

**Jacek Murawski, Elektromontaż Toruń Sp. z o.o., Toruń**  
**Andrzej Misiewicz, Zakład Przepływowych Maszyn Energetycznych ENERGOM, Świdnica**

## PRZEMIENNIKI CZĘSTOTLIWOŚCI W UKŁADZIE TECHNOLOGICZNYM CIEPŁOWNI O MOCY 100 MWt

### THE VARIABLE FREQUENCY DRIVES IN TECHNOLOGICAL PLANTS OF 100 MWt THERMAL POWER STATION

**Streszczenie:** Stosowanie regulowanych układów napędowych w pompach sieciowych źródeł ciepła jest obecnie najczęstszym sposobem regulacji parametrów hydraulicznych. Jednak bez uporządkowania technologii pompowania oraz właściwego doboru parametrów pomp nie można mówić o regulacji efektywnej. W referacie przedstawiona została modernizacja układu wodnego ciepłowni o mocy 100 MWt, z wykorzystaniem układów napędowych, pracujących wg nowych algorytmów regulacji. Konieczność głębokiej regulacji powodowała nieuniknione spadki sprawności pomp, silników i napędów (przemienników częstotliwości). W zmodernizowanym układzie, po wcześniejszym dostosowaniu parametrów hydraulicznych pomp do potrzeb (charakterystyki oporu układu), z nowo dobranymi napędami, uzyskano znaczną poprawę sprawności pompowania. Artykuł przedstawia rzeczywiste efekty energetyczne uzyskane w wyniku prawidłowego zaprojektowania technologii i odpowiedniego doboru zespołów (pompa-silnik-przemiennik). Prezentuje rozwiązania z zakresu zasilania, sterowania i regulacji co skutkuje poprawą sprawności energetycznej układu technologicznego ciepłowni.

**Abstract:** Using of variable frequency drives is now the most common method for adjusting the hydraulic parameters. However, without the right order in the technology systems and proper parameters selection it is not possible to adjust with enough positive energetic effect. This paper presents the modification of hydraulic system of 100 MWt heating plant, with the frequency variable drives, working under new steering algorithm. The deep adjustment causes the lowering of pumps, drives and motors efficiency. In new, modernized system, after correcting the hydraulic parameters of pumps, with the new drives, the total pumping efficiency is growing. This paper presents the realistic energetic effects realized as an effect of the right technology projects with new drives. It presents the solutions in the field of the electrical power supply, adjustment and steering, causing the higher energetic efficiency of whole heating plant system.

**Słowa kluczowe:** *przemienniki częstotliwości, pompy wirowe, regulacja, zasilanie elektryczne, sterowanie*  
**Keywords:** *frequency converters, centrifugal pumps, adjustment, electric supply, control*

#### 1. Wstęp

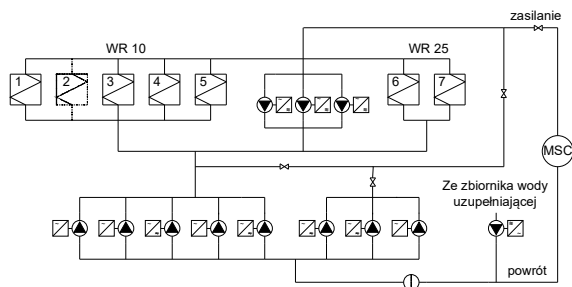
Przemienniki częstotliwości są obecnie najbardziej popularnymi urządzeniami do regulacji pomp wirowych, również w ciepłownictwie i energetyce. Ze względu na sposób zmiany parametrów pompy, wynikający wprost z teorii podobieństwa, są też urządzeniami najbardziej sprawnymi, przynoszącymi najmniejsze straty regulacji. Ich stosowanie nie jest jednak wolne od wad, a niedopasowanie napędów do wymagań układu powoduje, że straty regulacji układów z przemiennikami mogą być stosunkowo wysokie. Popularność przemienników w regulacji układów pomp ciepłowni wynika z ich obecnie relatywnie niskiej ceny oraz łatwości aplikacji [1]. Przykład zabudowy przemienników w układzie technologicznym ciepłowni o mocy 100 MWt pokazuje schemat. Widać, że wszystkie pompy przewidziane do pracy cie-

płowni są wyposażone w napędy z przemiennikami częstotliwości. Poprzez zmianę prędkości obrotowej zmieniają one parametry hydrauliczne pomp, dostosowując je do aktualnych wymagań sieci ciepłowniczej miasta. Nie jest jednak tak, że regulacja odbywa się „za darmo”. Przemienniki, jak i silniki oraz pompy, są urządzeniami energetycznymi, które zależnie od swojego obciążenia oraz głębokości regulacji wykazują różny poziom sprawności. Sprawność regulowanego przemiennikiem zespołu pompowego jest iloczynem sprawności składowych (pompy, silnika, przemiennika) i można ją zapisać równaniem:

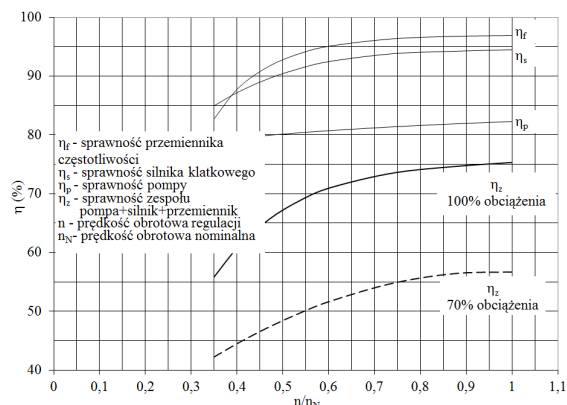
$$\eta_z = \eta_p \cdot \eta_s \cdot \eta_f \quad (1)$$

Znamienne jest to, że im większa głębokość regulacji oraz im większe niedociążenie mocą,

tym sprawność ta jest mniejsza [2]. Pokazuje to rysunek 2.



Rys. 1. Schemat technologiczny ciepłowni o mocy 100MWt



Rys. 2. Sprawność zespołu pompowego regulowanego przemiennikiem [2]

Analiza zależności (1) wskazuje, że dla uzyskania regulacji wysokosprawnej nie wystarczy jedynie zastosowanie przemiennika. Musi on być odpowiednio dobrany do wymaganego zakresu zmian parametrów.

Głębokość regulacji wynika z kolei z dynamiki zmian parametrów regulowanych, w przypadku pomp ciepłowniczych, z wysokości podnoszenia oraz przepływu.

W układzie ciepłowni pompy muszą zapewnić uzyskanie wymaganego ciśnienia dyspozycyjnego  $H_d$  na wyjściu ze źródła, oraz pokonać własne opory hydrauliczne urządzeń wytwórczych (kotłów)  $H_k$  i straty instalacji własnej (rurociągi, armatura)  $\Delta H_r$ . Charakterystyka taka ma zawsze kształt paraboliczny [3].

W prezentowanym przykładzie pompy musiały pokonywać szeregowy opór hydrauliczny kotłów i sieci.

$$H_R = H_k + H_d + \Delta H_r \quad (2)$$

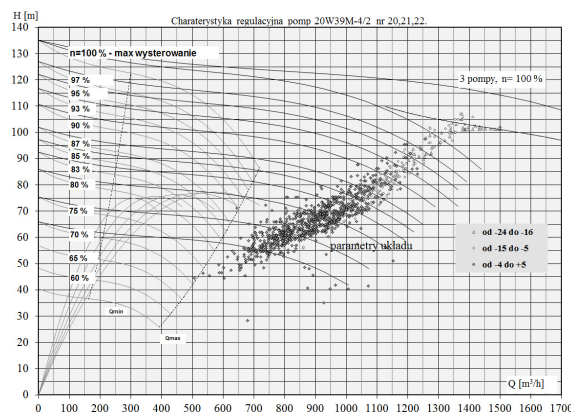
Nałożenie na siebie minimów i maksimów składowych oporów, powodowało zwiększanie głębokości regulacji i tym samym spadek sprawności zespołów (pompa - silnik - przemiennik).

Głębokość regulacji została pokazana na wykresie współpracy pomp (rys.3). Dodatkowym źródłem strat było to, że współpracujące ze sobą opory równoległe (kotły WR10 i WR25) były różne, co skutkowało koniecznością pracy „na wyższy opór” i dodławianiu kotła o mniejszym oporze.

Analiza sytuacji doprowadziła do postawienia tezy o istnieniu znacznych rezerw w zakresie możliwości poprawy efektywności energetycznej.

Poprawę układu zdecydowano się dokonać poprzez ingerencję w:

- technologię układu i zindywidualizowanie funkcji pomp,
- zmianę infrastruktury elektrycznej,
- zmianę algorytmów sterowania i sposobów regulacji.

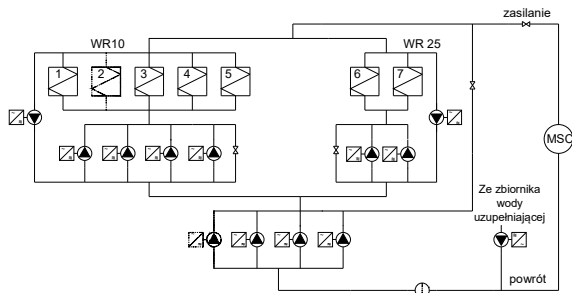


Rys. 3. Głębokość regulacji pomp sieciowych. (rysunek pana Adama Głębockiego)

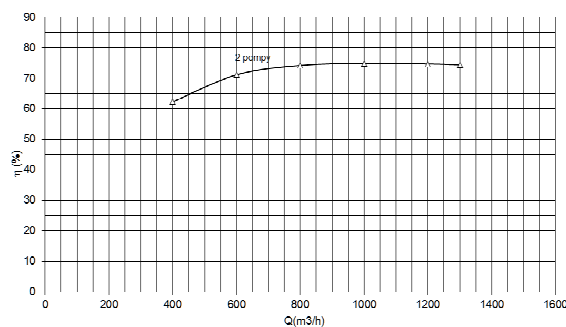
## 2. Nowa technologia pompowania

Układ technologiczny został tak przebudowany, że każda pompa (zespół pomp) został dedykowany do jednego oporu hydraulicznego. Pompy sieciowe mają pokonywać opory sieci, pompy przevalowe kotłów tylko opory kotłów, pompy zmieszania gorącego tylko opory instalacji zmieszania.

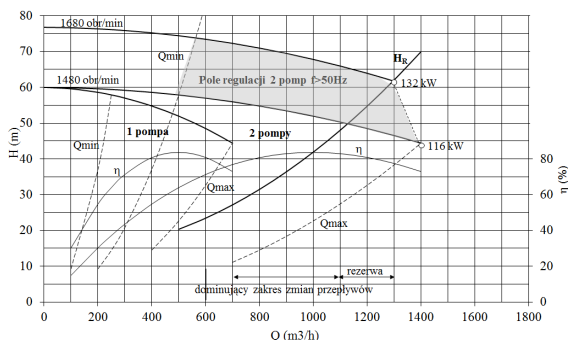
Uzyskano w ten sposób zmniejszenie głębokości regulacji poszczególnych pomp oraz zmniejszenie ich mocy nominalnych. Współpraca pomp sieciowych regulowanych przemiennikami została pokazana na rysunku 5, natomiast pomp przevalowych kotłów na rysunku 6. W przypadku pomp sieciowych wykorzystano regulację  $>50$  Hz do uzyskania chwilowo wymaganych, wyższych parametrów hydraulicznych i rezerwowania.



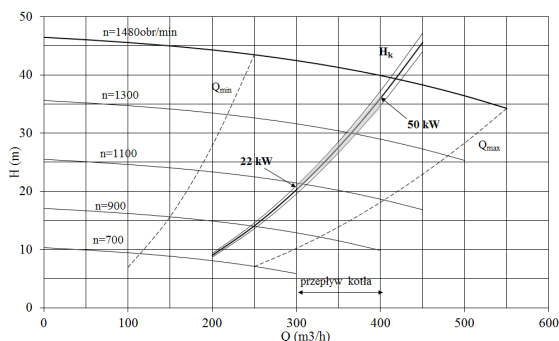
Rys. 4. Schemat dedykowanych do poszczególnych urządzeń zespołów pompowych w układzie technologicznym ciepłowni



Rys. 7. Sprawność zespołów pompowych w polu regulacji



Rys. 5. Praca pomp sieciowych regulowanych przemiennikami. Wykorzystanie regulacji >50 Hz do rezerwowania



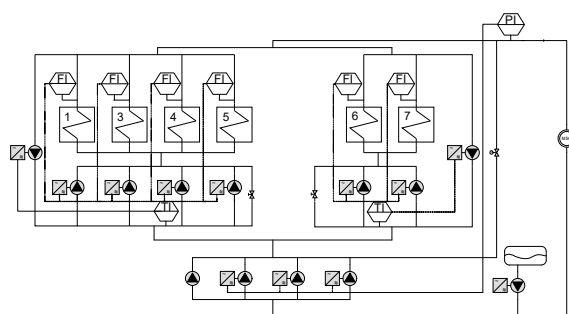
Rys. 6. Praca pompy przeławowej kotła WR25 z przemiennikiem. Charakterystyka obciążenia w środku pola regulacji

Na uwagę zasługuje fakt, że charakterystyki pomp zostały tak dobrane, żeby maksimum sprawności zespołów znajdowało się w obszarze najczęściej występujących przepływów.

Rysunek nr 7 pokazuje praktycznie stałą sprawność zespołów pompowych, w szerokim zakresie zmian przepływów (od 700 do 1300 m<sup>3</sup>/h). Dopasowanie pomp i napędów do wymagań, bez zbędnych nadwyżek parametrycznych, miało decydujące znaczenie z punktu widzenia sprawności układu i późniejszych kosztów pompowania.

### 3. Układy regulacyjne

Indywidualizacja zakresu pracy pomp spowodowała zastosowanie odpowiednich układów automatycznej regulacji. Układy zostały dobrane ściśle do zadań, które realizują pompy. Dla zapewnienia prawidłowej i optymalnej pracy ciepłowni zastosowano: układ regulacji ciśnienia wody do sieci miejskiej, układy regulacji przepływu przez kotły oraz zmieszania gorącego dla kotłów (WR10 i WR25). Schemat technologiczny z układami regulacji przedstawia rysunek nr 8.



Rys. 8. Schemat technologiczny z układami automatycznej regulacji

#### 3.1. Regulacja ciśnienia do sieci miejskiej

Podstawowym układem automatycznej regulacji pracy ciepłowni jest układ ciśnienia wody do sieci miejskiej.

Do realizacji tego zadania zastosowano pompy sieciowe wyposażone w przemienniki częstotliwości. Każda z pomp została dopasowana tak, aby w sposób optymalny (pracując z możliwie najlepszą sprawnością) zapewnić konieczne parametry zasilania sieci ciepłowniczej. Ponadto we wszystkich pompach sieciowych wyrównano charakterystyki energetyczne, co jest bardzo ważne z punktu widzenia procesu regulacji za pomocą tych urządzeń [4].

W regulatorze sygnał pomiaru ciśnienia lub różnicy ciśnień wody na bieżąco porównywany

jest z wartością zadaną wpisaną przez operatora. Wypracowany sygnał regulujący zmienia prędkość obrotową silników pomp sieciowych za pomocą przemienników częstotliwości [5]. Dzięki temu układ regulacji przeciwdziała zmieniającym się warunkom ciśnieniowym w sieci ciepłowniczej utrzymując je na zadanym przez operatora poziomie.

Wyrównane charakterystyki pomp pozwalają na ich prawidłową pracę równoległą (pompy nie „konkurują” ze sobą i pracują z jednakowym obciążeniem).

Charakterystyczną cechą tego układu regulacji jest to, że pracujące pompy sterowane są tym samym sygnałem sterującym - prędkość obrotowa wszystkich pracujących pomp w danym układzie jest taka sama. Po włączeniu do pracy dowolnej pompy, układ regulacji zapewnia zsynchronizowanie punktu pracy wszystkich pracujących pomp na nowym, takim samym dla każdej pompy poziomie prędkości obrotowej. W pewnych obszarach pracy całego układu źródło-sieć, osiągnięcie zadanych parametrów przez pompy jest możliwe przy pracy jednej lub dwóch, albo dwóch lub trzech pomp. Z tego względu, a także ze względu bezpieczeństwa, o włączeniu i wyłączeniu każdej pompy decyduje operator. Decyzję podejmuje na podstawie bieżącej analizy warunków obiektowych.

### 3.2. Regulacja przepływu przez kotły

Kolejną regulacją zastosowaną w ciepłowni jest kontrola przepływu wody przez kotły. Zadany przez operatora przepływ przez kocioł (kotły) utrzymywany jest przez zespół pomp przewalowych zamontowanych przed samymi kotłami. Niezależny regulator steruje prędkością obrotową każdej pompy przy pomocy dobranej do mocy przemiennika częstotliwości i silnika.

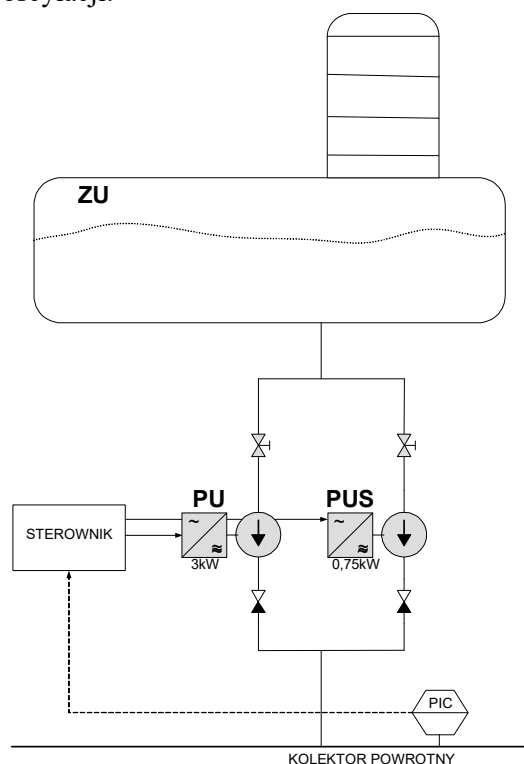
### 3.3. Regulacja temperatury wlotowej do kotłów

Innym układem regulacji zastosowanym na obiekcie jest układ utrzymania stałej temperatury na wlocie do kotłów - układ zmieszania gorącego. Pompy zmieszania gorącego podają część gorącej wody zza kotła (o temperaturze 130 °C) bezpośrednio do kolektora ssącego pomp przewalowych. Ważnym elementem w tym układzie jest wybór lokalizacji czujnika temperatury wody w kolektorze przed kotłami. Czujnik powinien być umieszczony w takim miejscu, aby było pewne, że w punkcie pomiaru woda jest dobrze wymieszana, a jej temperatura

jest wiarygodną dla różnych wariantów pracy ciepłowni. Układ regulacji temperatury na wlocie do kotłów, zależnie od jej wahań, reguluje wydajność pomp przez zmianę prędkości obrotowej w celu osiągnięcia założonej wartości temperatury. Również w tym przypadku do regulacji prędkości obrotowej pomp wykorzystano dobrane do mocy urządzenia przemienniki częstotliwości i silniki. Utrzymanie temperatury wody odbywa się niezależnie dla kotłów WR10 i WR25. Regulacja temperatury wody do sieci miejskiej jest wartością wynikową. Jednak jej utrzymanie można w pewien sposób zautomatyzować, wprowadzając układy regulacji temperatury wylotowej bezpośrednio na kotłach.

### 3.4. Regulacja ciśnienia powrotu

Jedną z najważniejszych regulacji w ciepłowni realizuje układ stabilizacji ciśnienia w rurociągu powrotnym z sieci miejskiej. Od jakości jego pracy zależy prawidłowe funkcjonowanie wcześniej opisanych układów regulacji. Ten niepozorny układ (napędy nie są większe niż 3 kW) pozwala na ustabilizowanie ciśnienia wody w kolektorach ssących pomp sieciowych. Skutkiem czego, regulacja pomp głównych (z napędami o znacznych mocach 130-200 kW) odbywa się stabilnie, bez zbędnych przeregulowań i oscylacji.

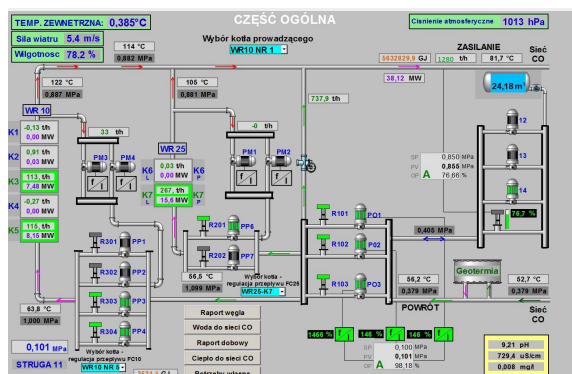


Rys. 9. Układ automatycznej regulacji ciśnienia na powrocie miejskiej sieci ciepłowniczej

Pośrednio układ stabilizacji ciśnienia w źródle połączony jest z układem uzupełniania, którego zadaniem jest zapewnienie uzupełnienia ubytków w sieci ciepłowniczej.

### 3.5. System nadzoru i sterowania

Wszystkie sygnały pomiarowe z aparatury kontrolno-pomiarowej zamontowanej na obiektach, sygnały z układów sterowania, sygnalizacji oraz układy automatycznej regulacji zaimplementowano w sterowniku PLC. Jego zadaniem jest bezpieczne prowadzenie procesu technologicznego związanego z obiegiem wodnym ciepłowni. Sterownik połączony jest z komputerowym systemem sterowania, regulacji i archiwizacji SCADA, zrealizowanym w postaci komputerów stacji operatorskiej i obiektowych paneli operatorskich z dedykowanymi aplikacjami. Na poszczególnych ekranach operator ma dostęp do bieżących parametrów procesu technologicznego, sygnalizacji alarmowej, układów sterowania i regulacji. Ponadto w stacji prowadzony jest proces archiwizacji danych i raportowania stanu urządzeń.



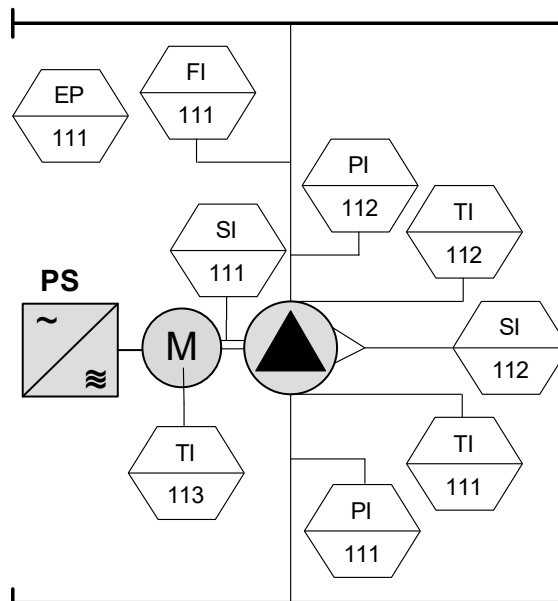
Rys. 10. Schemat wizualizacji w stacji operatorskiej

Szafy sterujące, sterownik oraz stacje i panele operatorskie zasilane są z sieci napięcia gwarantowanego przyłączonej do UPS-a.

### 4. Informacje o stanie pracy pomp

Do prawidłowej eksploatacji pracy pomp sieciowych niezbędne jest prowadzenie stałej diagnostyki. Monitoring podstawowych parametrów pracy pomp dostarcza informacji o procesie eksploatacji urządzeń, pozwala podjąć decyzję o prowadzeniu działań remontowych i naprawczych. Głównymi parametrami pracy pomp są: ciśnienia wody na ssaniu i tłoczeniu pompy, przepływ wody przez pompę, prędkość obrotowa pompy i pomiar mocy elektrycznej (zużywanej przez zespół przemiennik, silnik

i pompa). Do pomiaru prędkości obrotowej zastosowano enkodery, połączone bezpośrednio z wałem silnika, które zapewniają rzeczywisty pomiar obrotów pompy. Ponadto dodatkowo można wyposażyć zespół pompowy w pomiary: temperatury łożysk pompy i silnika, temperatury uzwojeń silnika oraz pomiary drgań pompy. Zebrane w ten sposób dane z każdego agregatu pompowego i poddane analizie w systemie komputerowym, zapewniają informacje o bieżącym stanie i zużyciu pompy.



Rys. 11. Schemat opomiarowania pojedynczej pompy

Kolejny niezwykle ważny parametr pracy całego zespołu pompowego (przemiennik, silnik, pompa) - sprawność - jest dostępny w systemie komputerowym w wyniku obliczeń ilorazu mocy hydraulicznej (przepływ x wysokość podnoszenia pompy) przez dostarczoną do układu moc elektryczną, pochodzącą z układu pomiarowego.

Ponadto dzięki wprowadzeniu danych podstawowych możliwa jest bieżąca kontrola punktu pracy pompy w dozwolonym zakresie pracy. Czytając chwilowy przepływ przez pompę, znając wysokość podnoszenia pompy (różnicę między ciśnieniem ssania i tłoczenia) oraz prędkość obrotową pompy można wyznaczyć bieżący punkt pracy pompy. Punkt pracy powinien znajdować się w obszarze pomiędzy wydajnością minimalną, a maksymalną pompy, znaną z charakterystyki energetycznej. Praca w tym obszarze zapewnia optymalne, pod względem sprawnościowym, wykorzystanie

pompy. Znając punkt pracy pompy, na wykresie w stacji operatorskiej można określić „odległość” od obszarów przeciążenia i niedociążenia pompy.

Znajomość pól pracy pomp i ich wzajemne położenie pozwala operatorowi prowadzić eksploatację pomp w sposób prawidłowy, utrzymując je w obszarze optymalnych sprawności.

## 5. Zasilanie pomp

Zmiana technologii pompowania ciepłowni spowodowała dopasowanie i dobór nowych jednostek pompowych, o zmniejszonych mocach elektrycznych. Dzięki temu zrezygnowano z silników zasilanych napięciem 6 kV i rozdzielnic średniego napięcia. Koniecznym było zmodernizowanie istniejącej rozdzielnic niskiego napięcia, łącznie z wymianą transformatorów na urządzenia większej mocy. Do zmodernizowanej rozdzielnic przyłączono nowe silniki pomp, zasilane przez przemienniki częstotliwości.

Rezygnacja z napięcia 6 kV na obiekcie oraz modernizacja istniejącej rozdzielnic nn poprawiła bezpieczeństwo, niezawodność i pewność zasilania urządzeń. Ponadto wyeliminowane zostały koszty związane z eksploatacją, konserwacją i remontami urządzeń zasilanych napięciem 6 kV.

## 6. Efekty modernizacji

W wyniku uporządkowania technologii, zmiany parametrów pomp i przemienników, dopasowania infrastruktury elektrycznej oraz zmiany sposobu regulacji uzyskano znaczące efekty energetyczne (tabela).

*Tabela. 1. Zużycie energii przez wszystkie pompy nowego układu w okresie 01.11.2014 do 31.10.2015 (pełny rok)*

l.p.	Typ pompy w układzie	Oznaczenie	Energia (kWh)
1	Sieciowa (obiegowa)	PO1	105 633
2		PO2	95 951
3		PO3	240 198
4	Przewalowa kotła WR 25	PP6	49 823
5		PP7	43 029
6	Zmieszania gorącego kotła WR25	PM1	32
7		PM2	32
8	Przewalowa kotła WR 10	PP1	18 637
9		PP2	23 326
10		PP3	18 840
11		PP4	20 423

12	Zmieszania go-	PM3	2
13		PM4	2
14	Stabilizacji i uzupełniania	P12	6 711
15		P13	2 283
16		P14	5 091
Razem:			630 019

Średnie zużycie energii elektrycznej, przez stary układ pompowy, z 3 lat 2010 do 2012, wynosiło:

$$E_{\text{śr}} = 1.128.480 \text{ kWh/rok}$$

Efekt energetyczny uzyskany w jednym roku:

$$E_c = 498.461 \text{ kWh}$$

## 7. Wnioski

- Zastosowanie przemienników częstotliwości w napędach zespołów pompowych ciepłowni, bez uporządkowania technologii pompowania oraz likwidacji nadwyżek parametrowych pomp, nie gwarantuje uzyskania pełnych efektów energetycznych.

- Ze względu na charakterystykę oporów hydraulicznych korzystnie jest zmniejszać głębokość regulacji poprzez dobór pomp do poszczególnych, odrębnych parametrowo układów i urządzeń (sieć, kotły, zmieszanie gorące).

- Wysokość efektów zależy również od zastosowanych rozwiązań z zakresu zasilania i sterowania. Szczególnie istotny jest dobór odpowiednich algorytmów układów regulacji przemiennikami dla poszczególnych zespołów pompowych.

## Literatura

- [1]. M. Skowroński: „Układy pompowe”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, str.247, 2009.
- [2]. W. Misiewicz, A.Misiewicz: „Napędy regulowane w układach pompowych źródeł ciepła”, Krajowa Agencja Poszanowania Energii, str.25, 2008.
- [3]. W. Jędral: „Pompy wirowe”, Wydawnictwo Naukowe PWN, str.223, 2001.
- [4]. W. Misiewicz: „Wybrane zagadnienia optymalizacji układów pompowych i ich regulacja zmienobrotowa”, Maszyny elektryczne - Zeszyty Problemowe", 78, str. 48, 2007.
- [5]. Z. Bajorek: „Maszyny elektryczne”, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, str. 228, 1980.

## Podziękowania

*Autorzy składają podziękowanie Dyrekcji PEC Stargard Szczeciński za zgodę na upowszechnienie danych eksploatacyjnych ciepłowni, na-*

*tomiast Panu mgr inż. Adamowi Głębockiemu  
za ich staranne przygotowanie.*

**Autorzy**

inż. Jacek Murawski  
Elektromontaż Toruń Sp. z o.o.  
87-100 Toruń, ul. Na Zapleczu 20  
email: j.murawski@elektromontaz-torun.pl

dr inż. Andrzej Misiewicz  
Zakład Przepływowych Maszyn Energetycznych  
ENERGOM s.c.  
58-100 Świdnica, ul. Ślązańska 13  
e-mail: andrzej.misiewicz@energom.com.pl