

Urszula POCLASK
POLITECHNIKA ŚLĄSKA
INSTYTUT AUTOMATYKI

WYBÓR ROZWIĄZAŃ UKŁADU STEROWANIA PRZEPOMPOWNI

Streszczenie: W pracy omówione zostały trzy różne sposoby regulacji wydajności pomp. Ocena układów regulacji przeprowadzona została w oparciu o koszt zużycia energii. Przedstawiono strukturę układu sterowania przepompownią jako jednego z obiektów systemu wodno-gospodarczego.

1. Wstęp

Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej od 1972 r. prowadzi prace nad koncepcją sterowania systemem wodno-gospodarczym na obszarze Śląska [8,9], [10]. Prace te swoim zakresem obejmują sterowanie poszczególnymi obiektami oraz urządzeniami w tych obiektach. Jednym z obiektów systemu, objętych kompleksowym sterowaniem, są przepompownie. Przepompownie te różnią się między sobą zadaniami, lokalizacją w strukturze systemu, wydajnością, wyposażeniem oraz obiektami towarzyszącymi. Z punktu widzenia rodzaju pracy przepompownie możemy podzielić na współpracujące ze zbiornikiem dolnym, zbiornikiem górnym, bezpośrednio z siecią wodociągową. Przedstawiony w dalszej części układ sterowania dotyczyć będzie przepompowni o mieszanym charakterze pracy, tzn. współpracującej z dolnym i górnym zbiornikiem oraz tłoczącej część wody bezpośrednio do odbiorców zlokalizowanych na rurociągu łączącym przepompownie ze zbiornikiem górnym.

2. Opis pracy przepompowni

Załóżmy, że:

- przepompownia przetłacza wodę ze stacji wodociągowej do zbiornika górnego,
- woda do zbiornika dolnego podawana jest ze stacji wodociągowej grawitacyjnie,
- ze zbiornika dolnego woda jest podawana do hali pomp,
- zespoły pompowe pracują w układzie równoległym na wspólny rurociąg tłoczący wodę do zbiornika górnego.

Zadaniem każdej przepompowni jest przepompowanie w jednostce czasu określo-

nej ilości wody o odpowiednim ciśnieniu.

W sterowaniu przepompownią wielkością zadaną (parametrem wiodącym) może być:

- wydajność przepompowni,
- ciśnienie wody w zadanym punkcie sieci,
- czas pracy przepompowni.

Sterowanie według wydajności polega na takim sterowaniu wydajnością pomp, aby w rurociągu tłocznym w danej chwili czasu uzyskać zadaną wartość natężenia przepływu.

Sterowanie według ciśnienia polega na takim sterowaniu pracą pomp, aby w danej chwili czasu uzyskać zadaną wartość ciśnienia w rurociągu.

Sterowanie według czasu polega na sterowaniu pracą pomp według harmonogramu. Harmonogram taki powstaje na podstawie danych statystycznych o poborze wody w określonych porach dnia. Ten sposób sterowania w porównaniu z pozostałymi jest mało elastyczny. Nie pozwala na natychmiastowe dostosowanie się do warunków różnych od założonych w harmonogramie. Metoda ta jest wprawdzie prostsza, ale powoduje z reguły większe zużycie energii. Wynika to z konieczności założenia ciśnień większych (z odpowiednim zapasem) w porównaniu z zapotrzebowaniem.

W przepompowniach objętych układem kompleksowego sterowania celowe jest stosowanie sterowania według wydajności. Z jednej strony umożliwia to dopasowanie pracy pomp w danej chwili czasu do zadanego natężenia przepływu, którego wartość wyznacza się na podstawie znajomości wydajności przepompowni w ciągu doby V_d . Wartość parametru V_d jest określona przez poziom nadrzędny. Z drugiej strony sterowanie według zadanej wydajności w przypadku pomp wirowych (najczęściej stosowanych) jest sterowaniem według jednej wielkości zadanej. Ten sposób sterowania został przyjęty w przedstawionej poniżej koncepcji sterowania przepompownią.

Zadanie sterowania przepompownią można sformułować w następujący sposób: uzyskanie żądanej wydajności Q_z w danej chwili czasu t , przy warunku optymalnego wskaźnika jakości E_x w określonym przedziale czasu, np. w ciągu doby.

Do układu sterowania oprócz dobowej wydajności należy wprowadzić z poziomu nadrzędnego informację dotyczącą wartości zadanej natężenia przepływu Q_z w określonych przedziałach czasu Δt . Ten rozkład dobowy określa się na podstawie prognozy, aktualnego stanu zapotrzebowania oraz stanu sieci wodociągowej.

Jako wskaźnik jakości E_x przyjęto wskaźnik ekonomiczny określający koszt przepompowania 1 m³ wody. O wartości tego wskaźnika decyduje przede

wszystkim wartość energii pobranej przez pompy. W takim razie problem sterowania przepompownią sprowadza się do algorytmu regulacji wydajności pomp.

3. Ocena metod regulacji wydajności pomp z punktu widzenia zużycia energii

Zażyjmy, że przepompownia jest wyposażona w n pomp wirowych tej samej mocy.

Sterowanie wydajnością pomp wirowych można przeprowadzić za pomocą:

- a) regulacji prędkości obrotowej,
- b) dławienia,
- c) pracy pomp w reżimie załącz-wyłącz.

Pozostałe metody jak upustowa, napowietrzająca nie będą omawiane, ponieważ nie można ich stosować w danych przepompowniach.

Energia potrzebna do podniesienia 1 m^3 wody na wysokość H , jaką pokonuje zespół pompowy przy wydajności Q , wyraża się następującą zależnością [5]:

$$E = \frac{P}{Q}$$

$$E = 0,00272 \frac{H}{\eta} \left[\frac{\text{KWh}}{\text{m}^3} \right]$$

gdzie: P - moc pobrana przez zespół pompowy,

η - sprawność zespołu pompowego.

Moc pobrana przez zespół pompowy jest zależna od sprawności pompy η_p , silnika napędzającego pompę η_s oraz organu regulującego wydajnością pompy η_r .

3.1. Regulacja prędkości obrotowej zespołu pompowego

Prędkość obrotową n_x dla zadanej wartości wydajności pomp Q_x przy znanej charakterystyce przepływu pomp dla obrotów nominalnych wyznacza się w następujący sposób:

- wysokość podnoszenia H_z odpowiadającą wydajności Q_z określa się w oparciu o charakterystykę rurowciągu, do którego pompy tłoczą wodę $H_c = H_c(Q)$,
- w oparciu o prawo podobieństwa określa się punkt pracy pompy H^* , Q^*

$$\frac{H^*}{H_z} = \left(\frac{Q^*}{Q_z} \right)^2 \Bigg|_{n=n_n}$$

$$H = H(Q) \Bigg|_{\text{dla } Q=Q^*}$$

$$H = H^*$$

$$n = n_n$$

gdzie: n_n - obroty nominalne

$H=H(Q)$ - charakterystyka przepływu,

a następnie wyznacza szukaną wartość n_x : $n_x = n_n \frac{Q_x}{Q}$.

Zarówno moc pobrana przez pompę P_p jak i straty mocy w układzie regulacji ΔP_r są funkcjami prędkości obrotowej. I tak w przypadku tradycyjnego układu regulacji opartego na zmianie oporu w obwodzie wirnika można napisać:

$$P_p(n_x) = P_p(n_n) \left[\frac{n_x}{n_n} \right]^3$$

$$\Delta P_r(n_x) = P_p(n_n) \left[\frac{n_x}{n_n} \right]^2 \left[1 - \frac{n_x}{n_n} \right]$$

gdzie: P_s - moc pobrana przez silnik bez strat w silniku.

Wartość mocy P_p oraz straty ΔP_r dla n pomp wirnikowych pracujących równolegle napędzanych silnikami asynchronicznymi przedstawiono na rys.1.

3.2. Regulacja dławieniowa

Regulacja dławieniowa polega na zmianie położenia zaworu na rurociągu tłocznym pompy.

W przypadku pomp pracujących równolegle nie stosuje się równoczesnego dławienia na rurociągach wszystkich pomp, lecz dławi się na zaworze tylko jednej pompy. Taki sposób regulacji dławieniowej powoduje mniejsze straty oraz nie wymaga równoczesnej i jednakowej zmiany położenia zaworów na wszystkich rurociągach tłocznych pomp.

Dla regulacji dławieniowej organem wykonawczym układu regulacji powodującym straty energii jest zawór na rurociągu tłocznym 1 pompy. Straty regulacji ΔP_r wynoszą:

$$\Delta P_r = 0,00272 \frac{Q_1 \Delta h_1}{\eta_p^1}$$

gdzie: Q_1 - wydajność 1 pompy,

$\Delta h_1 = H_1 - H_r$ - straty ciśnienia na zaworze 1 pompy,

H_r - ciśnienie w rurociągu tłocznym wyjściowym z przepompowni,

H_1 - ciśnienie w rurociągu tłocznym pompy dławionej,

η_p^1 - sprawność 1 pompy dla Q_1 .

Moc pobrana przez zespół pompowy, składający się z m pomp pracujących równolegle bez strat w silniku, określa następujące równanie:

$$Q_z \tau = Q_{\max}^1 \tau_1 + Q_{\max}^{1+1} \tau_{1+1}$$

gdzie: Q_z - zadana wartość,

Q_{\max}^1 - wydajność 1 pomp pracujących równolegle dla obrotów nominalnych,

Q_{\max}^{1+1} - wydajność 1+1 pomp pracujących równolegle dla obrotów nominalnych.

W przypadku pomp pracujących w reżimie załącz-wyłącz żaden element układu regulacji nie powoduje strat energii. Moc zespołu pompowego bez strat w silniku wynosi:

$$P_s = P_s^1 + (P_s^{1+1} - P_s^1) \frac{Q_z - Q_{\max}^1}{Q_{\max}^{1+1} - Q_{\max}^1}$$

Wartość mocy P_s przedstawiono na rys.1.

4. Struktura układu sterowania przepompowni

Układ sterowania wydajnością przepompowni będzie różny w zależności od przyjętego sposobu regulacji. W każdym przypadku inną postać będzie miał wektor wartości zadanych c oraz wektor wielkości sterujących x .

I tak dla:

- regulacji prędkości obrotowej: $[c] = \begin{bmatrix} n_z \\ 1^z \end{bmatrix}$
- regulacji dławieniowej: $[c] = \begin{bmatrix} z \\ 1 \end{bmatrix}$
- pracy w reżimie załącz-wyłącza: $[c] = \begin{bmatrix} 1 \\ \tau_1 \\ \tau_{1+1} \end{bmatrix}$

gdzie: n_z - zadana prędkość obrotowa pomp,

1 - liczba pracujących pomp,

z - położenie zaworu na rurociągu tłoczym pomp,

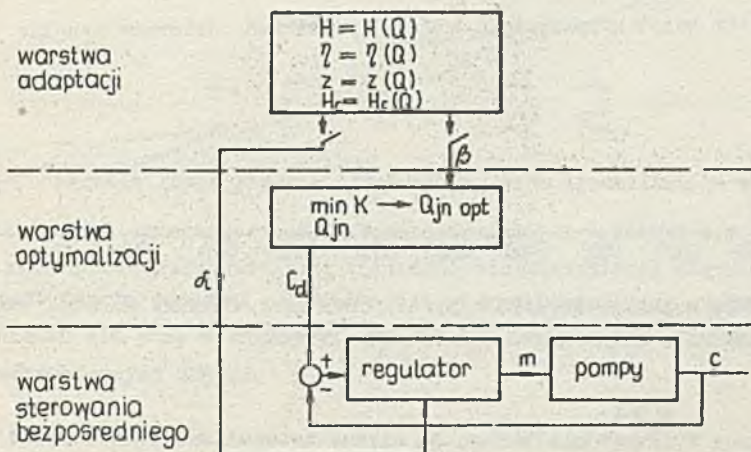
τ_1 - czas pracy 1 pomp,

τ_{1+1} - czas pracy 1+1 pomp.

Wyjścia sterujące stanowią różne sygnały w zależności od przyjętego sposobu regulacji, np. sygnały załączające i wyłączające pompy, sterujące układem regulacji prędkości obrotowej czy położeniem zaworu.

Omawiając układ sterowania, należy uwzględnić również wpływ zakłóceń. Istotne znaczenie będą miały przede wszystkim zakłócenia powodujące zmianę charakterystyki przepływu $H=H(Q)$, sprawności $\eta = \eta(Q)$, rurociągu $H_c = H_c(Q)$, zaworu $z=z(Q)$. Wykorzystanie wymienionych charakterystyk do sterowania wydajnością przepompowni wymagać będzie ich ciągłej aktualizacji.

Układ sterowania przepompownią wody będzie realizował funkcje adaptacji, optymalizacji oraz sterowania bezpośredniego. Czyli będzie układem trójwarstwowym (rys.2.).



Rys.2. Układ sterowania przepompownią wody.

W warstwie adaptacji wyznaczane będą wektory nastawialnych parametrów β i α . I tak np. dla regulacji dławieniowej wektor β będzie miał postać

$$\beta = \begin{bmatrix} \eta \\ H \end{bmatrix} \quad Q = \text{var}, \quad \text{a wektor } \alpha = [z] \quad Q = \text{var}.$$

W warstwie optymalizacji wyznaczona będzie optymalna wartość wydajności przepompowni w określonych przedziałach czasu Δt_n . Załóżmy, że:

- sieć wodociągowa jest zasilana przez m -przepompowni,
- z sieci wodociągowej wodę pobiera l -odbiorców,
- koszt zaopatrzenia w wodę i -tego odbiorcy przez j -tą przepompownię wynosi k_{ij} .

W takim razie ilość wody V_{i1} , którą w czasie Δt_n należy dostarczyć i -temu odbiorcy oraz ilość wody V_{j1} , którą dysponuje j -ta przepompownia, spełniają następujące zależności:

$$\sum_{j=1}^m V_{j1} = V_{i1}$$

$$\sum_{i=1}^1 v_{ji} \leq v_j$$

$$\sum_{j=1}^m v_j \geq \sum_{i=1}^1 v_i$$

Całkowity koszt zaopatrzenia w wodę wszystkich odbiorców wynosi:

$$K = \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^m v_{ji} k_{ji}$$

Problem optymalizacji można sformułować w następujący sposób:

należy tak dobrać wydajność poszczególnych przepompowni, aby dostarczona woda pokryła zapotrzebowanie odbiorców przy równoczesnym utrzymaniu odpowiedniego rozkładu ciśnień w sieci, oraz przy warunku minimum kosztów, tzn.:

$$h_k \geq h_{k \min}$$

$$K = K_{\text{minimum}} \rightarrow v_{ji} = v_{ji} \text{ optymalne}$$

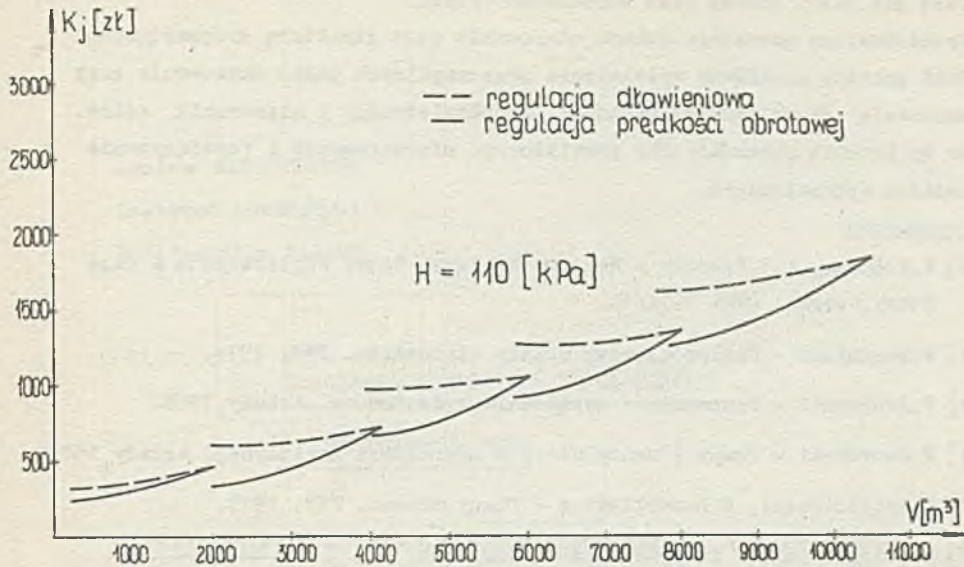
gdzie: h_k - ciśnienie w k -tym węźle sieci.

Inaczej mówiąc, należy wyznaczyć wydajność Q_j dla każdej przepompowni, tak aby koszt dostarczonej wody był minimalny oraz aby były zapewnione odpowiednie gradienty ciśnień. Zagadnienie to można rozwiązać za pomocą programowania liniowego, wykorzystując charakterystyki kosztu przepompowni $k_j = k_j(V)_{H=\text{const}}$, gdzie: H - wysokość podnoszenia pomp.

Przykłady takich charakterystyk dla regulacji prędkości obrotowej i dźwigniowej przedstawiono na rys.3. Przy wyznaczaniu charakterystyki przyjęto, że koszt 1 kWh wynosi 0,50 zł, a $\Delta t_n = 1$ h.

W koszcie przepompowni wody uwzględniono tylko koszt energii pobieranej przez pompy.

Zadanie adaptacji i optymalizacji będzie realizowane na poziomie nadrzędnym 1, który w oparciu o aktualne charakterystyki pomp i charakterystyki kosztu dla poszczególnych przepompowni oraz w oparciu o aktualny stan sieci określać będzie wydajność Q_{jn} .



Rys.3. Wartość kosztu pompowni w zależności od wydajności przy stałym ciśnieniu dla pomp wirnikowych typu WB 220 napędzanych silnikami asynchronicznymi SCU dm.

Sterowanie bezpośrednio realizowane będzie na poziomie niższym. W oparciu o znajomość wartości Q_{jn} oraz parametrów wektora α , układ będzie sterował pracą pomp.

5. Podsumowanie

Z analizy zużycia energii przez zespół pompowy wynika, że najmniejsze zużycie energii przez zespół występuje dla pracy pomp w reżimie załącz-wyłącz, a największe dla regulacji dławieniowej.

Wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy dotyczą dwóch aspektów:

- nowobudowanych przepompowni,
- modernizacji przepompowni już istniejących.

Stosowanie regulacji poprzez pracę w reżimie załącz-wyłącz nie zawsze jest możliwe. Wymaga ono bowiem górnego i dolnego zbiornika oraz stosunkowo małych wartości poborów wody z rurociągu przed zbiornikiem górnym.

W przypadku gdy wymienione powyżej warunki nie są spełnione, najkorzystniejszym sposobem jest regulacja poprzez zmianę prędkości obrotowej.

Należy tu jednak pamiętać, że oszczędności energii przy sposobie opartym na zmianie oporności w obwodzie wirnika w porównaniu z regulacją dławieniową nie są zbyt duże.

Natomiast zastosowanie układów tyrystorowych daje większe oszczędności,

lecz sam koszt układu jest stosunkowo wysoki.

Przedstawiona struktura układu sterowania jest strukturą trójwarstwową. Taki podział umożliwia wydzielenie poszczególnych zadań sterowania oraz wskazanie ich wzajemnych powiązań, współzależności i hierarchii celów. Ma to istotne znaczenie dla prawidłowego sformułowania i rozwiązywania zadania optymalizacji.

LITERATURA

- [1] K.P.Singh, A.P.Vosocky - Meeting Regional Water Regierements A Case Study. Journal AWWA 1974/10.
- [2] W.Findeisen - Wielopoziomowe układy sterowania. PWN, 1974.
- [3] F.Jankowski - Pompownie i urządzenia hydroforowe. Arkady, 1966.
- [4] F.Jankowski - Pompy i wentylatory w inżynierii sanitarnej. Arkady, 1975.
- [5] T.Troskłański, S.Łazarkiewicz - Pompy wirowe. WNT, 1973.
- [6] Katalog silników krajowych 34-M. Rok 1961.
- [7] R.Kulikowski - Sterowanie w wielkich systemach. NT, Warszawa 1970.
- [8] W.Pękański - Koncepcja automatyzacji i sterowania przepompowniami systemu wodociągu grupowego WPWiK Katowice-Gliwice, 1975 - praca IAPiP (niepublikowana).
- [9] U.Pociask - Analityczny model matematyczny przepompowni dla potrzeb optymalnego sterowania - Gliwice 1977 - praca IAPiP (niepublikowana).
- [10] Praca zbiorowa IAPiP - Opracowanie koncepcji kompleksowego sterowania w systemie wodno-gospodarczym na obszarze Śląska.

ВЫБОР СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ

На основании стоимости потребляемой энергии проведено анализ схем управления производительностью насосов. Подано структуры схем управления насосной станцией.

THE CHOISE OF THE PUMPING PLANT CONTROL SYSTEM SOLUTION

In this paper three diffirent types of the pump delivery control are presented. An evaluation of the control systems is made utilizing pumping energy cost. The structures of the pumping plant control system are shown as for one of the objects of the water-economic system.