

**Tadeusz Śliwiński**  
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

## **DOSTOSOWANIE KRAJOWEJ PRODUKCJI SILNIKÓW INDUKCYJNYCH DO NOWYCH WYMAGAŃ IEC I UNII EUROPEJSKIEJ**

### **IMPLEMENTING OF THE NEW ECODESIGN REQUIREMENTS OF IEC AND OF THE EUROPEAN COMMUNITY IN THE HOME PRODUCTION OF INDUCTION MOTORS**

**Abstract:** The new standards of IEC defining four efficiency classes of induction motors and the respective regulations of the European Union are presented. The dependence of the material costs on the expected efficiency is analyzed by means of the optimization procedure. The economical effects which result from implementing the new regulations for the users and for the manufacturers are evaluated. Some details of the new regulations of the European Union are criticized.

#### **1. Wprowadzenie**

Silniki indukcyjne są podstawową grupą odbiorników energii w systemach energetycznych i przetwarzają według szacunków Unii Europejskiej [4] ok. 70% całej energii elektrycznej zużywanej przez przemysł. Ogólna moc silników indukcyjnych zainstalowanych w krajach Unii ocenia się na 260 GW, a energię pobieraną przez nie w ciągu roku 2005 na 1070 TW.h., przy czym przewiduje się wzrost tej ostatniej wartości w 2015 r. do 1250 TW.h. Ogólne możliwe oszczędności energii elektrycznej pobieranej przez silniki indukcyjne w 2020 r. oceniono na 135 TW.h.

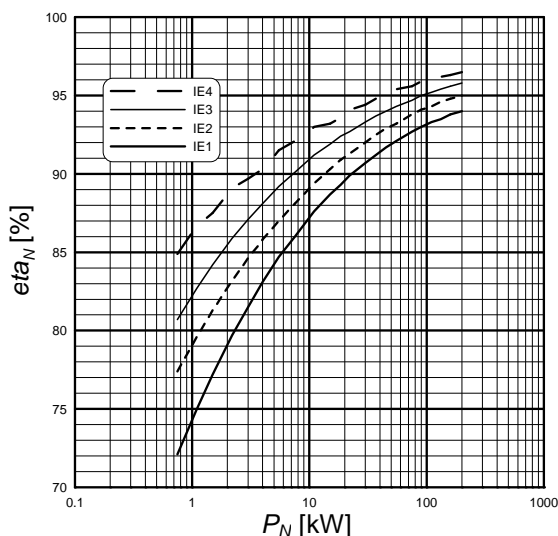
W naszym kraju wyprodukowano w 2007 roku 907.000 szt. wielofazowych silników prądu przemiennego o łącznej mocy 3100 MW [13], z czego wynika średnia moc znamionowa tych silników 3,4 kW. Ogólne zużycie energii w tym samym roku wyniosło 139 TW.h. Zakładając, że ok. 60% tej energii pobrane zostało przez silniki działające w układach napędowych o nieregulowanej prędkości, otrzymuje się jej ilość wynoszącą ok. 80 TW.h. Jeśli oceniać możliwe oszczędności energii w 2020 r. w podobnym stopniu, jak to przyjęto w Unii Europejskiej, wyniosłyby one ok. 3 TW.h rocznie, co przy średniej cenie 0,5 zł/kW.h daje 1,5 miliarda zł.

Działania zmierzające do zmniejszania strat energii zarówno ze względów ekonomicznych, jak i w trosce o ograniczanie globalnych zmian klimatycznych związanych z emisją dwutlenku węgla przy produkcji energii elektrycznej w elektrowniach, działających z wy-

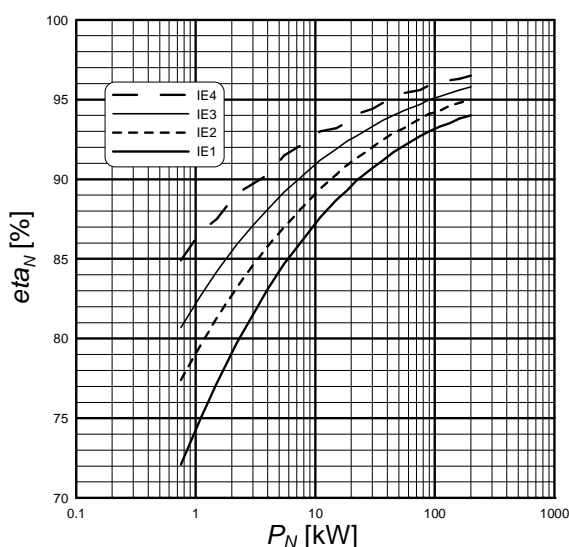
korzystaniem procesów spalania, prowadzone są już od ponad 25 lat. Ich przebieg do roku 2000 przedstawiono we wcześniejszej publikacji autora [12]. Ostatnio nastąpił istotny postęp w formalnych działaniach zarówno na skalę światową, jak i w Unii Europejskiej. Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna (IEC) przyjęła dwie normy ogólnoświatowe. W pierwszej z nich [1] ustalono trzy klasy sprawności silników niskiego napięcia: IE1 (standard efficiency), IE2 (high-efficiency) oraz IE3 (premium efficiency). W drugiej normie [2] podano wskazówki dotyczące właściwego doboru silników do przewidywanego charakteru ich pracy, a także dodano czwartą klasę sprawności IE4 (super-premium efficiency). W normie tej określono również zalecenia co do silników o regulowanej prędkości, które tu nie będą omawiane. Zależność minimalnych wartości sprawności silników dwu- i czterobiegunowych od mocy wg tych norm przedstawiono na rys. 1 i 2. Unia Europejska w swojej dyrektywie postuluje wycofanie z produkcji silników o niższych klasach sprawności: silników klasy IE1 od 2011 r., silników klasy IE2 o mocy większej od 7,5 kW od 2015 r. oraz silników klasy IE2 o mocy od 0,75 do 7,5 kW od 2017 r. Do projektu tych wymagań autor referatu zgłosił zastrzeżenia, które będą omówione w jego dalszej części.

W dotychczasowych pracach nad optymalizacją silników [6,7,12] przyjmowano jako funkcję celu koszt użytkowania  $K$  obejmujący zarówno koszt silnika lub w przybliżeniu koszt głównych materiałów  $K_m$  jak i koszt  $K_e$  strat

energii przy jego pracy w ciągu całego okresu amortyzacji



Rys.1 Sprawność silników dwubiegunowych czterech klas wg IEC [1,2]



Rys.2. Sprawność silników czterobiegunowych czterech klas wg IEC [1,2].

$$K = K_m + K_e \quad (1)$$

$$K_e = \frac{h(1-\eta)}{\eta d} P_N c_e \quad (2)$$

$d$  - oznacza współczynnik amortyzacji silnika [12],  $h$  - liczbę godzin pracy silnika w ciągu roku, zaś  $c_e$  - cenę 1 kW.h energii elektrycznej.

W obecnej sytuacji, kiedy maksymalne straty energii w silniku określone są z góry przez jego sprawność, można przyjmować jako funkcję celu minimalną wartość kosztu silnika lub

w uproszczeniu minimalny koszt głównych materiałów. Przy ustalaniu zależności sprawności od rozwiązania silnika należy uwzględnić następujące sposoby jej zwiększania:

- zwiększanie wymiarów rdzenia, dzięki czemu zmniejsza się gęstość przetwarzanej energii i gęstość strat [9]
- zastosowanie optymalnych wymiarów poszczególnych blach i długości rdzenia jak również optymalnego uzwojenia [8]
- dobranie optymalnych wymiarów wentylatora, przy których otrzymuje się minimum sumy strat wentylacyjnych i strat w uzwojeniach [5], zależnych od wydatku powietrza i temperatury
- zastosowanie lepszych materiałów
- udoskonalenie procesów technologicznych, od których zależą straty mocy
- złagodzenie ograniczeń co do parametrów rozruchowych [10].

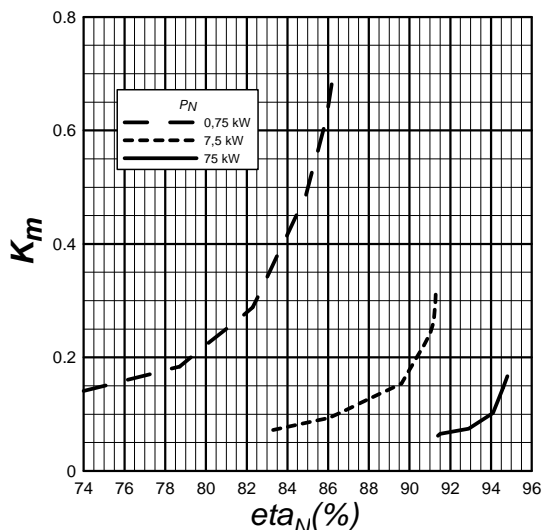
Spośród wymienionych działań zmierzających do zwiększenia sprawności silników rozpatrzone tu zostaną dwa pierwsze.

## 2. Zależność kosztu głównych materiałów od sprawności

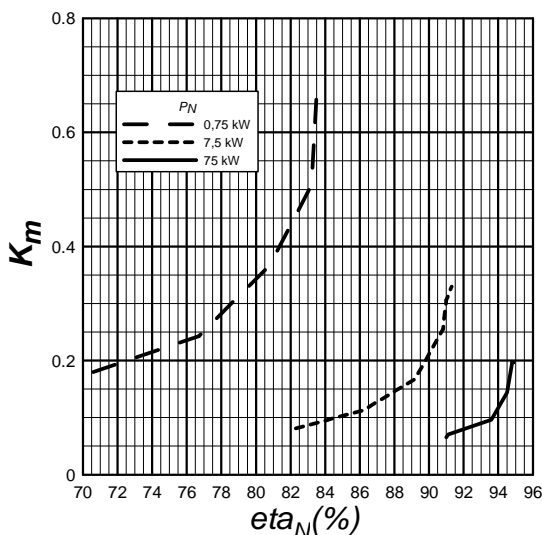
Podstawowym zagadnieniem przy dostosowywaniu się do nowych wymagań jest uwzględnienie związanych z nimi efektów ekonomicznych, zarówno dla całej gospodarki krajowej, jak i oddzielnie dla użytkowników silników i dla ich producentów.

Istotną rolę odgrywa tu wynikająca z uwarunkowań technicznych i ekonomicznych zależność kosztu głównych materiałów od wymaganej sprawności silnika. Zależność tę można przeanalizować korzystając z opracowanego wcześniej programu optymalizacyjnego OSIN5 [12]. Przyjęto typową formę wykonania silników (budowy zamkniętej IP44) z zastosowaniem dotychczasowych materiałów i procesów produkcyjnych. Założono, że niezależnie od klasy sprawności silnika takie same są straty mechaniczne obliczane wg [5] oraz straty dodatkowe obciążeniowe określone w normach [5]. Przyjęto średnie aktualne relacje cen 1 kg głównych materiałów (blachy na rdzeń, miedziane przewody nawojowe, aluminium na odlewaną klatkę i żeliwna obudowa) do ceny 1 kW.h energii i założono, że wartość współczynnika amortyzacji  $d=0,25$ . Wykonując obliczenia optymalizacyjne przy założonej różnej liczbie godzin  $h$  pracy silnika

w roku (od 100 do 8760) otrzymano rozwiązania o minimalnym koszcie  $K_m$  głównych materiałów i o odpowiadających im wartościach sprawności  $\eta_N$ . Wyniki obliczeń silników dwu- i czterobiegunowych o mocy 0,75, 7,5 i 75 kW i o różnych wartościach sprawności przedstawiono na rys.3 i 4.



Rys.3. Koszt  $K_m$  głównych materiałów na jednostkę mocy optymalnych silników dwubiegunowych w zależności od ich sprawności  $\eta_N$ .



Rys.4. Koszt  $K_m$  głównych materiałów na jednostkę mocy optymalnych silników czterobiegunowych w zależności od ich sprawności  $\eta_N$ .

Wartości  $K_m$  na rysunkach wyrażone są na jednostkę mocy (1 W) znamionowej silnika i w stosunku do ceny 1 kWh energii elektrycznej na zaciskach silnika.

Analizując przedstawione tu wykresy trzeba wziąć pod uwagę, że przy wykonywaniu obli-

czeń optymalizacyjnych uwzględniono zawarte w programie następujące ograniczenia:

- minimalny dopuszczalny moment obrotowy i maksymalna dopuszczalna moc pozorna w stanie zahamowanym [3]
- maksymalny dopuszczalny przyrost temperatury uzwojenia przy obciążeniu znamionowym
- maksymalny skok przyrostu temperatury uzwojenia po rozruchu ze stanu nagranego [5].

W obliczeniach przyjęto wartości momentu rozruchowego o 10 % większe i mocy rozruchowej o 10% mniejsze niż przewidziane w normie [3], graniczny dopuszczalny przyrost temperatury uzwojenia przy zastosowaniu układu izolacyjnego klasy F- 100 K oraz dopuszczalny skok przyrostu temperatury uzwojenia stojana przy rozruchu – 20 K.

Analizując przebiegi zależności na rys.3 i 4 stwierdzić można, że lewy koniec krzywych, o najmniejszym koszcie materiałów i najmniejszej sprawności określony jest przede wszystkim przez ograniczenia termiczne. Tańszych silników przy przyjętych założeniach wykonać nie można. Zwiększanie sprawności związane jest z coraz większym wzrostem kosztu materiałów, a prawy koniec krzywych wskazuje na to, że istnieje graniczna sprawność, której przez zmianę wymiarów i danych uzwojeniowych przy przyjętym rozwiązaniu konstrukcyjnym, oraz przy zastosowanych materiałach i przyjętych ograniczeniach przekroczyć nie można.

### 3. Efekty ekonomiczne z punktu widzenia producenta.

Zadaniem producenta jest zaprojektowanie i wytwarzanie silników określonych klas sprawności, spełniających poza tym omówione już wymagania co do parametrów rozruchowych i termicznych. Producent dąży do tego, by produkować silniki jak najmniejszym nakładem kosztów, których bardzo istotną część stanowi koszt materiałów. Jak wynika z przedstawionych analiz, sytuacja producenta jest bardzo trudna, gdyż aby osiągnąć możliwie duży zysk, musi zbliżyć się jak najbardziej do granicy sprawności, nie przekraczając jej jednak. Istnieje wprawdzie określona w normach [ ] tolerancja sprawności, lecz trzeba również uwzględnić pewien margines na niedokładność obliczeń projektowych i roz-

rzut produkcyjny związany m. in. z rozrzutem właściwości materiałów.

Efekty ekonomiczne uzyskane przez producenta będą zatem w dużym stopniu zależały od dokładnego zaprojektowania silników i spełnienia pozostałych wymienionych warunków.

#### 4. Efekty ekonomiczne dla użytkowników.

Wprowadzenie do produkcji silników kilku klas sprawności umożliwia użytkownikom uzyskiwanie znacznych oszczędności dzięki temu, że będą mogli dobrać właściwe silniki do przewidywanych warunków ich pracy. Miarą tych efektów ekonomicznych może być koszt przetwarzania energii  $k_{em}$  [11]. Koszt ten określa w jakim stosunku cena  $c_m$  1 kW.h energii na wale silnika jest większa od ceny  $c_e$  1 kW.h energii na zaciskach silnika

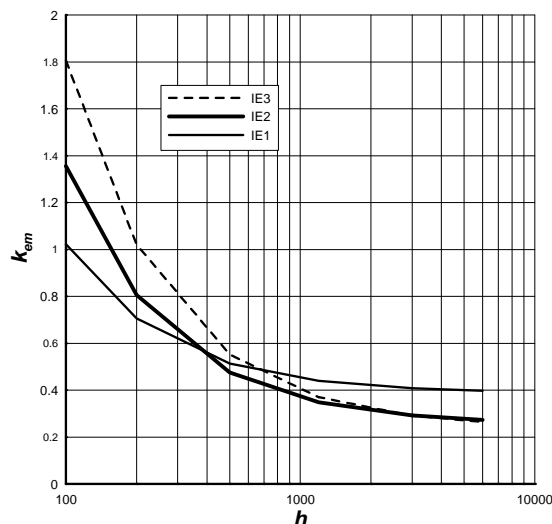
$$c_m = (1 + k_{em})c_e \quad (3)$$

Koszt przetwarzania energii obejmuje amortyzację kosztu zakupu silnika lub w przybliżeniu kosztu głównych materiałów  $K_m$  oraz roczny koszt strat energii  $K_e$  podczas jego pracy przy założeniu, że silnik pracuje  $h$  godzin w roku z obciążeniem znamionowym

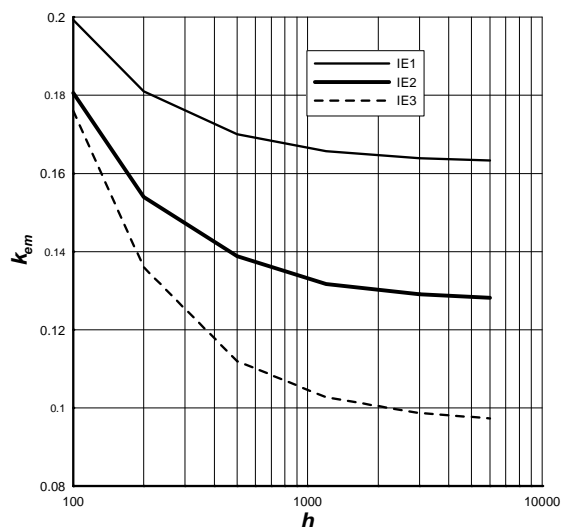
$$k_{em} = \frac{1000K_m d}{hP_N} + \frac{1 - \eta_N}{\eta_N} \quad (4)$$

Dla wygody koszt materiałów jest w tej zależności wyrażony w odniesieniu do 1W mocy znamionowej silnika i przy założeniu ceny energii elektrycznej  $c_e=1$ .

Głównym parametrem decydującym o prawidłowym wyborze przez użytkownika silnika o nieręgulowanej prędkości jest przewidywana liczba  $h$  godzin pracy w roku z pełnym obciążeniem. Dla określenia korzyści dla użytkownika wynikających z prawidłowego doboru silników wykonano projektowe obliczenia optymalizacyjne silników czterobiegunowych o mocy 0,75, 7,5 i 75 kW trzech klas sprawności IE1, IE2 i IE3. Następnie określono koszt ich użytkowania przy obciążeniu znamionowym z różną liczbą godzin w roku. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rys. 5, 6 i 7.

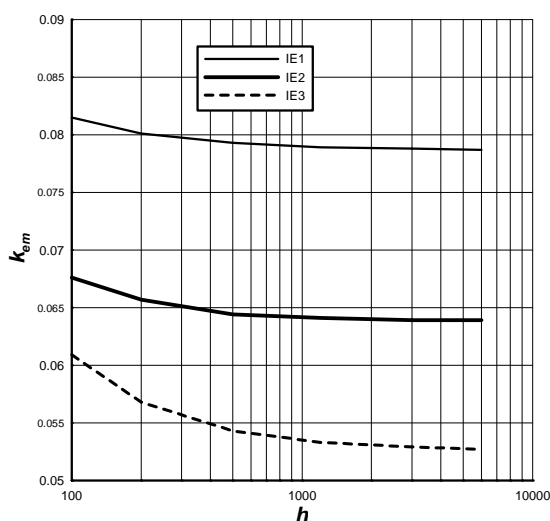


Rys.5. Koszt przetwarzania energii przez optymalne czterobiegunowe silniki o mocy 0,75 kW trzech klas sprawności: IE1, IE2 i IE3 w warunkach pracy z pełnym obciążeniem w ciągu różnej liczby  $h$  godzin w roku.



Rys.6. Koszt przetwarzania energii przez optymalne czterobiegunowe silniki o mocy 7,5 kW trzech klas sprawności: IE1, IE2 i IE3 w warunkach pracy z pełnym obciążeniem w ciągu różnej liczby  $h$  godzin w roku

W przypadku największego silnika (rys.7) o mocy 75 kW koszt materiałów na jednostkę mocy jest stosunkowo niewielki w stosunku do kosztu strat energii i zależność ta jest w pełni przejrzysta: niezależnie od liczby godzin pracy w roku opłaca się stosować silniki najwyższej klasy sprawności. Koszt przetwarzania energii silników klasy IE2 jest o ok. 20% mniejszy niż silników klasy IE1, zaś silników IE3 o ok. 15% mniejszy niż silników klasy IE2 i niewiele zależy od liczby godzin pracy w roku.



Rys. 7. Koszt przetwarzania energii przez optymalne czterobiegunowe silniki o mocy 75 kW trzech klas sprawności: IE1, IE2 i IE3 w warunkach pracy z pełnym obciążeniem w ciągu różnej liczby  $h$  godzin w roku

W przypadku silnika o mocy 7,5 kW (rys.6) zależności są znacznie bardziej zdecydowane: im większa liczba godzin pracy w roku tym bardziej opłaca się stosować silniki wyższej klasy. Największe efekty otrzymuje się w silnikach małych. W silniku o mocy 0,75 kW (rys.5) przy pracy z małą liczbą godzin w roku najbardziej opłacalne są najtańsze silniki IE1. Koszt przetwarzania energii przy tej liczbie godzin przez silnik IE2 jest większy o ok.35%, zaś przez silnik IE3 aż o 80 %. Przy pracy z większą liczbą godzin w roku silnik IE2 daje wprawdzie ok. 30% zysku w porównaniu z silnikiem IE1, lecz zastosowanie silnika IE3 już dalej tego zysku nie zwiększa. Przy  $h > 2000$  godzin znika różnica między silnikami IE2 i IE3.

## 5. Efekty ekonomiczne dla całej gospodarki.

Z punktu widzenia całej gospodarki istotne jest wykonywanie przez silniki niezbędnej pracy mechanicznej przy jak najmniejszym zużyciu materiałów niezbędnych do wyprodukowania silników i jak najmniejszych stratach energii podczas ich pracy. W ostatnim czasie przybył jeszcze jeden warunek: jak najmniejszych zmian klimatycznych związanych z działalnością człowieka, a w szczególności emisji do atmosfery dwutlenku węgla. Ograniczanie tego zjawiska próbuje się wy-

musić karami za nadmierną emisję tego gazu w wysokości ok. 20 euro za tonę.

Tak więc przy ocenie efektów ekonomicznych dla całej gospodarki wynikających z wprowadzenia omawianych tu nowych norm światowych IEC oraz dyrektyw Unii Europejskiej oprócz opisanych tu wymiernych kosztów materiałowych i kosztu strat energii w silnikach należy uwzględnić kary za emisję dwutlenku węgla. Jak wynika z informacji prasowych utarł się zwyczaj handlowania przyznanymi poszczególnym krajom kwotami w różnych gałęziach przemysłu. W związku z tym trzeba problem emisji dwutlenku węgla rozpatrywać kompleksowo i brać pod uwagę nie tylko efekty wynikające ze zmniejszenia strat energii, lecz również zwiększenie tej emisji w związku ze wzrostem zużycia materiałów. Materiały te to przede wszystkim blacha elektrotechniczna, miedziane przewody nawojowe, aluminium na klatkę oraz obudowa żeliwna lub ze stopów aluminium. Produkcja tych wszystkich materiałów zaczynając od wydobycia rud metali poprzez procesy hutnicze oraz elektrolizę odbywa się z dużym nakładem energii oraz ze znaczną emisją dwutlenku węgla.

## 6. Wnioski

1. Wprowadzenie do produkcji i udostępnienie odbiorcom silników o różnych klasach sprawności przyniesie zarówno użytkownikom jak i całej gospodarce znaczne korzyści dzięki odczuwalnemu zmniejszeniu zużycia energii jak i przez zmniejszenie kar płaconych za nadmierną emisję dwutlenku węgla

2. Dyrektywy Unii Europejskiej obciążone są niektórymi mankamentami. Przede wszystkim ograniczono się w nich do zagadnienia strat w silnikach, bez uwzględnienia konieczności zwiększenia zużycia materiałów, przy produkcji których również występuje emisja dwutlenku węgla.

3. W normach IEC odnoszących się do tego zagadnienia określa się sprawność silników przy pełnym obciążeniu. Jak wynika z badań przeprowadzonych w Unii Europejskiej [4], jak również z własnych doświadczeń silniki pracują zwykle z obciążeniem częściowym, przy którym ich sprawność może być znacznie mniejsza. Z tego powodu należałoby określać sprawność przede wszystkim przy obciążeniu częściowym, np. 75%..

4. Dyrektywy Unii Europejskiej dotyczące wycofywania z produkcji silników niższych klas sprawności (IE1 i IE2) są, jak to wykazano (rys.5), nieuzasadnione, a nawet szkodliwe z punktu widzenia kompleksowego ujęcia kosztów użytkowania silników oraz ograniczania emisji CO<sub>2</sub> zarówno przy produkcji energii elektrycznej w elektrowniach, jak i przy produkcji materiałów niezbędnych do wykonania silników.

### Literatura

- [1] PN-EN 60034-30:2009. *Klasy sprawności silników indukcyjnych (kod IE)*.
- [2] IEC 60034-31:2009. *Guide for the selection and application of energy-efficient motors including variable-speed applications*.
- [3] PN-EN 60034-12:2004. *Maszyny elektryczne wirujące. Charakterystyki rozruchowe jednobiegowych trójfazowych silników indukcyjnych klatkowych*.
- [4] de Almeida A.T., Fonseca P.: *Characterisation of EU Motor Use. Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives*. Springer 2000.
- [5] Śliwiński T.: *Metody obliczania silników indukcyjnych, t.I Analiza*. PWN, 2008.
- [6] Śliwiński T.: *Optymalizacyjne obliczenia projektowe silników indukcyjnych*. Prace Instytutu Elektrotechniki, Nr 114, 1980, s.5-26.
- [7] Śliwiński T.: *Optymalizacja kosztów materiałowych i eksploatacyjnych przy projektowaniu silników indukcyjnych*. Wiadomości Elektrotechniczne, 1980, Nr 11.
- [8] Śliwiński T.: *Optymalna synteza silnika indukcyjnego*. Zeszyty Naukowe politechniki Poznańskiej. Elektryka. 1992, Nr 40, s.31-34.
- [9] Śliwiński T.: *Straty mocy a objętość rdzenia silników indukcyjnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektryka, Nr 111, 1999, s.181-187.
- [10] Śliwiński T.: *Wpływ parametrów rozruchowych silników indukcyjnych na ich koszt produkcji i eksploatacji*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka. Nr 176, 2001, s.79-88..
- [11] Śliwiński T.: *Koszt przetwarzania energii przez silniki indukcyjne*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, Nr 63, 2001, wyd. BOBRME Komel,
- [12] Śliwiński T.: *Optymalizacja silników indukcyjnych. Doświadczenia i wnioski*. XL Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Hajnówka 2004, s.19-26.
- [13] Rocznik Statystyczny 2008.

### Autor

Prof. zw. dr inż. Tadeusz Śliwiński  
Instytut Elektrotechniki  
Zakład Maszyn Elektrycznych  
04-703 Warszawa, ul. Pożaryskiego 28  
tel 0-22-812-25-77  
[t.sliwinski@iel.waw.pl](mailto:t.sliwinski@iel.waw.pl)

### Recenzent

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski