

Rafał Haloń, TAMEL S.A., Tarnów

Piotr Dukalski, Wojciech Poprawski, BOBRME KOMEL, Katowice

## SILNIK NAPĘDZAJĄCY OSZCZĘDNOŚĆ

### THE MOTOR PROPELLING THE ECONOMY

**Streszczenie:** Artykuł dotyczy opisu nowych standardów sprawności silników indukcyjnych, które są aktualnie wprowadzane na rynek europejski. Autorzy opisują normy określające nowe standardy oraz aspekty ekonomiczne stosowania silników energooszczędnych z uwagi na ilość zaoszczędzonej energii oraz emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery. Część artykułu dotyczy kroków podjętych przez TAMEL S.A. w celu opracowania oraz zaoferowania w przyszłości rynkowi europejskiemu silników klasy sprawności Premium IE3 oraz Super Premium IE4.

**Abstract:** The article concerns the description of new standards of efficiency motors that are currently introduced into European market. The authors describe the norms which create new standards and economic aspects of the use of energy efficient motors because of the amount of energy savings and CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere. Part of the article concerns the steps taken by the TAMEL SA to develop and offer the European market in the future efficiency class IE3 Premium and Super Premium IE4 motors.

**Słowa kluczowe:** silniki indukcyjne, normy sprawności, energooszczędność

**Keywords:** induction motors, efficiency standards, energy efficiency

#### 1. Wstęp

W przeciągu ostatnich kilkunastu lat ochrona środowiska naturalnego stała się jednym z najważniejszych trendów wywierających największy wpływ na rozwój przemysłu na świecie.

Przykładem działań mających na celu obniżenie zanieczyszczenia środowiska jest zwiększenie sprawności powszechnie stosowanych silników elektrycznych poprzez wprowadzenie nowych, bardziej restrykcyjnych norm dotyczących wyznaczania oraz oznaczania sprawności silników [1,2]. Normy dotyczą silników indukcyjnych, które są najpowszechniej stosowane w przemyśle ze względu na prostą konstrukcję, dopasowanie charakterystyk elektro-mechanicznych oraz niskich kosztów eksploatacyjnych.

Silniki tego typu, zwłaszcza silniki klatkowe stanowią ok. 90% silników stosowanych w przemyśle [3].

Poprawa efektywności energetycznej polskiej gospodarki jest konieczna ze względu na ochronę środowiska naszej planety, ze względu na wywiązanie się ze zobowiązań, jakie w tym zakresie jako kraj przyjęliśmy oraz z uregulowań prawnych wynikających z członkostwa w EU. Istotnym czynnikiem jest również fakt zaakceptowania norm przez firmy zagraniczne, które podjęły już prace nad podwyższeniem sprawności silników, co mobilizuje producentów chcących zachować konkurencyjność krajowych produktów.

Poprawa efektywności w użytkowaniu energii elektrycznej w gospodarce krajowej, poprzez stosowanie efektywnych energetycznie i energooszczędnych rozwiązań w obszarze napędów elektrycznych, ogranicza bezpośrednio zużycie energii oraz przyczynia się do uzyskania wielu efektów dodatkowych takich, jak poprawa jakości produktów i świadczonych usług, oszczędność paliw, wody i surowców.

Elektryczne układy napędowe, które pełnią różne funkcje od napędów pomocniczych w instalacjach grzewczych, wentylacyjnych, czy klimatyzacyjnych do funkcji podstawowej w procesach technologicznych realizowanych w przedsiębiorstwach produkcyjnych (układy pompowe, wentylatorowe, sprężonego powietrza, wytwarzania chłodu) wykorzystują wg różnych szacunków nawet do 60 % całej zużywanej energii elektrycznej, w tym ok. 90% przez silniki prądu przemiennego.

#### 2. Nowe regulacje prawne

Technicznie dostępna poprawa sprawności silników nie jest jednakowa dla różnych mocy i typów silników. Prawdopodobny rozkład możliwych do uzyskania oszczędności w przyjętych przedziałach mocy silników został przedstawiony w tabeli 1 [4].

Tab. 1. Oszczędności możliwe do uzyskania dla różnych przedziałów mocy silników[4]

Zakres mocy	Procentowy udział oszczędności
do 0,75kW	3,7%
0,75-4,0kW	24,3%
4,0 – 10kW	13,2%
10 – 30kW	11,2%
30 – 70kW	9,3%
70 – 130kW	4,0%
130 – 500kW	20%

Przeprowadzona analiza wykazała, że największy potencjał oszczędności energii można przypisać grupom silników o mocach od 0,75 do kilkunastu kilowatów oraz powyżej 130 kW.

Powyższa analiza przyczyniła się do decyzji zarządu FSE Tamel o podjęciu działań zmierzających do opracowania silników klasy sprawności IE4.

Dnia 6 lipca 2005 roku Parlament i Rada Europejska przyjęła Dyrektywę 2005/32/WE ustanawiającą ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących projektu ekologicznego dla produktów, które wykorzystują energię. Dyrektywa ta obejmuje swoim zakresem ogólne zasady oraz wymogi, jakie będą musiały spełniać produkty z zakresu dyrektywy.

Napędy elektryczne stanowią podgrupę urządzeń, które w pierwszej kolejności zostały objęte dyrektywą. W ramach projektu finansowanego przez Komisję Europejską w latach 2006 – 2008, zostały podjęte działania nad określeniem dokładnych zasad, metodyki oraz norm wspierających projektowanie objętych urządzeń.

Analizy techniczno-ekonomiczne obejmowały [4]:

- charakterystykę rynku dla danej kategorii napędów elektrycznych,
- aspekty związane z oddziaływaniem produktu na środowisko oraz ocena potencjału techniczno-ekonomicznego dla minimalizacji niekorzystnych oddziaływań;
- ocenę istniejących standardów, prawodawstwa w zakresie danej grupy napędów elektrycznych,
- regulacje i standardy obowiązujące w danym sektorze przemysłowym związanym z daną grupą napędów elektrycznych,
- identyfikację potrzeb w zakresie rozwijania istniejących standardów i norm.

Podstawowe wnioski z przygotowanego raportu dotyczącego silników elektrycznych są następujące [4]:

Obligatoryjne normy dotyczące efektywności energetycznej sprzedawanych silników elektrycznych tzw. MEPS (minimal energy performance standards) są powszechne na świecie. Przykładem są rozwiązania pochodzące ze Stanów Zjednoczonych, Kanady, Meksyku, Brazylii, Australii, Nowej Zelandii i Chin. Kraje te znacznie wyprzedzają Europę. Na rynku UE wciąż dominują silniki Eff2 (są silniki standardowe wg nomenklatury przyjętej na podstawie dobrowolnego porozumienia producentów zrzeszonych w Europejskim Komitecie Producentów Maszyn Elektrycznych i Urządzeń Elektronicznych CEMEP z 1999 roku wprowadzające europejską klasyfikację sprawności silników Eff3, Eff2, Eff1) [4]. Porozumienie CEMEP/EU zredukowało sprzedaż silników o klasie efektywności EFF3 (silniki o niskiej sprawności) o 50%. Tak więc należy uznać, że założony w porozumieniu cel został w pełni osiągnięty, gdyż w okresie od 1998 do 2005 roku nastąpił spadek sprzedanych silników tej klasy z 68% do 4% [4]. Do tej pory udział w rynku silników klasy silniki o podwyższonej sprawności-EFF1 jest niewielki w stosunku do silników o niższej klasie efektywności energetycznej i nie przekracza on 10%.

Stworzono obligatoryjne normy dotyczące minimalnej efektywności energetycznej silników elektrycznych, które sprzedawane będą na terenie UE.

Komisja Europejska przyjęła Rozporządzenie Nr 640/2009 w sprawie wdrażania Dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady dotyczące wymogów ekoprojektu dla silników elektrycznych. Oznacza to, że na terenie Unii Europejskiej wprowadzone zostały usankcjonowane prawnie wymogi dotyczące efektywności energetycznej sprzedawanych na rynku unijnym silników indukcyjnych 2, 4 i 6- biegunowych.

Rozporządzenie wprowadza te wymogi zgodnie z nową klasyfikacją IE i następującym harmonogramem [4]:

- 1) od dnia 16 czerwca 2011 r. silniki o mocy znamionowej w granicach 0,75–375 kW muszą odpowiadać co najmniej klasie sprawności IE2,
- 2) od dnia 1 stycznia 2015 r. silniki o mocy znamionowej w granicach 7,5–375 kW muszą odpowiadać co najmniej klasie spraw-

- ności IE3, lub odpowiadać klasie sprawności IE2 oraz być wyposażone w układ płynnej regulacji prędkości obrotowej,
- 3) od dnia 1 stycznia 2017 r. wszystkie silniki o mocy znamionowej w granicach 0,75–375 kW muszą odpowiadać co najmniej klasie sprawności IE3, lub odpowiadać klasie sprawności IE2 oraz być wyposażone w układ płynnej regulacji prędkości obrotowej.

Klasyfikację oraz oznakowanie IE wprowadza nowa norma z serii IEC 60034-30 (Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code)) z 2008 roku. Sposób klasyfikacji obowiązuje dla silników 2, 4 i 6-biegunowych o mocach od 0,75 do 375 kW i napięciu znamionowym do 1000 V. Dokument określa cztery poziomy sprawności dla silników.

Tab. 2. Nowe klasy sprawności silników indukcyjnych

Oznaczenie klasy	Zakres klasy
IE1 (standard)	silniki standardowe
IE2 (high efficiency)	silniki o podwyższonej sprawności
IE3 (premium).	wysoki poziom sprawności
IE4 (super premium)	najwyższy poziom sprawności

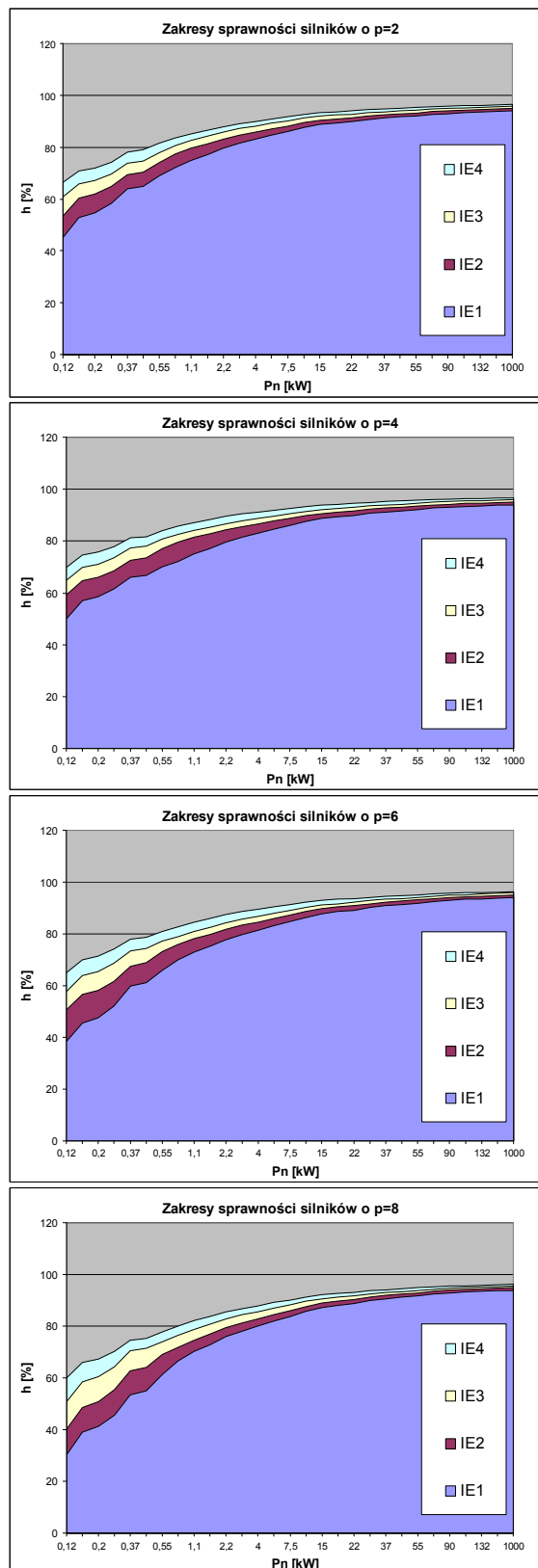
Sprawność silników na potrzeby porównania z wymaganiami IE powinna być wyznaczana zgodnie z normą IEC 60034-2-1 Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding for traction vehicles) z 2007 roku.

Wymagań IE nie można wprost porównywać np.: z wymaganiami wg klasyfikacji EFF.

Należy podkreślić, że określenie wymagań dla silników zasilanych napięciem o częstotliwości 60 Hz, może być uznane za element ujednoczniający światowy rynek silników energooszczędnych.

FSE Tamel dokonuje pomiaru sprawności wg metody strat poszczególnych, straty dodatkowe wyznaczane są jako straty resztkowe.

Pomimo, iż do wprowadzenia wymagań IE3 pozostało jeszcze kilka lat FSE Tamel już teraz posiada je w ofercie i chce rozpocząć pracę nad wprowadzeniem silników IE4.



Rys. 1. Zakresy sprawności klas IE1, IE2, IE3, IE4 dla silników indukcyjnych zgodnie z drąftem normy i IEC 60034-30-1 Ed.1, dla różnej liczby biegunów: a) p=2, b) p=4, c) p=6, d) p=8

### 3. Ocena techniczno-ekonomiczna przedsięwzięcia

Cena urządzeń energooszczędnych w przypadku silników indukcyjnych niskiego napięcia jest zazwyczaj wyższa od ceny standardowych odpowiedników. Jest to spowodowane zastosowaniem nowoczesnych technologii przy ich produkcji oraz lepszemu technologicznie wykonawstwu. Z tego powodu taki produkt należy uważać za wyrób o wyższej jakości.

Opłacalność stosowania silników energooszczędnych jest najczęściej mierzona czasem zwrotu nakładów inwestycyjnych wynikających z poniesionych dodatkowo na zakup takiego silnika w miejsce standardowego lub poprzez porównanie kosztów ponoszonych w cyklu życia silnika (LCC) standardowego i energooszczędnego zależy od wielu czynników, w tym od [4]:

- różnicy cen silnika energooszczędnego i standardowego,
- ceny energii elektrycznej,
- różnicy sprawności przy różnych obciążeniach silnika standardowego i energooszczędnego,
- stopnia obciążenia silnika,
- rocznego czasu pracy.

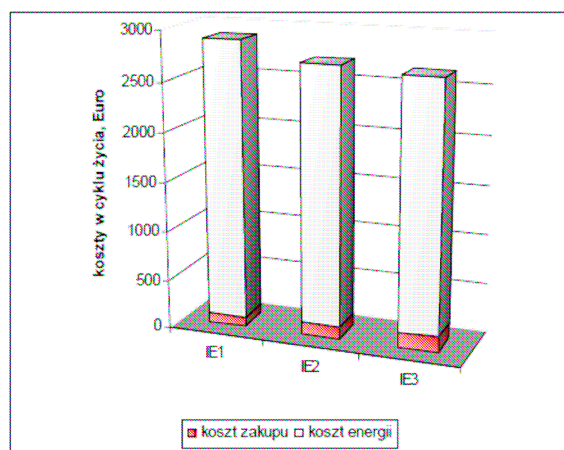
Zakup silnika następuje zazwyczaj w oparciu o kryterium kosztu inwestycyjnego, czyli głównie ceny produktu oraz kosztów jego instalacji. Bardzo często użytkownik bierze pod uwagę jedynie nakłady początkowe, natomiast nie zauważa lub też nie docenia pozostałych kosztów, które ponoszone są sumarycznie w pełnym cyklu życia urządzenia. Żywotność niektórych urządzeń można szacować na kilkanaście lub nawet kilkudziesiąt lat. W tym okresie koszty związane m.in. ze zużyciem energii będą ponoszone przez cały ten czas.

Aby odpowiedzieć na pytanie, czy w tym przypadku zakup tańszego produktu jest zawsze opłacalny należy przeprowadzić analizę kosztów cyklu żywotności (LCC – ang. life cycle costs). Są to koszty ponoszone od momentu zakupu do utylizacji urządzenia, która umożliwia ocenę i porównanie tych kosztów dla dwóch lub wielu różnych produktów. Po przeprowadzeniu analizy może się okazać, że wybór droższego urządzenia jest bardziej zasadny, ponieważ ze względu na niższy koszt eksploatacji po pewnym okresie czasu eksploatacji np. 5-10 lat koszty początkowe zostaną zniwelowane.

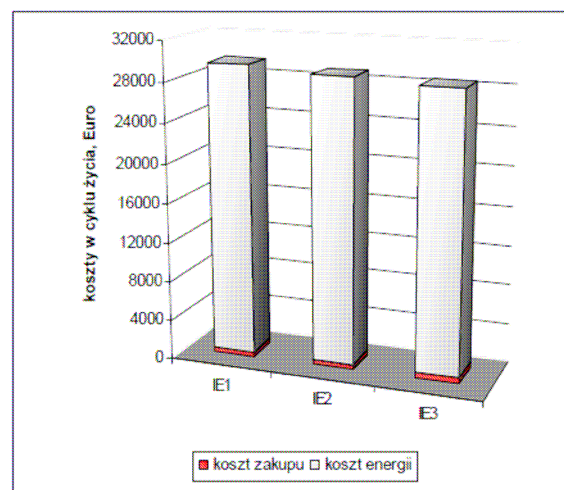
Analiza taka powinna zawsze być oparta na porównaniu kosztów co najmniej dwóch rozwiązań i mieć decydujący wpływ na decyzję o zakupie [4].

Na rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono wyniki analizy LCC dla silnika indukcyjnego standardowego i o podwyższonej sprawności (wg nowej klasyfikacji silników IE) [4].

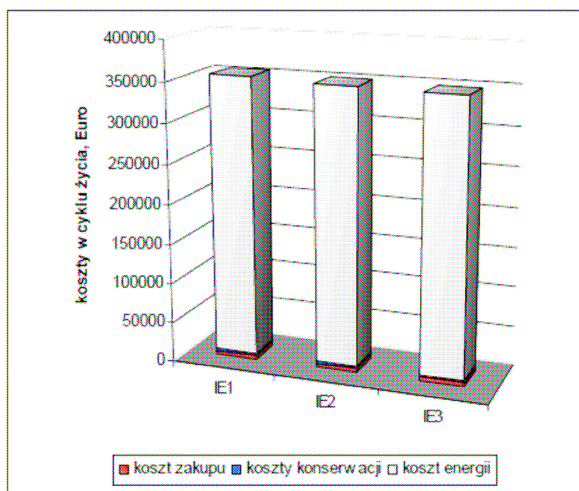
Uwaga: dla silników o mocy 1,1 oraz 11 kW nie uwzględniono kosztów związanych z konserwacją i utrzymaniem.



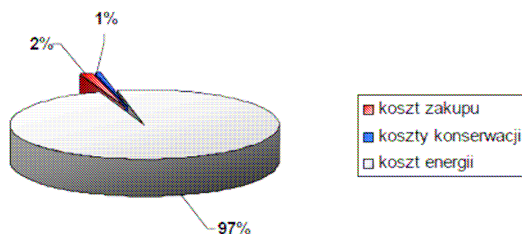
Rys. 2. Koszty w cyklu życia silnika indukcyjnego, trójfazowego o mocy 1,1 kW (długość cyklu życia 12 lat, czas pracy 4000 h/rok) [4]



Rys. 3. Koszty w cyklu życia silnika indukcyjnego, trójfazowego o mocy 11 kW (długość cyklu życia 15 lat, czas pracy 4000 h/rok) [4]



Rys. 4. Koszty w cyklu życia silnika indukcyjnego, trójfazowego o mocy 110 kW (długość cyklu życia 20 lat, czas pracy 4000 h/rok) [4]



Rys. 5. Udział poszczególnych kosztów w 20-letnim cyklu życia silnika indukcyjnego, trójfazowego o mocy 110 kW klasy IE2 (EFF1), czas pracy 4000 h/rok [4]

#### 4. Kierunki optymalizacji silników indukcyjnych

Miejsca powstawania strat w silniku indukcyjnym i planowany sposób ich redukcji:

- **Straty prądowe w uzwojeniu wirnika:**

FES Tamel chce przebadać możliwość redukcji tych strat poprzez zwiększenie ilości materiałów czynnych (aluminium) oraz optymalizację przekroju żłobków z zachowaniem rozkrojów blach (zwiększenie przekroju uzwojenia).

Planowane jest również przeprowadzenie testów wpływu na parametry silnika poprzez:

- zastosowanie żłobków otwartych,
- zastosowanie żłobków zamkniętych,
- zalanie wirnika ze żłobkami zamkniętymi i późniejsze ich otwarcie na etapie obróbki mechanicznej,
- wykonanie dodatkowej obróbki cieplnej gotowego wirnika mającej na celu odseparowanie klatki aluminiowej od blach stalowych w procesie szybkiego stygnięcia wirnika,

- zoptymalizowanie sposobu przeprowadzenia obróbki mechanicznej powierzchni wirnika.

Stosowana jest również technologia polegająca na odlewaniu z miedzi klatki wirnika, jednakże z uwagi na kosztowny proces zalewania wirnika miedzią (ze względów temperaturowych samego procesu) zastosowanie jej w wirniku wydaje się być trudne do realizacji z ekonomicznego punktu widzenia.

- **Straty prądowe w uzwojeniu stojana:**

Zastosowanie wzrostu masy materiałów czynnych dzięki zwiększeniu przekroju przewodów w uzwojeniu stojana oraz poprzez powiększenie przekroju żłobków blach stojana.

Dodatkowo planujemy wprowadzenie skrócenia długości połączeń czołowych uzwojeń stojana, które nie biorą czynnego udziału w generowaniu strumienia elektromagnetycznego, a przyczyniają się do wzrostu strat w miedzi. Optymalizacji samego uzwojenia dokonamy poprzez zmniejszenie liczby zwojów w uzwojeniu stojana oraz maksymalizacji współczynnika wypełnienia żłobka przy jednoczesnym zachowaniu możliwości uzwojania maszynowego, co pozwoli nam w przyszłości na seryjną i stosunkowo tanią produkcję silników wysokiej sprawności.

Prace badawcze obejmą również możliwość zastosowania drutu nawojowego emaliowanego wykonanego z tzw. miedzi beztlenowej charakteryzującej się zwiększoną przewodnością uzyskaną poprzez eliminację zanieczyszczeń miedzi.

- **Straty w żelazie:**

Eliminacja strat poprzez zastosowanie blach elektrotechnicznych o mniejszej stratności. Plan badań przewiduje zastosowanie blachy prądnicowej o parametrach:

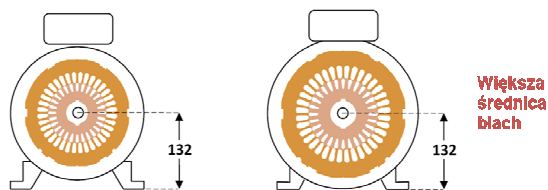
- M530-50A – obecnie stosowana przez Tamel,
- M470-50A,
- M400-50A,
- M330-50A – blacha prądnicowa o znacznie obniżonej stratności.

Na podstawie wyników badań przeprowadzimy analizę mającą na celu wybór optymalnych parametrów blach pod względem technicznym i ekonomicznym.

Wydłużenie pakietu blach stojana (wydłużenie obudowy silnika bez zmian wymiarów montażowych).

Chcemy również wprowadzić rozwiązanie polegające na maksymalizacji średnicy zewnętrznej blach stojana przy równoczesnym zachowaniu wymiarów przyłączeniowych silnika we-

dług standardów IEC. Kadłub silnika będzie tak zaprojektowany, aby mógł pomieścić maksymalnie dużą średnicę blach przy jednoczesnym zachowaniu wzniosu silnika.



Rys. 6. Poglądowe przekroje silników wzniosu 132 o standardowych i zwiększonych średnicach blach

• **Straty mechaniczne w łożyskach:**

FSE Tamel planuje przeprowadzenie badań wzrostu sprawności silników o różnych prędkościach obrotowych poprzez zastosowanie łożysk tocznych o zredukowanym współczynniku tarcia (low friction bearing). Łożyska takie uzyskuje się poprzez odpowiedni dobór łożysk tocznych (selekcja pod kątem średnic i luzu poprzecznego), poprawę smarowania łożyska (smar o niskim współczynniku minimalnego momentu potrzebnego do wprowadzenia łożyska w ruch obrotowy) oraz zastosowanie uszczelnień eliminujących straty wywołane tarciem o bieżnię łożyska.

• **Straty mechaniczne, układ wentylacji:**

Zmniejszenie strat w stojanie i wirniku umożliwia nam zastosowanie wentylatora o mniejszej średnicy i jednoczesnej optymalizacji kształtu kierownicy osłony przewietrznika. Dopasowanie konstrukcji wirnika do lepszych warunków przepływu powietrza pozwoli na zmniejszenie straty tarcia aerodynamicznego.

Kolejnym krokiem mającym na celu redukcję strat mechanicznych jest zastosowanie bezkontaktowych uszczelnień wału w miejsce standardowo stosowanych pierścieni simmera. Naszym celem jest skonstruowanie i przetestowanie kilku typów uszczelnień labiryntowych i wybranie rozwiązania dającego wymagany stopień ochrony IP przy równoczesnej eliminacji tarcia pomiędzy wałem, uszczelnieniem i tarczą obudowy silnika.

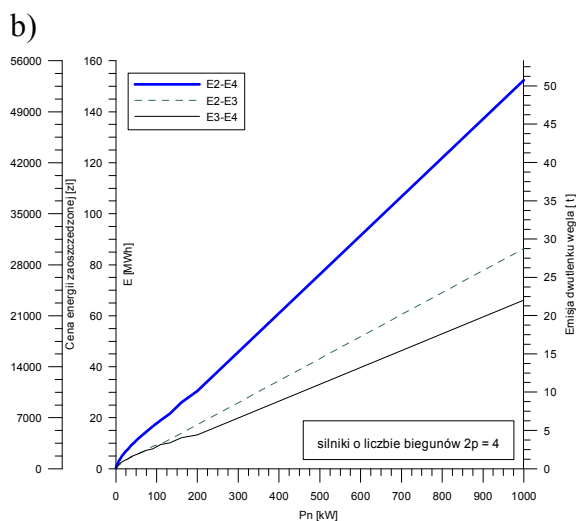
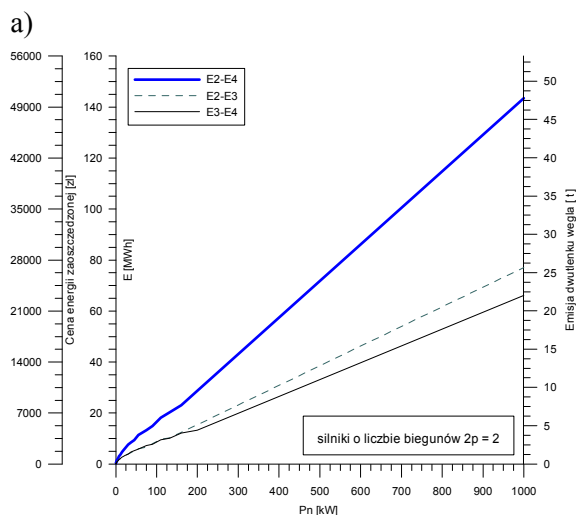
• **Straty dodatkowe:**

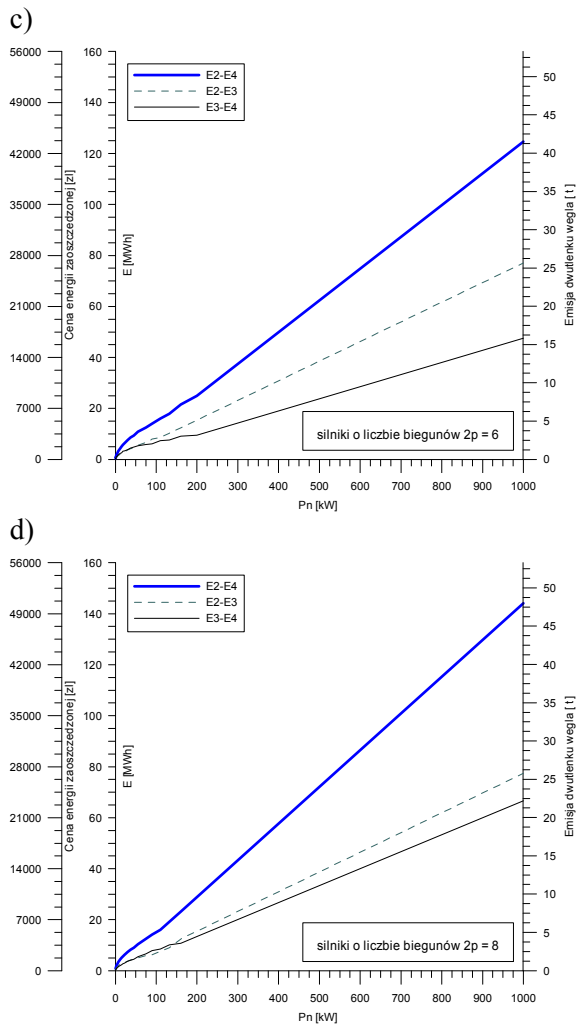
Optymalizacja wielkości szczeliny powietrznej pomiędzy wirnikiem, a stojaniem;

## 5. Porównanie kosztów oszczędności energii przy zastosowaniu silników różnych klas sprawności

W tym rozdziale autorzy przedstawili wyniki obliczeń różnicy kosztów wynikających z zastosowania silników o różnych klasach sprawności. W przeprowadzonej analizie oszczędności energii założono okres pracy silnika 1 rok, w tym 8760 godzin pracy.

Do wykonania obliczeń zostały wykorzystane tabele sprawności przypisane do poszczególnych zakresów mocy, zgodnie z draftem normy IEC 60034-30-1 Ed.1. Obliczenia obrazują różnice zaoszczędzonej energii, jej ceny oraz oszczędności emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery przy zastosowaniu różnych klas sprawności silników. Na wykresach zamieszczonych na rysunku 7 przedstawiono wyniki obliczeń w formie wykresów porównawczych poszczególnych klas silników.





Rys. 7. Obliczone charakterystyki energii, emisji dwutlenku węgla oraz ceny zaoszczędzonej energii wynikające z różnicy sprawności silników różnych klas. Wyniki zostały przedstawione jako porównanie klas sprawności w funkcji mocy znamionowej silników

### Podsumowanie

Rozwój przemysłu ma bezpośredni, negatywny wpływ na środowisko naturalne naszej planety. W ostatnich latach stawiany jest coraz większy nacisk na stosowanie rozwiązań bardziej ekologicznych, energooszczędnych.

Dane zebrane na przestrzeni ostatnich lat, dotyczące urządzeń wykorzystujących energię elektryczną wskazują na układy napędowe jako największą grupę urządzeń odbiorczych. W wymienionej grupie znaczącą podgrupę tworzą silniki indukcyjne, klatkowe.

W artykule autorzy przybliżyli ogólnosiwiatowy trend podwyższania sprawności silników indukcyjnych, klatkowych dostępnych na rynku oraz normy, które go determinują.

Opisane zostały również regulacje prawne, które kształtowały wyznaczane przez normy zakresy sprawności silników na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat.

Została przeprowadzona analiza techniczno-ekonomiczna na przykładzie silników mocy 1,1 i 11 kW, która wykazała zasadność zakupu silnika o wyższej klasie sprawności (co wiąże się zazwyczaj z wyższą ceną zakupu), w perspektywie oszczędności energii wynikającej z okresu pracy silnika energooszczędnego.

Przedstawiono również udział poszczególnych kosztów silnika klasy IE2 o mocy  $P_n=110\text{kW}$  w 20-letnim cyklu życia przy założeniu czasu pracy 4000h/rok. Według opracowanych materiałów koszt zakupu oraz konserwacji silnika przy takim cyklu i przy założonym czasie pracy silnika jest równy jedynie 3% ceny kosztów związanych z eksploatacją silnika. Pozostały koszt jest kosztem zużytej energii.

Artykuł przedstawia również obliczone porównanie kosztów oszczędności energii przy zastosowaniu różnych klas sprawności silników. Obliczone charakterystyki pokazują różnice zaoszczędzonej energii wynikające z różnic sprawności silników klas IE2, IE3 i IE4 dla zakresu mocy objętych normami. Obliczenia przeprowadzono dla cyklu  $h=8760/1\text{rok}$  pracy silnika. Wykresy przedstawiają również oszczędność, emisji dwutlenku węgla wynikającą z porównania klas sprawności.

### Bibliografia

- [1]. Draft normy IEC 60034-30-1 Ed.1.
- [2]. Norma polska PN-EN 60034-2-1:2008.
- [3]. <http://automatykab2b.pl/tematmiesiaca/3875-europa-stawia-na-silniki-elektryczne-o-podwyzszonej-sprawnosci?showall=1#.UXYj-cpknGo>.
- [4]. [www.pemp.pl/](http://www.pemp.pl/).