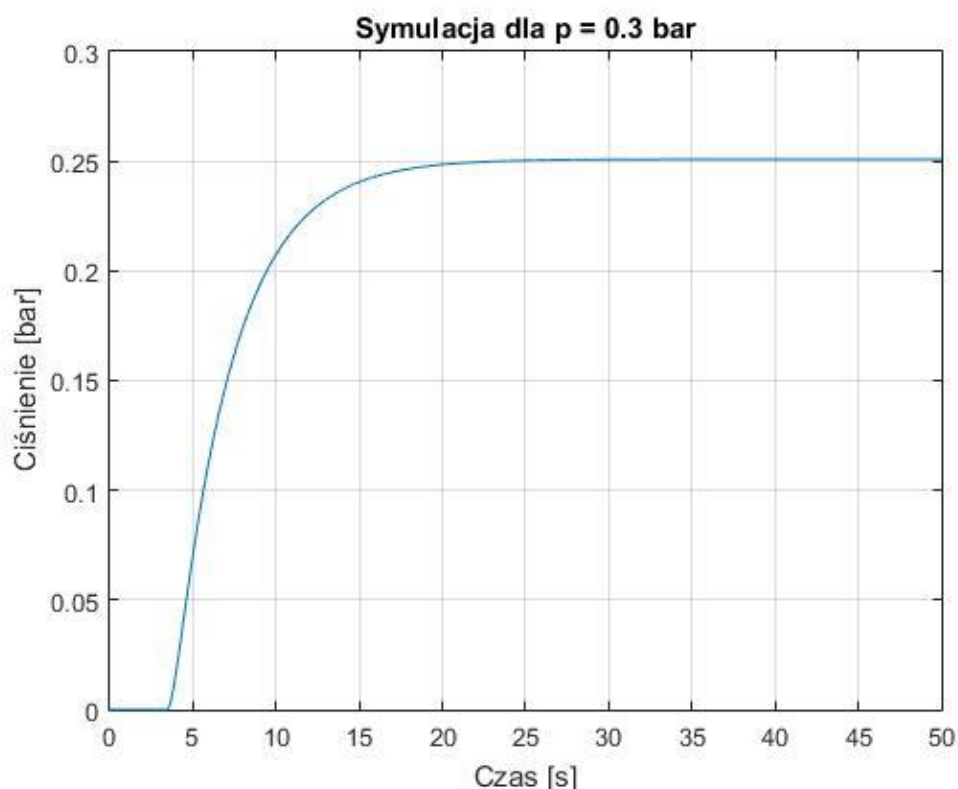
Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC



Rys. 3.5. Przebieg ciśnienia w zbiorniku przy zadanym ciśnieniu $w = 0,1$ bar



Rys. 3.6. Przebieg ciśnienia w zbiorniku przy zadanym ciśnieniu $w = 0,2$ bar



Rys. 3.7. Przebieg ciśnienia w zbiorniku przy zadanym ciśnieniu $w = 0,3$ bar

Z przedstawionych przebiegów symulacyjnych (Rys. 3.5-3.7) widać, że wartości ciśnienia stabilizują się zgodnie z podanymi wartościami zadanymi. Przebieg wielkości regulowanej ciśnienia dla wartości zadanych równych 0,1 bar i 0,2 bar wyglądają podobnie. Z analizy Rys. 3.5-3.7 widać także, że w układzie występuje niewielkie przeregulowanie (5%) oraz brak w nim oscylacji. Układ charakteryzuje się bardzo szybkim czasem narastania (4,5 s). Ciśnienie najlepiej stabilizuje się w przypadku wartości zadanej równej 0,3 bar, jednak widać, że układ maksymalnie osiąga wartość ok. 0,25 bar, co jest zgodne w rzeczywistymi wartościami zarejestrowanymi na stanowisku *Festo MPA*. Pompa pracuje wtedy przy maksymalnym napięciu. Nastawy dobrane metodą *Pidtune* spełniają zatem swoje zadanie dla regulacji ciśnienia w przedstawionej symulacji.

3.3. Wyznaczenie nastaw regulatora PID metodą Zieglera-Nicholsa

Nie zawsze istnieje możliwość doboru nastaw regulatora podczas symulacji. Często dobiera się je metodą prób i błędów. Można również skorzystać z opracowanych już wcześniej metod. Jedną z najprostszych i najczęściej stosowanych metod doboru nastaw jest metoda Zieglera-Nicholsa (Z-N) [11]. Polega ona na ustawieniu regulatora na działanie

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

proporcjonalne (P) w pętli zamkniętej tak by układ sterowania był na granicy stabilności. Wówczas otrzymana wartość wzmocnienia jest wzmocnieniem granicznym k_g , a wynikający z tego okres drgań niegasnących to T_g . Wadą wspomnianej metody jest jednak fakt, że nie każdy układ (np. z powodów technologicznych) można doprowadzić do granicy stabilności. Jednakże w przypadku jej zastosowania w celu wyliczenia poprawnych nastaw regulatora PID stosuje się następujące zależności:

$$\begin{aligned}k_p &= 0,6 k_g \\T_i &= 0,5 T_g \\T_d &= 0,125 T_g\end{aligned}\tag{3.4}$$

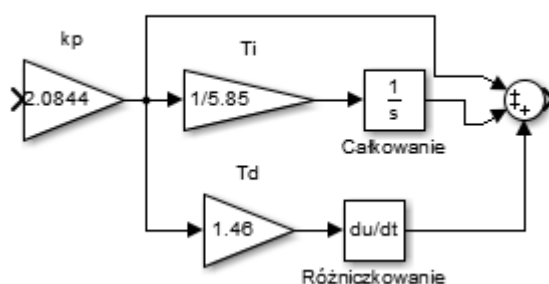
W rozpatrywanym układzie otrzymano następujące wartości wzmocnienia granicznego oraz okresu oscylacji (3.5).

$$\begin{aligned}k_g &= 3,474 \\T_g &= 11,707 s\end{aligned}\tag{3.5}$$

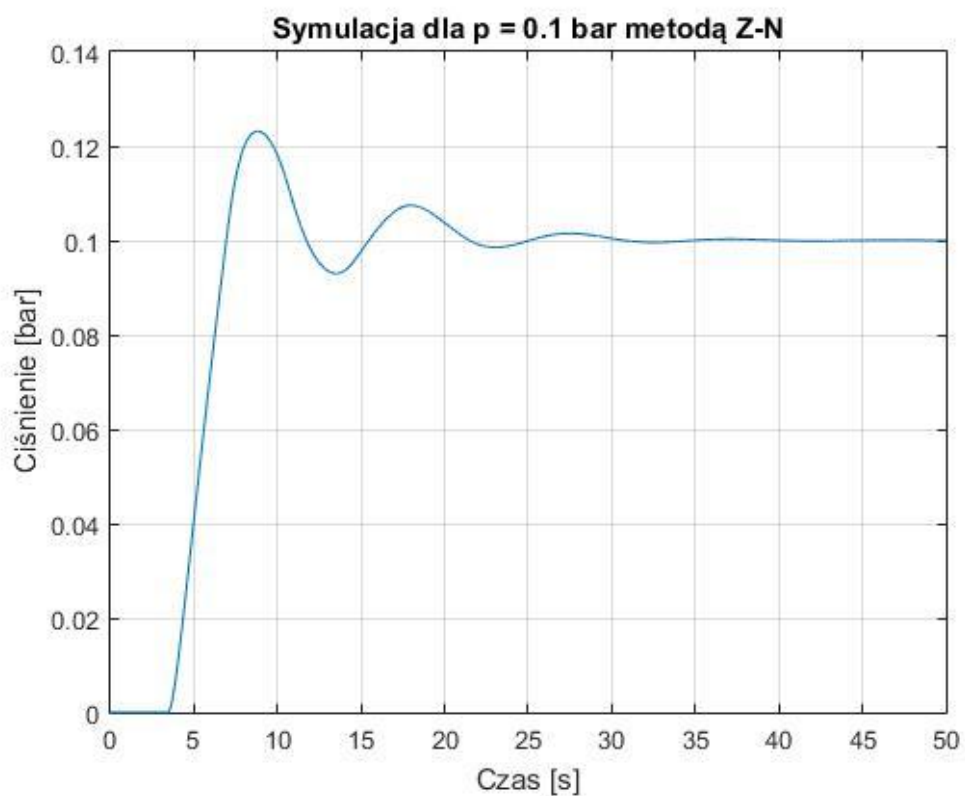
W związku z tym wartości nastaw regulatora PID obliczona metodą Zieglera-Nicholsa są następujące: .

$$\begin{aligned}k_p &= 2,084 \\T_i &= 5,85 s \\T_d &= 1,46 s\end{aligned}\tag{3.6}$$

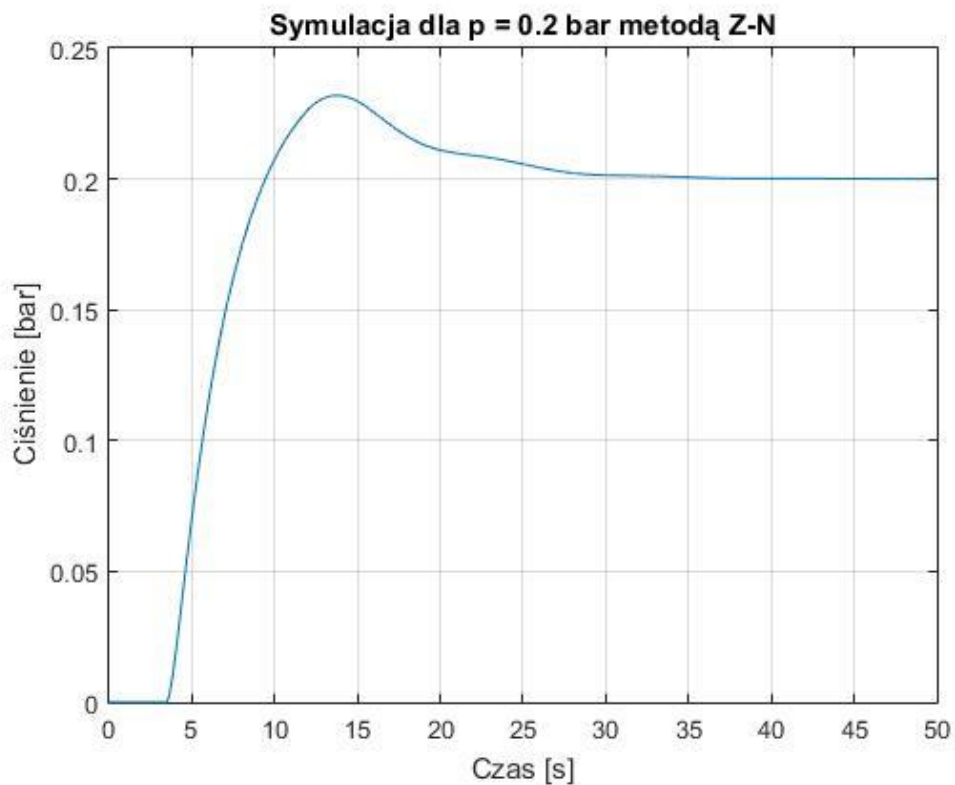
Następnie przeprowadzono symulację układu zamkniętego dla tych samych wartości zadanych ciśnienia równych 0,1 bar, 0,2 bar i 0,3 bar. Schemat blokowy zaprojektowanego regulatora z nastawami dobranymi metodą Zieglera-Nicholsa (Z-N) przedstawia Rys. 3.8.



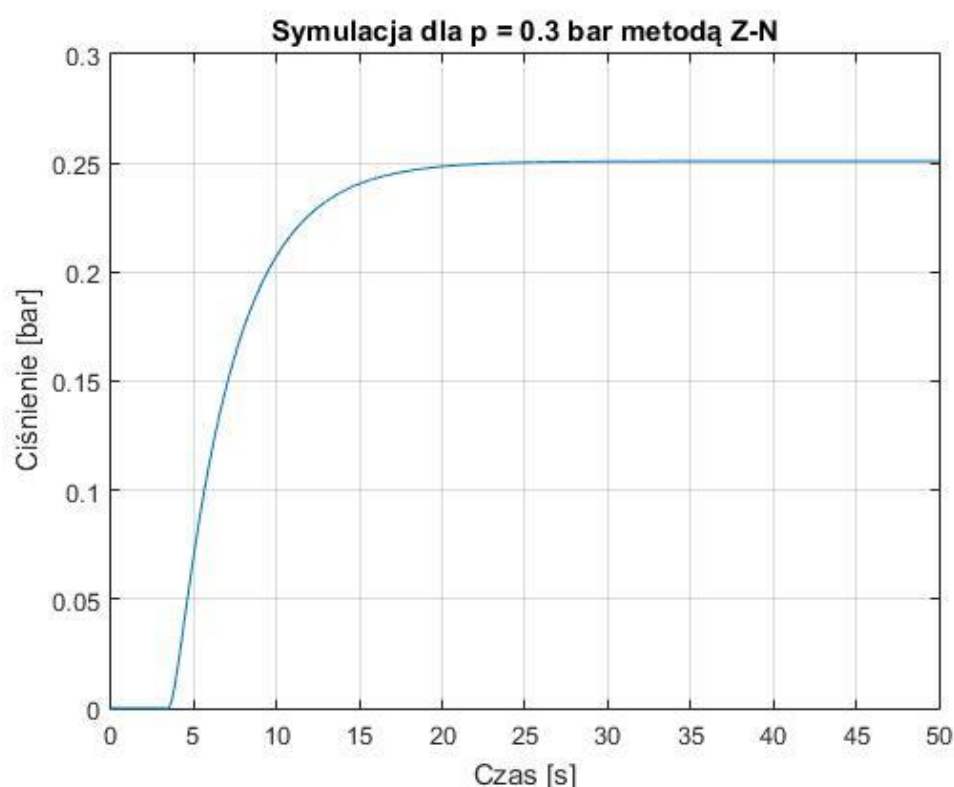
Rys. 3.8. Schemat blokowy regulatora PID z nastawami dobranymi metodą Zieglera-Nicholsa



Rys. 3.9. Przebieg ciśnienia w zbiorniku przy zadanym ciśnieniu $w = 0,1$ bar (Z-N)



Rys. 3.9. Przebieg ciśnienia w zbiorniku przy zadanym ciśnieniu $w = 0,2$ bar (Z-N)



Rys. 3.10. Przebieg ciśnienia w zbiorniku przy zadanym ciśnieniu $w = 0,3$ bar (Z-N)

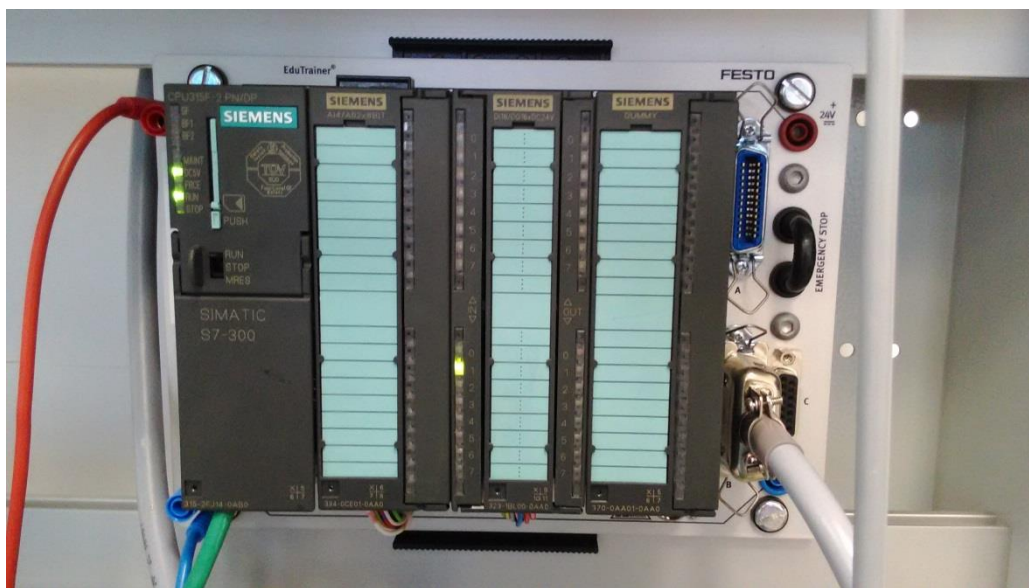
Przebiegi wielkości regulowanej uzyskane w oparciu o wyliczone nastawy regulatora metodą Zieglera-Nicholsa odbiegają od przebiegów ukazanych na Rys. 3.5, Rys. 3.6 i Rys. 3.7, ale wciąż spełniania postawione kryteria sterowania. Przy wartości zadanej ciśnienia 0,1 bar uzyskano czas narastania równy 2,57 s i przeregulowanie na poziomie 23%. Niewielkie oscylacje występujące w układzie regulacji zostały wygaszone po czasie ok. 20 s. W przypadku wartości zadanej równej 0,2 bar czas narastania wyniósł już 4,23 s, a przeregulowanie było równe 16%. Oscylacji drgań nie stwierdzono. Natomiast w przypadku pobudzenia do pracy układu ciśnieniem równym 0,3 bar otrzymany przebieg wielkości regulowanej pokrył się z przebiegiem z nastawami z *Pidtune*. W związku z tym można domniemywać, że obie metody doboru nastaw regulatora są poprawnymi metodami. Skrypt generujący przebiegi symulacyjne z wykorzystaniem regulatora PID z nastawami uzyskanymi metodą Z-N przedstawiono w Załączniku nr 3.

4. IMPLEMENTACJA PRAWA STEROWANIA NA STEROWNIK PLC

Sterownik PLC (*ang. Programmable Logic Controller*) to uniwersalne urządzenie mikroprocesorowe przeznaczone do sterowania pracą maszyny lub urządzenia technologicznego. Cechą tych sterowników jest cykliczny obieg pamięci programu, co odróżnia je od innych sterowników komputerowych [26]. W celu szerszej obsługi danego procesu do sterowników PLC można dołączyć odpowiednie moduły I/O typu analogowego lub cyfrowego, lub urządzenia peryferyjne w postaci paneli operatorskich lub wysp zaworowych. Urządzenia tego typu mogą komunikować się między sobą poprzez protokoły takie jak: MPI, Modbus, Profibus, Profinet lub sieć Ethernet. Sterownik PLC posiada również funkcje obsługi błędów czy diagnostyki w zależności od zaimplementowanego algorytmu działania. Cechy te sprawiają, że są one powszechnie wykorzystywane w automatyce przemysłowej do sterowania różnorodnymi procesami ciągłymi oraz dyskretnymi.

4.1. Sterownik Simatic S7-300 model: CPU 315F-2PN/DP

Do regulacji procesu ciśnienia w zbiorniku wykorzystano sterownik PLC *Simatic S7-300 CPU 315F-2PN/DP* firmy *Siemens* znajdujący się na stanowisku *Festo MPA* (Rys. 4.1).



Rys. 4.1. Sterownik *Simatic S7-300 CPU 315F-2PN/DP* (opracowanie własne)

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

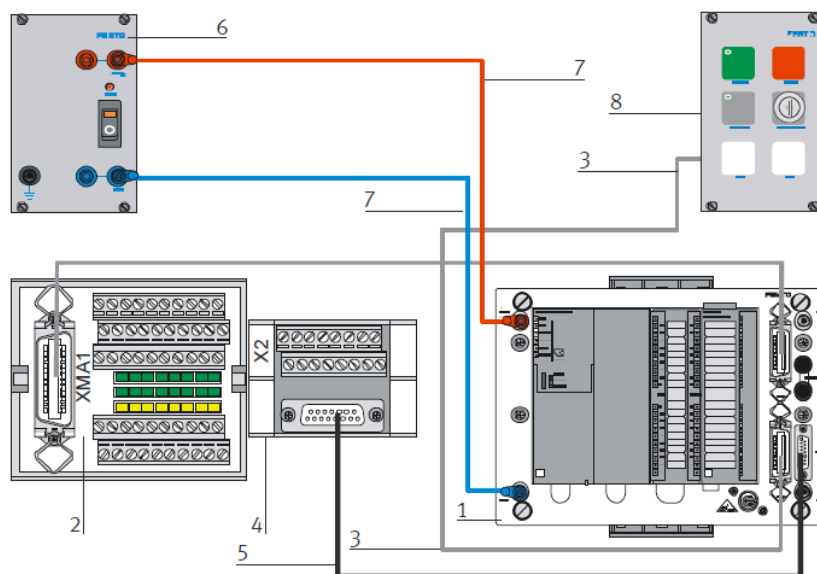
Cechy sterownika *Simatic CPU 315F-2PN/DP* to [23]:

- interfejs MPI (*ang. Message Passing Interface*),
- możliwość pracy w trybie Master lub Slave,
- funkcje:
 - obsługa liczników i timerów,
 - regulacja ciągła i dyskretna,
 - pomiar częstotliwości sygnału,
 - generowanie i modulacja sygnałów pulsacyjnych,
- specyfikacja:
 - zasilanie: 24 V DC,
 - 16 cyfrowe wejścia,
 - 16 cyfrowych wyjść,
 - 4 analogowe wejścia,
 - 2 analogowe wyjścia.

Sterownik serii S7-300 składa się z modułu zasilacza, procesora CPU (*ang. Central Processing Unit*) oraz modułów wejść/wyjść i/lub modułów komunikacyjnych i funkcyjnych.. Jest to jeden z najpopularniejszych sterowników PLC wykorzystywany w przemyśle [7]. Sterownik ten został rozszerzony o moduł *SIMATIC S7-300 Dummy*, który może symulować pracę 16 wyjść/wejść oraz posiada 8 dodatkowych wejść/wyjść analogowych [23].

Schemat podłączenia sterownika PLC ze stanowiskiem *Festo MPA* przedstawia Rys. 4.2. Sterownik (1) jest zasilany napięciem 24 V DC i podłączony do zasobnika (6) przy pomocy 4 mm wtyczek śrubowych (7). Z komputerem PC komunikuje się poprzez kabel Ethernet. Cyfrowe sygnały wejściowe i wyjściowe są pobierane ze stanowiska poprzez 24-pinową wtyczkę SysLink IEE448 podłączoną do terminalu wejść/wyjść XMA1 (2). Sygnały analogowe są przesyłane przez 15-pinową wtyczkę D-Sub (5) podłączoną do terminalu wejść/wyjść analogowych X2 (4). Panel operatorski (8) jest podłączony ze sterownikiem przy pomocy 20-pinowej wtyczki SysLink (3).

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC



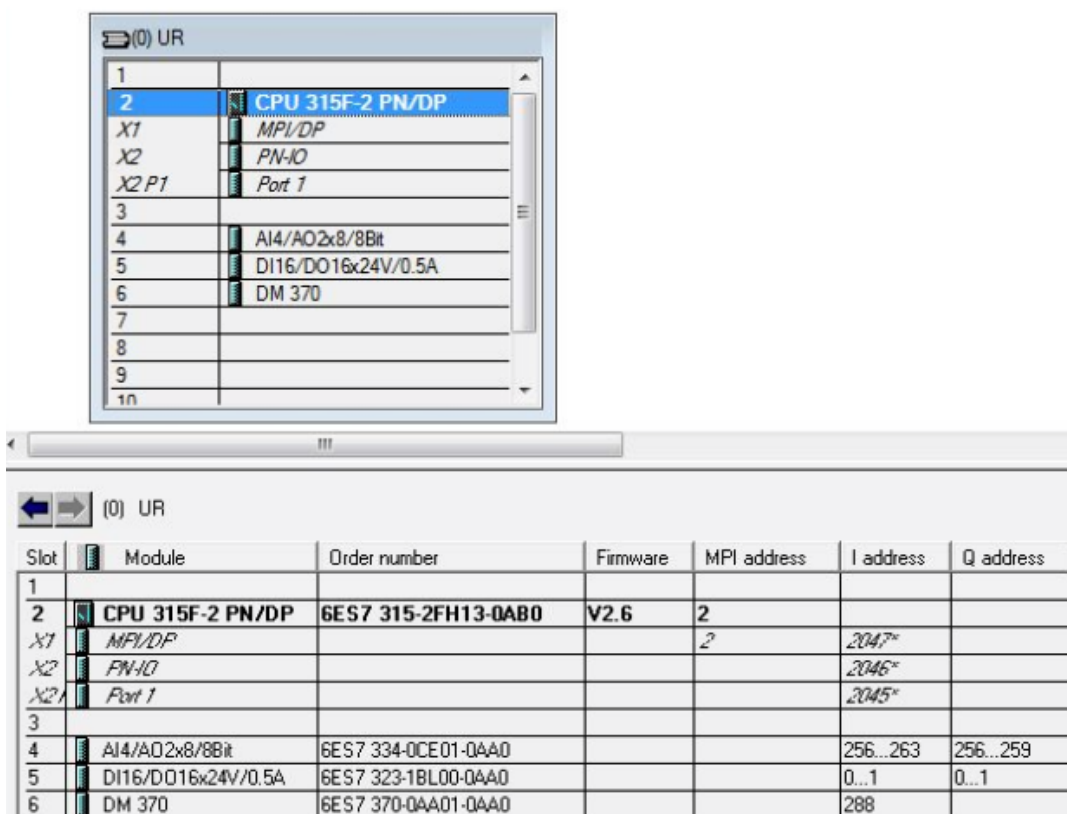
Rys. 4.2. Schemat podłączenia sterownika PLC ze stanowiskiem *Festo MPA*, [3]

4.2. Środowisko programowe i konfiguracja sterownika

Do implementacji programu sterującego wykorzystano dedykowane do sterownika Siemens środowisko *STEP 7*. Wersja oprogramowania to *Simatic Manager V5.5*. Do przedstawienia i zapisu przebiegów wygenerowanych na stanowisku za pośrednictwem sterownika PLC wykorzystano gotową aplikację wizualizacyjną dołączoną do stanowiska *Festo MPA*. Wizualizacja odbyła się w oprogramowaniu *WinCC* kompatybilnym ze sterownikiem.

Przed załadowaniem programu sterującego na urządzenie niezbędna jest odpowiednia konfiguracja sterownika oraz połączonych z nim modułów [13]. Określono również adresy wejść i wyjść ze sterownika. Wejścia *I* przypisane są do adresów 256-263, a wyjścia *Q* przypisane są do adresów 256-259. Sterownik posiada zatem 4 wejścia analogowe i 2 wyjścia analogowe każde wielkości 8 bitów. Konfigurację sprzętową przedstawiono na Rys. 4.3.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC



Slot	Module	Order number	Firmware	MPI address	I address	Q address
1						
2	CPU 315F-2 PN/DP	6ES7 315-2FH13-0AB0	V2.6	2		
X1	MPI/DP			2	2047*	
X2	PN-IO				2046*	
X2 P1	Port 1				2045*	
3						
4	AI4/AO2x8/8Bit	6ES7 334-0CE01-0AA0			256...263	256...259
5	DI16/DO16x24V/0.5A	6ES7 323-1BL00-0AA0			0...1	0...1
6	DM 370	6ES7 370-0AA01-0AA0			288	

Rys. 4.3. Konfiguracja sprzętowa sterownika PLC w programie *Step 7*

4.3. Omówienie programu sterującego na sterowniku PLC

Do procesu regulacji ciśnienia wykorzystano przykładowy program sterujący dołączony do stanowiska. Dokonano w nim pewnych modyfikacji polegających na zaprojektowaniu regulatora PID na sterownik PLC. Istota działania programu opiera się na przesyłaniu sygnałów analogowych z czujników, na podstawie których generowany jest odpowiedni sygnał sterujący ze sterownika na urządzenie wykonawcze (pompę).

Do realizacji programu wykorzystano następujące typy bloków [26]:

- blok organizacyjny OB, który jest interfejsem pomiędzy sterownikiem a programem użytkownika. Poszczególne bloki są uruchamiane poprzez system operacyjny w odpowiedzi na nagłe zdarzenia: przerwania, uruchomienie sterownika lub błędy. Wykonanie programu jest inicjowane poprzez blok OB1, gdzie zapisany jest główny program i wywołania kolejnych bloków.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

- blok funkcyjny FB posiadający pamięć, która umożliwia przypisanie do niego odpowiedniego bloku danych (DB). Podczas kolejnego wywołania funkcja FB pamięta wartość zmiennych z poprzedniego wywołania.
- funkcja FC jest blokiem logicznym, który nie posiada pamięci, tylko wykonuje obliczenia na podstawie argumentów wprowadzanych w formie zmiennych wyjściowych i wejściowych.

4.3.1. Omówienie działania bloku OB1

W niniejszym programie blok OB1 jest inicjowany, gdy włączone są odpowiednie przyciski lub markery powodujące przejście procesora w tryb RUN. Wywoływana jest w nim funkcja FC12, która resetuje wartości początkowe sygnałów analogowych oraz wartość regulowaną. Cykl pracy bloku wynosi 150 ms. Działanie bloku przedstawiono na Rys. 4.4-4.6. Podgląd funkcji FC12 przedstawiono w Załączniku nr 4.

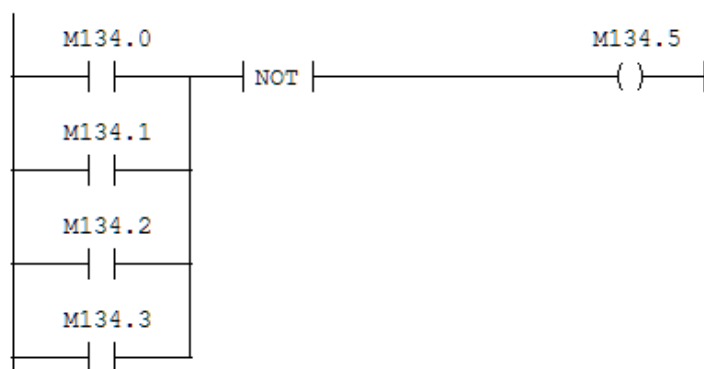
Network 1 : Title:

Otwarcie bloku danych DB10



Network 2 : Title:

Ustawienie markera sygnalizującego uruchomienie jednego z 4 obwodów

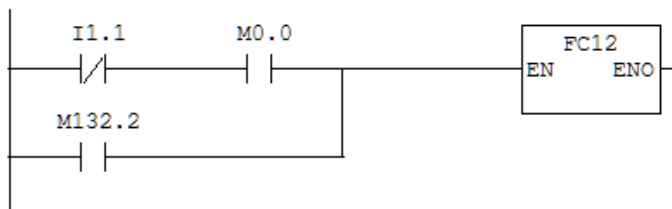


Rys. 4.4. Podgląd bloku OB1 (część 1. - opracowanie własne)

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

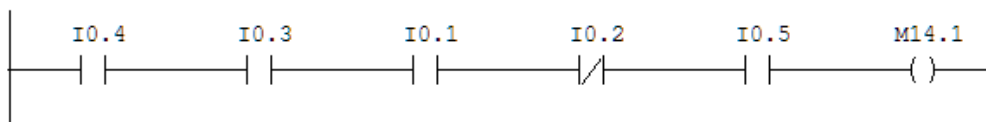
Network 3 : Title:

Uruchomienie funkcji resetującej FC12



Network 4 : Title:

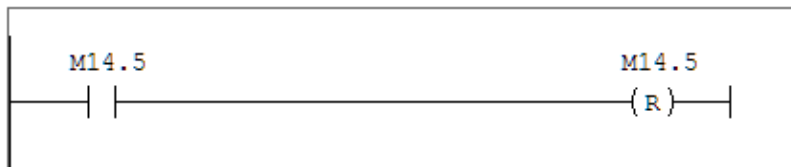
Ustawienie markera sygnalizującego włączenie przycisków na panelu



Rys. 4.5. Podgląd bloku OB1 (część 2. - opracowanie własne)

Network 5 : Title:

Marker uruchomienia cyklu programu. Po zakończeniu cykl jest wyłączany i uruchamiany ponownie



Rys. 4.6. Podgląd bloku OB 1 (część 3. - opracowanie własne)

4.3.2. Omówienie działania bloku OB35

Blok OB35 jest to blok organizacyjny przerwań cyklicznych, które definiuje się podczas konfiguracji sprzętowej. W niniejszym programie cykl przerwań wynosi 100 ms. Jest on uruchamiany równolegle z blokiem OB1 podczas startu pracy sterownika. W tym bloku znajduje się blok FB41 (Rys. 3.9-3.10), który odpowiada za regulację procesu ciągłego oraz przypisany do niego blok danych DB10 (Rys. 3.11-3.12), gdzie znajdują się zmienne wejściowe i wyjściowe wykorzystane podczas regulacji [15, 22]. Bloki *MOVE* przenoszą dane z czujników analogowych w zależności od wybranego obwodu do zmiennej reprezentującej aktualną wartość regulowanego sygnału (Rys. 3.7-3.8). Cykl pracy bloku FB41 wynosi 50 ms.

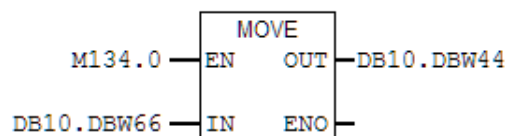
Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

OB35 : Title:

Comment:

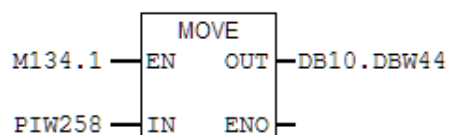
Network 1: Title:

Przeniesienie analogowego sygnału poziomu



Network 2: Title:

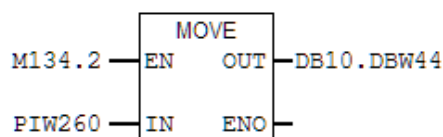
Przeniesienie analogowego sygnału przepływu



Rys. 4.7. Podgląd bloku OB35 (część 1. – opracowanie własne)

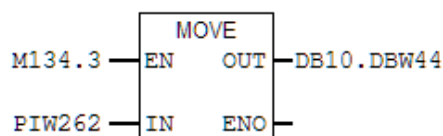
Network 3: Title:

Przeniesienie analogowego sygnału ciśnienia



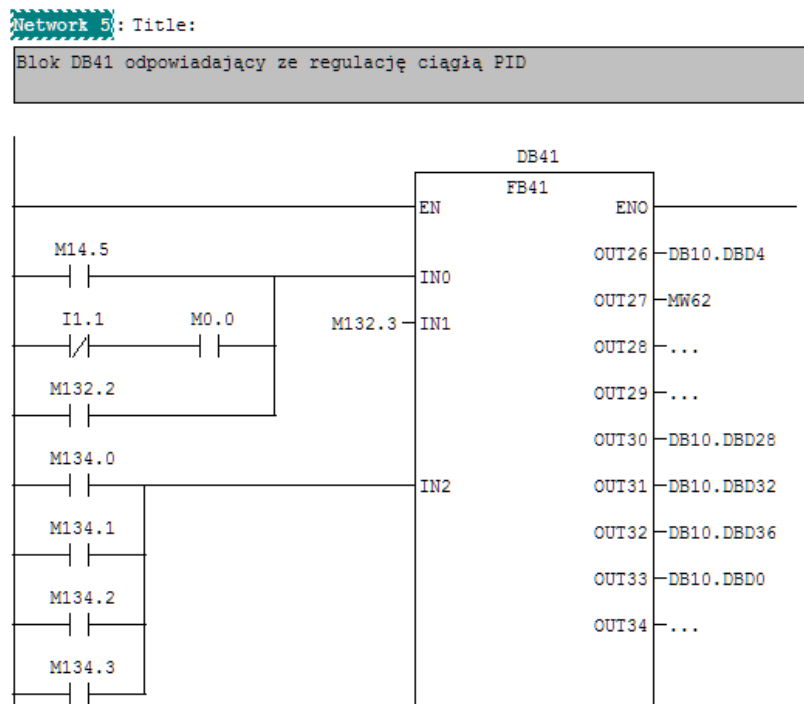
Network 4: Title:

Przeniesienie analogowego sygnału temperatury

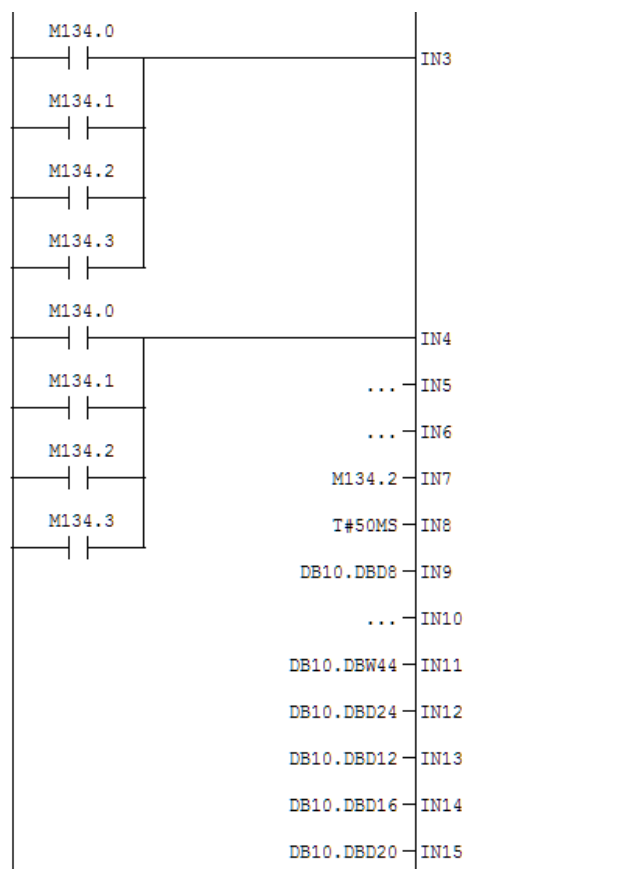


Rys. 4.8. Podgląd bloku OB35 (część 2. – opracowanie własne)

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC



Rys. 4.9. Podgląd bloku FB41 (część 1. – opracowanie własne)



Rys. 4.10. Podgląd bloku FB41 (część 2. – opracowanie własne)

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	STAT0	REAL	0.000000e+000	wartość mierzona PV
+4.0	STAT1	REAL	0.000000e+000	wartość zadana SP
+8.0	STAT2	REAL	4.000000e-001	sygnał sterujący CO
+12.0	STAT3	REAL	1.400000e+001	kp
+16.0	STAT4	TIME	T#0MS	Tr
+20.0	STAT5	TIME	T#0MS	Td
+24.0	STAT6	REAL	0.000000e+000	wartość SP po restarcie
+28.0	STAT7	REAL	0.000000e+000	skalowanie poziomu
+32.0	STAT8	REAL	0.000000e+000	skalowanie przepływu
+36.0	STAT9	REAL	0.000000e+000	skalowanie temperatury
+40.0	STAT10	REAL	4.000000e+001	skalowanie ciśnienia
+44.0	STAT11	WORD	W#16#0	aktualna wartość sygnału analogowego
+46.0	STAT12	REAL	0.000000e+000	komponent P/poziom
+50.0	STAT13	REAL	0.000000e+000	komponent I
+54.0	STAT14	REAL	0.000000e+000	komponent D/przepływ
+58.0	STAT15	REAL	0.000000e+000	ciśnienie
+62.0	STAT16	REAL	0.000000e+000	temperatura
+66.0	STAT17	INT	0	
=68.0		END_STRUCT		

Rys. 4.11. Opis zmiennych bloku danych DB10

Address	Name	Type	Initial value	Actual value	Comment
0.0	STAT0	REAL	0.000000e+000	18.05556	
4.0	STAT1	REAL	0.000000e+000	49.82281	
8.0	STAT2	REAL	5.000000e+001	25.0	
12.0	STAT3	REAL	1.400000e+000	1.41	
16.0	STAT4	TIME	T#5S800MS	T#5s820ms	
20.0	STAT5	TIME	T#300MS	T#300ms	
24.0	STAT6	REAL	0.000000e+000	0.0	
28.0	STAT7	REAL	0.000000e+000	9.791667	
32.0	STAT8	REAL	0.000000e+000	40.40605	
36.0	STAT9	REAL	0.000000e+000	-0.3749025	
40.0	STAT10	REAL	0.000000e+000	40.0	
44.0	STAT11	WORD	W#16#0	W#16#1380	
46.0	STAT12	REAL	0.000000e+000	0.0	
50.0	STAT13	REAL	0.000000e+000	0.0	
54.0	STAT14	REAL	0.000000e+000	0.1041667	
58.0	STAT15	REAL	4.000000e-002	0.07222223	
62.0	STAT16	REAL	0.000000e+000	18.98148	
66.0	STAT17	INT	0	0	

Rys. 4.12. Podgląd zmiennych w czasie rzeczywistym w bloku danych DB10

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

Tab. 4.1. Zmienne wykorzystane w programie sterującym

Adres zmiennej	Typ zmiennej	Opis zmiennej
I0.1	Bool	Start
I0.2	Bool	Stop
I0.3	Bool	Sterowanie ręczne/automatyczne
I0.4	Bool	Włączanie czujnika minimalnego poziomu cieczy w zbiorniku
I0.5	Bool	Włączenie czujnika maksymalnego poziomu cieczy w zbiorniku
I1.1	Bool	Przycisk awaryjny
M0.0	Bool	Marker uruchamiający FC12
M14.1	Bool	Marker uruchomienia stanowiska panelem operatorskim
M14.5	Bool	Marker uruchomienia cyklu programu
M132.2	Bool	Marker panelu operatorskiego
M134.0	Bool	Marker wyboru obiegu poziomu
M134.1	Bool	Marker wyboru obiegu przepływu
M134.2	Bool	Marker wyboru obiegu ciśnienia
M134.3	Bool	Marker wyboru obiegu temperatury
M134.5	Bool	Marker uruchomienia jednego z obwodów
PIW256	Peripheral Input Word	Analogowy sygnał poziomu
PIW258	Peripheral Input Word	Analogowy sygnał przepływu
PIW260	Peripheral Input Word	Analogowy sygnał ciśnienia
PIW262	Peripheral Input Word	Analogowy sygnał temperatury
PQW256	Peripheral Output Word	Sygnał sterujący pompą
PQW258	Peripheral Output Word	Sygnał sterujący zaworem proporcjonalnym
DB10.DB0	Real	Wartość mierzona PV
DB10.DB4	Real	Wartość zadana SP
DB10.DB8	Real	Sygnał sterujący CO
DB10.DB12	Real	Wzmocnienie K_p
DB10.DB16	Time	Czas zdwojenia T_r
DB10.DB20	Time	Czas wyprzedzenia T_d
DB10.DB24	Real	Wartość SP po restarcie
DB10.DB28	Real	Skalowanie poziomu cieczy
DB10.DB32	Real	Skalowanie przepływu
DB10.DB36	Real	Skalowanie ciśnienia

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

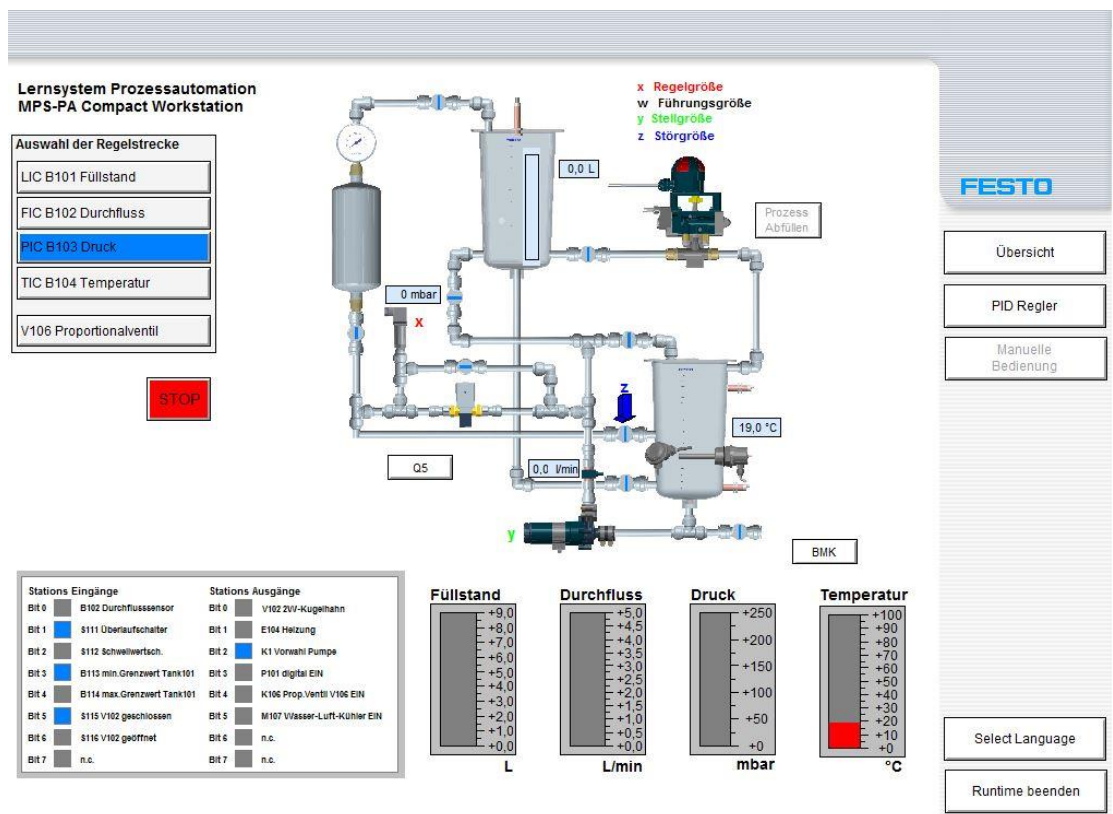
DB10.DB40	Real	Skalowanie temperatury
DB10.DB44	Word	Aktualna wartość sygnału
DB10.DB46	Real	Komponent P/poziom
DB10.DB50	Real	Komponent I
DB10.DB54	Real	Komponent D/przepływ
DB10.DB58	Real	Ciśnienie
DB10.DB62	Real	Temperatura

4.4. Uruchomienie i obsługa aplikacji wizualizacyjnej w środowisku WinCC

4.4.1. Okno główne aplikacji

Do wygenerowania przebiegów otrzymanych za pośrednictwem sterownika PLC wykorzystano wbudowaną aplikację wizualizacyjną dołączoną do stanowiska. Okno główne aplikacji przedstawiono na Rys. 3.13. Przed przystąpieniem do wizualizacji przebiegów (*PID Regler*), należy wybrać odpowiednią pętlę regulacji: poziomu cieczy (B101), przepływu (B102), ciśnienia (B103) lub temperatury (B104). W trybie obsługi ręcznej (*Manuelle Bedienung*) istnieje możliwość ręcznego ustawienia sygnału na urządzeniach wykonawczych - pompie lub zaworze proporcjonalnym. Kolorem czerwonym oznaczono miejsce mierzenia aktualnej wartości procesowej, kolorem czarnym sygnał wartości zadanej, kolorem zielonym źródło sygnału sterującego, a kolorem niebieskim zawór, którym można wprowadzić zakłócenia w układzie. Wyświetlone są również aktualne stany każdej z regulowanych wartości oraz stan odpowiednich bitów wejściowych i wyjściowych. Przycisk *STOP* powoduje zatrzymanie procesu. Przycisk *Übersicht* umożliwia powrót do głównego okna i ponowny wybór obwodu.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC



Rys. 3.13. Okno główne aplikacji wizualizacyjnej

4.4.2. Przedstawienie zmiennych występujących w programie

Aby aplikacja wizualizacyjna mogła współpracować ze sterownikiem PLC, poszczególne zmienne posiadają takie same adresy jak w programie na sterowniku. Zmienne przenoszące informacje o sygnałach analogowych, skalowaniu sygnałów lub nastawach regulatora zdefiniowano jako 32-bitowe liczby zmiennoprzecinkowe (floating-point numer). Zmienne określające stan elementów i markery zdefiniowano jako binarne (binary tag). Listę zmiennych przedstawia Rys. 4.14. Kolorem czerwonym wyróżniono zmienne użyte w procesie regulacji ciśnienia w zbiorniku.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

Name	Type	Parameters	Last Change
Compact_Station_In	Unsigned 8-bit value	EB0	2/16/2012 3:18:40 PM
Compact_Station_Out	Unsigned 8-bit value	AB0	2/16/2012 3:18:40 PM
RemoteControl	Unsigned 8-bit value	MB132	2/16/2012 3:18:40 PM
A_Level	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD46	2/16/2012 3:39:14 PM
A_Flow	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD54	2/16/2012 3:39:22 PM
A_Pressure	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD58	2/16/2012 3:39:29 PM
A_Temperature	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD62	2/16/2012 3:39:37 PM
Remote_Setpoint	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD8	2/16/2012 3:39:48 PM
RemoteClosedLoop	Unsigned 8-bit value	MB134	2/16/2012 3:18:40 PM
RemoteOutputs	Unsigned 8-bit value	MB133	2/16/2012 3:18:40 PM
ProcessValue	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD0	2/16/2012 3:39:59 PM
ControlledValue	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD4	2/16/2012 3:40:06 PM
P_component	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD46	2/16/2012 3:18:40 PM
I_component	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD50	2/16/2012 3:18:40 PM
D_component	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD54	2/16/2012 3:18:40 PM
Kp_Parameter	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD12	2/16/2012 3:40:21 PM
Td_Parameter	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD20	1/9/2017 3:10:45 PM
Tr_Parameter	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD16	1/9/2017 3:12:17 PM
Manu_Pump	Binary Tag	M133.3	2/16/2012 3:18:40 PM
Manu_V102	Binary Tag	M133.0	2/16/2012 3:18:40 PM
Remote_ControlledValue	Floating-point number 32-bit IEEE 754	DB10,DD24	2/16/2012 3:41:36 PM
Manu_Out5	Binary Tag	M133.5	2/16/2012 3:18:40 PM
Manu_Out6	Binary Tag	M133.6	2/16/2012 3:18:40 PM
Manu_Out7	Binary Tag	M133.7	2/16/2012 3:18:40 PM
Heating	Binary Tag	A0.1	2/16/2012 3:18:40 PM
Manu_Prop_Valve	Binary Tag	M133.4	2/16/2012 3:18:40 PM
BottlingTime	Unsigned 16-bit value	MW72	2/16/2012 3:18:40 PM
Manu_RelayK1	Binary Tag	M133.2	2/16/2012 3:18:40 PM
Manu_ControlValuePump	Floating-point number 32-bit IEEE 754	MD82	2/16/2012 3:18:40 PM
Manu_ControlValuePropValve	Floating-point number 32-bit IEEE 754	MD86	2/16/2012 3:18:40 PM
Manu_Heizung	Binary Tag	M133.1	2/16/2012 3:18:40 PM
Manu_ControlValueCooler	Floating-point number 32-bit IEEE 754	MD78	2/16/2012 3:42:35 PM

Rys. 4.14. Lista zmiennych zaimportowana z programu WinCC

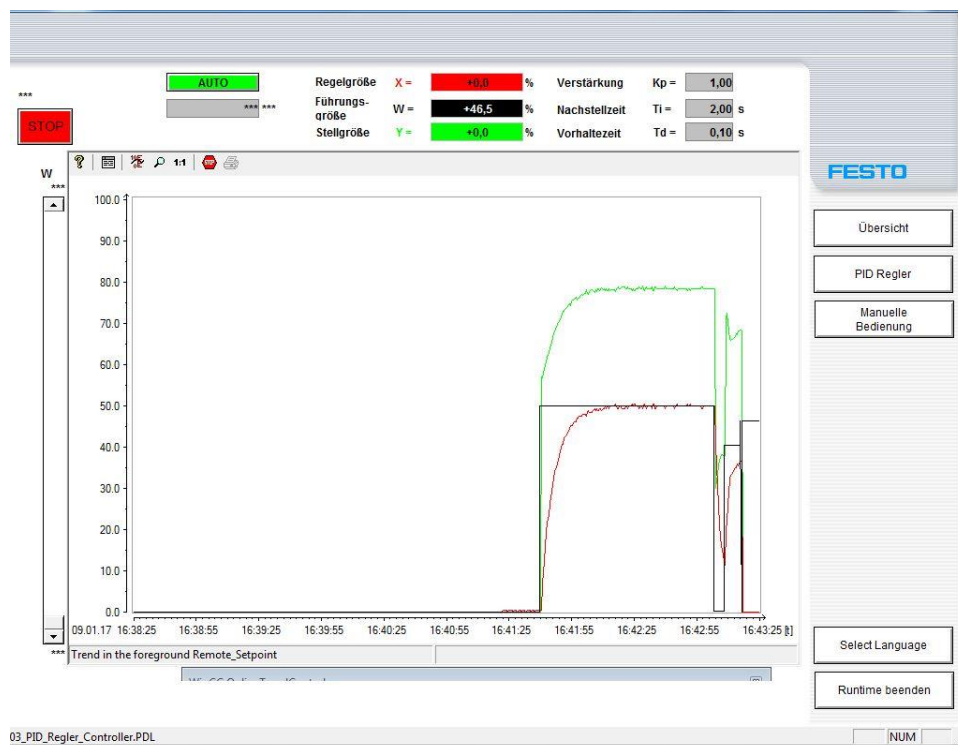
4.4.3. Okno programu w trybie Runtime

Po wybraniu odpowiedniego obwodu regulacji, aplikacja przechodzi w tryb Runtime (Rys. 3.15). Użytkownik ma możliwość ustawienia nastaw dla regulatora (K_p , T_i , T_d) do dwóch miejsc po przecinku. Na wykresie przedstawiono wartość zadaną w (kolor czarny), wartość regulowaną x (kolor czerwony) oraz sygnał sterujący y (kolor zielony) wyrażone w procentach. Dzięki takiemu rozwiązaniu na jednym wykresie można przedstawić sygnały, które posiadają różne zakresy np. ciśnienie (0-0,4 bar) i napięcie (0-10V), a wykres staje się bardziej czytelny. W trybie *AUTO* po wpisaniu wartości zadanej, przebieg zostaje uruchomiony automatycznie wraz z programem na sterownik PLC i aktualne wartości sygnałów są przedstawione w oknie głównym programu. W trybie *Manuelle* istnieje możliwość zadania wartości sygnału sterującego. Przycisk *STOP* zatrzymuje cykl pracy sterownika.

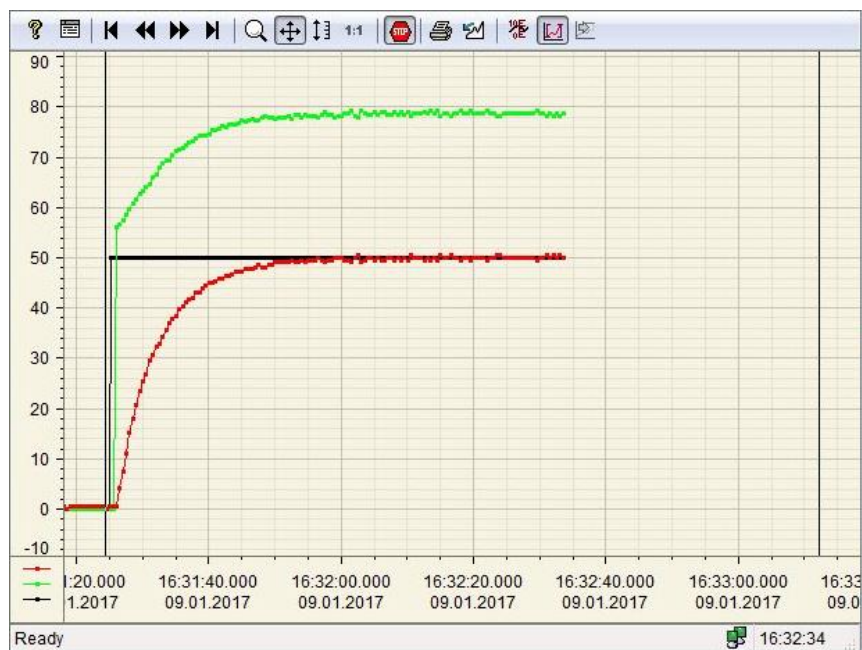
Niestety, przebiegu aktualnych wartości nie można zapisać do pliku w celu dalszej obróbki. W tym celu utworzono okno, które wyświetla przebiegi archiwalne badanych sygnałów (Rys. 3.16). Oznaczenia (kolory) sygnałów są takie same jak dla przebiegów aktualnych. Przebiegi są wyświetlane z częstotliwością 500 ms. Istnieje tutaj również możliwość wybrania do zapisu tylko pewnego wycinka z przebiegu. Za pomocą

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

odpowiedniego narzędzia wybiera się na wykresie zakres danych do zapisu. Przebiegi można zapisać w formacie *csv*.



Rys. 4.15. Okno Runtime wywołane w aplikacji



Rys. 4.16. Przebieg wielkości zadanej (l. czarna), wielkości sterującej (l. zielona) i wielkości regulowanej (l. czerwona) uzyskane w programie WinCC.

5. BADANIA TESTOWE

Badania testowe polegały na przeprowadzeniu przebiegów dla czterech rodzajów nastaw regulatora PID. Pierwsze dwa rodzaje nastaw zostały wyznaczone na podstawie symulacji komputerowej. Są to nastawy dobrane przy pomocy narzędzia *Pid tune* oraz metodą Zieglera-Nicholsa. Następnie przeprowadzono pomiary eksperymentalne przy pomocy złącza *Easy Port* i metodą doświadczalną wybrano najbardziej optymalne nastawy regulatora. Sprawdzono je również podczas regulacji z wykorzystaniem sterownika PLC. Dla każdego rodzaju nastaw wykonano 3 przebiegi, odpowiednio dla wartości zadanych 0,1 bar, 0,2 bar i 0,3 bar. Przedstawiono również przebieg sygnału sterującego. Następnie dokonano analizy otrzymanych przebiegów i ich oceny na podstawie wskaźników jakości regulacji. Skrypt wykorzystany do analizy badań testowych przedstawiono w Załączniku nr 5.

5.1. Badania testowe z wykorzystaniem nastaw *Pid tune*

Pierwszą serię pomiarów wykonano wykorzystując nastawy dobrane metodą za pomocą funkcji *Pid tune* w Rodz. 3.2. Otrzymane przebiegi prezentują Rys. 5.1-5.3.

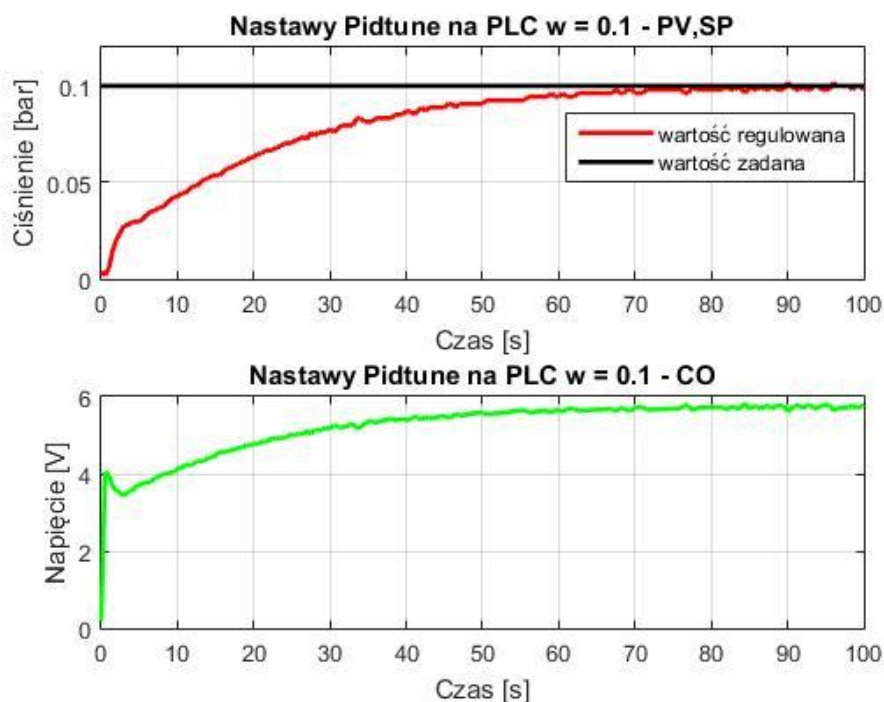
Nastawy dla regulatora otrzymane metodą *Pid tune* przedstawia wzór (5.1).

$$\begin{aligned} P &= 1,41 \\ I &= 0,242 \\ D &= 0,426 \end{aligned} \tag{5.1}$$

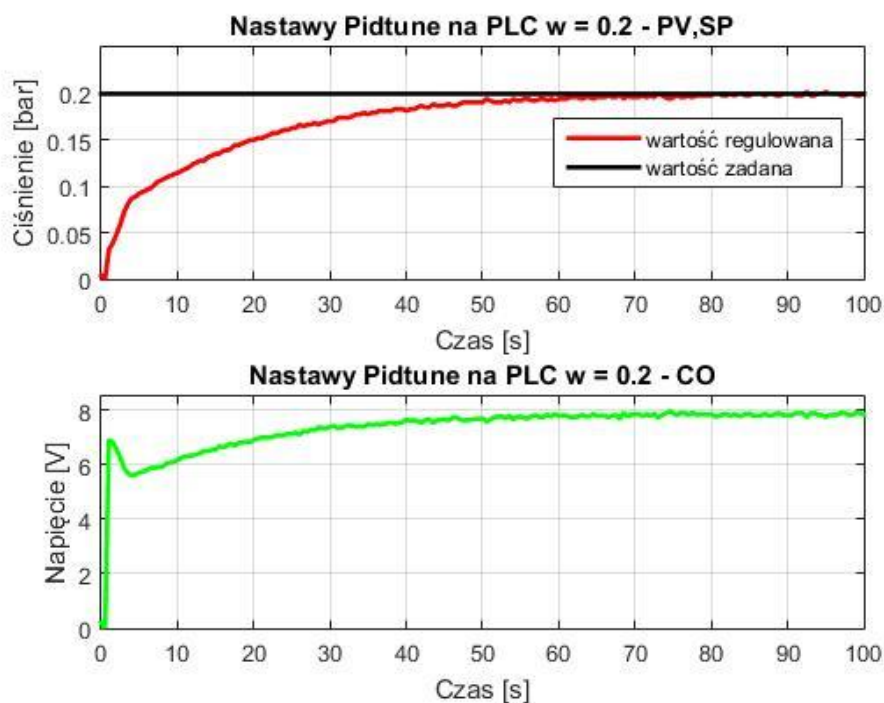
Budowa regulatora PID zaimplementowanego na sterowniku PLC różni się jednak od regulatora w PID w środowisku *Simulink*. Aby sprawdzić te nastawy na sterowniku, konieczna było odpowiednie przeliczenie nastaw (5.2).

$$\begin{aligned} k_p &= P = 1,41 \\ T_i &= \frac{k_p}{I} = 5,82 \text{ s} \\ T_d &= \frac{D}{k_p} = 0,302 \text{ s} \end{aligned} \tag{5.2}$$

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

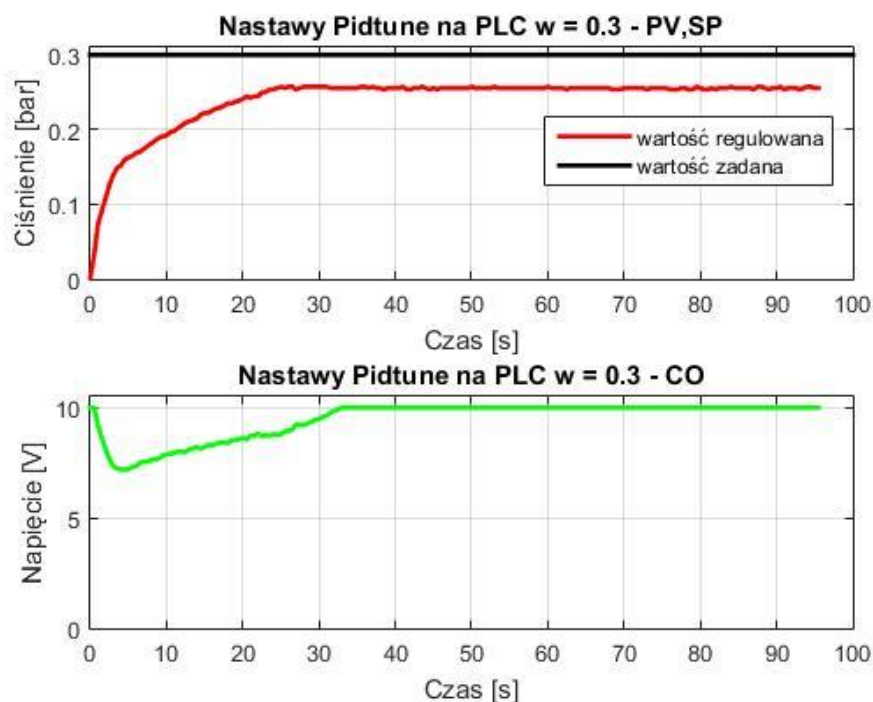


Rys. 5.1. Przebieg wielkości zadanej, regulowanej i sterującej układu regulacji z regulatorem PID (nastawy Pidtune) przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,1$ bar



Rys. 5.2. Przebieg wielkości zadanej, regulowanej i sterującej układu regulacji z regulatorem PID (nastawy Pidtune) przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,2$ bar

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC



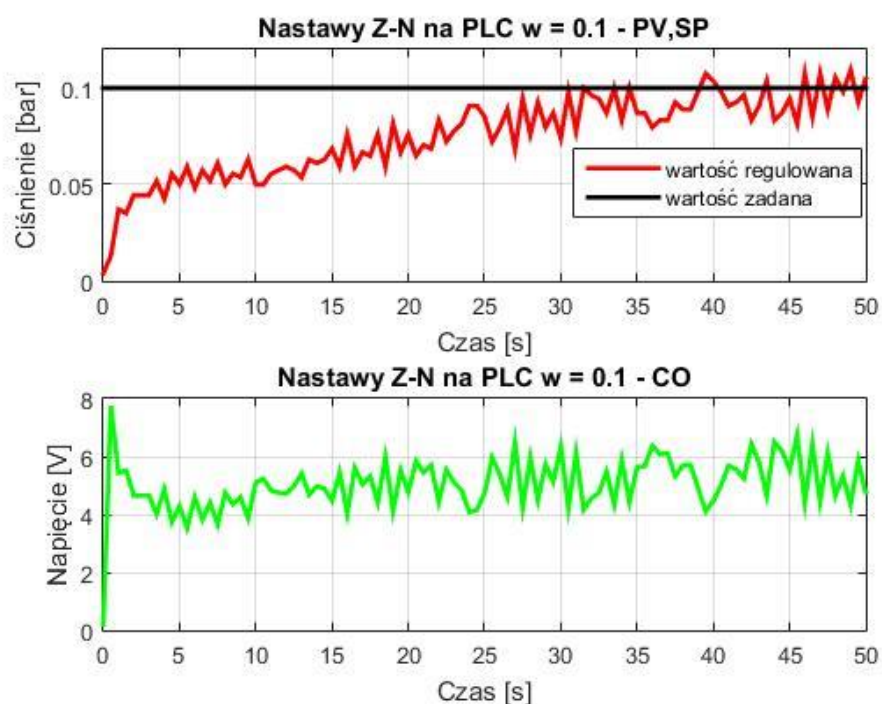
Rys. 5.3. Przebieg wielkości zadanej, regulowanej i sterującej układu regulacji
z regulatorem PID (nastawy Pidtune) przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,3$ bar

5.2. Badania testowe z wykorzystanie nastaw Zieglera-Nicholsa

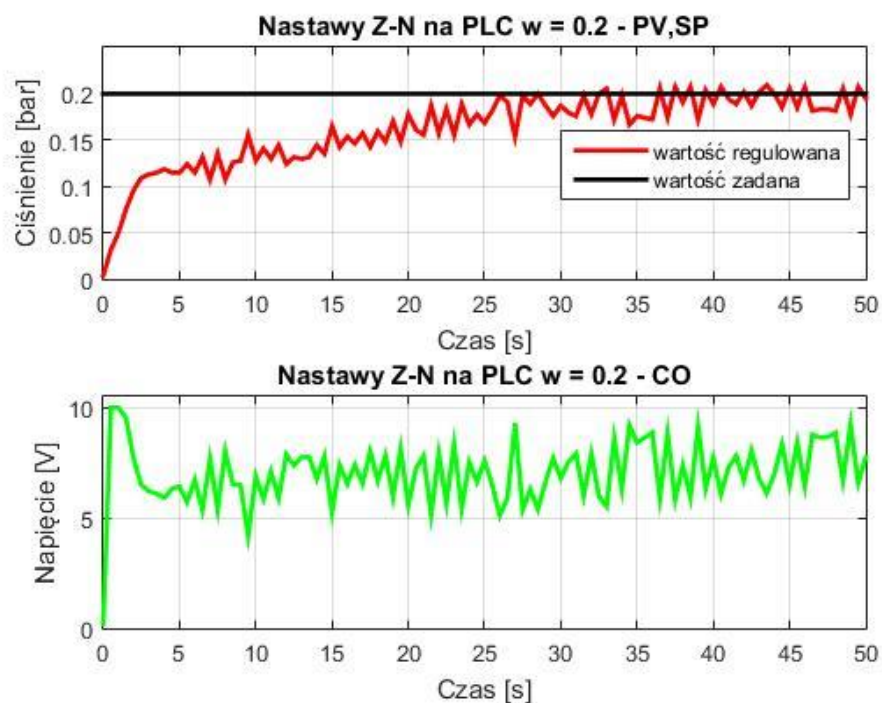
Drugą serię pomiarów przeprowadzono dla nastaw dobranych za pomocą metody Zieglera-Nicholsa w Rozdz. 3.3. Nastawy przedstawia wzór (5.3). Otrzymane przebiegi przedstawiono na Rys. 5.4-5.6.

$$\begin{aligned}k_p &= 2,084 \\T_i &= 5,85 \text{ s} \\T_d &= 1,46 \text{ s}\end{aligned}\tag{5.3}$$

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

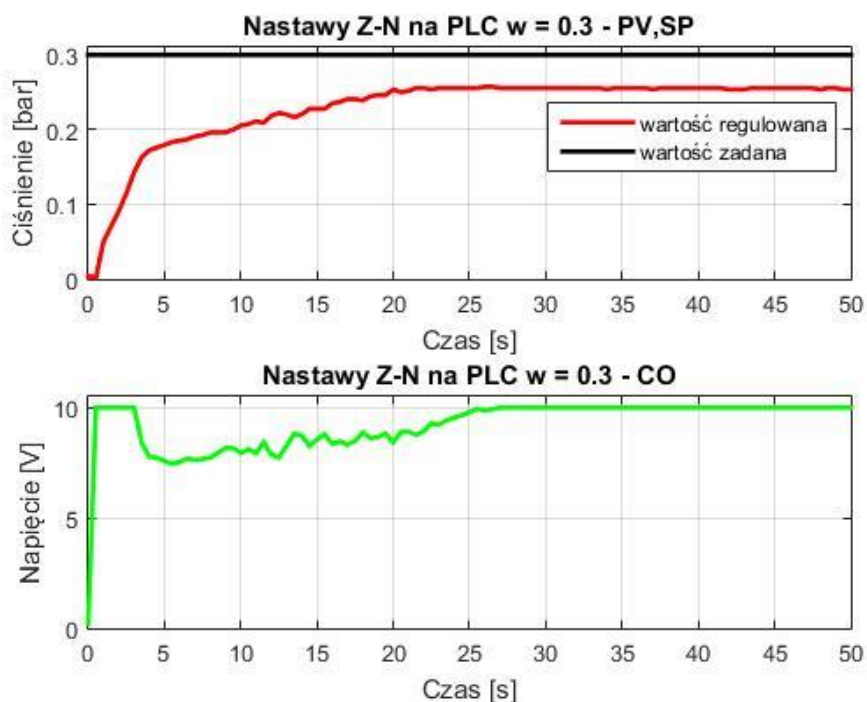


Rys. 5.4. Przebieg wielkości zadanej, regulowanej i sterującej układu regulacji z regulatorem PID (nastawy Z-N) przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,1$ bar



Rys. 5.5. Przebieg wielkości zadanej, regulowanej i sterującej układu regulacji z regulatorem PID (nastawy Z-N) przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,2$ bar

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC



Rys. 5.6. Przebieg wielkości zadanej, regulowanej i sterującej układu regulacji
z regulatorem PID (nastawy Z-N) przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,3$ bar

5.3. Badania testowe z wykorzystaniem złącza Easy Port

W celu sprawdzenia poprawności dobranych nastaw regulatorów PID i zaimplementowanych na sterownik PLC dokonano również pomiarów ciśnienia na stanowisku *Festo MPA* przy pomocy złącza *Easy Port*. Otrzymane przebiegi przedstawiają Rys. 5.7-5.9. Zakres mierzonego ciśnienia mieści się w granicach 0-0,4 bar, a napięcia sterującego 0-10 V. Stanowisko skalibrowano więc zgodnie ze wzorem (5.4).

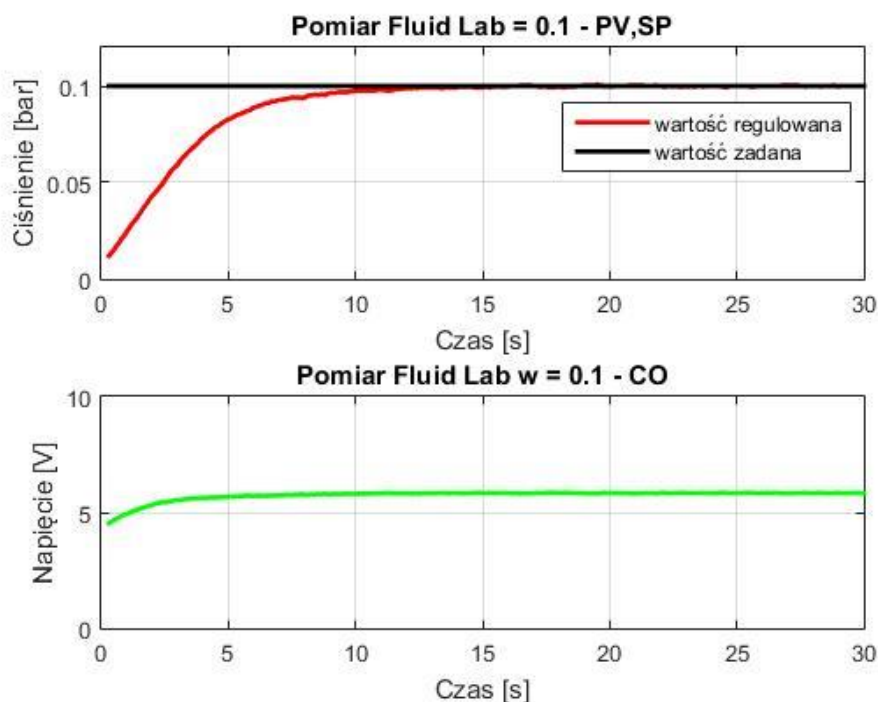
$$p = 0,04U \quad (5.4)$$

Metodą prób i błędów wybrano najoptymalniejsze nastawy dla regulatora PID (5.5).

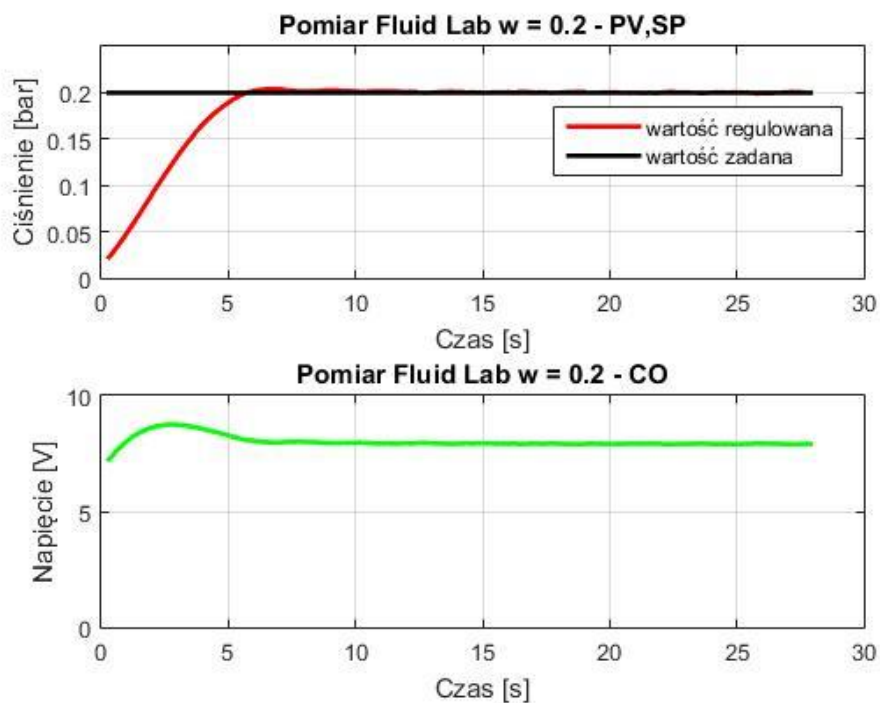
$$\begin{aligned} k_p &= 1 \\ T_i &= 2\text{ s} \\ T_d &= 0,1\text{ s} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Wartość zadana w aplikacji *Fluid Lab* ustawia się w zakresie od 0 do 1, a więc dla badanych wartości zadanych 0,1 bar, 0,2 bar i 0,3 bar będą to odpowiednio wartości 0,25, 0,5 i 0,75. Pomiary wykonano z częstotliwością próbkowania równą 100 ms.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

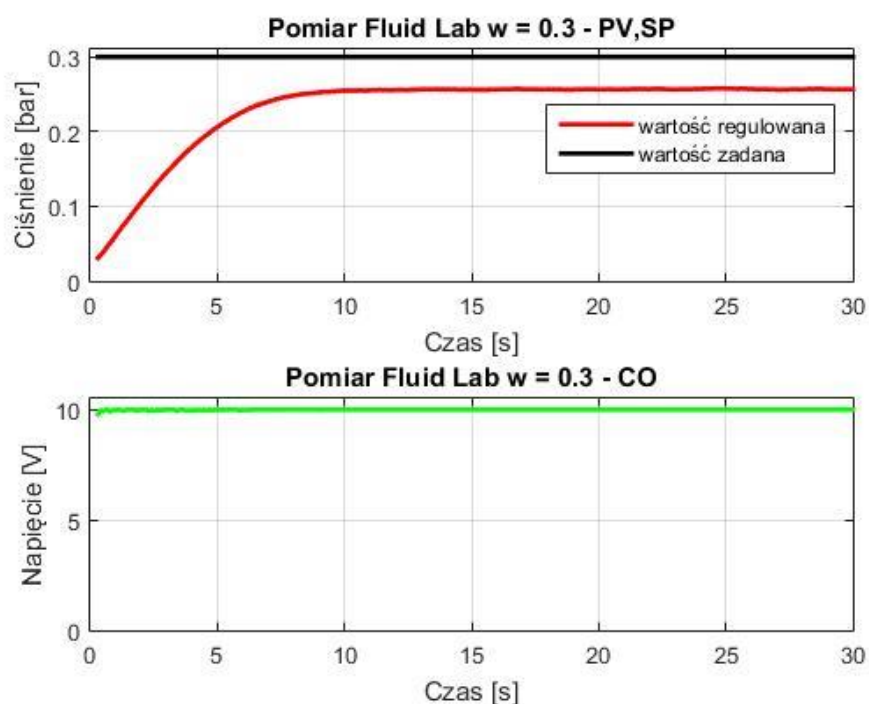


Rys. 5.7. Przebieg wielkości zadanej, sterującej i regulowanej uzyskane w układzie regulacji z regulatorem PID z nastawami z równaniami 5.5 przy wykorzystaniu złącza Easy Port przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,1$ bar



Rys. 5.8. Przebieg wielkości zadanej, sterującej i regulowanej uzyskane w układzie regulacji z regulatorem PID z nastawami z równaniami 5.5 przy wykorzystaniu złącza Easy Port przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,2$ bar

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

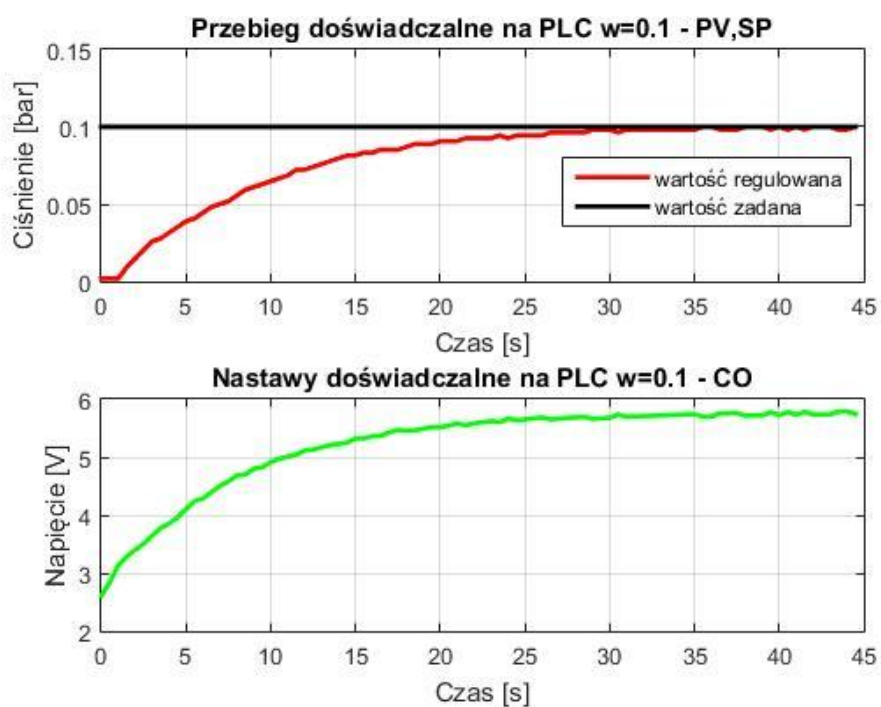


Rys. 5.9. Przebieg wielkości zadanej, sterującej i regulowanej uzyskane w układzie regulacji z regulatorem PID z nastawami z równaniami 5.5 przy wykorzystaniu złącza Easy Port przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,3$ bar

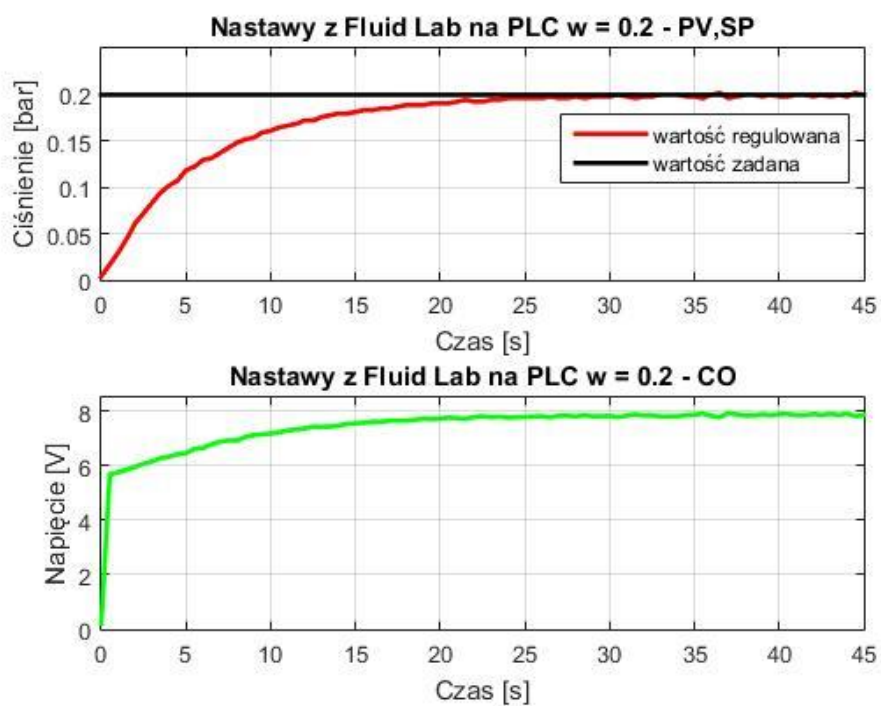
5.4. Badania testowe nastaw dobranych eksperymentalnie zaimplementowanych na sterownik PLC

Aby sprawdzić, jak zachowują się nastawy eksperymentalne, na sterownik PLC zaimplementowano nastawy dobrane za pomocą prób i błędów przy pomocy złącza *Easy Port* i aplikacji *Fluid Lab*. W ten sposób można porównać regulację na stanowisku przy użyciu takich samych nastaw, a przy zastosowaniu różnych interfejsów sterujących. Użyte w tym przypadku nastawy regulatora PID przedstawiono we wzorze (5.5). Przebiegi przedstawiono na Rys. 5.10-5.12.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

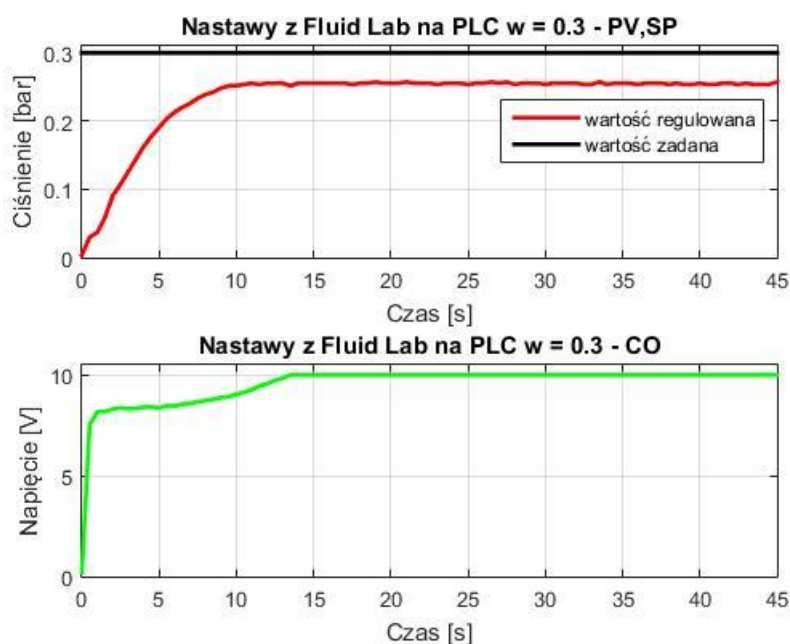


Rys. 5.10. Przebiegi eksperymentalne uzyskane z wykorzystaniem sterownika PLC
przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,1$ bar



Rys. 5.11. Przebiegi eksperymentalne uzyskane z wykorzystaniem sterownika PLC
przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,2$ bar

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

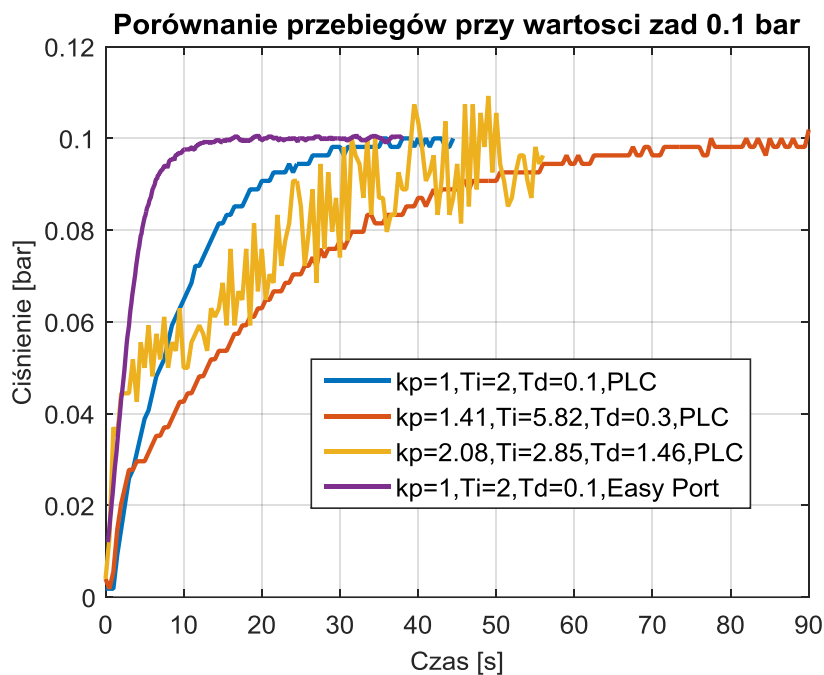


Rys. 5.12. Przebiegi eksperymentalne uzyskane z wykorzystaniem sterownika PLC
przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,3$ bar

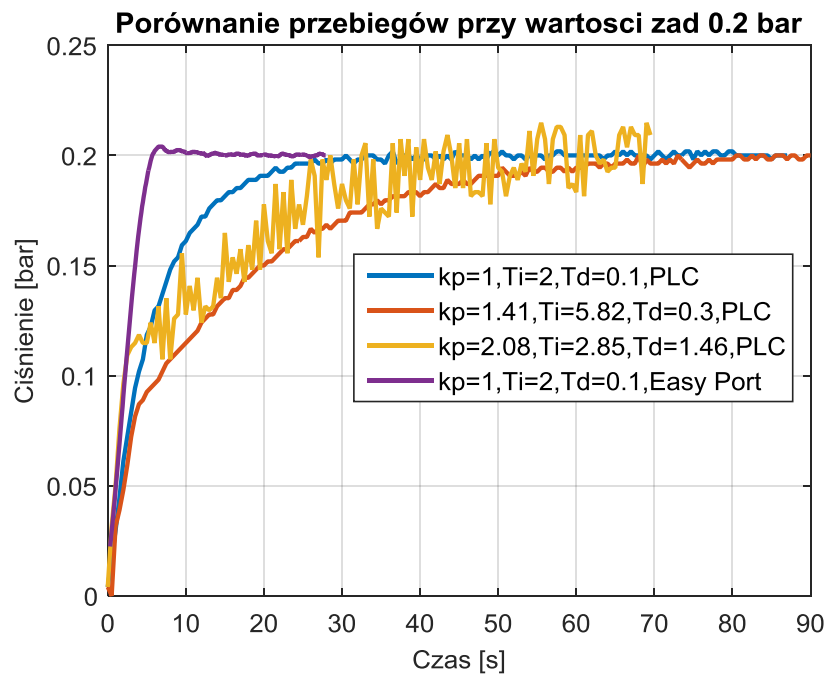
5.5. Porównanie przebiegów

W celu przeanalizowania i porównania wygenerowanych przebiegów, postanowiono je przedstawić na wspólnych wykresach w zależności od zadanych wartości ciśnienia. W odniesieniu do przedstawionych na rysunkach 5.13-5.15 przebiegach można zauważyć różne czasy ich rejestracji. Związane to było z użyciem dwóch różnych urządzeń służących do sterowania ciśnieniem w zbiorniku.

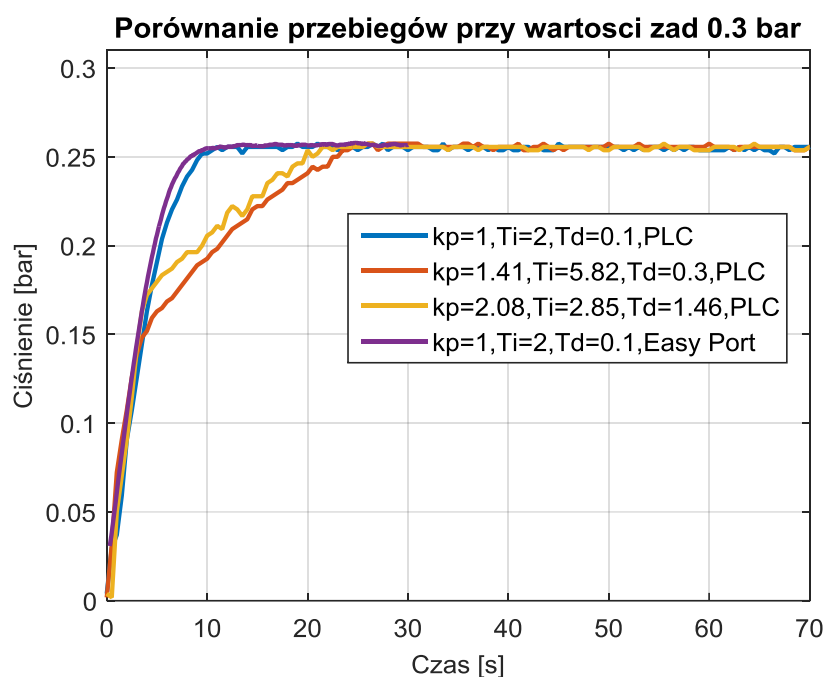
Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC



Rys. 5.13. Porównanie przebiegów eksperymentalnych uzyskanych z wykorzystaniem sterownika PLC i Easy Port przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,1$ bar



Rys. 5.14. Porównanie przebiegów eksperymentalnych uzyskanych z wykorzystaniem sterownika PLC i Easy Port przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,2$ bar



Rys. 5.15. Porównanie przebiegów eksperymentalnych uzyskanych z wykorzystaniem sterownika PLC i Easy Port przy wartości zadanej ciśnienia $w = 0,3$ bar

5.6. Analiza otrzymanych przebiegów

Na podstawie otrzymanych przebiegów dokonano ich analizy pod kątem jakości dynamicznej. Pod uwagę wzięto wartość przeregulowania, czas narastania i czas ustalania [10, 24]. Wyniki tej analizy zestawiono w tabelach 5.1-5.3 w zależności od wartości zadanej ciśnienia.

Tab. 5.1. Analiza wskaźników jakościowych regulatora PID przy wartości zadanej 0,1 bar

Metoda nastaw	Wartości nastaw			Wartość przeregulowania [%]	Czas narastania [s]	Czas ustalania [s]
	k_p	T_i	T_d			
Pid tune	1,41	5,82	0,30	1,90	45,60	62,17
Ziegler-Nichols	2,08	2,85	1,46	9,30	27,15	29,56
Doświadczalna Easy Port	1,00	2,00	0,10	0,80	6,30	8,85
Doświadczalna PLC	1,00	2,00	0,10	0,00	18,13	26,18

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

Tab. 5.2. Analiza wskaźników jakościowych regulatora PID przy wartości zadanej 0,2 bar

Metoda nastaw	Wartości nastaw			Wartość przeregulowania [%]	Czas narastania [s]	Czas ustalania [s]
	k_p	T_i	T_d			
Pid tune	1,41	5,82	0,30	0,95	35,33	47,30
Ziegler-Nichols	2,08	2,85	1,46	7,40	20,28	25,47
Doświadczalna Easy Port	1,00	2,00	0,10	2,00	4,58	5,10
Doświadczalna PLC	1,00	2,00	0,10	0,93	13,30	19,23

Tab. 5.3. Analiza wskaźników jakościowych regulatora PID dla wartości zadanej 0,3 bar

Metoda nastaw	Wartości nastaw			Wartość przeregulowania [%]	Czas narastania [s]	Czas ustalania [s]
	k_p	T_i	T_d			
Pid tune	1,41	5,82	0,30	0,70	15,40	19,60
Ziegler-Nichols	2,08	2,85	1,46	0,70	15,34	17,69
Doświadczalna Easy Port	1,00	2,00	0,10	0,47	6,22	7,56
Doświadczalna PLC	1,00	2,00	0,10	0,70	7,50	10,80

Analizując otrzymane przebiegi oraz parametry jakości dynamicznej, stwierdzono, że najlepsze wyniki uzyskano podczas regulacji ciśnienia za pomocą złącza *Easy Port*. Te przebiegi charakteryzują się najszybszym czasem reakcji, sygnał ustala się na zadanej wartości bez jakichkolwiek oscylacji, występują niewielkie przeregulowania. Sygnał sterujący przechodzi płynnie do odpowiedniej wartości napięcia i utrzymuje stały poziom podczas regulacji.

Spośród pomiarów przeprowadzonych za pomocą sterownika PLC, najlepsze parametry regulacji uzyskano stosując nastawy doświadczalne zaimplementowane na sterownik PLC, które pomimo użycia takich samych nastaw regulatora PID, charakteryzują się nieco wolniejszym działaniem niż w przypadku zastosowania złącza *Easy Port*. Ponadto na ich podstawie możemy stwierdzić, że w przypadku użycia sterownika PLC nie wystąpiły oscylacje a przeregulowania są bardzo małe. Są to najlepsze nastawy zaimplementowane na sterownik PLC.

Nastawy dobrane podczas symulacji odbiegają od nastaw dobranych metodą doświadczalną. Przebiegi wygenerowane z nastawami dobranymi metodą *Pid tune* reagują ok. 3 razy wolniej, niż te z nastawami doświadczalnymi. W przebiegach występuje niewielkie przeregulowanie, nie stwierdzono oscylacji. Sygnał sterujący początkowo bardzo szybko narasta, a następnie stabilizuje się na zadanej wartości. W tym przypadku przebiegi sygnału sterującego najbardziej przypominają charakterystykę regulatora PID.

Najgorzej ze wszystkich nastaw w zestawieniu wypadły nastawy dobrane metodą Zieglera-Nicholsa. Czas narastania jest tutaj zbliżony do nastaw *Pid tune*. W tych przebiegach występują największe przeregulowania. Wartość regulowana oscyluje wokół wartości zadanej. Oscylacje nie są duże, jednak występują bardzo często, co powoduje ciągłe włączanie i wyłączanie regulatora. Widać to po przebiegu sygnału sterującego. Takie nastawy nie są korzystne dla urządzenia wykonawczego oraz są najmniej optymalne podczas regulacji ciągłej.

Parametry regulatora dobrane metodą doświadczalną prezentują się lepiej niż parametry dobrane podczas symulacji. Nastawy symulacyjne dobierano w taki sposób, żeby w układzie nie występowały zbyt duże przeregulowania, co spowodowało wolniejszą odpowiedź układu. Na podstawie przebiegu charakterystyk ciśnienia w funkcji czasu stwierdzono, że przy zastosowaniu nastaw doświadczalnych oraz wygenerowanych z funkcji *Pid tune*, sygnał ciśnienia osiągał wartości zadane 0,1 bar i 0,2 bar i po pewnym czasie ustalał się. Świadczy to o stabilności układów przy zastosowaniu otrzymanych nastaw regulatora PID. Sygnał ciśnienia nie osiągnął wartości zadanej 0,3 bar, ale wynika to z faktu, że wartość ta nie jest osiągalna sprzętowo. Podczas badania tego przebiegu można jednak sprawdzić, jak zachował się układ podczas wygenerowania maksymalnej wartości sygnału sterującego. W tym przypadku wartość regulowana ustaliła się we wszystkich czterech przebiegach na poziomie 0,2556 bar.

Przeregulowanie dla każdego z czterech typu nastaw mieści się w dopuszczalnych granicach (0-40%) [10]. Tylko przebiegi z wykorzystaniem nastaw Zieglera-Nicholsa nie mieszczą się w dopuszczalnych granicach uchybu statycznego (<2,5%). W tym przypadku uchyb statyczny zawiera się w przedziale 7-9%.

PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy pokazano sterowanie procesem ciągłym na przykładzie regulacji sygnału ciśnienia na stanowisku *Festo MPA*. Zaprojektowanie układu sterowania z regulatorem PID na sterownik PLC przebiegało w kilku etapach. Analiza budowy stanowiska oraz dołączonej do niego dokumentacji pozwoliła na zapoznanie się z działaniem układu automatycznej regulacji oraz parametrami i charakterystykami urządzeń. Sygnałem wejściowym w układzie jest napięcie podawane na pompę, a sygnałem wyjściowym sygnał ciśnienia.

Za pomocą złącza *Easy Port* oraz aplikacji *Fluid Lab* wykonano pomiary charakterystyk statycznych i dynamicznych stanowiska. Następnie, wykorzystując je, zamodelowano układ metodą identyfikacyjną. Poszczególne elementy układu zostały przedstawione za pomocą transmitancji operatorowych w oparciu o przykłady dostępne w literaturze. Na podstawie modelowania utworzono symulację komputerową w środowisku *Matlab/Simulink*. Symulacja została sprawdzona pod kątem stabilności układu otwartego i zamkniętego. Dzięki symulacji dobrano nastawy regulatora PID metodą *Pid tune* oraz metodą Zieglera-Nicholsa.

Implementacja prawa sterowania na sterownik PLC polegała na napisaniu programu sterującego działaniem regulatora PID oraz pobierającym i wysyłającym sygnały analogowe na rzeczywiste stanowisko. Wykorzystano do tego dołączony do stanowiska sterownik PLC serii *Simatic S7-300* oraz oprogramowanie *Step 7*. Do rejestracji otrzymanych przebiegów użyto przykładowego programu wizualizacyjnego w środowisku *WinCC*.

Przeprowadzenie badań testowych polegało na analizie przebiegów dla trzech wartości zadanych z nastawami otrzymanymi metodami komputerowymi. Następnie, na sterowniku PLC sprawdzono nastawy dobrane metodą doświadczalną przy wykorzystaniu złącza *Easy Port*. Umożliwiło to sprawdzenie autentyczności nastaw dobranych podczas symulacji oraz porównanie symulacji i rzeczywistego działania stanowiska *Festo MPA*.

Przebiegi z wykorzystaniem nastaw doświadczalnych charakteryzują się szybszą reakcją układu. Na podstawie przebiegu charakterystyk statyczny i dynamiczny stwierdzono opóźnienie występujące w układzie (3,34 s), które uwzględniono podczas modelowania symulacji. Analiza badań testowych pokazała jednak, że w układzie opóźnienie praktycznie nie występuje. Różnice pomiędzy symulacją oraz rzeczywistym działaniem

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA z wykorzystaniem sterownika PLC

stanowiska mogły być spowodowane pominięciem działania ciśnienia hydrostatycznego podczas modelowania zbiornika ciśnieniowego oraz przyjęciem charakterystyk statycznych jako idealnie liniowych. Ponadto nastawy symulacyjne były dobierane w taki sposób, żeby w układzie nie występowało przeregulowanie. Nastawy z *Pidtune* oraz dobrane metodą eksperymentalną osiągają satysfakcjonujące rezultaty w procesie regulacji ciśnienia. Jedynie nastawy Zieglera- Nicholasa dają gorsze wyniki, jednak nie odbiegają one dużo od pozostałych przebiegów. Założenia postawione w pracy zostały zatem zrealizowane, ponieważ sygnał ciśnienia reguluje się przy wykorzystaniu regulatora PID na sterowniku PLC, spełniając badane wskaźniki jakości dynamicznej.

BIBLIOGRAFIA

Literatura:

1. Czemplik Anna, „*Model dynamiki układów fizycznych dla inżynierów. Zasady i przykłady konstrukcji modeli dynamicznych obiektów automatyki*”, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
2. Festo Didatic „*Technical Documentation - Data sheets*”, 2008.
3. Helmich Jürgen, „*Festo MPS PA Compact Workstation Manual*”, Germany 2008.
4. Jeżowiecka-Kabsch Krystyna, Szewczyk Henryk, „*Mechanika płynów*”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
5. Korczak Andrzej, Pakuła Grzegorz, „*Dynamika układów pompowych*”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993, strony 7-45.
6. Markowski A., Kostro J., Lewandowski A., „*Automatyka w pytaniach i odpowiedziach*”, 1985.
7. Mystkowski Arkadiusz, „*Sieci przemysłowe PROFIBUS DP I PROFINET IO*”, 2012.
8. „*Podstawy programowania STEP 7 – Podręcznik*”, Warszawa 2010, Wydanie 3.
9. Siemens Simatic, „*Standard PID Control Manual*”, Edition 03/2003.
10. Siemieniako Franciszek, Gosiewski Zdzisław, „*Automatyka. Tom I: Modelowanie i analiza układów*”, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2006.
11. Siemieniako Franciszek, Gosiewski Zdzisław, „*Automatyka. Tom II: Synteza układów*”, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2007.
12. Siemieniako Franciszek, „*Podstawy automatyki z zadaniami*”, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1986.
13. „*Training Document for Comprehensive Automation Solutions Totally Integrated Automation (TIA). Module B3 Control Engineering with STEP 7*”, 2008.
14. Walden Henryk, „*Mechanika płynów*”, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1980.
15. Wolfgang Eckart, „*MPS PA Compact Workstation – Close loop control with Simatic PLC CPU 313C - Handling description*”, Denkendorf 2008.
16. Wolfgang Eckart, „*MPS PA Compact Workstation – Fluid Lab ® - PA - Handling description*”, Denkendorf 2008.
17. Żabiński Tomasz, „*Automatyka I Regulacja Automatyczna, Wykład 8*”, Politechnika Rzeszowska, r. a.2011/2012.

Opracowanie układu sterowania ciśnieniem w zbiorniku na stanowisku Festo MPA
z wykorzystaniem sterownika PLC

Strony internetowe:

18. http://www.asimo.pl/teoria/regulatory_dzialanie_ciagle.php, 20.12.2016
19. <http://www.asimo.pl/teoria/stabilnoscukladu.php>, 10.01.2017
20. <http://www.festo-didactic.com/int-en/learning-systems/equipment-sets/accessories/general/easyport-usb-an-interface-for-measuring,open-loop-control,closed-loop-control.-connects-the-simulation-to-the-real-world.htm?fbid=aW50LmVuLjU1Ny4xNy4xOC41NTUuNTM4Mg>, 28.12.2016
21. <http://www.festo-didactic.com/int-en/learning-systems/process-automation/overview/fluidlab-pa-closed-loop-control-engineering-in-focus.htm?fbid=aW50LmVuLjU1Ny4xNy4xOC44NzkuNDYyMA>, 28.12.2016
22. <https://support.industry.siemens.com/cs/mdm/12429336?c=28981521419&lc=en-WW>, 14.01.2017
23. <http://w3.siemens.com/mcms/programmable-logic-controller/en/advanced-controller/s7-300/cpu/compact-cpus/pages/default.aspx>, 11.01.2017
24. <https://www.mathworks.com/help/control/ref/stepinfo.html>, 15.01.2017
25. <http://www.ime.pw.edu.pl/zme/dyd/mater/metitech/bezwladnosc.pdf>, 7.01.2017
26. http://ftp.pwsz.glogow.pl/Materialy_dydaktyczne/Grzegorz_Goral/Sterowniki_PLC.pdf, 10.01.2017

WYKAZ ZAŁĄCZNIKÓW

1. Załącznik nr 1

Wygenerowanie przebiegu charakterystyk statycznych i dynamicznych

2. Załącznik nr 2

Sprawdzenie stabilności układu otwartego

3. Załącznik nr 3

Wygenerowanie przebiegów z nastawami symulacyjnymi oraz sprawdzenie ich parametrów jakości dynamicznej

4. Załącznik nr 4

Podgląd funkcji FC12

5. Załącznik nr 5

Przedstawienie badań testowych

1. Załącznik nr 1

Wygenerowanie przebiegu charakterystyk statycznych i dynamicznych

```
%Wczytanie danych pobranych ze stanowiska i zapisanych w workspace
load('statyka_i_dynamika.mat')
%Charakterystyka statyczna Q(U)
figure(1)
plot(QfU_U,QfU_Q)
xlabel('Napięcie [V]')
ylabel('Natężenie przepływu [l/min]')
title('Charakterystyka statyczna Q(U)')
grid on
%Charakterystyka statyczna p(U)
figure(2)
plot(pU_U,pU_p)
xlabel('Napięcie [V]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
title('Charakterystyka statyczna p(U)')
grid on
%Charakterystyka statyczna p(Q)
figure(3)
plot(QfU_Q,pQ_p)
xlabel('Natężenie przepływu [l/min]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
title('Charakterystyka statyczna p(Q)')
grid on
%Charakterystyka dynamiczna p(t)
figure(4)
subplot(2,1,1)
plot(Times,bar1,'LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
title('Charakterystyka dynamiczna p(t)')
grid on
subplot(2,1,2)
plot(wym.Time,wym.Data,'LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Wymuszenie skokowe sygnałem sterującym 10 V')
grid on
axis([0 35 0 10.5])
%Charakterystyka dynamiczna Q(t)
figure(5)
subplot(2,1,1)
plot(Times,lmin,'LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Natężenie przepływu [l/min]')
title('Charakterystyka dynamiczna Q(t)')
grid on
subplot(2,1,2)
plot(wym.Time,wym.Data,'LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Wymuszenie skokowe sygnałem sterującym 10 V')
grid on
axis([0 35 0 10.5])
```


2. Załącznik nr 2

Sprawdzenie stabilności układu otwartego

```
s=tf('s'); %zmienna zespolona
G1=tf([0.273],[0.4 1]) % model pompy
G2=tf([0.91],[1],'inputdelay',3.36)%model rurociągu
G3=tf([0.101],[3.5 1]) %model zbiornika
G4=tf([25],[0.02 1]) %model czujnika
%utworzenie układu otwartego
OL1=series(G1,G2)
OL2=series(G3,G4)
OL=series(OL1,OL2)
% odpowiedź układu otwartego na wymuszenie skokowe
figure(1)
plot(step.Time,step.Data)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
title('Odpowiedź układu otwartego na wymuszenie skokowe 10 V')
grid on
% mapa zer i biegunów układu otwartego
figure(2)
pzmap(OL)
title('Mapa zer i biegunów układu otwartego')
xlabel('Oś rzeczywista')
ylabel('Oś urojona')
```

3. Załącznik nr 3

Wygenerowanie przebiegów z nastawami symulacyjnymi oraz sprawdzenie ich parametrów jakości dynamicznej

```
%wczytanie danych zapisanych w workspace
load('badania_symulacyjne.mat')
%symulacja z nastawami pidtune
figure(1)
plot(n41.Time,n41.Data)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
title('Symulacja dla p = 0.1 bar')
grid on

figure(2)
plot(n42.Time,n42.Data)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
title('Symulacja dla p = 0.2 bar')
grid on

figure(3)
plot(n43.Time,n43.Data)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
title('Symulacja dla p = 0.3 bar')
grid on

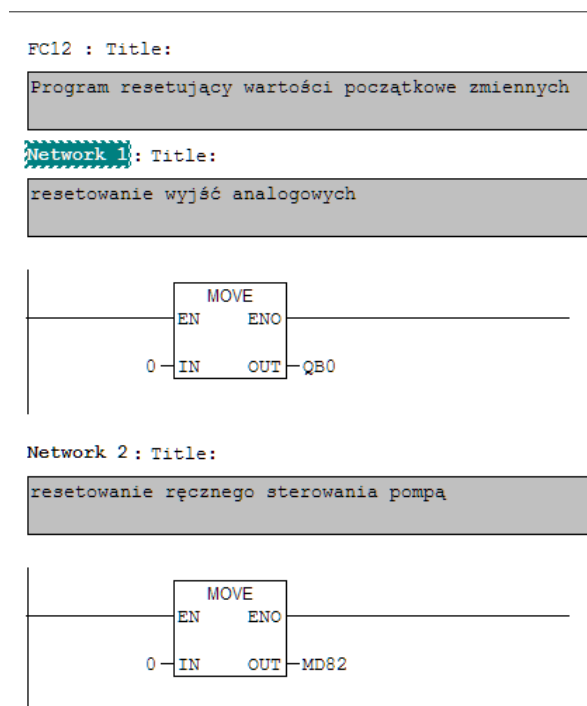
%symulacja z nastawami Zieglera-Nicholsa
figure(4)
plot(zn1.Time,zn1.Data)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
title('Symulacja dla p = 0.1 bar metodą Z-N')
grid on

figure(5)
plot(zn2.Time,zn2.Data)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
title('Symulacja dla p = 0.2 bar metodą Z-N')
grid on

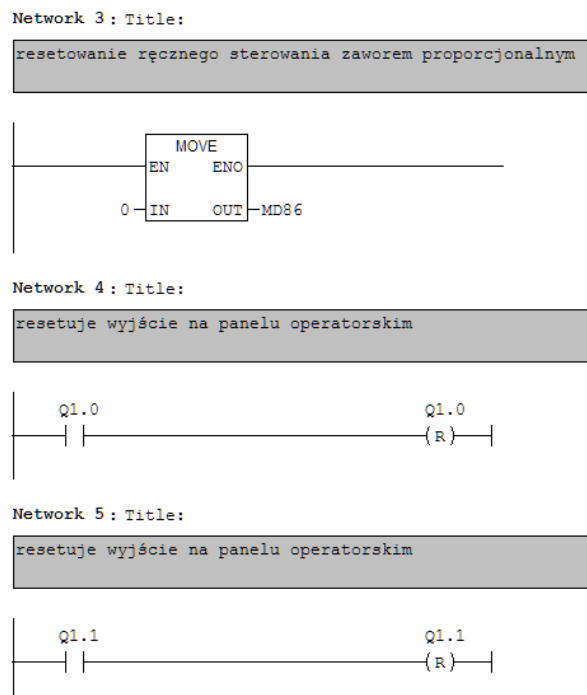
figure(6)
plot(zn3.Time,zn3.Data)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
title('Symulacja dla p = 0.3 bar metodą Z-N')
grid on
%sprawdzenie parametrów jakości dynamicznej
J1=stepinfo(n41.Data,n41.Time)
J2=stepinfo(n42.Data,n42.Time)
J3=stepinfo(n43.Data,n43.Time)
J4=stepinfo(zn1.Data,zn1.Time)
J5=stepinfo(zn2.Data,zn2.Time)
J6=stepinfo(zn3.Data,zn3.Time)
```

4. Załącznik nr 4

Podgląd funkcji FC12



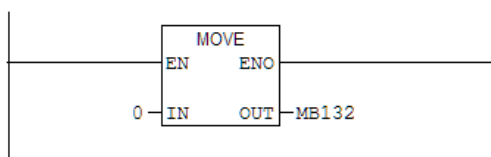
Rys. 1. Funkcja FC12 (część 1. – opracowanie własne)



Rys. 2. Funkcja FC12 (część 2. – opracowanie własne)

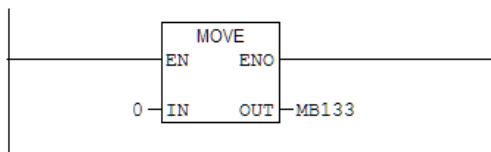
Network 6 : Title:

resetowanie markerów panelu sterującego



Network 7 : Title:

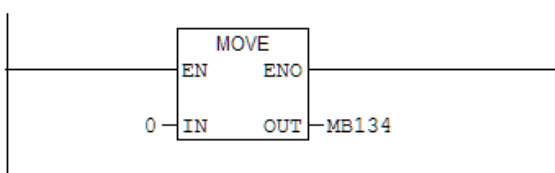
resetowanie wyjść dyskretnych w układzie



Rys. 3. Funkcja FC12 (część 3. – opracowanie własne)

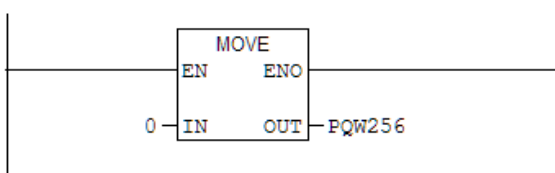
Network 8 : Title:

resetowanie wyboru pętli regulacji



Network 9 : Title:

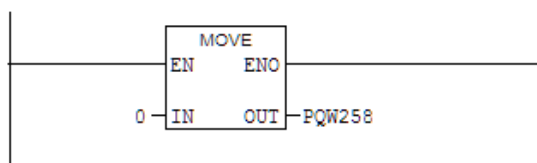
resetowanie sygnału analogowego na pompę



Rys. 4. Funkcja FC12 (część 4. – opracowanie własne)

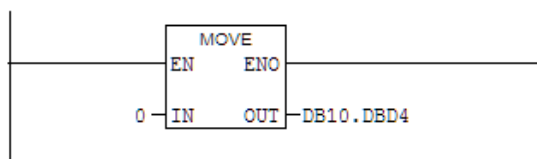
Network 10: Title:

resetowanie sygnału zawóru proporcjonalnego



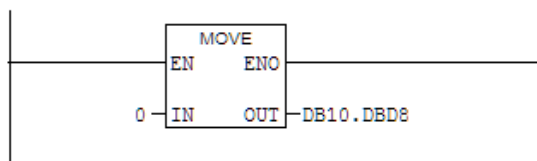
Network 11: Title:

resetowanie wartości zadanej



Network 12: Title:

resetowanie sygnału sterującego



Rys. 5. Funkcja FC12 (część 5. – opracowanie własne)

5. Załącznik nr 5

Przedstawienie badań testowych

```
wczytanie danych
load('pidtune.mat')
load('z-n.mat')
load('fluid_lab')
load('doswiadczone')

%badania testowe z wykorzystaniem nastaw doświadczalnych
figure(1)
yd1=ones(90,1);
subplot(2,1,1)
plot(Td1,0.004*d1pv,'-r',Td1,0.1*yd1,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Nastawy z Fluid Lab na PLC w = 0.1 - PV,SP')
grid on
axis([0 45 0 0.12])
subplot(2,1,2)
plot(Td1,d1co/10,'-g','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Nastawy z Fluid Lab na PLC w = 0.1 - CO')
grid on
axis([0 45 0 6])

figure(2)
yd2=ones(225,1);
subplot(2,1,1)
plot(Td2,0.004*d2pv,'-r',Td2,0.2*yd2,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Nastawy z Fluid Lab na PLC w = 0.2 - PV,SP')
grid on
axis([0 45 0 0.25])
subplot(2,1,2)
plot(Td2,d2co/10,'-g','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Nastawy z Fluid Lab na PLC w = 0.2 - CO')
grid on
axis([0 45 0 8.5])

figure(3)
yd3=ones(182,1);
subplot(2,1,1)
plot(Td3,0.004*d3pv,'-r',Td3,0.3*yd3,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Nastawy z Fluid Lab na PLC w = 0.3 - PV,SP')
grid on
axis([0 45 0 0.31])
subplot(2,1,2)
plot(Td3,d3co/10,'-g','LineWidth',2)
```

```

xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Nastawy z Fluid Lab na PLC w = 0.3 - CO')
grid on
axis([0 45 0 10.5])

%badania testowe z wykorzystaniem nastaw Pidtune
figure(4)
ypid1=ones(464,1);
subplot(2,1,1)
plot(Tpid1,0.004*pid1pv,'-r',Tpid1,0.1*ypid1,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Nastawy Pidtune na PLC w = 0.1 - PV,SP')
grid on
axis([0 100 0 0.12])
subplot(2,1,2)
plot(Tpid1,pid1co/10,'-g','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Nastawy Pidtune na PLC w = 0.1 - CO')
grid on
axis([0 100 0 6])

figure(5)
ypid2=ones(233,1);
subplot(2,1,1)
plot(Tpid2,0.004*pid2pv,'-r',Tpid2,0.2*ypid2,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Nastawy Pidtune na PLC w = 0.2 - PV,SP')
grid on
axis([0 100 0 0.25])
subplot(2,1,2)
plot(Tpid2,pid2co/10,'-g','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Nastawy Pidtune na PLC w = 0.2 - CO')
grid on
axis([0 100 0 8.5])

figure(6)
ypid3=ones(284,1);
subplot(2,1,1)
plot(Tpid3,0.004*pid3pv,'-r',Tpid3,0.3*ypid3,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Nastawy Pidtune na PLC w = 0.3 - PV,SP')
grid on
axis([0 100 0 0.31])
subplot(2,1,2)
plot(Tpid3,pid3co/10,'-g','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Nastawy Pidtune na PLC w = 0.3 - CO')
grid on
axis([0 100 0 10.5])

```

```

%badania testowe z wykorzystaniem nastaw Zieglera-Nicholsa
figure(7)
yzn1=ones(118,1);
subplot(2,1,1)
plot(Tzn1,0.004*zn1pv,'-r',Tzn1,0.1*yzn1,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Nastawy Z-N na PLC w = 0.1 - PV,SP')
grid on
axis([0 50 0 0.12])
subplot(2,1,2)
plot(Tzn1,zn1co/10,'-g','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Nastawy Z-N na PLC w = 0.1 - CO')
grid on
axis([0 50 0 8])

figure(8)
yzn2=ones(260,1);
subplot(2,1,1)
plot(Tzn2,0.004*zn2pv,'-r',Tzn2,0.2*yzn2,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Nastawy Z-N na PLC w = 0.2 - PV,SP')
grid on
axis([0 50 0 0.25])
subplot(2,1,2)
plot(Tzn2,zn2co/10,'-g','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Nastawy Z-N na PLC w = 0.2 - CO')
grid on
axis([0 50 0 10.5])

figure(9)
yzn3=ones(191,1);
subplot(2,1,1)
plot(Tzn3,0.004*zn3pv,'-r',Tzn3,0.3*yzn3,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Nastawy Z-N na PLC w = 0.3 - PV,SP')
grid on
axis([0 50 0 0.31])
subplot(2,1,2)
plot(Tzn3,zn3co/10,'-g','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Nastawy Z-N na PLC w = 0.3 - CO')
grid on
axis([0 50 0 10.5])

%badania testowe z wykorzystanie Fluid Lab
figure(10)
subplot(2,1,1)
plot(Tx1,0.4*x1,'-r',Tx1,0.4*w1,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')

```



```

legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Pomiar Fluid Lab = 0.1 - PV,SP')
grid on
axis([0 30 0 0.12])
subplot(2,1,2)
plot(Tx1,y1,'-g','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Pomiar Fluid Lab w = 0.1 - CO')
grid on
axis([0 30 0 10])

figure(11)
subplot(2,1,1)
plot(Tx2,0.4*x2,'-r',Tx2,0.4*w2,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Pomiar Fluid Lab w = 0.2 - PV,SP')
grid on
axis([0 30 0 0.25])
subplot(2,1,2)
plot(Tx2,y2,'-g','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Pomiar Fluid Lab w = 0.2 - CO')
grid on
axis([0 30 0 10])

figure(12)
subplot(2,1,1)
plot(Tx3,0.4*x3,'-r',Tx3,0.4*w3,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Ciśnienie [bar]')
legend('wartość regulowana','wartość zadana')
title('Pomiar Fluid Lab w = 0.3 - PV,SP')
grid on
axis([0 30 0 0.31])
subplot(2,1,2)
plot(Tx3,y3,'-g','LineWidth',2)
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Napięcie [V]')
title('Pomiar Fluid Lab w = 0.3 - CO')
grid on
axis([0 30 0 10.5])

%porównaie przebiegów
figure(13)
plot(Td1,0.004*d1pv,Tpid1,0.004*pid1pv,Tzn1,0.004*zn1pv,Tx1,x1*0.4,'LineWid
th',2)
xlabel('Czas [s]','FontSize',12)
ylabel('Ciśnienie [bar]','FontSize',12)
legend('kp=1,Ti=2,Td=0.1,PLC','kp=1.41,Ti=5.82,Td=0.3,PLC','kp=2.08,Ti=2.85
,Td=1.46,PLC','kp=1,Ti=2,Td=0.1,Easy Port')
title('Porównanie przebiegów przy wartosci zad 0.1 bar')
grid on
axis([0 90 0 0.12])

figure(14)
plot(Td2,0.004*d2pv,Tpid2,0.004*pid2pv,Tzn2,0.004*zn2pv,Tx2,x2*0.4,'LineWid
th',2)

```

```

xlabel('Czas [s]', 'FontSize', 12)
ylabel('Ciśnienie [bar]', 'FontSize', 12)
legend('kp=1, Ti=2, Td=0.1, PLC', 'kp=1.41, Ti=5.82, Td=0.3, PLC', 'kp=2.08, Ti=2.85, Td=1.46, PLC', 'kp=1, Ti=2, Td=0.1, Easy Port')
title('Porównanie przebiegów przy wartosci zad 0.2 bar')
grid on
axis([0 90 0 0.25])

figure(15)
plot(Td3, 0.004*d3pv, Tpid3, 0.004*pid3pv, Tzn3, 0.004*zn3pv, Tx3, x3*0.4, 'LineWidth', 2)
xlabel('Czas [s]', 'FontSize', 12)
ylabel('Ciśnienie [bar]', 'FontSize', 12)
legend('kp=1, Ti=2, Td=0.1, PLC', 'kp=1.41, Ti=5.82, Td=0.3, PLC', 'kp=2.08, Ti=2.85, Td=1.46, PLC', 'kp=1, Ti=2, Td=0.1, Easy Port')
title('Porównanie przebiegów przy wartosci zad 0.3 bar')
grid on
axis([0 70 0 0.31])

%analiza wskaźników jakości dynamicznej
Jd1=stepinfo(d1pv, Td1, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)
Jd2=stepinfo(d2pv, Td2, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)
Jd3=stepinfo(d3pv, Td3, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)
Jpid1=stepinfo(pid1pv, Tpid1, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)
Jpid2=stepinfo(pid2pv, Tpid2, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)
Jpid3=stepinfo(pid3pv, Tpid3, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)
Jzn1=stepinfo(zn1pv, Tzn1, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)
Jzn2=stepinfo(zn2pv, Tzn2, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)
Jzn3=stepinfo(zn3pv, Tzn3, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)
Jf1=stepinfo(x1, Tx1, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)
Jf2=stepinfo(x2, Tx2, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)
Jf3=stepinfo(x3, Tx3, 'SettlingTimeThreshold', 0.05)

```

