

Ryszard Zapaśnik
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

SILNIKI INDUKCYJNE Z MIEDZIANĄ ODLEWANĄ KLATKĄ WIRNIKA - NOWE PROBLEMY I NOWE PERSPEKTYWY

INDUCTION MOTORS WITH DIE - CASTING COOPER ROTORS NEW PROBLEMS AND NEW PROSPECTS

Abstract: Inclusion in the last time the research centers and the great manufacturers to topic of the motors with die – casting copper rotors has caused that on the one hand the new technological and material problems have been elicited and on the other hand the new fields of the application of the such motors have been discovered.

1. Wstęp

Mija okres zbyt jednostronnej i merytorycznie dość płytkiej oceny właściwości eksploatacyjnych i technologicznych silników z odlewaną z miedzi klatką wirnika opartej w głównej mierze na materiałach promocyjnych inspirowanych przez światowe lobby miedziowe.

Włączenie się w ostatnim czasie w problematykę takich silników niezależnych ośrodków badawczych oraz liczących się światowych producentów silników spowodowało z jednej strony ujawnienie określonych problemów technologicznych jakie trzeba jeszcze rozwiązać, a z drugiej strony określiło nowe perspektywy rozwojowe dla tego rodzaju silników.

Sytuacja produkcyjna

Niemiecka firma SEW Eurodrive jest pierwszym i jak dotychczas jedynym europejskim producentem na skalę przemysłową silników z miedzianą klatką wirnika. Są to silniki o mocach 1,1 – 37 kW.

Obecnie w firmie tej stosowane są dwa różne zależne od mocy silników podejścia do rozwiązania konstrukcyjnego silników z miedzianą odlewaną klatką wirnika w celu uzyskania wysokich sprawności.

Dla silników mniejszych mocy – do 3 kW - stosuje się w istocie proste zastąpienie odlewu aluminiowego klatki wirnika odlewem miedzianym pozostawiając bez zmian kształtu i wymiarów żłobków wirnika. Natomiast, w stosunku do wykonania silnika standardowego z klatką aluminiową, w silniku z klatką miedzianą zmienia się rodzaj blachy rdzenia na mniej stratną, powiększa długość rdzenia oraz zmienia się uzwojenie stojana w celu powiększenia indukcji w szczelinie. To wszystko pomaga

uzyskiwać w silniku z tak wykonaną miedzianą klatką satysfakcjonujące wartości momentu rozruchowego. W konsekwencji, w silnikach mniejszej mocy stosując sposób prostego zastąpienia klatki aluminiowej klatką miedzianą przy jednoczesnej niewielkiej modyfikacji pozostałej części czynnej silnika w SEW Eurodrive uzyskuje się wzrost sprawności o ponad 5 punktów procentowych przy zachowaniu dobrych parametrów rozruchowych silnika [1].

Dla silników z miedzianą klatką wirnika o mocach powyżej 3 kW w celu uzyskania wysokich sprawności przy jednoczesnym utrzymaniu dobrych parametrów rozruchowych w SEW Eurodrive przyjęto całkowicie zmienione rozwiązanie silnika. Między innymi w wirniku zastosowano uzwojenie dwuklatkowe, przy czym właściwy dobór przekroju prętów klatki rozruchowej uznano za rzecz pierwszoplanową.

Należy dodać, że wirniki z klatką miedzianą stosowane w silnikach firmy SEW – Eurodrive są wytwarzane w wyspecjalizowanej w odlawach z miedzi francuskiej firmie metalurgicznej FAVI, która dysponuje własnym oprzyrządowaniem i wdrożonymi procedurami technologicznymi umożliwiającymi przemysłowe odlewanie miedzianych klatek wirnika dla szerokiego asortymentu silników indukcyjnych. Kilka lat temu produkcję silników indukcyjnych małych mocy z klatką wirnika odlaną z miedzi podjęto również w Indiach, uruchamiając to przedsięwzięcie w niewielkich firmach produkujących silniki elektryczne z wykorzystaniem kooperacji z małymi odlewniami. W silnikach tych zastosowano tzw. prosty sposób odlania klatki miedzianej pozostawiając

bez zmian wykroje blach wirnika stosowane w przypadku konwencjonalnych klatek aluminiowych. Silniki te były przeznaczone do napędu pomp wody używanych w indyjskiej gospodarce wiejskiej [4].

W ostatnim czasie produkcję silników z odlaną miedzianą klatką wirnika uruchomił w USA Siemens. Na początek seria tych silników obejmuje moce 1 - 20 HP (0,75 – 15 kW) i liczby biegunów: 2, 4 i 6. Są to silniki na 60 Hz, budowy zamkniętej ze stopniem ochrony IP54 lub IP55.

Wg. materiałów firmowych [2] [3] silniki te pod względem wartości sprawności spełniają a nawet przewyższają wymagania stawiane silnikom *NEMA Premium Standard*.

Należy dodać, że minimalne wartości sprawności wymagane dla silników *NEMA Premium* są o kilka punktów procentowych wyższe od obligatoryjnych na terenie USA wymagań stawianych przez ustawę EAct 92.

W swoich materiałach firmowych firma Siemens dodaje, że wyżej wymienione silniki z miedzianą klatką wirnika mają najwyższe sprawności ze wszystkich innych silników dostępnych obecnie na rynku.

Aspekt kosztowy

Jeżeli :

- przyjąć, że objętość materiału klatki miedzianej jest o połowę mniejsza od objętości materiału klatki aluminiowej (mniejszy przekrój poprzeczny żłobków wirnika, brak odlanych razem z klatką skrzydełek na pierścieniach)

- uwzględnić ciężar właściwy miedzi i aluminium: 8,9 g/cm³ i 2,7 g/cm³

- wziąć pod uwagę fakt, że w okresie ostatnich kilku lat światowe ceny miedzi wzrosły czterokrotnie, przy dwukrotnym wzroście w tym czasie ceny aluminium [5], to zastąpienie w silniku klatki aluminiowej klatką miedzianą spowoduje następującą krotność wzrostu kosztu materiału klatki

$$0,5 \times (8,9/2,7) \times (4/2) = 3,3$$

Jest rzeczą zrozumiałą, że chociażby ze względu na wyższą temperaturę topnienia miedzi i specjalne kokile odlewnicze koszt odlania klatki miedzianej jest odpowiednio wyższy od kosztu odlania klatki aluminiowej – wg. [6] koszt odlania klatki miedzianej jest trzykrotnie wyższy niż klatki aluminiowej.

Uwzględniając to wszystko, można uznać, że przy aktualnych relacjach cenowych koszt

(materiału i robocizny) klatki odlanej z miedzi jest w przybliżeniu trzykrotnie wyższy niż klatki odlanej z aluminium.

Wyższe koszty klatki odlanej z miedzi w porównaniu z klatką aluminiową w niewielkim stopniu wpływają na wzrost kosztu całego silnika, gdyż koszt wirnika z klatką miedzianą stanowi mniej niż 5 % kosztu całego silnika, a w przypadku klatki odlanej z aluminium składnik kosztu wirnika stanowi trochę więcej niż 1 % kosztu silnika. [7].

Silniki z klatką miedzianą tańsze niż z klatką aluminiową

Ogólnie rzecz biorąc przez proste zastąpienie w silniku klatki aluminiowej klatką miedzianą można uzyskać efekt różnego rodzaju:

a) wzrost sprawności silnika przy jego nie zmienionych wymiarach

lub

b) zmniejszenie wymiarów silnika przy nie zmienionej mocy znamionowej i/lub nie zmienionej sprawności silnika.

Analiza dotycząca przypadku b) tzn. Porównania kosztów silników z miedzianą i aluminiową klatką wirnika dla jednakowych sprawności obydwu wariantów silnika wykazała, że przez proste zastąpienie klatki aluminiowej klatką miedzianą można uzyskać zmniejszenie kosztów produkcji silnika od 4% do 7%, dzięki możliwości skrócenia długości pakietu dla wariantu z klatką miedzianą.[7].

Zdaniem autorów analizy taki rezultat jest zachęcający, ale nie w pełni zadawalający, ponieważ proste zastąpienie aluminium miedzią bez przeprojektowania silnika nie pozwala na pełne wykorzystanie potencjalnych zalet klatki miedzianej.

Dlatego następne porównanie dotyczyło kosztów produkcji na skalę przemysłową odpowiednio zaprojektowanych silników z miedzianą klatką z silnikami standardowymi z klatką aluminiową, przy czym parametry eksploatacyjne, w tym sprawność obydwu rodzajów silników były jednakowe. Do porównań przyjęto silniki o mocach 5,5 kW oraz 11 kW.

Koszty produkcji takich silników obliczano na podstawie danych uzyskanych od sześciu dużych amerykańskich wytwórców silników.

Obliczenia te wykazały, że produkcja takich silników z klatką miedzianą jest tańsza niż silników z klatką aluminiową

- średnio o 18 % dla silników 5,5 kW

- i średnio o 14 % dla silników 11 kW.

Silniki z miedzianą klatką wirnika były specjalnie projektowane dla optymalnego zużycia miedzi przy jednoczesnym zachowaniu ekwiwalentnych parametrów (moc znamionowa, sprawność, moment rozruchowy, prąd rozruchowy) w stosunku do silników standardowych z aluminiową klatką wirnika spełniających pod względem wartości sprawności wymagania amerykańskiej ustawy EPart i wymagania dla europejskiej klasy EFF-1. Optymalizacja silnika z miedzianą klatką obejmowała modyfikację następujących elementów: żłobki wirnika (liczba i kształt), długość rdzenia, grubość szczeliny, wał i łożyska, rdzeń i uzwojenie stojana, masa uzwojenia stojana i wymiary obudowy.

Jako ceny dostarczanej blachy elektrotechnicznej i drutu nawojowego przyjmowano ceny hurtowe uzyskiwane w kontraktach długoterminowych. Do wyliczenia ceny rdzenia przyjmowano masę blachy równą 130% i 140% masy blachy po wykrawaniu, uwzględniając w ten sposób straty wykrawania. W koszcie blachy uwzględniano też koszty wykrawania i amortyzację. Koszt drutu nawojowego obliczano na podstawie masy drutu zużytego w silniku.

W koszcie wirnika zawarte były koszty materiału (miedź lub aluminium) oraz koszty odlewania i topienia wraz z amortyzacją.

Koszty wału, obudowy i montażu obejmowały koszt metalu i jego obróbki oraz związane z tym koszty ogólnozakładowe.

Jak piszą autorzy publikacji [7], korzyści ze stosowania droższego wirnika z miedzianą klatką uzyskuje się w innych częściach silnika: zmniejsza się koszt rdzenia, gdyż może on być krótszy; obniżają się koszty wału, obudowy oraz montażu silnika, gdyż wirnik jest mniejszy.

Problemy technologiczne

Doświadczenie wykazuje, że istnieje problem prawidłowej technologii odlewania klatek wirnika z miedzi.

Można tu przytoczyć wyniki pracy przeprowadzonej w jednym z południowokoreańskich instytutów badawczych [8], które dotyczyły silnika o mocy 1,5 kW. Badania prototypu takiego silnika z klatką odlaną z miedzi wykazały, że pomierzona sprawność jest prawie 7 punktów procentowych niższa niż została obliczona przy projektowaniu silnika. Powstało przypuszczenie, że przyczyny tak dużej różnicy sprawności obliczonej i pomierzonej silnika tkwią w niedoskonałej technologii odlania miedzianej

klatki powodującej powstawanie wewnątrz klatki pęknięć i pęcherzyków powietrza, w wyniku czego następuje wzrost rezystancji, tym samym wzrost strat prądowych w klatce. Dla potwierdzenia tych przypuszczeń został wykonany wirnik z klatką miedzianą nie odlaną lecz zbudowaną z prętów miedzianych przylutowanych na końcach do miedzianych pierścieni. Dla tak wykonanego wirnika z klatką miedzianą, stosując taką samą metodę obliczeń jak poprzednio, uzyskano bardzo dobrą zgodność obliczonej i pomierzonej wartości sprawności silnika – obliczona 86,7 % pomierzona 87,3 %. Problem ten znajduje również swoje odbicie w publikacji dotyczącej nowych silników Siemens [9], w której stwierdza się, że w niektórych silnikach eksperymentalnych z klatką odlaną z miedzi uzyskano sprawności mniejsze niż oczekiwano, co wynikało z określonych procesów i zjawisk technologicznych.

Zdaniem autorów publikacji istnieją dwa czynniki, które mają w tym zakresie szczególnie szkodliwe działanie: nadmierna ilość tlenu w wytopie oraz złe właściwości metalurgiczne pakietu blach tworzących rdzeń.

Mogą wystąpić również jeszcze inne dotychczas nie uwzględniane zjawiska, które należy brać pod uwagę przy projektowaniu i produkcji silników z miedzianą klatką wirnika.

Silniki specjalnego przeznaczenia

Dotychczas silniki z odlewana z miedzi klatką wirnika traktowano głównie jako silniki ogólnego przeznaczenia i pod takim kątem je rozpatrywano i oceniano. W ostatnim czasie silnikami tego rodzaju zainteresował się sektor obronny USA [10]. W kraju tym funkcjonuje program badawczy C-BCT (Copper-Based Casting Technology), którego działania obejmują rozwój, demonstrację i użyteczne aplikacje stopu miedzi w celu uzyskania lepszych i o większej sprawności elementów używanych w systemach obronnych. W szczególności program ten dotyczy silników z odlewana miedzianą klatką wirnika. Program C-BCT jest programem czteroletnim, a w skład jego zespołu wchodzi przedstawiciele rządu, przemysłu i uczelni. W szczególności program ten dotyczy silników z odlewana miedzianą klatką wirnika. W tym zakresie w ramach programu przewiduje się zaprojektowanie, wykonanie i przebadanie silników z miedzianą odlewana klatką wirnika mających większą sprawność lub mniejszą masę w porównaniu z silnikami z aluminiową

klatką. Brane są przy tym pod uwagę silniki 60 Hz instalowane na statkach i silniki 400 Hz stosowane w lotnictwie.

Podsumowanie

- Kolejną firmą światową, która uruchomiła seryjną produkcję silników z odlewana miedzianą klatką wirnika jest Siemens (amerykański). Silniki te spełniając pod względem sprawności wysokie wymagania stawiane silnikom określanym jako NEMA Premium, są w pierwszej kolejności przeznaczone na rynek amerykański.

- Obserwuje się zmianę podejścia do sposobu zdyskontowania zalet klatki miedzianej. O ile dotychczas efekt zastosowania klatki miedzianej w zasadzie ograniczano do możliwości podwyższenia sprawności silnika, to obecnie efekt ten traktuje się szerzej i alternatywnie: albo jako wyższą sprawność silnika przy jego nie zmienionych wymiarach albo mniejsze wymiary i masa silnika przy jego nie zmienionych parametrach, w tym sprawności.

- Istnieje poważny problem nie dopracowanej jeszcze do końca technologii odlewania miedzianej klatki jako elementu procesu produkcji masowej silników. W wyniku czego w strukturze klatki powstają zanieczyszczenia, pęcherzyki i pęknięcia powodujące znaczący wzrost rezystancji klatki i tym samym przekreślające w dużym stopniu zakładane korzyści z użycia miedzi - materiału o niskiej rezystywności.

- Mimo, że koszt klatki miedzianej jest w przybliżeniu trzykrotnie wyższy niż klatki aluminiowej, to relacja ta nie ma liczącego się wpływu na koszt całego silnika, gdyż koszt klatki miedzianej stanowi tylko ok. 5% kosztu całego silnika i odpowiednio klatki aluminiowej ok. 1,5%.

- Przez zastosowanie droższego wirnika z miedzianą klatką można uzyskać obniżenie kosztów innych części silnika - mniejszy rdzeń i wał, mniejszy cały wirnik, mniejsza obudowa, tańszy montaż – i w konsekwencji niższe koszty produkcji całego silnika w porównaniu z silnikiem o takich samych parametrach z wirnikiem z klatką aluminiową.

- Zaprezentowane w literaturze i robiące wrażenie wiarygodnych, wyniki amerykańskich badań i obliczeń wykazują, że optymalnie zaprojektowane silniki z miedzianą klatką wirnika są przy masowej produkcji tańsze o kilkanaście procent od silników o takich samych parametrach z klatką aluminiową.

- Dotychczas odlewana z miedzi klatka wirnika traktowana była głównie jako alternatywa dla klatki aluminiowej w silnikach ogólnego przeznaczenia. Ostatnio silnikami z klatką miedzianą zainteresował się sektor obronny zainteresowany silnikami o wyższej sprawności i/lub mniejszej masie w porównaniu z silnikami z klatką aluminiową.

Literatura

- [1]. Klimmich R. Doppelbauer M. Peters D.T. Cowie J. G. Brush E.F. : *Die-cast Copper Rotor Motors via Simple Substitution and Motor Redesign for Copper*. 17th International Conference on Electrical Machines. ICEM 2006 Chania, Crete Island, Greece. September 2-5 2006. Conference Proceeding CD no. 358
- [2]. <http://automation.usa.siemens.com/motors/product/mtnema.html>
- [3]. http://www.automation.siemens.com/sd/motoren/html_76/nema_new.htm
- [4]. Brush E.F, Peters D.T, Cowie J.G, Doppelbauer M, Klimich R, *Recent Advances in Development of the Die – cast Copper Rotor Motors*. 16th International Conference on Electrical Machines. ICEM 2004, Cracow, Poland. 5–8 September 2004, Conference Proceeding CD no. 589
- [5]. Jazdyński W. *Optimum Designed Induction Motors with Die-Cast Aluminium and Copper Cages – a Comparative Study*. 17th International Conference on Electrical Machines. ICEM 2006 Chania, Crete Island, Greece. September 2-5 2006. Conference Proceeding CD no. 464
- [6]. Peters D.T i inni: *Performance of Motors with Die – cast Copper Rotors in Industrial and Agricultural Pumping Applications*. http://www.copper-motor-rotor.org/pdf/IEMDC_Final.pdf
- [7]. *Motors with Copper Rotors Can Cost Less to Produce*. http://www.copper-motor-rotor.org/update/august_05/topstory_cost01.html
- [8]. Han P-W. Chun Y-D. Koo D-H.: *Improving Three-Phase Induction Motor Efficiency by the optimized Design with Copper Rotor Cage*. 17th International Conference on Electrical Machines. ICEM 2006. Chania, Crete Island, Greece. September 2-5 2006. Conference Proceeding CD no. 586
- [9]. *Tests Show Mass-Produced Copper-Rotor Motors More Efficient Than Nameplate Claims*. Copper Motor Rotor Volume 6, Issue 3 – November 2006.
- [10]. Stark C. i inni: *Copper in the Rotor for Lighter, Longer Listing Motors*. http://www.copper-motor-rotor.org/pdf/Copper_Motors_ASNE_San_Diego_2005_Final_Paper.Pdf
- [10]. Graczyk M.: *Silniki indukcyjne klatkowe z wirnikiem zalewanym miedzią*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 74/2006, s. 5-9.

