

Urszula SZTWIERTNIA-POCIASK

Instytut Automatyki
Politechniki Śląskiej

OCENA SPOSOBÓW REGULACJI WYDAJNOŚCI POMP NA PRZYKŁADZIE PRZEPOMPOWNI

Streszczenie. W artykule omówiono regulację wydajności pomp wirowych w przepompowniach wody. Ocena poszczególnych sposobów, tzn. poprzez regulację prędkości obrotowej i ciśnienie na rurociągu tłocznym oraz pracę w reżimie załącz-wyłącz, przeprowadzono w oparciu o wskaźnik ekonomiczny, określający koszt przepompowania 1 m³ wody. Jako główny składnik kosztu przyjęto koszt zużytej energii.

1. Wstęp

Do obiektów objętych systemem kompleksowego sterowania zasobami wodnymi na obszarze Śląska należą przepompownie. Zadanie optymalnego sterowania wydajnością przepompowni polega na takim sterowaniu, dla którego przyjęty wskaźnik oceny pracy ma wartość optymalną. Jako wskaźnik oceny stosowany jest na ogół wskaźnik ekonomiczny, określający koszt przepompowania 1 m³ wody. O wartości tego wskaźnika decyduje przede wszystkim wartość energii pobranej przez pompy. Energia potrzebna do przepompowania zadanej ilości wody przez zespół pompowy zależy od sprawności silnika napędzającego pompę η_s , sprawności układu regulacji wydajnością pomp η_r oraz sprawności samej pompy η_p . Stąd też przy wyborze układu regulacji η_r ma istotne znaczenie.

Przepompownie na obszarze Śląska są na ogół wyposażone w pompy wirowe o różnej mocy w zależności od wielkości wydajności przepompowni. W dalszej części na przykładzie 6 pomp wirowych typu WB-22d pracujących równolegle zostanie przedstawiona ocena i wzajemne porównanie trzech sposobów regulacji wydajnością pomp z punktu widzenia zużycia energii.

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

Sterowanie wydajnością pomp wirowych można przeprowadzić przy pomocy:

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

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

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

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

$$E = 0,00272 \frac{H}{\eta} \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3},$$

gdzie:

P - moc pobrana przez zespół pompowy,

η - sprawność zespołu pompowego.

Jak już powiedziano na wstępie, moc pobrana przez zespół pompowy jest zależna od sprawności η_p , η_r i η_s .

$$P = P_s + \Delta P_s,$$

$$P_s = P_p + \Delta P_r,$$

gdzie:

$P_s = P \cdot \eta_s$ moc pobrana przez zespół pompowy bez strat w silniku,

$P_p = P_s \cdot \eta_r$ moc pobrana przez zespół pompowy bez strat w silniku i w układzie regulacji,

ΔP_s - straty mocy w silniku,

ΔP_r - straty mocy w układzie regulacji.

Z punktu widzenia oceny układu regulacji istotne znaczenie mają straty ΔP_r . Straty ΔP_s oraz mod P_p nie zależą od sposobu regulacji wydajnością pomp.

W dalszej części do oceny i wzajemnego porównania regulacji prędkości obrotowej, dławieniowej oraz pracy pomp w reżimie załącz-wyłącz zostanie wykorzystana wartość mocy P_s .

Jak wiadomo własności pomp wirowych opisują trzy podstawowe charakterystyki:

- | | |
|---------------|-----------------------|
| a) przepływu | $H = H(Q),$ |
| b) mocy | $P_p = P(Q),$ |
| c) sprawności | $\eta_p = \eta_p(Q),$ |

gdzie:

P_p - moc pobrana na wale pompy,

η_p - sprawność pompy.

Punkt pracy pompy wirowej podnoszącej ciecz na pewną wysokość przy pomocy przewodu zamkniętego określa punkt przecięcia się charakterystyki przepływu $H = H(Q)$ z charakterystyką przewodu (rurociągu) $H_c = H_c(Q)$.

$$H(Q) = H_c(Q),$$

gdzie:

$$H_c = H_p + \Delta h_r(Q),$$

H_p - statyczna wysokość podnoszenia,

Δh_r - straty ciśnienia wskutek ruchu cieczy w rurociągu.

Założmy, że charakterystykę rurociągu, z którym współpracuje przepompownia, opozuje następujące równanie :

$$H_c = (100,4 + 12 \cdot 10^{-5} Q^2) [m]$$

Na rys.1, 2 i 3 przedstawiono charakterystykę przepływu, sprawności i mocy jednej pompy oraz charakterystykę rurociągu.

2.1. Regulacja prędkości obrotowej zespołu pompowego

Regulacja wydajności pomp przez zmianę prędkości obrotowej wirnika polega na zmianie prędkości obrotowej wraz ze zmianą zapotrzebowania na wodę.

Wszystkie charakterystyki pompy są funkcjami prędkości obrotowej n . Prędkością obrotową n_x dla zadanej wartości wydajności pomp Q_z wyznacza się w oparciu o prawa podobieństwa [1] :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad /1/$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \quad /2/$$

$$\frac{P_{p1}}{P_{p2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3, \quad /3/$$

Wysokość podnoszenia H_z odpowiadającą wydajności Q_z określa się w oparciu o charakterystykę przewodu $H_c = H_c(Q)$. Zakładając, że znana jest charakterystyka przepływu pomp dla obrotów nominalnych n_n (co jest zawsze spełnione) wyznacza się punkt pracy pompy H'' , Q'' spełniający następujący układ równań :

$$\left. \begin{aligned} \frac{H^*}{H_z} &= \left(\frac{Q^*}{Q_z} \right)^2 \\ H &= H(Q) \end{aligned} \right\} \text{ dla } n = n_n$$

$$\left. \begin{aligned} \text{dla } Q &= Q^* \\ H &= H^* \end{aligned} \right\}$$

Po określeniu wydajności Q^* na podstawie zależności /1/ wyznacza się szukaną wartość prędkości obrotowej n_x

$$n_x = n_n \frac{Q_z}{Q^*}$$

Zarówno moc P_p jak i straty ΔP_x są funkcjami prędkości obrotowej

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

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

Wyznaczając wartość mocy P_p z równania

$$P_p = 0,00272 \frac{H \cdot Q}{\eta_p} \quad \text{dla } n = \text{const} \quad /4/$$

przy wykorzystaniu charakterystyk $H = H(Q)$ i $\eta = \eta(Q)$ można obliczyć straty ΔP_x . Wartość mocy P_B oraz strat ΔP_x dla 6 pomp pracujących w omawianej przepompowni podano w tabelicy 1.

2.2. Regulacja dławieniowa

Regulacja dławieniowa polega na przemykaniu zaworu na rurociągu tłocznym pompy. Dławienie na rurociągu ssawnym powoduje niebezpieczeństwo powstania kawitacji i dlatego nie jest stosowane.

W przypadku pomp pracujących równolegle nie stosuje się równoczesnego dławienia na rurociągach wszystkich pomp, lecz dławi się tylko na zaworze jednej pompy. Taki sposób przeprowadzania regulacji dławieniowej powoduje mniejsze straty oraz nie wymaga równoczesnej zmiany położenia zaworów na wszystkich rurociągach tłocznych pracujących pomp. Rozpatrzmy przypadek pracy pomp pracujących równolegle. Straty mocy ΔP_d^1 na skutek dławienia wystąpią tylko na jednej pompie i wyniosą

$$\Delta P_d^1 = 0,00272 \frac{Q_1 \Delta h_1}{\eta_p^1} \quad /5/$$

gdzie:

- Q_p - wydajność jednej pompy,
 Δh_p = $H_1 - H_x$ straty ciśnienia na zaworze jednej pompy,
 η_p - sprawność jednej pompy dla Q_p ,
 H_x - ciśnienie w rurociągu tłocznym wyjściowym z przepompowni,
 H_1 - ciśnienie w rurociągu tłocznym pompy dławionej.

Moc pobrana przez m pomp będzie równa sumie mocy pobieranej przez jedną pompę i $(m-1)$ pomp

$$P_B = 0,00272 \left[\frac{Q_1 \cdot H_1}{\eta_p} + \sum_{i=2}^{m-1} \frac{Q_i \cdot H_x}{P_i} \right], \quad /6/$$

gdzie :

- Q_i - wydajność i -tej pompy,
 η_{pi} - sprawność i -tej pompy dla Q_{m-1} .

Dla regulacji dławieniowej elementem układu regulacji powodującym straty energii jest zawór na rurociągu tłocznym. Straty regulacji ΔP_x są więc równoważne stratom ΔP_d . Moc P_B pobrana przez zespół pompy bez strat w silniku określa równanie /6/. Wartość mocy P_B dla 6 pomp WB-22d oraz strat ΔP_x podano w tablicy 2.

2.3. Regulacja wydajności przepompowni poprzez pracę pomp w reżimie załącz-wyłącz

Regulacja wydajności przepompowni poprzez pracę pomp w reżimie załącz-wyłącz może być stosowana tylko wówczas, gdy przepompownia współpracuje z dolnym i górnym zbiornikiem. Taki sposób regulacji wymaga bowiem akumulacji zasobów w obu zbiornikach.

Analizowana przepompownia spełnia ten warunek. Dla pracy pomp w reżimie załącz-wyłącz moc pobrana przez pompy będzie równa mocy pobranej przez 1 pomp pracujących przez czas τ_1 oraz przez $l+1$ pomp pracujących przez czas τ_{l+1} . Pod uwagę brany jest okres czasu pracy pomp $\tau = \tau_1 + \tau_{l+1}$. Po jego upływie ilość wody przepompowanej jest równa:

$$Q_z \cdot \tau = Q_{\max}^1 \tau_1 + Q_{\max}^{l+1} \tau_{l+1}. \quad /7/$$

gdzie:

- Q_z - zadana wartość wydajności pomp,
 Q_{\max}^1 - wydajność 1 pomp pracujących równolegle,
 dla obrotów nominalnych,
 Q_{\max}^{1+1} - wydajność 1+1 pomp pracujących równolegle,
 dla obrotów nominalnych.

Energia pobrana przez pompy w czasie τ wynosi :

$$P_p \cdot \tau = P_p^1 \tau_1 + P_p^{1+1} \tau_{1+1}, \quad /8/$$

przy czym : P_p^1 - moc pobrana przez 1 pomp,
 P_p^{1+1} - moc pobrana przez 1+1 pomp.

Wyznaczając z zależności /7/ stosunek czasu

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

oraz podstawiając do równania /8/ otrzymuje się:

$$P_p = P_p^1 + (P_p^{1+1} - P_p^1) \frac{Q_z - Q_{\max}^1}{Q_{\max}^{1+1} - Q_{\max}^1} \quad /9/$$

W przypadku pracy pomp w reżimie załącz-wyłącz żaden element układu regulacji nie powoduje strat energii. Tym samym nie występują straty regulacji ΔP_r ($\eta_r = 1$). Moc P_p określana równaniem /9/ jest równa mocy P_B .

Wartość mocy P_B dla różnych wartości natężenia przepływu dla omawianej przepompowni podane w tabelicy 3.

3. Wnioski

Z analizy zużycia energii przez zespół pompowy przedstawionej na przykładzie 6 pomp typu WB-22d pracujących równolegle wynika, że najmniejsze zużycie energii występuje dla pracy pomp w reżimie załącz-wyłącz, a największe dla regulacji dławieniowej (tablice 1,2,3).

Wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy dotyczą dwu aspektów:

- nowo budowanych przepompowni,
- modernizacji przepompowni już istniejących.

Stosowanie regulacji wydajności pomp poprzez pracę w reżimie załącz-wyłącz pomimo- że jest najkorzystniejsza, nie zawsze jest możliwe. Wymaga ono bowiem górnego i dolnego zbiornika. Powyższe ograniczenia nie występują przy pozostałych sposobach regulacji. Stąd też wydaje się, że najkorzystniejszym sposobem jest regulacja poprzez zmianę prędkości obrotowej. Należy tu jednak pamiętać, że jej realizacja odbywa się na drodze regulacji prędkości obrotowej silnika napędzającego pompę. Obecnie w Polsce tego typu układy regulacji dla silników o dużej mocy są produkowane tylko dla silników asynchronicznych. Należy więc przy wyborze sposobu regulacji wydajności pomp porównać oszczędność energii uzyskanej na drodze regulacji prędkości obrotowej z kosztem silnika wraz z układem regulacji prędkości. Dla już istniejących obiektów należy jeszcze często uwzględnić koszt wymiany silników.

W przypadku silników asynchronicznych na koszt zużytej energii ma również wpływ współczynnik mocy $\cos \varphi$. Pociąga to za sobą konieczność ich maksymalnego obciążenia, co stwarza pewne ograniczenia zakresu regulacji wydajnością pomp.

Na zakończenie należy dodać, że przedstawiona analiza została przeprowadzona tylko z punktu widzenia wartości mocy, jaką powinien mieć zespół pompowy w zależności od przyjętego sposobu regulacji wydajności pomp, aby mógł przepompować odpowiednią ilość wody w ciągu godziny. Całkowity koszt przepompowania 1 m^3 będzie zależał od czasu pracy pomp wynikającego z algorytmu sterowania przepompownią jak również od kosztów eksploatacyjnych [4]. Ponieważ jednak koszt energii oraz harmonogram dobowej wydajności przepompowni są takie same, niezależnie od sposobu regulacji wydajności pomp już na podstawie wartości mocy potrzebnej do uzyskania zadanej wydajności, można porównać koszt przepompowania 1 m^3 wody przy zastosowaniu różnych układów regulacji.

LITERATURA

- [1] Troskoleński T., Łazarkiewicz S. : Pompy wirowe, WNT, Warszawa 1973
- [2] Opis techniczny przepompowni wody w Urbanowicach. Część technologiczna.
- [3] Katalog silników produkcji krajowej 34-M. Rok 1961.
- [4] Singh K.P., Visocky A.P. : Meeting Regional Water Requirements. A. Case Study. Journal AWWA 1974/10.

Natężenie przepływu Q_z [m^3/h]	Liczba pracujących pomp	Prędkość obrotowa	Straty regulacji ΔP_r [kW]	Moc pobrana P_B [kW]
500	1	0,815 n_n	98,3	438,3
1000		0,825	95,28	500,28
1500		0,88	74,34	594,34
1800		0,945	39,29	649,29
2050		n_n	0	
2500	2	0,84 n_n	171,6	1071,6
3000		0,88	141,25	1171,25
3600		0,94	80,58	1330,58
4030		n_n	0	1520,0
4530	3	0,9 n_n	189,54	1859,54
5030		0,913	169,69	1999,69
5530		0,93	141,67	2171,67
5930		n_n	0	2340,0
6430	4	0,91 n_n	229,54	2529,54
6930		0,94	163,28	2683,28
7450		0,97	86,93	2906,93
7720		n_n	0	3080,0
8220	5	0,95	174,18	3374,18
8720		0,97	108,95	3548,95
9220		0,987	48,88	3748,88
9350		n_n	0	3860,0
9650	6	0,96 n_n	165,88	3965,88
10050		0,98	86,43	4226,43
10370		n_n	0	4500,0

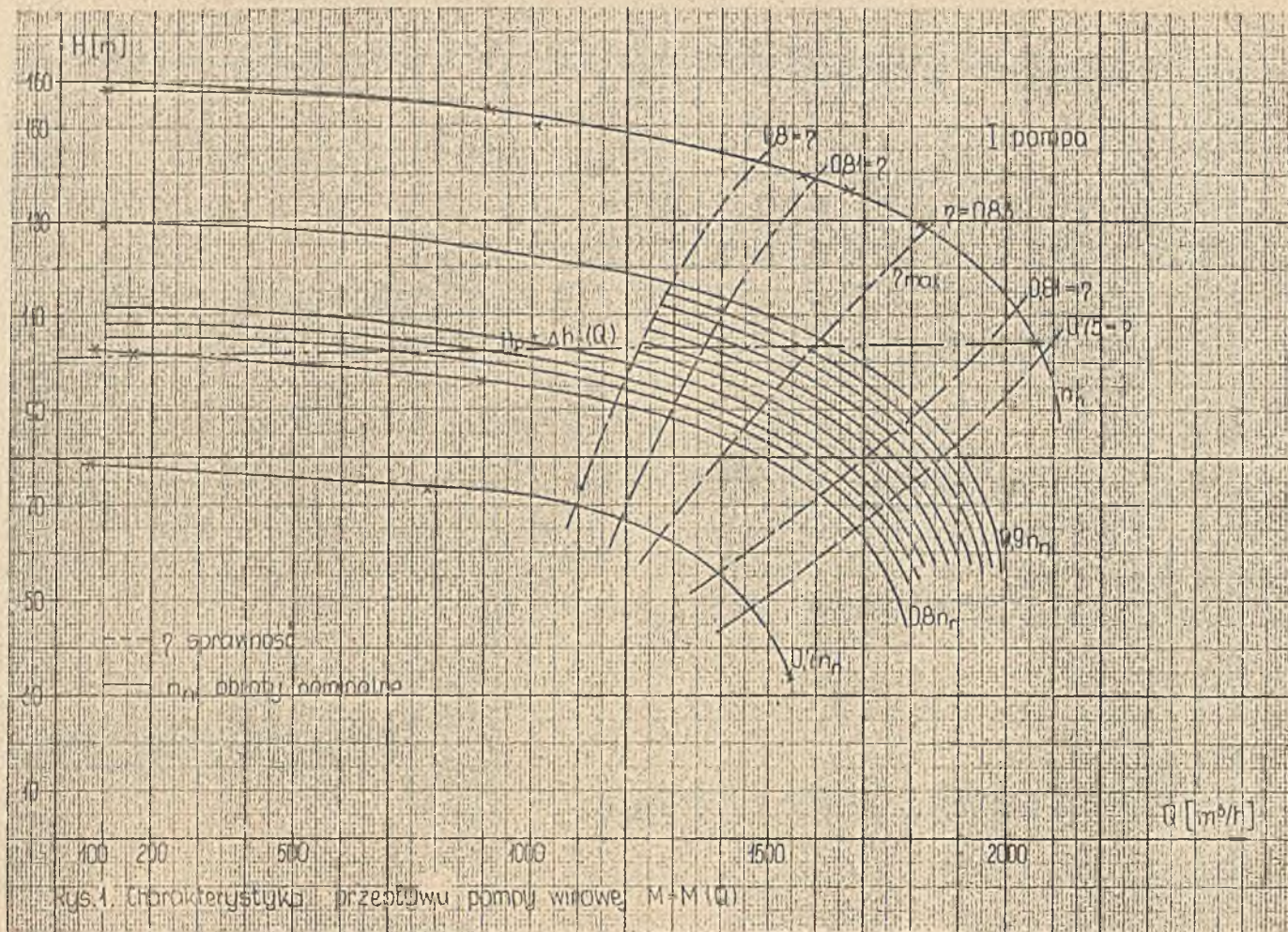
Tablica 1. Moc pobrana przez zespół pompowy P_B oraz straty mocy ΔP_r dla regulacji prędkości.

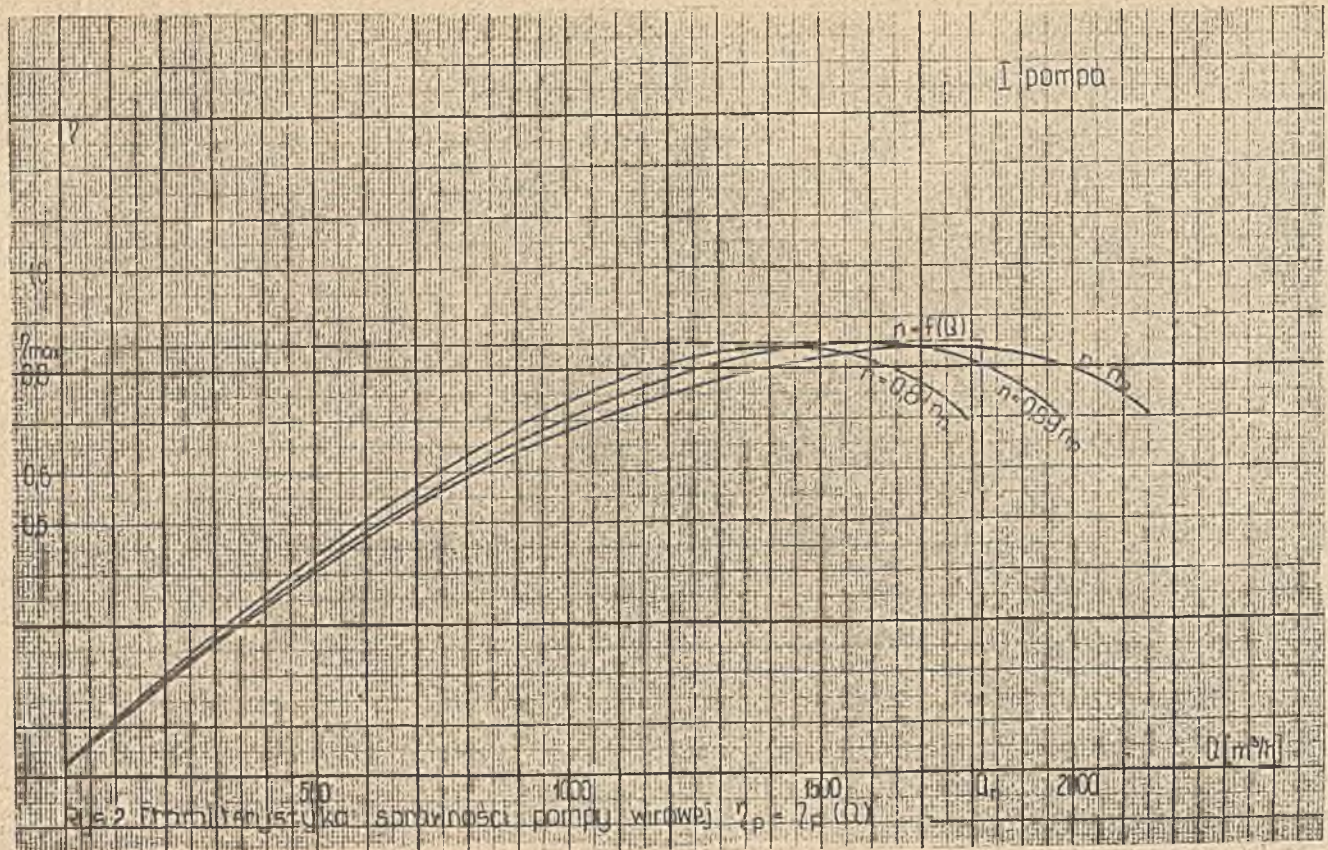
Natężenie przepływu Q [m^3/h]	Straty mocy ΔP_d^1 [kW]	Moc pobrana P_B [kW]
500	-	507,8
1000	-	598,4
1500	-	702,6
2550	168	1270,4
3050	164,7	1264,3
3550	174,8	1277,1
4500	143,8	2038,8
5030	158,3	2132,7
5530	152,3	2223,6
6430	137,2	2685,7
6930	139,06	2796,3
7450	116,8	2928,6
8220	125,5	3629,05
8720	114,2	3758,8
9220	75,7	3884,8
9650	54,4	4335,7
10050	68,5	4502,1

Tablica 2. Wartość mocy P_B dla 6 pomp WB-22d oraz straty ΔP_r

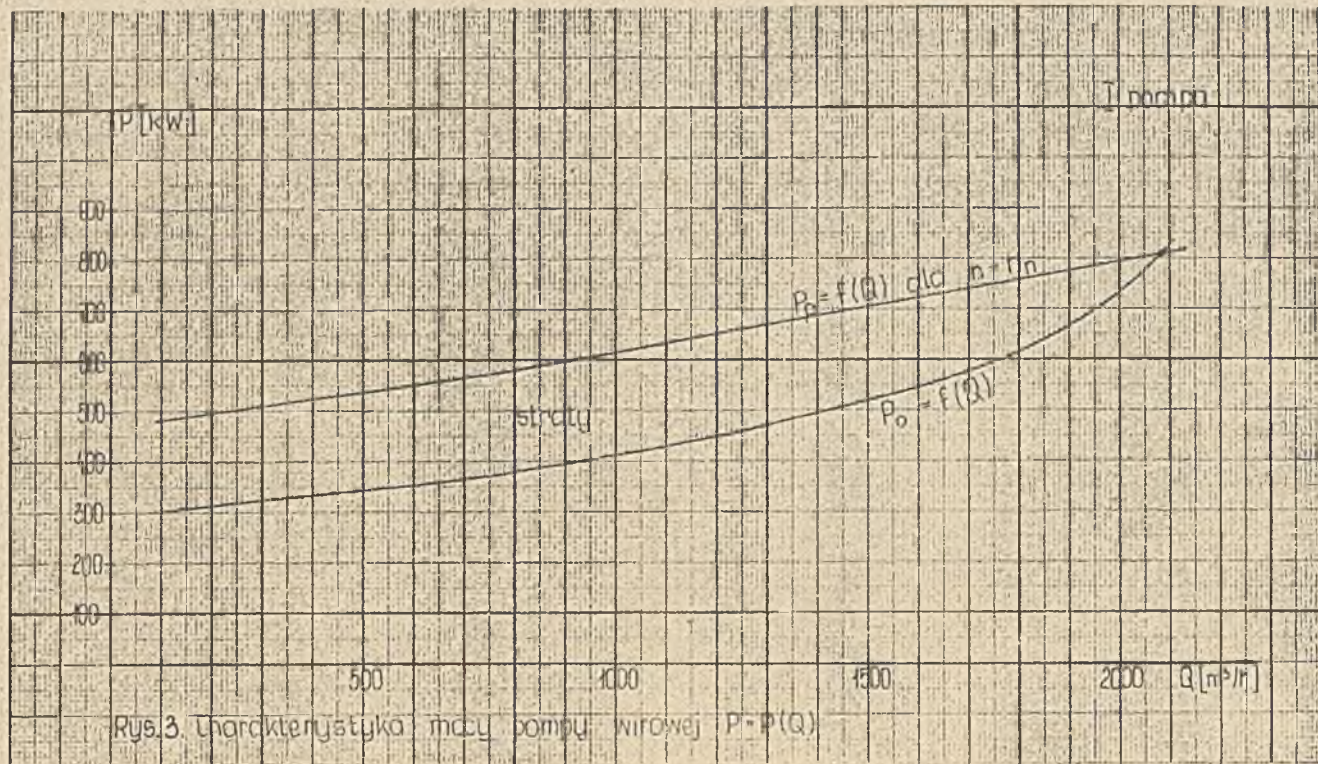
Natężenie przepływu Q_z [m^3/h]	Moc pobrana P_B [kW]
500	195
1000	390
1500	585
2550	980
3050	1160
3550	1340
4530	1735
5030	1950
5530	2165
6530	2586
6930	2750
7530	2986
8220	3300
8720	3520
9220	3740
9850	4128
10250	4416

Tablica 3. Moc pobrana przez zespół pompowy P_B dla pracy pomp w reżimie załącz-wyłącz.

Rys.1. Charakterystyka przepływu pompy wirowej $M=M(Q)$



Rys. 2. Charakterystyka sprawności pompy wirkowej $\eta_p = \eta_p(Q)$



Rys.3. Charakterystyka mocy pompy wirowej $P = P(Q)$

ОЦЕНКА СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ НАСОСОВ НА ПРИМЕРЕ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

Р е з ю м е

В статье рассматриваются вопросы регулирования производительности центробежных насосов в насосной станции. Оценка отдельных способов т.е. регулирование скоростью вращения, дросселирование на выходном трубопроводе и работы в режиме включен - выключен, проводится на основе экономического показателя определяющего стоимость перекачивания 1 м^3 воды. Основной составляющей стоимости принято стоимость затраченной энергии.

COMPARISON OF METHODS OF PUMPS ASSICIENCY REGULATION FOR THE CASE OF PUMPING STATION

Summary

In the paper there is a description concerning the output regulation of centrifugal-pumps in a water pumping station. An evaluation of the various methods for output-control is described including the regulation of the rotating-speed, the installing of a stuffing-box on the pressure-pipe and the "switch on and switch off" system. The pumping costs of 1 м^3 water are assumed as the economica criterion and the powercost is the main component of them.