

Grzegorz Badowski, Jerzy Hickiewicz, Krystyna Macek-Kamińska, Marcin Kamiński
 Politechnika Opolska, Opole
 Piotr Pluta, PGE Elektrownia Opole SA, Brzezie

ZASTOSOWANIE SILNIKÓW O DUŻEJ SPRAWNOŚCI DO NAPĘDÓW WENTYLATORÓW MŁYNOWYCH

THE APPLICATION OF HIGH-EFFICIENCY MOTORS FOR FANS MILL DRIVES

Abstract: The paper describes the possibility of using high-efficiency motors to fans mill drives. Criteria for economic analysis of replacing standard motors by energy-saving ones are quoted. The results of this analysis are presented. Mathematical models of induction motors for dynamic tests are briefly described. Simulation and measurement results of start-up for standard and energy-saving motors used in fans mill drives are given. Advisability of such a replacement is presented in the paper conclusion.

1. Wstęp

Celem jest zaproponowanie metody wymiany silników standardowych na energooszczędne polegającej na analizie efektywności ekonomicznej oraz sprawdzeniu pod względem dynamicznym możliwości takiej wymiany.

2. Kryteria analizy efektywności ekonomicznej

Analizy ekonomiczne przeprowadzane są zgodnie z wytycznymi Organizacji Narodów Zjednoczonych ds. Rozwoju Przemysłowego (ang. United Nations Industrial Development Organization, UNIDO). Zgodnie z nimi każdorazowo w celu wskazania racjonalnego rozwiązania przy podejmowaniu decyzji inwestycyjnej konieczne jest przeprowadzenie wielu porównań i analiz. Wytyczne UNIDO obejmują zróżnicowane metody, które można ująć w dwie grupy [1]:

- metody statyczne,
- metody dynamiczne.

Metody statyczne stosowane są do oceny efektywności we wstępnym etapie rozpatrywania inwestycji. Jedną z najpopularniejszych metod jest prosty okres zwrotu.

Prosty okres zwrotu (ang. *Simple Payback Time, SPBT*) – to metoda, umożliwiająca wyznaczenie całkowitego okresu zwrotu nakładów inwestycyjnych, która w przybliżeniu, w latach określa czas, po którym zwraca się koszt inwestycji.

$$SPBT = \frac{N_i}{O_i} \quad (1)$$

gdzie:

N_i – nakłady inwestycyjne, [zł]

O_i – średnioroczne oszczędności wynikające z inwestycji, [zł].

Metody dynamiczne powodują uwiarygodnienie obliczeń dzięki zastosowaniu rachunku dyskonta, uwzględnieniu zmiany wartości pieniądza w czasie oraz całości przepływów pieniężnych związanych z inwestycją.

Najszerze zastosowanie znalazły metody: wartości zaktualizowanej netto (NPV), wewnętrznej stopy zwrotu (IRR) oraz okresu zwrotu inwestycji (PP).

Wartość zaktualizowana netto (ang. *Net Present Value, NPV*) – wskaźnik NPV przedstawia różnicę pomiędzy zdyskontowanymi przepływami pieniężnymi a nakładami początkowymi przy zadanej stopie dyskonta oraz zadany czasie realizacji inwestycji. NPV daje jednoznaczne przesłanki w zakresie decyzji inwestycyjnych, dany jest wzorem:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (2)$$

gdzie:

CF_t – przepływy gotówkowe w okresie t, [zł],

r – stopa dyskonta, [%],

I_0 – nakłady początkowe, [zł],

t – kolejne okresy (najczęściej lata) eksploatacji inwestycji, [lat].

Inwestycja uważana jest za opłacalną, jeżeli $NPV \geq 0$.

Wewnętrzna stopa zwrotu (ang. *Internal Rate of Return, IRR*) – wskaźnik IRR jest stopą dyskontową przy zadany czasie realizacji inwestycji, przy której wartość zaktualizowana

netto NPV jest równa zeru. Analizując kilka wariantów inwestycji planowanych w tym samym okresie czasu, najkorzystniejszy jest ten, dla którego wartość stopy IRR jest największa.

Okres zwrotu inwestycji (ang. Payback Period, PP) – wskaźnik PP określa okres zwrotu inwestycji, tj. rok, w którym wpływy (oszczędności) pokrywają poniesione nakłady, przy zadanej wartości stopy dyskonta. Im czas zwrotu zainwestowanego kapitału jest krótszy, tym inwestycja jest wyżej ceniona.

3. Efekt zmniejszenia zużycia energii elektrycznej

Uzyskany efekt zmniejszenia zużycia energii elektrycznej przez silniki energooszczędne wynika z ich większej sprawności przetwarzania energii elektrycznej na mechaniczną. [3]

Metoda dokładna uwzględnia zależność sprawności do rzeczywistego obciążenia silników w czasie. Dla każdego odcinka czasu eksploatacji, przyjmuje się wartości odpowiadające aktualnemu obciążeniu silnika w tym czasie.

$$P_m = P_e \eta \quad (3)$$

$$\Delta P_e = P_m \left(\frac{1}{\eta_s} - K_n \frac{1}{\eta_e} \right) \quad (4)$$

$$\Delta E_n = \Delta P_{ne} t_n \quad (5)$$

$$E = \sum_{t=1}^n \Delta P_{en} t_n \quad (6)$$

gdzie:

P_m – moc mechaniczna silnika wydawana na wale silnika, [kW],

P_e – moc pobierana przez silnik, [kW],

η – sprawność silnika, [%],

ΔP_e – różnica pomiędzy wartościami mocy pobieranej przez silnik standardowy i energooszczędny, [kW],

η_s – sprawność silnika standardowego, [%],

η_e – sprawność silnika energooszczędnego, [%],

K_n – współczynnik: $K_n = (n_e/n_s)^3$,

ΔE_n – oszczędność energii w czasie t_n , [kWh],

E – roczna oszczędność energii, [kWh],

Metoda uproszczona uwzględnia stałą, znamionową wartość sprawności niezależną od obciążenia silnika.

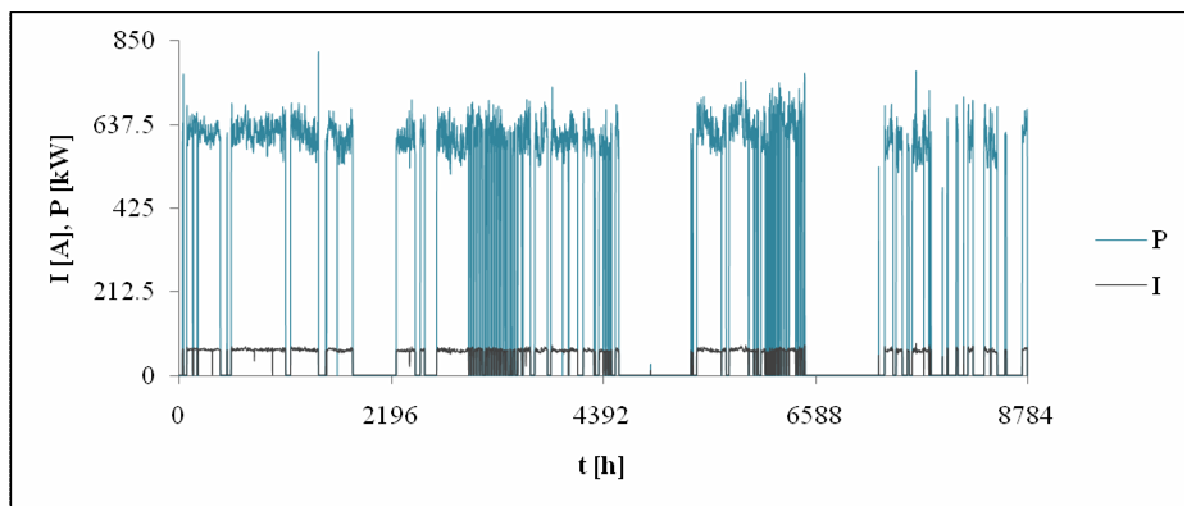
4. Przykładowe wyniki obliczeń efektów ekonomicznych

Analiza ekonomiczna umożliwiła ocenę korzyści wynikających z inwestycji polegającej na wymianie silników standardowych na nowe o wysokiej sprawności.

Taką ocenę przeprowadzono na podstawie przykładowej analizy napędów wentylatorów młynowych (Rys. 1.). Wykorzystano do niej roczne wykresy obciążenia silników.

Obliczenia przeprowadzono w trzech wariantach:

- Metodą uproszczoną, zakładając stałą wartość sprawności silników równa znamionowej.
- Metodą dokładną, uwzględniającą zależność sprawności od obciążenia.

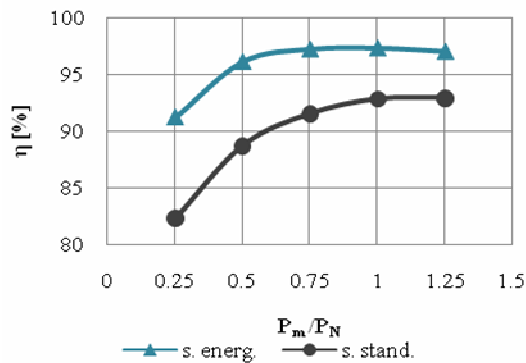


Rys. 1. Roczny wykres obciążenia silnika wentylatora młynowego

- Metodą dokładną uwzględniającą zarówno zależność sprawności od obciążenia jak i zwiększenie wydajności wynikające z uwzględnienia zależności prędkości obrotowej od obciążenia silnika standardowego i energooszczędnego.

Tabela 1. Parametry silnika standardowego i energooszczędnego

WENTYLATOR MŁYNOWY		
	silnik standardowy	silnik energooszczędny
P_N	850 kW	850 kW
U_N	6000 V	6000 V
I_N	99 A	95,5 A
n_N	1490 obr/min	1494 obr/min
η_N	92,5 %	97,3 %
$\cos\varphi_n$	0,89	0,88
M_r/M_N	1	1
M_k/M_N	2,24	2,5
I_r/I_N	5	6,5
ΔP_m	40 kW	2,9 kW
J	75 kgm ²	27,3 kgm ²



Rys. 2. Charakterystyki sprawności silnika standardowego i energooszczędnego

W przeprowadzonych obliczeniach oceny efektywności inwestycji przyjęto następujące założenia:

- stopa dyskonta: $r = 7,5\%$,
- okres ekonomicznej użyteczności silnika: przyjęto 20lat (POE),
- jednostkowy koszt energii elektrycznej:
 - wariant elektrowniany: 100zł/MWh,
 - wariant przemysłowy: 380zł/MWh (270zł/MWh z uwzględnieniem 40% kosztów dystrybucji),
- wzrost jednostkowego kosztu zmiennego produkcji: przyjęto 1% rocznie,

- cena uprawnień do emisji CO₂:
 - wariant 1: bez kosztów uprawnień do emisji,
 - wariant 2: koszt uprawnień: 15€/Mg,
 - wariant 3: koszt uprawnień: 30€/Mg,
- kurs walutowy: przyjęto 1€ = 4,25zł,
- jednostkowa cena skupu silnika: przyjęto 1kg = 2,5zł,
- amortyzacja: 5%, wynika to z przyjętego okresu użytkowania (20lat),
- podatek: przyjęto 19%, to podatek dochodowy od osób prawnych.

Założono również, że obciążenie silnika będzie w zasadzie niezmiennie przez cały analizowany okres.

Szczegółowo rozpatrzono wariant dokładny uwzględniający zmianę prędkości obrotowej oraz uwzględniający cenę uprawnień do emisji CO₂ w wysokości 30€ za uprawnienie (11 wiersz tabeli 2).

Dane wejściowe:

- ilość silników w grupie: 5szt.,
- średnioroczna oszczędność na jeden silnik: 179,57MWh,
- koszt zakupu silnika energooszczędnego: 148,8tyś. zł,
- przychody z likwidacji silników: 64,5tyś. zł {ilość silników w grupie (5szt.) pomnożona przez jednostkową cenę skupu silnika (2,5zł/kg) oraz masę silnika standardowego (5160kg)}.

Obliczenia ekonomiczne:

- zwiększenie przychodów (R): 171,4tyś. zł, to suma dwóch składników: przychodów z likwidacji silników (64,5tyś. zł) tylko dla roku 2011 oraz iloczynu, średniorocznej oszczędności energii elektrycznej (897,85MWh) pomnożonej przez współczynnik wielkości emisji (0,93401Mg/MWh) pomnożonej przez cenę uprawnień do emisji CO₂ (30€/Mg) i po uwzględnieniu kursu walut (1€=4,25zł),
- zmniejszenie kosztów zużycia energii elektrycznej(O): 89,8tyś. zł, to iloczyn ilości silników w grupie (5szt.) pomnożony przez średnioroczną oszczędność energii na silnik (179,57MWh) oraz jednostkowy koszt energii elektrycznej (100zł/MWh),
- amortyzacja(A): 37,2tyś. zł, to nakłady na wymianę silników (744,0tyś. zł) pomnożone przez stawkę amortyzacyjną 5%,
- EBIT(E): 224,0tyś. zł, to R (171,4tyś. zł) + O (89,8tyś. zł) – A (37,2tyś. zł),

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń dla wentylatorów młynowych

	WENTYLATORY MŁYNOWE	Średnioroczna oszczędność energii	SPBT	PP	NPV	IRR
		MWh	lat	lat	tyś. zł	%
Metoda uproszczona	bez uprawnień do emisji CO ₂	124,55	11,9	25,3	-70,2	6,2
	cena uprawnień do emisji CO ₂ : 15 €		7,5	11,7	259,1	11,9
	cena uprawnień do emisji CO ₂ : 30 €		5,5	7,8	588,5	16,9
	wariant przemysłowy		3,1	4,1	1 478,5	29,0
Metoda dokładna	bez uprawnień do emisji CO ₂	168,57	8,8	14,8	125,3	9,7
	cena uprawnień do emisji CO ₂ : 15 €		5,5	7,9	571,0	16,6
	cena uprawnień do emisji CO ₂ : 30 €		4,0	5,5	1 016,8	22,8
	wariant przemysłowy		2,3	3,0	2 221,4	38,6
Metoda dokładna n=f(P _m)	bez uprawnień do emisji CO ₂	179,57	8,3	13,5	174,1	10,5
	cena uprawnień do emisji CO ₂ : 15 €		5,2	7,4	649,0	17,7
	cena uprawnień do emisji CO ₂ : 30 €		3,8	5,1	1 123,8	24,3
	wariant przemysłowy		1,7	2,1	3 356,7	53,1

- podatek od EBIT(T): 42,6tyś. zł, to EBIT (224,0tyś. zł) pomnożony przez stawkę podatkowa 19%,
- nakłady na wymianę silników (I): 744,0tyś. zł (dla roku 2010), to ilość silników w grupie (5szt.) pomnożona przez koszt zakupu jednego silnika energooszczędnego (148,8tyś. zł),
- przepływy pieniężne przedsiębiorstwa (CF): 218,6tyś. zł, to E (224,0tyś. zł) – T (42,6tyś. zł) + A (37,20tyś. zł) – I (0zł),
- współczynnik dyskontujący(CO): 0,93 dla roku 2011 (obniża wartości pieniądza w czasie),
- zdyskontowane przepływy pieniężne (DCF): (203,4tyś. zł), to iloczyn przepływów pieniężnych przedsiębiorstwa (218,6tyś. zł) oraz współczynnika dyskontującego (0,93).

Dane wyjściowe:

- SPBT: 3,8 lat – prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych (koszt zakupu silnika (14880zł) podzielony przez iloczyn średniorocznej oszczędności na silniki (179,57MWh) i jednostkowego kosztu energii elektrycznej (100zł/MWh)),
- PP: 5,1 lat – czas, po upływie którego wpływy pokrywają poniesione nakłady,
- NPV: 1123,8tyś. zł – wartość inwestycji po okresie użyteczności silnika (20lat),
- IRR: 24,3% – stopa dyskontowa, przy której wartość zaktualizowana netto NPV byłaby równa zero, po 20 latach.

5. Obwodowy model silnika indukcyjnego

W badaniach symulacyjnych stanów dynamicznych silników indukcyjnych wykorzystuje się obwodowe modele matematyczne. Modele matematyczne sformułowano przyjmując następujące założenia: [4, 5, 6, 7] symetria budowy silnika, liniowość charakterystyk magnesowania, jednoharmoniczny rozkład przestrzennego pola magnetycznego, pomijanie strat w obwodzie magnetycznym maszyny. Taki model matematyczny silnika stanowi układ równań różniczkowych obwodów elektrycznych:

$$[U] = [L] \frac{d}{dt} [I] + [Z(\omega)] [I] \quad (7)$$

gdzie:

- U – wektor napięć,
- L – macierz indukcyjności,
- I – wektor prądów,
- Z – macierz impedancji,

Wraz z równaniem ruchu: (8)

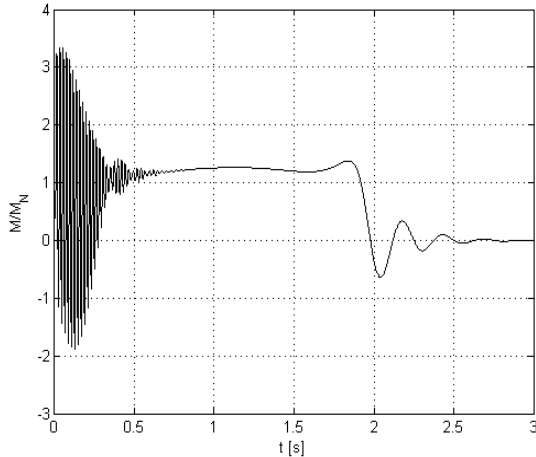
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p^2}{J} \frac{X_m}{\omega_0} [I_A I_B] [B]_t \left\{ \begin{bmatrix} I_{u1} \\ I_{v1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{u2} \\ I_{v2} \end{bmatrix} \right\} + \frac{p}{J} M_m$$

gdzie:

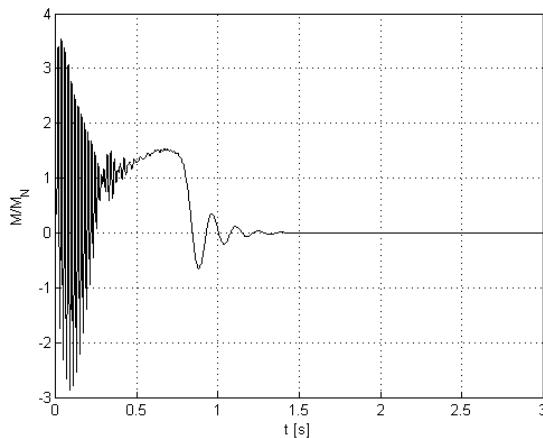
- B – macierz liczbowa,

6. Wyniki badań symulacyjnych i pomiarowych rozruchu silnika standardowego i energooszczędnego

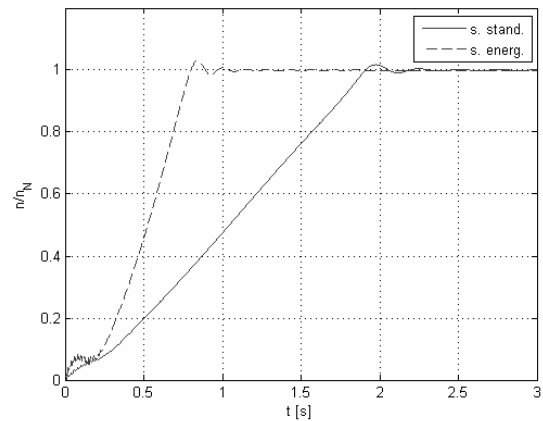
Parametry modelu matematycznego silników w szczególności obwodów wirnika uzyskano metodą estymacji parametrów na podstawie charakterystyki mechanicznej ($M=f(s)$). Wykonano obliczenia symulacyjne przebiegów czasowych momentów, prądów oraz prędkości rozruchu silników napędzających wentylatory młynowe. Przeprowadzono również porównawcze pomiary rozruchu na obiektach rzeczywistych.



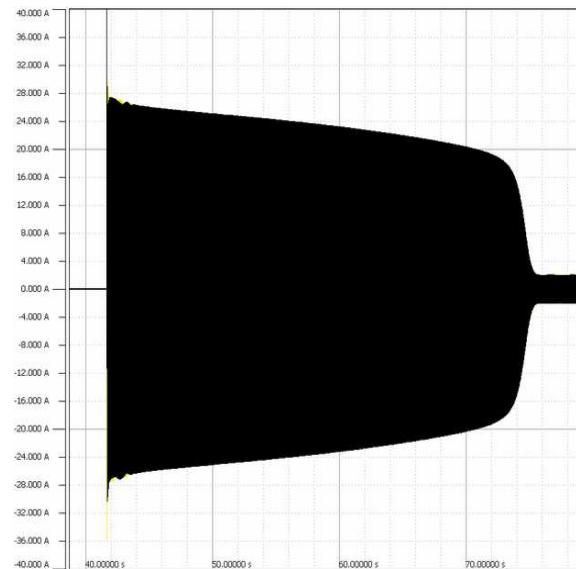
Rys. 3. Przebieg momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu silnika standardowego na biegu jałowym



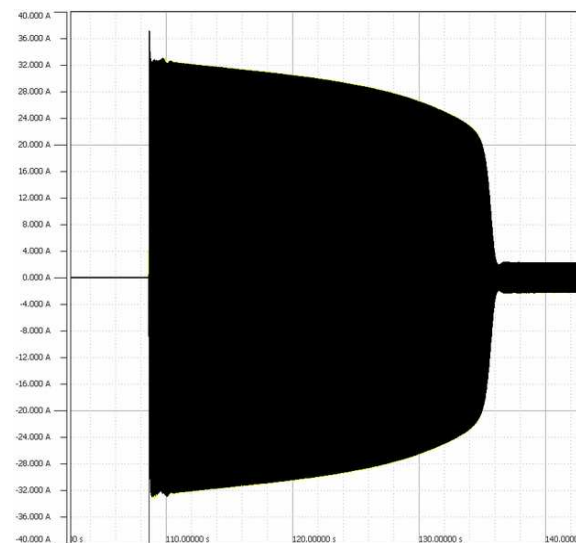
Rys. 4. Przebieg momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu silnika energooszczędnego na biegu jałowym



Rys. 5. Przebieg prędkości obrotowych podczas rozruchu silnika standardowego i energooszczędnego na biegu jałowym



Rys. 6. Przebieg pomiarowy prądu rozruchu silnika standardowego



Rys. 7. Przebieg pomiarowy prądu rozruchu silnika energooszczędnego

7. Wnioski

W pracy przedstawiona została metoda modernizacji napędów elektrycznych przez wymianę silników standardowych na nowe silniki o podwyższonej sprawności.

Przy ocenie ekonomicznej najbardziej wnikliwym kryterium wydaje się być okres zwrotu inwestycji *PP*. Wymiana napędów elektrycznych zainstalowanych w pobliżu źródła energii nie jest najlepszym przykładem do oceny korzyści z zastosowania silników energooszczędnych, dlatego obliczenia przeprowadzono również dla hipotetycznego zakładu przemysłowego zakładając możliwie najniższe ceny zakupu energii elektrycznej. Na podstawie tabeli 2 zawierającej wskaźniki efektywności ekonomicznej można również zauważyć, że w przypadku zakładu przemysłowego efekty ekonomiczne są bardziej wyraźne niż w elektrowni.

Z przeprowadzonej analizy dynamicznej wynika, że rozruch każdego silnika energooszczędnego dokonuje się w krótszym czasie niż w silnikach standardowych.

Porównanie przebiegów prądów rozruchowych pokazuje natomiast, iż w silnikach energooszczędnych szczytowe wartości prądów rozruchowych są większe, podobnie szczytowe wartości momentów rozruchowych. Z punktu widzenia oddziaływania na źródło zasilania w przypadku elektrowni nie stanowi to zagrożenia. Zwiększone, krótkotrwałe wartości szczytowe prądu i momentu mogą jednak negatywnie wpływać na trwałość silników, szczególnie przy częstych rozruchach. Wyniki badań symulacyjnych potwierdzono pomiarami na obiektach rzeczywistych.

Analiza efektywnościowa i dynamiczna pracy silnika jest niezbędna zarówno na etapie projektowania, jak i podczas eksploatacji układów napędowych. Planując wymianę silnika standardowego na energooszczędny należy równolegle przeprowadzić analizę ekonomiczną, która odpowie na pytanie czy inwestycja opłaci się oraz analizę dynamiczną, aby stwierdzić czy silnik energooszczędny podoba wymaganiom dynamicznym rozruchu, którym silnik standardowy dotychczas stosowany sprostał.

Właściwie dobrany silnika pozwala użytkownikowi na zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych, jak również na osiągnięcie celów związanych z ograniczeniem zanieczyszczenia powietrza oraz ewentualnego efektu cieplarnianego.

Zaproponowana metoda modernizacji napędów elektrycznych nie jest skomplikowana, największy

problem stanowi uzyskanie od producentów wszystkich danych układu napędowego, a w szczególności danych potrzebnych do estymacji parametrów obwodów wirnika.

Literatura

- [1] Pawlik M., Strzelczyk F.: *Elektrownie*, Wyd. 5 zm., Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 2009
- [2] Badowski G.: *Analiza techniczno – ekonomiczna napędów wentylatorowych w energetyce*, Praca dyplomowa Politechnika Opolska, Opole 2009
- [3] Hickiewicz J., Puta P., Węgrzyn J.: *Ocena celowości wymiany standardowych silników napędów potrzeb własnych na wysokosprawne z uwzględnieniem wykorzystania praw do emisji CO₂*, Komel Zeszyty problemowe – maszyny elektryczne nr 78/2007
- [4] Macek - Kamińska K.: *Estymacja parametrów modeli matematycznych silników indukcyjnych dwuklatkowych i głębokożłobkowych*, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Opole 1992
- [5] Hickiewicz J.: *Dynamika układów napędowych*, materiały niepublikowane, Politechnika Opolska, Opole 2009
- [6] Hickiewicz J., Macek – Kamińska K., Kamiński M.: *Dynamiczne modele obliczeniowe maszyn indukcyjnych i ich identyfikacja*, Komel Zeszyty problemowe – maszyny elektryczne nr 69/2004
- [7] Praca zbiorowa: Praca naukowo – badawcza nr NB-23/87 wykonana na zlecenie GBSiPE ‘ENERGOPROJEKT’ w Warszawie, etap I : *Obliczeniowe testowanie doboru silników do napędów potrzeb własnych w fazie projektowania elektrowni i elektrociepłowni*, etap II: *Obliczeniowe testowanie doboru silników do napędów potrzeb własnych w fazie projektowania elektrowni i elektrociepłowni*. Wyższa Szkoła Inżynierska, Opole 1987

Autorzy

Dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz, prof. PO,
e-mail: j.hickiewicz@po.opole.pl
Dr hab. inż. Krystyna Macek-Kamińska, prof. PO,
e-mail: k.macek-kaminska@po.opole.pl
Dr inż. Marcin Kamiński
e-mail: m.kaminski@po.opole.pl
Mgr inż. Grzegorz Badowski
e-mail: gkbadowski@gmail.com
Politechnika Opolska,
Wydział Elektrotechnika, Automatyki i Informatyki
ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole
Mgr inż. Piotr Pluta
e-mail: piotr.pluta@elopole.bot.pl
PGE Elektrownia Opole SA
46-021 Brzeziny k. Opola

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Jan Zawilak