

Jakub Bernatt, Tadeusz Glinka
BOBRME Komel, Katowice

PROBLEMY KONSTRUKCJI MASZYN ELEKTRYCZNYCH W AKTUALNYCH PRACACH BOBRME KOMEL

ELECTRICAL MACHINES DESIGN ISSUES – BOBRME KOMEL PRESENT R&D WORK

Abstract: Research and Development Centre of Electrical Machines (BOBRME) KOMEL areas of interest include design, construction, lab and on-site tests and diagnostics of different kinds of electrical machines. At present we mostly deal with medium and large power induction machines and machines excited with permanent magnets. Komel occupies the leading position among Polish companies developing and investigating these machines. Therefore, this paper's subject matter is limited to these two machine types. With respect to induction machines, the following topics have been covered:

- motors with frequent start-ups,
- motors with allowable long start-up time,
- motors with decreased power losses (energy-saving motors), including those fulfilling NEMA MGI standards demands,
- 6-phase motor adapted to inverter supply.

Examples of different constructions have been presented, such as motors driving deep-well pumps, electric traction motors, sea motors, mine motors, high-speed motors, slip-ring motors with hollow shaft used for pipe cementing.

With respect to electrical machines excited with permanent magnets, the following topics have been covered:

- motors used for driving electric vehicles such as SAM, ELIPSA, QUAD, mine locomotive, motor hang-glider,
- synchronous generators for wind and hydro power stations.

1. Wstęp

Branżowy Ośrodek Badawczo Rozwojowy Maszyn Elektrycznych (BOBRME) KOMEL zajmuje się projektowaniem, konstrukcją, badaniami laboratoryjnymi, badaniem stanowiskowym oraz diagnostyką maszyn elektrycznych różnych rodzajów; aktualnie jest to tematyka silników indukcyjnych średniej i dużej mocy oraz maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi. W tych tematach BOBRME Komel jest w Polsce liderem. Treść artykułu jest zatem związana do tych dwóch typów maszyn.

2. Maszyny indukcyjne

Silniki indukcyjne klatkowe są najpowszechniejszymi napędami przemysłowymi, szacuje się, że około 60% wytwarzanej w kraju energii elektrycznej przetwarzana jest przez te silniki. Współczesne problemy konstrukcji maszyn indukcyjnych klatkowych to:

- dostosowanie charakterystyk i rozwiązań konstrukcyjnych do wymagań napędzanych urządzeń i maszyn roboczych,
- wysoka niezawodność eksploatacyjna,

- wysoka sprawność (możliwie małe rozpraszanie energii) i kompatybilność (niski poziom hałasu i drgań),
- dobra współpraca z energoelektronicznymi przemiennikami częstotliwości.

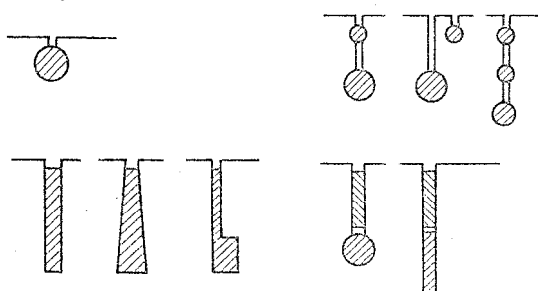
Wymieniona problematyka zostanie scharakteryzowana na przykładach zaprojektowanych w Ośrodku, a następnie wykonanych i oddanych do eksploatacji maszyn.

2.1. Obwód elektromagnetyczny maszyn indukcyjnych

Właściwości elektromechaniczne maszyn indukcyjnych determinuje obwód elektromagnetyczny, to jest kształt wykroju blach stojana i wirnika oraz rodzaj i sposób wykonania uzwojeń. Pakiet blach i uzwojenia stojana decydują o wielkości strumienia magnetycznego, do którego w drugiej potędze proporcjonalny jest rozwijany przez maszynę moment początkowy i maksymalny. Natomiast przebieg charakterystyki momentu elektromagnetycznego w funkcji poślizgu zależy w dużej mierze od kształtu żłobków i rodzaju uzwojenia wirnika. Standar-

dowe silniki indukcyjne średniej i dużej mocy wykonuje się z klatkami wirnika prętowanymi (lutowane lub spawane) zazwyczaj miedzianymi jako:

- jednoklatkowe głębokożłobkowe, w których wykorzystuje się zjawisko wypierania prądu podczas rozruchu,
 - dwuklatkowe,
 - z prętami rozruchowymi (tzw. pręty bierne).
- Stosowane kształty żłobków wirnika klatkowego pokazano na rysunku 1. Dobierając odpowiedni rodzaj klatki, kształt żłobka, materiał klatki rozruchowej w silniku dwuklatkowym, lub materiał i kształt prętów „biernych”, można dobrze dopasować charakterystyki i parametry silnika do wymagań stawianych przez maszynę roboczą lub napędzane urządzenie. Ogólnie można stwierdzić, iż silniki dwuklatkowe, osiągają najwyższe wartości początkowego momentu rozruchowego. Nadają się dobrze dla napędów o dużej ilości rozruchów – lecz rozruchów trwających krótko. Dla rozruchów długotrwałych bardziej predysponowane są wirniki jednoklatkowe głębokożłobkowe (prostokątne lub trapezowe), bądź wirniki z prętami rozruchowymi.



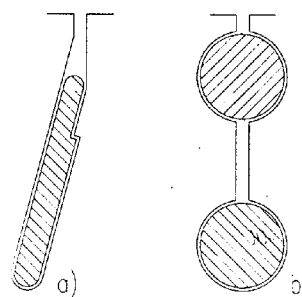
Rys. 1. Kształt żłobków i prętów silników indukcyjnych klatkowych

BOBRME Komel dysponuje własnymi metodami obliczeniowymi pozwalającymi dokładnie określić parametry elektromechaniczne maszyn indukcyjnych z różnymi rodzajami wirników, a także przyrosty temperatury i naprężenia mechaniczne powstające w klatkach podczas rozruchu silnika.

Silnik o dużej częstotliwości rozruchów

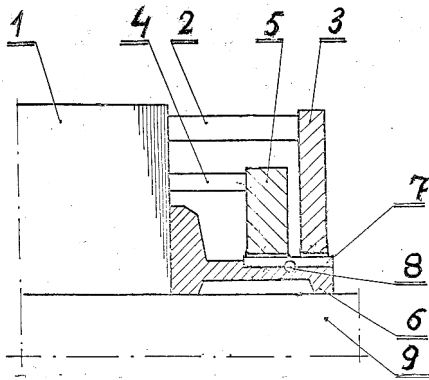
Procesy technologiczne narzucają warunki pracy silników napędowych. Jednym z nich jest praca przerywana. Na przykład w jednej z hut silniki, napędzające pompy wody chłodzącej w procesie wytapiania stali, mają cykl pracy: 15 minut praca i 15 minut postój. W ciągu jednego roku dokonywanych jest około 13 000

rozruchów. Silniki o napięciu znamionowym 6 kV pracują przy zasilaniu bezpośrednim z sieci [1]. Pomimo, że rozruch jest lekki (przy pompie nieobciążonej trwa ok. 1 s, a przy pompie obciążonej ok. 6 s), silnik w wykonaniu fabrycznym miał żłobki skośnie i wytrzymał około 4 500 rozruchów, pękały połączenia prętów z pierścieniami zwierającymi. Silnik należało dopasować do warunków pracy, w tym przypadku silnik powinien wytrzymać kilkadziesiąt tysięcy rozruchów. Uzwojenie wirnika w takich warunkach pracy jest narażone na: działanie sił elektrodynamicznych żłobkowych [2] i na nierównomierne nagrzewanie energią rozruchową, która jest równa w przybliżeniu energii kinetycznej uruchamianego układu elektromechanicznego. Rozwiązanie konstrukcyjne wirnika zostanie zilustrowane na przykładzie silnika o parametrach znamionowych: 515 kW, 6 kV, $2p = 2$, 2980 obr/min. Silnik fabryczny miał żłobki jak na rysunku 2.



Rys. 2. Kształt prętów wirnika fabryczny (a) i silnika dwuklatkowego z prętami okrągłymi (b)

Nowo zaprojektowany wirnik ma uzwojenie dwuklatkowe z prętami okrągłymi. Siły elektrodynamiczne żłobkowe działające w czasie rozruchu są najmniejsze w prętach okrągłych [2]. Pręty klatki rozruchowej umieszczone bliżej szczeliny powietrznej są wykonane z mosiądzu i mają większy przekrój niż pręty klatki pracy – rys. 2. Klatka rozruchowa ma zatem większą rezystancję i większą pojemność cieplną od klatki pracy [3]. Rezystancja klatki pracy zabezpiecza pożądany moment rozruchowy. Uszkodzenia uzwojeń wirników występują najczęściej na połączeniach prętów z pierścieniami zwierającymi. Węzeł ten musi być szczególnie mocno zabezpieczony. Pierścienie zwierające klatki pracy i klatki rozruchowej są rozdzielone i są luźno osadzone na wspólnym podzwojniku – rys. 3.

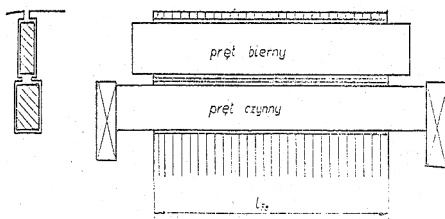


Rys. 3. Mocowanie czół uzwojenia silnika klatkowego

Możliwość drgań lub przemieszczeń obwodowych eliminuje wpust łączący podzwojnik i pierścień. Wpust i rowki wpustowe w podzwojniku i pierścieniach mają skośne położenie względem osi wału. Skos ten jest kątoowo równy skosowi łożków wirnika. Wykonano kilka takich wirników. Wirniki po wykonaniu ponad 30 tys. rozruchów nie miały śladów uszkodzenia klatek.

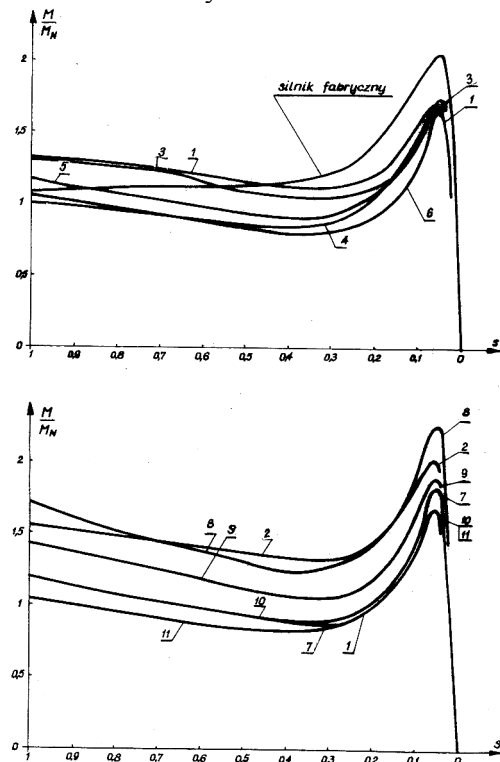
Silnik o dopuszczalnym długim czasie rozruchu

Konstrukcja silnika o dopuszczalnie długim czasie rozruchu zostanie przedstawiona na przykładzie silnika SZJr 138r o parametrach znamionowych: 400 kW, 6 kV, 740 obr/min. Silnik w wykonaniu fabrycznym ma pręty trapezowe podbijane klinami od dołu (rysunek w tabeli 1). Silniki te są wykorzystywane do napędów młynów węglowych i młynów topika. Urządzenia te w niekorzystnych stanach rozruchowych, przy zasypanym młynie i przy rozruchach powtarzanych, mają czasy rozruchu przekraczające 30 sekund, przy czasie dopuszczalnym dla silnika 20 sekund. Duża awaryjność silników skłoniła użytkownika do poszukiwania innego rozwiązania uzwojenia klatkowego wirnika. Zdecydowano się na zastosowanie uzwojenia z prętami biernymi [4], które jest bardziej odporne na działanie rozruchowych sił termicznych – rys. 4.



Rys. 4. Wirnik z prętami biernymi

Poszukując rozwiązania optymalnego przeprowadzono obliczenia 11-tu wariantów rozwiązania obwodu elektromagnetycznego silnika z prętami biernymi. Warianty te różniły się między sobą liczbą zwojów stojana z_1 (3 warianty) i kształtem łożków wirnika, w tym wymiarami prętów biernych i prętów klatki (8 wariantów). Kształty łożków wirnika, liczby zwojów z_1 oraz wyniki obliczeń podstawowych parametrów silnika zestawiono w tabeli 1, a charakterystyki momentów w funkcji poślizgu przedstawiono na rysunku 5.

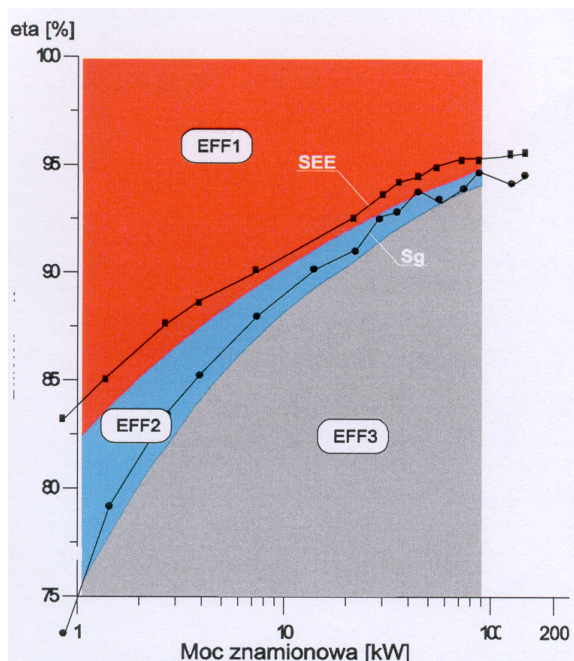


Rys. 5. Charakterystyki mechaniczne silników z tabeli 1

Z obliczeń tych wynika, że przy niezmiennych danych nawojowych stojana przeciążalność momentem jest mniejsza niż w silniku fabrycznym. Momenty rozruchowe ($s = 1$) wszystkich wariantów silników z prętami biernymi są większe od momentu rozruchowego silnika fabrycznego. Sprawność silników z prętami biernymi jest mniejsza od sprawności silnika fabrycznego od 0,2% - wariant 7 - do 0,7% - wariant 1, co jest jedyną wadą tego rozwiązania. Ze względu na prostotę przerobienia wirników fabrycznych na wirniki z prętami biernymi, w czasie remontów silników, realizowano wariant rozwiązania 11. Rozwiązanie to zdało egzamin eksploatacyjny, silniki z prętami biernymi miały trwałość prawie 3-krotnie większą.

Silniki o zmniejszonych stratach mocy

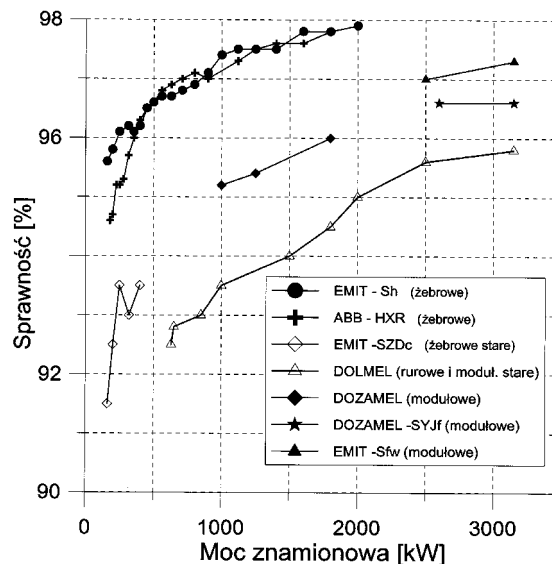
Sprawność silników elektrycznych jest wysoka. Jednak szacuje się, że roczne krajowe koszty energii traconej wynoszą 1,5 miliarda zł. Szacuje się, że w przemyśle krajowym pracuje około 10 000 silników indukcyjnych klatkowych wysokiego napięcia w zakresie mocy 160-3150 kW. Większość tych maszyn została wyprodukowanych w latach 60-80 ubiegłego wieku, ich sprawność nie spełnia obecnych standardów obowiązujących w USA, Kanadzie i w Unii Europejskiej. Stowarzyszenie Europejskich Producentów Maszyn Elektrycznych i Energoelektroniki CEMEP określiło trzy klasy sprawności silników indukcyjnych klatkowych w zakresie mocy 1,1-90 kW, oznaczone symbolami: Eff1, Eff2, Eff3 [5, 6]. Produkowane w Polsce silniki serii Sg mieszczą się w klasie Eff2, a silniki energooszczędne serii SEE w klasie Eff3 – rys. 6.



Rys. 6. Europejskie klasy sprawności silników klatkowych niskiego napięcia, $2p = 4$ i sprawność silników krajowych

W zakresie wyższych mocy nie ma opracowanych standardów, jednak producenci silników elektrycznych dążą, aby ich maszyny miały możliwie wysoką sprawność. Na wykresie (rys. 7) przedstawiono porównanie sprawności silników starego typu i silników obecnie produkowanych przez różne firmy. Widać, że silniki współcześnie produkowane przez EMIT i ABB mają prawie identyczną sprawność, natomiast

sprawność silników starego typu jest około 3% mniejsza. Efekt ten uzyskano poprzez obniżenie strat wentylacyjnych, zmniejszenie grubości izolacji i zwiększenie przekroju miedzi w żłobku i obniżenie strat w rdzeniu.



Rys. 7. Porównanie sprawności silników $2p = 4$ wysokiego napięcia różnych producentów

Silniki indukcyjne dużej mocy zasilane z falowników

Napęd energooszczędny jest to napęd, który pracuje bez zbędnych strat mocy przy minimalnej, technologicznie dopuszczalnej, prędkości obrotowej. Warunek ten spełnia silnik indukcyjny zasilany z falownika. W zakresie dużych mocy są stosowane dwa rozwiązania:

- falownik i silnik o napięciu znamionowym 6 kV,
- transformator 6/0,8 kV, falownik i silnik o napięciu 800 V.

BOBRME Komel preferuje drugi wariant rozwiązania. Silnik wykonany na niższe napięcie ma większą sprawność o około 0,5% [5, 6], a w celu zmniejszenia prądu wykonuje się uzwojenie 6-fazowe z rozłożeniem osi faz 30° , 90° , 30° , itd. [7].

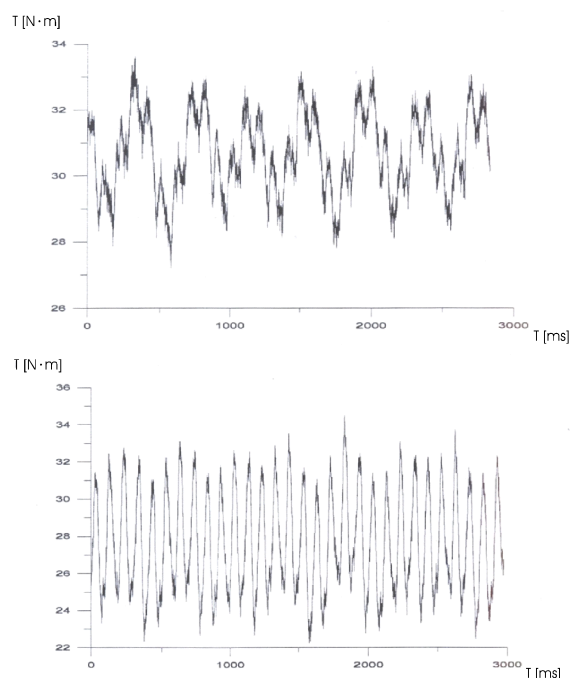
Silnik elektryczny, przy tym samym obwodzie magnetycznym, poprzez zmniejszenie napięcia znamionowego ma mniejsze straty mocy, a więc wyższą sprawność. Uzwojenie o niższym napięciu znamionowym ma cieńszą izolację, a zatem współczynnik wypełnienia żłobka materiałem przewodzącym prąd (miedzią) jest większy, mniejsza jest gęstość prądu i mniejsze są straty mocy w uzwojeniu. Z tego tytułu wzrasta sprawność silnika o około

0,5%. Dalsze podwyższenie sprawności silnika można uzyskać poprzez zastosowanie uzwojenia 6-fazowego z rozłożeniem przestrzennym osi faz: 30° , 90° , 30° itd., gdyż w szczelinie magnetycznej zerują się 5-ta i 7-ma harmoniczne przestrzenne rozkładu pola magnetycznego, generowane przez pierwszą i wyższe harmoniczne prądu. Harmoniczne te najsilniej wpływają (gdyż są największe) na straty dodatkowe, momenty pasożytnicze, hałas magnetyczny i drgania. Konstruktorzy maszyn elektrycznych 3-fazowych ograniczają 5-tą i 7-mą harmoniczną pola poprzez współczynniki uzwojenia: skrótu i rozłożenia. Współczynniki te nie eliminują całkowicie tych harmonicznych, a równocześnie obniżają napięcie rotacji indukowane w uzwojeniu przez 1-harmoniczną pola, co trzeba wyrównywać powiększając liczbę zwojów lub długość pakietu. Wzrasta zatem objętość miedzi i rezystancja uzwojenia. Wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na silniku doświadczalnym 50 kW, opracowanym i wykonanym w BOBRME Komel, który był badany przy uzwojeniu połączonym w układ 3- i 6-fazowy, wykazały, że sprawność układu 6-fazowego jest wyższa o 0,4%. Obniżenie strat mocy i powiększenie sprawności silników z uzwojeniem 6-fazowym zostało potwierdzone także na silnikach 1400 kW i 2400 kW zaprojektowanych przez BOBRME Komel, a wykonanych przez fabrykę Cantoni-EMIT. Stanowi to eksperymentalne potwierdzenie na obiekcie rzeczywistym, że uzwojenie 6-fazowe zmniejsza straty dodatkowe generowane przez wyższe harmoniczne przestrzenne indukcji, a tym samym podwyższa jego sprawność.

Przy zasilaniu z falownika w układzie 6-fazowym występują mniejsze pulsacje momentu, a częstotliwość ich jest większa, co widać na rysunku 8.

2.2. Dostosowanie konstrukcji silników do maszyn napędzanych

Znacząca liczba urządzeń mechanicznych i maszyn roboczych ciężkich ma silniki elektryczne zabudowane wewnątrz bądź połączone z obudową. W tych przypadkach silnik elektryczny musi być dostosowany do wbudowania w maszynę roboczą. Podamy kilka przykładów [7].



Rys. 8. Przebieg czasowy momentu mechanicznego silnika 50 kW, $f = 5$ Hz, stan obciążenia. $T_0 = 30$ Nm; a) zasilanie 3-fazowe sinusoidalne, b) zasilanie 6-fazowe sinusoidalne

Silniki współpracujące z pompami głębinowymi

Silniki głębinowe mokre napędzają pompy głębinowe i tworzą z nimi jedno urządzenie, które jest zabudowywane w studni głębinowej. BOBRME Komel przy współpracy z Karkonoskimi Zakładami Maszyn Elektrycznych KARELMA S.A. w Piechowicach zaprojektował i wdrożył do produkcji nową generację silników głębinowych typu SM, które zastąpiły produkowane dotychczas serie silników typu SGM.

Zwiększony został zakres mocy silników w poszczególnych wielkościach mechanicznych, a mianowicie w:

- silnikach 6" z 9 kW (w SGMe-14) do 40 kW (w SM6),
- silnikach 8" z 55 kW (w SGMe-18) do 90 kW (w SM8),
- silnikach 10" z 75 kW (w SGMe-24) do 220 kW (w SM10),
- silnikach 12" z 125 kW (w SGMe-27) do 300 kW (w SM12) (1" = 25,4 mm – Encyklopedia PWN, 1973).



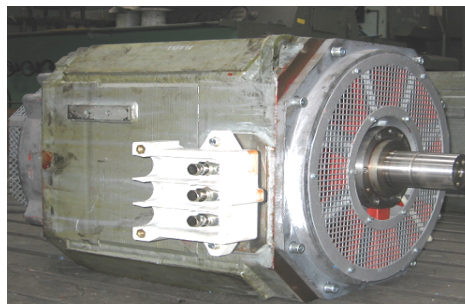
Rys. 9. Wygląd zewnętrzny silnika głębinowego serii SM12 o mocy 200 kW sprzęgniętego z pompą GDB.4.06

Wymiary silników spełniają wymagania norm i standardów międzynarodowych, które narzucają, w pewnym zakresie, rozwiązania konstrukcyjne silników głębinowych, szczególnie w zakresie kształtów, wymiarów i wyglądu zewnętrznego. Pierwszy i najważniejszy z przyjętych standardów dotyczy wymiarów średnicy i dopasowania do połączenia silnika z pompą. Zunifikowane zakończenia wirników, sprzęgieł, a także zamków oraz ilości i rozstawu śrub łączących pozwala na sprzęganie silników z dowolnymi, produkowanymi wspólnie w świecie pompami. Cechą charakterystyczną nowej serii silników są kadłuby zewnętrzne silników wykonane ze stali kwasoodpornej. Pozwoliło to na zmniejszenie grubości kadłubów, powiększenie średnicy pakietu blach, bez zmiany gabarytów, oraz na stosowanie technologii bezodpadowej przy ich produkcji. Poprawiło to także estetykę silników.

Silniki indukcyjne klatkowe do zastosowań trakcyjnych

Napędy elektryczne taboru trakcyjnego są modernizowane. Wyeksploatowane, niskosprawne i zawodne w pracy układy napędowe, oparte na silnikach prądu stałego, są wymieniane na silniki indukcyjne klatkowe zasilane z falowników. W BOBRME Komel od 2004 roku rozpoczęto prace nad specjalnym wykonaniem silników indukcyjnych klatkowych do zastosowań trakcyjnych przystosowanych do zasilania z fa-

lowników. Jednym z pierwszych silników trakcyjnych zaprojektowanych w BOBRME Komel był bezkadłubowy silnik o mocy 180 kW do napędu pojazdu trakcyjnego typu METROPOLIS. Silnik jest produkowany przez fabrykę EMIT w Żychlinie. Nowy silnik jest zamienny z silnikami trakcyjnymi typu 4 EXA2130 produkcji ALSTOM, które także są stosowane w wagonach METROPOLIS w Metrze Warszawskim.



Rys. 10. Silnik STDa280-4B, 180 kW do napędu Metra Warszawskiego

Projektując silnik należało dopasować zarówno wymiary silnika do zabudowania na wózku wagonu, jak i zapewnić identyczne charakterystyki trakcyjne w całym zakresie regulacji prędkości obrotowej. Warunki takie narzucił odbiorca, a wynikają one stąd, że dwa silniki są zasilane z jednego falownika i przy losowo zabudowanych silnikach jednego lub drugiego producenta, silniki powinny równo obciążać się.



Rys. 11. Silnik STx 500-4A, 830 kW do napędu lokomotywy

Drugim przykładem opracowanego w BOBRME Komel silnika trakcyjnego jest silnik STx500-4A o mocy 830 kW do napędu nowo projektowanej lokomotywy o mocy 5 MW. Zaprojektowano także silnik o mocy 50 kW do tramwaju i silnik typu LK 450 X6 do napędu autobusu szynowego.

Silniki morskie

W 2001 roku w BOBRME Komel wykonano projekt i dokumentację konstrukcyjną silnika indukcyjnego w wykonaniu morskim, przeznaczonego do napędu sterów strumieniowych na statkach o nieograniczonym rejonie pływania. Silnik typu mSCVf 560Y6 o mocy 1800 kW (rodzaj pracy S2-30 min.) jest zaprojektowany w wykonaniu pionowym, z jednym normalnym czopem wału skierowanym w dół – forma wykonania IM 4011/IMV1, budowy okapturzonej o stopniu ochrony wnętrza IP-23, chłodzenie silnika własne. Silnik spełnia wymagania przepisów Polskiego Rejestru Statków i Germanischer Lloyd. Silnik został wdrożony do produkcji w ZME EMIT w Żychlinie.

Silniki spełniające wymagania normy NEMA MG1

Silniki TEFC z kadłubem żebrowanym, Frame 449, Design B, o mocy 250-350 HP, 460 i 575 V, 60 Hz przewidziane są do sprzedaży na rynki USA i Kanady. Ich parametry techniczne – wymiary montażowe, czopy końcowe wałów, skrzynki zaciskowe i wyprowadzenia połączeń uzwojenia stojana, a także sposób rozruchu – określają odpowiednie ustalenia przepisów NEMA MG1 oraz wymagania rynku amerykańskiego, różniące się od standardów europejskich. Zaprojektowane w BOBRME Komel silniki zostały wdrożone do produkcji w ZME EMIT w Żychlinie i są w pełni konkurencyjne w stosunku do współczesnych silników oferowanych na rynkach USA i Kanady.

Silniki górnicze

W ciągu ostatnich 10-ciu lat w BOBRME Komel powstało wiele typoodmian oraz konstrukcji silników indukcyjnych przeznaczonych do ciężkich warunków pracy oraz przystosowanych do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem dla kopalń (silniki przeciwwybuchowe). Są to projekty dla firm:

- CELMA w Cieszynie – silniki ognioszczelne przeciwwybuchowe EExdIICT5, o wzniosie osi wału $H = 80$ mm, $2p = 2$ i 4 , 400 V, 50 Hz i silniki przeciwwybuchowe w osłonie ognioszczelnej o podwyższonej sprawności i wzniosie 280 i 315 mm; 2 , 4 , 6 biegunów, $400 \div 1000$ V;
- EMIT w Żychlinie – silniki typu ExSf630Y2-6, 1100 kW, 6 kV, $2p = 2$ w wykonaniu przeciwwybuchowym z osłoną ognioszczelną i silniki chłodzone wodą o mocy 500 kW,

3300 V, 50 Hz w wykonaniu przeciwwybuchowym oraz silniki górnicze dwubiegowe $200/400$ kW $2p = 8/4$ i $132/400$ kW, $2p = 12/4$, $3,3$ kV;

- DAMEL S.A. w Dąbrowie Górniczej – silniki budowy przeciwwybuchowej ognioszczelnej chłodzone powietrzem o mocach 200 , 250 i 315 kW, $2p = 4$ o napięciu $660/1140$ V; silniki górnicze dwubiegowe chłodzone wodą o mocach $65/200$ i $85/250$ kW, $2p = 12/4$ o napięciu 1000 i 1140 V oraz $105/315$ i $200/400$ kW, $2p = 8/4$ o napięciu 1000 , 1140 i 3300 V przeciwwybuchowe w osłonie ognioszczelnej oraz zaprojektowano typoszerzeg silników elektrycznych budowy przeciwwybuchowej, chłodzonych powietrzem o mocach $110-630$ kW – $2p = 4$; $75-250$ kW, $2p = 6$ oraz $110/220$ kW; $125/250$ kW, $2p = 8/4$;
- Zakładów Mechanicznych S.A. w Zabrze – silniki chłodzone wodą o mocy 13 kW, 1000 V, $2p = 4$ i o mocy 36 kW, 440 V, $2p = 4$;
- Instytutu Maszyn Górniczych KOMAG w Gliwicach uruchomiono produkcję silnika samohamownego typu SGKg80-4Hp o mocy 1.1 kW i napięciu 230 , 400 i 500 V do wciągnika łańcuchowego typu EWL-3/6A.



Rys. 12. Silnik górniczy o mocy 85 kW typu SGKg250M-4



Rys. 13. Silnik górniczy samohamowny o mocy 1.1 kW typu SGKg80-4Hp

Silniki szybkoobrotowe

Silniki indukcyjne szybkoobrotowe o budowie modułowej, 3150 kW, 6000 V, 50 Hz, 2987 obr/min. stosowane są do napędu wysokociśnieniowych pomp, zasilających kotły bloków elektroenergetycznych 220 i 230 MW. Uzwojenie stojana, wykonane w technologii impregnacji próżniowo-ciśnieniowej VPI (Vacuum Pressure Impregnation), jest odporne na działanie sił elektrodynamicznych. Silniki te mogą być powtórnie załączane przy 100% napięcia resztkowego i pełnej opozycji faz.



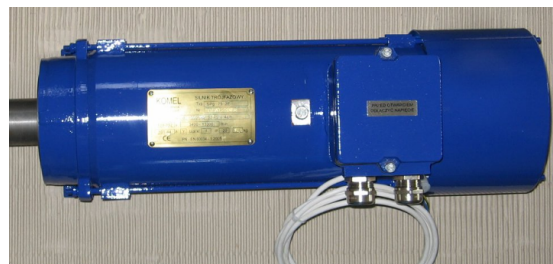
Rys. 14. Silnik modułowy 3150 kW, 6000 V, 2987 obr/min.

Silnik w wykonaniu specjalnym z wałem drążonym z zastosowaniem do cementowania rur: 1,1 kW, 400 V, 2931 obr/min.



Rys. 15. Silnik 1,1 kW z wałem drążonym

Silnik szybkoobrotowy typu SPg 75-2E zasilany z falownika, przewidziany do pracy dorywczej 60 s w przedziale prędkości obrotowych 3400 – 13500 obr/min. napędzający ściernice obciążającą go siłą poosiową.



Rys. 16. Silnik typu SPg 75-2E

Silniki pierścieniowe

Silniki typu SUf630H4, 1250 kW, 6000 V i typu SUf630H4, 1120 kW, 6000 V zaprojektowane w BOBRME Komel są przeznaczone do napędu różnych urządzeń przemysłowych (wentylatory, pompy, przenośniki taśmowe itp.). Silniki te mają budowę zamkniętą (stopień ochrony IP 54) o konstrukcji modułowej z chłodnicą rurową powietrze-powietrze umieszczoną na górze kadłuba, pierścienie ślizgowe poza kadłubem. Do ścianki czołowej obudowy przykręcone są filtry powietrza. Ruch powietrza wewnątrz obudowy jest wytwarzany przez wentylator osadzony na tulei pierścieniowej. Skrzynka zaciskowa uzwojenia stojana posiada konstrukcyjne osłabienia, zabezpieczające przed jej rozerwaniem w razie zwarcia na zaciskach. Poszczególne fazy oddzielone są przegrodami stalowymi. Silniki wdrożono do produkcji w ZME EMIT w Żychlinie.

3. Maszyny wzbudzone magnesami trwałymi

Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi NdFeB mają, w porównaniu z innymi rodzajami maszyn elektrycznych, najwyższą sprawność i najmniejszą masę przy tej samej znamionowej mocy i prędkości obrotowej. Dlatego maszyny te obecnie są w orbicie zainteresowania producentów i użytkowników maszyn elektrycznych. Maszyny te stworzyły warunki rozwoju napędów pojazdów elektrycznych i hybrydowych.

W BOBRME Komel opracowano konstrukcje, technologię wykonania i są produkowane prądnice i silniki wzbudzone magnesami trwałymi. Produkowane są głównie 3 grupy maszyn:

- z magnesami umieszczonymi na powierzchni wirnika,
- z magnesami umieszczonymi wewnątrz wirnika,
- silniki komutatorowe prądu stałego.

3.1. Przykłady silników z magnesami trwałymi

Najważniejsze zastosowania silników z magnesami trwałymi to:

- napędy pojazdów trakcji elektrycznej,
- nowoczesne napędy pojazdów mechanicznych o napędzie elektrycznym lub hybrydowym,
- układy napędowe i siłowniki stosowane w automatyce przemysłowej i robotyce.

Silnik synchroniczny do napędu lokomotywy kopalnianych typu SMzs o mocy znamionowej 33/60 kW, 220 V, 240 obr/min. Lokomotywy kopalniane, w poprzednim rozwiązaniu były napędzane silnikiem prądu stałego o wzbudzeniu szeregowym. Powiększenie parametrów trakcyjnych lokomotywy wymagało zwiększenia mocy silnika lecz w tej samej objętości. Jedynym wariantem rozwiązania zapewniającym postawione warunki był silnik z komutacją elektroniczną wzbudzany magnesami trwałymi.

a)



b)



Rys. 17. a) Silnik typu SMzsg250L o mocy 33/60 kW i b) lokomotywa kopalniana

Silnik do napędu pojazdu typu ELIPSA, który jest przeznaczony do jazdy w mieście ($V_{\max} = 30$ km/h), w kurortach, na polach golfowych. Jest to silnik typu BLDC o mocy znamionowej 2,2 kW, 48 V, 2400 obr/min.

a)



b)



Rys. 18. a) Silnik o mocy 2.2 kW i b) pojazd ELIPSA

Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi typu SMws zastosowany do napędu paralotni o parametrach 3,0 kW, 135 V, 2400 obr/min.

a)



b)



Rys. 19. a) Silnik do motolotni i b) motolotnia

Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi SMzS do samochodu elektrycznego typu SAM o parametrach: 18 kW, 135 V, 2400 obr/min. Samochód miejski SAM z napędem elektrycznym ma parametry trakcyjne: $v_{\max} = 90$ km/h, zasięg do 100 km.

a)



b)



Rys. 20. a) Silnik 18 kW i b) pojazd SAM

3.2. Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi

W latach 2003-2004 w BOBRME KOMEL zostały wdrożone do produkcji prądnice synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi. Stosunkowo niska cena i masa prądnicy przypadające na jednostkę mocy powoduje, że małe elektrownie wiatrowe i wodne stają się atrakcyjne dla użytkowników indywidualnych. Prądnice te dzięki swym zaletom można stosować m.in. jako dodatkowe (lub nawet podstawowe) źródło energii do ogrzewania domów, szklarni, jako źródło energii dla napędu pomp wzbogacających w tlen wodę w stawach rybnych, jako źródło energii doładowujące akumulatory, np. na jachtach i wiele innych.



Rys. 21. Prądnica z magnesami trwałymi typu PMzg132M-16

Najważniejszymi cechami jakimi charakteryzują się prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi to: prosta budowa, duża niezawodność ruchowa i wysoka trwałość, najwyższa możliwa sprawność przetwarzania energii mechanicznej w elektryczną. BOBRME Komel produkuje prądnice o mocy od 0.1÷110 kW i prędkościach obrotowych 250÷1500 obr/min. Prądnice z magnesami trwałymi znalazły uznanie wśród odbiorców. BOBRME KOMEL za „Typoszereg prądnic synchronicznych do odnawialnych źródeł energii” został nagrodzony w 2004 roku **Medalem Prezesa SEP**.



Rys. 22. Przykładowy sposób wykorzystania prądnic synchronicznych z magnesami trwałymi



Rys. 23. Medal Prezesa SEP

4. Wnioski

Postęp w rozwoju maszyn indukcyjnych skupia się na trzech problemach:

- dopasowanie konstrukcji i charakterystyk elektromechanicznych, w tym rozruchowych, do potrzeb urządzeń napędzanych, co w sposób znaczący podwyższy niezawodność ich pracę,
- obniżenia w silnikach strat energii przetwarzania, w szczególności strat dodatkowych, co podwyższy sprawność maszyn,
- modyfikacji technologii produkcji w celu zmniejszenia kosztów wytwarzania.

Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi z komutacją elektroniczną, średniej i dużej mocy są dopiero na początku swojej drogi rozwoju. Metodyka obliczeń polowych obwodu elektromagnetycznego 2D i 3D jest już dobrze zaawansowana, natomiast konstrukcja wirników i sposoby rozwiązania mocowania magnesów trwałych, taka aby technologicznie była łatwa w realizacji i trwała, a wirniki nie generowały zjawisk ubocznych, nie jest sprawą zamkniętą. Najwięcej do zrobienia jest jednak w tematyce sterowania komutatorem elektronicznym. Podobnie jak w silnikach indukcyjnych zasilanych z falowników sterowanych wektorowo, należy poszukiwać rozwiązań sterowania wektorowego pracą maszyny wykorzystując obserwator matematyczny położenia wirnika. Pozwoli to uprościć sterowanie pracą maszyny i co jest najważniejsze, umożliwi wyeliminowanie najbardziej zawodnego elementu w układzie napędowym jakim są czujniki pomiarowe położenia wirnika: hallotrony lub enkodery.

5. Literatura

- [1] Bernatt M.: *Narażenia silników klatkowych występujące w czasie rozruch przy łączeniu na pełne napięcie sieci*. Materiały Szkoły Niezawodności RELEMA, 1985, tom XX, ss.48-67, Instytut Elektrotechniki – Warszawa
- [2] Bernatt M., Czogała E., Talikowski A., Rut R.: *Naprężenia w prętach klatki wirnika w czasie rozruch silnika indukcyjnego*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 16/1972, ss. 17-27, BOBRME Komel
- [3] Bernatt M.: *O niektórych własnościach cieplnych i rozruchowych silników dwuklatkowych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 51/1995, ss. 95-97, BOBRME Komel
- [4] Bernatt M., Śliwa B.: *Silniki indukcyjne z prętami biernymi – nowe rozwiązanie silnika klatkowego*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 31/1980, BOBRME Komel
- [5] Bernatt M.: *Możliwości obniżenia energochłonności napędów dużej mocy*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 73/2005, ss. 23-30, BOBRME Komel
- [6] Bernatt J., Bernatt M.: *Energy Efficient High Voltage Induction Motors*. Proc. IC Energy Efficiency of Motor Driven Systems, Treviso, Italy, 2002
- [7] Działalność merytoryczna Ośrodka w latach 1998-2008. Monografia „10 lat po 50-tce”. ISBN 978-83-910585-8-9. Wydawnictwo BOBRME Komel, 2008
- [8] Glinka T.: *Electric motors with permanent magnets*. Przegląd Elektrotechniczny, PL ISSN 0033-2097, nr 7/2008, ss. 1-7
- [9] Bernatt J., Glinka T., Król E., Rossa R.: *Electric Motors with Permanent Magnets*. ICRM 2008. IEEE Catalog Number: CFP0890B-CDR. ISBN: 978-1-4244-1736-0. Library of Congress Number: 2007906913. Poz. 58
- [10] Bernatt J., Glinka T.: *Electrical machines with 6-phase winding*. Przegląd Elektrotechniczny, PL ISSN 0033-2097, nr 12/2008, ss. 6-11
- [11] Bernatt J., Glinka T.: *Maszyny elektryczne z uzwojeniem 6-fazowym*. Wiadomości Elektrotechniczne, PL ISSN 0043-5112, nr 12/2008, ss. 14-20

Autorzy

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka,

Dr inż. Jakub Bernatt

e-mail: info@komel.katowice.pl

Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Komel
Al. Rozdzieńskiego 188, 40-203 Katowice