

Andrzej MATEJOWSKI  
Politechnika Gdańska

## ZASTOSOWANIE PROGRAMOWALNYCH STEROWNIKÓW LOGICZNYCH DO AUTOMATYZACJI MAŁYCH ELEKTROWNI WODNYCH

**Streszczenie.** Przedmiotem referatu jest układ automatycznego sterowania małej elektrowni wodnej przepływowej, wyposażonej w dwa hydrozespoły. W projektowaniu tego układu wykorzystano programowalne sterowniki logiczne (PLC). Przedstawione rozwiązanie w szczególności dotyczy małych elektrowni wodnych z hydrozespołami wyposażonymi w mechaniczno-hydrauliczne regulatory prędkości kątowej.

## APPLICATION OF PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS TO AUTOMATIC CONTROL FOR SMALL HYDROELECTRIC POWER STATIONS

**Summary.** The object of the paper are automatic control systems in small hydroelectric power stations equipped with more than one hydroelectric generating set. In designing such systems advantage has been taken of programmable controllers (PLC). The presented solutions are related in particular to automatic control systems applied to power stations provided with hydro generating sets controlled by mechanical-hydraulic angular velocity control units.

### 1. Wstęp

Małe elektrownie wodne (MEW), to elektrownie wodne o mocach od kilku kW do 5000 kW. Zdecydowana większość tych MEW, to elektrownie przepływowe współpracujące z siecią elektroenergetyczną. W MEW przepływowych moc oddawana do sieci powinna być ściśle dostosowywana do wielkości dopływu wody. W elektrowniach bez stałej obsługi dostosowywanie wytwarzanej mocy do wartości dopływu wody powinno odbywać się automatycznie. Konieczne jest więc stosowanie układu automatycznego sterowania pracą elektrowni, którego podstawową funkcją jest regulacja wytwarzanej mocy w zależności od dopływu wody oraz sterowanie włączaniem do pracy i wyłączaniem z pracy poszczególnych hydrozespołów elektrowni. Koncepcja układu automatycznego sterowania nazywanego też autooperatorem jest przedmiotem tego referatu. Idea działania tego układu została oparta na opracowanym w latach osiemdziesiątych, w ramach Rządowego Programu Badawczo - Rozwojowego PR-8,

układzie automatycznego sterowania, zbudowanego z wykorzystaniem analogowych urządzeń regulacyjnych i przekaźników elektromagnetycznych. W miejsce układów logicznych zbudowanych na przekaźnikach i regulatorów elektronicznych wprowadzono program sterownika.

## 2. Założenia projektowe

W założeniach projektowych układu automatycznego sterowania rozpatrywana MEW jest elektrownią wodną przepływową z dwoma hydrozespołami jednakowego typu. Zakłada się, że turbiny wodne są wyposażone w nastawialne łopatki kierownicze (turbiny Francis). Projektowany układ automatycznego sterowania może być również dostosowany do MEW wyposażonych w turbiny z nastawialnymi łopatkami kierowniczymi i nastawialnymi łopatkami wirnika (turbiny Kaplana), a także do MEW z turbinami z nastawialnymi łopatkami wirnika (turbiny rurowe). Urządzeniami do nastawiania żądanego otwarcia turbiny, za pomocą łopatek kierowniczych i wirnika, są serwomotory hydrauliczne lub regulatory prędkości kątowej. W przypadku mechaniczno-hydraulicznych regulatorów prędkości kątowej, sterowanie otwarciem turbiny może się odbywać za pomocą mechanizmu zmiany prędkości kątowej lub mechanizmu ogranicznika otwarcia turbiny. Hydrozespoły mogą być wyposażone w generatory synchroniczne o mocy 100 do 2500 kVA, lub asynchroniczne o mocy od 100 do kilkuset kVA. Rozpatrywana elektrownia współpracuje z siecią elektroenergetyczną, a w warunkach awaryjnych, gdy generatory są synchroniczne, może pracować na sieć wydzieloną. W przypadku pracy automatycznej MEW, bez stałej obsługi, obok podstawowego wyposażenia w układy automatycznej regulacji i zabezpieczeń, elektrownie te powinny być wyposażone w układ nadrzędnego sterowania nazwanego tu układem automatycznego sterowania lub autooperatorem i w miarę potrzeby w układ regulacji grupowej napięcia i mocy biernej.

## 3. Koncepcja układu automatycznego sterowania

W małych elektrowniach wodnych można wyróżnić następujące procesy, które mogą być automatyzowane: uruchomienie hydrozespołu, zatrzymanie i odstawienie hydrozespołu, sterowanie mocą hydrozespołu, sterowanie pracą całej MEW oraz inne procesy pomocnicze, jak np. proces utrzymywania ciśnienia w zbiorniku ciśnieniowym zasilającym serwomotory otwierania i zamykania turbin. Procesy uruchomienia i zatrzymania hydrozespołów to procesy dyskretne, składające się z wielu czynności, których wykonywanie uwarunkowane jest osią-

gnięciem odpowiedniego stanu elektrowni. Sterowanie mocą hydrozespołów - to proces ciągły, który polega na ciągłym dostosowywaniu mocy hydrozespołów do aktualnego dopływu wody. W MEW wyposażonych w więcej niż jeden hydrozespół występuje jeszcze problem rozdziału obciążeń między pracujące hydrozespoły. Proces sterowania pracą całej MEW obejmuje szereg czynności, które zależą od rodzaju automatyzowanej elektrowni. Do tych czynności należy przede wszystkim wybór hydrozespołów, które powinny być uruchomione bądź odstawić i wybór momentów ich uruchomienia lub odstawić. W przedstawionym układzie automatyki zaproponowano sterowanie dwupoziomowe. Poziom wyższy obejmuje sterowanie pracą całej MEW, a poziom niższy to układy sterowania procesami rozruchu i zatrzymania oraz sterowanie mocą hydrozespołów.

Podstawowym urządzeniem układu automatycznego sterowania jest modułowy sterownik programowalny STR, który na podstawie sygnałów z układów pomiarowych doprowadzonych do wejść sterownika generuje sygnały sterujące dla urządzeń wykonawczych elektrowni.

Funkcje pełnione przez układ automatycznego sterowania MEW są następujące:

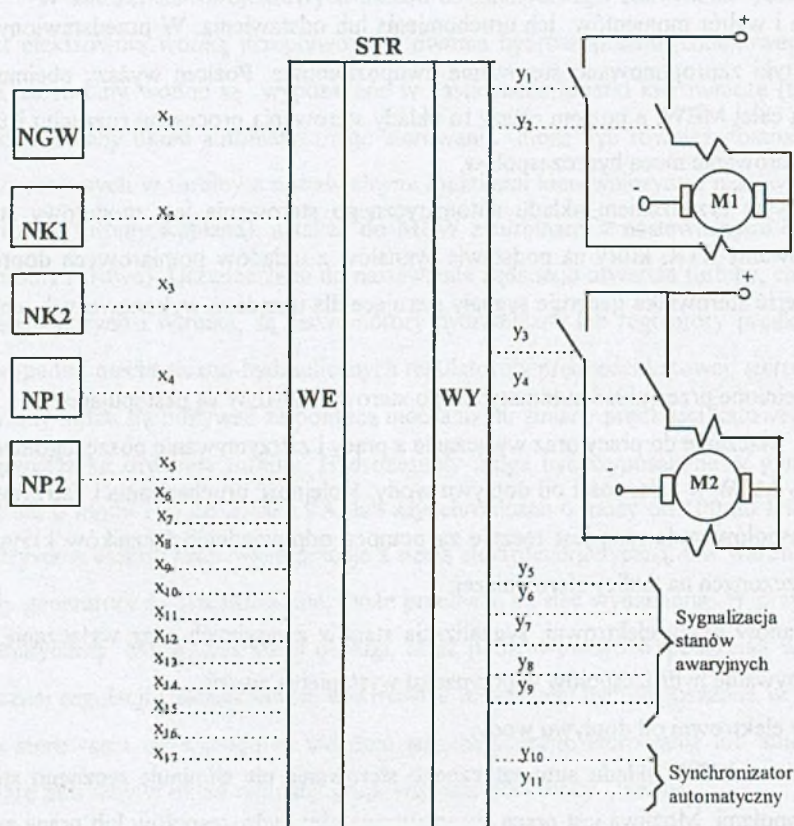
- uruchamianie i włączanie do pracy oraz wyłączanie z pracy i zatrzymywanie poszczególnych hydrozespołów MEW w zależności od dopływu wody. Kolejność uruchamiania i zatrzymywania hydrozespołów zadawana jest ręcznie za pomocą odpowiednich łączników krzywkowych umieszczonych na tablicy sterowniczej,
- sygnalizacja stanów pracy elektrowni, sygnalizacja stanów awaryjnych oraz wyłączanie z pracy i zatrzymywanie hydrozespołów w przypadku wystąpienia awarii,
- regulacja mocy elektrowni od dopływu wody.

Zastosowanie w MEW układu automatycznego sterowania nie eliminuje ręcznego sterowania hydrozespołami. Możliwa jest praca automatyczna obu hydrozespołów lub praca automatyczna jednego hydrozespołu, podczas gdy drugi sterowany jest ręcznie lub znajduje się w postoju.

Realizacja sekwencyjnych układów sterowania i funkcji regulatorów odbywa się za pomocą programów sterownika. Dobrano sterownik modułowy serii 90-30 produkcji GE Fanuc Automation z kasetą podstawową dla jednostki centralnej CPU 311. W dobranej kasie można zamontować do pięciu modułów wejść-wyjść. Wprowadzono następujące moduły:

- dwa 4-kanalowe napięciowe (lub prądowe) moduły wejść analogowych,
- moduł wejść dyskretnych 16-punktowy dla napięcia wejściowego 24 V prądu stałego lub przemiennego, działający w logice dodatniej lub ujemnej,

- moduł wyjść dyskretnych, przekaźnikowych zwiernych, 16-punktowy o natężeniu prądu do 2 A,
- moduł rezerwowy (pozwala na zwiększenie rodzajów i zakresu wykonywanych czynności).



Rys.1. Układ automatycznego sterowania małej elektrowni wodnej  
 Fig. 1. Automatic control system of small hydroelectric power station

Sygnały wejściowe sterownika to:

- sygnały analogowe ( $x_1 - x_5$ ) od: układu pomiarowego poziomu górnej wody (NGW), układów pomiarowych stopnia otwarcia turbin (NK1 – turbiny 1, NK2 – turbiny 2) i układów pomiarowych prędkości kątowej turbin (NP1 – turbiny 1, NP2 – turbiny 2),
- sygnały dyskretne ( $x_6 - x_{17}$ ): stanu gotowości hydrozespołów do rozruchu, stanu położenia łączników trybu pracy elektrowni, sygnały od położenia wyłączników generatorów, sygnały od zabezpieczeń i sygnały kasowania sygnalizacji awarii.

Sygnały wyjściowe sterownika to: sygnały włączenia napięcia na silniki sterujące otwarciem aparatów kierowniczych turbin (M1 – turbiny 1, M2 – turbiny 2), sygnały na włączenie synchronizatora automatycznego oraz sygnały na włączenie sygnalizacji stanów awaryjnych elektrowni.

Programowanie sterownika serii 90-30 obejmuje konfigurowanie sterownika oraz właściwe programowanie. Czynności te mogą być wykonywane za pomocą pakietu oprogramowania narzędziowego Logicmaster 90, który uruchamia się na komputerze typu PC pracującym jako programator, połączonym ze sterownikiem łączem szeregowym poprzez konwerter RS232 / RS422. Program sterownika serii 90-30 ma budowę modułową. Składa się z programu sterującego (funkcje ogólne) i podprogramów nazywanych modułami. Program „funkcje ogólne” przywołuje poszczególne podprogramy, którymi są: automatyczny rozruch, automatyczne zatrzymanie, regulacja od poziomu wody, hydrozespół 1, hydrozespół 2, kontrola awarii. Układ automatycznego sterowania, oprócz podanych funkcji, może pełnić jeszcze szeregi funkcji kontrolnych i sygnalizacyjnych zwiększających niezawodność i zapewniających bezpieczną pracę elektrowni.

#### 4. Sterowanie procesami rozruchu i zatrzymania hydrozespołów

Proces uruchomienia hydrozespołu obejmuje następujące czynności: przygotowanie do uruchomienia, rozruch hydrozespołu do biegu jałowego i włączenie hydrozespołu do pracy równoległej lub na sieć wydzieloną. Przygotowanie do uruchomienia hydrozespołu polega na doprowadzeniu danego hydrozespołu do stanu gotowości ruchowej. Rozruch hydrozespołu polega na odpowiednim zwiększaniu natężenia przepływu wody przez turbinę od zerowego poczynając, poprzez natężenie przepływu dla otwarcia rozruchowego, a na natężeniu przepływu dla znamionowej prędkości kątowej kończąc.

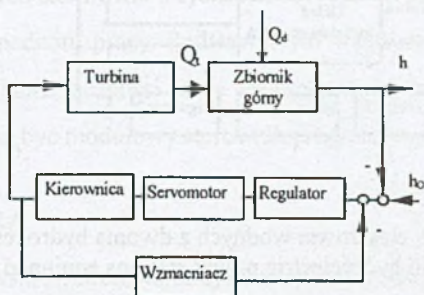
Procesy zatrzymania i odstawiania hydrozespołu mogą przebiegać w normalnych warunkach ruchowych lub w warunkach awaryjnych. Przy zatrzymaniu w normalnych warunkach ruchowych hydrozespół zostaje odciążony i po osiągnięciu stanu biegu jałowego odłączony od sieci, po czym następuje odcięcie dopływu wody do turbiny. Proces awaryjnego zatrzymania hydrozespołu występuje, gdy nastąpi zadziałanie zabezpieczeń elektrycznych lub zabezpieczeń turbiny powodujących wyłączenie prądu z sieci lub zamknięcie dopływu wody do turbiny.

Do automatyzacji procesów rozruchu i zatrzymania hydrozespołu i pozostałych dyskretnych procesów występujących w MEW stosuje się sekwencyjne układy sterowania. Opis algorytmu sterowania dokonuje się za pomocą schematu drabinkowego. Szczebel drabinki stykowej odpowiada wyrażeniu logicznemu, w którym mogą występować zmienne wejściowe, wewnętrzne i wyjściowe. Punktem wyjściowym do opracowania algorytmów sterowania są obwodowe schematy przekąźnikowe i metoda stanów, za pomocą której algorytm sterowania przedstawia się za pomocą sieci. Elementami graficznymi tej sieci są prostokąty przedstawiające stany procesu i strzałki przedstawiające przejścia między stanami. Każdy stan charakteryzuje się odpowiednią konfiguracją wyjść i położeniem elementów wykonawczych. Każde przejście (połączenie) z jednego stanu do kolejnego jest związane ze zmianą sygnałów wejściowych (spełnieniem warunków) oraz przypisanymi im zmianami konfiguracji wyjść elementów wykonawczych.

## 5. Analiza układu regulacji mocy

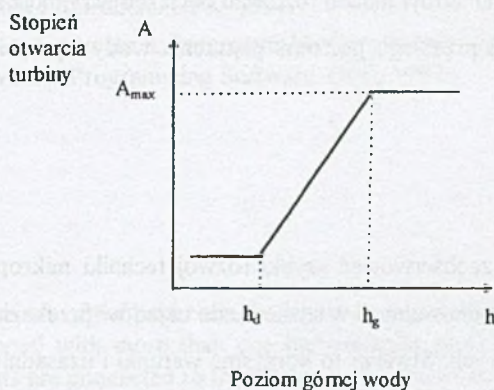
Dla celów analizy układu regulacji mocy od dopływu wody dogodnie jest założyć, że elektrownia wodna czerpie wodę do turbin z górnego zbiornika (zbiornik wody górnej) i oddaje wodę do zbiornika dolnego (zbiornik wody dolnej). Dla uproszczenia rozważań analitycznych przyjmuje się, że poziom wody zbiornika dolnego nie zmienia się. Charakterystykę obiektu regulacji można w uproszczeniu traktować jako przebieg zmiany wartości poziomu wody górnej, a więc pojemności warstwy użytecznej górnego zbiornika od przepływu przez turbiny, dopływu do zbiornika górnego i przepływu przez budowle piętrzące rozpatrywanego stopnia wodnego. Regulacja mocy wytwarzanej od dopływu wody polega na ciągłym automatycznym dostosowywaniu otwarcia współpracujących turbin do aktualnej wartości dopływu wody. Realizuje się to przez utrzymywanie rzędnej poziomu górnej wody na zadanej wartości. Wtedy natężenie dopływu wody do zbiornika górnego ze zlewni  $Q_d$  jest równe sumie natężeń przepływu wody przez turbiny  $Q_t$  i jałowego przez budowle piętrzące.

Schemat blokowy układu regulacji, w przypadku MEW z jednym hydrozespołem, przedstawia rys.2. W układzie zastosowano regulator proporcjonalny, ze strefą nieczułości, zbudowany za pomocą bloku funkcyjnego PID sterownika. Sygnał wyjściowy regulatora uruchamia impulsator, w wyniku czego sygnał podany na urządzenie wykonawcze ma charakter impulsowy.

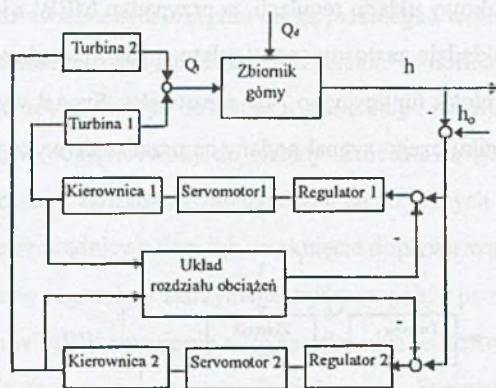


Rys.2. Układ regulacji poziomu górnej wody dla pojedynczego hydrozespołu  
Fig.2. Level control system for a single hydro generating set

Wewnętrzna pętla ujemnego sprzężenia zwrotnego, od stopnia otwarcia turbiny, poprawia jakość regulacji. Współczynnik wzmocnienia regulatora i wartości ograniczeń sygnału poziomu wody górnej jak na rys. 3. Schemat blokowy układu regulacji, w przypadku MEW wyposażonej w dwa hydrozespoły, przedstawia rys. 4. Każdy z hydrozespołów wyposażony jest w układ regulacji poziomu wody z regulatorami odpowiednio R1 i R2.



Rys.3. Charakterystyka regulacji stopnia otwarcia turbiny  
Fig.3. Characteristic curve of the turbine opening control



Rys.4. Układ regulacji mocy małych elektrowni wodnych z dwoma hydrozespołami

Fig.4. Power control system to small hydroelectric power stations equipped with two hydro generating set

Współpraca obu układów regulacji dokonuje się poprzez układ automatycznego rozdziału obciążeń. Rozdział obciążeń między poszczególne hydrozespoły powinien być taki, by każdy z hydrozespołów pracował z możliwie największą sprawnością. W projekcie układ automatycznego rozdziału obciążeń zrealizowano opierając się na zasadzie równości stopni otwarcia obu turbin. Układ ten porównuje sygnały od układów pomiarowych stopni otwarcia turbin i generuje sygnały sprzężenia zwrotnego, podawane do wejść regulatorów R1 i R2 powodując wyrównanie stosunkowych stopni otwarcia obu turbin. W celu doboru wartości parametrów nastaw regulatorów i parametrów układu rozdziału obciążeń przyjmuje się kryterium niedopuszczenia do przeregulowań przebiegu poziomu piętrzenia wody i przebiegów stopni otwarcia turbin.

## 6. Wnioski

W ostatnich latach daje się zaobserwować szybki rozwój techniki mikroprocesorowej oraz spadek cen sterowników programowalnych w stosunku do układów przekaźnikowych i regulacyjnych elementów analogowych. Stwarza to korzystne warunki i uzasadnia stosowanie sterowników programowalnych PLC do sterowania i kontroli MEW nawet najmniejszych mocy. Układy automatyki z sterownikami programowalnymi coraz szerzej są stosowane w MEW. Przedstawioną w referacie koncepcję regulacji mocy od dopływu wody można stosować dla



wszystkich rodzajów MEW przepływowch. W przypadku MEW wyposażonych w generatory synchroniczne niezbędnym jest stosowanie synchronizatorów automatycznych.

Automatyzacja małych elektrowni wodnych, za pomocą sterowników programowalnych, stwarza dogodne warunki do budowy układów zdalnego sterowania tych elektrowni. Wprowadzenie zdalnego sterowania MEW powinno polepszyć efekty ekonomiczne wynikające ze współpracy tych elektrowni z systemem elektroenergetycznym, a także polepszyć komfort ich sterowania i nadzoru pracy. Podstawowym urządzeniem w MEW zdalnie sterowanej, z którym poprzez kanał łączności może współpracować stacja operatorska w ośrodku dyspozycyjnym, powinien być modułowy sterownik programowalny.

## LITERATURA

1. Kozuchowski J.: Sterowanie systemami elektroenergetycznymi. PWN, Warszawa 1994.
2. Mikulczyński T., Samsonowicz Z.: Automatyzacja dyskretnych procesów produkcyjnych. WNT, Warszawa, 1997.
3. Matejowski A.: Układy automatycznego sterowania małych elektrowni wodnych. Materiały XII Krajowej Konferencji Automatyki, Gdynia 1994.
4. Matejowski A.: Automatyzacja małych elektrowni wodnych. Ogólnopolskie Forum „Mała Energetyka - 97”. Zakopane - Kościelisko 1997.
5. Matejowski A.: Automatyzacja małych elektrowni wodnych przepływowych. Ogólnopolskie Forum Odnawialnych Źródeł Energii - 98. Gdańsk 1998.
6. Małe elektrownie wodne. Poradnik pod redakcją M. Hoffmanna. Nabba Sp. z O. O. Warszawa 1992.
7. GE Fanuc Automation. Programmable Control Products. Series 90-30/20/Micro Programmable Controllers. GFK, 1997.
8. GE Fanuc Automation. Programmable Control Products. Logicmaster 90. Series 90-30/20/Micro. Programming Software. GFK, 1997.

Recenzent: Dr inż. R. Jakuszewski

## Abstract

The object of the paper are automatic control systems in small hydroelectric power stations equipped with more than one hydroelectric generating set. A large number of these power plants are connected to the electric power network.

The described control system based on a programmable controller has been designate for small hydroelectric power plants consisting of two generating sets. But it can also be adapted for a small hydroelectric plant equipped with a single hydroelectric generating set, or developed for use in a plant with more than two hydroelectric generating sets. The idea for the automatic control system was based on a control system worked out in the 1980 s under a Government Research - Development Programme PR-8 using control equipment and electro-

magnetic relays. In place of the logic circuit making use of relays and electronic controllers there was a programmable controller.

A simplified diagram of the designed automatic control system is presented in Fig. 1. The main part of the system is a modular programmable controller which on the basis of signals, from the measuring units, transferred to the inputs of the controller generates controlling signals to the actuators of the power station. Advantage has been taken of a selected modular controller of the Series 90-30 produced by GE Fanuc Automation. Configuration and programming of the Series 90-30 PLC can be accomplished by Logicmaster 90, and can be done with the programmer off-line from the PLC.

The functions performed by the automatic control system of the power station are as follows:

- actuation and putting into operation, as well as switching off and stopping particular systems of the power station depending on the inflow of water. The operational sequence of actuating and disconnecting the hydro generating sets is performed manually by appropriate levers situated in the control switchboard,
- signalling various operational conditions of the power plant, signalling emergency states, and turning off and stopping particular hydro-units in an emergency,
- controlling the inflow water power of the hydroelectric plant.

The application of the automatic control system to the small hydroelectric power plant does not eliminate the manual control of the hydro-generating sets.