

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

ENERGOOSZCZĘDNE SILNIKI INDUKCYJNE

ENERGYSAVING INDUCTION MOTORS

Streszczenie: W napędach elektrycznych, pracujących przy stałej prędkości obrotowej stosowane są silniki indukcyjne zasilane bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej. Oszczędność energii uzyskuje się poprzez stosowanie silników o wysokiej sprawności. Na wykresach i tabeli zestawiono silniki, w zakresie mocy od 0,75 kW do 375 kW, o różnych klasach sprawności. Poprzez wymianę silników, standardowych na energooszczędne, pokazano efekty oszczędności energii bloku elektroenergetycznego 200 MW.

Abstract: In electric drives operating at constant rotational speed, induction motors are used, supplied directly from the power grid. Energy saving is achieved by using high efficiency motors. The table and graphs show the engines in the power range from 0.75 kW to 375 kW, with different efficiency classes. Through replacing motors - standard ones for energy-saving ones - the energy-saving effects of the 200 MW power block are shown.

Słowa kluczowe: silniki indukcyjne, sprawność, energooszczędność.

Keywords: induction motors, efficiency, energy saving.

1. Wstęp

Michał Doliwo Dobrowolski (1862 -1919), pracując w koncernie AEG (niem. - Allgemeine Electricitäts-Gesellschaft) opracował w 1889 roku trójfazowy silnik indukcyjny z wirnikiem klatkowym. Od tego czasu do końca lat 90-tych ubiegłego wieku optymalizowano konstrukcje silników indukcyjnych i technologię ich produkcji, według kryterium mniejszej masy i niższej ceny, przy tych samych parametrach znamionowych.

W latach 80-tych XX wieku ekolodzy zwrócili uwagę na szkodliwe oddziaływanie na środowisko energetyki cieplnej, która jest podstawowym źródłem energii elektrycznej. Organizacje ekologiczne argumentują: „im mniej zużyje się energii elektrycznej, tym mniej tej energii elektrycznie wyprodukują i proporcjonalnie mniej wyemitują do atmosfery szkodliwych gazów i pyłów”. Zwrócono w tym czasie także uwagę na zjawisko efektu cieplarnianego.

Biorąc pod uwagę, że napędy elektryczne zużywają około 60% energii elektrycznej pobieranej przez przemysł, więc oszczędność energii w elektrycznych układach napędowych ma pierwszorzędne znaczenie. Kryterium energooszczędności wynikające z problemów ekologicznych jest równoznaczne z kryterium minimum kosztów eksploatacyjnych, które są determinowane przede wszystkim kosztem zużytej energii.

Projektując elektryczny układ napędowy uwzględnia się całkowite koszty w okresie jego eksploatacji, a więc sumę kosztów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych. Należy mieć na uwadze, że koszty eksploatacyjne głównie zależą od: liczby godzin pracy napędu w skali roku oraz kosztów przeglądów i napraw. Obecnie przyjmuje się, że napęd jest zaprojektowany poprawnie pod względem ekonomicznym, jeśli wzrost kosztów inwestycyjnych zostanie zrównoważony obniżeniem kosztów eksploatacyjnych tak, aby w czasie do 5-ciu lat nastąpił zwrot zwiększonych nakładów inwestycyjnych.

Przykładem realizacji napędu energooszczędnego jest przenośnik taśmowy przeznaczony do transportu rudy, zainstalowany w jednej z hut [5]. Przenośnik ma długość 1783 m i wydajności 3000 m³/h. Przenośnik napędzany jest dwoma silnikami indukcyjnymi pierścieniowymi o parametrach znamionowych: 400 kW, 6 kV, 980 obr/min. Urządzenie współpracujące z przenośnikiem ma wydajność 1500 m³/h, zatem przenośnik pracuje z wydajnością o 50% mniejszą, tzn. 1500 m³/h, czyli przy 50-cio procentowym załadunku taśmy.

Pomiar zużycia energii wykazał, że:

- ✓ przy znamionowej prędkości taśmy i przy 50-cio procentowym załadunku rudą, średni pobór mocy z sieci elektroenergetycznej (obliczony z pomiaru w czasie 137,8 h energii pobranej) wynosił 298 kW,

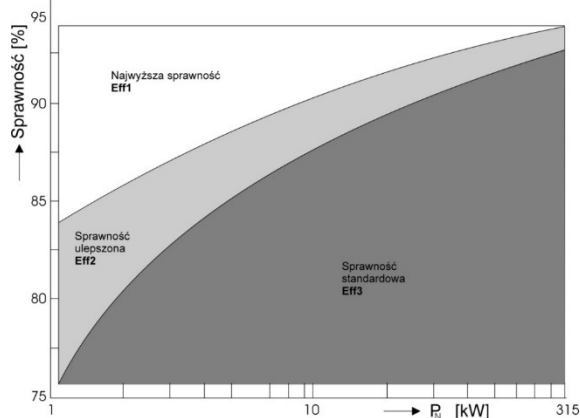
- ✓ przy prędkości taśmy równej 50 % prędkości znamionowej i 100 procentowym załadunku ruda, średni pobór mocy (obliczony z pomiarów w czasie 24,4 h energii pobranej) wynosił 199 kW.

Z przykładu tego widać, że realizacja tego samego zadania w tym samym czasie, może odbywać się z mniejszą o 33 % mocą pobieraną z sieci elektroenergetycznej, pomimo że w tym przypadku o 1/3 wzrósł moment obciążenia z tytułu większego obciążenia taśmy. Wskazany przenośnik pracuje przy stałej prędkości taśmy zatem wystarczy dopasować prędkość silników napędowych do wymaganej prędkości taśmy przenośnika i już uzyska się 33 % oszczędności energii. Zmniejszenie prędkości taśmy przynosi jeszcze inne korzyści: obniża poziom drgań układu i natężenie emitowanego hałasu, zmniejsza zatem negatywne oddziaływanie urządzenia na środowisko, zmniejsza się także zużycie taśmy i łożysk w rolkach transportowych.

2. Podział silników elektrycznych wg klas sprawności

Napędy elektryczne pracujące przy stałej prędkości obrotowej są standardowo realizowane przez silniki indukcyjne klatkowe. Napędy dużej mocy, zasilane z sieci elektroenergetycznej o napięciu 6 kV, z uwagi na wysoki koszt falowników, są zasilane bezpośrednio z sieci. Tylko w nielicznych układach napędowych stosowane są falowniki na napięciu 6 kV. W przypadku oczekiwanych dużych oszczędności energii, silniki do 1000 kW wykonuje się na napięciu 690 V i zasilają z falowników, lecz w skali kraju suma tych napędów jest niewielka, są one instalowane głównie w elektrowniach. Zasadniczą więc grupę stanowią napędy, w których silniki indukcyjne, zwykle klatkowe, zasilane są bezpośrednio z sieci, a więc pracują przy stałej prędkości obrotowej. W odniesieniu do tej grupy elektrycznych układów napędowych wzrosło zainteresowanie użytkowników i producentów obniżeniem strat mocy w silnikach. Politykę promowania i wspierania produkcji i sprzedaży silników energooszczędnych zapoczątkowano w Kanadzie [2]. Promocja silników energooszczędnych polegała na subsydiowaniu zakupu silników wysokosprawnych poprzez rabaty, których wysokość była proporcjonalna do ilości kilowatów, o które zostały zmniejszone straty mocy czynnej w silniku. W późniejszym okresie

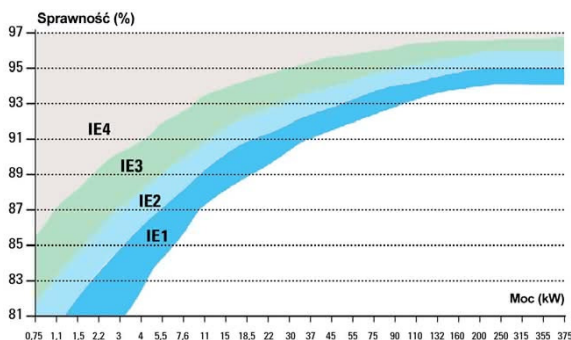
wprowadzono ustawowo przepisy prawne określające minimalne poziomy sprawności silników oraz metody ich wyznaczania. Podobnie jak Kanada postąpiły Stany Zjednoczone. Departament Energii USA (US DOE) opracował Energy Policy Act z 1992 r. (EPACT), w którym określił minimalne poziomy sprawności silników indukcyjnych klatkowych w zakresie mocy od 1÷200 HP, spójne z przepisami normy NEMA (National Electrical Manufacturers Association). Przepisy te ujęte w standardach obowiązują w USA i Kanady od października 1997 r. Opracowano także jednolitą metodę wyznaczania sprawności silników, wprowadzono obowiązek uzyskania certyfikatu (Compliance Certificate – CC) na ich sprzedaż, wydawanego przez US DOE. Wymagania EPACT i wynikające z nich obowiązki dla producentów i dystrybutorów silników są zatem egzekwowane ustawowo. Wniosek o uzyskanie certyfikatu zgodności CC musi być poparty pozytywnymi wynikami badań przeprowadzonych przez niezależne, uznane przez US DOE laboratorium.



Rys. 1. Klasy sprawności silników o liczbie biegunów $2p=4$ według CEMEP

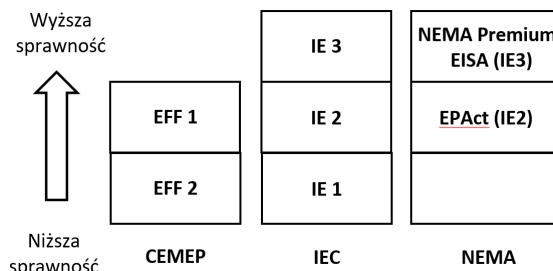
Polityka promocji silników energooszczędnych w Europie jest nieco inna, preferuje się programy fakultatywne. Dla trójfazowych silników indukcyjnych klatkowych o mocach 1,1÷90 kW Stowarzyszenie Europejskich Producentów Maszyn Elektrycznych i Energoelektroniki CEMEP (ang. - European Committee of Manufacturers and Power Electronics) oraz Komisja Europejska, w 1999 roku, opracowały klasyfikację silników indukcyjnych, trójfazowych, o budowie zamkniętej, zasilanych napięciem 400 V, 50 Hz, o liczbie biegunów 2 i 4. Silniki podzielono na trzy klasy sprawności: Eff1 najbardziej energooszczędna, Eff2 średnia, Eff3 najmniej – rys. 1.

W roku 2008 IEC (ang. International Electrotechnical Commission) opracowało normę IEC 60034-30:2008 „Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code)”, której celem było zastąpić i połączyć klasyfikację NEMA i CEMEP. Dla silników klatkowych indukcyjnych trójfazowych jednobiegowych o znamionowym napięciu do 1 kV i częstotliwości 50/60 Hz, o liczbie biegunów (2, 4, 6) i o mocy od (0,75 ÷ 375) kW. W normie zdefiniowano klasy sprawności: najniższą IE1 (Standard efficiency), wyższą IE2 (High efficiency) i najwyższą do IE3 (Premium efficiency). W normie IEC 60034-30 wyróżniono też klasę IE4 (Super Premium Efficiency). Sposób wyznaczania klas sprawności silników (IE1 ÷ IE4) jest opisane w normie IEC 60034-2-1:2007 (PN-EN 60034-2-1 Maszyny elektryczne wirujące. Część 2-1. Znormalizowane metody wyznaczania strat i sprawności na podstawie badań (z wyjątkiem maszyn pojazdów trakcyjnych). Na rysunku 2 przedstawiono wykresy zakresów sprawności silników 4-biegunowych w poszczególnych klasach.



Rys. 2. Sprawność silników 4-biegunowych w poszczególnych klasach [12]

Odpowiednikami silników o klasie sprawności według IEC i CEMEP są: IE1 ↔ EFF2, IE2 ↔ EFF1. Silnikom o sprawności poniżej IE1 nie przydzielono klasy przyjęto tylko, że ich odpowiednikami są silniki w klasie sprawności EFF3. Porównanie klasyfikacji sprawności silników według CEMEP, IEC i NEMA przedstawiono na rysunku 3. W 2014 roku norma IEC 60034-30:2008 została zastąpiona przez IEC 60034-30-1:2014. W Polsce dokument ten przyjęto jako PN- EN 60034-30-1 pt. Maszyny elektryczne wirujące. Część 30-1.

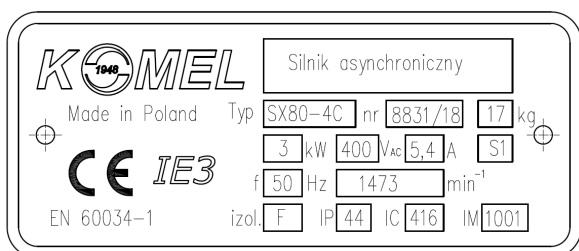


Rys. 3. Porównanie klas sprawności według (CEMEP ↔ IEC ↔ NEMA)

Klasy sprawności silników prądu przemiennego bezpośrednio zasilanych z sieci (kod IE). W normie IEC 60034-30-1:2014 silniki jednobiegowe podzielono na cztery klasy sprawności od IE1 do IE4. Dla poszczególnych klas podano sprawność minimalną silnika w zależności od częstotliwości napięcia zasilania, liczby biegunów oraz mocy znamionowej.

W lipcu 2009 roku Komisja Europejska przyjęła rozporządzenie nr 640/2009 w sprawie wdrażania dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Europejskiej dotyczącej wymaganej sprawności silników elektrycznych. Tak więc w Unii Europejskiej wprowadzone zostały usankcjonowane prawnie wymagania dotyczące efektywności energetycznej 3-fazowych silników indukcyjnych klatkowych o liczbie biegunów (2 ÷ 6), mocach znamionowych (0,75 ÷ 375) kW i napięciu do 1000 V, które są przeznaczone do eksploatacji ciągłej.

W rozporządzeniu nr 640/2009 podano terminy wprowadzania silników energooszczędnych na rynek. Pierwszą datą wprowadzenia tych silników był dzień 16 czerwca 2011 roku. Od tego dnia wymienione silniki powinny mieć co najmniej klasę sprawności IE2. Od 1 stycznia 2015 roku silniki o mocy znamionowej w przedziale (7,5 ÷ 375) kW powinny mieć klasę sprawności co najmniej IE3, a jeśli są wyposażone w falownik regulujący w sposób płynny prędkość obrotową to mogą mieć klasę IE2. Z początkiem 2017 roku wymóg ten rozszerzono na zakres mocy w dół i objęto w nim silniki o mocy znamionowej (0,75 ÷ 375) kW. Po analizie skutków wdrożenia rozporządzenia nr 640/2009, w roku 2014 wydano nowe rozporządzenie nr 4/2014, w którym zmieniono treść art. 1. W art. 1 podano nową listę urządzeń, których rozporządzenie 4/2014 nie dotyczy. Informacja o klasie sprawności jest traktowana jako etykieta energetyczna i powinna być umieszczona na tabliczce znamionowej, przykładem jest rys. 4.



Rys. 4. Tabliczka znamionowa silnika firmy KOMEL [6]

3. Silniki energooszczędne

Ilość zaoszczędzonej przez silnik wysoko-sprawną energii jest zależna od mocy silnika i czasu jego pracy. A zatem efektów oszczędnościowych należy szukać w grupie silników o większej mocy, sprzedawanych w dużych ilościach, które w miarę możliwości pracują w sposób ciągły, czyli w grupie silników przemysłowych. Producenci silników elektrycznych w Polsce wdrożyli do produkcji serię silników energooszczędnych spełniających wymagania klasy IE3. Osiągnięto ten efekt dzięki:

- ✓ wydłużeniu pakietów blach stojana i wirnika,
- ✓ zastosowaniu blach o mniejszej stratności,
- ✓ mniejsze wypełnienie żłobków izolacją i podwyższenie stosunku $S_{Cu}/S_{zł}$,
- ✓ wprowadzeniu nowych wykrojów blach przy zmianie kształtu żłobków,
- ✓ zmniejszeniu szczeliny między stojanem i wirnikiem,
- ✓ powiększeniu pierścieni zwierających wirnika,
- ✓ zastosowaniu mniejszych przewietrzników o lepszej wydajności i obniżenie strat wentylacyjnych.

Ponadto wprowadzono zmiany konstrukcyjne (wynikające z prowadzonych równoległe prac unifikacyjnych):

- ✓ zaprojektowano kadłub tak, aby istniała możliwość przykręcenia łap z różnych stron,
- ✓ zapewniono możliwość obrotu skrzynki zaciskowej, co ułatwia podłączenie silnika do urządzenia.

Zastosowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałów spowodował wzrost ceny silników energooszczędnych w stosunku do silników standardowych. Z tego względu dla użytkownika istotny jest czas zwrotu dodatkowych nakładów inwestycyjnych poniesionych na zakup silnika o wysokiej sprawności. Czas ten zależy m.in. od wzrostu ceny silnika i ceny za-

oszczędzonej energii zależnej od stopnia i czasu wykorzystania silnika. Na przykład przy pracy ciągłej (7000 godzin w roku) wzrost ceny niektórych silników energooszczędnych zwraca się najpóźniej w ciągu roku, a więc w 1/3 okresu gwarancyjnego silnika. Należy zwrócić uwagę, że zastosowanie silników energooszczędnych jest szczególnie opłacalne:

- ✓ dla instalacji o długiej żywotności,
- ✓ dla urządzeń o ciągłym i stabilnym charakterze pracy,
- ✓ przy zastąpieniu silników przeznaczonych do remontu lub źle dobranych dla danego napędu.

Wymienione w punkcie 2 rozporządzenie nie dotyczy silników dużej mocy o napięciu (6 ÷ 10) kV. Silniki te, ze względu na wysoki koszt energoelektronicznych układów regulacji, zasilane są zwykle bezpośrednio z sieci. Obecnie silniki projektuje się o możliwie wysokiej sprawności i dobrych parametrach eksploatacyjnych: dużej trwałości, niskim poziomie drgań i hałasów. Możliwość obniżenia wielkości strat energii zużywanej przez silniki elektryczne napędzające urządzenia potrzeb własnych bloku elektroenergetycznego 200 MW poprzez wymianę silników na nowoczesne o wysokiej sprawności ilustruje przykład przedstawiony w tabeli 1, [1]. Z danych zestawionych w tabeli 1 wynika, że przy 7000 godzinach pracy bloku i średnim obciążeniu silników 95% mocy znamionowej, można zaoszczędzić w napędach potrzeb własnych jednego bloku elektroenergetycznego w czasie jednego roku około 3.22 GWh, co przy koszcie jednostkowym 250 zł/MWh daje efekt ekonomiczny w wysokości 805 tys. zł.

Dodatkową korzyścią wymiany silników jest poprawa warunków środowiskowych poprzez obniżenie poziomu hałasu. Nowe silniki generują poziom hałasu, zgodnie z obowiązującą normą [10], poniżej 85 dB[A], podczas gdy silniki starszych serii, wykonane zgodnie z wówczas obowiązującymi wymaganiami, mogą emitować hałas do 110 dB[A].

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Prędkość obrotową silników należy dopasować do wymaganej prędkości maszyny roboczej. Napęd energooszczędny powinien pracować przy minimalnej, ze względów technologicznych dopuszczalnej, prędkości obrotowej. Prędkość obrotowa nie powinna być większa od prędkości koniecznej, gdyż największe oszczęd-

Tabela 1. Silniki indukcyjne w napędach potrzeb własnych bloku elektroenergetycznego 200 MW

Lp.	Nazwa urządzenia	OBECNIE STOSOWANE SILNIKI				Ilość silników czynnych na 1 blok	PROPOZYCJA ZASTOSOWANIA SILNIKA O WYSOKIEJ SPRAWNOŚCI				Roczna oszczędność energii MWh
		Typ silnika	Moc	Prędk. obrot.	Sprawność		Typ silnika	Moc	Prędk. obrot.	Sprawność	
			kW	min ⁻¹	%			kW	min ⁻¹	%	
1	Młyn węglowy	SZDr124r	650	1490	92,8	3	Sh450H4A ¹⁾	630	1494	96,7	577,2
2	Wentylator młynowy	SZJr134s	850	1490	93,0	3	Sh450H4C ¹⁾	800	1494	97,2	816,7
3	Wentylator podmuchu	SZJr1512	800	498	93,5	2	Sh560-12(x)	800	498	96,0	296,3
4	Wentylator ciągu	SZJre158	1700	740	94,5	2	Sh710-8(x)	1700	745	97,0	616,6
5	Pompa skroplin podstawowych	SZDvc174	200	1485	92,5	2	SVh355H4B	200	1488	95,8	99,1
6	Pompa wody zasilającej	SYJe142r	3150	2984	95,8	2	Sh710-2D	3150	2990	97,4	718,4
7	Pompa wody sieciowej (zima)	SDC174t	250	1480	93,5	1	Sh355H4C	250	1490	96,1	48,1
8	Pompa wody sieciowej (lato)	SZDc154	160	1480	91,5	1	Sh355H4A	160	1488	95,6	49,9
9	Pompa główna wody chłodzącej	SBJVe1716t	3150	365	95,5	1	-	-	-	-	-
Łączne oszczędności energii w roku: 3222 MWh.											
Uwagi do tabeli 1:											
1) Dla silników Sh450H4A oraz S450H4C przyjęto niższą moc, niż silników obecnie pracujących typu SZD i SZJ. Jednak nie wpływa to znacząco na obliczenia oszczędności energii.											
2) Do obliczeń przyjęto średnie obciążenie silnika na poziomie ok. 95% jego mocy znamionowej oraz założono pracę silników na poziomie ok. 7000 godzin w roku.											
3) W obliczeniach pominięto silnik z pompy głównej wody chłodzącej (wiersz 9 tabeli 1).											

dnosci energii uzyskuje się poprzez dobre dostosowanie prędkości obrotowej do procesu technologicznego realizowanego przez maszynę roboczą. W drugiej kolejności oszczędność energii daje silnik o wysokiej sprawności.

Projektując elektryczny układ napędowy, nowy bądź modernizując istniejący, należy wziąć pod uwagę następujące kryteria techniczne i technologiczne:

- funkcjonalność, tzn. aby dobrze wypełniał wymagania maszyny roboczej realizującej proces technologiczny i działał niezawodnie,
- energooszczędność, to jest aby pracował z minimalnym rozproszeniem energii,
- kompatybilność, miał niski poziom hałasu i drgań oraz aby nie był wrażliwy na zakłócenia elektryczne i elektromagnetyczne,
- bezpieczny, nie stwarzał zagrożenia uszkodzenia maszyny roboczej w sytuacjach krytycznych.

Kryteria powyższe każdy układ napędowy powinien spełniać.

Kryterium minimalnego zużycia energii elektrycznej jest ważne z uwagi na: koszt eksploatacji silników, ochronę środowiska, oszczędza-

nie pierwotnych surowców energetycznych i efekt cieplarniany.

5. Literatura

- [1]. Bernatt J., Bernatt M.: „Możliwości obniżenia energochłonności urządzeń potrzeb własnych bloku 200 MW poprzez wymianę silników wysokiego napięcia”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe BOBRME „Komel”*; 2001 r.; Nr 63.
- [2]. Chodanionek J.: „Energooszczędność na rynku amerykańskim” - *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe BOBRME „Komel”*; 2001 r.; Nr 63.
- [3]. Gawron S.: „Prądnicą synchroniczną z magnesami trwałymi o podwójnym wirniku zwiększająca częstotliwość generowanego napięcia”. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 80/2008*, str. 211-215.
- [4]. Glinka T.: „Maszyny elektryczne i transformatory. Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka. PL ISBN 978-83-931909-1-1. Wydaw. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, 2015.
- [5]. Glinka T., Kulesz B., Lechowicz K., Lisowski J.: „Skompensowana kaskada asynchroniczna i jej zastosowanie w napędach przenośników taśmowych” – *Przegląd Elektrotechniczny*; 1992 r.; Nr 8.
- [6]. www.komel.katowice.pl.
- [7]. IEC 60034-30:2008 i IEC 60034-30-1:2014. Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code).
- [8]. IEC 60034-2-1:2007 (PN-EN 60034-2-1) Maszyny elektryczne wirujące. Część 2-1. Znormalizowane metody wyznaczania strat i sprawności na podstawie badań.
- [9]. PN- EN 60034-30-1 pt. Maszyny elektryczne wirujące. Część 30-1. Klasy sprawności silników prądu przemiennego bezpośrednio zasilanych z sieci (kod IE).
- [10]. PN-EN 60034-9-2000. Maszyny elektryczne wirujące. Dopuszczalne poziomy hałasu.
- [11]. Dukalski P., Poprawski W., R. Hałoń R.: „Silnik napędzający oszczędność”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 2/2013 (99)*, str. 191-197.
- [12]. https://automatykab2b.pl/tematmiesiaca/10132-silniki_energooszczedne?showall=1#.WqejJefI82w.

Autorzy

dr hab. inż. Jakub Bernatt, prof. KOMEL
dr inż. Stanisław Gawron
prof. dr hab. Inż. Tadeusz Glinka
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL, al. Roździeńskiego 188,
40-203 Katowice, tel. +48 (32) 258 20 41
e-mail: info@komel.katowice.pl