

Dariusz Szczęsny, Partner Serwis Sp. z o.o., Kwidzyn
Grzegorz Drabik, Siemens Sp. z o.o.

SILNIKI WYSOKOSPRAWNE Z KLATKĄ MIEDZIANĄ

HIGH EFFICIENCY MOTORS WITH COPPER ROTOR

Abstract: In the past years, serial production of motors with die-cast copper cage rotors was started. This paper reviews the advantages of substituting die-cast copper for aluminum in the motor rotor made by SIEMENS. Specially it will discuss changes in the losses - rotor resistance losses, indage and friction losses, as well as stray load losses. As an example, losses for a 11 kW motor are presented. Additionally, performance data of example industrial motors with aluminum and copper cage are presented. Also, changes in both the starting and the breakdown torque are pointed out. In the end, the idea of construction of the 1LE1 motor new series is presented.

1. Wstęp

W ostatnich latach coraz więcej uwagi zwraca się na efekty środowiskowe działalności człowieka. Inżynierowie pracują nad coraz nowocześniejszymi urządzeniami, które zużywałyby coraz mniej energii przy przynajmniej takiej samej wydajności. Głównym odbiorcą energii elektrycznej są zakłady przemysłowe, a w szczególności pracujące w nich silniki. Szacuje się, że ogólnie napędy pochłaniają 70% całej globalnej produkcji energii. Nie powinno więc dziwić, że szczególny nacisk kładzie się na obniżenie energochłonności właśnie układów napędowych. Przez ostatnie kilka lat szczególnie duży rozwój zaobserwowano w układach regulacji prędkości obrotowej. Spadek cen oraz rozwój technologii spowodował wzrost popularności przemienników częstotliwości. Obecnie asynchroniczne, klatkowe silniki indukcyjne są standardem w aplikacjach o stałej i zmiennej prędkości obrotowej. Konstrukcja silników, będących podstawowymi przetwornikami energii elektrycznej na mechaniczną jest ciągle udoskonalana, co wpływa na coraz lepsze ich parametry eksploatacyjne.

2. Coraz wyższe wymagania

Od wielu lat rządy najbardziej uprzemysłowionych krajów świata próbują skłonić z jednej strony wytwórców do produkowania coraz to bardziej oszczędnych silników z drugiej strony odbiorców do ich zakupów. Czynią to zarówno poprzez wydawanie odpowiednich przepisów i rozporządzeń wręcz zakazujących sprzedaży silników poniżej określonej sprawności, jak i poprzez propagowanie silników energooszczędnych, czy też pomoc przy pracach badawczych, a nawet dopłaty do zakupów nowych

energooszczędnych silników. Na rynku polskim na uwagę zasługuje projekt: „Polski Program Efektywnego Wykorzystania Energii w Napędach Elektrycznych (PEMP)”, realizowany przez Krajową Agencję Poszanowania Energii S.A. przy współudziale producentów silników elektrycznych, polegający na przydzielaniu dopłat do sprzedaży silników wysokosprawnych w klasie EFF1.

Jedną z metod wyprodukowania silnika o wysokiej sprawności jest zamiana klatki aluminiowej na klatkę miedzianą. W silnikach klatkowych małej mocy, produkowanych na masową skalę klatki wykonuje się jako odlewy. Inna technologia (lutowanie lub spawanie prętów miedzianych lub aluminiowych) jest obecnie zbyt kosztowna i nie znajduje szerszego zastosowania w masowej produkcji. Technologia odlewania klatek z aluminium została dobrze opanowana przez producentów i nie stanowi obecnie większych problemów. Inaczej jest z technologią odlewania miedzi. Prace nad opanowaniem odlewania klatek silników asynchronicznych z miedzi trwają już od wielu lat. Jednak problemy technologiczne nie pozwalały wdrożyć produkcji silników z tego typu klatką na skalę przemysłową. Głównym problemem jest tutaj wyższa temperatura krzepnięcia miedzi (1083°C) w porównaniu do aluminium (660°C), co powoduje uszkodzenia pakietu wirnika. Firma Siemens, jako jedna z pierwszych na świecie, opracowała konstrukcję i technologię seryjnej produkcji wirników z odlewana klatką z miedzi. Silniki tego typu pojawiły się w 2006 roku na rynku Stanów Zjednoczonych jako Ultra Efficient (ultra

sprawne silniki), które to pod względem sprawności przewyższają wymagania normy EPACT, odpowiednik europejskiej eff1, ale także jako jedne z pierwszych, spełniają wysokie wymagania stawiane przez normę NEMA Premium. Obecnie Siemens produkuje silniki z odlewaną miedzianą klatką seryjnie.

3. Nowe silniki

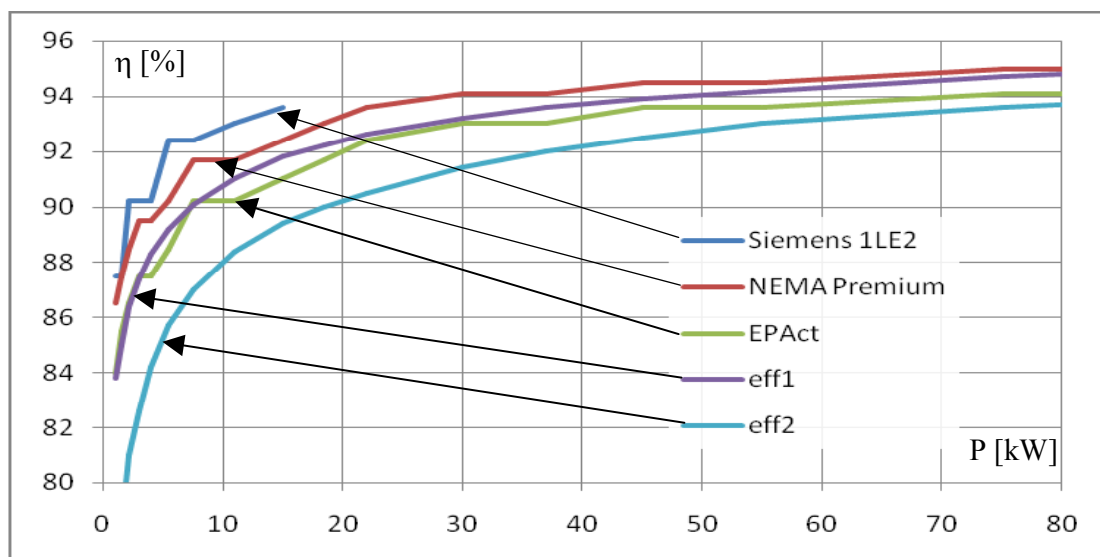
Nowa seria silników o symbolu 1LE1 wprowadzana obecnie na rynek europejski powstała na bazie silników NEMA produkowanych na rynek amerykański i oznaczonych symbolem 1LE2. Silniki nowej konstrukcji na rynku europejskim pojawiły się na początku 2007 roku dla wzniosów wału od 100 do 160. W połowie 2008 roku oferta poszerzy się o silniki w zakresie wzniosu wału od 56 do 90. Silniki 1LE1 dostępne są w dwóch wersjach: jako silniki o podwyższonej sprawności (klasa EFF2) z klatką aluminiową oraz jako silniki wysokosprawne (EFF1) z klatką miedzianą. Nowa seria, to wspólna platforma dla silników oferowanych na całym świecie. Nowe typy silników, to silniki o identycznej konstrukcji, zbudowane z podobnych elementów, co ułatwia dostęp do części zamiennych oraz oferowanie i stosowanie silników w dowolnym miejscu na ziemi, niezależnie od obowiązujących standardów.

Przy opracowywaniu nowej konstrukcji silników, oprócz unifikacji konstrukcji wiele uwagi poświęcono problemowi sprawności.

Podobnie jak dotychczasowe serie silników firmy SIEMENS (1LA7 i 1LA9) nowa konstrukcja pozwala dokonywać modyfikacji silników na potrzeby użytkownika. Wszelkie zmiany takie jak zmiana położenia skrzynki, zmiana sposobu montażu, zabudowa hamulca lub enkodera mogą się odbywać bezpośrednio w autoryzowanym warsztacie, w oparciu o materiały dostarczane z fabryki (tzw. zestawy modyfikacyjne). Największą zmianą w nowej serii silników jest wprowadzenie silników z odlewaną klatką miedzianą. Pozwala to na uzyskanie wyższych sprawności w porównaniu do silników z tradycyjną klatką aluminiową, a w połączeniu z odpowiednią konstrukcją stwarza inne możliwości, które zostaną omówione w dalszej części artykułu.

4. Parametry nowych silników

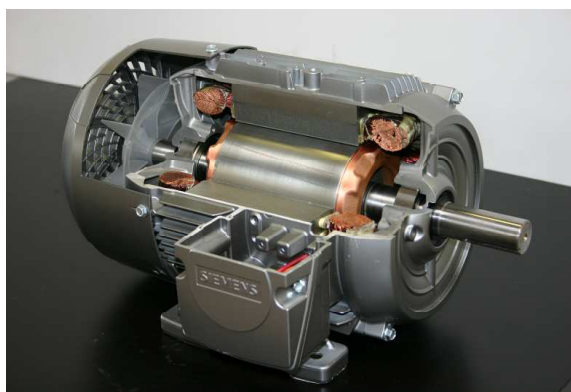
Od lat wiadomo jest, że zastosowanie miedzianej klatki w silnikach asynchronicznych pozwala na zmniejszenie strat wytwarzanych w silniku przy niezmiennych wymiarach lub zmniejszenie wymiarów silnika przy niezmiennych parametrach elektrycznych.



Rysunek 1: Porównanie sprawności silników w poszczególnych klasach

Dzięki temu, że przewodność miedzi jest o około 60% wyższa od aluminium, można oczekiwać, że straty w klatce w wirniku będą istotnie niższe, jeżeli aluminium zostanie zastąpione miedzią. Wstępne obliczenia konstruktorów zakładały, że silnik z wirnikiem miedzianym będzie miał o 15-20% strat mniej niż jego odpowiednik z klatką aluminiową. Straty powstające w silnikach można podzielić ogólnie na:

- Straty w żelazie – straty magnetyczne w blachach, indukcyjne i na prądy wirowe
- Straty w miedzi stojana – powodowane przez przepływający prąd w uzwojeniu stojana
- Straty w miedzi wirnika - powodowane przez przepływający prąd w prętach klatki i pierścieniach zwierających wirnika
- Starty mechaniczne – straty cierne w łożyskach i straty przewietrznika
- Straty rozproszenia powstające w szczelinie powietrznej



Rysunek 2: Silnik 1LE2 z klatką miedzianą

W celu identyfikacji rzeczywistych parametrów silnika, przeprowadzono próby mające na celu porównanie właściwości silnika z klatką aluminiową z silnikiem z klatką miedzianą. Jako przykład mogą służyć wyniki pomiarów silnika o mocy 11 kW. Do badań porównawczych użyto silników, których kształt żłobków był taki sam zarówno dla silników z klatką miedzianą jak i aluminiową. W Tabeli nr 1 przedstawiono uśrednione wyniki pomiarów siedmiu silników. Zgodnie z przewidywaniami, największe zmiany nastąpiły w stratach w uzwojeniach wirnika – zmniejszyły się o 40%. Wynik ten stanowi 80% teoretycznej, obliczeniowej różnicy w stratach w klatce wirnika wynikającej ze zmiany przewodności materiału.

Tabela 1
Wyniki pomiarów strat w silnikach

Typ strat	Al. [W]	Cu [W]	ΔP	%
Starty w uzwojeniach stojana	507	507	0	0
Straty w żelazie	286	286	0	0
Starty w uzwojeniach wirnika	261	157	-104	-40
Straty mechaniczne	115	72	-43	-37
Starty rozproszenia	137	105	-32	-23
RAZEM	1306	1127	-179	-14

Interesującym wynikiem jest spadek strat mechanicznych w silniku z klatką miedzianą. Wydawałoby się, że straty te nie powinny zależeć od materiału klatki, jednak zamiana materiału spowodowała zmniejszenie ilości ciepła wydzielanego w wirniku. Pozwoliło to na zmianę jego konstrukcji. Odlew miedzianej klatki posiada gładkie pierścienie wirujące z wyjątkiem miejsc przeznaczonych do mocowania odważników do wyważania wirnika. Wirnik nie posiada łopatek chłodzących na pierścieniach wirujących służących do oddawania ciepła, jak i do cyrkulacji powietrza wewnątrz silnika. Dzięki likwidacji łopatek występujących standardowo w wirnikach z klatką aluminiową, całkowite straty mechaniczne spadły o 37%. Starty mechaniczne w łożyskach pozostały bez zmian. Straty rozproszenia są związane z przejściem pola magnetycznego pomiędzy stojanem a wirującym wirnikiem. Na wielkość tych strat ma oczywiście wpływ przede wszystkim kształt pola magnetycznego uzależniony od kształtu zębów wirnika i stojana oraz wielkości szczeliny. Okazuje się że niebagatelne znaczenie mają także porowatość i wtrącenia niemetaliczne w odlewie klatki, które znacząco wpływają na poziom niejednorodności pola elektromagnetycznego. Jak można się łatwo domyśleć, im więcej zakłóceń w przebiegu linii pola, tym większe straty rozproszenia.

Dzięki temu, że do odlewania klatki miedzianej używa się stopu miedzi z niklem, odlew jest bardziej jednorodny co prowadzi do znacznego zmniejszenia strat rozproszeniowych. Średnie zmniejszenie strat rozproszenia z tytułu jednorodności pola wynosi 23 %, z 137 W do 105 W.

Należy zwrócić uwagę, że także bardziej dokładny i jednorodny proces odlewania klatek aluminiowych powinien wpłynąć pozytywnie na wielkość strat rozproszonych. Dodatkową korzyścią z bardziej jednorodnej klatki miedzianej, wpływającą pośrednio na starty mechaniczne, jest praktycznie brak konieczności wyważania wirników.



Rysunek 3: Wirnik z odlewaną klatką miedzianą

Podsumowując, zastąpienie materiału, jakim jest aluminium przez miedź w klatce wirnika, daje bezpośrednio około 58% procent całkowitych oszczędności z tytułu mniejszych strat nagrzewania oraz dodatkowo 24% w stratach mechanicznych i 18% w stratach rozproszenia.

W tabeli 2 przedstawiono porównanie podstawowych parametrów silników z klatką aluminiową i miedzianą.

Tabela 1
Porównanie parametrów silnika z klatką aluminiową i miedzianą

Parametr	Al.	Cu	Różnica	Zmiana %
Sprawność	89.5	90.7	-1.2	+1.4
Przyrost temp	64	59.5	-4.5	-7.0
Prędkość znamionowa	1760	1775	+15	+0.85
Poślizg %	2.22	1.37	-0.85	-38
Wsp. mocy	0.815	0.790	-2.5	-3

Całkowita sprawność silników z klatką miedzianą jest wyższa o 1.2 punkty procentowe od ich odpowiednika z klatką aluminiową. Wzrost tego parametru jest oczywisty i nie wymaga większego komentarza.

Następny analizowany parametr związany bezpośrednio ze sprawnością, przyrost temperatury ma poważne znaczenie dla żywotności silnika. Przyjmuje się, że wzrost temperatury o 10°C zmniejsza żywotność silnika o połowę. Można więc przyjąć, że zmniejszenie przyrostu temperatury o ok. 5 °C zwiększy o 50% czas życia silnika.

Współczynnik mocy nieznacznie spada, lecz nie jest to spadek znaczący.

Zmniejszenie poślizgu jest spowodowane mniejszą rezystancją klatki miedzianej, co zmienia charakterystykę silnika na bardziej „sztywnej”. Prędkość obrotowa silników z klatką miedzianą, w mniejszym stopniu zależy od zmian obciążenia, co może korzystnie wpływać na parametry technologiczne niektórych urządzeń.

Na skutek zmniejszenia rezystancji wirnika zmniejsza się również moment rozruchowy silników z klatką miedzianą. Zmiana ta średnio wynosi kilkanaście procent (Tabela 3). Fakt ten należy uwzględnić przy doborze, bądź wymianie silników. Z jednej strony może to spowodować pogorszenie parametrów rozruchu dla niektórych aplikacji (dla których wymagany jest duży moment rozruchowy), z drugiej jednak strony w większości aplikacji powoduje zmniejszenie prądów rozruchowych silnika, co może mieć pozytywny wpływ na sieć elektryczną.

W tabeli 3 przedstawiono podstawowe dane znamionowe silników klasy eff1 produkcji SIEMENS z klatką aluminiową (seria 1LA9) oraz z klatką miedzianą (seria 1LE1).

Analizując dane z tabeli 3 należy dodać, że silniki 1LA9 z klatką aluminiową posiadają specjalnie zaprojektowany zarówno wirnik, jak i stojan. Nowe silniki posiadają ten sam stojan dla klasy EFF1 jak i EFF2. Poprawę ich sprawności osiągnięto tylko dzięki zmianie konstrukcji wirnika (klatka miedziana zamiast aluminiowej). Z faktu tego wynika, że porównując sprawności obydwu silników z tabeli 3 można zauważyć, że są one zbliżone, pomimo zastosowania w nowej serii silników klatki miedzianej.

Zastosowanie niezmienionego stojana spowodowane jest wspomnianą wcześniej unifikacją konstrukcji silników, co wiąże się z lepszą dostępnością silników na rynku, jak i możliwością prostej adaptacji silników z klasy EFF2 na klasę EFF1 (poprzez wymianę wirnika). Silniki ze stojanem o niezmienionej konstrukcji oraz wir-

nikiem z klatką miedzianą to jeszcze jedna korzyść. Koszty (ilości) materiałów do wytworzenia takiego silnika są mniejsze o kilkanaście procent w stosunku do dotychczasowych konstrukcji (silnik ze specjalnym stojanem i klatką aluminiową). Przekłada się to na obniżenie kosztów wytworzenia silnika. Ma to wpływ zarówno na cenę silnika, jak i na ochronę środowiska.

Dla porównania w Tabeli 4 przedstawiono parametry silników nowej serii 1LE1 z klatką miedzianą w klasie eff1 i klatką aluminiową w klasie eff2.

5. Budowa mechaniczna

Jak już wspomniano wcześniej konstrukcja nowych silników opiera się na wspólnej platformie. Niektóre elementy silnika (skrzynka zaciskowa, pokrywy łożysk dla formy budowy IMB3, czy obudowa silnika dla wykonania IMB5) są wspólne dla wszystkich silników, niezależnie od standardów według których zostały wykonane (IEC, NEMA). Rozwiązanie takie przyczynia się do lepszej dostępności elementów, unifikacji produkcji, co ma z kolei wpływ na koszty wytwarzania. Niezależnie od klasy sprawności w jakiej wykonano silniki (EFF1 lub EFF2), ich budowa jest taka sama.

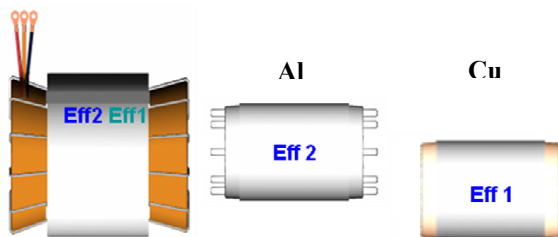
Tabela 2:
Porównanie parametrów znamionowych silników klasy eff1 z klatką aluminiową z silnikami klasy eff1 z klatką miedzianą

		Prędkość znam. [Obr/min]		Moment znam.		Sprawność [-]		Wsp. mocy [-]		Moment rozruchowy [-]		Moment krytyczny [-]	
2p	Moc	Cu 1LE	Al. 1LA	Cu 1LE	Al. 1LA	Cu 1LE	Al 1LA	Cu 1LE	Al 1LA	Cu 1LE	Al 1LA	Cu 1LE	Al. 1LA
2	5.5	2950	2930	18	18	89.5	89.5	0.87	0.90	1.8	2.4	2.9	3.2
2	7.5	2950	2930	24	24	90.0	90.5	0.88	0.92	2.2	2.5	3.1	3.1
2	11	2955	2945	36	36	90.8	91.0	0.87	0.90	2.1	2.3	3.2	3.1
2	15	2955	2945	48	49	91.4	91.5	0.88	0.92	2.4	2.3	3.4	3.1
4	5.5	1465	1455	36	36	89.2	89.5	0.80	0.81	2.3	2.9	2.9	3.6
4	7.5	1465	1455	49	49	90.1	90.3	0.83	0.82	2.3	3.0	2.9	3.6
4	11	1470	1460	71	72	91.2	91.5	0.85	0.84	2.2	2.7	2.8	3.2
4	15	1475	1460	97	98	92	92.0	0.85	0.84	2.5	2.9	3	3.3

Tabela 3:
Porównanie parametrów znamionowych silników 1LE1 klasy eff2 z klatką aluminiową z silnikami tego samego typu, klasy eef1 z klatką miedzianą

		Prędkość znam. [Obr/min]		Moment znam.		Sprawność [-]		Wsp. mocy [-]		Moment rozruchowy [-]		Moment krytyczny [-]	
2p	Moc	Cu	AL	Cu	AL	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
2	5.5	2950	2905	18	18	89.5	86.0	0.87	0.89	1.8	2.0	2.9	2.6
2	7.5	2950	2925	24	24	90.0	87.6	0.88	0.88	2.2	2.2	3.1	3
2	11	2955	2920	36	36	90.8	88.4	0.87	0.85	2.1	2.1	3.2	2.7
2	15	2955	2930	48	49	91.4	89.5	0.88	0.84	2.4	2.4	3.4	3
4	5.5	1465	1450	36	36	89.2	86.0	0.80	0.83	2.3	2.3	2.9	2.7
4	7.5	1465	1450	49	49	90.1	87.0	0.83	0.83	2.3	2.9	2.9	2.5
4	11	1470	1460	71	72	91.2	88.4	0.85	0.82	2.2	2.3	2.8	3.1
4	15	1475	1460	97	98	92.0	89.4	0.85	0.82	2.5	2.5	3	3.4

Różnią się one jedynie konstrukcją samego wirnika. Koncepcja ta została schematycznie przedstawiona na rys. 4.



Rysunek 4: Idea budowy silników ILE1

W silnikach nowej konstrukcji ILE1 utrzymano i rozwinięto koncepcję modułowej rozbudowy, wprowadzoną w poprzedniej serii silników 1LA7.

Koncepcja ta polega na takiej konstrukcji silników, aby była możliwość późniejszej zabudowy poza fabryką modułów wyposażenia dodatkowego: hamulca, wymuszonego przewietrzania, enkodera, grzałek antykondensacyjnych, czujników temperatury łożysk i uzwojeń itp.

Wszystkie te elementy są lub będą dostępne również dla silników nowej konstrukcji. Biorąc pod uwagę unifikację ich konstrukcji, modyfikacja silników stanie się jeszcze prostsza.

6. Podsumowanie

Jak widać, silniki z odlewną klatką miedzianą otwierają nową erę w budowie maszyn elektrycznych małej mocy. Jeszcze niedawno wydawało się, że wszystko to, co można było usprawnić w budowie maszyn elektrycznych, już zrobiono. Jednak dzisiaj ocenia się, że wprowadzenie miedzi do produkcji na skalę przemysłową umożliwi znaczny postęp w budowie jeszcze bardziej oszczędnych silników elektrycznych. Ma to tym większe znaczenie, że ceny nowych silników z klatką miedzianą nie będą się różnić od klasycznych silników tej samej klasy efektywności.

7. Literatura

- [1]. New generation of Alu ILE1 motors – Technology, SIEMENS.
- [2]. New generation of Alu ILE1 motors – Economical, SIEMENS.
- [3]. New generation in Alu ILE1 - Promotion, SIEMENS.