

Ryszard Zapaśnik
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

SILNIKI INDUKCYJNE Z MIEDZIANĄ ODLEWANĄ KLATKĄ WIRNIKA

INDUCTION MOTORS WITH DIE-CASTING COOPER ROTORS

Abstract: Die-cast copper rotor motors as the new kind of the squirrel cage induction motors. Main performance of the motors where copper has been substituted for aluminum in the rotor squirrel cage. Today's worldwide situation in the field of the production of the die-cast copper rotor induction motors. Perspectives of the industrial expansion of this kind of motors as the profitable alternative to ordinary motors with aluminum squirrel cage.

1. Wstęp

Przeszło stuletnia historia produkcji, aplikacji i eksploatacji silników indukcyjnych klatkowych powoduje, że jest to obecnie tzw. produkt technicznie dojrzały co skutkuje również tym, że jest on odporny na różnego rodzaju nazbyt radykalne pomysły innowacyjne.

Od kilku dziesiątków lat w budowie silników indukcyjnych klatkowych nie zaszły istotniejsze zmiany w konstrukcji, technologii i rodzajach stosowanych materiałów.

Ujednoliciły się w skali światowej i ustabilizowały podstawowe procesy technologiczne silników – zwojenie, wykrawanie blach, impregnacja, odlewanie żeliwa i aluminium, obróbka mechaniczna. Można tu mówić o szczególnym rodzaju globalizacji wynikającym z faktu opanowania światowego rynku urządzeń technologicznych przez określoną liczbę wyspecjalizowanych firm dostarczających „pod klucz” takie urządzenia producentom silników. Nie ulegały zmianie rodzaje podstawowych materiałów czynnych: blacha elektrotechniczna (zimnowalcowana niskokrzemowa), przewody nawojowe (miedziane), aluminium do odlewania klatek wirnika oraz rodzaje materiałów izolacyjnych.

Poza innymi przyczynami, nie bez wpływu na stabilizację konstrukcyjną silników ma ukształtowana w dużym stopniu w minionych latach i konserwatywna z zasady międzynarodowa i krajowa normalizacja dotycząca maszyn elektrycznych w ogólności i silników indukcyjnych w szczególności.

W ostatnim czasie pojawiły się przesłanki zapowiadające możliwość zmiany tej sytuacji. Chodzi tu o materiał z którego są odlewane uzwojenia klatkowe wirników.

Obecnie materiałem używanym powszechnie do odlewania uzwojeń klatkowych jest aluminium. Z podstawowych zasad działania silnika wiadomo, że zastąpienie w klatce wirnika aluminium miedzią – tj. materiałem o konduktywności prawie dwukrotnie większej – stwarza w silniku znacząco lepsze warunki dla przemiany energii elektrycznej w mechaniczną, co może być w różny sposób, zależnie od wyboru zdyskontowane na korzyść silnika: podwyższenie sprawności, obniżenie masy, zmniejszenie gabarytów.

Dotychczas wprowadzenie przemysłowego odlewania klatek wirnika z miedzi uniemożliwiały przeszkody natury technologicznej. Wysoka, ponad 1000 °C temperatura topnienia miedzi, prawie dwukrotnie wyższa niż dla aluminium wymaga użycia specjalnych form odlewniczych (kokili). Poza spełnieniem określonych wymagań technicznych kokile takie ze względu na konieczność zapewnienia akceptowalnego kosztu przemysłowej operacji odlewniczej muszą mieć odpowiednio dużą trwałość – liczoną liczbą możliwych do wykonania wtrysków (shots) w jednej kokili, w literaturze np. [1] wymienia się liczbę 20 000.

Możliwości rozwiązania tego problemu pojawiły się stosunkowo niedawno – na przełomie minionego i obecnego stulecia..

W literaturze pochodzącej z tego okresu przedstawiono rezultaty zrealizowanego w USA programu badawczego, który doprowadził do opracowania specjalnej kokili na bazie stopu niklu, wolframu i molibdenu przeznaczonej do odlewania miedzianych klatek wirnika. Jednocześnie zmodyfikowano sam proces odlewniczy przez wprowadzenie wstępnego podgrzewania

kokili celem zmniejszenia szoku termicznego działającego na kokilę w momencie wtrysku roztopionej miedzi.

Wg. autorów tej publikacji kokila taka w połączeniu z operacją jej wstępnego podgrzania wytrzymuje liczoną w tysiącach ilość wtrysków, co zapewnia fabryczną opłacalność procesu odlewania miedzianych klatek wirnika.

2. Podstawowe efekty uzyskiwane w silniku w wyniku zastosowania uzwojeń klatkowych wirnika odlewanych z miedzi

Podstawowym efektem zastosowania miedzi w miejsce aluminium jako materiału, z którego odlewane jest uzwojenie klatkowe wirnika w silnikach indukcyjnych jest znaczące zmniejszenie strat w silniku co przekłada się na liczący się technicznie i handlowo wzrost sprawności silnika. W ostatnim czasie w literaturze światowej ukazało się sporo publikacji na ten temat opartych m.in. na eksperymentalnych badaniach porównawczych strat w silnikach z miedzianą i aluminiową klatką wirnika - np. [1, 3-7].

Determinujące sprawność silnika jego straty całkowite – równe różnicy mocy pobieranej z sieci i oddawanej na wale – są sumą pięciu składników:

- a) w uzwojeniu stojana;
- b) w rdzeniu stojana;
- c) w uzwojeniu (klatce) wirnika;
- d) mechaniczne (wentylacja i tarcie);
- e) dodatkowe.

Ogólnie rzecz biorąc zastosowanie miedzi w miejsce aluminium do odlewania klatek wirników w sposób bezpośredni (większa przewodność) zmniejsza składnik c) strat oraz w sposób pośredni składnik d) (przy mniejszych stratach w klatce wirnika silnik mniej się nagrzewa i wystarcza mniej intensywna wentylacja).

W niektórych wzmiankowanych wyżej publikacjach odnotowano również eksperymentalnie stwierdzony fakt, że w silnikach z klatką miedzianą mniejszy jest również w porównaniu z klatką aluminiową składnik e) – straty dodatkowe, nie wyjaśniając do końca tego przyczyny.

W literaturze wymienia się również inne zalety silników z uzwojeniem klatkowym wirnika odlewanych z miedzi w porównaniu z silnikami z klatką aluminiową:

- niższe nagrzewanie się silnika podczas pracy co zwiększa jego trwałość;

- łatwiejsze wyważanie wirnika a nawet zbyteczność takiej operacji technologicznej,
- możliwość zmniejszenia gabarytów silnika.

3. Różne zasady stosowania w silnikach klatek wirnika odlewanych z miedzi w miejsce klatek odlewanych z aluminium

Zastosowanie w silnikach indukcyjnych uzwojeń klatkowych wirnika odlewanych z miedzi w miejsce uzwojeń klatkowych odlewanych z aluminium, ogólnie rzecz biorąc, może być dokonane na różnych zasadach:

- a) z pozostawieniem bez zmian pozostałych części obwodu elektromagnetycznego silnika (kształt i wymiary żłobków wirnika, długość rdzenia, jego średnice wewnętrzną i zewnętrzną, uzwojenie stojana)
- b) ze zmianami obwodu elektromagnetycznego silnika dostosowującymi rozwiązanie konstrukcyjne silnika do wymagań i właściwości klatki miedzianej (w literaturze często takie rozwiązanie jest nazywane zoptymalizowanym)

Sposób a) jest najprostszy, dla producenta najtańszy, i z punktu widzenia zmniejszenia strat w silniku (podwyższenia sprawności) efektywny. Jednakże ten najprostszy sposób ma swoje wady wpływające negatywnie na inne właściwości silnika.

Uzwojenie miedziane odlane w takich samych żłobkach wirnika jak uzwojenie aluminiowe będzie mieć rezystancję o kilkadziesiąt procentów mniejszą od rezystancji uzwojenia aluminiowego. Z zasady działania silnika indukcyjnego wiadomo, że zmniejszenie rezystancji uzwojenia wirnika pogarsza obydwa podstawowe parametry rozruchowe silnika - powiększa prąd rozruchowy i jednocześnie znacząco zmniejsza moment rozruchowy. W konsekwencji, przy zastosowaniu rozwiązania a) istnieje niebezpieczeństwo znaczącego pogorszenia się właściwości rozruchowych silnika, nawet w takim stopniu że silnik nie będzie spełniać stawianych przez normy wymagań odnośnie właściwości rozruchowych.

Wiadomo jest również, że zmniejszenie rezystancji uzwojenia wirnika powoduje zmniejszenie się wartości znamionowego poślizgu silnika czyli wzrost znamionowej prędkości obrotowej silnika. Taki wzrost prędkości obrotowej silnika jest z reguły zjawiskiem niezamierzonym i niepożądanym gdyż przy momencie obciążającym stałym w funkcji prędkości obrotowej lub pro-

porcjonalnym do kwadratu tej prędkości wzrasta moc pobierana przez silnik z sieci a ponadto taki wzrost mocy pobieranej przez silnik fałszuje ocenę efektu energooszczędnościowego uzyskiwanego w wyniku zastosowania silnika z miedzianą klatką wirnika.

Przytoczone w artykule [3] wyniki badań amerykańskich wykazują, że w wyniku zastosowania w silnikach o mocy 15 HP (11,2 kW) klatki miedzianej w rozwiązaniu a) uzyskano zmniejszenie strat w uzwojeniu wirnika o 40%. (Autorzy artykułu zwracają uwagę, że jest to tylko 80 % teoretycznej wartości wynikającej z różnicy konduktywności miedzi i aluminium). Jak piszą autorzy tego artykułu, wbrew pozorom zastosowanie klatki miedzianej powoduje również zmniejszenie składnika strat mechanicznych, gdyż mniejsze w porównaniu z klatką aluminiową straty w klatce miedzianej i większa przewodność cieplna miedzi powoduje, że w wirnikach z klatką miedzianą pierścienie zwierające klatkę są gładkie, bez skrzydełek radiatorowych powodujących dodatkowy składnik strat wentylacyjnych. Na potwierdzenie tego autorzy przytaczają wyniki pomiarów: straty wentylacyjne silnika z wirnikiem aluminiowym i skrzydełkami na pierścieniach wynosiły 115 W; straty wentylacyjne tego samego silnika z wirnikiem miedzianym bez skrzydełek wynosiły 72 W, czyli były zmniejszone o 37 %. Odnosnie strat dodatkowych autorzy uważają, że na ich wartość ma wpływ porowatość i niemetaliczne zanieczyszczenia w strukturze prętów klatki. Ponieważ przy odlewaniu klatki miedzianej łatwiej jest uzyskać wyższą pod tym względem jakość odlewu, istnieją potencjalne możliwości zmniejszenia również w silnikach z klatką miedzianą składnika strat dodatkowych. Na poparcie tej tezy autorzy przytaczają wyniki odpowiednich badań przeprowadzonych na kilku silnikach, które wykazały, że w silnikach z miedzianą klatką wirnika uzyskano w porównaniu z silnikami z klatką aluminiową zmniejszenie strat dodatkowych z 137 W do 105 W czyli o 23 %. Łącznie w silnikach tych w wyniku zastąpienia wirników z klatką aluminiową wirnikami z klatką miedzianą uzyskano zmniejszenie strat całkowitych o 179 W, czyli 14 %, co się przekłada na wzrost sprawności znamionowej silnika o 1,2 punktu procentowego. Taki wynik uzyskanego wzrostu sprawności silnika autorzy artykułu skomentowali w ten sposób: „w okresie ostatnich 20 lat wykorzystano już wszystkie łatwe sposoby

zmniejszenia strat w silniku i obecnie dalszy postęp jest możliwy praktycznie tylko przez zastępowanie w silnikach klatek wirnika aluminiowych klatkami miedzianymi nie biorąc pod uwagę tak egzotycznych jeszcze i bardzo drogich alternatyw jak blachy amorficzne na rdzenie silników i nadprzewodnictwo”.

Wg. badań [3] przeprowadzonych z czterema innymi wirnikami zastąpienie w tych samych silnikach wirników z klatką aluminiową wirnikami z klatką miedzianą spowodowało obniżenie się strat w wirniku o 40 % i strat całkowitych o 17, 6 %. Podobne badania przeprowadzone dla jeszcze innych silników - o mocy 4 HP (3 kW) - wykazały że straty całkowite zmniejszyły się o 21 %.

Podsumowując przedstawione w swoim artykule wyniki badań, odnoszące się do szerokiego zakresu mocy silników (3 kW – 200 kW) autorzy [3] stwierdzają, że przez zastąpienie aluminiowej klatki wirnika klatką miedzianą uzyskuje się zmniejszenie strat w wirniku o ok. 40%, przy czym dla silników mniejszych mocy nawet więcej i zmniejszenie strat całkowitych średnio o 14,7 %.

W publikacji [4] zwrócono uwagę, że sposób a) zastosowania klatki miedzianej może być wykorzystany do łatwego zmodyfikowania silnika standardowego z aluminiową klatką wirnika i posiadającego europejską najniższą klasę energetyczną Eff3 w silnik o wyższej klasie energetycznej Eff2.

W publikacji pochodzącej z ubiegłego roku [8] przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w Indiach. Badania te dotyczyły produkowanych w kilku firmach silników używanych do napędu pomp wody w gospodarce wiejskiej. W silnikach tych zastosowano klatki miedziane w miejsce klatek aluminiowych wg. sposobu a), t.zn. bez żadnych zmian kształtu i wymiarów klatki. Jak piszą autorzy wirniki z klatką miedzianą były odlane w małych odlewniach indyjskich. Badania porównawcze przeprowadzone na kilku silnikach o mocach 1,5 – 3,7 kW i liczbie biegunów $2p = 2$ i 4 wykazały, że w wyniku zastąpienia klatki aluminiowej klatką miedzianą uzyskano: wzrost sprawności poszczególnych silników od 1,4 do 3,1 punktu procentowego, przy jednoczesnym wzroście prędkości obrotowej silników od 0,8 % do 2,8 %.

Podobne badania porównawcze (klatka miedziana odlana wg. sposobu a) były przeprowadzone [8] przez niemiecką firmę SEW – Euro-

rive dla silnika 1,1 kW 2p=4. W silniku tym przez zastąpienie klatki aluminiowej klatką miedzianą uzyskano wzrost sprawności silnika z 75,7 % do 82,8 % t.j. o 7,1 pkt. procentowego.

Poza korzyściami energetycznymi - zmniejszenie strat, podwyższenie sprawności- zastosowanie w wirniku klatek odlewanych z miedzi wpływa korzystnie również na inne właściwości silnika zarówno eksploatacyjne jak i produkcyjne:

- obniża znacząco temperaturę pracy silnika (wg. przykładowych badań [3] uzwojenia stojana o 32 °C i klatki wirnika o 29 °C) przez co zwiększa się trwałość silnika

- upraszcza wyważanie wirnika a nawet umożliwia całkowitą rezygnację z takiej operacji technologicznej.

Stosowanie w silnikach uzwojeń klatkowych wirnika odlewanych z miedzi wg. sposobu a) wpływa jednak również negatywnie na niektóre właściwości i parametry silnika.

W pewnym stosunkowo niewielkim stopniu – ok. 3 % [3] - zmniejsza się wartość znamionowego współczynnika mocy.

Zmniejsza się poślizg znamionowy czyli wzrasta znamionowa prędkość obrotowa silnika co z reguły nie jest rzeczą pożądaną.

Najpoważniejszym mankamentem takiego bezpośredniego zastąpienia klatki aluminiowej klatką miedzianą – z pozostawieniem bez zmian wymiarów klatki - jest obniżenie się momentu rozruchowego silnika przy jednoczesnym wzroście prądu rozruchowego. Ta sprawa jest poruszana w wielu publikacjach.

Sposób b) bardziej kosztowny dla producenta, pozwala na optymalne – przy określonych założeniach i uwarunkowaniach – wykorzystanie w silniku zalet jakie daje zastosowanie do odlewania uzwojeń klatkowych wirnika, miedzi - materiału elektrycznie i cieplnie doskonalszego niż aluminium nie powodując jednocześnie pogorszenia parametrów rozruchowych silnika. Sposób ten może być realizowany, z różnym stopniem zmian wprowadzanych w silniku. Autorzy artykułu [4] zmiany te stopniują w następujący sposób:

S1 - miedziana klatka wirnika + zmieniona

długość pakietu i zmienione uzwojenie stojana

S2 - S1 + zmiana wykroju blach

S3 - S2 + zmiana wszystkich wymiarów silnika i zmiana średnic stojana

W pierwszym przypadku (S1) wymiary żłobków stojana i wirnika oraz średnice wewnętrzne i zewnętrzne stojana i wirnika pozostają bez zmiany. Koszt oprzyrządowania pozostaje praktycznie bez zmiany gdyż zbyteczne są kosztowne nowe narzędzia wykrawające.

W drugim przypadku (S2) ma miejsce zmiana wymiarów żłobków w stojanie i wirniku, co powoduje konieczność zmiany narzędzi wykrawających nawet jeżeli zmianie nie ulegają średnice wewnętrzna i zewnętrzna stojana.

Trzecie i najdroższe rozwiązanie (S3) wymaga zmiany wszystkich wymiarów łącznie ze średnicami wewnętrzną i zewnętrzną stojana. W krańcowym przypadku powiększeniu może ulec gabaryt silnika łącznie z modyfikacją jego obudowy.

Ogólnie rzecz biorąc, efekt uzyskiwany z zastosowania poszczególnych rozwiązań jest różny zależny m.in. od mocy silnika. Tak np. w wyniku zastosowania w silniku o mocy 1,5 kW rozwiązania (S1) jak i (S2) uzyskano tylko europejską klasę sprawności Eff2, a klasę Eff1 uzyskano dopiero przy rozwiązaniu (S3) [4].

Obecnie światowym liderem w przemysłowym stosowaniu w silnikach wirników z uzwojeniem klatkowym odlewanych z miedzi jest niemiecka firma SEW – Eurodrive. Firma ta produkuje tego rodzaju silniki do mocy 37 kW. W silnikach tych wykroje blach i uzwojenie stojana zostały dostosowane do miedzianej klatki wirnika. Przy takim rozwiązaniu dla silnika 5,5 kW 2p = 4 uzyskano wzrost sprawności o 3,3 pkt. procentowego przy jednoczesnym zachowaniu odpowiednich wartości momentów silnika.

4. Sytuacja światowa odnośnie produkcji silników z odlewana miedzianą klatką wirnika

Silniki z odlewana miedzianą klatką wirnika, jako wyrób rynkowy, pojawiły się na świecie po raz pierwszy w kwietniu 2003 roku na Targach Przemysłowych w Hanowerze w ofercie niemieckiej firmy SEW- Eurodrive z Bruchsalu. Obecnie firma ta produkuje silniki z miedzianą klatką wirnika mocach do 37 kW przy liczbie biegunów 2p = 4.

Firma SEW-Eurodrive charakteryzując swoje nowe silniki jako energooszczędne stwierdza, że przez zastąpienie klatki aluminiowej klatką miedzianą uzyskano nie tylko znaczące zmniejszenie strat w wirniku ale również zmniejszenie strat dodatkowych. W silnikach tych są zachowane takie same średnice stojana i wirnika jak

w silnikach standardowych (z aluminiową klatką wirnika). Ze względu na większy ciężar właściwy miedzi w porównaniu z aluminium a także dłuższy pakiet blach, silniki z miedzianą klatką wirnika są cięższe i wirniki mają większy moment bezwładności w porównaniu z silnikami z klatką aluminiową. To oznacza – jak piszą autorzy w firmowej publikacji [6], że sensowne zastosowanie tych energooszczędnych silników jest ograniczone do pracy ciągłej z obciążeniem 75 % - 100 % znamionowego i niewielką liczbą włączeń w ciągu godziny. Silniki tej firmy z miedzianą klatką wirnika pod względem poziomu sprawności spełniają wymagania europejskiej klasy Eff1 i wymagania amerykańskie EPact. Silniki energooszczędne z miedzianą klatką wirnika firmy SEW – Eurodrive mają takie same znamionowe moce i prędkości obrotowe oraz gabaryty zewnętrzne jak silniki standardowe przez co istnieje pełna wymiennalność między tymi dwoma rodzajami silników.

W ostatnim czasie produkcję silników o mocach kilku kilowatów z klatką wirnika odlaną z miedzi podjęto również w Indiach, uruchamiając to przedsięwzięcie w niewielkich firmach produkujących silniki elektryczne i w kooperacji z małymi odlewniami [8]. W silnikach tych zastosowano sposób a) odlania miedzianej klatki t.zn. bez wprowadzenia zmian wymiarów klatki w stosunku do wirników standardowych z klatką aluminiową. Silniki te są przeznaczone przede wszystkim do napędu pomp wody używanych w indyjskiej gospodarce wiejskiej. Zainteresowanie w Indiach silnikami energooszczędnymi wynika z faktu stosunkowo wysokiej ceny energii elektrycznej w tym kraju (0,109 \$ za 1 kWh) [8]. Dane liczbowe podane w artykule [8] wykazują, że przy takiej cenie energii i wyższej tylko o 10,35 % cenie silnika z klatką miedzianą w porównaniu z ceną silnika z klatką aluminiową dla konkretnego przypadku eksploatacji silnika okres zwrotu wyższej ceny silnika z klatką miedzianą zwróci się już po 22 dniach. Należy dodać, że indyjski program produkcji silników z miedzianą klatką wirnika był zainicjowany i wspierany przez organizacje międzynarodowe i krajowe promujące miedź (International Copper Promotion Council India i International Copper Association Ltd) oraz przez instytucje finansujące rozwój sektora małych przedsiębiorstw (Small Scale Industries Development Bank of India).

5. Zakończenie

Trudno jest w tej chwili prognozować realne perspektywy rozwojowe tego rodzaju silników. Silniki z miedzianą odlewaną klatką wirnika należy obecnie traktować jako swojego rodzaju nowinkę techniczną i rynkową ze zrozumiałych względów nagłaśnianą przez wytwórców takich silników, przy silnym wsparciu potężnego światowego lobby miedziowego zainteresowanego zwiększeniem popytu na ten surowiec.

To czy silniki indukcyjne z miedzianą odlewaną klatką wirnika staną się realną przemysłową alternatywą dla silników z klatką aluminiową zależy przede wszystkim od wyników wieloaspektowej analizy techniczno-ekonomicznej opartej na wiarygodnym i obiektywnym materiale porównawczym.

Nie można jednak wykluczać i takiego scenariusza: w sytuacji ciągłego zaostrzania się światowych wymagań odnośnie poziomu sprawności silników, przy jednoczesnym kończeniu się możliwości uzyskiwania dalszego wzrostu sprawności silników z aluminiową klatką wirnika, jedynym sposobem spełnienia takich (być może obligatoryjnych) wymagań będą silniki z miedzianą klatką wirnika.

Należy dodać, że od kwietnia ubiegłego roku w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie są prowadzone prace badawcze dotyczące tego rodzaju silników realizowane w ramach projektu badawczego finansowanego przez KBN.

6. Literatura

- [1]. Peters D.T, Cowie J. G, Brush E. F.: Die Casting Copper Motor Rotors: Mold Materials and Processing for Cost-Effective Manufacturing. Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives. Springer Verlag, 2000.
- [2]. Peters D. T, Cowie J. G, Brush E. F, Midson S. P, : Die-Cast Copper Rotors: Die Materials and Process Considerations for Economical Cooper Rotor Production. Energy Efficiency in Motor Driven Systems. Springer Verlag, 2003.
- [3]. Brush E. F, Cowie J. G, Peters D. T, Vanson D. J.: Die-Cast Copper Motor Rotors: Motor Test Results, Copper Compared to Aluminium. Ibid.
- [4]. Parasiliti F, Villani M, : Design of High Efficiency Induction Motors with Die-Casting Copper Rotors. Ibid.
- [5]. Paris CH, Walti O, : Stray-Load Losses Analysis in Copper Squirrel Cage Induction Machine. Ibid.
- [6]. *Neue Energiesparmotoren Reihen DTE und DVE*. <http://presse.sew.de/1280.htm>

- [7]. *Energiesparmotoren von SEW-EURODRIVE: EFF1, EFF2 und andere.* SEW- EURODRIVE 0918 0001/0303
- [8]. Brush E.F, Peters D.T, Cowie J.G, Doppelbauer M, Klimich R,: *Recent Advances in Development of the Die-cast Copper Rotor Motor.*
16th International Conference on Electrical Machines ICEM 2004 5-8 September 2004, Cracow – Poland. Conference Proceeding CD no. 589.
- [9]. Doppelbauer M,: *Kompaktere Energiesparmotoren dank Kupfertechnologie*, www.pua24.net
- [10]. Zapaśnik R, : *Silniki z odlewana miedzianą klatką wirnika.* Nowa Elektrotechnika 1. 2004