

Włodzimierz Koczara, Zbigniew Szulc, Politechnika Warszawska, Warszawa
Tomasz Kubera, PKN Orlen, Płock

ZASADY DOBORU UKŁADU NAPĘDOWEGO Z PRZEMIENNIKIEM CZĘSTOTLIWOŚCI ŚREDNIEGO NAPIĘCIA I SILNIKIEM INDUKCYJNYM KLATKOWYM O ZNAMIONOWYCH PARAMETRACH: MOCY 3150kW, NAPIĘCIA 6kV, CZĘSTOTLIWOŚCI 72,5Hz DO POMP WODY ZASILAJĄCEJ

THE RULES OF DRIVE SYSTEM'S SELECTION WITH MEDIUM VOLTAGE'S FREQUENCY CONVERTER AND INDUCTION CAGE MOTOR WITH NOMINAL PARAMETERS OF: POWER 3150 kW, VOLTAGE 6 kV, FREQUENCY 72,5 Hz FOR A WATER SUPPLY PUMPS

Abstract: In this paper, the criteria for the selection elements of the drive system water supply pump are presented. Currently, drive system with fluid coupling is used, which make a base for creating a new type of drive systems. Considered drive systems consists of squirrel-cage motor medium volatge and medium voltage invertor. The selection was dependent on qualitative and quantitative criteria, which describe technical, operating and economic properties. There were described three types of drive systems with medium volatge invertor. Moreover, application of new drive system with fluid coupling VORECON was considered. Based on characteristics of selected pump and predicted working point, calculated power input of drive systems, energy efficiency and distortion factor of input current. Obtained results allowed to quantify of mentioned drive systems. Further evaluation could be made based on propertis of drive system not included in this study. Presented method of drive system selection could be useful in practice design.

1. Wstęp

Układ napędowy pompy wody zasilającej (PWZ) jest najczęściej największym, pod względem mocy (zainstalowanej i pobieranej) odbiornikiem energii elektrycznej w obiektach wytwarzających energię cieplną lub (i) elektryczną. Wartości mocy znamionowej silników napędowych sięgają kilku MW.

Regulacja parametrów wyjściowych (ciśnienie, natężenie przepływu) PWZ odbywa się w większości zastosowań poprzez zmianę prędkości obrotowej. Ze względu na dużą moc, najlepsze efekty minimalizacji dostarczanej do pompy poprzez wał napędowy energii mechanicznej, daje właśnie zmiana (regulacja) prędkości obrotowej. Również dynamika regulacji parametrów wyjściowych pompy stawia wymagania, które najlepiej realizowane są poprzez zmianę prędkości obrotowej wału napędowego. Energię mechaniczną, poprzez wał napędowy dostarcza silnik elektryczny. Dla dużych bloków energetycznych (powyżej 200 MW) są również stosowane do napędu pomp zasilających turbiny parowe.

Najwygodniejszym w eksploatacji silnikiem elektrycznym jest silnik indukcyjny klatkowy

średniego napięcia (dla mocy od setek kW). Do końca ubiegłego wieku regulacja prędkości obrotowej takiego silnika poprzez przemiennik częstotliwości średniego napięcia (PCSN) była trudna do realizacji przemysłowej. Konstrukcje PCSN były wówczas skomplikowane, drogie i zawodne. Najczęstszym rozwiązaniem praktycznym było i jest stosowanie sprzęgła hydrokinetycznego (SH) zasilanego silnikiem indukcyjnym klatkowym. Takie rozwiązanie spełnia wymagania eksploatacyjne pompy wody zasilającej (PWZ), ale ma jedną wadę – niskie wartości sprawności, malejące ze zmniejszeniem prędkości obrotowej.

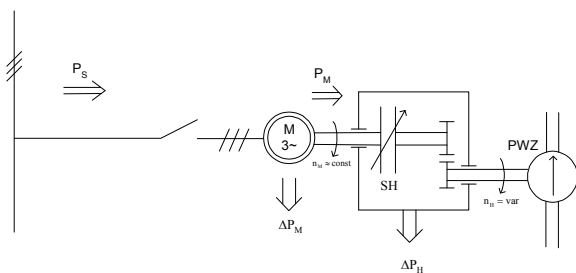
Konstrukcja sprzęgła hydrokinetycznego (SH) ma jeszcze jedną zaletę. Umożliwia uzyskanie prędkości obrotowych powyżej 3000 obr/min poprzez zastosowanie mechanicznej przekładni podwyższającej w jednej konstrukcji łącznie z układem regulacji prędkości obrotowej. Wymiary PWZ i sprawność energetyczna zależą od znamionowej prędkości obrotowej. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej (znamionowej wartości) maleją wymiary geometryczne PWZ, a sprawność rośnie. Z tych względów wartości

dużych pod względem mocy PWZ budowane są dla prędkości obrotowych znamionowych o wartościach powyżej 3000obr/min. Układem napędowym elektrycznym, który może spełnić takie wymagania jest PCSN o częstotliwościach wyjściowych większych od 50Hz i silnik indukcyjny klatkowy średniego napięcia (SISN) o częstotliwości znamionowej powyżej 50Hz. W artykule zostały przedstawione wyniki rzeczywistego doboru takiego układu napędowego w oparciu o rozwiązania przemysłowe.

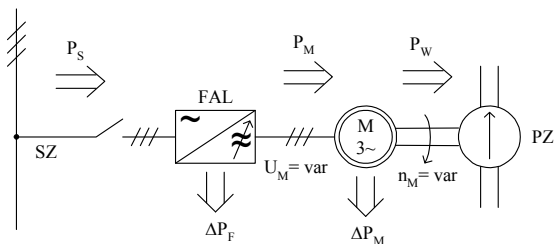
2. Kryteria doboru układu napędowego PWZ

Na rys. 1 został przedstawiony, najczęściej stosowany układ napędowy PWZ dla kotła o wydajności 420 t/h pary. Ten kocioł posiada dwie PWZ - jedna pracuje, a druga jest rezerwowa [1].

Na rys. 1 zostały zaznaczone straty mocy w silniku (ΔP_M) i w SH (ΔP_H). Poprzez (P_S) oznaczono moc pobieraną z sieci zasilającej przez układ napędowy, a przez (P_M) moc przekazywaną przez wał silnika do PWZ. Na rys. 2 został przedstawiony nowy układ napędowy, który zawiera (PCSN) przemiennik częstotliwości (FAL) oraz nowy silnik (o znamionowej częstotliwości 72,5 Hz). Przez (ΔP_F) oznaczono straty mocy w falowniku, a przez (U_M) – napięcie silnika (zasilanego z przemiennika). Moc przekazywaną przez silnik do pompy oznaczono przez (P_W).



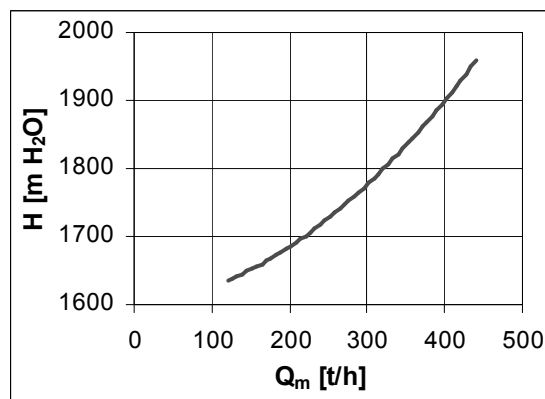
Rys. 1. Schemat ideowo – blokowy obecnego zespołu napęd – pompa wody zasilającej



Rys. 2. Schemat ideowo – blokowy nowego zespołu układ napędowy – pompa wody zasilającej

Wybór układu napędowego z PCSN i nowym silnikiem został poprzedzony doбором pompy PWZ. Musi ona spełniać wymagania technologiczne (eksploatacyjne wartości ciśnień na wejściu i wyjściu PWZ oraz wymagany zakres zmian natężeń przepływu) i równocześnie spełniać warunek dużej wartości sprawności energetycznej. Podstawowe parametry znamionowe tej pompy wynoszą (dla temperatury 165°C):
 Natężenie przepływu (wydajność): 470 m³/h
 Wartość podnoszenia (ciśnienie): 1900 m
 Prędkość obrotowa 4200 obr/min
 Sprawność energetyczna w zakresie zmian wydajności od 350 m³/h do 550 m³/h większe od 80 %.

Na rys. 3 została przedstawiona charakterystyka przepływowa $H=f(Q)$ – ciśnienie w funkcji wydajności masowej obiektu zasilanego przez pompę PWZ. Na tej podstawie oraz charakterystyk energetycznych pompy wyznaczono zapotrzebowanie mocy na wale silnika napędowego przy określonej prędkości.



Rys. 3. Charakterystyka przepływowa $H=f(Q_m)$ ciśnienia w funkcji wydajności masowej obiektu zasilanego przez pompę PWZ

Analizę zastosowanie nowego układu napędowego PWZ przeprowadzono w oparciu o kryteria obejmujące jakościowy, (a więc raczej subiektywny oparty na doświadczeniu) wybór oraz kryteria ilościowe pozwalające oszacować wartości parametrów istotnych dla eksploatacji. W tabeli 1 zostały przedstawione kryteria według ważności oceniane punktowo i wartość punktowa danego kryterium. Minimalna ocena kryterium wynosi 0 punktów.

Rodzaj danego kryterium oraz jego wartość punktowa została wybrana po analizie efektów technicznych i ekonomicznych, jakie daje układ napędowy PWZ. Za najważniejsze kryterium (K1) uznano sprawność energetyczną układu napędowego. Oczywiście, największa jest też

ocena (30pkt) punktowa układu napędowego o najwyższej sprawności. Wartości sprawności danego układu napędowego w funkcji prędkości obrotowej i momentu na wale zostały podane przez producenta. Są one oparte na pomiarach i obliczeniach, ich rzetelność może być sprawdzona po zastosowaniu danego układu.

Tabela 1. Kryteria oceny układu napęd z pompą

Nr	Kryterium	Wartość [pkt]
K1	sprawność energetyczna	30
K2	współczynnik odkształcenia prądu zasilającego	20
K3	odporność układu na zmiany napięcia zasilającego	15
K4	wymiary zewnętrzne	15
K5	cena układu	15
K6	niezawodność układu	10
K7	warunki gwarancji	10
K8	dostępność serwisu	10
K9	możliwość wykonania testów SAT	10
K10	dynamika zmian prędkości obrotowej	5
K11	pełna DTR-ka w j. polskim	5
K12	język polski w panelu sterującym	5
K13	możliwość zasilania ze źródła awaryjnego	5
K14	ochrona przed porażeniem prądu	5
K15	rodzaj chłodzenia i smarowania	5
K16	liczba aplikacji krajowych i zagranicznych	5
K17	możliwość dostępu do pracujących aplikacji	5
K18	czas zwrotu zwiększonych nakładów na układ z przemiennikiem częstotliwości w stosunku do standardowego sprzęgła Voitha	5

Kolejnym ważnym kryterium (K2) jest współczynnik odkształcenia prądu zasilającego w funkcji obciążenia mocą wyjściową układu napędowego. Ze względu na ważność tego kryterium maksymalna wartość punktowa wynosi 20pkt. Trzy następne kryteria (K3, K4, K5) o możliwie maksymalnych liczbach punktowych

po 15pkt decydują o realnych szansach na zastosowanie wybranego układu napędowego. Obiekt przemysłowy, w którym ma pracować wybrany układ napędowy charakteryzuje się dużą dynamiką załączeń odbiorników elektrycznych o różnych mocach, lub ich zmianami obciążenia. Powoduje to wahania, przysiady, a nawet chwilowe wyłączenia napięcia zasilającego dany oddział zakładu. Stąd, ważna jest ocena układu napędowego ze względu na te zjawiska.

Również miejsce zainstalowania elementów układu napędowego (oprócz silnika) ma swoje określone właściwości (zawsze mogą powstać trudności ze znalezieniem miejsca np. dla PSCN o odpowiednich warunkach klimatycznych). Stąd wymiary PSCN, jego transformatora zasilającego lub innych elementów składowych są ważne. Ważnym kryterium jest cena układu napędowego (choć w tym wypadku nie najważniejsza), gdyż decyduje ona o możliwości modernizacji (lub budowy nowego obiektu).

Następne cztery kryteria (K6, K7, K8, K9) o maksymalnych liczbach punktowych po 10pkt dotyczą głównie przyszłej eksploatacji, a właściwie jej jakości. Niezawodność układu, podawana często jako liczba godzin pracy bez uszkodzeń jest często wielkością podawaną na podstawie eksploatacji określonej liczby rzeczywistych aplikacji pracujących skończoną liczbą godzin. Wtedy taka ocena jest najlepsza, jeżeli jest to odpowiednio duża liczba aplikacji pracująca już po kilka lat. Niestety często niezawodność jest podawana na podstawie szacowań.

Bardzo ważnym kryterium są warunki gwarancji (K7), gdyż rozpatrywane urządzenie przynosi efekty ekonomiczne, gdy pracuje tak jak każde. Jego uszkodzenie i długi czas przestoju bez naprawy decyduje o stratach w całym zakładzie. Wytwórca odpowiada za poprawną pracę w okresie gwarancji. Następne kryterium związane jest ściśle z poprzednim kryterium, gdyż dotyczy dostępności serwisu. Nawet najlepsze urządzenia może ulec awarii bez winy użytkownika. Wówczas szybka interwencja łagodzi skutki techniczne, a więc w konsekwencji ekonomiczne awarii (jeżeli trwa krótko dzięki interwencji serwisu). Sprawdzenie parametrów układu napędowego w warunkach eksploatacyjnych jest najlepszym testem. Możliwość wykonania takich testów u użytkownika (SAT)

daje duże prawdopodobieństwo poprawnej eksploatacji. Druga połowa kryteriów (od K10 do K18) chociaż punktowana najmniej (maksymalnie po 5 punktów) dotyczy istotnych zagadnień eksploatacyjnych. Kryterium (K10) dotyczy dynamiki zmian prędkości obrotowej, która może być określona ściśle ilościowo (np. przez podanie czasu (Δt) zmiany (Δn)) i zależy od dynamiki całego obiektu w którym pracuje napęd PWZ. Kryteria następne (K11, K12, K13, K14, K15) są wymaganiami ściśle eksploatacyjnymi i decydują o jakości prawidłowej pracy poznania urządzenia u użytkowników, którzy je stosują od konkretnego czasu. Kryteria K16 i K17, jeżeli są spełniane umożliwiają poznanie urządzenia u użytkowników, którzy je stosują od konkretnego czasu. Bezpośredni kontakt z obsługą urządzenia pozwala dość dobrze poznać zalety i wady układu napędowego. Ostatnie kryterium pozwala oszacować prosty czas zwrotu nakładów na układ napędowy z PCSN w stosunku do istniejącego (lub do innego rozpatrywanego układu), jeżeli został już wybrany do realizacji taki układ. 3. Analiza jakościowo – ilościowa układu napędowego.

W Tabeli 2 zostały zestawione wyniki oceny punktowej układów napęd – pompa wg kryteriów K1 ÷ K18. Ocena została wykonana dla czterech rodzajów układów napędowych z tą samą dobraną pompą przy czym oznaczono:

SI – układ napędowy z PCSN typu trójpoziomowy przemiennik napięcia.

RA – układ napędowy z PCSN typu prądowy przemiennik z filtrem wyjściowym pojemnościowym.

TM – układ napędowy z PCSN typu siedmio-poziomowy przemiennik napięcia

SV – układ napędowy ze sprzęgłem hydrokinetycznym

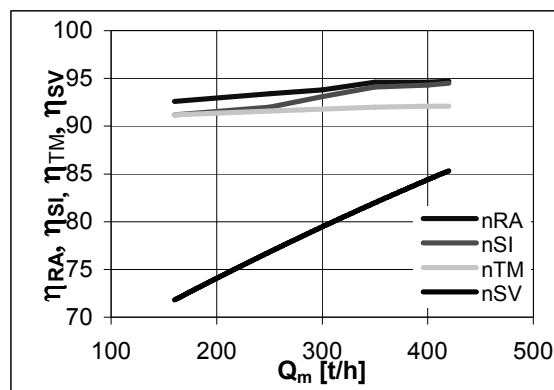
Wszystkie te układy napędowe zostały opisane w [1] i [2]. Najwięcej punktów otrzymały dwa rozwiązania układów napędowych SI – 151 pkt i RA – 152 pkt. Rozwiązanie typu układ napędowy ze sprzęgłem hydrokinetycznym (SV) został rozpatrywany jako układ odniesienia najczęściej obecnie stosowany. Jak wspomniano we wstępie, powyższa ocena punktowa odnosi się do konkretnej aplikacji (elektrociepłownia przemysłowa, w której mają być modernizowane napędy PWZ i budowa nowego bloku energetycznego z nową PWZ). Do dalszych rozważań tej konkretnej aplikacji można wybrać dwa typy układów napędowych, które otrzymały najwięcej punktów. Poniżej rozpa-

trzano najważniejsze właściwości najlepszego pod względem punktowym układu napędowego – RA.

Tabela 2. Ocen punktowa układów napęd – pompa

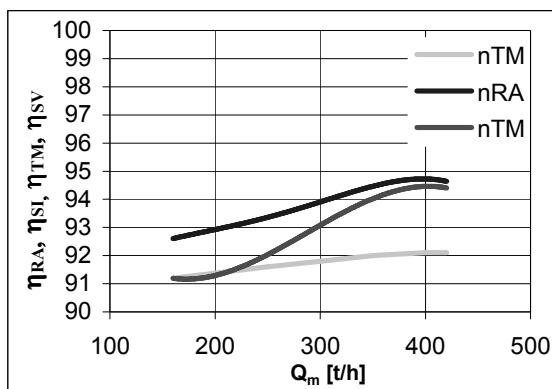
Oferta	SI	RA	TM	SV
Kryterium				
K1	20	30	10	0
K2	14	10	16	20
K3	15	8	12	5
K4	12	15	8	5
K5	12	8	5	15
K6	6	8	4	10
K7	10	10	10	10
K8	10	10	10	10
K9	10	10	10	10
K10	4	5	2	0
K11	5	5	5	5
K12	5	5	5	5
K13	5	5	5	0
K14	5	5	5	5
K15	5	5	0	5
K16	5	4	0	5
K17	5	5	0	5
K18	5	4	3	0
SUMA P-W	151	152	110	115

Najważniejsze właściwości układu napędowego RA – sprawność energetyczna została przedstawiona w postaci zależności od wydajności masowej pompy w zakresie jej wartości eksploatacyjnej. Zależność ta została przedstawiona na rys. 4 w porównaniu ze sprawnościami wszystkich rozważanych układów napędowych.



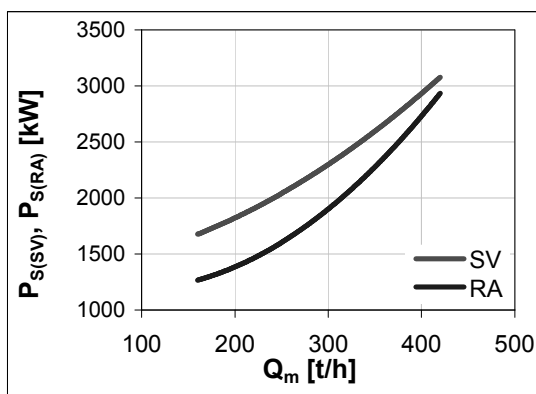
Rys. 4. Sprawności energetyczne układów napędowych w funkcji wydajności masowej (przemiennik częstotliwości z transformatorem (lub bez) oraz silnik napędowy) w porównaniu ze sprzęgłem Voitha (przekładnia typu RK

Natomiast na rys. 5. porównano te zależności tylko dla falownikowych układów napędowych (z PCSN). Na tym rysunku widać wyraźnie różnice sprawności pomiędzy tymi układami. Porównując sprawności układów napędowych z PCSN i układem napędowym ze SH (SV) otrzymuje się różnicę sprawności dochodzącą do 20% przy minimalnej eksploatacyjnej wydajności masowej PWZ ($Q_m = 160\text{t/h}$).



Rys. 5. Sprawności energetyczne układów napędowych falownikowych w funkcji wydajności masowej

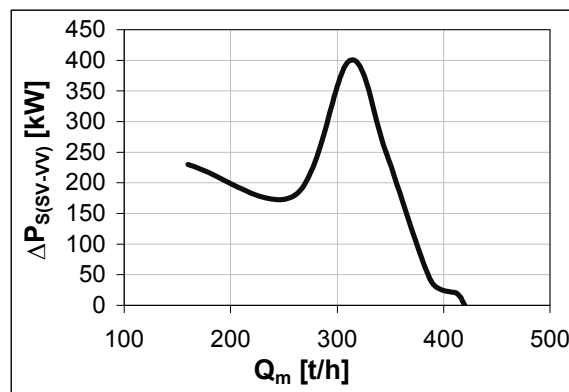
Dodatkowo wykonano symulację poboru mocy czynnej (P_s) układów napędowych RA i SV w funkcji wydajności masowej (Q_m). Wyniki symulacji zostały przedstawione na rys. 6.



Rys. 6. Pobór mocy z sieci zasilającej przez układ napędowy firmy RA ($P_{S(RA)}$) i sprzęgła Voitha (SV) ($P_{S(SV)}$) w funkcji wydajności masowej

Podobne symulacje zrobiono dla pozostałych układów napędowych. Na podstawie harmonogramu pracy PWZ w ciągu roku [1] obliczono oszczędność energii elektrycznej [w MWh]. Wykonano obliczenia w porównaniu z obecnym układem napędowym (SV – SH) oraz z nowym układem napędowym sprzęgła hydrokinetycznego oznaczonym przez producenta

symbolem VORECON. Sprawność energetyczna sprzęgła hydrokinetycznego typu VORECON jest znacznie wyższa niż klasycznego sprzęgła dotychczas stosowanego. Na rys. 7 został przedstawiony wykres oszczędności mocy po zastosowaniu VORECON – a w porównaniu ze sprzęgłem klasycznym.



Rys. 7. Oszczędność mocy po zastosowaniu VORECONA w porównaniu ze sprzęgłem Voitha

Widać wyraźnie dużą różnicę, ale tylko w pobliżu jednego punktu pracy PWZ ($Q_m = 320\text{t/h}$). Taki przebieg wynika z charakteru sprawności tego sprzęgła (VORECON) w funkcji jego obciążenia.

Wyniki obliczeń oszczędności energii po ewentualnym zastosowaniu napędów falownikowych (z PCSN) lub nowego sprzęgła hydrokinetycznego typu VORECON zostały przedstawione w tabeli 3. Nakłady na realizację napędów falownikowych (połowa roku 2009) zostały przedstawione w tabeli 4.

Tabela 3. Oszczędność energii elektrycznej

Oszczędność roczna energii [MWh]	W porównaniu z obecnym układem	W porównaniu z nowym układem sprzęgła
Firma		
SI	4362	2280
RA	4443	2350
TM	4240	2180

Na tej podstawie oszacowano prosty czas zwrotu nakładów, które zostały przedstawione w tabeli 5. Jako cenę 1MWh energii elektrycznej przyjęto wartość 240PLN (w obiekcie rozpatrywanym przyjmuje się taką cenę do obliczeń obiektów, które będą realizowane po 2010 roku).

Tabela 4. Nakłady na napędy falownikowe

Firma	NAKŁADY (tys. €)
SI	620
RA	647
TM	925

Tabela 5. Czasy zwrotów nakładów (lata)

Firma	Wymiana całego zespołu	W porównaniu z nowym zespołem pompa – napęd ze sprzęgła
	t_{z1}	t_{z2}
SI	2,66	1,94
RA	2,73	2,09
TM	4,09	3,65

Powyższe wyniki symulacji i obliczeń jako wartości parametrów PCSN i silników napędowych oraz transformatorów i sprzęgieł hydrokinetycznych używano wartości producentów i ich ośrodki badawczo – rozwojowe. Według zapewnień producentów wartości tych parametrów można będzie sprawdzić podczas testów SAT.

W silnikach i transformatorach oprócz typowych strat mocy obciążeniowych i jałowych uwzględniono straty mocy wynikające z odkształconych przebiegów prądów i napięć występujących na wejściu i wyjściu PCSN.

3. Wnioski

Na podstawie analizy jakościowej i ilościowej proponowanych do zastosowania układów napędowych z PCSN można wyciągnąć następujące wnioski:

- współczesne konstrukcje układów napędowych złożonych z PCSN i silników indukcyjnych klatkowych SN o podwyższonej częstotliwości znamionowej ($f_N > 50\text{Hz}$) pozwalają zastępować dotychczas stosowane układy napędowe PWZ oparte o SH (nawet nowszych konstrukcji np. VORECON)
- nakłady na układy napędowe z PCSN, chociaż są ok. 2 razy większe od dotychczas stosowanych, zwracają się po czasie ok. 3 – 4 lata (w przedstawionym obiekcie poniżej 3 lat).
- dobór układu napędowego z PCSN należy przeprowadzić z uwzględnieniem wszystkich właściwości dotyczących zużycia energii, warunków eksploatacji i technologii

- oferowane w kraju układy napędowe PCSN mogą spełniać wszystkie powyższe wymagania.

4. Literatura

- [1]. Koczara W., Szulc Z.: *Analiza techniczno – ekonomiczna zastosowania układów falownikowych do pompy wody zasilającej dla kotła 420ton pary/h*. Praca umowna dla przemysłu. ISEP PW. Warszawa, Marzec 2009.
- [2]. Przybylski J., Szulc Z.: *Doświadczenie eksploatacyjne napędów pomp dużych mocy z silnikami zasilanymi z przemienników częstotliwości średniego napięcia 6kV – efektywność eksploatacji napędów regulowanych dużych mocy*. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe Nr 78/2007 EENSE. Komel, Katowice.

Autorzy

Koczara Włodzimierz – Prof. dr hab inż.
kierownik Zakładu Napędu Elektrycznego ISEP PW
Szulc Zbigniew – Dr inż.,
adiunkt Zakładu Napędu Elektrycznego ISEP PW
Kubera Tomasz – Mgr inż. PKN ORLEN