

Artur MUCHA, Mariusz NOWAK

*Institut Informatyki
Politechnika Poznańska*

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE MODELOWANIA I SYMULACJI W INŻYNIERII I OCHRONIE ŚRODOWISKA

COMPUTER SUPPORT FOR MODELLING AND SIMULATION
IN ENVIRONMENT PROTECTION ENGINEERING

This paper presented the use of traditional and intelligent control algorithms for real laboratory object model "flow control and fluid level" type. In the presented approach, verification of the developed control algorithms has been conducted using the objects modeled in Matlab environment. In this paper there is presented the possibility of computer simulation of control systems in Matlab. This paper also presents a project of the SCADA system for the real object model to monitor, visualization and control of the level of values and fluid flow. In order to verify the proposed system of monitoring and visualization of proposed simulation of PLC controller and control panel in the appropriate visualization of simulation environments. Implemented simulation of PLC and control panel in the appropriate visualization of simulation environments in order to verify the proposed control system. Advantage of the proposed solution is to reduce the cost of research and experimentations.

1. Wprowadzenie

Komputerowe systemy sterowania są dziedziną, która rozwija się bardzo intensywnie. Coraz częściej spotykamy się z nimi w życiu codziennym, często nawet nie będąc tego świadomym. Wdrożenie komputerowego systemu sterowania często uzależnione jest od znacznych nakładów finansowych, które związane są z koniecznością tworzeniem rzeczywistego modelu badanego obiektu. Próbą ominięcia ponoszonych kosztów jest wdrażanie komputerowego wspomaganie modelowania i symulacji.

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania komputera jako kompleksowego narzędzia, które może być pomocne przy projektowaniu systemu sterowania. Zaprezentowano aplikacje umożliwiające wirtualizację poszczególnych elementów systemu sterowania, takich jak: modelowanie obiektu sterowania, symulacje działania algorytmów sterowania, symulacje systemów monitorująco-wizualizacyjnych. Poszczególne elementy można ze sobą łączyć, co pozwala na stworzenie kompletnego systemu mode-

lowania i symulacji dla całego układu, z jednoczesnym obniżeniem kosztów syntezy i walidacji algorytmów sterowania.

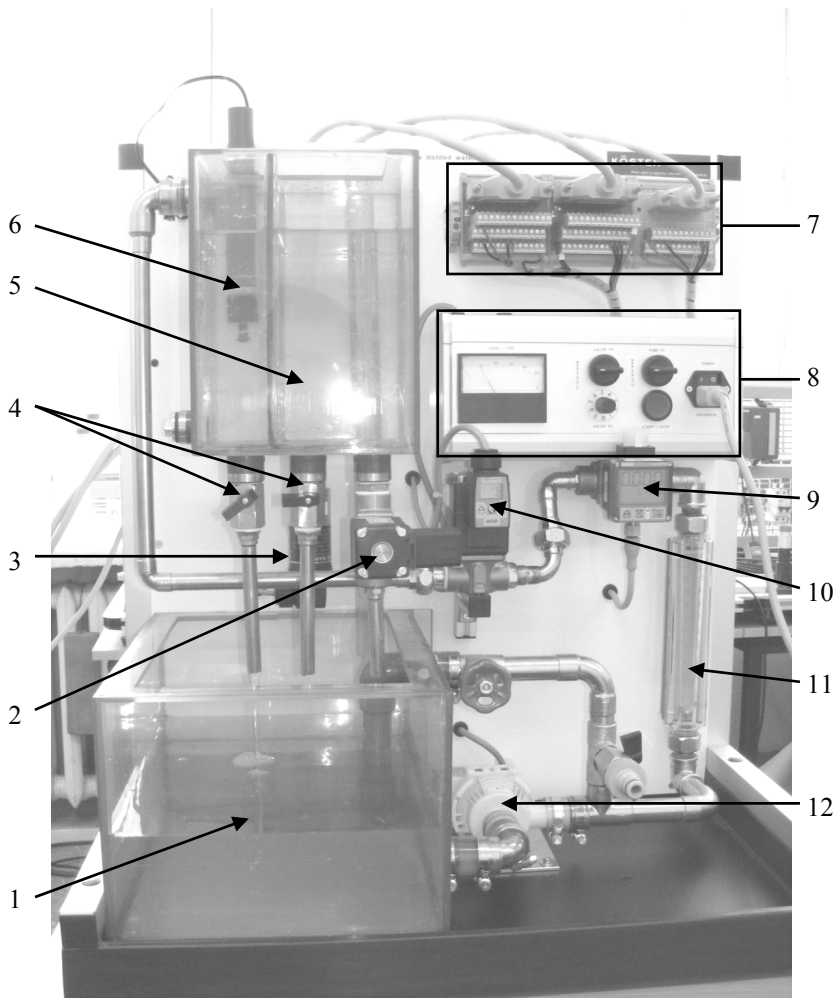
Przedstawiony schemat wirtualizacji poszczególnych elementów stanowiska badawczego typu „sterowanie przepływem i poziomem cieczy” można przenieść do dużo większych rozwiązań rzeczywistych funkcjonujących w inżynierii i ochronie środowiska. Analogiczne postępowanie przeprowadzone dla funkcjonujących systemów pozwala na optymalizację algorytmów, bez konieczności ponoszenia ryzyka związanego z pracą na obiekcie. Wykorzystanie metod komputerowego wspomaganie modelowania i symulacji do projektowania nowych rozwiązań pozwala natomiast na wczesne przewidywanie zagrożeń, których wystąpienie mogłoby być nieprzewidywalne w skutkach w przypadku tradycyjnych metod projektowania systemów sterowania [2], [3].

2. Rzeczywisty układ badawczy

W rzeczywistym układzie badawczym rolę obiektu sterowania pełni stanowisko laboratoryjne typu „sterowanie przepływem i poziomem cieczy”. Model ten umożliwia zapoznanie się z podstawowymi zagadnieniami związanymi ze sterowaniem poziomem i przepływem cieczy. Kolejnym elementem układu jest sterownik PLC, pozwalający na implementację algorytmów sterowania. Ostatnią częścią układu jest system monitorowania i wizualizacji umożliwiający kontrolę sterowanego obiektu i obrazowanie jego stanu. Wszystkie elementy tworzą kompleksowy model rzeczywistego problemu.

2.1. Obiekt sterowania

Stanowisko laboratoryjne „sterowanie przepływem i poziomem cieczy”, przedstawione na rys. 1 może być reprezentantem rzeczywistych problemów z dziedziny przesyłu i rozprowadzania wody w inżynierii i ochronie środowiska. Przy odpowiednim zdefiniowaniu problemu obiekt może być dowolnej klasy – SISO, SIMO, MISO, czy MIMO. Sygnały sterujące oraz odpowiedzi obiektu mogą być zarówno sygnałami ciągłymi (stopień otwarcia zaworu dopływowego, poziom cieczy w zbiorniku) jak i dyskretne dwustanowe (załączenie/wyłączenie pompy, otwarcie/zamknięcie zaworu odpływowego). Prezentowane stanowisko badawcze pozwala zatem na testowanie nowoczesnych rozwiązań systemów sterowania z dziedziny sterowania przepływem i poziomem.



Rys. 1. Widok obiektu sterowania wraz z zaznaczonymi elementami

Fig. 1. Object control with selected elements

Na rys. 1 przedstawiono widok obiektu sterowania. Stanowisko badawcze składa się z następujących elementów:

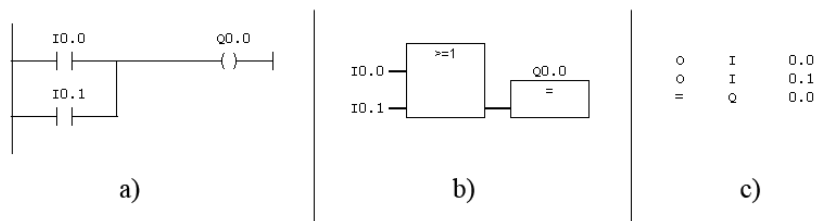
1. zbiornik pomocniczy o pojemności 20l,
2. zawór odpływowy dwustanowy,
3. manometr przeponowy pełniący funkcję sensora poziomu cieczy,
4. zawory odpływowe sterowane ręcznie,
5. zbiornik dwukomorowy o pojemności 7l,
6. pływakowy czujnik poziomu,
7. złącza kablowe do podłączenia modelu ze sterownikiem,
8. lokalny panel sterowania,

9. czujnik przepływu,
10. dolutowy zawór proporcjonalny sterowany elektromagnesem,
11. rotometr,
12. pompa samozasysająca.

2.2. Sterownik PLC

Algorytmy regulacji implementuje się w często wykorzystywanych sterownikach typu PLC. Moc obliczeniowa tych urządzeń jest coraz większa, co pozwala na stosowanie coraz bardziej skomplikowanych algorytmów sterowania. Regulatory klasyczne PID coraz częściej ustępują miejsca inteligentnym algorytmom regulacji, takim jak sterowanie predykcyjne, regulacja rozmyta, czy rozwiązania dedykowane dla poszczególnych obiektów.

W prezentowanym komputerowym systemie sterowania wykorzystywane są sterowniki PLC firmy Siemens serii S7-300, które są bardzo popularne w przemyśle [6], [7]. Sterowniki PLC są programowane za pomocą specjalistycznego oprogramowania, przy użyciu dedykowanych języków programowania. Sterowniki Siemens wykorzystują oprogramowanie Simatic Step 7, które umożliwia wykorzystanie jednego z trzech języków: drabinkowy (LAD), diagram bloków funkcyjnych (FBD) oraz lista instrukcji (STL). Języki LAD i FBD pozwalają na nieskomplikowane i intuicyjne tworzenie programów, przy użyciu wspomagającego programowanie środowiska graficznego. STL jest tekstowym językiem programowania przypominającym formę języka assemblera sterownika. Język ten pozwala na prowadzenie dokładnej kontroli nad algorytmem sterowania oraz optymalizację jego działania.



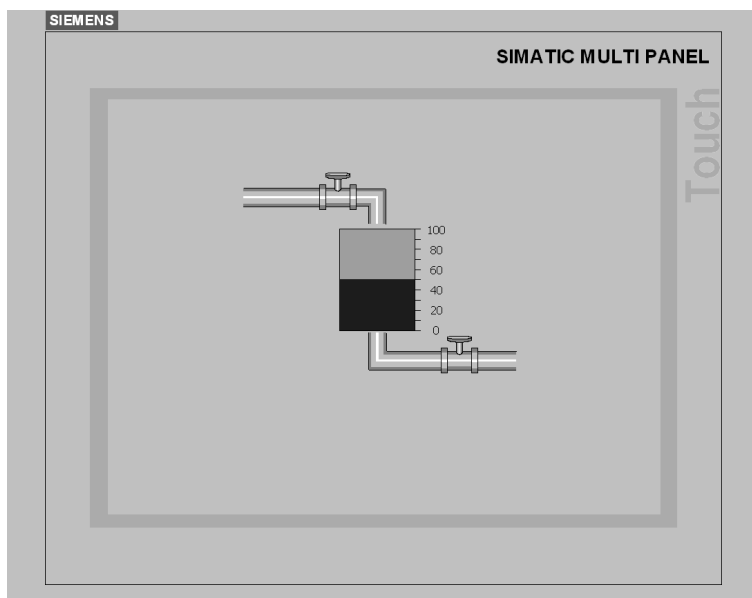
Rys. 2. Przykład bramki OR w trzech językach programowania: a) drabinkowy (LAD), b) diagram bloków funkcyjnych (FBD), c) lista instrukcji (STL)

Fig. 2. Example of OR gate in three programming languages: a) LAD - ladder, b) FBD - function block diagram, c) STL - instruction list

W przedstawianym komputerowym systemie sterowania obiektem typu „poziom i przepływ” na sterowniku PLC zaimplementowano regulatory klasyczne PID.

2.3. System monitorowania i wizualizacji

W układach regulacji automatycznej coraz większą rolę odgrywają kompleksowe systemy monitorowania i wizualizacji procesów. Ich zadaniem jest ułatwienie kontroli poprawności pracy obiektów sterowanych. Pozwalają na wykrycie zagrożeń, a w początkowej fazie wdrażania systemu automatycznej regulacji mogą pomagać przy ręcznym dostrajaniu parametrów algorytmów [1]. Urządzeniami pełniącymi funkcję systemów monitorowania i wizualizacji mogą być uniwersalne ekrany synoptyczne, bądź specjalizowane konstrukcje zaprojektowane do konkretnych rozwiązań. Wadą tych drugich jest brak możliwości dostosowania działającego już systemu do zmieniających się potrzeb. Przykładowy ekran synoptyczny wykorzystywany w systemach sterowania rozdziału i przesyłu wody przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Przykładowy ekran synoptyczny

Fig. 3. Sample synoptic screen

W prezentowanym komputerowym systemie sterowania zastosowano multipanel dotykowych Siemens. Multipanel dotykowy zintegrowany jest z komputerem wbudowanym działającym pod nadzorem systemu operacyjnego czasu rzeczywistego WindowsCE. Moc obliczeniowa takiego komputera wbudowanego pozwala na bezproblemową implementację inteligentnych algorytmów sterowania [5]. Do programowania tego typu urządzenia służy aplikacja WinCC flexible [6], [7]. Jest to rozbudowane narzędzie, pozwalające na tworzenie zaawansowanych systemów monitorowania i wizualizacji procesów. Środowisko pozwala na tworzenie zarówno prostych systemów monitorowania, jak i bardzo skomplikowanych łącznie ze wspomaganie funkcjonowania zaawansowanych, inteligentnych algorytmów sterowania.

3. Wirtualny system sterowania

Wdrożenie lub optymalizacja systemu sterowania zazwyczaj wiąże się z dużymi nakładami finansowymi i czasowymi, nierzadko z przymusowym wstrzymaniem pracy sterowanego procesu. Aby zminimalizować te koszty oraz czasy przestoju, wykorzystuje się modelowanie i symulacje komputerową wspomagającą proces projektowania kompletnego komputerowego systemu sterowania.

3.1. Symulacja obiektu sterowania

W celu stworzenia systemu sterowania obiektem przedstawionym na rys. 1 należy między innymi przeprowadzić syntezę algorytmów sterowania. W prezentowanym podejściu w procesie projektowania komputerowego systemu sterowania, syntezy oraz walidacji algorytmów sterowania dokonano w środowisku Matlab & Simulink. Na tym etapie projektowania, niezbędne stało się stworzenie modelu matematycznego obiektu sterowania. Analizując rzeczywisty model obiektu, założono rozważanie systemu nieliniowego.

Do zbiornika o pewnej wysokości i polu powierzchni podstawy A [m²] pompowana jest ciecz, której przepływ objętościowy wynosi q_{we} [m³/s]. Jednocześnie założono, że ze zbiornika wypływa ciecz przez zawór o stałej wypływu C . Przepływ cieczy wypływającej oznaczono jako q_{wy} [m³/s]. Przyjęto, że w analizowanym obiekcie sterowania wielkością wejściową jest q_{we} , natomiast wielkościami wyjściowymi mogą być q_{wy} lub wysokość słupa cieczy w zbiorniku h [m]. Stałe A i C zostały przyjęte jako parametry obiektu sterowania. Przyjęto następujące równanie bilansu przepływów w zbiorniku:

$$\frac{dV}{dt} = q_{we} - q_{wy} \quad (1)$$

przyjmując zależność na objętość cieczy w zbiorniku:

$$V = A \cdot h \quad (2)$$

oraz zakładając, że przepływ wyjściowy jest burzliwy:

$$q_{wy} = C \cdot \sqrt{h} \quad (3)$$

otrzymujemy następującą zależność:

$$A \frac{dh}{dt} = q_{we} - C \cdot \sqrt{h} \quad (4)$$

W stanie ustalonym przyjmuje się, że wysokość słupa cieczy jest stała (h_{ust}), zatem:

$$\frac{dh}{dt} = 0, \text{ czyli } q_{we} = C \cdot \sqrt{h_{ust}} \quad (5), (6)$$

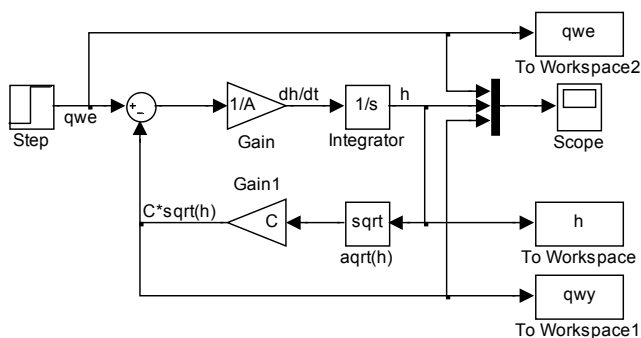
Równanie (4) można przekształcić do postaci:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} (q_{we} - C \cdot \sqrt{h}) \quad (7)$$

Równanie (7) można zamodelować w środowisku Matlab & Simulink. Model obiektu sterowania zrealizowany za pomocą bloków Simulinka został przedstawiony na rys. 4. Jako sygnał q_{we} wykorzystano skok jednostkowy. Dla tak dobranego sygnału wejściowego przeprowadzono analizę poprawności konstrukcji modelu matematycznego. Z zależności (6) można wyznaczyć analityczną postać charakterystyki statycznej:

$$h = \left(\frac{q_{we}}{C} \right)^2 \tag{8}$$

Charakterystykę statyczną (8) analizuję się w celu określenia punktu pracy układu. Założono, że przy stałym przepływie q_{we0} oraz stałej zaworu C , wysokość słupa cieczy w zbiorniku będzie w stanie ustalonym wynosiła h_0 . Zachowanie układu w stanie ustalonym zależy jedynie od wartości q_{we0} i C , nie zależy natomiast od warunków początkowych, czyli pierwotnej wysokości słupa cieczy oraz od wymiarów geometrycznych zbiornika.



Rys. 4. Model obiektu sterowania w środowisku Matlab & Simulink

Fig. 4. Control object model in Simulink environment

Chcąc wyprowadzić równanie modelu zlinearyzowanego wokół punktu pracy (q_{we0} , h_0), należy dokonać obliczeń pochodnych cząstkowych wyrażenia (7) po wszystkich występujących w równaniu zmiennych oraz wymnożeniu ich przez przyrosty odpowiednich wielkości oraz podstawienia parametrów charakterystycznych dla stanu ustalonego:

$$A \cdot \Delta \left(\frac{dh}{dt} \right) \Big|_0 = \Delta q_{we} - C \frac{1}{2\sqrt{h}} \Big|_0 \Delta h \tag{9}$$

Przyjmując w stanie ustalonym stałe wartości dla wszystkich sygnałów otrzymuje się zerowe wartości wszystkich pochodnych. Zatem równanie (9) przekształca się do postaci zależności liniowej (10):

$$\Delta q_{we} = C \frac{1}{2\sqrt{h_0}} \Delta h, \text{ zatem } \Delta h = \frac{2\sqrt{h_0}}{C} \Delta q_{we} \quad (10), (11)$$

W celu wykreślenia charakterystyki statycznej modelu zlinearyzowanego, zależność (11) zapisano w postaci:

$$h - h_0 = \frac{2\sqrt{h_0}}{C} q_{we} - q_{we0}, \text{ czyli } h = \frac{2\sqrt{h_0}}{C} (q_{we} - q_{we0}) + h_0 \quad (12), (13)$$

W otoczeniu punktu pracy charakterystyka statyczna modelu zlinearyzowanego jest podobna do charakterystyki modelu nieliniowego.

W celu przeprowadzenia syntezy regulatora dla układu sterowania poziomem cieczy w zbiorniku określono transmitancję operatorową obiektu:

$$G(s) = \frac{\Delta H(s)}{\Delta Q(s)} \quad (14)$$

Po przekształceniu równania (9) otrzymuje się zależność:

$$As\Delta H(s) = \Delta Q_{we}(s) - C \frac{1}{2\sqrt{h}} \Delta H(s) \quad (15)$$

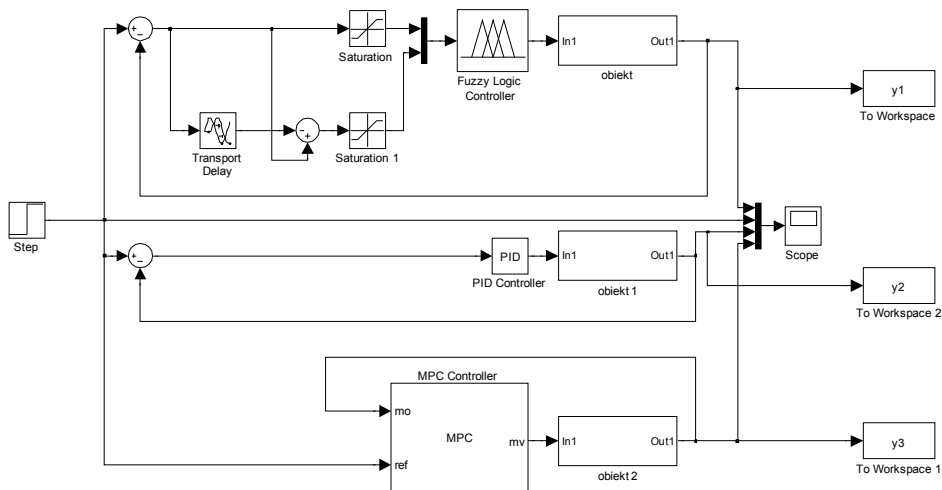
Transmitancja operatorowa ma zatem postać:

$$G(s) = \frac{\Delta H(s)}{\Delta Q(s)} = \frac{\frac{2\sqrt{h_0}}{C}}{\frac{2A\sqrt{h_0}}{C}s + 1} = \frac{k}{Ts + 1} \quad (16)$$

Wykorzystując środowisko Matlab & Simulink można przeprowadzić porównanie odpowiedzi skokowych dla modelu liniowego i nieliniowego. Możliwe stanie się wtedy wywnioskowanie maksymalnych przyrostów wartości sygnałów wokół punktu pracy, dla których model zlinearyzowany właściwie opíše zachowanie się nieliniowego systemu.

Modelując obiekt sterowania z wykorzystaniem transmitancji operatorowej (16) można dokonać porównania proponowanych algorytmów sterowania, zarówno klasycznych jak i wykorzystujących sztuczną inteligencję. Na rys. 5 przedstawiono jedną z metod walidacji opracowanych algorytmów sterowania z wykorzystaniem bloków funkcjonalnych środowiska Matlab & Simulink. Po przeprowadzeniu walidacji i weryfikacji proponowanych klasycznych i inteligentnych algorytmów sterowania można bez

problemów przystąpić do implementacji opracowanych rozwiązań zarówno na sterowniku PLC jak i na komputerze wbudowanym zintegrowanym z panelem dotykowym [4].



Rys. 5. Przykład walidacji systemu sterowania w środowisku Matlab & Simulink

Fig. 5. Example of control system validation in Matlab & Simulink environment

3.2. Symulacja sterownika PLC

Wdrażanie algorytmu sterowania bez kompleksowej walidacji niesie ze sobą bardzo dużo niebezpieczeństw, na które nie można pozwolić.

Aby uniknąć konsekwencji wdrażania błędnych rozwiązań, oprogramowanie sterownika PLC musi zostać bezwzględnie przetestowane. Niestety zazwyczaj możliwości sprzętowe ograniczają nasze pole działania. Dodawanie kolejnego sterownika PLC oraz tworzenie dla niego modelu procesu pochłania wiele czasu oraz środków finansowych. Rozwiązaniem tego problemu jest programowa symulacja działania sterownika.

Jednym z modułów oprogramowania Step 7, jest symulator S7-PLCSIM. Oprogramowanie to pozwala na symulację działania jednego lub kilku, połączonych ze sobą, sterowników PLC. Symulator S7-PLCSIM pozwala na zadawanie dowolnych wartości wejściowych. Dzięki takiemu rozwiązaniu możemy przetestować algorytm działania w sytuacjach normalnej pracy oraz zasymulować warunki awaryjne. Jest to niezwykle przydatne, gdy należy ocenić oraz sprawdzić zachowanie stworzonego oprogramowania w sytuacjach, które mogą się zdarzyć na rzeczywistym obiekcie, ale ich wywołanie jest bardzo niebezpieczne.

W przypadku napotkania błędów w działaniu algorytmu, istnieje możliwość przeanalizowania kodu programu krok po kroku, co pozwala na dokładną diagnozę problemu.

Możliwe jest to dzięki monitorowi sygnałów zewnętrznych, które możemy obserwować na bieżąco. Widać wtedy jednoznacznie, która linia kodu jest błędna.

Oprócz ustalania sygnałów wejściowych i monitorowania stanu wyjść sterownika, oprogramowanie S7-PLCSIM pozwala na obserwację stanu większości elementów wewnętrznych sterownika, takich jak: znaczniki, liczniki, timery i inne. Symulator nie pozwala jedynie na monitorowanie przerw sprzętowych wynikających z nieprawidłowego działania samego urządzenia (np. błąd zasilania).

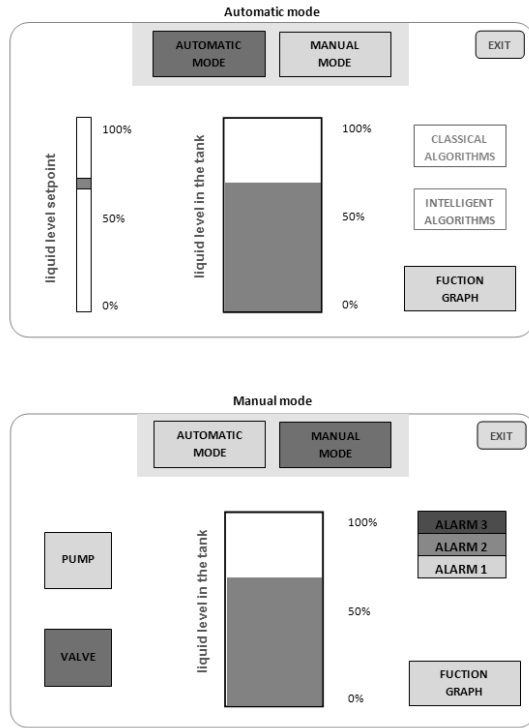
Ułatwieniem jest możliwość tworzenia skryptów oraz makr działań. Pozwala to na przeprowadzanie testów automatycznych, bez konieczności ręcznego zmieniania parametrów wejściowych dla każdej symulacji. Jest to bardzo duże ułatwienie, pozwalające na dużą oszczędność czasu.

3.3. Symulacja ekranu synoptycznego

Podstawową rolą ekranu synoptycznego jest dostarczanie w sposób przejrzysty danych dotyczących kontrolowanego procesu. Ekran synoptyczny powinien także umożliwiać szybką i intuicyjną reakcję na pewne odczyty, a także zmianę parametrów procesu. Poprawnie zaprojektowany ekran synoptyczny prezentuje kluczowe dane, ostrzega o zagrożeniach, ułatwia pracę oraz pozwala na szybkie zmiany niektórych parametrów procesu, a wszystko to w sposób przejrzysty i intuicyjny.

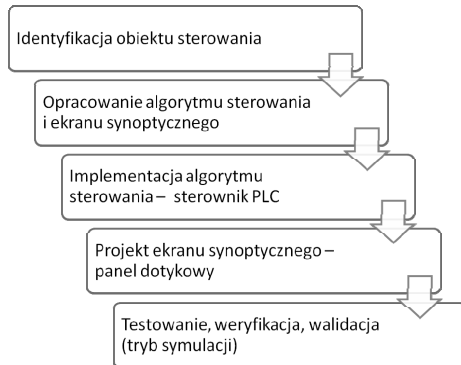
Wdrożenie systemu monitorowania i wizualizacji jest procesem czasochłonnym. Zaprojektowanie wydajnego ekranu synoptycznego nie jest sprawą prostą. Proces tworzenia takiego środowiska powinien być konsultowany z operatorami systemu, którzy mają na co dzień styczność z tym środowiskiem. Na rys. 6 przedstawiono przykładowe ekrany synoptyczne dla trybów pracy automatycznej i ręcznej dla zestawu badawczego „sterowanie przepływem i poziomem”. W trybie pracy automatycznej możliwa jest zmiana wartości zadanej poziomu cieczy w zbiorniku. Operator ma możliwość zmian nastaw regulatorów klasycznych oraz zmian parametrów inteligentnych algorytmów sterowania. Zmianie ulec może np. wartość wzmocnienia regulatora klasycznego lub długość horyzontu predykcji w algorytmie MPC (ang. Model Predictive Control). W trybie pracy ręcznej operator ma możliwość załączania i wyłączania zarówno pompy jak i zaworu. Dodatkowo zaimplementowano elementy dbające o bezpieczeństwo prowadzonego procesu w postaci generatorów alarmów i możliwości uruchamiania procedury awaryjnego zatrzymania procesu pompowania cieczy.

Na rys. 7 przedstawiono propozycje postępowania przy projektowaniu kompletnego komputerowego systemu sterowania. Sugeruje się rozpoczęcie prac od identyfikacji obiektu sterowania – stworzenie modelu matematycznego. Dalsze prace powinny dotyczyć opracowania algorytmów sterowania implementowanych zarówno na sterowniku PLC jak i na komputerach funkcjonujących na wyższym poziomie w wielowarstwowej strukturze sterowania np. komputerach wbudowanych w panele dotykowe. Po weryfikacji opracowanych algorytmów z wykorzystaniem metod symulacji komputerowej można przejść do prac związanych z implementacją rozwiązań na fizycznych sterownikach i komputerach sterujących. Kolejnym krokiem jest opracowanie ekranów synoptycznych służących do pełnej kontroli pracy systemu sterowania oraz zachowania obiektu sterowania. W kroku końcowym dokonuje się ostatecznej walidacji opracowanego systemu oraz testowania poprawności współpracy wszystkich elementów składowych komputerowego systemu sterowania, monitorowania i wizualizacji.



Rys. 6. Ekrany synoptyczne dla trybów pracy automatycznej i ręcznej

Fig. 6. Synoptic screen - automatic and manual mode



Rys. 7. Algorytm postępowania przy projektowaniu KSS

Fig. 7. Algorithm design for Computer Control System

4. Podsumowanie

Przedstawione podejście projektowania kompletnego komputerowego systemu sterowania z wykorzystaniem możliwości komputerowego wspomaganie charakteryzuje się wieloma cennymi cechami. Symulacja obiektu sterowania pozwala na pełną analizę zachowania poszczególnych elementów układu rzeczywistego. Symulacja sterownika PLC pozwala na weryfikację opracowanych algorytmów sterowania bez ponoszenia konsekwencji implementacji błędnych rozwiązań. Symulacja ekranów synoptycznych pozwala na weryfikację poprawności rozwiązań z dziedziny monitorowania i wizualizacji procesów bez konieczności dostępu do rzeczywistego nadzorowanego obiektu. Takie podejście do projektowania komputerowych systemów sterowania polecane jest w dziedzinach inżynierii i ochronie środowiska. W dziedzinach tych bardzo istotna jest możliwość sprawnego przeprowadzenia pełnej weryfikacji opracowanych rozwiązań w trybie symulacji. Testowanie rozwiązań na rzeczywistych obiektach w inżynierii i ochronie środowiska mogłoby wiązać się z koniecznością przerwania procesów co jest bardzo kosztowne lub wręcz niemożliwe.

Bibliografia

- [1] Kamiński K., *Programowanie paneli operatorskich*, Gryf, Gdańsk 2007
- [2] Mucha A., *Projekt systemu sterowania, monitorowania i wizualizacji procesu stabilizacji poziomu cieczy*, praca magisterska, Instytut Informatyki Politechniki Poznańskiej, wrzesień 2009
- [3] Nowak M., Urbaniak A., *Rozproszone sterowanie i monitorowanie w systemach wodno-kanalizacyjnych*, w: *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód*, Tom II, A. Królikowski, M. M. Sozański (red.), Wyd. PZITS, , Poznań - Zakopane, 2006 r., (539–548)
- [4] Nowak M., *Rozproszone sterowanie, monitorowanie i wizualizacja w inżynierii i ochronie środowiska*, w: *Inteligentne systemy w inżynierii i ochronie środowiska z cyklu Komputer w Ochronie Środowiska*, Jan F. Lemański, S. Zabawa (red.), Wyd. PZITS, Poznań, 2007 r., (13-22)
- [5] Tatjewski P., *Sterowanie zaawansowane obiektów - struktury i algorytmy*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002
- [6] <http://www.siemens.com/entry/cc/en>
- [7] <http://www.water.siemens.com/en/Pages/default.aspx>