

Waldemar Jędrał

Instytut Techniki Ciepłej

OPTYMALNA ENERGETYCZNIE LUB KOSZTOWO EKSPLOATACJA POMPOWNI KOMUNALNYCH

Pompy o wysokiej sprawności i poprawnie dobrane do instalacji są często eksploatowane w sposób niedostatecznie ekonomiczny. W pracy przedstawiono metody optymalnego sterowania pracą pompowni pierwszego rodzaju (PI) oraz optymalnej bieżącej regulacji, w czasie rzeczywistym, wydajności pompowni drugiego rodzaju (PII). Funkcją celu w optymalizacji jest uzyskanie minimalnych kosztów energii elektrycznej zużywanej do napędu pomp, co nie zawsze musi być równoznaczne z najmniejszym zużyciem energii. Wyniki przykładów obliczeniowych pokazują, że wdrożenie i stosowanie tych metod w pompach i instalacjach gospodarki komunalnej może przynieść znaczące oszczędności. Metody mogą być stosowane także w wybranych innych instalacjach przemysłowych i energetycznych.

Oznaczenia

- E [kW·h] – zużycie energii przez zespół pompowy lub grupę zespołów pompowych w określonym czasie (np. w ciągu doby)
- H [m] – wysokość podnoszenia pompy
- H_{uk} [m] – wysokość podnoszenia układu pompowego
- H_z [m] – geometryczna wysokość podnoszenia
- k_e [zł/kW·h] – koszt jednostkowy energii elektrycznej w określonej porze doby lub tygodnia
- K_e [zł] – koszt energii elektrycznej zużywanej do napędu pomp
- m [-] – liczba pomp współpracujących równolegle w pompowni lub innej instalacji pompowej
- n [obr/min] – prędkość obrotowa
- P [kW] – moc na wale pompy
- P_{el} [kW] – moc pobierana z sieci przez układ napędowy pompy
- Q [m³/h] – wydajność pompy

Q_s [m^3/h]	– wydajność chwilowa pompowni lub instalacji pompowej
$\sum Q_s$ [m^3/h]	– wydajność okresowa (np. dobową) pompowni (instalacji)
δQ [m^3/h]	– krok w obliczeniach optymalizacyjnych (dla pojedynczej pompy)
ΔQ_s [m^3/h]	– krok w obliczeniach optymalizacyjnych (dla grupy pomp) lub zmiana zapotrzebowania w określonym czasie Δt
t [h]	– czas bieżący
T [h]	– okres czasu (np. doba), dla którego wykonywane są obliczenia
V [m^3]	– objętość zbiornika przed (za) pompownią
η [–]	– sprawność pompy
η_s [–]	– sprawność silnika napędowego
η_{ur} [–]	– sprawność układu regulacji zmiennobrotowej
η_z [–]	– sprawność zespołu pompowego

Skróty stosowane w tekście i na rysunkach

m.s.c.	– miejska sieć ciepłownicza
m.s.w.	– miejska sieć wodociągowa
p	– pompa
r	– rurociąg (instalacja pompowa)

WSTĘP

Ilość energii zużywanej do napędu pomp w pompowniach i instalacjach, będących przedmiotem niniejszej pracy, zależy od:

- 1) poziomu jakości konstrukcji oraz wykonania pomp,
- 2) poprawności zaprojektowania i wykonania instalacji pompowej,
- 3) poprawności doboru pomp do instalacji,
- 4) racjonalności użytkowania pomp i instalacji pompowych.

W pracy [1] omówiono zagadnienie oceny pomp pracujących w obiektach komunalnych oraz zaproponowano sposób oceny istniejących instalacji pompowych pod względem energochłonności (1, 2). Przedstawiono następnie metodę optymalnego – pod względem łącznych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych – doboru pomp do obiektów modernizowanych (3) jak również nowo projektowanych.

Równie ważnym zagadnieniem jest energooszczędna eksploatacja obiektu pompowego, dobrze zaprojektowanego i wykonanego lub racjonalnie zmodernizowanego. Stosunkowo prostymi środkami można – zdaniem autora – uzyskać w tym zakresie znaczne efekty ekonomiczne.

Jednym z najbardziej efektywnych sposobów zmniejszenia zużycie energii przez układy napędowe może być dobór uzasadnionych ekonomicznie sposobów regulacji wydajności pomp pracujących w gospodarce komunalnej oraz optymalizacja sposobu prowadzenia tej regulacji ze względu na minimum strat energii.

W pracy [1] podano metodę doboru optymalnych kosztowo sposobów regulacji wydajności, w tym – różnych realizacji zmiennoodrotowych układów napędowych. Jest ona oparta na tych samych zasadach co optymalny dobór pomp.

W niniejszej pracy przedstawiono zarówno ogólną metodę jak też praktyczny sposób optymalnego energetycznego prowadzenia regulacji parametrów pracy pomp w całych obszarach ich możliwej zmienności, tzn. takiego bieżącego doboru parametrów regulacji poszczególnych współpracujących ze sobą pomp, aby zużycie energii elektrycznej do ich napędu było jak najmniejsze. Metoda dotyczy pompowni II rodzaju (PII) [1] jak również, w zakresie ograniczonym wymaganiami ze strony urządzeń współpracujących – instalacji pompowych w ciepłowniach miejskich.

Przedstawiono także rozwiązanie problemu optymalnego sterowania pracą grupy pomp w pompowniach rodzaju PI, które w ciągu doby powinny przetłoczyć określoną ilość cieczy między zbiornikami wyrównawczymi o dużych pojemnościach, natomiast liczbę pracujących pomp i ich bieżące wydajności można w szerokich granicach wybierać dość dowolnie.

Praca oparta jest na wynikach uzyskanych w ramach projektu badawczego [2].

1. OGÓLNE ZASADY EKONOMICZNEJ EKSPLOATACJI POMPOWNI I i II RODZAJU

1.1. POMPOWNI PIERWSZEGO RODZAJU PI

Pompownie rodzaju PI są to najczęściej obiekty wodociągowe, umieszczone na terenie zakładów produkujących wodę pitną. Powinny one w ciągu doby ($T = 24$ h) przepompować z jednego do drugiego zbiornika wodę w ilości

$$\sum Q_s = \int_0^T Q_s dt \quad [\text{m}^3/\text{dobę}] \quad (1)$$

przy chwilowej wydajności Q_s [m^3/h], która może być arbitralnie ustalona w stosunkowo szerokim zakresie $Q_{s\min} \dots Q_{s\max}$, ograniczonym tylko dopuszczalnymi¹⁾ wydajnościami dla poszczególnych pomp

$$Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max} \quad (2)$$

oraz pod warunkiem zachowania objętości V_i każdego ze zbiorników w dopuszczalnych granicach

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max}; \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

Przykład usytuowania pompowni rodzaju PI pokazano na rys. 1.

Dla istniejącej instalacji pierwszego rodzaju, dla której obowiązują ogólne warunki pracy (1) i (3), powinna być możliwa eksploatacja m znajdujących się w niej, równolegle połączonych pomp – optymalna pod względem zużycia energii. Podczas takiej eksploatacji odpowiednio sterowane silniki napędowe wszystkich m pomp, pracujących w różnych przedziałach czasowych z różnymi wydajnościami i pobierających z sieci elektrycznej moce P_{el} o różnych wartościach, zużywają najmniejszą ilość energii w ciągu doby:

$$E_d = \sum_{i=1}^m E_i = \sum_{i=1}^m \left(\int_0^T P_{el,i} dt \right) = \min \text{ [kW} \cdot \text{h/dobę]} \quad (4)$$

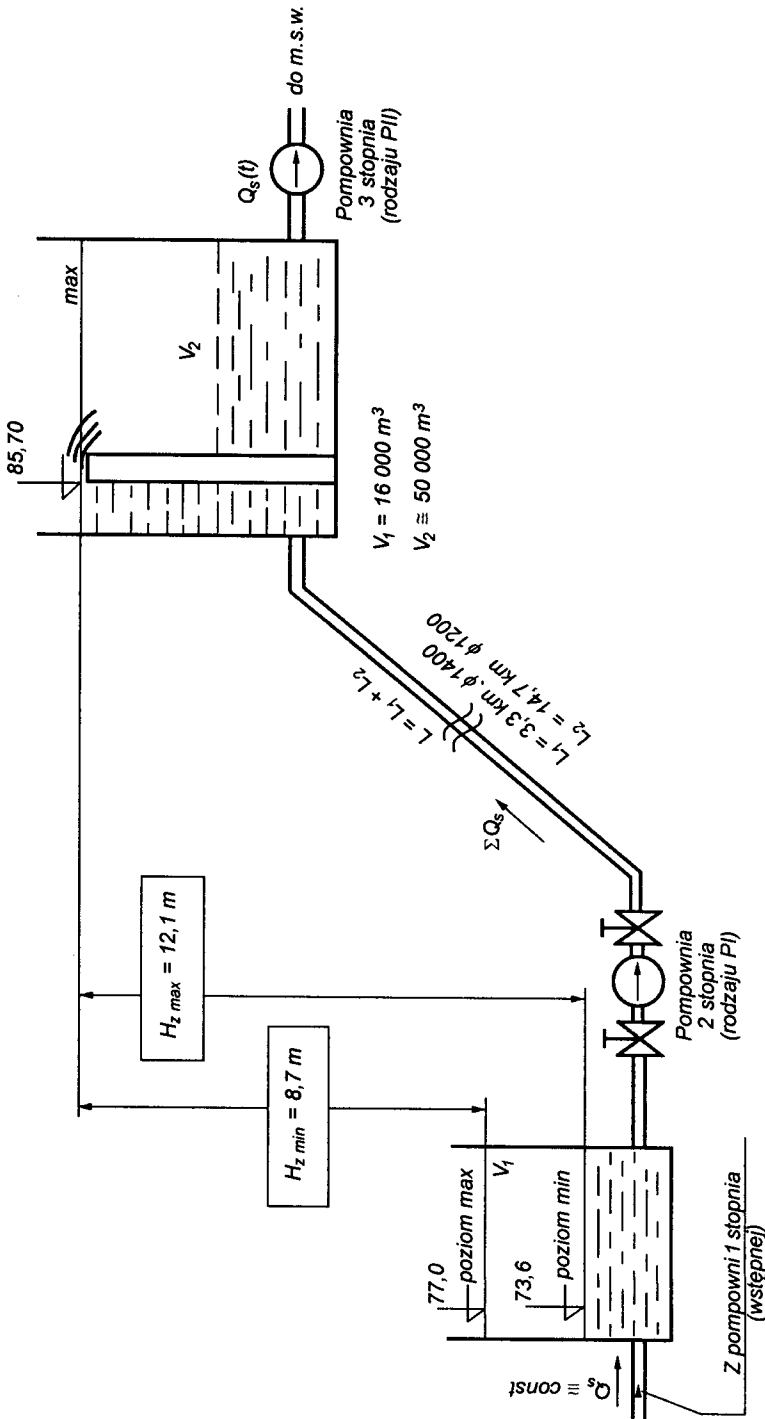
W przypadku korzystania z energii elektrycznej o różnych w ciągu doby cenach jednostkowych, najczęściej dwóch: dziennej k_{e1} [$\text{zł/kW} \cdot \text{h}$] i nocnej k_{e2} [$\text{zł/kW} \cdot \text{h}$] powinna być możliwa eksploatacja optymalna pod względem kosztu energii²⁾ zużytej w ciągu doby, tzn. uzyskanie w czasie $T_1 + T_2 \leq 24$ h łącznego kosztu

$$K_{ed} = \sum_{i=1}^m K_i = \sum_{i=1}^m \left(\int_0^{T_1} P_{el,i} k_{e1} dt + \int_0^{T_2} P_{el,i} k_{e2} dt \right) = \min \text{ [zł/dobę]} \quad (5)$$

W dokładniejszych obliczeniach można uwzględnić różnice kosztów jednostkowych także w różnych dniach tygodnia, a nawet w różnych sezonach, rozciągając optymalizację na okresy dłuższe niż jedna doba.

¹⁾ Chodzi o wydajności Q_{\min} , Q_{\max} , określone przez wytwórcę każdej z pomp w jej dokumentacji techniczno-ruchowej, których przekroczenie nie jest wskazane ze względu na mogącą wówczas wystąpić kawitacja, nadmierne wartości sił hydraulicznych i/lub inne zagrożenia.

²⁾ W przypadku, gdy istnieje możliwość korzystania z energii o różnych cenach w ciągu doby, uzyskanie najmniejszych kosztów energii nie musi być równoznaczne z najmniejszym jej zużyciem.



Rys. 1. Fragment systemu wodociągowego z pompowniami PI i PII, rurociągami tranzytowym i zbiornikami wyrównawczymi

Równania (4), (5) są funkcjami celu w optymalizacji, w której ograniczeniami są m.in. warunki (1) i (3). W niniejszej pracy nazywano ją optymalizacją pierwszego rodzaju. W tej optymalizacji mogą wystąpić dodatkowe ograniczenia, związane np. z zakresami dopuszczalnej pracy poszczególnych pomp (2).

Dla pompowni w trakcie projektowania trudno jest z góry przewidzieć, w jakich konkretnie warunkach będzie ona pracowała w przeciągu kolejnych dób w ramach ogólnych warunków (1), (3). Stąd problem minimalizacji kosztów eksploatacyjnych należy w takim przypadku rozpatrywać inaczej, wiążąc go z optymalnym doбором pomp do nowej instalacji. Zadanie takie przedstawiono w pracy [1].

1.2. POMPOWNIE DRUGIEGO RODZAJU PII

Instalacje rodzaju PII są to obiekty wodociągowe (rys. 1), kanalizacyjne lub inne, których chwilowa wydajność $Q_s(t)$ zależy od zmiennego zapotrzebowania, nie dającego się z góry dostatecznie dokładnie określić. Możliwe jest tylko prognozowanie, na podstawie danych statystycznych, zakresu zmienności $Q_{smin} \dots Q_{smax}$ w ciągu doby, miesiąca czy roku.

W takim przypadku można oczekiwać, że osiągalna jest eksploatacja pomp optymalna zarówno pod względem zużycia energii jak i jej kosztów. W rezultacie odpowiednio regulowane silniki napędowe wszystkich m zainstalowanych pomp pobiorą z sieci elektrycznej najmniejszą ilość energii i równocześnie koszt tej energii będzie najmniejszy.

Ze względu na odmienne warunki pracy (w instalacji PI wydajnością pomp można sterować dość dowolnie, podczas gdy w instalacji PII jest ona narzucona zewnętrznie) sposoby optymalnej eksploatacji będą różne w każdym z tych przypadków.

W istniejącej pompowni rodzaju PII nie jest możliwa optymalizacja wg funkcji celu określonej zależnością (4). Jest natomiast możliwa optymalizacja drugiego rodzaju, polegająca na takim prowadzeniu regulacji parametrów pracy poszczególnych pomp, aby całkowite chwilowe zużycie energii pobieranej z sieci było jak najmniejsze. Jest to równoznaczne z minimalizacją łącznych chwilowych mocy pobieranych z sieci przez m pracujących pomp:

$$\sum_{i=1}^m P_{el,i} = \min \text{ [kW]} \quad (6)$$

przy ograniczeniu równościowym

$$\sum_{i=1}^m Q_i = Q_s(t) \quad (7)$$

i nierównościowym (2).

Dla pompowni w fazie projektowania problem minimalizowania kosztów eksploatacji należy, podobnie jak dla pompowni PI, rozpatrywać łącznie z optymalnym doбором pomp do instalacji. Optymalizację wg zależności (6) będzie można prowadzić po wybudowaniu tej instalacji.

1.3. UWAGI UZUPEŁNIAJĄCE

- A. Zasady optymalnej eksploatacji pompowni rodzaju PII dotyczą również instalacji pompowych w ciepłowniach. Różnica polega na tym, że w przypadku ciepłowni najważniejsza jest minimalizacja zużycia paliwa do wyprodukowania określonej ilości ciepła zawartego w wodzie sieciowej. Stąd do ograniczeń (2) i (7) mogą dojść inne, związane np. z najbardziej ekonomiczną pracą kotłów wodnych.
- B. W przypadku większości instalacji, w których wciąż jeszcze stosowana jest regulacja dławieniowa, należy oczywiście rozważyć celowość jej zastąpienia przez regulację zmiennoodrotową. Stosownie do rodzaju pompowni/instalacji zależności z podrozdz. 1.1 i 1.2 można wówczas wykorzystać do symulacji energochłonności i związanych z nią kosztów dla porównywanych sposobów regulacji. Należy w tym celu założyć przypuszczalny rozkład obciążeń $Q_s(t)$ w dłuższym okresie, opierając się na przebiegu dotychczasowej eksploatacji. Regulacja dławieniowa powinna być jednym z porównywanych wariantów.
- C. Dla analizowanych wariantów można obliczać zdyskontowane okresy zwrotu nakładów, jakie muszą być poniesione na zmianę sposobu regulacji, np. wg [4]. Rozwiązanie najlepsze ekonomicznie powinno charakteryzować się najkrótszym okresem zwrotu. Otrzymanie okresu zwrotu dłuższego niż 6 lat wskazuje na celowość tymczasowej rezygnacji ze zmiany sposobu regulacji, np. do czasu istotnej zmiany kosztów napędów zmiennoodrotowych lub jednostkowych kosztów energii elektrycznej.

2. MINIMALIZACJA KOSZTÓW ENERGII DLA POMPOWNI PIERWSZEGO RODZAJU

2.1. ZAŁOŻENIA I ZALEŻNOŚCI DODATKOWE

Konkretne obliczenia optymalizacyjne dotyczą określonej pompowni, dla której obowiązują różne dodatkowe zależności i ograniczenia.

Dodatkowe zależności podano przykładowo dla pompowni, w której równocześnie może pracować nie więcej niż $m = 3$ różnych pomp. Jest to przypadek występujący w przeważającej liczbie pompowni, równocześnie dogodny do

przejrzystego przedstawienia. Opracowany na tej podstawie algorytm obliczeń oraz program komputerowy można łatwo uogólnić na dowolną liczbę pomp.

Uwzględniając różne możliwe kombinacje pracy poszczególnych pomp w ciągu doby można w danym przypadku napisać następujące zależności dodatkowe:

$$Q_i t_i + Q_{ij} t_{ij} + Q_{123} t_{123} = \sum Q_s \quad (8)$$

$$t_i + t_{ij} + t_{123} \leq 24 \text{ h} \quad (9)$$

$$t_i \geq 0; \quad t_{ij} \geq 0; \quad t_{123} \geq 0 \quad (10)$$

gdzie: $i = 1, 2, 3$ (praca tylko jednej pompy):

$$Q_i = Q_1 = Q_s \text{ lub } Q_i = Q_2 = Q_s \text{ lub } Q_i = Q_3 = Q_s$$

$ij = 12, 23, 13$ (równoczesna praca pompy i oraz $j = 1, 2, 3; j \neq i$):

$$Q_{ij} = Q_1 + Q_2 = Q_s \text{ lub } Q_{ij} = Q_1 + Q_3 = Q_s \text{ lub}$$

$$Q_{ij} = Q_2 + Q_3 = Q_s$$

123 – równoczesna praca wszystkich trzech pomp:

$$Q_{123} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_s$$

Na rysunku 2 pokazano przykładowe charakterystyki $H(Q)$ każdej z pomp P_1, P_2, P_3 pracujących pojedynczo oraz charakterystyki wypadkowe różnych możliwych grup tych pomp, przy prędkościach obrotowych znamionowych i mniejszych od znamionowych. Przecięcie się tych charakterystyk z charakterystyką rurociągu $r = H_{uk}(Q)$ wyznacza poszczególne możliwe punkty pracy W_{ij} układu w zakresie wydajności $Q_{smin} \leq Q_s \leq Q_{smax}$.

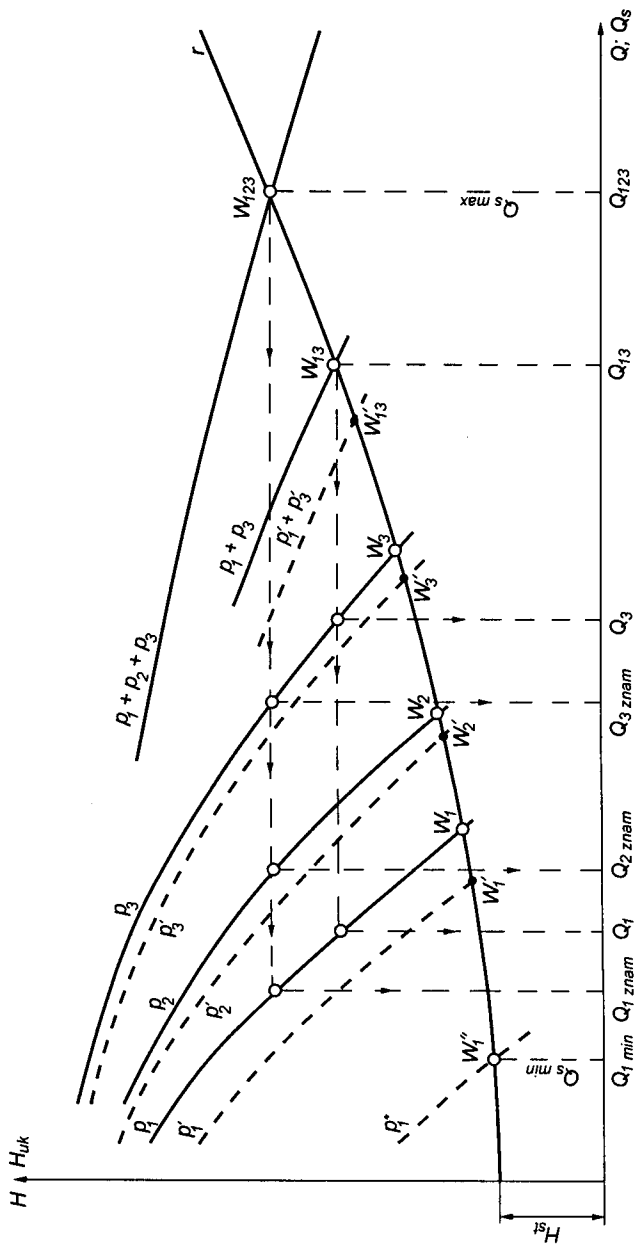
Wydajność każdej pompy powinna być w zasadzie regulowana za pomocą zmian prędkości obrotowej. Stąd, ze względu na wymagania poszczególnych rodzajów napędów zmiennoodrotowych, może być konieczne dodatkowe ograniczenie dotyczące prędkości obrotowych

$$n_i \geq n_{i \min} \quad (11)$$

Można także wprowadzić arbitralne ograniczenie dotyczące najmniejszych, możliwych do przyjęcia sprawności pomp w poszczególnych punktach ich pracy

$$\eta_i \geq \eta_{i \min} \quad (12)$$

Wartość $\sum Q_s$ oraz charakterystyka r rurociągu powinny być wynikiem odpowiednich oszacowań.



Rys. 2. Przypadek trzech różnych pomp w pompowni pierwszego rodzaju (PI) – charakterystyki pojedynczych pomp i różnych możliwych grup tych pomp

2.2. PRZYJĘTA METODA OPTIMALIZACJI ORAZ OBLICZENIA PRZYKŁADOWE

2.2.1. Metoda i przedmiot obliczeń

Ze względu na wcześniejsze negatywne doświadczenia³⁾ zrezygnowano ze stosowania procedur programowania nieliniowego. Zastosowano metodę najprostszą, polegającą na przeliczeniu wszystkich możliwych kombinacji parametrów pracy grupy m pomp; przy rozsądnym stopniowaniu wydajności (np. co $\delta Q = 0,001 Q_s \dots 0,005 Q_s$) można w ten sposób sprowadzić zadanie optymalizacyjne do przeszukania nie więcej niż 50–60 tysięcy różnych wariantów, co przeciętnemu komputerowi PC zajmuje kilka minut.

Przykładowe obliczenia optymalizacyjne wykonano dla pompowni 2 stopnia⁴⁾ z zespołu trzech współpracujących pompowni wodociagowych (rys. 1). Jest to pompownia rodzaju PI, omówiona w poprzedniej pracy [1] w punkcie 2.1.2. Wszystkie zainstalowane w niej pompy są formalnie jednakowe, jednak ich rzeczywiste (zmierzone) charakterystyki są wyraźnie różne. Zadanie potraktowano więc jako minimalizację kosztów energii dla $m = 3$ różnych pomp; czwartą pompę w pompowni przyjęto jako rezerwową. W obliczeniach uwzględniono zmiany sprawności zarówno pompy [5] jak i regulowanych układów napędowych [1] wraz ze zmianami prędkości obrotowych.

Obliczenia wykonano dla różnych wartości $\sum Q_s = 120\,000 \dots 170\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ i dla różnych geometrycznych wysokości podnoszenia H_z w zakresie pokazanym na rys. 1. W obliczeniach końcowych uwzględniono ograniczenia poziomów wody h w zbiorniku 1 oraz dwa różne jednostkowe koszty energii w ciągu doby: $k_{e2}/k_{e1} \approx 2,25$; czas trwania szczytów energetycznych $t_2 = 10 \text{ h}$.

2.2.2. Najważniejsze wyniki obliczeń

A. Dla jednego z wariantów podstawowych, tj. $\sum Q_s = 144\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ i $H_z = 12,1 \text{ m}$ oraz przy założeniu jednakowych w ciągu doby jednostkowych kosztów energii $k_{e1} = k_{e2} = k_{e\text{sr}}$, najmniejszą ilość energii $\sum E_{\text{min}} = 15\,402 \text{ kW}\cdot\text{h}$ zużytej w ciągu doby do napędu pomp otrzymano dla następującego ich zestawu i czasów pracy pomp:

³⁾ W licznych obliczeniach dotyczących optymalizacji energetycznej układów z tarczami odciążającymi w pompach wielostopniowych okazywało się, że poszczególne procedury optymalizacyjne „zaczynały się” na optimumch lokalnych, nie odnajdując istniejącego optimum globalnego [4].

⁴⁾ Pompownia 1 stopnia tłoczy wodę surową z osadników do zespołu obiektów technologicznych stacji uzdatniania wody; jej wpływ na zbiór ograniczeń w rachunku optymalizacyjnym pominięto.

$$Q_1 = 5000 \text{ m}^3/\text{h}; \quad t_1 = 14 \text{ h}$$

$$Q_{12} = Q_1 + Q_2 = 7400 \text{ m}^3/\text{h} \quad (Q_1 = Q_2); \quad t_{12} = 10 \text{ h}$$

Analizując wyniki obliczeń dla poszczególnych możliwych kombinacji parametrów pracy pomp można było łatwo zauważyć, że niektóre pozornie równorzędne warianty pracy wykazują wyraźnie większe zużycie energii, rzędu 1000 a nawet 1500 kW·h (10%) na dobę [6]. Oznacza to różnicę w zużyciu energii rzędu 0,5 mln kW·h/a. Nie ma przy tym wyraźnych przesłanek, które pozwoliłyby obsłudze na intuicyjny dobór najkorzystniejszych wydajności i czasów pracy poszczególnych zestawów pomp.

Dostatecznie uzasadnia to celowość eksploatacji opierającej się na zaproponowanym rachunku optymalizacyjnym.

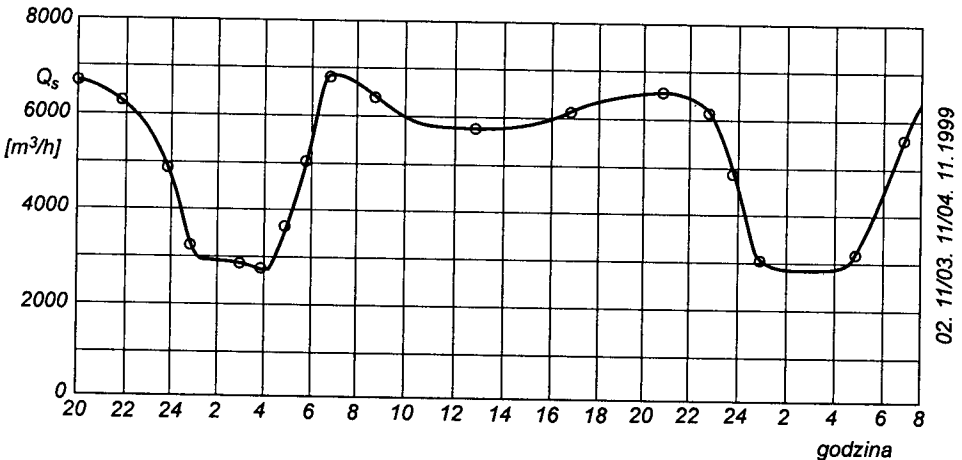
- B. We wszystkich rozpatrywanych wariantach najlepsze wyniki otrzymywano przy pracy co najwyżej 2 pomp (efekt parabolicznej charakterystyki r rurociągu). Płyne stąd wskazanie dla obsługi, aby unikać równoczesnej pracy trzech pomp, gdyż wówczas dobowe zużycie energii będzie na pewno większe niż przy pracy 1 i 2 pomp.
- C. Dla założonych różnych wydajności dobowych pompowni $\sum Q_s$ (w zakresie 120–170 tys. m^3/d) uzyskano niewiele się różniące optymalne wydajności pomp pracujących w różnych zestawach, ale przy bardzo różnych czasach pracy. Intuicyjne oszacowanie wartości tych parametrów przez obsługę pompowni i uzyskanie jej pracy z możliwie małym zużyciem energii jest więc mało prawdopodobne bez dokonania optymalizacji pierwszego rodzaju.
- D. Istotny wpływ na końcowe wyniki obliczeń, tj. $(Q_i, t_i; Q_{ij}, t_{ij})$ ma taryfa energetyczna stosowana w obiekcie pompowni, tzn. czy jest jedna średnia cena jednostkowa energii $k_{e\text{sr}}$ czy różne w ciągu doby ceny k_{e1}, k_{e2} .
- E. Konieczność utrzymywania poziomu wody w zbiorniku 1 w dopuszczalnych granicach silnie wpływa na końcowy wynik obliczeń. Osiągnięcie poziomu maksymalnego h_{max} (któremu odpowiada $H_{z\text{min}} = 8,7 \text{ m}$) tuż przed początkiem szczytu energetycznego wymusza konieczność pracy dwóch, a nie jednej tylko pompy w godzinach szczytu, co powoduje zwiększenie łącznych dobowych kosztów energii.
- F. Z poprzednich wniosków wynika, że są celowe dalsze prace nad opracowaniem programu sterowania pracą pompowni w przypadku wg E), jednak w powiązaniu z pracą pozostałych pompowni i całościową optymalizacją pracy zespołu tych pompowni, z uwzględnieniem również poziomu wody w zbiorniku 2 (rys. 1). Do tego celu potrzebny jest program globalnej optymalizacji prac wszystkich trzech pompowni (PI, PII, PIII) przy losowo zmiennym zapotrzebowaniu $Q_s(t)$. Program taki powinien m.in. przewidywać możliwości odchodzenia od optimum, w przypadku zbliżania się poziomów wody do położenia skrajnych oraz sposoby reagowania na sytuacje

awaryjne. Do opracowania takiego programu należy zmierzać w następnych projektach badawczych zwłaszcza, że mógłby on mieć dużą wartość komercyjną.

3. MINIMALIZACJA ZUŻYCIA ENERGII DLA POMPOWNI DRUGIEGO RODZAJU

3.1. ZAŁOŻENIA I DODATKOWE ZALEŻNOŚCI

Zadanie uzyskania minimalnych kosztów energii podczas eksploatacji m pomp w instalacji drugiego rodzaju jest równoznaczne z minimalizacją sumy chwilowych poborów mocy $P_{el,i}(t)$ przez wszystkie pompy ($i = 1, 2, \dots, m$) przy zmiennej chwilowej wydajności $Q_s(t)$ pompowni. Wydajność $Q_s(t)$ zależy z kolei od stochastycznie zmiennego zapotrzebowania ze strony odbiorców, zwłaszcza przy przetwarzaniu wody (rys. 3).



Rys. 3. Typowy przebieg zmian zapotrzebowania na wodę w ciągu doby w jednej z miejskich sieci wodociągowych

Zadanie powyższe jest formalnie zapisane równaniami (6), (7), (2).

W przypadku pompowni drugiego rodzaju nie występują zbiorniki buforowe, jakie były umiejscowione za pompownią pierwszego rodzaju. Nie można pompować medium „na zapas” ani też przez pewien czas nie pompować w ogóle, gdyż zapotrzebowanie nie spada do zera, nawet chwilowo. Zatem jedyną możliwością uzyskania oszczędności energii jest minimalizacja strat występujących w procesach regulacji wydajności poszczególnych pomp.

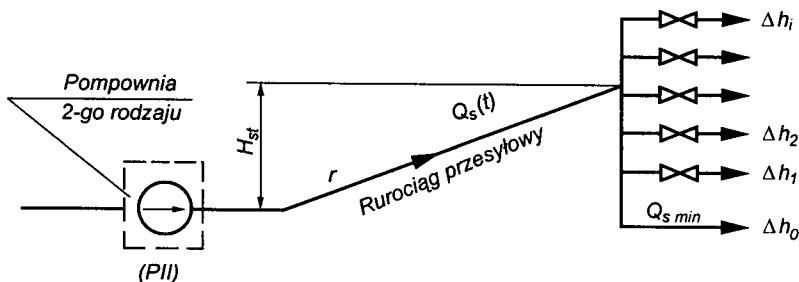
Zadanie zapisane równaniem (6) jest zagadnieniem bieżącej optymalizacji procesu regulacji wydajności grupy pomp, dokonywanej w czasie rzeczywistym.

Ze względu na wymagania regulowanych napędów zmiennoodrotowych potrzebne jest – analogicznie jak w przypadku pompowni pierwszego rodzaju – ograniczenie (11) dotyczące minimalnych wartości prędkości obrotowych, tj. $n_i \geq n_{i \min}$. Może ponadto być celowe wprowadzenie ograniczenia (12) dotyczącego najmniejszych dopuszczalnych wartości sprawności pomp, tj. $\eta_i \geq \eta_{i \min}$, i/lub (13) – dotyczącego całych zespołów pompowych

$$\eta_{z,i} = \eta_i \eta_{ur,i} \eta_{s,i} \geq \eta_{z,i \min} \quad (13)$$

Należy zauważyć, że inna – niż w przypadku pompowni pierwszego rodzaju – jest charakterystyka układu $H'_{uk}(Q_s)$. Oprócz rurociągu przesyłowego r układ ten zawiera przede wszystkim sieć bardzo różnie usytuowanych odbiorników, połączonych równolegle, włączających się niezależnie od siebie.

Sieć odbiorników, pokazana na rysunku 4, jest najprostsza z możliwych. Rzeczywiste sieci wodociągowe są znacznie bardziej złożone, ale dla każdego konkretnego przypadku można wyznaczyć ich charakterystyki, posługując się klasycznymi metodami obliczeniowymi lub korzystając z dostępnych, komercyjnych programów komputerowych. Stąd też w dalszych rozważaniach przyjmuje się, że charakterystyka $H'_{uk}(Q_s)$ jest znana.



Rys. 4. Układ pompowy złożony z pompowni PII, rurociągu przesyłowego r i rozgałęzionej sieci odbiorników

Można wyróżnić następujące szczególne przypadki równoległej pracy pomp w przepompowni:

- równocześnie pracuje m jednakowych pomp, wszystkie z regulacją prędkości obrotowej
- równocześnie pracuje m różnych pomp, wszystkie z regulacją prędkości obrotowej
- równocześnie pracuje m różnych pomp, z których część wyposażona jest w napędy zmiennoodrotowe.

Należy oczywiście uwzględnić możliwość zmniejszenia liczby pracujących pomp z m do $m - 1$, $m - 2$, ..., przez wyłączenie poszczególnych pomp, przy odpowiednio dużym spadku zapotrzebowania na medium pompowane.

3.2. RÓWNOLEGLA WSPÓLPRACA m RÓŻNYCH POMP Z REGULACJĄ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ

Podobnie jak dla instalacji pierwszego rodzaju, dalsze rozważania dotyczą przypadku $m = 3$ różnych pomp; można je łatwo uogólnić na dowolne $m > 3$.

Rozpatrywane zadanie można sformułować następująco:

W chwili t_1 instalacja, np. pompownia pracuje z wydajnością Q_{s1} wynikającą z zapotrzebowania (rys. 3). Wszystkie pompy pracują z określonymi początkowymi prędkościami obrotowymi n_{i1} i wydajnościami Q_{i1} :

$$\begin{aligned} \text{pompa } p_1 & - n_1 = n_{11} & Q_1 & = Q_{11} \\ \text{pompa } p_2 & - n_2 = n_{21} & Q_2 & = Q_{21} \\ \text{pompa } p_3 & - n_3 = n_{31} & Q_3 & = Q_{31} \end{aligned} \quad (14)$$

przy czym

$$Q_{s1} = Q_{11} + Q_{21} + Q_{31} \quad (15)$$

Spełniony jest warunek (6) optymalnej pracy pompowni.

Po upływie czasu Δt , tj. w chwili $t_2 = t_1 + \Delta t$, zapotrzebowanie zmniejszyło się z Q_{s1} do Q_{s2} ⁵⁾ równego (rys. 5)

$$Q_{s2} = Q_{s1} - \Delta Q_s \quad (16)$$

Należy znaleźć takie nowe prędkości obrotowe n_{i2} (n_{12} , n_{22} , n_{32}) poszczególnych pomp, przy których łączny pobór mocy będzie najmniejszy, tzn. że w dalszym ciągu spełniony będzie warunek (6). Powinien być spełniony warunek bilansowy

$$Q_{s2} = Q_{12} + Q_{22} + Q_{32} \quad (17)$$

Podobnie jak poprzednio zastosowano procedurę optymalizacyjną polegającą na przeliczeniu wszystkich możliwych kombinacji parametrów pracy pomp, przy kolejnych wydajnościach obliczeniowych różniących się o δQ . Wartość δQ przyjęto przed rozpoczęciem obliczeń, odpowiednio do założonego odstepu czasowego Δt , przewidywanych wartości Q_{s1} i ΔQ_s jak również spodziewanych szybkości zmian dQ_s/dt . Aby nie wydłużać niepotrzebnie czasu obliczeń założono, że największa zmiana wydajności $Q_{i2} = Q_{i1} + \Delta Q_i$ poszczególnych pomp nie powinna być większa od zmiany ΔQ_s wydajności pompowni:

$$|\Delta Q_i| \leq |\Delta Q_s| \quad (18)$$

⁵⁾ Nie oznacza to skokowej zmiany zapotrzebowania $Q_s(t)$, lecz tylko uwzględnia fakt, że poszczególne parametry pracy pompowni mogą być mierzone, rejestrowane i przekazywane do komputera sterującego w odstępach czasowych Δt , np. co 30 s lub co 60 s.

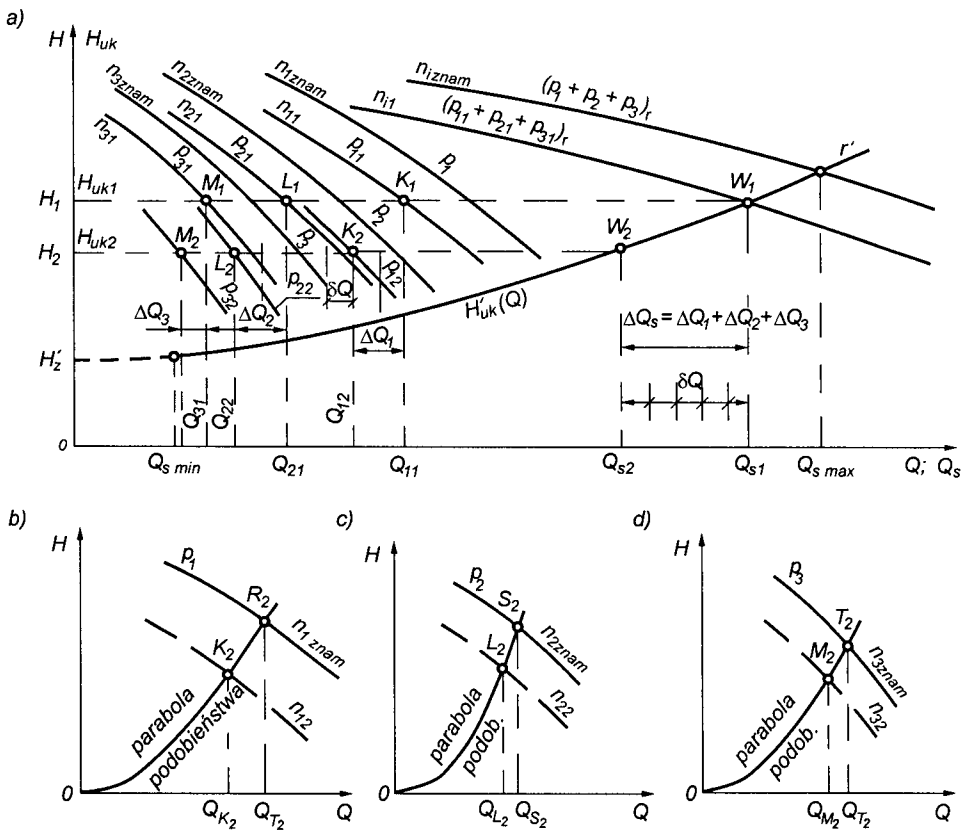
Poszczególne wartości n_{i2} najprościej jest wyznaczać odnosząc się zawsze do tej samej charakterystyki $H_i = f_i(Q)$ dla $n_i = n_{i\text{znam}}$ oraz stosując zależność wynikającą z podobieństwa przepływów w pompach. Tak np. dla $i = 1$ (rys. 5b):

$$n_{12} = n_{1\text{znam}} \frac{Q_{K_2}}{Q_{R_2}} \quad (19)$$

Sprawność pompy w nowym punkcie pracy K_2 można obliczyć z wzoru empirycznego, ważnego dla $n_{i2}/n_{i1} \geq 0,5$ [5]

$$\eta_{K_2} = \eta_{R_2} \left(\frac{n_{12}}{n_{1\text{znam}}} \right)^{0,09} \quad (20)$$

i analogicznie dla nowych prędkości obrotowych n_{22} i n_{32} .



Rys. 5. Zmniejszenie zapotrzebowania o ΔQ_s w przypadku równoległej współpracy $m = 3$ różnych pomp

Przykładową symulację wykonano dla pompowni PII przedstawionej w poprzedniej pracy [1] (punkt 2.1.3) i przebiegu $Q_s(t)$ wg rys. 3. Pompownia współpracuje bezpośrednio z siecią wodociagową (brak długiego rurociągu przesyłowego), toteż jako charakterystykę układu można przyjąć linię prostą: $H_{uk1} = 57$ m (w dzień) i $H_{uk2} = 52$ m (w nocy).

Porównanie regulacji energooszczędnej (w danym przypadku obie pompy z regulacją zmiennobrotową) z regulacją stosowaną aktualnie (jedna pompa regulowana za pośrednictwem układu kaskadowego, druga zaś dławieniowo, przy utrzymywaniu jednakowych wydajności obu pomp) wykazało, że dobowe zużycie energii można zmniejszyć o ponad 30% [6]. Część oszczędności wynika oczywiście z zastąpienia regulacji dławieniowej przez zmiennobrotową, ale pozostała znaczna część – wiąże się właśnie z zastosowaniem omówionej wyżej bieżącej optymalizacji procesu regulacji.

4. PODSUMOWANIE

1. Zastosowanie metod optymalnego sterowania (w przypadku pompowni PI) i optymalnej bieżącej regulacji (w przypadku pompowni PII) może przynieść dodatkowe, znaczne oszczędności energii elektrycznej, niezależnie od oszczędności uzyskanych w rezultacie optymalnego doboru pomp do instalacji.
2. Celowe jest wdrażanie przedstawionych metod nie tylko w pompowniach komunalnych, lecz także w innych gałęziach gospodarki narodowej (energetyka, wybrane instalacje przemysłowe, transport hydrauliczny paliw).
3. Wskazana wydaje się kontynuacja i rozszerzenie przedstawionych w pracy zagadnień na globalną optymalizację pracy zespołu kilku pompowni PI i PII, z uwzględnieniem dopuszczalnych poziomów wody w zbiornikach wyrównawczych, zmiennych w ciągu doby, a także w dłuższych okresach, jednostkowych kosztów energii oraz innych warunków dodatkowych.

Bibliografia

- [1] Jędral W.: Ocena i racjonalny dobór pomp w gospodarce komunalnej. Biuletyn Instytutu Techniki Ciepłej nr 88 (numer bieżący).
- [2] Zmniejszenie zużycia energii do napędu pomp w gospodarce narodowej przez opracowanie i wdrożenie metod optymalnego doboru i regulacji grupy pomp w dowolnie złożonych układach i instalacjach. Sprawozdanie z projektu badawczego nr 7T07B 032 12 (grant KBN). Warszawa 1999, maszynopis.

- [3] Górzyński J.: Auditing energetyczny. Warszawa 1999, Wydawnictwo Fundacji Poszanowania Energii.
- [4] Jędral W.: Metody obliczania sił wzdłużnych i układów odciążających w pompach wirowych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Mechanika, z. 110, OWPW, Warszawa 1998.
- [5] Jędral W.: Zmiana sprawności pompy przy zmianie jej prędkości obrotowej. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Mechanika, z. 181, OWPW, Warszawa 1999, s. 119–124.
- [6] Ahmad S.H.: Metoda optymalnego doboru i zmniejszenia kosztów eksploatacji pomp w przepompowniach. Praca doktorska 2000, Politechnika Warszawska.

ENERGY – SAVING METHODS IN THE OPERATION OF PUMPS IN MUNICIPAL PUMPING STATIONS

Summary

The paper presents two methods for the optimum flow-rate control of pumps in different pumping stations with regard to minimum energy consumption and/or its cost. The application of these methods can significantly decrease the operation costs in pumping stations and other pumping installations.