

Waldemar Jędral

Instytut Techniki Ciepłej

OCENA AKTUALNEGO STANU ORAZ WARUNKI WPROWADZANIA REGULACJI POMP SIECIOWYCH W KRAJOWYCH ELEKTROCIĘPŁOWNIACH I CIEPŁOWNIACH

Wprowadzenie w elektrociepłowniach i ciepłowniach regulacji parametrów pracy pomp sieciowych przez zmianę ich prędkości obrotowej powinno być poprzedzone głęboką analizą techniczną i ekonomiczną. Brak jest jednak materiałów umożliwiających dokonywanie takich analiz. Prezentowany cykl trzech artykułów przedstawia racjonalną metodykę wprowadzania regulacji zmiennoodrotowej, z równoczesną modernizacją pomp i ich instalacji. Adresowany jest zwłaszcza do pracowników biur projektowych, służb technicznych obiektów ciepłowniczych oraz pracowników przedsiębiorstw energetyki ciepłej.

Pierwszy artykuł z tego cyklu przedstawia krytyczną analizę stanu wprowadzania regulacji zmiennoodrotowej w krajowych elektrociepłowniach i ciepłowniach oraz podaje ogólne warunki racjonalnego wprowadzania energooszczędnej regulacji parametrów pomp sieciowych.

OZNACZENIA

- g [m/s²] – przyspieszenie ziemskie
- G_s [kg/h] – masowe natężenie przepływu wody sieciowej; $G_s = \rho Q_s$
- H [m] – wysokość podnoszenia pompy
- H_{EC} [m] – wysokość podnoszenia układu: pompy + sieć wewnętrzna, mierzona na przyłączach EC (CM)
- $H_{m.s.c.}$ [m] – wysokość podnoszenia wymagana przez m.s.c., mierzona na przyłączach EC (CM)
- H_{st} [m] – statyczna wysokość podnoszenia układu pompowego
- H_{uk} [m] – wysokość podnoszenia dla dowolnego układu pompowego (instalacji pompowej), np. instalacji wewnętrznej w CM
- ΔH_s [m] – wysokość ciśnienia dyspozycyjnego (różnicy ciśnień na przyłączach); $\Delta H_s = (p_z - p_p) / \rho g$

- Δh [m] – opory przepływu w elemencie, rurociągu lub sieci rurociągów jako funkcja natężenia przepływu
 n [obr/min] – prędkość obrotowa (ogólnie); prędkość obrotowa pompy
 p [MPa] – ciśnienie
 Δp_s [MPa] – ciśnienie dyspozycyjne (różnica ciśnień na przyłączach);
 $\Delta p_s = p_z - p_p$
 Q [m³/h] – wydajność pompy; natężenie przepływu (strumień) w dowolnym miejscu instalacji
 Q_s [m³/h] – strumień wody sieciowej, mierzony na wyjściu z EC (CM)
 T [°C] – temperatura
 ρ [kg/m³] – gęstość wody sieciowej

Indeksy

- EC – dotyczy elektrociepłowni lub ciepłowni miejskiej
 m.s.c. – dotyczy miejskiej sieci ciepłowniczej
 o – dotyczy otoczenia
 p – dotyczy powrotu z m.s.c.
 z – dotyczy zasilania m.s.c.
 znam – dotyczy wielkości znamionowej (umieszczonej na tabliczce znamionowej)

Skróty stosowane w tekście

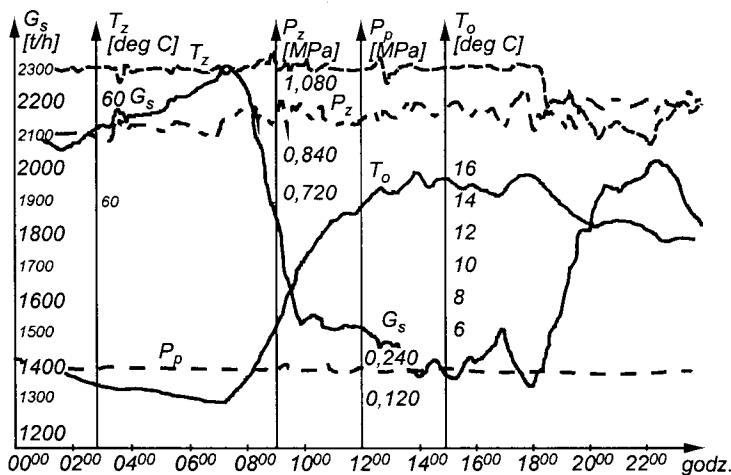
- CM – ciepłownia miejska
 EC – elektrociepłownia
 m.s.c. – miejska sieć ciepłownicza
 PEC – przedsiębiorstwo energetyki ciepłej

WSTĘP

W wyniku powszechnego wprowadzania regulacji pogodowej zmieniają się wymagania ze strony miejskich sieci ciepłowniczych (m.s.c.). Postępująca automatyzacja węzłów ciepłowniczych powoduje znaczne wahania strumienia Q_s wody płynącej w m.s.c. Zmiany Q_s są przy tym stosunkowo szybkie (rys. 1), powodując konieczność wprowadzenia regulacji strumienia Q_s (regulacja ilościowa) jako uzupełnienie dotychczas stosowanej, stosunkowo wolnej regulacji jej temperatury T_z ¹⁾ (regulacja jakościowa). Regulację taką zaczęto od kilku lat wprowadzać w niektórych krajowych elektrociepłowniach (EC)

¹⁾ Ścisłej: sterowania ilości ciepła temperaturą T_z wg uzgodnionej między EC i PEC zależności $T_z = f(T_o)$ zmian temperatury wody sieciowej od temperatury otoczenia T_o .

i ciepłowniach miejskich (CM), instalując napędy pomp sieciowych o zmiennej prędkości obrotowej. Wybór rodzaju napędu zmiennoodrotowego jest jednak dotychczas wynikiem znajomości zagadnienia i przyzwyczajień projektantów wykonujących projekty modernizacji i/lub siły przebicia na lokalnych rynkach przedstawiciele firm produkujących układy napędowe różnych typów, nie zaś odpowiedniej analizy technicznej i ekonomicznej.



Rys. 1. Przykład zmian parametrów wody sieciowej w jednej z miejskich sieci ciepłowniczych, spowodowanych szybką zmianą temperatury otoczenia T_o (koniec marca 1998 r.)

Przed wyborem sposobu realizacji zmian prędkości obrotowej pomp i zakupem odpowiednich regulowanych układów napędowych należy dokonać szczegółowej analizy:

- warunków pracy wewnętrznej instalacji wody sieciowej w EC lub CM,
- rzeczywistych potrzeb ze strony m.s.c., zarówno obecnych jak i perspektywicznych,
- stopnia dostosowania pomp sieciowych do obu powyższych instalacji oraz możliwości poprawy tego dostosowania,
- wszelkich innych warunków brzegowych związanych z EC i m.s.c.

Dopiero po wykonaniu odpowiednich prac i zabiegów modernizacyjnych, będących wynikiem wymienionych analiz, powinien nastąpić wybór optymalnego układu regulacyjnego, umożliwiającego osiągnięcie niskich kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Końcowym efektem powinno być uzyskanie oszczędności energii zużywanej do napędu pomp sieciowych w EC, sięgających 600–1000 mln kWh w skali całego kraju oraz równie dużych oszczędności w ciepłowniach miejskich.

Zadanie powyższe było rozpatrywane dotąd tylko w odniesieniu do ciepłowni miejskich [1, 2]; przy tym nie uwzględniano wpływu różnicy kształtu rzeczywistej charakterystyki m.s.c. w porównaniu z charakterystyką dotychczas

przyjmowaną. Sieć wewnętrzna w EC różni się znacznie od sieci w ciepłowni, jest przy tym o wiele bardziej złożona. Stąd inny powinien być zarówno sposób jak i wynik analizy zagadnień wymienionych powyżej.

Jednym z powodów dotychczasowego sposobu wprowadzania regulacji zmiennoobrotowej jest brak literatury ujmującej całościowo zagadnienie doboru napędu oraz podającej odpowiednie metody postępowania i kryteria oceny różnych wariantów rozwiązań. Publikacje dotyczące powyższego tematu są ilościowo skromne i rozproszone po trudno dostępnych na ogół wydawnictwach; nie ma też jak dotąd żadnego opracowania monograficznego.

W pracach [1, 2] poruszono zagadnienia związane z regulacją parametrów wody sieciowej w CM. Omówiono sposoby zmniejszenia strat hydraulicznych wewnątrz ciepłowni, zwłaszcza przez likwidację dławienia w obiegach zimnego i gorącego zmieszania oraz sposoby poprawy dostosowania pomp sieciowych do instalacji wewnętrznych. Podkreślono konieczność rezygnacji w większości przypadków z regulacji dławieniowej i przejścia na regulację zmiennoobrotową. W pracy [3] podano sposób oszacowania stopnia zmniejszenia mocy na wale pompy regulowanej przez zmianę prędkości obrotowej w porównaniu z regulacją dławieniową, dla charakterystyk pompy $H(Q)$ i instalacji $H_{uk}(Q)$ o różnych stopniach stromości. W pracy [4] porównano różne napędy zmiennoobrotowe, szczegółowo omawiając ich wady i zalety eksploatacyjne oraz oceniono straty energii w poszczególnych rozwiązaniach. W pracach [5, 6] porównano pod względem energetycznym różne sposoby realizacji zmian prędkości obrotowej, dla $n/n_{znam} = 0,5...1,0$, pomp sieciowych o mocy silnika 800 kW, zainstalowanych w jednej z ciepłowni komunalnych. Podano szczegółowe informacje dotyczące zmian sprawności silnika elektrycznego w funkcji zmian prędkości obrotowej i obciążenia. W pracach [7, 8] omówiono różne czynniki wpływające na wybór sposobu regulacji pomp wskazując takie przypadki, w których instalowanie napędów zmiennoobrotowych może nie przynieść oczekiwanych korzyści. W pracach [5, 6, 7, 8] wskazano także problemy, które mogą się pojawić wówczas, gdy nie wszystkie z grupy pomp współpracujących równolegle mają napędy zmiennoobrotowe.

Z powyższego krótkiego przeglądu wynika, że poszczególne pozycje literatury omawiają zadanie sformułowane powyżej bardzo wycinkowo, w szczególności zupełnie pomijając wpływ charakterystyki m.s.c. na wybór rozwiązania optymalnego.

Cykl trzech publikacji, zamieszczonych w niniejszym zeszycie Biuletynu ITC PW, stanowi znaczne rozwinięcie i uzupełnienie prac [9, 10]. Przedstawiono w nim propozycję ogólnej metody postępowania podczas wprowadzania ekonomicznej regulacji wydajności pomp sieciowych, zwłaszcza w elektrociepłowniach (EC), ale również w ciepłowniach miejskich (CM). Jej celem jest znalezienie rozwiązania najkorzystniejszego pod względem łącznych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, przy uwzględnieniu całkowitej sprawności regulowanego układu napędowego, charakterystyki hydraulicznej całej instalacji

wody sieciowej wewnątrz obiektu energetycznego oraz charakterystyki miejskiej sieci ciepłowniczej. Podkreślając znaczny wpływ tej ostatniej wskazano na konieczność negocjowania z przedsiębiorstwami energetyki ciepłej (PEC) charakterystyki $H_{m.s.c.}(Q_s)$ jak najbardziej zbliżonej do paraboli $H_{m.s.c.} = aQ_s^2$.

Jest oczywiste, że najmniejsze zużycie paliwa i energii elektrycznej do wyprodukowania i przesłania do m.s.c. określonej ilości energii ciepłej można uzyskać dopiero w wyniku równoczesnego optymalizowania procesów regulacji parametrów cieplnych (temperatury T_z , T_p) i hydraulicznych (strumień Q_s , różnica ciśnień Δp_s) wody sieciowej „na zaciskach” EC lub CM, skoordynowanego z regulacją pogodową w węzłach ciepłowniczych. Aby jednak osiągnąć w przyszłości ten cel należy przedtem rozwiązać szereg zagadnień cząstkowych wymienionych wyżej. Omówienie i analiza tych zagadnień jest treścią trzech prezentowanych prac, stanowiących w zamierzeniu autora pewną zamkniętą całość.

1. AKTUALNY STAN WPROWADZANIA REGULACJI ZMIENNOOBROTOWEJ W EC I CM

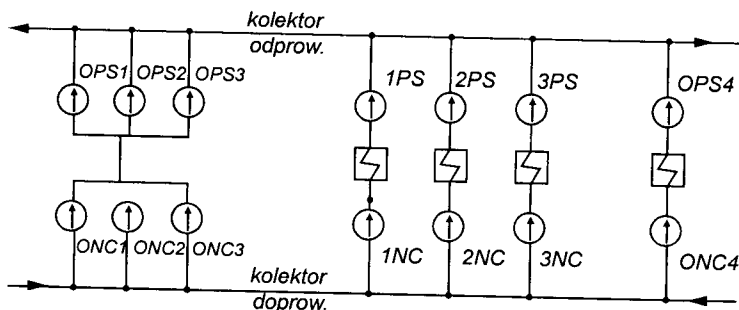
1.1. ROZPOZNANIE SYTUACJI W WYBRANYCH OBIEKTACH ENERGETYCZNYCH

W ramach różnych prac, wykonanych głównie na podstawie zleceń z zakładów energetyki ciepłej, przeprowadzono wizje lokalne w poszczególnych obiektach i na podstawie zebranych obszernych informacji technicznych wykonano analizy dotyczące doboru pomp do aktualnie panujących warunków pracy. Następnie dokonano oceny proponowanych przez różne biura projektów rozwiązań mających na celu wprowadzenie bardziej ekonomicznych niż dotychczas sposobów regulacji parametrów pracy pomp. Niżej omówiono stan istniejący w poszczególnych obiektach, rozwiązania proponowane przez biura projektów oraz propozycje rozwiązań bardziej racjonalnych. Nazwy poszczególnych obiektów nie mają żadnego znaczenia dla analizy, toteż nie podano ich, oznaczając obiekty cyframi.

1.1.1. Elektrociepłownia 1

W obiegu wewnętrznym wody sieciowej zainstalowanych jest łącznie 14 pomp sieciowych w układzie blokowo-kolektorowym, co przedstawiono schematycznie na rys. 2. Na rysunku pokazano tylko pompy i pojedyncze wymienniki (między pompami wstępnymi i głównymi) pomijając inne elementy hydrauliczne. Wszystkie te elementy wraz z rurociągami tworzą złożony układ prze-

strzenny. 6 pomp spośród ww. pomp sieciowych, tj. pompy oznaczone jako NC 1, 2, 3; PS 1, 2, 3 są to pompy dwustrumieniowe 40B80 o parametrach znamionowych $Q_{\text{znam}} = 3100 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{\text{znam}} = 80 \text{ m}$, $P_{\text{znam}} = 1000 \text{ kW}$. Pozostałych 8 pomp, oznaczonych jako ONC 1, 2, 3, 4; OPS 1, 2, 3, 4 – to pompy dwustrumieniowe 30B50, o parametrach znamionowych $Q_{\text{znam}} = 1800 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{\text{znam}} = 80 \text{ m}$, $P_{\text{znam}} = 630 \text{ kW}$. Łącznie moc zainstalowana pomp wynosi $\Sigma P_{\text{znam}} = 11\,040 \text{ kW}$.



Rys. 2. Schemat połączeń grupy pomp sieciowych w EC 1

W bilansie nie uwzględniono pomp przewałowych ONP 3, 4 o parametrach $Q_{\text{znam}} = 1800 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{\text{znam}} = 30 \text{ m}$, napędzanych silnikami o znacznie mniejszych mocach niż pompy sieciowe, pracujących zaś tylko wtedy, gdy pracują kotły wodne.

Przewidywany w najbliższych latach zakres zmienności strumienia wody sieciowej wynosi

$$Q_s = 5500 \dots 8000 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (sezon zimowy)}$$

przy stałym ciśnieniu dyspozycyjnym Δp_s , a stąd – stałej wysokości podnoszenia mierzonej na przyłączy EC

$$H_{\text{uk}} = \Delta H_s = \Delta p_s / (\rho g) = 85 \text{ m}$$

Do chwili obecnej jedyną formą regulacji strumienia Q_s wody sieciowej jest regulacja dławieniowa dokonywana zaworami w rurociągach tłocznych pomp lub w kolektorach zbiorczych.

W opracowaniu [11] Biuro Projektów A²⁾ zaproponowało wprowadzenie regulacji zmiennoobrotowej przez zabudowanie między pompami a ich silnikami napędowymi sprzęgieł hydrokinetycznych. Opracowanie zawiera propozycje rozwiązań w kilku wariantach w tym – zainstalowanie sprzęgieł hydrokine-

²⁾ Celem niniejszej pracy nie było wskazanie i krytyka konkretnych biur projektów, lecz zasygnalizowanie daleko posuniętej rutyny w ich działaniu, wspólnej wszystkim tym instytucjom. Dlatego nazwy tych biur zastąpiono literami A, B, C.

tycznych we wszystkich pompach NC i PS. Wariant rekomendowany, to zainstalowanie sprzęgieł hydrokinetycznych w 3 pompach sieciowych wstępnych NC 1, 2, 3. Wg autorów opracowania [11] zrealizowanie tego wariantu przyniesie roczne oszczędności energii rzędu 3,5 mln kWh.

Do zaproponowanych rozwiązań można mieć szereg istotnych zastrzeżeń:

- W opracowaniu [11] zastosowano niewłaściwą metodę odrębnego wyznaczenia charakterystyki wypadkowej pomp i niezależnie – wypadkowej charakterystyki sieci wewnętrznej EC, prowadzącą do wyników obciążonych znacznymi błędami.
- Oparto się na fabrycznych charakterystykach pomp sprzed wielu lat i charakterystykach rurociągów oszacowanych na podstawie mało dokładnych danych projektowych.
- Wyboru sposobu regulacji – przez zastosowanie sprzęgieł hydrokinetycznych – dokonano arbitralnie, bez uwzględnienia możliwości zainstalowania innych napędów regulowanych i bez przeprowadzenia rachunku ekonomicznego porównującego łączne koszty wszystkich możliwych sposobów. Rozwiązanie także było uzasadnione 40 i więcej lat temu, kiedy to projektowano większość obecnie pracujących elektrociepłowni i kiedy praktycznie nie istniały żadne inne konkurencyjne rozwiązania.
- W bardzo uproszczonej analizie poprzedzającej wybór sposobu regulacji nie uwzględniono wpływu rzeczywistej, parabolicznej charakterystyki m.s.c., jaką w najbliższych latach powinno się uzgadniać z PEC.
- Niewłaściwe jest etapowe, stopniowe instalowanie napędów regulowanych w kolejnych pompach. Ze względu na „rozchodzenie się” charakterystyk pomp regulowanych i nie regulowanych i negatywne konsekwencje tego faktu [7] należy od razu, jednoetapowo zainstalować regulowane układy napędowe we wszystkich przewidzianych do tego pompach.
- Zastrzeżenia można mieć także do wyboru pomp regulowanych (wstępne NC, zamiast głównych PS).

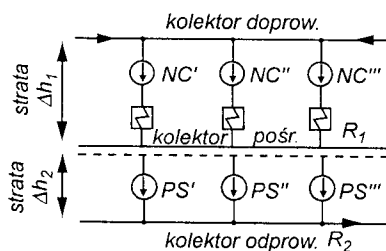
Uwzględniając reguły postępowania podane i uzasadnione w rozdz. 2, 3 oraz w dwóch następnych pracach niniejszego cyklu należało w danym przypadku:

- wyznaczyć na podstawie pomiarów rzeczywiste charakterystyki pomp i rurociągów,
- ocenić jakość doboru pomp do instalacji i ewentualnie dokonać korekty tego doboru oraz modernizacji pomp,
- wyznaczyć możliwie dokładnie rzeczywistą charakterystykę $H_{EC}(Q_s)$ systemu: pompy sieciowe + sieć wewnętrzna EC, wynegocjować z PEC charakterystykę $\Delta H_s(Q_s)$ dla m.s.c. możliwie zbliżoną do rzeczywistej charakterystyki parabolicznej oraz przewidywany zakres zmienności strumienia Q_s wody sieciowej,
- obliczyć dla każdego z możliwych rozwiązań łączne koszty inwestycyjne i eksploatacyjne (ew. okres zwrotu nakładów inwestycyjnych) i wybrać rozwiązanie najbardziej ekonomiczne.

Nawet bez wykonywania szczegółowej analizy można przypuszczać, że w przypadku EC 1 znacznie lepsze od sprzęgieł hydrokinetycznych byłyby pod względem ekonomicznym tyrystorowe układy napędowe w typie kaskady podsynchronicznej, zaś uzyskane dzięki ich zainstalowaniu oszczędności energii mogłyby wynieść co najmniej 5–6 mln kWh rocznie.

1.1.2. Elektrociepłownia 2

Pompy sieciowe w EC 2 zainstalowane są w nieco innym układzie niż na rys. 2. Pompy wstępne ONC i/lub NC współpracując równolegle tłoczą wodę na wspólny kolektor, skąd pobierają je również współpracujące pompy główne OPS i/lub PS i tłoczą na kolektor odprowadzający (rys. 3).



Rys. 3. Uproszczony schemat części układu pomp sieciowych w EC 2

W układzie wody sieciowej zainstalowano 8 pomp wstępnych oznaczonych jako ONC 1...ONC 5, 3 NC, 4 NC, 5 NC. Są to pompy dwustrumieniowe 40B75 i 40B80 o średnich parametrach znamionowych: $Q_{\text{znam}} = 3050 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{\text{znam}} = 81 \text{ m}$, z silnikami napędowymi o mocach 790...920 kW.

Zainstalowano ponadto 8 pomp głównych oznaczonych jako OPS 1...OPS 5, 3 PS, 4 PS, 5 PS. Są to pompy dwustrumieniowe 40B61 o parametrach znamionowych: $Q_{\text{znam}} = 3050\text{--}3000 \text{ m}^3/\text{h}$ i $H_{\text{znam}} = 100\text{--}120 \text{ m}$, z silnikami napędowymi 1250 kW. Łączna moc zainstalowana wszystkich 16 pomp wynosi 17 040 kW.

Zakres zmienności strumienia wody sieciowej jest sprecyzowany niezbyt jasno:

- wg autorów opracowania [12] ma być docelowo w sezonie zimowym

$$Q_s \approx 4000\text{--}11\,800 \text{ m}^3/\text{h} \quad (34\text{--}100\%)$$

przy temperaturach $T_o \leq +6^\circ\text{C}$;

- wg GPEC ([12], zał. 1)

$$Q_s \approx 6150\text{--}11\,350 \text{ m}^3/\text{h} \quad (54\text{--}100\%)$$

- wg wybranych wrywkowo informacji z okresu XII–98/II–99

$$Q_s = 10\,850\text{--}12\,920 \text{ m}^3/\text{h} \quad (84\text{--}100\%)$$

Ciśnienie dyspozycyjne Δp_s jest zgodnie z umową z miejscowym PEC stałe; można na podstawie jego wartości obliczyć

$$H_{uk} = \Delta H_s = 85 \text{ m} = \text{const}$$

W opracowaniu [12] Biuro Projektów B zaproponowało wprowadzenie docelowo regulacji zmiennoobrotowej za pomocą sprzęgieł hydrokinetycznych, łącznie dla wskazanych 6 spośród 16 pomp sieciowych wymienionych powyżej.

Aktualnie w sezonie zimowym pracuje zwykle 6 pomp sieciowych (3 wstępne + 3 główne), zaś przy najniższych temperaturach – 7 pomp (3 wstępne i 4 główne), przy bardzo różnych konfiguracjach. Stąd w przypadku zrealizowania ww. propozycji albo pompy z napędami zmiennoobrotowymi będą eksploatowane w sposób ciągły (pozostałe pompy byłyby niewykorzystane), albo realizowana będzie współpraca pomp regulowanych i nieregulowanych z niekorzystnymi skutkami tego rozwiązania.

W opracowaniu [12] nie obliczono efektów ekonomicznych wprowadzenia regulacji zmiennoobrotowej za pomocą sprzęgieł i w proponowanym zakresie.

Zastrzeżenia dotyczące rozwiązania proponowanego w opracowaniu [12] są dokładnie także same, jak w przypadku projektu rozwiązania dla EC 1.

Sposób dojścia do najlepszego rozwiązania jest taki sam, jak w punkcie 1.1.1. Szczególny nacisk należy w danym przypadku położyć na poprawę dostosowania pomp do instalacji. Należy także dokonać modernizacji poszczególnych elementów wewnętrznej instalacji wody sieciowej w celu zmniejszenia strat ciśnienia w tej instalacji.

Również w danym przypadku znacznie bardziej celowe wydaje się zastosowanie układów kaskady podsynchronicznej zamiast sprzęgieł hydrokinetycznych. Decydować jednak powinien rachunek ekonomiczny, zaś warunkiem poprawności wniosków jest bardziej precyzyjne ustalenie spodziewanego zakresu zmian strumienia Q_s wody sieciowej oraz uzgodnienie charakterystyki m.s.c. bardziej racjonalnej, od aktualnie przyjętej: $H_{\text{m.s.c.}}(Q_s) = 85 \text{ m} = \text{const}$.

1.1.3. Elektrociepłownia 3

Wewnętrzna instalacja wody sieciowej w EC 3 jest bardzo skomplikowana, m.in. ze względu na jej stopniowe powstawanie w ciągu wielu lat przez dobudowywanie kolejnych obiektów. W instalacji tej znajduje się 55 różnych pomp o łącznej mocy 36 120 kW. Elektrociepłownia składa się zasadniczo z części kolektorowej (uruchomionej w 1962 r.) i części blokowej (uruchomionej w latach siedemdziesiątych). Łączny zakładany przepływ wody sieciowej w sezonie grzewczym (wg opracowania [13]):

- w najbliższej przyszłości $G_s = 19\,600 \dots 28\,000 \text{ t/h}$ (zakres zmienności 70–100%),
- w dalszej przyszłości $G_s = 8\,400 \dots 28\,000 \text{ t/h}$ (zakres zmienności 30–100%).

Z tego w części kolektorowej maksymalny przepływ wg [13] ma wynieść $G_{kol\ max} \approx 9900\ t/h$.

Wszystkie 9 głównych pomp sieciowych w części blokowej EC (łącznie jest tam 18 pomp sieciowych o sumarycznej mocy napędów 19 580 kW) od początku wyposażono w regulację prędkości obrotowej za pomocą sprzęgieł hydrokinetycznych, natomiast pompy w części kolektorowej są nieregulowane. Dalsze uwagi dotyczą więc tylko części kolektorowej EC 3.

W części kolektorowej znajduje się 5 pomp wstępnych, oznaczonych jako ONC 1...ONC 5, o parametrach znamionowych $Q_{znam} \approx 3100\ m^3/h$, $H_{znam} = 53\ m$, $P_{znam} = 630\ kW$ (pompy dwustrumieniowe 50B66) oraz 12 pomp głównych, oznaczonych jako OPS 1...OPS 12, o parametrach znamionowych $Q_{znam} = 1250\ m^3/h$, $H_{znam} = 150\ m$, $P_{znam} = 800\ kW$ (pompy wielostopniowe 35W50 oraz W24P). W instalacji znajdują się ponadto pompy przevalowe NP, które pominięto w analizie z tych samych względów, co w punkcie 1.1.1. Łączna moc zainstalowana wszystkich 17 pomp sieciowych (bez pomp przevalowych) w części kolektorowej EC 3 wynosi 12 750 kW.

W pierwszej wersji opracowania [13] (luty 1998) zaproponowano zainstalowanie sprzęgieł hydrokinetycznych we wszystkich 12 głównych pompach sieciowych części kolektorowej EC. Łączny koszt tej operacji, wraz z przeróbkami pomp i fundamentów, oszacowano na 5,1 mln zł. Wyboru sposobu regulacji dokonano autorytatywnie, bez żadnej głębszej analizy, podobnie jak w poprzednio omawianych przypadkach.

Po krytycznej ocenie tego rozwiązania, w drugiej wersji opracowania [13], (kwiecień 1998) liczbę proponowanych sprzęgieł ograniczono do 8, jednak w dalszym ciągu nie przedstawiono żadnej analizy ekonomicznej tego wariantu, jak również możliwych wariantów konkurencyjnych.

Zastrzeżenia odnoszące się do zaproponowanych rozwiązań są analogiczne jak w punktach 1.1.1 i 1.1.2. Niezbędną analizę ekonomiczną utrudnia fakt niedostatecznie dokładnego określenia zakresu zmian strumienia Q_s w części kolektorowej EC. Gdyby ten zakres wynosił np. tylko 20% (80–100%), to do rozważań należałoby włączyć najprostszą regulację dławieniową.

Ze względu na dużą zainstalowaną moc pomp oraz dławienie wewnątrz części kolektorowej EC – szacowane na $\Delta H_{dt} \approx 30\ m$ – szczególnej wagi nabiera zagadnienie dostosowania parametrów pracy pomp do wymagań sieci wewnętrznej EC, którego rozwiązanie powinno być poprzedzone wyznaczeniem, na drodze pomiarów, rzeczywistych charakterystyk pomp i sieci wewnętrznej oraz dokładnymi obliczeniami hydraulicznymi współpracy pomp i sieci wewnętrznej EC z m.s.c. (za pomocą odpowiednio zaawansowanych programów komputerowych).

Należy natomiast jako pozytywny podkreślić fakt uzgodnienia z SPEC charakterystyki m.s.c. w znacznie większym stopniu niż dotąd zbliżonej do charakterystyki rzeczywistej (por. [10], [20]), zamiast przyjmowania jak dotychczas

$$H_{uk} = \Delta H_s = (110 \pm 10)\ m$$

Sugestie odnośnie racjonalnego rozwiązania zadania ekonomicznej regulacji strumienia Q_s są takie same, jak w poprzednich przypadkach. Dodatkowo należy podkreślić, że w analizie obliczeniowej, o której mowa wyżej, powinno się uwzględnić współpracę części kolektorowej z częścią blokową EC 3.

1.1.4. Ciepłownie miejskie

Podczas wykonywania prac [1, 2] jak również w ramach opracowania wielu niepublikowanych analiz i ekspertyz, przeanalizowano sytuację w zakresie doboru pomp sieciowych i przewalowych do wymagań instalacji wewnętrznej i zewnętrznej w różnych ciepłowniach miejskich o stosunkowo dużych mocach cieplnych. Dokonano także oceny możliwości wprowadzenia tam racjonalnej regulacji parametrów pracy pomp, związanej z przechodzeniem na regulację jakościowo-ilościową.

Analiza dotyczyła pięciu ciepłowni w miastach o liczbie mieszkańców 30 tys. do 200 tys.

Problemy występujące w zakresie poprawy dostosowania pomp do instalacji oraz w zakresie energooszczędnej regulacji parametrów pracy były dokładnie takie same, jak w przypadku dużych elektrociepłowni (punkty 1.1.1...1.1.3). Taki sam jest też ogólny sposób ich rozwiązania, przedstawiony w pracy [20].

Dodatkowo w analizowanych obiektach występował generalny problem niskiej sprawności hydraulicznej instalacji wewnętrznych wody sieciowej, spowodowany istnieniem tam obiegów „gorącego” i zwłaszcza „zimnego” zmieszania, gdzie miały miejsce znaczne straty dławienia. W pracach [1], [2], [7], [14], [15] omówiono szczegółowo sposoby poprawy sprawności hydraulicznych ciepłowni i uzyskania oszczędności energii, wynoszących w obiektach średniej wielkości co najmniej 2 mln kWh rocznie.

1.2. GŁÓWNE WNIOSKI WYNIKAJĄCE Z WIZJI LOKALNYCH

1. W znacznej większości przypadków pompy sieciowe są przewymiarowane, mają zwłaszcza zbyt duże wysokości podnoszenia, nierzadko o 20–30% przekraczające wartości uzasadnione. Skutkiem tego jest konieczność dławienia strumienia wody sieciowej przed skierowaniem jej do m.s.c. i związane z tym straty energii – znacznie przekraczające 500 mln kWh w skali całego kraju.
2. Proponowane przez biura projektów sposoby regulacji zmiennoobrotowej pomp opierają się na doświadczeniach sprzed 30–40 lat. Wprowadzają one regulację za pomocą sprzęgieł hydrokinetycznych bez uzasadnienia techniczno-ekonomicznego i bez wykonania analizy celowości zastosowania innych sposobów zmian prędkości obrotowej pomp. Nie przewidują natomiast

- koniecznej w większości przypadków modernizacji wewnętrznych sieci ciepłowniczych oraz modernizacji pomp i poprawy stopnia ich dostosowania do wymagań zarówno sieci wewnętrznej EC (CM) jak i m.s.c.
3. W sporadycznych przypadkach wprowadzana jest regulacja pomp za pomocą falowników lub układów kaskadowych, jednak również bez żadnej analizy zagadnienia i bez dokonywania modernizacji pomp i ich instalacji.
 4. Nie widać jak dotąd zmian sposobu podejścia przedsiębiorstw energetyki ciepłej (poza jednym wyjątkiem) do określenia wymaganej charakterystyki hydraulicznej miejskiej sieci ciepłowniczej. W ogromnej większości przypadków w dalszym ciągu od ciepłowni i elektrociepłowni żąda się utrzymywania stałego ciśnienia dyspozycyjnego, o wartości niezależnej od zmienności w coraz szerszym zakresie strumienia wody sieciowej.

2. OGÓLNE WARUNKI WPROWADZANIA ENERGOOSZCZĘDNEJ REGULACJI PARAMETRÓW PRACY POMP

Wprowadzenie racjonalnej regulacji wydajności i ciśnienia pomp sieciowych powinno być ostatnim etapem wielu przedsięwzięć zmierzających do uzyskania wydatnych efektów oszczędnościowych. Poszczególne działania, omówione szczegółowo w publikacjach [1, 2], [7...10], [14, 15], wynikają z ogólnych zasad energooszczędnej eksploatacji pomp i instalacji pompowych. Są to w szczególności:

1. Identyfikacja pomp i instalacji oraz ustalenie warunków brzegowych od strony EC (CM).
2. Ocena struktury i stanu instalacji wewnętrznej EC (CM) oraz stanu technicznego pomp sieciowych.
3. Modernizacja instalacji wody sieciowej wewnątrz EC (CM).
4. Modernizacja pomp i poprawa ich dopasowania do instalacji.
5. Analiza współpracy sieci wewnętrznej EC (CM) z m.s.c. i wynikające stąd wymagania dotyczące regulacji pomp w przewidywanym obszarze zmienności parametrów ich pracy.

Dopiero następnym etapem, po wykonaniu wszystkich wymienionych powyżej działań, powinno być przeprowadzenie analizy techniczno-ekonomicznej poszczególnych sposobów regulacji parametrów pomp i – na końcu – wybór sposobu optymalnego pod względem całkowitych kosztów jego zakupu, zainstalowania i użytkowania.

3. IDENTYFIKACJA ORAZ OCENA POMP I INSTALACJI

3.1. UZASADNIENIE KONIECZNOŚCI POMIARÓW CHARAKTERYSTYK

Pomiary rzeczywistych charakterystyk pomp są niezbędne z powodu występujących często znacznych rozbieżności między parametrami znamionowymi pomp a parametrami rzeczywistymi, jakie można oszacować na podstawie wskazań zainstalowanych na pompach manometrów, wskazań przepływomierzy na wyjściu z EC lub CM oraz na podstawie wielu innych przesłanek (np. natężenia prądu pobieranego przez silnik pompy, łącznego zużycia energii elektrycznej itp.).

Często zdarza się, że w dokumentacji pomp brakuje charakterystyk fabrycznych. Niekiedy w przypadku pomp 30–40-letnich ich tabliczki znamionowe są nieczytelne lub w ogóle ich nie ma, zaś parametry znamionowe znajdujące się w wielokrotnie przepisywanych wykazach budzą poważne wątpliwości.

Inne dość częste przypadki, to nie odnotowane w dokumentacji, a wykonane różne zabiegi modernizacyjne, najczęściej – obtoczenia (stoczenia) wirników dokonywane w celu zmniejszenia wysokości podnoszenia, wymiana podczas remontów wirników między pompami tych samych typowości ale o różnych parametrach znamionowych itp.

Pomiary rzeczywistych charakterystyk rurociągów są konieczne ze względu na:

- postępującą zmianę ich oporów przepływu z powodu korozji, nawarstwiania się osadów itp.,
- złożoną konfigurację przestrzenną rurociągów oraz brak dostatecznie dokładnych wartości współczynników strat hydraulicznych dla poszczególnych elementów, co utrudnia wystarczająco dokładne wyznaczenie charakterystyk na drodze obliczeniowej,
- często spotykane rozbieżności między rzeczywistym układem rurociągów a układem wynikającym z dokumentacji.

Pomiary charakterystyk hydraulicznych obiektów o największych oporach, takich jak kotły wodne, wymienniki, filtry są niezbędne zarówno ze względu na ich nieznaną (lub tylko orientacyjną) charakterystyki od początku pracy obiektu, postępującą zmianę ich oporów przepływu w ciągu wielu lat pracy oraz na znaczny udział strat ciśnienia w tych elementach w łącznej stracie ciśnienia w elektrociepłowni lub ciepłowni.

3.2. WYMAGANIA DOTYCZĄCE WYKONANIA I DOKŁADNOŚCI POMIARÓW

Pomiary powinny być wykonane zgodnie z normami PN-85/M-44005 oraz PN-86/M-44006 przez doświadczony zespół, najlepiej z laboratorium mającego akredytację lub przynajmniej upoważnienie PCBC. Do pomiarów powinny być wykorzystane wzorcowane przyrządy pomiarowe o klasach dokładności nie gorszych niż 0,5 w przypadku ciśnieniomierzy i watomierzy oraz 1,0 w przypadku przepływomierzy. Pożądane jest, aby przyrządy umożliwiały równoczesny pomiar i rejestrację wszystkich wielkości mierzonych. Bardzo ważne jest odpowiednie podłączenie ciśnieniomierzy, zgodne z normami jw.

W przypadku pomiaru natężeń przepływu mogą wystąpić problemy znalezienia odpowiednio długich odcinków pomiarowych. Najwygodniej jest wówczas zastosować bezinwazyjne przepływomierze ultradźwiękowe odpowiednio zaawansowanej generacji, np. dwuścieżkowe przepływomierze UNIFLOW 1010 (USA).

3.3. IDENTYFIKACJA GEOMETRYCZNA INSTALACJI WODY SIECIOWEJ

Identyfikacja powinna obejmować ustalenie długości i średnic wewnętrznych poszczególnych elementów rurociągów, liczby, rodzaju i usytuowania oporów miejscowych (kolana, trójniki, zwężki, zasuw, przepustnice, filtry itp.) oraz – w miarę możliwości – wartości lokalnych współczynników strat hydraulicznych.

3.4. USTALENIE WEWNĘTRZNYCH WARUNKÓW BRZEGOWYCH I ZAKRESÓW ZMIENNOŚCI WYDAJNOŚCI DLA POSZCZEGÓLNYCH ELEMENTÓW SIECI WEWNĘTRZNEJ

Wewnętrzne warunki brzegowe są związane z ograniczeniami wynikającymi z zakresów pracy poszczególnych urządzeń, możliwości ich współpracy itp. Są to:

- zakresy $Q_{i\min} \dots Q_{i\max}$ dopuszczalnych wydajności dla każdej z i zainstalowanych pomp,
- zakresy $Q_{j\min} \dots Q_{j\max}$ każdego z j innych urządzeń (kotły wodne, wymienniki ciepła itp.),
- kolejność włączania poszczególnych źródeł ciepła,
- możliwe ograniczenia we współpracy poszczególnych pomp z odpowiednimi elementami wewnętrznej instalacji wody sieciowej,

- ograniczenia w zakresie temperatur wody $T_{\min} \dots T_{\max}$ wynikające z warunków pracy kotłów wodnych i granicznej temperatury wody sieciowej i wynika stąd zakresy strumieni „zimnego” i „gorącego” zmieszania (dotyczy zwłaszcza ciepłowni miejskich).

3.5. OCENA WEWNĘTRZNEJ INSTALACJI WODY SIECIOWEJ POD WZGLĘDEM HYDRAULICZNYM

Obiektywnym miernikiem oceny jakości wewnętrznej instalacji wody sieciowej jest jej sprawność hydrauliczna η_h lub całkowita sprawność η_c procesu przetwarzania wody w tej instalacji [7], [15], [16], zdefiniowana jako

$$\eta_c = \frac{P_u}{\sum_i P_{el,i}} = \eta_h \frac{\sum_i (P_u)_{p,i}}{\sum_i P_{el,i}} \quad (1)$$

$$P_u = \rho g Q_s \Delta H_s \quad (2)$$

$$(P_u)_{p,i} = \rho g Q_i H_i \quad (3)$$

gdzie: P_u – moc hydrauliczna użytecznie przekazana cieczy w elektrociepłowni lub ciepłowni (zawarta w wodzie wypływającej do m.s.c.),

$(P_u)_{p,i}$ – moc użyteczna i -tej pompy; $(P_u)_{p,i} = P \eta_i$,

P_i – moc na wale i -tej pompy,

$P_{el,i}$ – moc pobierana z sieci elektrycznej przez silnik i -tej pompy.

Wartość η_c należy ocenić dla każdego konkretnego przypadku. Orientacyjnie można przyjąć, iż uzyskanie wartości

- $\eta_c < 0,30$ w przypadku ciepłowni,
- $\eta_c < 0,40$ w przypadku elektrociepłowni świadczy o konieczności modernizacji wewnętrznej instalacji wody sieciowej.

3.6. OCENA POMP ORAZ STOPNIA ICH DOPASOWANIA DO INSTALACJI

Ocena pomp powinna dotyczyć ich ogólnego stanu technicznego oraz sprawności. Pierwszy element oceny jest oczywisty i nie budzi wątpliwości.

Sprawność całkowita η pompy po $t \geq 10$ lat eksploatacji nie powinna być mniejsza niż o $\Delta \eta_{\max} = 0,03 \dots 0,05$ od sprawności pompy fabrycznie nowej.

W przypadku braku tej ostatniej wartości, można posłużyć się przeciętnymi wartościami sprawności pomp wirowych podawanymi w literaturze, np. w [17]. Stwierdzenie mniejszych sprawności powinno być sygnałem do dokonania modernizacji pomp, zaś dużo mniejsze sprawności ($\Delta \eta \geq 0,10$) powinny kwalifikować pompy do wymiany.

Niewłaściwy dobór pomp do instalacji może być wynikiem:

- błędów projektowych (przewidziany zbyt duży zapas wysokości podnoszenia),
- zmian zaistniałych z upływem czasu w warunkach pracy obiektu (rozbudowa i przebudowa sieci wewnętrznej; zmiana zapotrzebowania na gorącą wodę itp.),
- zmian postulowanych, będących wynikiem modernizacji sieci wewnętrznej spowodowanej jej małą sprawnością.

Główne skutki złego dopasowania pomp do instalacji, to:

- nadmiernie duże ciśnienie wody na wyjściu z EC lub CM, stąd konieczność dławienia strumienia Q_s i związane z tym straty energii,
- praca pomp z wydajnościami znacznie odbiegającymi od wydajności optymalnych Q_{opt} , z czym również wiążą się znaczne niekiedy straty energii,
- przeciążenie silników napędowych w przypadku ciągłej pracy pomp z wydajnościami znacznie przekraczającymi Q_{opt} ,
- praca pomp w obszarze kawitacji, w przypadku jak powyżej.

Podstawowe kryteria dobrego dopasowania pomp do instalacji omówiono szczegółowo m.in. w publikacjach [17...19]. W zastosowaniu do pomp sieciowych w EC i CM są to przede wszystkim następujące warunki:

- wydajność Q pompy w przeważającej części jej czasu pracy³⁾ powinna być zbliżona do Q_{opt} ,
- wysokość podnoszenia H pompy powinna mieć taką wartość, aby w przeważającej części jej czasu pracy³⁾ wszystkie zawory w instalacji wody sieciowej mogły być całkowicie otwarte,
- pompa powinna pracować poza obszarem kawitacji, tzn. dla każdej wydajności z zakresu $Q_{min} \dots Q_{max}$ powinien być spełniony warunek

$$NPSH_{av} \geq NPSH_r \quad (4)$$

Ocena stopnia dostosowania pomp do instalacji powinna być wykonana przez specjalistów, w szczególności – kompetentnych i niezależnych pracowników wyższych uczelni technicznych.

³⁾ Przez przeważającą część czasu pracy pompy należy rozumieć co najmniej (75) 80% jej całkowitego czasu pracy w ciągu roku.

4. PODSUMOWANIE

Wybór konkretnego sposobu realizacji zmian prędkości obrotowej pomp sieciowych powinien być poprzedzony:

- szczegółową analizą uwarunkowań ze strony wewnętrznej i zewnętrznej instalacji wody sieciowej oraz oceną stopnia dostosowania pomp do instalacji,
- modernizacją instalacji wewnętrznej oraz pomp,
- analizą techniczno-ekonomiczną poszczególnych sposobów regulacji.

Jak dotąd brak jest materiałów pozwalających kompleksowo i równocześnie efektywnie rozwiązywać postawione zadanie, przy potencjalnie dużym zapotrzebowaniu na praktyczną metodykę rozwiązań (kilkanaście dużych elektrociepłowni oraz bardzo wiele ciepłowni miejskich w całym kraju).

W niniejszej pracy omówiono pierwszą z wymienionych wyżej grup zagadnień. Przedmiotem kolejnej pracy [20] jest kompleks przedsięwzięć modernizacyjnych oraz omówienie dodatkowych wymagań związanych ze współpracą EC lub CM z m.s.c.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jackowski K., Jędral W., Koczara W., Zwierzchowski R.: Zasady sterowania pompami obiegowymi w miejskich systemach ciepłowniczych. Priorytetowy Program Naukowo-Badawczy Energia i utylizacja odpadów w ochronie środowiska. Politechnika Warszawska, 1996, z. 1, s. 167–182.
- [2] Jackowski K., Jędral W., Zwierzchowski R.: Oszczędność energii oraz wzrost niezawodności działania obiegów wodnych w ciepłowniach komunalnych. Uczelniane Centrum Badawcze Energetyki i Ochrony Środowiska. Prace Naukowe, z. 2. OWPW, 1998, s. 143–158.
- [3] Pawlik M., Kotlicki T.: Efektywność energetyczna regulowanych napędów pomp w elektrowniach parowych. Archiwum Energetyki. 1992, nr 1, s. 45–54.
- [4] Michalski W.: Analiza porównawcza różnych rozwiązań układów napędowych w kontekście możliwości zastosowań w Polsce. Krajowe Forum Producentów i Użytkowników Pomp w Wodociągach i Kanalizacji. Jachranka 1996, Mater. Konfer., s. 73–81.
- [5] Misiewicz W.: Zmiennobrotowe napędy pomp ciepłowniczych. Wybrane zagadnienia racjonalnego doboru. Krajowe Forum Producentów i Użytkowników Pomp w Ciepłownictwie i Energetyce. Szczyrk 1997, Mater. Konfer. s. VII–1 do VII–14.
- [6] Misiewicz W.: Wybrane zagadnienia regulacji parametrów pracy pomp wirowych. IV Krajowe Forum Producentów i Użytkowników Pomp. Szczyrk 1998, Mater. Konfer. s. 5–10.
- [7] Jędral W.: Racjonalizacja i energooszczędna eksploatacja instalacji pompowych w energetyce cieplnej. Gospodarka Paliwami i Energią, 1996, nr 10, s. 2–5.
- [8] Jędral W.: Optymalna regulacja wydajności pomp wirowych w energetyce, przemyśle i gospodarce komunalnej. Gospodarka Paliwami i Energią, 1998, nr 1, s. 2–4.

- [9] Jędral W.: Warunki wprowadzania ekonomicznej regulacji wydajności i ciśnienia wody sieciowej w elektrociepłowniach. GRE'98. Zesz. Nauk. Politechniki Opolskiej, nr 242/1988 (Elektryka, z. 46), s. 149–156.
- [10] Jędral W.: Perspektywy modernizacji pomp i instalacji pompowych w energetyce. Konfer. Nauk.-Techn. Modernizacja i Oszczędności w Energetyce. Jawor 1999, Mater. Konfer., s. 11–24.
- [11] Analiza dostosowania układu wody sieciowej EC I do regulacji ilościowo-jakościowej z uwzględnieniem regulacji obrotów pomp metodami mechanicznymi. Biuro Projektów A, maj 1998.
- [12] Koncepcja modernizacji członu ciepłowniczego w zakresie analizy hydraulicznej miejskiej sieci ciepłowniczej. Biuro Projektów B, marzec 1996.
- [13] Koncepcja modernizacji sieci ciepłej Elektrociepłowni 3 dla przejęcia obszaru Elektrociepłowni 4. Biuro Projektów C; I wersja – luty 1998, II wersja – kwiecień 1998.
- [14] Jędral W.: Układy pomp energetycznych i ciepłowniczych w aspekcie energooszczędnej eksploatacji. II Konf. Naukowa Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej. Prace Nauk. Politechn. Warszawskiej, Konferencje, z. 6, OWPW, 1995, t. I, s. 229–236.
- [15] Jędral W.: Sprawność instalacji pompowej jako wskaźnik stopnia jej energochłonności. III Konf. Nauk. Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej. Prace Nauk. Politechn. Warszawskiej, Konferencje, z.15. OWPW, Warszawa 1997, t. I, s. 275–282.
- [16] Jędral W.: Sposoby i perspektywy obniżenia kosztów eksploatacji pomp i instalacji pompowych. Gospodarka Paliwami i Energią, 1997, nr 6, s. 26–28.
- [17] Jędral W.: Pompy wirowe odśrodkowe. OWPW, Warszawa 1996.
- [18] Jędral W.: Oszczędności energii elektrycznej w eksploatacji pomp wirowych. Energetyka, 1991, nr 1, s. 8–13.
- [19] Jędral W.: Zasady ogólne oraz przykłady doboru pomp do określonych warunków pracy. Pompy-Pompownie, 1998, nr 8, s. 35–38.
- [20] Jędral W.: Modernizacja pomp sieciowych oraz inne uwarunkowania regulacji ilościowej w elektrociepłowniach i ciepłowniach. Biuletyn Instytutu Techniki Ciepłej, numer bieżący.

AN ANALYSIS OF THE ACTUAL STATE AND THE CONDITIONS FOR INTRODUCING ENERGY – SAVING CONTROL OF CIRCULATING PUMPS IN COMBINED HEAT AND IN POWER PLANTS AND HEATING STATIONS

Summary

This set of three papers presents rational methods for introducing variable speed control with the simultaneous modernization of pumps and pump installations. This paper deals with the critical analysis of the actual state of the plant and for introducing variable speed control for large circulating pumps in the home, combined heat and power plants and heating stations. The general conditions for introducing energy saving control for circulating pumps are given.