

**Jerzy Przybylski, Zbigniew Szulc**  
Politechnika Warszawska, Warszawa

## **DOŚWIADCZENIA Z EKSPLOATACJI NAPĘDÓW POMP DUŻYCH MOCY Z SILNIKAMI ZASILANYMI Z PRZEMIENNIKÓW CZĘSTOTLIWOŚCI ŚREDNIEGO NAPIĘCIA 6kV - EFEKTYWNOŚĆ EKSPLOATACJI NAPĘDÓW REGULOWANYCH DUŻYCH MOCY**

### **EXPERIENCES FROM APPLICATIONS BIG POWER PUMP ELECTRICAL DRIVES WITH FREQUENCY CONVERTERS 6kV – EFFICIENCY OF APPLICATION CONTROL BIG POWER ELECTRICAL DRIVE**

**Abstract:** The paper presents results of experiences from applications big power electrical drives in Poland. In electrical drive was applying frequency converter to medium voltage – 6kV. Very well project and applying of new frequency converter medium voltage 6kV, motor and pump drive and keeping the input and output currents and supplying voltage in sinusoidal wave from allow to increase the efficiency of pump and the efficiency electrical energy of pump or ventilators drive. The paper describes different main circuits of frequency converters with selecting inputs of converter for decreases of losses and influencing to the supply network. In the paper also describes criteria's to projects and to applying these electrical drives and economical effects.

#### **1. Wstęp**

Autorzy artykułu przedstawiają doświadczenia z projektowania i eksploatacji regulowanych napędów pomp dużych mocy zainstalowanych w ostatnich latach w Polsce. Doświadczenia zebrane przez autorów artykułu w czasie eksploatacji napędów dotyczą pomp o mocach powyżej 1250kW i obejmują zagadnienia dotyczące sygnałów zasilających silniki napędowe i stopień odkształceń w sieciach zasilających te układy (HD i THD prądów i napięć). Zebrane dane z pracy napędów pomp obejmują okres kilku lat i zostały zarejestrowane w kilku elektrociepłowniach w Polsce. W artykule przedstawiono także kryteria doboru takich układów napędowych oraz efekty techniczno-ekonomiczne ich zastosowania w określonych obiektach, np. energochłonność przesyłu wody kWh/m<sup>3</sup> przetłoczonego medium.

Potrzeba automatyzacji procesów technologicznych i efektywność wykorzystania energii w tych procesach wymusza potrzeby modernizacji sterowania i zasilania w energię elektryczną urządzeń realizujących różne technologie. Wśród tych istotnymi stają się zwłaszcza te, gdzie uzyskane efekty techniczne i ekonomiczne są największe. W niedawnej przeszłości ograniczenia techniczne budowy urządzeń regulowanych dużych mocy i w pełni sterowanych nie są obecnie przeszkodą. Stąd

coraz częściej obecnie wykonywane nowe inwestycje lub realizowane modernizacje obiektów istniejących dotyczą urządzeń elektrycznych dużych mocy (powyżej 1MW). Spośród tych urządzeń dużych mocy napędy pomp i wentylatorów stanowią znaczącą część. Zarówno wielkość mocy silników napędowych jak też proces technologiczny, w którym sytuowane są pompy czy wentylatory powoduje, że do zasilania silników napędów pomp są obecnie stosowane przemienniki częstotliwości. Zmiany parametrów technologicznych tych urządzeń (ciśnienie, wydajność) są realizowane przez regulację prędkości obrotowej pomp. Przemieniki częstotliwości realizują zmianę prędkości pomp przez regulację częstotliwości napięcia zasilania silnika.

W czasie procesu projektowego układu napędowego (silnik wraz z układem zasilania - w tym wypadku przemiennikiem częstotliwości) oprócz właściwego doboru mocy tych urządzeń oraz nominalnych parametrów elektrycznych (napięcie, prąd) powinno także uwzględnić się procesy i skutki negatywnego oddziaływania zastosowanych energoelektronicznych urządzeń regulacyjnych na sieć zasilającą (dbałość o „środowisko energetyczne”), kryterium właściwego zakresu zmian prędkości oraz szereg właściwości ekonomicznych. Wśród właściwości ekonomicznych projektant powinien

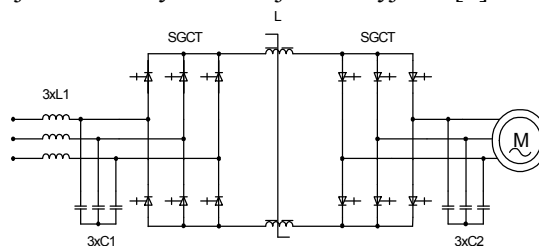
uwzględnić koszt inwestycji (ewentualnie modernizacji), co będzie przekładać się na określenie czasu zwrotu nakładów inwestycyjnych oraz organizacja i koszty eksploatacji parku maszynowego (w tym zwłaszcza silników napędu, części zamienne etc.).

Problemy przy projektowaniu i eksploatacji napędów tego rodzaju i dużej mocy urządzeń to zastosowanie urządzeń przystosowanych do zasilania silników budowy klasycznej (tańsze od wykonań specjalnych)

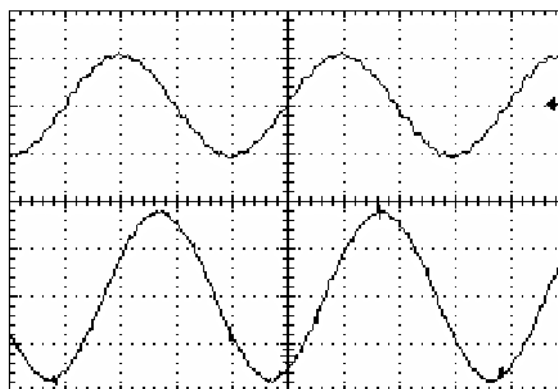
## 2. Przemienneiki częstotliwości do silników SN

Silniki indukcyjne średniego napięcia (SN) są często stosowane w praktyce dla mocy znamionowej już od 250 kW. W Polsce najczęściej stosuje się napięcie średnie o wartości 6 kV dla typowych silników do lat 90 – tych ubiegłego wieku, ze względu na napięcie znamionowe półprzewodnikowych elementów sterowanych (rzędu 1500V) nie konstruowano przemienników częstotliwości (PCz) na napięcie wyjściowe większe niż 690V. Z tych względów zaczęto konstruować silniki dużej mocy (nawet powyżej 1 MW) na niskie napięcie (NN) znamionowe (400V, 500V, 690V). Prądy znamionowe tych silników wynoszą powyżej 1 kA. Wkłady napędowe budowane z PCz NN na duże moce wymagają łączenia równoległego kabli w fazach zasilających silnik lub dwóch oddzielnych uzwojeń stojana. Ze względu na kształt napięcia wyjściowego tych PCz NN (metoda kształtowania napięcia – PWM) kable zasilające silnik muszą być ekranowane, a łożyska lub tarcze łożyskowe izolowane. Silnik dużej mocy NN nie ma prostej możliwości zasilania z sieci elektroenergetycznej, gdyż nie są typowymi wartościami napięcia 500 V, 690 V trzeba stosować oddzielny transformator niż przy zasilaniu PCzNN. Z powyższych względów w połowie lat 90 – tych ubiegłego wieku istniały silne tendencje zbudowania PCz dla napięcia SN o wartościach 2,4 kV; 3,3 kV; 4,16; 6 kV; 6,6 kV, a w ostatnich latach [1] nawet 11 kV. Konstrukcje PCzSN dążą do sinusoidalnego kształtu napięcia wyjściowego i sinusoidalnego kształtu prądu zasilającego. W [4] przedstawiono takie rozwiązania zastosowane w krajowej gospodarce. Na rys. 1 został przedstawiony PCzSN spełniający takie właściwości. Struktura tego PCzSN oparta jest na zasto-

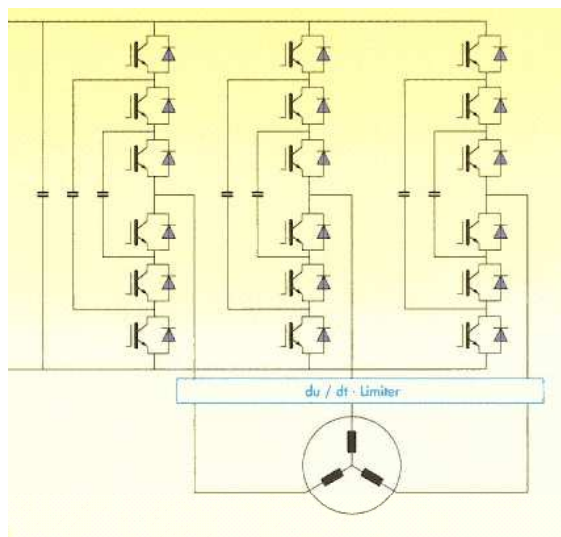
środku prądu w obwodzie DC i filtrów pojemnościowych na wejściu i wyjściu [5].



Rys. 1. PCzSN ze źródłem prądu w obwodzie DC i sinusoidalnym kształtowaniem napięcia wyjściowego i prądu wejściowego



Rys. 2. Oscylogram przebiegu prądu wejściowego /przebieg górny/ i napięcia wyjściowego /przebieg dolny/ w PCzSN ze źródłem prądu

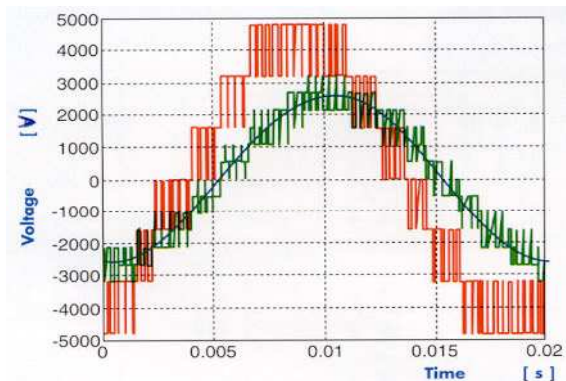


Rys. 3. PCzSN ze źródłem napięcia w obwodzie DC oraz wielopoziomowym kształtowaniem napięcia wejściowego

Na rys.3 został przedstawiony PCzSN o właściwościach zbliżonych do poprzedniego i oparty o źródło napięcia w obwodzie DC oraz

wielopoziomowym kształtowaniu napięcia wejściowego.

Oba PCzSN formują kształt napięcia wyjściowego o współczynniku THDU < 5% oraz prąd zasilający o współczynniku THDI < 5% i cosinusa kąta przesunięcia pierwszej harmonicznej prądu wejściowego względem napięcia nie mniejszym niż 0,9.

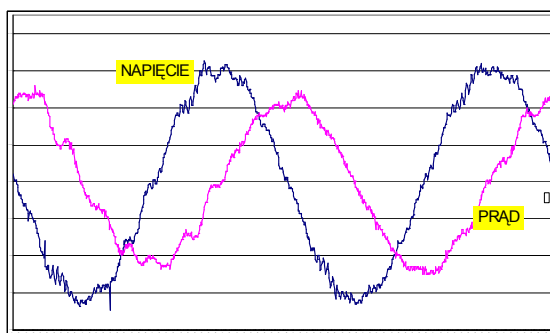


Rys. 4. Napięcie wyjściowe z przemiennika częstotliwości wielopoziomowego

### 3. Przykłady zastosowań p.cz. 6kV

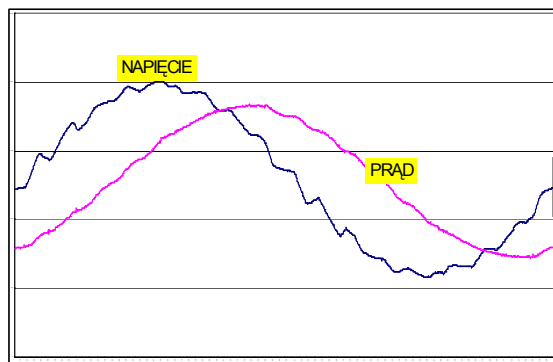
Od 2000 roku zrealizowano szereg napędów z regulowaną prędkością przy wykorzystaniu do sterowania przemiennika częstotliwości średniego napięcia. W większości były to przemienniki na napięcie 6kV. W tej części artykułu zostaną przedstawione wyniki z badań i obserwacji pracy niektórych z tych urządzeń.

Pierwsze w Polsce zastosowanie przemiennika częstotliwości na 6kV zostało zrealizowane w 2000 roku i był to napęd o mocy 1310 kVA do pompy wody sieciowej. Na Rys. 5 przedstawiono oscylogram prądu zasilającego silnik o mocy 1250kW.



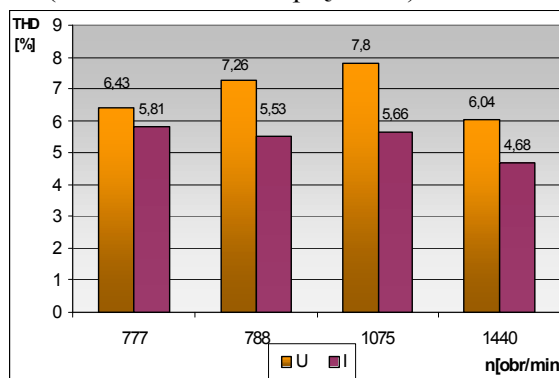
Rys. 5. Napięcie i prąd wyjściowy przemiennika częstotliwości /f=20 Hz/

Kształt prądu, jak też napięcia zasilającego uzwojenia silnika asynchronicznego są bardzo zbliżone do harmonicznych, co pozwoliło wykorzystać klasyczną budowę silnika.



Rys. 6. Napięcie i prąd wyjściowy przemiennika częstotliwości /f=48 Hz/

Zawartość harmonicznych jest mała i nie przekracza 5,8% dla prądu i 7,8% dla napięcia zasilającego silnik. Na Rys. 7 przedstawiono wykres zawartości współczynnika harmonicznych (THD) przy zmianach prędkości silnika, z czym dla pompy wiąże się zmiana wartości obciążenia (z kwadratem zmian prędkości).



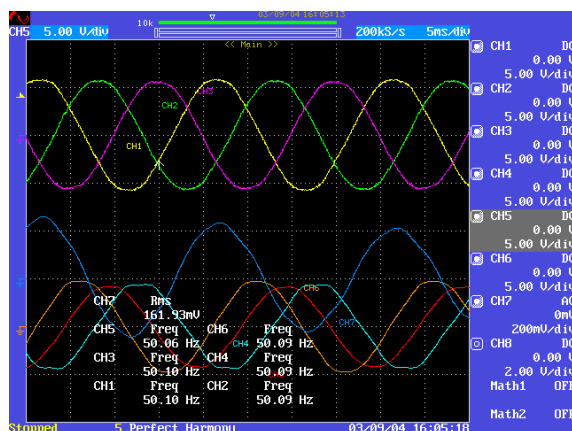
Rys. 7. Wykres zawartości harmonicznych w napięciu i prądzie zasilającym silnik w funkcji prędkości obrotowej silnika.  $THDU[\%]=f(n)$ ,  $THDI[\%]=f(n)$

$$THD_{I\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad THD_{U\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} U_h^2}}{U_L} \cdot 100 \quad (1)$$

Układ napędowy z przekształtnikiem o mocy 1310kVA był zasilany falownikiem prądu.

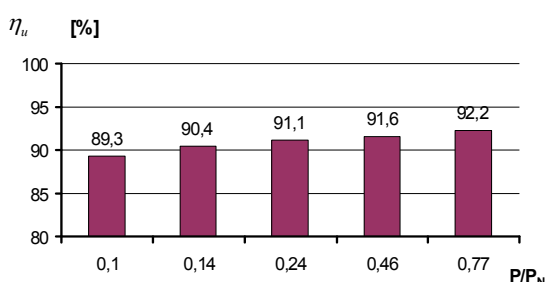
Podobne odkształcenia prądu i napięcia zasilającego silnik (o małych odkształceniach od sinusoidalnych) uzyskano stosując falownik napięcia jako źródło zasilania o regulowanej częstotliwości silnika asynchronicznego o mocy 2MW. Był to wielopoziomowy przemiennik częstotliwości o 13 poziomach kształtowanego napięcia wyjściowego z przemiennika częstotliwości.

Przebieg prądu zasilającego uzwojenie silnika asynchronicznego o mocy 2MW z wielopoziomowego falownika napięcia przedstawiono na Rys.8.



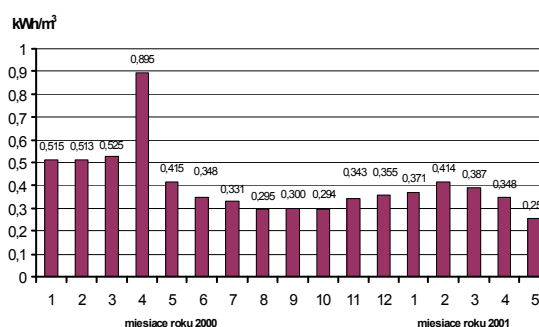
Rys. 8. Oscylogramy prądów i napięć wyjściowych z wielopoziomowego falownika napięcia o mocy 2MW

W czasie całego procesu zmian prędkości (obciążenia) układ napędowy wykazywał dużą sprawność energetyczną. Na Rys.9. przedstawiono wykres zmian sprawności energetycznej.



Rys. 9. Sprawność układu napędowego w funkcji mocy obciążenia układu napędowego

Skutki stosowania regulowanego napędu pompy w jednej z elektrociepłowni to przede wszystkim zmniejszenie kosztów transportu wody. Na Rys.10 przedstawiono wykres zmian kosztów przetłoczenia 1m<sup>3</sup> wody po zainstalowaniu napędu regulowanego z przemiennikiem częstotliwości o napięciu 6kV. Jak wspomniano wcześniej ważną przesłanką przy projektowaniu, a następnie eksploatacji nowoczesnego układu napędowego jest stopień oddziaływania układu energoelektronicznego na sieć zasilającą.



Rys. 10. Zużycie energii elektrycznej na przetłoczenie 1m<sup>3</sup> wody grzewczej w pompowni sieciowej po zastosowaniu przemiennika częstotliwości 1310 kVA, 6 kV w EC

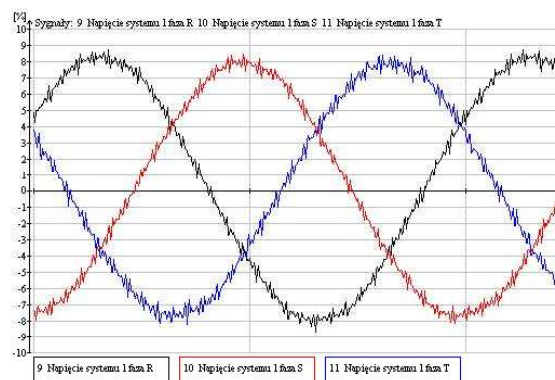
Wielkość oddziaływań jest określana dopuszczalnymi współczynnikami odkształceń THD dla prądów i napięć. Dopuszczalne odkształcenia w napięciach zasilających są określone Rozporządzeniem Ministra Gospodarki.

Współczynniki odkształcenia napięcia oraz zawartość poszczególnych harmonicznych odniesionych do harmonicznej podstawowej nie mogą przekraczać /Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 Standardy jakościowe obsługi odbiorców/.

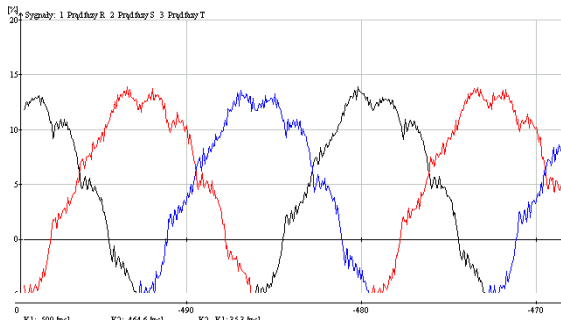
Tabela. 1

	U > 110 kV	110 kV > U > 30 kV	30 kV > U > 1 kV	U < 1 kV
THD <sub>U</sub> [%]	1.5	2.5	5.0	8.0
HDU <sub>U</sub> [%]	1.0	1.5	3.0	5.0

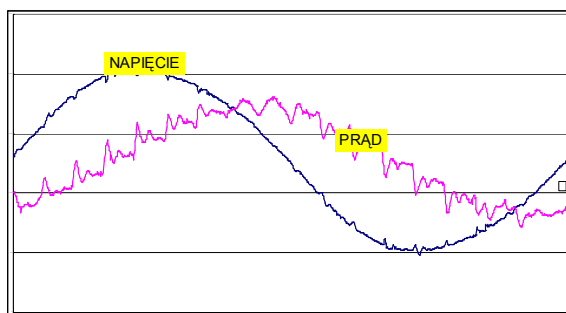
Na rys.11. przedstawiono oscylogram napięć i prądów zasilających przemiennik częstotliwości o mocy 1310kVA.



Rys. 11a. Oscylogram napięć zasilających przemiennik częstotliwości o mocy 1310kVA



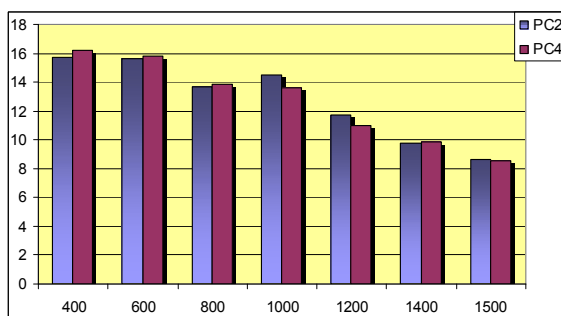
Rys. 11b. Oscylogram prądów zasilających przemiennik częstotliwości o mocy 1310kVA przy 70% obciążenia nominalnego



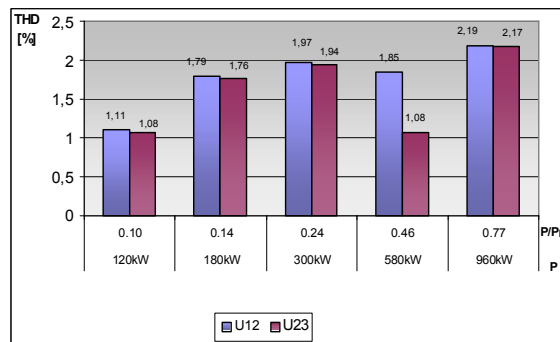
Rys. 12. Oscylogramy przebiegów napięcia i prądu zasilającego przemiennik częstotliwości o mocy 1310 kW dla zmiennych wartości prędkości

Stopień odkształcenia sieci zasilającej 6kV jest niewielki, a współczynnik odkształcenia tej sieci jest przedstawiony na Rys.13. Wykres powstał dla zmiennej prędkości silnika wynikającej z potrzeb technologicznych (potrzeba zmian wydajności pompy tłoczącej ciepłą wodę).

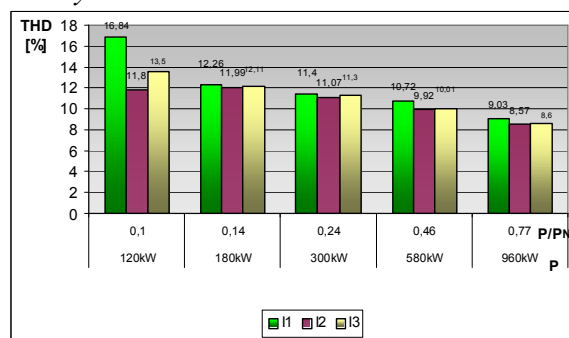
Podczas zmian prędkości zmienia się oczywiście wielkość obciążenia pompy. Wraz ze wzrostem prędkości (częstotliwości zasilania silnika) maleje stopień odkształcenia prądu zasilającego, a także napięcia sieci 6kV.



Rys. 13. Wykres zmian współczynnika THDI prądu zasilającego przemiennik częstotliwości o mocy 1310 kVA



Rys. 14. Wykres zawartości harmonicznych w napięciu 6 kV zasilającym transformator funkcji mocy obciążenia układu napędowego o mocy 1310 kVA



Rys. 15. Wykres zawartości harmonicznych w prądzie zasilającym transformator funkcji mocy obciążenia układu napędowego

#### 4. Ocena efektywności energetycznej układów napędowych z PCzSN

Jednym ze sposobów ilościowego przedstawienia efektywności energetycznej układu napędowego jest podanie wartości wskaźników energetycznych w całym zakresie zmian eksploatacyjnych jednego z parametrów wyjściowych napędzanej maszyny roboczej [2]. Innym sposobem jest obliczenie lub pomiar typowych wartości wielkości energetycznych układu napędowego w zakresie zmian eksploatacyjnych. Autorzy proponują na etapie badań symulacyjnych układu napędowego wyznaczyć moc czynną, bierną i wartość skuteczną prądów wyższych harmonicznych w prądzie zasilającym. Ze względu na odkształcony charakter prądów i napięć wziąć do obliczeń moc czynną na wejściu układu napędowego ( $P_{WE}$ ) określoną typowym wyrażeniem:

$$P_{WE} = 3 \sum_{h=1}^n U_{fh} I_{fh} \cos \varphi_h \quad (2)$$

Jako moc bierną rozważyć tylko moc bierną



( $Q_{WE}$ ) pierwszej harmonicznej prądu i napięcia wejściowego:

$$Q_{WE} = 3U_{f1}I_{f1} \cos \varphi_1 \quad (3)$$

Wartość skuteczną prądów wyższych harmonicznych w prądzie zasilającym obliczyć można z wyrażenia:

$$I_{WEh} = \sqrt{\sum_{h=2}^n I_{fh}^2} \quad (4)$$

$U_{fh}$  – wartość skuteczna napięcia fazowego  $h$  – tej harmonicznej

$I_{fh}$  – wartość skuteczna prądu fazowego  $h$  – tej harmonicznej

$\cos \varphi_h$  – cosinus kąta przesunięcia pomiędzy napięciem i prądem fazowym  $h$  – tej harmonicznej napięcia i prądu

$n$  – rząd harmonicznej wziętej jako ostatni do obliczeń.

Takie obliczenie wartości mocy i prądów ma tę zaletę, że można porównać z rzeczywistymi pomiarami, gdyż są one mierzalne przez typowe mierniki uwzględniające odkształcony charakter prądów i napięć. Tak przyjęte wielkości są jednoznacznie definiowane [3] i porównać je można w różnych układach napędowych bez względu na ich zasady działania. W praktyce łatwiej jest wyznaczać zużycie energii czynnej lub biernej (pierwszej harmonicznej prądu i napięcia) na przetłoczenie  $1m^3$  medium oraz THDI prądu zasilającego [4]. Na przedstawionych wykresach w poprzednim rozdziale były stosowane takie wyniki pomiarów. Lepszym i dokładniejszym opisem efektywności energetycznej są jednak wyrażenia przedstawione przez zależności (2), (3), (4).

W Tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów wielkości  $P_{WE}$ ,  $Q_{WE}$ ,  $I_{WEh}$  układu napędowego pompy sieciowej [6]. Na etapie projektowania były prowadzone badania symulacyjne układów napędowych dobieranych dla tej pompy sieciowej. Wybrano układ przedstawiony w [4], który pracuje w sposób ciągły od 6 lat.

Tabela 2

$Q/Q_N$	0,525	0,532	0,726	0,973
$P_{WE}[\text{kW}]$	161	181	478	1121
$Q_{WE}[\text{kVAr}]$	383	464	678	611
$I_{WEh}[\text{A}]$	4,14	5,13	6,86	7,87

W tabeli 2 zmienną niezależną jest natężenie przepływu  $Q$  pompy. Wyniki badań symulacyjnych były zbieżne z wynikami pomiarów (błąd  $<5\%$ ).

## 5. Podsumowanie i wnioski:

- W kraju jest zastosowanych kilka układów o mocach 1,25MW -2MW
- Duża sprawność układu i pożądane efekty technologiczne (Siekierki mogą regulować same ilość ciepła dla W-wy w zależności od zmian pogodowych), zastosowania innych rozwiązań (np. kaskad, sprzęgieł) jest dziś praktycznie nieefektywne
- Problemy oddziaływania na sieć są praktycznie do określenia i wyznaczenia przy wykonaniu dobrego projektu i przyjęciu właściwej koncepcji rozwiązania
- Dziś nie ma pytania czy stosować takie rozwiązania, tylko gdzie je stosować i określić czas zwrotu nakładów finansowych.

## 6. Literatura

- [1]. Katalog TM drive –TMEIC 2007
- [2]. Szulc Z., Koczara.W.: Poprawa efektywności energetycznej układu napędowego z silnikiem indukcyjnym średniego napięcia poprzez jego zasilanie z przemiennika częstotliwości, EENSE, Podlesice 2005
- [3]. Strzelecki R., Supronowicz H.: Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2000
- [4]. Szulc Z., Przybylski J., i zespół: Badania układu napędowego pompy wody sieciowej w EC Ostrołęka. Praca dla przemysłu, ISEP PW, 2000
- [5]. Szulc Z., Przybylski J.: Zastosowanie przemienników częstotliwości średniego napięcia z prądem wejściowym kształtowanym sinusoidalnie do pomp wirowych dużej mocy, PEMINE, Ryto, 2007