

# Modelowanie i identyfikacja stanowiska dydaktycznego Festo MPS<sup>®</sup> PA Compact Workstation

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono charakterystykę elementów stanowiska dydaktycznego typu Festo MPS<sup>®</sup> PA Compact Workstation. Stanowisko to pozwala na badanie układów regulacji ciągłej dla zmiennych procesowych, takich jak: temperatura, ciśnienie, natężenie przepływu oraz poziom cieczy. Referat opisuje zbudowany model symulacyjny oraz przeprowadzoną identyfikację poszczególnych elementów składających się na model obiektu sterowania. Model analityczny został pomyślnie zweryfikowany poprzez porównanie otrzymanych charakterystyk odpowiedzi modelu i obiektu rzeczywistego na zadane wymuszenie w dziedzinie czasu.

**Abstract.** The paper presents didactic station: Festo MPS<sup>®</sup> PA Compact Workstation. This test rig, enables to provide study of process automation control for temperature, pressure, fluid flow rate, and fluid level. A simulation model and an identified model of particular elements making the control model were carried up. The analytical model was successfully verified by comparing received responses of the control plant model and the true system in the time-domain. **Modelling and identification of the didactic station: Festo MPS<sup>®</sup> PA Compact Workstation**

**Słowa kluczowe:** identyfikacja, modelowanie, układ regulacji ciągłej, stanowisko Festo MPS<sup>®</sup> PA Compact Workstation.

**Keywords:** identification, modelling, process automation system, didactic station: Festo MPS<sup>®</sup> PA Compact Workstation.

## Wstęp

Festo MPS<sup>®</sup> PA Compact Workstation jest stanowiskiem dydaktycznym, które charakteryzuje duży potencjał edukacyjny głównie w automatyzacji procesów ciągłych. W szczególności, stacja MPS<sup>®</sup> pozwala na badanie ciągłych układów sterowania w pętli sprzężenia zwrotnego dla zmiennych procesowych, takich jak: temperatura cieczy, natężenie przepływu płynu, ciśnienie i poziom słupa cieczy.

Standardowo, wyżej wymienione stanowisko dydaktyczne wyposażone jest w sterownik PLC realizujący prawo sterowania PID w trzech pętlach regulacji. Każdy z układów regulacji zawiera wiele elementów składających się na tzw. obiekt sterowania. Należy zaznaczyć, że model matematyczny obiektu sterowania, w tym jego elementów (głównie nieliniowych), nie jest znany. Dodatkowo, jak można się domyślić, poszczególne układy regulacji i ich zmienne procesowe są wzajemnie sprzężone. Na etapie zaawansowanym, badanie układów regulacji stacji MPS<sup>®</sup> wymusza zrealizowanie zadania, jakim jest identyfikacja elementów stanowiska i uzyskanie matematycznej reprezentacji obiektu sterowania. Taki model sterowania rozszerza możliwości edukacyjne/badawcze stanowiska i pozwala np. na projektowanie różnych praw sterowania, czy badanie charakterystyk statycznych i dynamicznych poszczególnych elementów systemu automatyki.

W artykule przedstawiono charakterystykę i budowę stanowiska dydaktycznego MPS<sup>®</sup> PA Compact Workstation. Głównym celem niniejszej pracy jest modelowanie, identyfikacja i weryfikacja elementów stanowiska składających się na jego matematyczny model obiektu sterowania. Model symulacyjny stanowiska został zrealizowany w środowisku Matlab/Simulink<sup>®</sup>. Identyfikacja elementów stacji MPS<sup>®</sup> PA Compact Workstation została zrealizowana metodą ARX. Weryfikacja modelu obiektu sterowania sprowadziła się do zestawienia charakterystyk otrzymanego modelu analitycznego i przebiegów odpowiedzi obiektu rzeczywistego zarejestrowanych w dziedzinie czasu.

## Opis stanowiska Festo MPS<sup>®</sup> PA Compact Workstation

Stanowisko dydaktyczne Festo MPS<sup>®</sup> PA Compact Workstation umożliwia sterowanie: poziomem cieczy w zbiorniku, temperaturą cieczy, ciśnieniem oraz natężeniem przepływu. Wymienione układy regulacji zmiennych procesowych składają się z wielu elementów, które mogą być połączone w różnych konfiguracjach w zależności od

użytych czujników oraz podzespołów wykonawczych [1, 2]. Możliwe jest na przykład zbudowanie układu sterowania ze sprzężeniem do przodu lub kaskadowego układu sterowania z kilkoma wewnętrznymi/lokalnymi sprzężeniami zwrotnymi.

Standardowo, stanowisko dydaktyczne wyposażone jest w czujnik ultradźwiękowy (do pomiaru wysokości słupa cieczy w zbiorniku), dwa połączone ze sobą zbiorniki, czujnik ciśnienia dynamicznego cieczy, zawór proporcjonalny (służący do sterowania ciśnieniem cieczy), czujnik natężenia przepływu, pompa, sterownik PLC, dwupołożeniowy zawór kulowy (służący do wprowadzania zakłóceń poprzez symulację wycieków), grzałka elektryczna oraz czujnik temperatury cieczy.

Stacja MPS<sup>®</sup> oferuje wiele praktycznych ćwiczeń dydaktycznych związanych ze sterowaniem lub kontrolą najczęściej spotykanych w przemyśle zmiennych procesowych. Dodatkowo, oprócz wymienionych powyżej i możliwych do przeprowadzenia ćwiczeń, stacja MPS<sup>®</sup> po uprzedniej konfiguracji i przeprogramowaniu sterownika PLC umożliwia badanie zmodyfikowanych układów regulacji procesów ciągłych np. regulacji dwupołożeniowej.

Stanowisko dydaktyczne wyposażone jest w programowalny sterownik logiczny (ang. *programmable logic controller*, PLC) firmy Siemens<sup>®</sup>, model CPU-314C-2DP. Dodatkowo stanowisko pozwala na podłączenie urządzenia typu EasyPort USB zarządzanego oprogramowaniem FluidLab<sup>®</sup>-PA. Takie połączenie umożliwia sterowanie ww. zmiennymi procesowymi oraz rejestrację i przetwarzanie sygnałów z obiektu sterowania w trybie ręcznym. Dodatkowo, oprogramowanie FluidLab<sup>®</sup>-PA umożliwia przeprowadzenie kalibracji czujników stanowiska dydaktycznego, na przykład kalibracji ultradźwiękowego czujnika poziomu cieczy w zbiorniku. Strojone parametry ww. czujnika to: współczynnik wzmocnienia, współczynnik przesunięcia oraz wzmocnienie filtrowania [3].

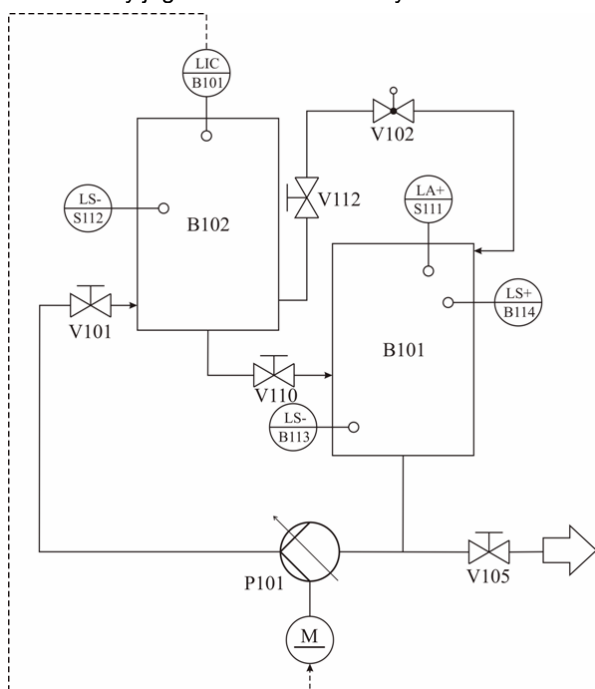
Złącze EasyPort USB umożliwia połączenie komputera PC z omawianym stanowiskiem dydaktycznym i rejestrowanie ciągłych sygnałów zmiennych procesowych oraz dyskretnych sygnałów sterujących w czasie rzeczywistym.

Jak wiadomo, większość modelowanych układów automatycznej regulacji przedstawionych w sposób analityczny można opisać za pomocą podstawowych członów automatyki tj. członu proporcjonalnego, członu całującego, członu różniczkującego czy też członu

opóźniającego. Biorąc pod uwagę założenia, jakie zawsze są podejmowane podczas modelowania obiektu sterowania, należy pamiętać, że ich negatywny wpływ skutkuje uzyskaniem niedokładnego modelu analitycznego z tzw. pominiętą dynamiką. Dlatego też, modelowanie czy identyfikacja obiektu sterowania jest trudnym zadaniem wymagającym od inżyniera dużej wiedzy i doświadczenia, szczególnie jeżeli chodzi o to, aby znaleźć niezbędny kompromis pomiędzy dokładnością modelu obiektu a wprowadzonymi uproszczeniami. Stąd też w niniejszej pracy, modelowanie i identyfikację modelu obiektu z przyjętymi założeniami wykonano tylko dla jednej pętli regulacji jaką jest sterowanie poziomem słupa cieczy w zbiorniku. Przyjęte założenia dotyczą parametrów cieczy, zachowania się cieczy oraz czynników zewnętrznych. Mianowicie zakłada się, że

- gęstość cieczy jest stała i wynosi  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,
- brak jest zawiesin w płynie (ciecz jest jednorodna),
- brak jest bezwładności cieczy przy zaniku pracy pompy,
- ciecz przepływa w sposób laminarny, nie uwzględnia się ciśnienia panującego przed pompą,
- temperatura cieczy nie zależy od natężenia przepływu, która zazwyczaj zmienia się podczas przepływu i może wpływać na jej gęstość.

Aby zrozumieć ideę działania badanego układu regulacji poziomu cieczy w zbiorniku na rysunku 1 został przedstawiony jego schemat obwodowy.



Rys. 1. Schemat obwodowy układu regulacji poziomu cieczy, [2]

Zgodnie z przedstawionym schematem (rys. 1) pompa P101 dostarcza płyn ze zbiornika magazynowego (zasobnika) B101 do zbiornika rezerwarowego B102 poprzez system rur. Poziom cieczy wewnątrz zbiornika B102 jest mierzony przez czujnik ultradźwiękowy, który znajduje się w punkcie pomiaru LIC B101. Zadany poziom cieczy w zbiorniku jest utrzymywany na zadanej wysokości, nawet w przypadku wystąpienia zakłóceń. W zależności od sposobu sterowania pompą, układ regulacji poziomu cieczy w zbiorniku może być zrealizowany w dwóch wariantach: ciągłym lub dyskretnym. Zakłócenie zmiennej regulowanej można wprowadzić poprzez ręczne zamknięcie lub otwarcie spustowego zaworu kulowego V102. Otwarcie zaworu V110 pozwala dodatkowo na wypuszczenie cieczy z głównego zbiornika do zbiornika rezerwarowego.

## Model matematyczny

Przy wyznaczeniu modelu analitycznego rozważanego stanowiska dydaktycznego uwzględniono elementy takie jak: pompa odśrodkowa (element wykonawczy), przewód hydrauliczny (sztywny) oraz zbiornik. Aby umożliwić możliwe najlepsze określenie dynamiki obiektu sterowania przy jednoczesnym określeniu sygnałów wejściowych i wyjściowych, modele poszczególnych elementów zostały zaprezentowane w postaci transmitancji operatorowych.

W przypadku pompy odśrodkowej sterowanej sygnałem napięciowym można przyjąć, że najlepsze przybliżenie jej dynamiki reprezentuje człon inercyjny opisany następującą transmitancją operatorową [4]:

$$(1) \quad G_{pompa}(s) = \frac{k_p}{T_p s + 1}$$

gdzie  $k_p$  oznacza wzmacnienie statyczne, a  $T_p$  – bezwładność wirnika.

Przy pomocy wzmacnienia  $k_p$  napięciowy sygnał wejściowy jest przeskalowywany, tak aby wartość napięcia elektrycznego była proporcjonalna do natężenia przepływu cieczy.

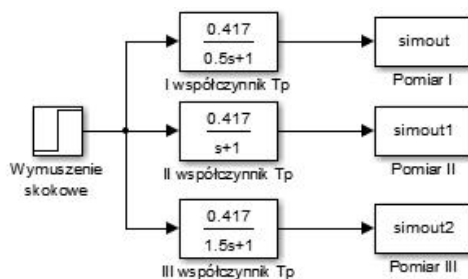
$$(2) \quad k_p = \frac{Q}{U_k}$$

Przy czym  $Q$  jest maksymalnym natężeniem przepływu cieczy, które jest generowane przez pompę dla maksymalnej wartości napięcia sterującego  $U_k$  wynoszącego 10 VDC, takiego że:

$$(3) \quad Q = \frac{U_k \cdot Q_{max}}{U_{max}}$$

gdzie:  $Q_{max}$  jest maksymalnym natężeniem przepływu równym 10 l/min, przy teoretycznej wartości napięcia wynoszącego 24 VDC, a  $U_{max}$  – maksymalnym napięciem, jakie można podać na pompę.

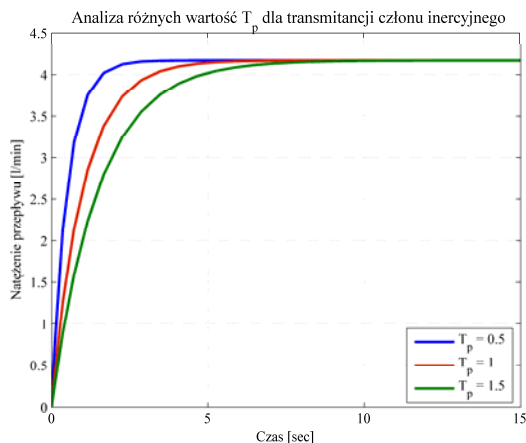
Bezwładność wirnika pompy  $T_p$  dopasowano metodą prób i błędów, na podstawie analizy zarejestrowanych odpowiedzi skokowych pompy na wymuszenie sygnałem sterującym równym 10 VDC podczas badań eksperymentalnych. Porównania i weryfikacji otrzymanych wartości bezwładności wirnika pompy dokonano za pomocą oprogramowania Matlab/Simulink®, według schematu przedstawionego na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat do weryfikacji modelu dynamiki pompy przy różnych wartościach  $T_p$

Odpowiedzi na wymuszenie skokowe poszczególnych modeli pompy wg. rysunku 2 przedstawiono na rysunku 3. Otrzymane wyniki symulacyjne zostały porównane z danymi mierzonymi i w efekcie otrzymano model dynamiki pompy zapisany za pomocą transmitancji operatorowej w postaci:

$$(4) \quad G_{pompa}(s) = \frac{0,417}{0,5s + 1}$$

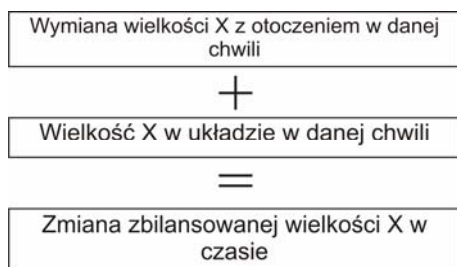


Rys. 3. Wpływ wartości bezwładności wirnika pompy  $T_p$  na dynamikę modelu analitycznego

Kolejnym elementem stanowiska dydaktycznego składającym się na pętlę regulacji poziomu cieczy w zbiorniku jest sam zbiornik. Przy jego modelowaniu uwzględniono fakt, że sygnałem wejściowym jest natężenie przepływu cieczy, a sygnałem wyjściowym jest wysokość słupa cieczy. Natężenie przepływu cieczy, zgodnie z układem jednostek SI, jest wyrażone w  $m^3/s$ . Przedstawienie modelu analitycznego zbiornika jest uzależnione od specyfikacji napełniania. W przypadku zbiornika napełnianego z góry przyjmuje on postać transmitancji operatorowej członu całkującego [5,6].

$$(5) \quad G_{zbiornik}(s) = \frac{1}{Ts}$$

gdzie:  $T$  oznacza stałą czasową, która głównie zależy od pola przekroju poprzecznego zbiornika. Model matematyczny zbiornika został wyznaczony w oparciu o uogólnione prawo zachowania, które zobrazowano na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat uogólnionego prawa zachowania, [5]

W przypadku zbiornika napełnianego z góry, natężenie przepływu cieczy zależy od różnicy ciśnienia wygenerowanego przez pompę oraz ciśnienia słupa cieczy w zbiorniku [7]:

$$(6) \quad Q = A_w \sqrt{\frac{2g(p_{pompa} - p)}{\rho}}$$

gdzie:  $A_w$  jest polem powierzchni otworu wlotowego,  $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $p_{pompa}$  oznacza ciśnienie wygenerowane przez pompę,  $p$  – ciśnienie hydrostatyczne wywarne przez słup cieczy w zbiorniku,  $\rho$  – gęstość cieczy. Można zauważyć, że rosnące ciśnienie hydrostatyczne wygenerowane przez słup wody będzie spowalniać proces napełniania zbiornika aż do osiągnięcia równoważnego ciśnienia jakie generuje pompa. Uwzględniając rozmiary

zbiornika, wygenerowane ciśnienie hydrostatyczne przy maksymalnej wysokości słupa cieczy jest mało znaczące w porównaniu do ciśnienia generowanego przez pompę. Dlatego też wpływ ten został pominięty i uzyskany uproszczony model dynamiki zbiornika został opisany następującą transmitancją operatorową:

$$(7) \quad G_{zbiornik}(s) = \frac{0,000017}{0,0361s}$$

Należy zauważyć, że wartość znajdująca się w liczniku równania (7) odpowiada za przekształcenie jednostek z  $l/min$  na  $m^3/s$ .

Ostatnim elementem, który składa się na pętlę regulacji poziomu słupa cieczy w zbiorniku jest sztywny przewód hydrauliczny. Model przewodu można przedstawić na podstawie dobrze znanego równania Bernoullego rozszerzonego o człon sumy strat przepływu cieczy następująco: [8]

$$(8) \quad \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \Sigma h_s$$

Równanie (8) uwzględnia straty liniowe oraz straty miejscowe natężenia przepływu cieczy. Jednak przyjęcie takiego modelu nie należy do najefektywniejszych rozwiązań, gdyż model ten jest dokładny głównie w stanach ustalonych. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie przewodu jako układu MIMO (ang. *multi-input multi-output*) [9], gdzie wejściami oraz wyjściami są odpowiednio ciśnienia i natężenia przepływu na końcach linii. W niniejszym przypadku, przewód hydrauliczny przybliżono członem opóźniającym. W modelu członu opóźniającego uwzględniono odpowiedni współczynnik korekcyjny, który wprowadza w układzie niewielkie straty natężenia przepływu cieczy.

Traktując przewód jako człon opóźniający i uwzględniając odpowiedni współczynnik korekcyjny wprowadzający straty natężenia przepływu cieczy model przewodu zapisano następująco:

$$(9) \quad G_{przewod}(s) = ke^{-sT_o}$$

gdzie:  $k$  oznacza współczynnik korekcyjny, a  $T_o$  – czas opóźnienia transportowego. Współczynnik korekcyjny można wyznaczyć biorąc pod uwagę stosunek natężenia przepływu wyliczonego na podstawie równania Bernoullego (8) do maksymalnego natężenia podanego w dokumentacji pompy [10]. Czas opóźnienia jest stały i został wyznaczony z przekształcenia podstawowego wzoru na prędkość cieczy:

$$(10) \quad v = \frac{x}{t}$$

W efekcie otrzymano transmitancję operatorową przewodu hydraulicznego:

$$(11) \quad G_{przewod}(s) = 0,938e^{-2,45s}$$

### Identyfikacja i weryfikacja modelu dynamicznego

Identyfikacja modelu układu regulacji poziomu cieczy w zbiorniku została przeprowadzona w oparciu o wejściowe, surowe dane mierzone zarejestrowane na obiekcie rzeczywistym. Przyjęto tutaj, że na model obiektu sterowania składają się wszystkie jego elementy stanowiące układ otwarty i pętlę sprzężenia zwrotnego. W tym celu identyfikowany obiekt sterowania potraktowano jako układ typu wejście-wyjście, gdzie sygnałem wejściowym jest napięcie elektryczne podawane na pompę, a sygnałem wyjściowym jest pojemność cieczy w zbiorniku (co przy znanych wymiarach zbiornika jednoznacznie przekłada się na poziom cieczy). Otrzymane dane mierzone stanowią dane wejściowe do procesu identyfikacji modelu

analitycznego zrealizowanego przy pomocy środowiska Matlab/Simulink<sup>®</sup>. Przybornik Identification Toolbox oprogramowania Matlab/Simulink<sup>®</sup> został wykorzystany do obliczenia modelu analitycznego układu regulacji poziomu cieczy w zbiorniku na podstawie charakterystyk mierzonych. W procesie identyfikacji przyjęto czas próbkowania zgodny z czasem próbkowania z jakim zostały zarejestrowane charakterystyki mierzone. Identyfikację przeprowadzono metodą modelu ARX (ang. *autoregressive with exogenous input*), który jest szczególnym modelem ARMAX. Wybór został uwarunkowany tym, że powyższy model znajduje zastosowanie przy opisie układów SISO (ang. *single-input single-output*) [11]. Model ARX można zobrazować następującym wzorem:

$$(12) \quad y_t = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u_{t-d} + \frac{1}{A(q^{-1})} \xi_t$$

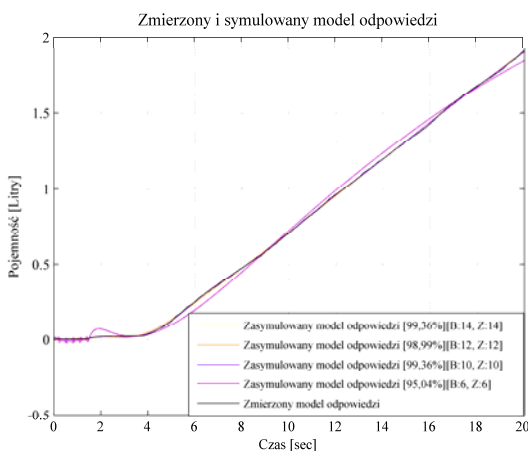
gdzie:  $y_t$  jest opisem sygnału wyjściowego,  $u_t$  jest sygnałem sterującym,  $\xi_t$  jest niezależnym zakłóceniem. Natomiast parametry, które opisane są symbolami  $A(q^{-1})$  oraz  $B(q^{-1})$  to wielomiany różnicowe, których współczynniki  $a_n$  i  $b_n$  są obliczone dla modelu względem operatora dyskretnego  $q^{-n}$ , który oznacza opóźnienie (przesunięcie wstecz) sygnału o wartość  $n$ . Wielomiany te są opisane następująco:

$$(13) \quad A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{nA} q^{-nA}$$

$$(14) \quad B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + \dots + b_{nB} q^{-nB}$$

Podczas identyfikacji z wykorzystaniem przybornika Identification Toolbox, w celu otrzymania najbardziej przybliżonego modelu należało odpowiednio manipulować jego ilością zer i biegunów. Wynikało to z faktu, że pożądany był model w postaci transmitancji operatorowej minimalnego rzędu. W wyniku przeprowadzonej identyfikacji otrzymano przybliżenie dynamiki układu regulacji modelami analitycznymi różnego rzędu w zakresie 6÷14.

W pierwszym etapie weryfikacji modelu zidentyfikowanego, charakterystyki dynamiczne odpowiedzi na wymuszenie skokowe otrzymanych zidentyfikowanych modeli symulacyjnych układu otwartego zostały porównane z charakterystyką mierzoną (patrz rysunek 5). W tym przypadku stopień przybliżenia dla poszczególnych uzyskanych modeli jest powyżej 95%. Dlatego też dokonano redukcji rzędu zidentyfikowanego modelu analitycznego.



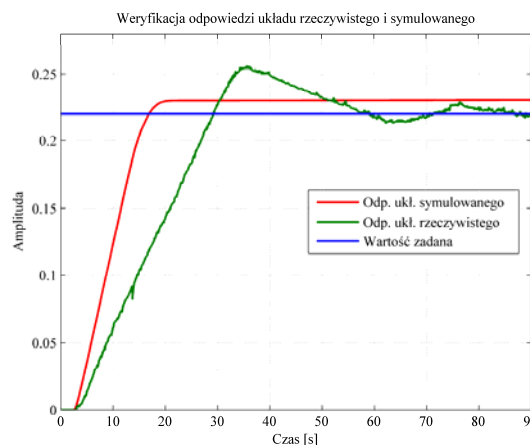
Rys. 5. Porównanie modelu symulacyjnego układu otwartego z charakterystyką mierzoną

Zredukowany zidentyfikowany model układu otwartego przedstawiono w postaci wartości zer i biegunów zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Zera i bieguny modelu zidentyfikowanego

Zera	Bieguny
43630	-4405,5
63+364j	-11,8+527,6j
63-364j	-11,8-527,6j
14+117j	-5,8+127,9j
14-117j	-5,8-127,9j
51	-8,3+30,4j
-25+7j	-8,3-30,4j
-25-7j	-0,3+1,3j
-2	-0,3-1,3j
1+j	-0,4
1-j	0

Ostatnim etapem weryfikacji zidentyfikowanego modelu obiektu jest weryfikacja układu zamkniętego. W tym celu zidentyfikowany model układu otwartego został zamknięty ujemnym sprzężeniem zwrotnym z regulatorem PID, a następnie zasymulowany w środowisku Simulink. Następnie, przyjmując stałe wartości parametrów/nastaw regulatora PID, porównano odpowiedzi skokowe układów regulacji dla układu uzyskanego metodą identyfikacji oraz dla układu rzeczywistego. W wyniku porównania, przy tych samych nastawach regulatora PID, otrzymano następujące odpowiedzi na wymuszenie skokowe, które przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Porównanie odpowiedzi skokowej modelu symulacyjnego układu zamkniętego z regulatorem PID z charakterystyką mierzoną

Analizując otrzymane wyniki zarejestrowane dla układu zamkniętego (rys. 6), można zauważyć, że dwie odpowiedzi tj. symulacyjna oraz mierzona różnią się od siebie. Różnice wynikają z przyjętych uproszczeń i założeń podczas budowy modelu w drodze identyfikacji, jak również z błędów samej metody identyfikacji oraz niepoprawnie skonfigurowanych parametrów identyfikacji.

Wybrane wartości parametrów określających jakość statyczną oraz dynamiczną układu zamkniętego zostały zebrane i przedstawione w tabeli 2. Parametry modelu symulacyjnego układu zamkniętego z regulatorem PID różnią się od parametrów określających jakość regulacji dla układu rzeczywistego. Różnice te wynikają z niedokładności wyznaczonego modelu zidentyfikowanego w skutek przyjętych założeń i uproszczeń.

Od strony fizycznej, obserwowane różnice w wartościach parametrów jakości regulacji (tabela 2), są spowodowane np. brakiem uwzględnienia bezwładności cieczy podczas zatrzymania pracy pompy oraz

niewzględnieniem wszystkich nieliniowości występujących w układzie rzeczywistym.

Tabela 2. Parametry jakości układów regulacji

Układ regulacji	Symulacyjny	Rzeczywisty
przeregulowanie [%]	-	25
czas regulacji [s]	-	80
czas narastania [s]	15	28
uchyb statyczny [%]	7	-

### Podsumowanie

Modelowanie oraz identyfikacja elementów układu regulacji poziomu cieczy w stanowisku dydaktycznym typu Festo MPS® PA Compact Workstation została zrealizowana z daną dokładnością przy przyjęciu pewnych założeń i uproszczeń. W przypadku układów automatycznej regulacji istnieje wiele elementów nieliniowych, które dla uproszczenia są modelowane jako liniowe.

W pracy zrealizowano identyfikację modelu układu otwartego oraz modelu układu zamkniętego regulacji poziomu cieczy w zbiorniku na podstawie stacji Festo MPS®. Wyżej wspomniana identyfikacja została zrealizowana bazując na surowych danych mierzonych, zarejestrowanych podczas badań eksperymentalnych. Otrzymanie dokładnego i efektywnego modelu matematycznego wymaga dobrania odpowiedniej metody identyfikacji oraz wartości parametrów estymacji. Otrzymany model matematyczny układu regulacji rozszerza możliwości edukacyjne stanowiska dydaktycznego i

pozwała na prowadzenie kolejnych badań, których celem może być na przykład projektowanie liniowych lub nieliniowych praw sterowania.

### LITERATURA

- [1] Helmich J., *Festo Module 2: Commissioning a basic closed-loop control system*, (2008)
- [2] Helmich J., *Festo MPS PA Compact Workstation Manual*, (2008)
- [3] Wolfgang E., *MPS PA Compact Workstation – Fluid Lab® - PA - Handling description*, (2008)
- [4] Korczak A., Pakuła G., *Dynamika układów pompowych*, (1993), 7-45
- [5] Czemplik A., *Model dynamiki układów fizycznych dla inżynierów. Zasady i przykłady konstrukcji modeli dynamicznych obiektów automatyki*, (2008)
- [6] Siemieniako F., Gosiewski Z., *Automatyka. Tom I: Modelowanie i analiza układów*, (2006)
- [7] Siemieniako F., *Podstawy automatyki z zadaniami*, (1986)
- [8] Walden H., *Mechanika płynów*, (1980)
- [9] Krus P., Weddfelt K., Palmberg J.O., *Fast Pipeline Models for Simulation of Hydraulic Systems*, (1994)
- [10] *Festo Didatic Technical Documentation – Data Sheet*, (2008)
- [11] Królikowski A., Horla D., *Identyfikacja obiektów sterowania – metody dyskretne*, (2005)

**Autorzy:** mgr inż. Paweł Romuszewski, E-mail: [pawel.romuszewski@gmail.com](mailto:pawel.romuszewski@gmail.com), dr inż. Arkadiusz Mystkowski, E-mail: [a.mystkowski@pb.edu.pl](mailto:a.mystkowski@pb.edu.pl), dr hab. Ewa Pawłuszewicz, E-mail: [e.pawluszewicz@pb.edu.pl](mailto:e.pawluszewicz@pb.edu.pl), Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok