

Zbigniew Szulc
Politechnika Warszawska, Warszawa

EFEKTY ZASTOSOWANIA INTELIGENTNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO Z PRZEMIENNIKIEM CZĘSTOTLIWOŚCI ŚREDNIEGO NAPIĘCIA W POMPOWNI SIECI CIEPLNEJ

EFFECTS OF USING A SMART DRIVE SYSTEM WITH A MEDIUM VOLTAGE FREQUENCY CONVERTER IN HEAT DISTRIBUTION NETWORK OF THE PUMPING STATION

Streszczenie: W artykule zostały przedstawione wyniki badań i pomiarów efektywności energetycznej układu napędowego pompy obiegowej w pompowni sieci ciepłowniczej. Badany obiekt stanowi inteligentny układ napędowy z przemiennikiem częstotliwości średniego napięcia. Wyniki badań zostały porównane z badaniami podobnymi przeprowadzonymi na układzie napędowym stosowanym poprzednio do chwili modernizacji. Efekty tych badań porównano stosując ilościowy pis efektywności energetycznej układu napędowego.

Abstract: The article presents results of research about circulating pump drive system in pumping station of Warsaw heat distribution network. This pumping station provides correct work of the heat distribution network to 30% of the city. Energy efficiency was an aim of drive system researches. Mathematical description of the energy efficiency was made by basing on energy coefficients. Value of these coefficients was computed using research results during pumping station exploitation. The drive system has been modernized two years ago but the pumping station was completely technically prepared in 2012/2013. The energy efficiency of modernized drive system was checked against energy efficiency of drive system applied until now. Results of both clearly showed that modernization was necessary.

Słowa kluczowe: *układ napędowy średniego napięcia, napęd pompy obiegowej, efektywność energetyczna*
Keywords: *medium voltage drive system, circulating pump drive, energy efficiency*

1. Wstęp

Układy napędowe pomp obiegowych (sieciowych) w pompowniach sieci ciepłych, oprócz efektywności energetycznej muszą wykazać się właściwościami, które zapewniają poprawną pracę w trudnych warunkach eksploatacyjnych. W artykule został przedstawiony układ napędowy dużej mocy (moc silnika wynosi 630 kW – znamionowa) i średniego napięcia (6 kV – napięcia sieci zasilającej) napędzający pompę obiegową. Trzy takie zespoły pracują w jednej ze stołecznych pompowni obsługującej ok 1/3 całej ciepłej sieci miejskiej. Najczęściej pracują dwa zespoły, a trzeci stanowi rezerwę. Do 2011 roku jako układy napędowe pomp obiegowych były stosowane napędykaskadowe zmodyfikowane. Cała pompownia składa się z dwu grup zespołów układ napędowy-pompa obiegowa. Jedna grupa (przedstawiona powyżej) zespołów stanowi zasilanie sieci ciepłej (dwa zespoły, a trzeci rezerwowo) tłoczy gorącą wodę z elektrociepłowni (podnosząc ciśnienie), a druga grupa (dwa zespoły, a trzeci rezerwowo) “ściąga” ciepłą wodę z sieci (gdzie

oddala ciepło) z powrotem do elektrociepłowni. W chwili obecnej zmodernizowana jest grupa trzech zespołów na tłoczeniu, a na powrocie będzie modernizowana w tym roku. W artykule została przedstawiona metoda badania efektywności energetycznej, która ilościowo pozwala ocenić eksploatowane układy napędowe. Na podstawie wrywkowych badań i pomiarów (w ciągu jednego miesiąca eksploatacji) oceniono dwa różne typy układów: jeden – po modernizacji, a drugi – przed modernizacją. Wyniki tej oceny przedstawiają wyraźnie korzyści, jakie dała modernizacja.

2. Badane układy napędowe

Tak jak było przedstawione powyżej, układy napędowe przed modernizacją stanowiły tzw. układy kaskadowe zmodyfikowane. Na rys. 1 został przedstawiony taki układ [1]. Do eksploatacji zostało wprowadzone w 1993r. 6 takich układów (trzy na tłoczeniu i trzy na powrocie). Silniki napędowe (asynchroniczne pierścieniowe M1 i silniki obcowzbudne prądu stałego

M2) były wyprodukowane znacznie wcześniej (w latach siedemdziesiątych) i stosowane były w układach napędowych tej pompowni w tzw. kaskadach stałej mocy. Moce znamionowe tych silników wynosiły: M1 – 800 kW (6 kV), M2 – 320 kW (440 V). W 2011 r. przeprowadzono modernizację układów napędowych na tłoczeniu pompowni (trzy sztuki). Ponieważ założeniem modernizacji była także wymiana pomp na nowe o większej sprawności i bardziej dostosowane do wymagań obecnej sieci ciepłowniczej, okazało się, że moc napędów może być mniejsza. Na rys. 2 został przedstawiony schemat ideowo blokowy nowego układu napędowego. Nowy silnik indukcyjny klatkowy posiada następujące dane znamionowe:

Typ: Sh 450 H62

$P_W = 630$ kW, $U_N = 6$ kV, $I_N = 74,8$ A

$n_N = 994$ obr/min, $\cos\phi_N = 0,84$

Silnik ten zasilany jest z przemiennika częstotliwości typu POWERFLEX 7000 o następujących danych:

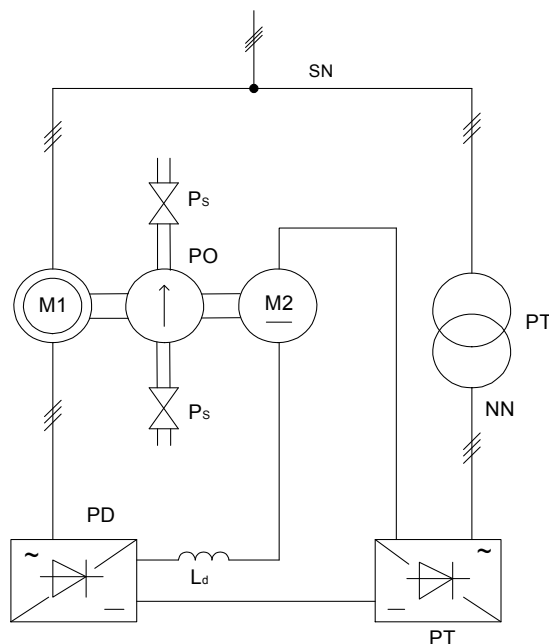
$U_1 = 6$ kV (napięcie wejściowe)

$U_2 = 0-6$ kV (napięcie wyjściowe regulowane)

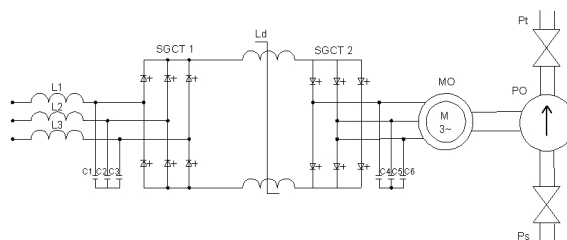
$f_2 = 0-75$ Hz (częstotliwość wyjściowa regulowana)

$I_{2N} = 75$ A, $\eta_N = 97,5\%$

Przemiennik ten, jego topologia i zasada działania zostały przedstawione w [2]. Ogólnie można powiedzieć, że jest to nowoczesny przemiennik częstotliwości średniego napięcia o kształtowanym sinusoidalnie prądem wejściowym i wyjściowym. Istnieje też możliwość kształtowania wartości $\cos\phi$ wejściowego. Wartość współczynnika THD prądu i napięcia wyjściowego nie przekracza kilku procent. Przemienniki te od kilku lat są produkowane w Polsce i posiadają już kilkadziesiąt aplikacji głównie w energetyce elektrycznej i ciepłowniczej. W sezonie ciepłym 2011/2012 pompownia pracowała dorywczo, a w obecnym sezonie 2012/2013 pracuje zgodnie z harmonogramem centralnej dyspozycji mocy ciepłowniczej ze stolicy. Warunki pracy pompowni, a więc i poszczególnych napędów zależą od wymaganych parametrów wyjściowych, przy czym najważniejszym parametrem jest ciśnienie na wyjściu pompowni (na tłoczeniu).



Rys. 1. Układ napędowy pompy obiegowej przed modernizacją



Rys. 2. Układ napędowy pompy obiegowej po modernizacji

3. Metodyka badań efektywności energetycznej układu napędowego

Dokładnie efektywność energetyczną pompowni, a więc i układów napędowych można ocenić dopiero po zakończeniu obecnego sezonu ciepłowniczego (maj 2013). Wtedy też można ją porównać z poprzednimi sezonami ciepłowniczymi, kiedy pracowały układy napędowe kaskad zmodyfikowanych. Jednak, aby wstępnie ocenić efekty modernizacji pompowni zdecydowano zrobić pomiary i badania nowego układu napędowego w przedziale czasowym kilkunastu godzin normalnej pracy eksploatacyjnej. Równocześnie wybrano podobny okres czasu i warunki technologiczne (ciśnienie i temperatura) pracy pompowni z układami napędowymi kaskad zmodyfikowanych w sezonach ciepłych sprzed 2011r. Jest to możliwe, gdyż praca pompowni od kilkunastu lat jest zautomatyzowana pod względem technologii i pomiarów. Komputerowy system rejestruje i ar-

chiwizuje dla jednego zespołu następujące dane:

- ciśnienie na ssaniu i tłoczeniu pompy,
- prędkość obrotową zespołu,
- prąd w jednej fazie zasilający silnik napędowy pompy.

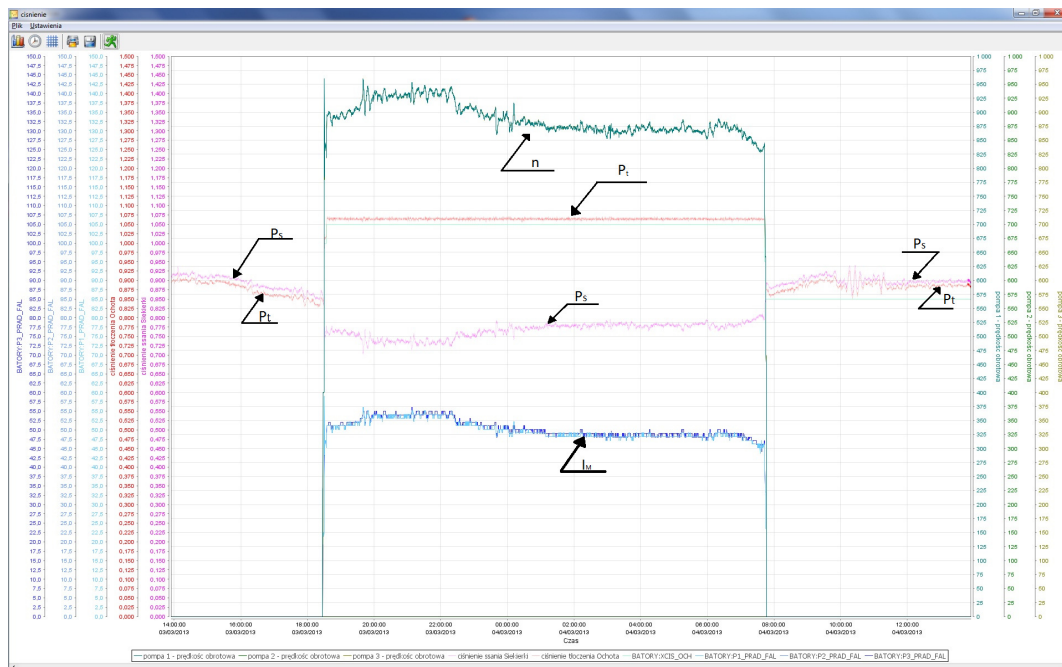
Na rys. 3 zostały przedstawione te przebiegi zarejestrowane w ciągu jednej doby (od godz. 14⁰⁰ dn. 3.03.2013 do godz. 14⁰⁰ dn. 4.03.2013 r.). Wejście do pracy zespołu nastąpiło po godz. 18⁰⁰ dn. 3.03 i skończyło się przed godz. 8⁰⁰ dn. 4.03. Stabilizowaną wielkością było ciśnienie (p_i) na tłoczeniu (najbardziej zewnętrzna pętla ujemnego sprzężenia zwrotnego).

Na rys. 4 zostały przedstawione zarejestrowane przebiegi mocy czynnej (P_C) i biernej (P_b) oraz prąd w trzech fazach zasilających (I_{L1} , I_{L2} , I_{L3}) w trójfazowej sieci 6 kV zasilającej pompownię na tłoczeniu. Jako parametr wyjściowy zespołu wybrano natężenie przepływu (Q), które zmieniło się od 0,6 Q_N do 1,0 Q_N .

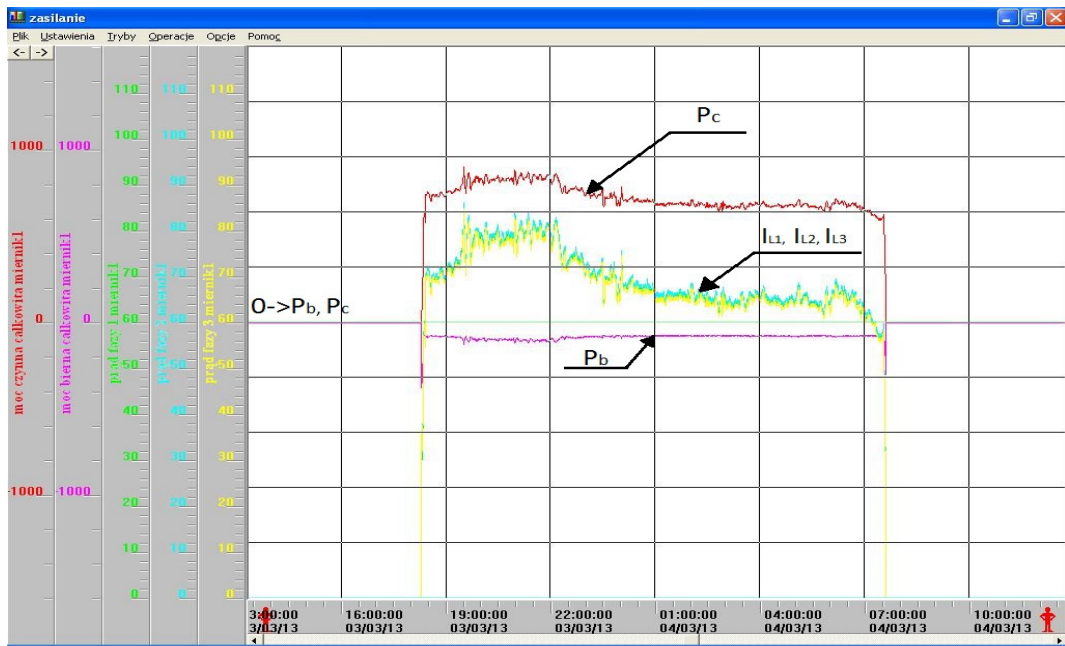
W zakresie tych wartości przepływu wyznaczono współczynniki efektywności energetycznej [3] [4] układu napędowego przed modernizacją i po modernizacji. Współczynniki te są następujące:

- $k_{e\eta}$ – sprawność energetyczna zespołu napędowego,
- k_{eh} – współczynnik zawartości wyższych harmonicznych w prądzie zasilającym,
- $k_{e\varphi}$ – współczynnik przesunięcia pomiędzy pierwszą harmoniczną prądu zasilającego, a napięciem (pierwszą harmoniczną) zasilającym,
- k_{eI} – współczynnik niesymetrii prądu zasilającego,
- $k_{e\Omega}$ – współczynnik pulsacji przebiegu prędkości obrotowej zespołu napędowego.

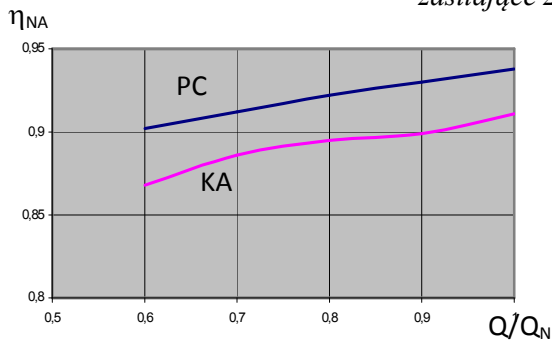
Wszystkie te współczynniki charakteryzują straty energii różnego rodzaju (elektryczne i mechaniczne) całego zespołu napędowego. Do ich wyznaczania zastosowania metody opisane w [3], [4]. Na tej podstawie wyznaczono przebiegi efektywności energetycznej zespołu napędowego przed modernizacją (kaskada zmodyfikowana) i po modernizacji. Na rys. 5 do rys. 9 zostały przedstawione przebiegi powyższych współczynników w funkcji natężenia przepływu. Współczynniki te można przedstawić zależnościami:



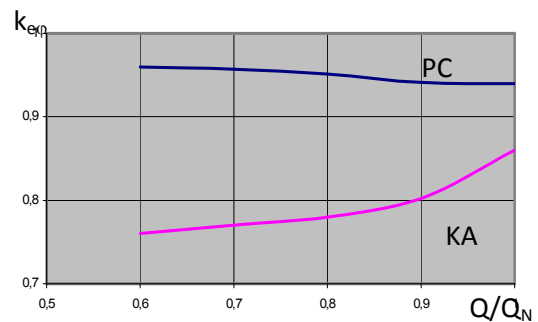
Rys. 3. Przebiegi zarejestrowane w pompowni. P_s – ciśnienie na wejściu pompowni; p_i – ciśnienie na wyjściu pompowni (tłoczenie), n – prędkość obrotowa zespołu napędowego; I_M – prąd w jednej fazie silnika napędowego



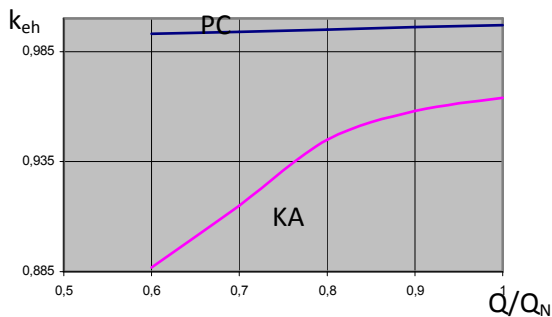
Rys. 4. Przebiegi zarejestrowane w rozdzielni zasilającej zespoły napędowe; P_C – moc czynna pobierana przez zespoły napędowe, P_b – moc bierna, I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} – fazowe prądy zasilające zespoły napędowe



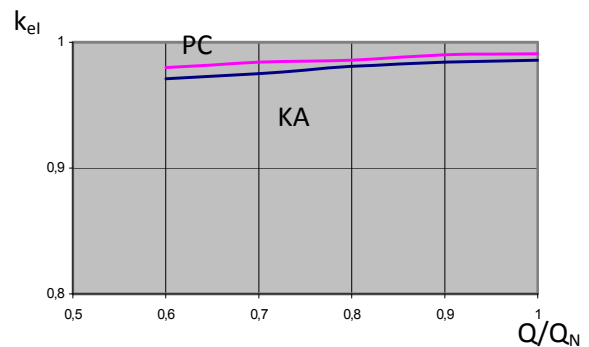
Rys. 5. Sprawność całkowita zespołu napędowego $\eta_{NA}=k_{e\eta}$ w funkcji natężenia przepływu. PC – układ napędowy z przemiennikiem częstotliwości, KA – układ kaskady zmodyfikowanej



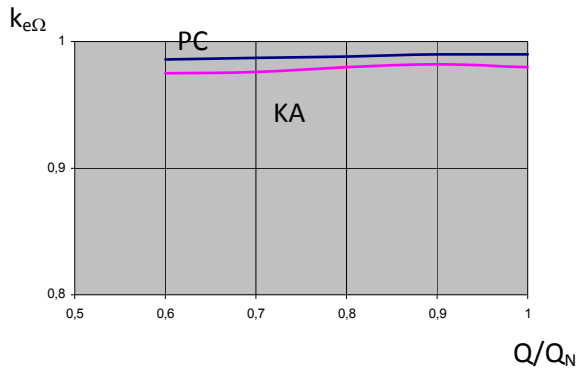
Rys. 7. Zależność współczynnika $k_{e\phi}$ od natężenia przepływu. PC – układ napędowy z przemiennikiem częstotliwości; KA – układ kaskady zmodyfikowanej



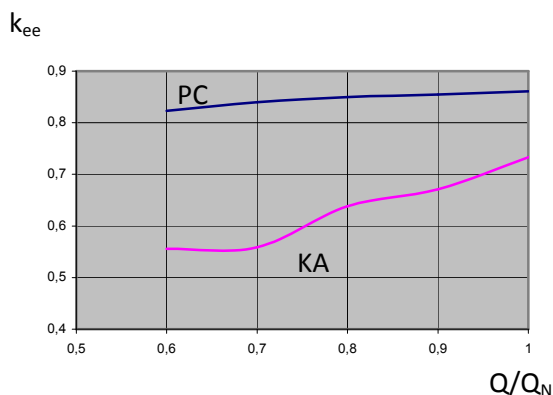
Rys. 6. Zależność współczynnika k_{eh} od natężenia przepływu. PC – układ napędowy z przemiennikiem częstotliwości; KA – układ kaskady zmodyfikowanej



Rys. 8. Zależność współczynnika $k_{e\Omega}$ od natężenia przepływu. PC – układ napędowy z przemiennikiem częstotliwości; KA – układ kaskady zmodyfikowanej



Rys. 9. Zależność współczynnika $k_{e\Omega}$ od natężenia przepływu. PC – układ napędowy z przemiennika częstotliwości; KA – układ kaskady zmodyfikowanej



Rys. 10. Zależność efektywności układów napędowych (k_{ee}) od natężenia przepływu. PC – układ napędowy z przemiennika częstotliwości; KA – układ kaskady zmodyfikowane

$$k_{e\eta} = \eta_F \cdot \eta_M = \eta_{NA} \quad (1)$$

$$k_{eh} = \frac{1}{\sqrt{1+(THDI)^2}} \quad (2)$$

$$k_{e\varphi} = \cos \varphi_1 \quad (3)$$

$$k_{el} = \frac{I_S}{I_S + \Delta I} \quad (4)$$

$$k_{e\Omega} = \frac{\Omega}{\Omega + \Delta\Omega} \quad (5)$$

Współczynnik efektywności energetycznej całego zespołu napędowego określono według [3] następująco:

$$k_{ee} = k_{e\eta} \cdot k_{eh} \cdot k_{e\varphi} \cdot k_{el} \cdot k_{e\Omega} \quad (6)$$

Przebieg współczynnika k_{ee} został przedstawiony na rys. 10. Do obliczenia składowych współczynników wyznaczono następujące wielkości:

η_F, η_M – na podstawie parametrów podanych przez producenta przemiennika częstotliwości (PCSN) i silnika (M) oraz wyznaczania sprawności metodą strat poszczególnych

THDI – współczynnik zawartości harmonicznych w prądzie zasilającym (rejestracja bezpośrednia)

$\cos \varphi_1$ – cosinus kąta pomiędzy pierwszą harmoniczną prądu zasilającego i pierwszą harmoniczną napięcia zasilającego, rejestracja przyrządem typu HIOKI

$I_S, \Delta I$ – średnia wartość skutecznej wartości prądu zasilającego w jednej z faz i największa różnica pomiędzy chwilową wartością skuteczną największą, a średnią (ΔI)

$\Omega, \Delta\Omega$ – średnia wartość prędkości wyjściowej i największa wartość pulsacji (różnica pomiędzy największą, a średnią – $\Delta\Omega$).

4. Wnioski

Zaproponowana metoda badania efektywności energetycznej układów napędowych wyraźnie wykazała pozytywny charakter modernizacji. Na rys. 10 współczynnik efektywności energetycznej k_{ee} układu napędowego z przemiennikiem częstotliwości znacznie przewyższa ten współczynnik układu napędowego kaskady zmodyfikowanej. Analizując przebiegi współczynników $k_{e\eta}$, k_{eh} , $k_{e\varphi}$ należy stwierdzić, że właśnie te mają największy wpływ na przebiegi k_{ee} układów badanych. Mniejszy wpływ mają przebiegi współczynników BLBLA, gdyż ich wartości w badanym przedziale Q ($0,6 Q_N \leq Q \leq Q_N$) są większe niż 0,95.

Zastosowana metoda dość dobrze ocenia efektywność energetyczną układu napędowego oraz może służyć do oceny różnych układów napędowych przy założeniu, że pracują w tych samych warunkach technologicznych. Jeżeli te warunki są różne i czas pracy jest różny to należy wprowadzić drugą zmienną i wówczas współczynnik efektywności energetycznej jest

funkcją dwu zmiennych (Q i t). W przypadku rozpatrywania zależności k_{ee} od natężenia przepływu dla różnych układów, ten jest najlepszy, którego pole jest pod krzywą k_{ee} największe.

5. Literatura

[1]. Koczara W., Szulc Z.: *Energy Saving Variable Speed Drives in Polish Industry and in Electrical Power Systems, International Scientific Conference „Energy Savings in Electricasl Engineering*, Warszawa 14-15.05.2001.

[2]. Koczara W., Szulc Z.: *Nowe topologie i sterowanie obwodów wejściowych przemienników częstotliwości średniego napięcia, umożliwiające ich*

szerokie zastosowanie, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne Nr 79, rok 2008, Katowice, 05.2008.

[3]. Szulc Z.: *Ocena ilościowa efektywności energetycznej układów napędowych wtórnych maszyn przepływowych dużych mocy*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne Nr 91 3/2011, Katowice, 05.2011.

[4]. Projekt badawczy Nr 3139/B/T02/2011: *Efektywność energetyczna przekształtnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym średniego napięcia do pomp obiegowych w inteligentnej sieci cieplnej*.