

**Roman MIELCAREK**

*Instytut Informatyki,  
Politechnika Poznańska*

## **ALGORYTMY STEROWANIA I WIZUALIZACJA STANU DYDAKTYCZNYCH MODELI OBIEKTÓW WODOCIĄGOWO-ŚCIEKOWYCH**

**THE CONTROL ALGORITHMS AND VISUALIZATION OF  
DIDACTIC MODELS OF WATER AND WASTEWATER FACILITIES**

*The paper discusses several types of water supply and wastewater designed and built at the institute of computing science Poznań University of Technology, for teaching purposes. Four such models are discussed: the virtual model of the water pumping station and physical models of: water supply, the satellite pumping station and the pumping main station. In the second part of the paper selected issues concerning and visualization of these models are presented.*

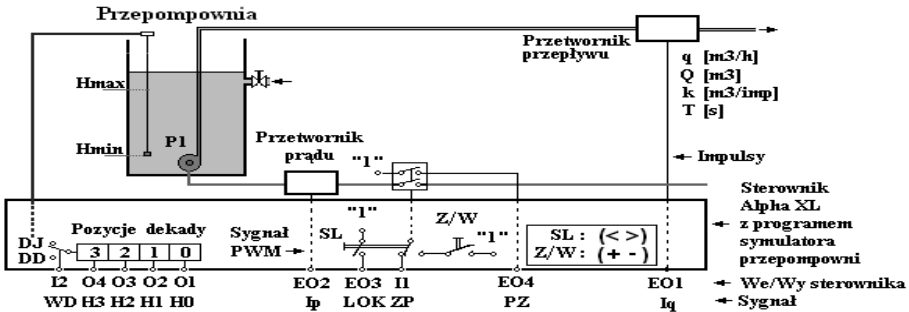
### **1. Wprowadzenie**

Monitorowanie pracy, automatyzacja i wizualizacja stanu obiektów wodociągowo-ściekowych wymaga znajomości zasad działania tych obiektów od strony technologicznej, jak również ich wyposażenia przeznaczonego do pobierania z nich informacji o realizowanym procesie oraz wyposażenia przeznaczonego do ich sterowania. W procesie dydaktycznym przekazania wiedzy teoretycznej na ww. temat nie daje pełnego wyobrażenia o problemach występujących w szeroko rozumianej automatyzacji tego rodzaju obiektów. Drugim istotnym czynnikiem byłoby przećwiczenie problematyki automatyzacji na rzeczywistym obiekcie, co z oczywistych względów nie jest możliwe do wykonania. Jedyną alternatywą jest wykonanie procesu automatyzacji na fizycznych modelach tych obiektów.

Stąd też w pracy przedstawiono kilka rozwiązań tych modeli, jakie zaprojektowano i zbudowano w Instytucie Informatyki Politechniki Poznańskiej właśnie dla celów dydaktycznych. Są to: wirtualny (programowy) model przepompowni, model ujęć wody, model satelickiej przepompowni ścieków i model przepompowni głównej. W każdym z nich pobieraniem i sterowaniem zajmuje się sterownik PLC połączony z terminalem operatorskim lub systemem SCADA. W kolejnych punktach przedstawiono wybrane zagadnienia odczytu ich parametrów, sterowania i wizualizacji każdego z tych obiektów.

## 2. Wirtualny model przepompowni

Pierwszym, zaprojektowanym obiektem był model wirtualnej (programowej) przepompowni wody, oparty na dwóch sterownikach PLC. Pierwszy z nich realizował symulację pracy przepompowni i jej urządzeń pomiarowych. Zadaniem drugiego było odczytanie czterech parametrów pomiarowych w postaci: wartości poziomu wody w zbiorniku [m], wartości przepływu bieżącego [m<sup>3</sup>/h] i sumarycznego [m<sup>3</sup>] oraz wartości prądu [A] pompy. Schemat technologiczno-sygnalowy symulatora przepompowni pokazano na rys.1



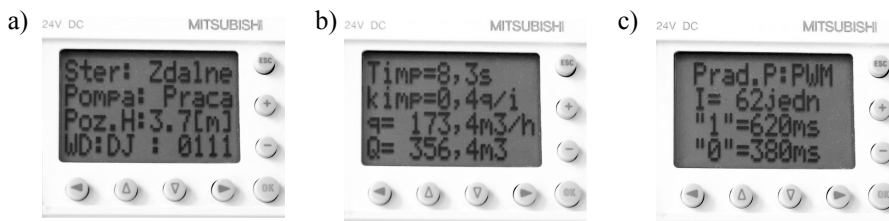
Rys.1. Schemat technologiczno-sygnalowy symulatora przepompowni wirtualnej

Fig.1. The technological and signal diagram of the virtual pumping station simulator

Symulator przepompowni realizowany jest na sterowniku Alpha XL (AL-2) [4] a jego zadaniem jest wypracowanie:

- wartości poziomu (H) z zakresu 0 – 99 jednostek przekazywanych w postaci 4 sygnałów binarnych stanu dekady jednostek (DJ) lub dekady dziesiątek (DD) na wyjściach O4 – O1 sterownika; dana dekada wybierana jest sygnałem wyboru dekady (WD),
- wartości przepływu bieżącego (q) i sumarycznego (Q) przekazywanego sygnałem impulsowym Iq o parametrach: okres impulsowania (T) i stała impulsu (k) na wyjściu EO1,
- wartości prądu z zakresu 0 – 99 jednostek przekazywanego sygnałem impulsowym Ip z kodowaniem PWM, kodowaniem długości impulsu lub z kodowaniem stanów.

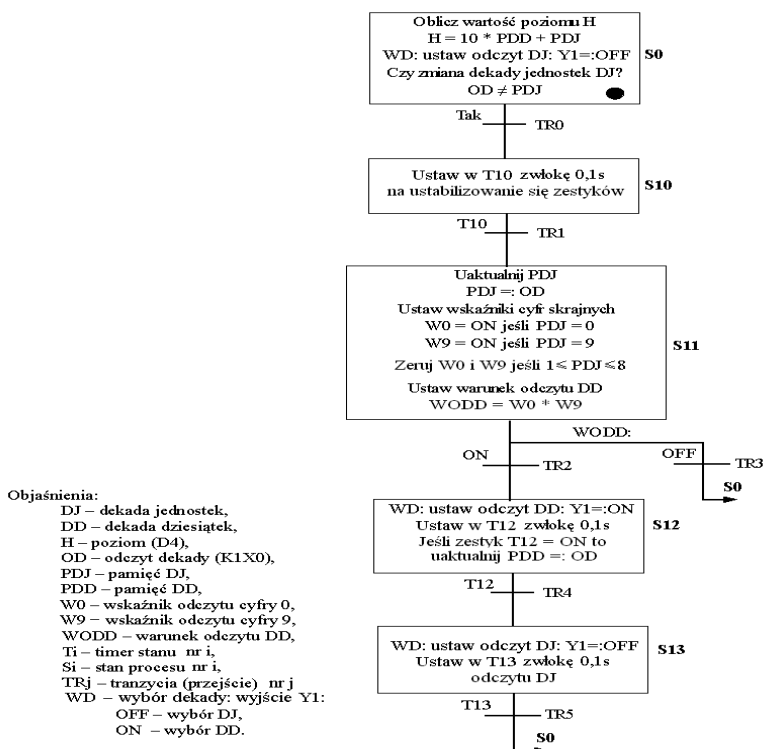
Sterownik AL-2 posiada wbudowany niewielki terminal operatorski pracujący w trybie tekstowym (4wiersze \* 12 kolumn) lub pseudograficznym (wykres słupowy), co umożliwia prezentację na nim wszystkich parametrów źródłowych i obliczeniowych. Przykładowe ekrany poziomu, przepływu i prądu pokazano na rys.2.



Rys.2. Ekran symulatora przepompowni: a) poziomu, b) przepływu, c) prądu

Fig.2. The screens shots of the pumping station parameter: a) the water level, b) the water flow, c) the pump current

Po uruchomieniu programu symulatora przepompowni następuje kolejny etap ćwiczenia, a mianowicie połączenie kablowe sterownika AL-2 ze sterownikiem nadrzędnym typu FX [4] według załączonego do ćwiczenia schematu ideowego. Finałem tego etapu jest kontrola poprawności dokonanych połączeń sygnałowych. Wymaga to, podobnie jak na rzeczywistym obiekcie, napisania prostych programów testowych na oba sterowniki.



Rys.3. Schemat blokowy programu odczytu wartości 2-dekadowego poziomu wody

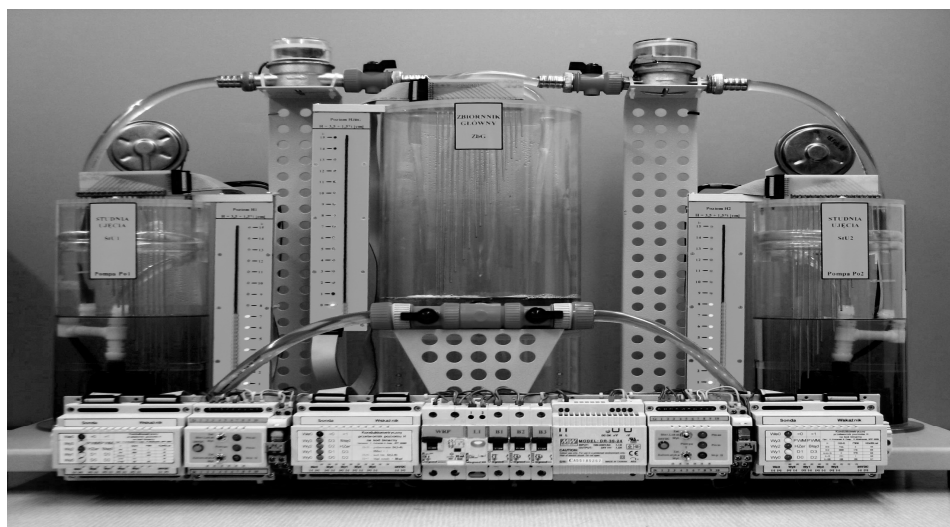
Fig.3. The block diagram of the program of two-decade water level readout

Testy polegają na kolejnym załączeniu każdego z wyjść używanego w programie docelowym danego sterownika i sprawdzeniu, czy generowane przez te wyjścia sygnały docierają do właściwych wejść drugiego sterownika. Pozytywny wynik tego testu pozwala w dalszym uruchamianiu systemu na lokalizację ewentualnych błędów wyłącznie w stworzonych programach a nie w wadliwie wykonanych połączeniach.

Zadaniem programu sterownika nadrzędnego typu FX jest odczytanie czterech, ww. parametrów. Program składa się z trzech sekcji realizujących odczyt wartości poziomu, przepływów i prądu. Wartości te docelowo należy pokazać zgrupowane w monitorze urządzeń programu narzędziowego w celu ich porównania z wartościami wskazywanymi na ekranach symulatora przepompowni - sterownika AL-2. Jedną z ciekawszych sekcji programowych sterownika nadrzędnego jest sekcja odczytu 2-dekadowego poziomu wody w zbiorniku, realizowana w języku SFC (*ang.: Sequential Function Chart*). Schemat blokowy programu, będący jednocześnie algorytmem odczytu dekad poziomu wody w zbiorniku, przedstawiono na rys.3.

### 3. Model ujęcia wody

Rzeczywistym modelem 1-pompowej przepompowni, analogicznym w dużym zakresie do modelu wirtualnego z p.2, jest zbudowany model systemu dwóch ujęć wody [1]. Zdjęcie tego modelu przedstawiono na rys.4.

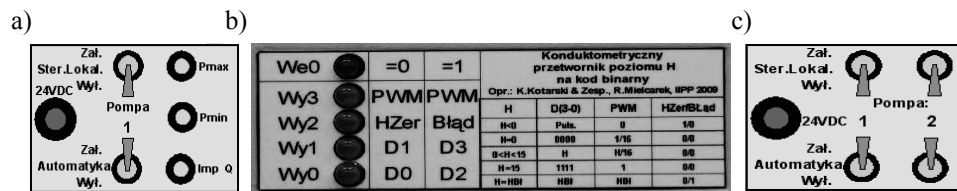


Rys.4. Model systemu dwóch ujęć wody

Fig. 4. The system model of two water intakes

Model składa się z dwóch zbiorników ujęć z pompą i zbiornika głównego, do którego pompowana jest woda ze zbiorników ujęć. Pompowana woda przechodzi przez wodomierz z nadajnikiem impulsowym, pozwalający na pomiar wartości przepływu bieżącego [**litr/min**] oraz sumarycznego [**litr**]. Na rurociągu wyjściowym zamontowany jest również dwustanowy czujnik ciśnienia wody. W każdym ze zbiorników zamontowano 16-punktową sondę konduktometryczną do pomiaru poziomu wody przez przetwornik, znajdujący się na frontowej listwie aparatów elektrycznych wyposażenia modelu. Widok elewacji przetwornika przedstawiono na rys.5b. Do każdego przetwornika podłączony jest punktowo-słupkowy wyświetlacz poziomu wody, znajdujący się obok danego zbiornika. Sygnały z danego przetwornika przekazywane są do sterownika PLC, w którym odbywa się obliczenie wartości poziomu z 4-pozycyjnej liczby binarnej lub z sygnału impulsowego z kodowaniem PWM wartości poziomu.

Sterowanie pompą ujęcia odbywa się ze sterownika PLC poprzez jednokanałowe urządzenie sterowania lokalnego (USL-1). Umożliwia ono, jak na rzeczywistym ujęciu, odłączenie sterowania zdalnego ze sterownika PLC i przejście na sterowanie lokalne (miejscowe). Widok elewacji USL-1 przedstawiono na rys.5a.

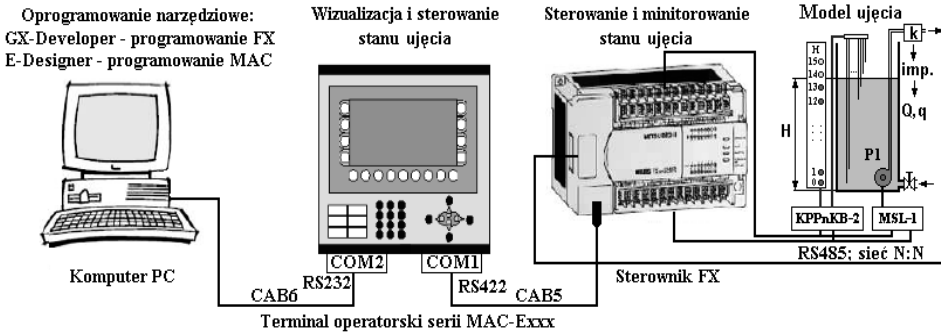


Rys.5. Elewacje: a) USL-1, b) przetwornika poziomu, c) USL-2

Fig. 5. The elevations of equipment: a) the USL-1, b) the water level converter, c) the USL-2

Zadaniem programu sterownika lokalnego jest realizacja następujących funkcji:

- sterowanie pompą ujęcia (ręcznie/automatycznie) przy poziomie  $H > H_{min}$ ,
- eksperymentalne obliczenie stałej  $k$  impulsu z wodomierza (w rzeczywistym przepływomierzu jest to stała urządzenia),
- obliczenie okresu impulsowania  $T$  i zliczenie liczby impulsów  $L_{imp}$ ,
- obliczenie przepływu bieżącego  $q = (3600 \cdot k) / T$  i sumarycznego  $Q = L_{imp} \cdot k$ ,
- obliczenie sprawności ujęcia  $S_u$  na podstawie zależności:  $S_u = q / (H_s - H_d)$ , gdzie:
  - $H_s$  - poziom statyczny w zbiorniku z momentu załączenia pompy,
  - $H_d$  - poziom dynamiczny w zbiorniku z danej chwili pompowania.



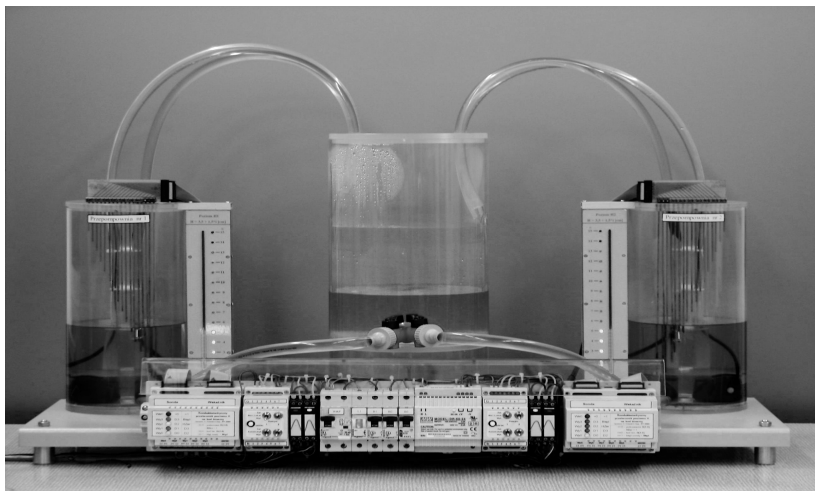
Rys. 6. Schemat systemu wizualizacji i sterowania modelem ujęcia za pomocą terminala operatorskiego serii MAC

Fig. 6. The visualization and system scheme of the water supply model using the operator terminals MAC

Wszystkie te ww. parametry określone są metodą obliczeniową z wyjątkiem poziomu  $H_s$ , który jest rejestracją poziomu  $H$  z chwili załączenia pompy. Parametry te są podstawą do programu wizualizacji stanu ujęcia, realizowanej albo za pomocą terminala operatorskiego, albo za pomocą aplikacji dyspozytorskiej w systemie SCADA. Strukturę tego pierwszego rozwiązania pokazano na rys. 6.

#### 4. Model przepompowni dwupompowej

Symulacja pracy satelickiej przepompowni ścieków (satelickiej dla przepompowni zbiorczej lub oczyszczalni ścieków) [2] jest również możliwa w aplikacji PLC, lecz daje wówczas znacznie mniejsze wyobrażenie o pracy jej pracy niż rzeczywisty model takiego obiektu. Dlatego też zaprojektowano i wykonano taki model składający się z dwóch 2-pompowych przepompowni i zbiornika zbiorczego, pomiędzy którymi przetaczana jest woda. Jak w rzeczywistej przepompowni tego typu, liczba 2 pomp jest podyktowana względami niezawodnościowymi oraz zapewnieniem zwiększenia ilości tłoczonego medium w sytuacjach zwiększonego napływu. Model przeznaczony jest dla dwóch grup ćwiczeniowych, z których każda zajmuje się jedną przepompownią. Widok modelu systemu przepompowni 2-pompowych przedstawiono na rys. 7.



Rys.7. Model systemu dwóch przepompowni 2-pompowych

Fig. 7. The system model of two 2-pump pumping stations

Sterowanie pompami przepompowni odbywa się ze sterownika PLC poprzez dwukanałowe urządzenie sterowania lokalnego (USL-2), które umożliwia (jak w rzeczywistej przepompowni) odłączenie sterowania zdalnego ze sterownika PLC i przejście na sterowanie miejscowe. Widok elewacji USL-2 przedstawiono na rys.5c.

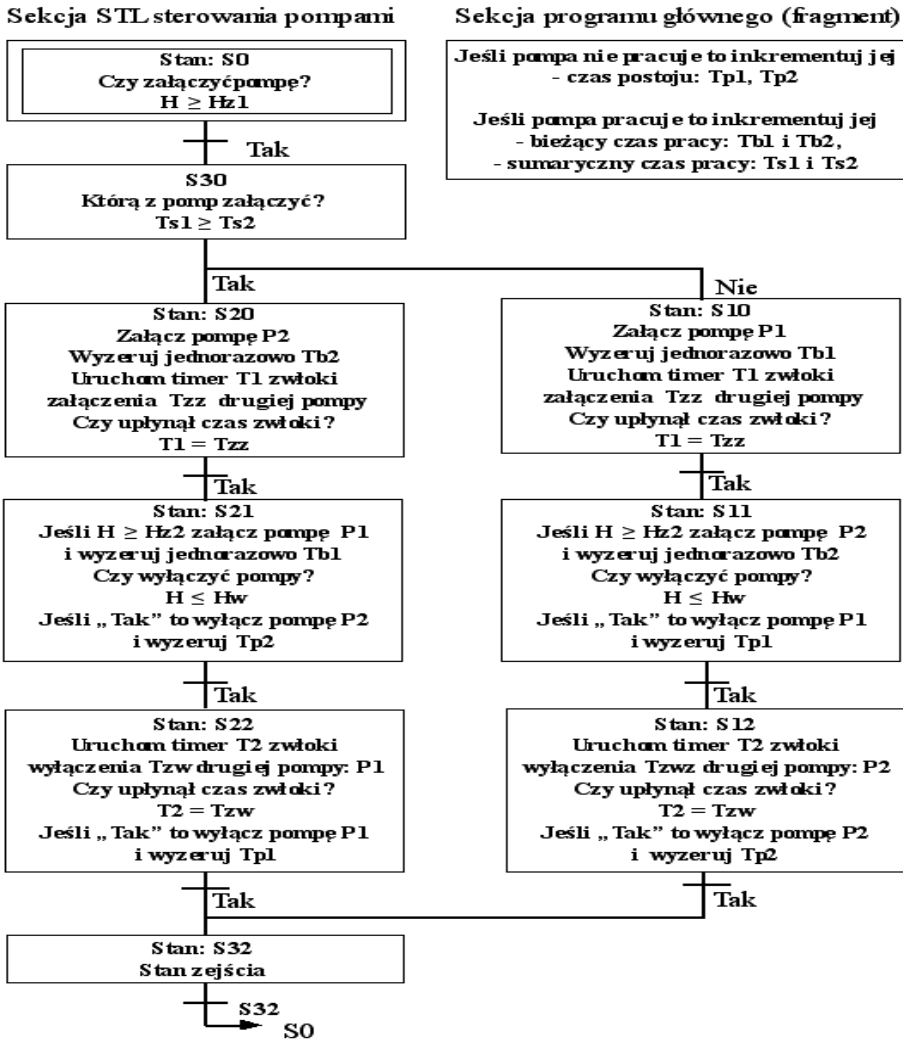
Aby sterownie pompami przepompowni było sensowne, sterownik PLC danej pompowni musi posiadać informację o poziomie wody w zbiorniku przepompowni. Dlatego też w każdym zbiorniku znajduje się 16-punktowa sonda konduktometryczna, współpracująca z przetwornikiem poziomu wody, znajdującym się na liście aparatów elektrycznych modelu. Przetwornik ten (analogiczny jak w wyposażeniu zbiornika ujęcia wody) dostarcza 4-bitowej informacji o wartości poziomu wody w zbiorniku przepompowni w postaci 4 sygnałów dwustanowych lub jednego sygnału dwustanowego z kodowaniem PWM.

W przedziale wartości poziomu  $H$  wody w zbiorniku należy określić trzy poziomy wyznaczające załączenie lub wyłączenie pomp. Idąc od najniższego poziomu w górę określa się następujące punkty sterowania:

- $H_w$  – poziom wyłączenia obu pomp,
- $H_{z1}$  – poziom załączenia pompy głównej,
- $H_{z2}$  – poziom załączenia pompy drugiej (rezerwowej lub wspomagającej).

Dodatkowo z każdą z pomp (nr 1 i nr 2) związane są trzy czasy ich stanu:

- $T_{p1}$  i  $T_{p2}$  – czas postoju pompy zerowany w momencie zatrzymania pompy,
- $T_{b1}$  i  $T_{b2}$  – czas bieżącej pracy pompy zerowany w momencie startu pompy,
- $T_{s1}$  i  $T_{s2}$  – czas sumaryczny pracy pompy.



Rys.8. Schemat blokowy programu PLC naprzemiennego sterowania pompami na podstawie sumarycznego czasu ich pracy

Fig. 8. The block diagram of the PLC program for alternating pump control on the basis of a summary of their work time



Niezależnie od wybranego algorytmu sterowania pompami, wspólny cechą każdego z nich jest określenie drugiej pompy jako pompy wspomagającej proces przepompowywania wody, w przypadku osiągnięcia poziomu Hz2, przy pierwszej pompie pracującej. Natomiast alternatywną rolą może cechować się pompa główna, która ma być załączona jako pierwsza po osiągnięciu poziomu Hz1. Można tu przyjąć kilka alternatywnych założeń, np.:

- stałe przypisanie danej pompy do roli pompy głównej,
- chwilowe przypisanie danej pompy do roli pompy głównej, jeśli jej czas postoju przekroczył zadaną wartość,
- przemienne przypisanie danej pompy do roli pompy głównej w zależności od tego, że w poprzednim procesie pompowania była ona pompą wspomagającą,
- przemienne przypisanie danej pompy do roli pompy głównej w zależności od sumarycznego czasu jej pracy: pompa o mniejszym sumarycznym czasie pracy w przyszłym załączeniu będzie pompą główną – załączaną jako pierwsza.

Ten ostatni wariant sterowania został pokazany na schemacie blokowym programu sterownika PLC. Program składa się co najmniej z dwóch sekcji: głównej i krokowej STL, które przedstawiono na rys.8.

Cechą szczególną zaprezentowanego algorytmu sterowania jest zwłoczne załączenie/wyłączenie drugiej pompy, co jest istotne z punktu widzenia głównego zabezpieczenia nadprądowego rzeczywistej przepompowni.

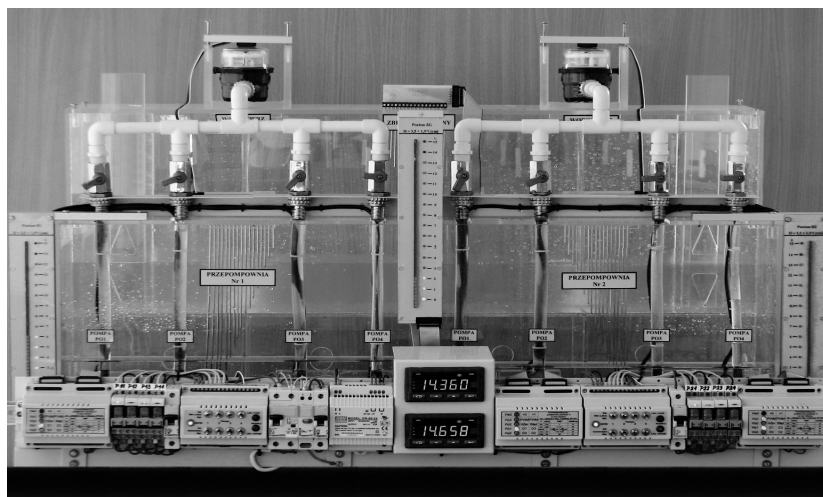
## 5. Model przepompowni głównej

Modelem najmłodszym, który powstał z początkiem 2012 roku, jest model 4-pompej przepompowni głównej. Model ten jest wzorowany funkcjonalnie na rzeczywistej przepompowni, analizowanej w pozycji [3]. Celem prezentowanego modelu jest:

- określenie kosztów pompowania poszczególnych pomp jak i pomp pracujących w zespole,
- określenie optymalnego algorytmu sterowania całej przepompowni z punktu widzenia minimalizacji kosztów pompowania.

Zdjęcie modelu przepompowni głównej przedstawiono na rys.9.

Struktura modelu jest analogiczna do omawianych modeli w poprzednich punktach. W skład jej wchodzi dwie przepompownie główne (dla dwóch grup ćwiczących) wyposażonych w cztery pompy. Tłoczą one wodę do rurociągu zbiorczego, na wyjściu którego znajduje się wodomierz z nadajnikiem impulsowym do pomiaru natężenia i wielkości przepływu. Ujście rurociągu następuje do zbiornika zbiorczego, który mieści się za komorami przepompowni. Na wyjściu każdej z pomp znajduje się zawór wielkości przepływu, którym ustawia się wydajność każdej z pomp, a tym samym jej sprawność energetyczną  $Se$ , określaną w jednostkach [kWh/litr]. Pomiar ilości zużytej energii procesu pompowania umożliwi tablicowy miernik energii elektrycznej, który umieszczony jest w centralnej części listwy aparatów elektrycznych. Każdy miernik energii wyposażony jest w nadajnik impulsowy o stałej impulsu  $ke = 1/18000$  [kWh/impuls], co pozwala dokonywać pomiarów zużycia energii elektrycznej z dużą dokładnością. Drugą metodą odczytu zużycia energii elektrycznej jest odczyt szeregowy przez styk RS-485 za pośrednictwem protokołu MODBUS-RTU.



Rys.9. Model systemu dwóch przepompowni głównych 4-pompowych

Fig. 9. The system model of two main 4-pump pumping stations

Analogicznie jak w poprzednich modelach zastosowano tu również konduktometryczny, 16-punktowy pomiar poziomu wody w każdym ze zbiorników. Pomiar poziomu w zbiorniku przepompowni umożliwia realizację algorytmu sterowania, natomiast pomiar poziomu w zbiorniku zbiorczym umożliwia pomiar stałej impulsu  $k$  wodomierza oraz pomiar sprawności energetycznej  $Se$  procesu pompowania.

Określenie stałej impulsu odbywa się wg następującej zależności:

$$k = \Delta H_{zsb} \cdot S_{zsb} / \Delta Imp \quad [\text{litr/impuls}]$$

gdzie:  $\Delta H_{zsb}$  – różnica poziomów w zbiorniku zbiorczym  $Z_{sb}$  pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi,

$S_{zsb}$  – pole powierzchni  $Z_{sb}$ ,

$\Delta Imp$  – liczba impulsów wygenerowanych przez nadajnik impulsowy wodomierza pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi.

Natomiast sprawność energetyczną określa następująca zależność:

$$Se = (k \cdot \Delta Imp) / (ke \cdot \Delta Impe) \quad [\text{litr/kWh}]$$

gdzie:  $\Delta Impe$  – liczba impulsów wygenerowanych przez nadajnik impulsowy licznika energii elektrycznej miernika tablicowego do momentu osiągnięcia poziomu wyłączenia w zbiorniku przepompowni, w którym to czasie zarejestrowano  $\Delta Imp$  z wodomierza.

Współczynnik  $Se$  oznacza koszt energetyczny przepompowania danej objętości wody dla danej pompy lub zespołów pomp. Zestawienie tabelaryczne  $Se$  dla wszystkich kombinacji załączonych pomp pozwala na określenie najlepszych sprawności (największe wartości  $Se$ ) poszczególnych pomp lub ich zespołów, a zatem i ustalenie kolejności ich włączania podczas ciągłego wzrostu poziomu wody w zbiorniku przepompowni. Natomiast ułożenie optymalnego algorytmu sterowania polega na wykorzystaniu tej kolejności do załączania tych pomp. Kolejność załączania zależy może od poziomu bez/lub z predykcją definiowaną szybkością przyrostu poziomu wody.

## 6. Podsumowanie

Oprogramowanie sterownika PLC dla monitorowania lub sterowania każdego z ww. modeli wymaga od ćwiczącego zapoznania się z realizowanym procesem, urządzeniami pomiarowymi pompowni a także z układem sterowania pomp danego modelu. Do każdego fizycznego modelu jest załączona dokumentacja elektryczna, obrazująca obwody zasilania pomp, obwody automatyki ich sterowania oraz obwody pomiarowe. Zadaniem wstępnym ćwiczącego jest zapoznanie się z tą dokumentacją, wykonanie połączeń obwodów automatyki i pomiarów ze sterownikiem, a na zakończenie części montażowej weryfikacja tych połączeń. Daje mu to podstawową wiedzę do napisania takiego oprogramowania.

Istotne znaczenie w każdym z prezentowanych modeli ma automatyka sterowania daną pompą, która od strony modelu umożliwia na sterowanie miejscowe i zdalne (ze sterownika) a od strony oprogramowania sterownika ma umożliwiać sterowanie ręczne lub automatyczne (wg algorytmu) tym urządzeniem. Istotnym jest zwrócenie uwagi na źródła sygnałów do monitorowania stanu urządzenia, np. żeby prezentowany stan pompy pochodził ze sterowanego obiektu a nie z urządzenia sterującego – sterownika PLC.

Zaprezentowany jako pierwszy model wirtualnej przepompowni posiada jedną, istotną zaletę nad pozostałymi. Jest nią mianowicie wizualizacja stanu i wartości parametrów na ekranie terminala sterownika AL-2, obrazujących procesy w przepompowni. Zaleta ta, a jednocześnie uciążliwość dla ćwiczącego po stronie sterownika (FX) monitorującego proces, pozwala zweryfikować zgodność stanu i wartości odtwarzanych parametrów, co w pozostałych modelach nie zawsze jest możliwe.

Zastosowanie wizualizacji stanu pompowni i jej parametrów na ekranie terminala operatorskiego czyni ćwiczenie bardzo atrakcyjne i cieszy się zawsze dużym zainteresowaniem i zaangażowaniem ćwiczących.

## Bibliografia

- [1] Mielcarek R. Sterownik Alpha Mitsubishi Electric w lokalnej i zdalnej kontroli i sterowaniu. Praca zbiorowa pod red. Zb.Huzara i Z.Mazura: Systemy Czasu Rzeczywistego – Metody i Zastosowania. Rozdz. 40. Str. 433-446. WKŁ 2007.
- [2] Mielcarek R. Zastosowanie sterownika Alpha XL do rozwiązywania problemów wodociągowo-ściekowych. XIX KNT i VII MKNT pt.: "Zaopatrzenie w Wodę, jakość i ochrona wód". Wielkopolski Oddział PZITS, Tom II str.: 527 - 538. Zakopane 2006.
- [3] Mielcarek R. Optymalizacja kosztów przepompowni ścieków. Prace XXI KKNT i IX MKNT pt.: "Zaopatrzenie w Wodę, Jakość i Ochrona Wód". Wielkopolski Oddział PZITS, Kołobrzeg. Czerwiec 2010.
- [4] Mitsubishi Electric. Podręczniki sprzętu i oprogramowania sterowników Alpha i FX. [www.mitsubishi-autoamtion.pl](http://www.mitsubishi-autoamtion.pl)