

Bartosz Polnik
Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice

SILNIK PMSM JAKO NOWOCZESNY NAPĘD W GÓRNICZYCH SYSTEMACH TRANSPORTOWYCH

PMSM AS STATE- OF-THE-ART DRIVE IN MINING TRANSPORT SYSTEMS

Abstract: The possibilities of development of mining transportation systems with use of drives with brushless synchronous motor with permanent magnets are presented in the paper. A review of solutions of drives used so far and comparative analysis of machines driven by electric motors and machines which use state-of-the-art drive with synchronous motor with permanent magnets are done. Drives of machines, which move on the floor as well as drives of suspended monorails are discussed. Special attention is paid to a new solution of GAD-1 suspended drivetrain. Method for control of a drivetrain drive is presented and advantages of state-of-the-art GAD-1 suspended drivetrain in comparison to solutions, which were used in hard coal mining industry so far, are indicated.

1. Wprowadzenie

W podziemnych wyrobiskach górniczych przewóz ludzi, a także transport materiałów i urobku opiera się głównie na wykorzystaniu lokomotyw spagowych oraz ciągników podwieszonych. W przypadku lokomotyw wyróżnia się, ze względu na sposób zasilania, trzy rodzaje lokomotyw górniczych:

- a) spalinowe – stanowiące obecnie większość taboru wyposażenia kopalń,
- b) trakcyjne – poruszające się w głównych chodnikach kopalnianych,
- c) akumulatorowe – nie wymagające zewnętrznego zasilania.

Spośród ciągników podwieszonych można wyróżnić:

- a) spalinowe – stanowiące znaczącą większość ciągników podwieszonych,
- b) elektryczne – zasilane z zewnątrz za pośrednictwem kabla wleczonego,
- c) akumulatorowe – rzadko obecnie stosowane.

Z uwagi na problemy związane z przewietrzaniem wyrobisk podziemnych, aktualne tendencje wskazują na ograniczenie stosowania maszyn spalinowych na rzecz napędów elektrycznych. Obecnie w najgłębszych pokładach, przy dążeniu przodków, praktycznie nie wykorzystuje się napędów spalinowych, a wydobywanie urobku oraz transport materiału opiera się przede wszystkim na wykorzystaniu maszyn elektrycznych oraz ciągle jeszcze z wykorzystaniem ludzi. Maszyny transportowe zasilane prądem elektrycznym posiadają ograniczony zasięg stosowania wynikający z: pojemności

akumulatorów – w przypadku maszyn akumulatorowych, prowadzenia trakcji pod ziemią w przypadku lokomotyw trakcyjnych oraz z długości kabla zasilającego w przypadku ciągnika podwieszono elektrycznego. Prowadzenie coraz to dłuższych kabli zasilających z uwagi na spadek napięcia oraz możliwości uszkodzenia mechanicznego nie jest rozwiązaniem docelowym. Rozwiązaniami przyszłościowymi są zatem maszyny akumulatorowe i zasilane z trakcji elektrycznej. W celu efektywnego wykorzystania maszyn elektrycznych, należy zwiększyć sprawność lokomotyw i ciągników z napędem elektrycznym. Osiągnięcie powyższego celu, może odbywać się w dwojaki sposób: poprzez poprawę sprawności układu zasilająco-sterującego, bądź poprzez modyfikację układu napędowego. Dotychczasowe układy zasilania w przypadku lokomotyw i ciągników akumulatorowych wykorzystują baterie kwasowo-ołowiowe, które posiadają jednak duże gabaryty oraz długi czas ładowania. Rozwój w dziedzinie ogniw wtórnych umożliwi wykorzystanie baterii jonowych posiadających dużo lepsze własności elektryczne jednakże są one dużo droższe. Z uwagi na brak dotychczasowego zastosowania, wymagają szeregu badań w celu dopuszczenia do użytku w warunkach zagrożeń. Łatwiejszą drogą do poprawienia sprawności lokomotyw i ciągników elektrycznych jest modyfikacja układu napędowego, a także układu sterowania. Propozycją w tym zakresie jest zastosowanie bezszczotkowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi.

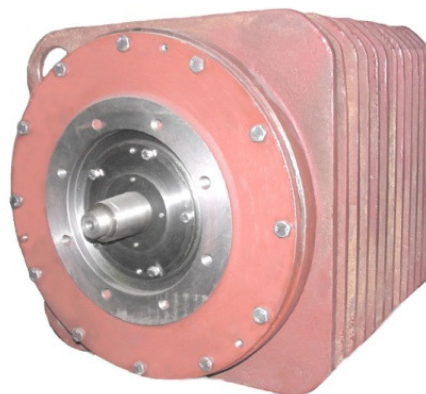
2. Lokomotywa trakcyjna Ld-31EM

W zakładach górniczych, które stosują w kopalnianej kolei podziemnej lokomotywy trakcyjne starszej generacji typu Ld-31, dostrzeżono konieczność ich modernizacji. Specjaliści z Instytutu Techniki Górniczej KOMAG przy współpracy z firmami Energo-Mechanik, Enel oraz Alstom opracowali nowe rozwiązanie lokomotywy o symbolu Ld-31EM. Wykonany egzemplarz pilotujący (rys.1) poddano próbom ruchowym w jednym z oddziałów wydobywczych KGHM Polska Miedź S.A.



Rys.1. Lokomotywa Ld-31EM podczas prób ruchowych w KGHM Polska Miedź S.A [4]

W dotychczasowym rozwiązaniu układu napędowego lokomotywy trakcyjnej Ld-31 stosowano silniki szeregowe prądu stałego typu LDA 327a. Napęd lokomotywy Ld-31EM bazuje na nowoczesnych bezszczotkowych silnikach z magnesami trwałymi typu PMPg 250L produkcji BOBRME KOMEL. Zasilanie silników odbywa się z trakcji elektrycznej za pośrednictwem przekształtnika energoelektronicznego, z którego odbywa się również sterowanie kierunkiem jazdy oraz prędkością [4]. Każdy zestaw kołowy napędzany jest niezależnie silnikiem o mocy 60kW. Operator ma możliwość wyboru napędu (I lub II lub I+II). Umożliwia to pracę maszyny nawet w przypadku awarii jednego z silników (napędów). Silnik napędowy typu PMPg-250L (rys.3) jest silnikiem przeznaczonym do napędu lokomotyw trakcji dołowej. Jest nowoczesnym zamiennikiem stosowanego do tej pory szeregowego silnika prądu stałego LDA 327a.



Rys.3. Silnik PMPg-250L z magnesami trwałymi produkcji BOBRME KOMEL [4]

Silnik PMPg 250L jest silnikiem nowej generacji z magnesami trwałymi zasilanym z przekształtnika energoelektronicznego. Dzięki zastosowaniu wysokoenergetycznych magnesów trwałych i optymalizacji konstrukcji obwodu elektroenergetycznego silnik cechuje wysoka sprawność (przewyższająca sprawność silników prądu stałego i indukcyjnych porównywalnych mocy) oraz duża przeciążalność mechaniczna. Silnik PMPg 250L, w porównaniu do silnika LDA 327a pozbawiony jest komutatora mechanicznego, dzięki czemu uzyskuje się znacznie zwiększoną trwałość i niezawodność, a tym samym ograniczony jest czas przestojów i obniżone są koszty remontów i przeglądów eksploatacyjnych silnika [4]. W porównaniu do silnika LDA 327a podniesiono moc znamionową z 45kW do 60kW (przy tych samych gabarytach silnika), a równocześnie obniżono masę silnika z 645kg do 572kg. Silnik PMPg 250L posiada doskonałe właściwości dynamiczne i regulacyjne tj:

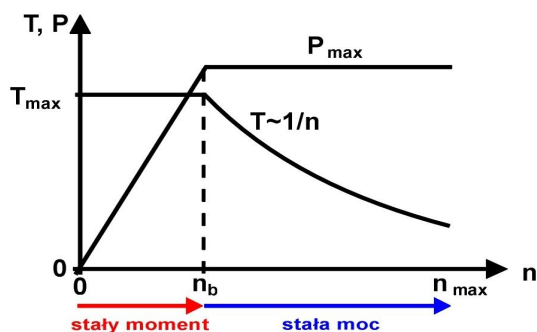
- moment na wale liniowo zależny jest od prądu zasilania,
- większe momenty bezwładności przy jednocześnie dużej przeciążalności momentem, pozwalają na uzyskanie większych przyspieszeń kątowych.

Wysokiej jakości materiały konstrukcyjne zapewniają odporność silnika na wstrząsy i zwiększają trwałość konstrukcji. Silnik nie posiada skrzynki zaciskowej. Połączenia z komutatorem elektronicznym dokonuje się trzema przewodami elastycznymi o przekroju 70mm².

Tabela 1. Zestawienie parametrów silników PMPg-250L i LDa327a [4]

	PMPg-250L	LDa327a
Rodzaj pracy	S2-60min	
Moc znamionowa P_N	60 kW	45 kW
Napięcie U_N	120 V	250V
Prąd znamionowy I_N	312 A	205A
Moment T_N	550 Nm	398 Nm
Prędkość obrotowa n_N	1080 obr/min	1080 obr/min
Sprawność η_N	93 %	87 %
Masa	572 kg	645 kg

Uzwojenie i materiały izolacyjne odpowiadają klasie izolacji H. Wysokiej jakości materiały elektroizolacyjne oraz przyrosty temperatury, niższe niż dopuszczalne dla klasy izolacji B, gwarantują długą i niezawodną pracę silnika, przy dużych przeciążeniach dopuszczalnych, trwale i chwilowo. W tarczach łożyskowych oraz uzwojeniach zastosowano po dwa czujniki termobimetalowe. Dodatkowo, w uzwojeniu zainstalowano dwa czujniki termistorowe PT100 do ciągłego pomiaru temperatury uzwojenia [4]. Silnik wyposażony jest w enkoder służący do pomiaru prędkości obrotowej silnika oraz identyfikacji położenia wirnika względem stojana. Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki elektromechaniczne silnika typu PMPg-250L.



Rys. 4. Charakterystyki elektromechaniczne silnika PMPg-250L z dwustrefową regulacją prędkości obrotowej [5]

3. Lokomotywa akumulatorowa Lea BM-12

Po pozytywnym zaimplementowaniu silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi do napędu lokomotywy trakcyjnej Ld-31EM, specjaliści Instytutu Techniki Górniczej KOMAG po przeprowadzeniu ankiet, w zakresie wykorzystania górniczych lokomotyw akumulatorowych postanowili podjąć się modernizacji układu napędowego dotychczas stosowanych

lokomotyw akumulatorowych z serii Lea BM-12. Nowy napęd górniczej lokomotywy akumulatorowej Lea BM-12, wykonano w ramach projektu badawczego rozwojowego nr N R01 0009 06 p.t. „Mechatroniczny układ napędowy do pojazdów szynowych przeznaczonych do pracy w atmosferze wybuchowej” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa. Na rys. 5 pokazano obiekt modernizacji.



Rys. 5. Górnicza lokomotywa akumulatorowa typu Lea BM-12 [6]

W celu unowocześnienia napędu górniczej lokomotywy akumulatorowej Lea BM-12, opracowano nowy silnik napędowy. Zadanie to zrealizował Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL, który zaprojektował i wykonał (w porozumieniu z KOMAG-iem) silnik synchroniczny z magnesami trwałymi – rys. 6. Dla nowego silnika zaadaptowano (wydłużono) standardowy kadłub silnika górniczego typu 3SGKH 200S-4 produkcji DAMEL S.A. Ponadto poszerzono skrzynkę przyłączeniową dodając jeden wpust sterowniczy [3].



Rys.6. Silnik typu SMwsd 200S-4 [3]

Zaprojektowano silnik synchroniczny z magnesami trwałymi typu SMwsd 200S-4, którego krotkość momentu rozruchowego jak i przeciążalność momentem zależna jest od wydajności prądowej falownika. Silnik wykonano w formie kołnierzej IM4001, chłodzony powietrzem IC410. Wewnątrz silnika zabudowano enkoder absolutny typu BFF 1G24K 1024 oraz hamulec elektromagnetyczny typu HPSX20 o napięciu pracy $U_h = 24V$ DC i maksymalnym momencie statycznym hamulca $M = 460Nm$ [3]. Do zasilania i sterowania napędem górniczej lokomotywy akumulatorowej posłużył, podobnie jak w przypadku lokomotywy trakcyjnej Ld-31EM, przekształtnik energoelektroniczny.

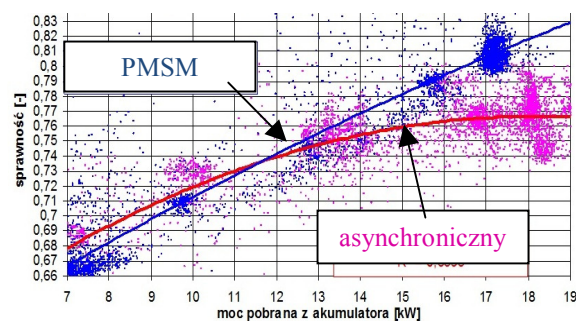
W tabeli 2 zestawiono parametry nowego napędu górniczej lokomotywy akumulatorowej Lea BM-12 i porównano z dotychczas stosowanymi silnikami napędowymi górniczych lokomotyw akumulatorowych serii Lea BM oraz z serii ELA-44.

Tabela 2. Zestawienie parametrów silników stosowanych w wybranych górniczych lokomotywach akumulatorowych. [6]

	SMwsd 200S-4	LDs-245	dSkG 180L4-EP-f
Rodzaj pracy	S1	S1	S1
Moc P_N	18 kW	15 kW	22 kW
Napięcie U_N	88 V	144 V	105 V
Prąd I_N	140 A	120 A	151 A
Moment T_N	115 Nm	51 Nm	143 Nm
Prędkość obrotowa n_N	1500 obr/min	2910 obr/min	1467 obr/min
$\cos\phi_N$	-	-	0,90
Sprawność η_N	92 %	88 %	90 %

Jak widać, parametry silnika synchronicznego z magnesami trwałymi typu SMwsd 200S-4 są lepsze od parametrów pozostałych stosowanych silników. Jednak porównanie wyłącznie danych katalogowych silników to za mało, aby móc stwierdzić przewagę układu napędowego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi nad pozostałymi silnikami napędowymi górniczych lokomotyw akumulatorowych. W Instytucie Techniki Górniczej KOMAG, przeprowadzono badania wybranych napędów górniczych lokomotyw akumulatorowych w celu zweryfikowania charakterystyk elektromechanicznych zamodelowanego układu napędowego. Porównano układ napędowy górniczej lokomotywy akumulatorowej wykorzystujący silnik asyn-

chroniczny z nowym, zaproponowanym przez specjalistów z KOMAG-u układem napędowym lokomotywy Lea BM-12 wykorzystującym silnik PMSM. Na rys.7 przedstawiono charakterystyki sprawności obydwu napędów w wyniku sześciokrotnego odwzorowania tego samego cyklu pracy maszyny górniczej.



Rys. 7. Charakterystyki sprawności w funkcji mocy pobieranej z akumulatora badanych silników napędowych [1]

Jak widać z charakterystyk na rys.8, zastosowanie silnika synchronicznego z magnesami trwałymi poprawia w znaczący sposób sprawność układu napędowego, co jest widoczne przy obciążeniu znamionowym.

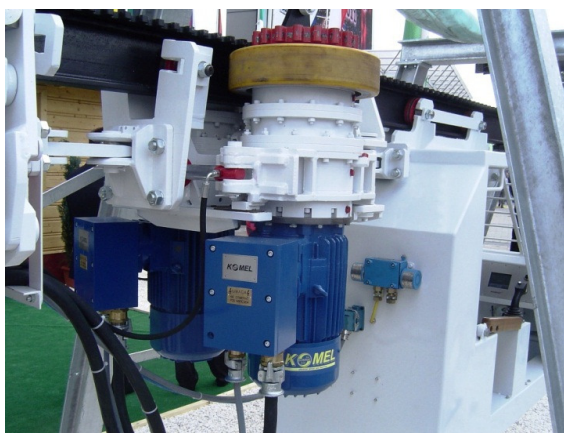
4. Akumulatorowy ciągnik podwieszony GAD-1 kolei podwieszonej

Na rys. 8 zaprezentowano najnowszą maszynę transportową wykorzystującą napęd z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi. Pionierskie prace związane z nowym rozwiązaniem realizowane są przez ITG KOMAG, wspólnie z firmą NAFRA, w ramach projektu celowego dofinansowywanego przez Naczelną Organizację Techniczną. W przedsięwzięciu zaangażowanych jest również kilka innych firm, dzięki którym możliwe było zastosowanie ogniów nowej generacji, silników z magnesami trwałymi, zasilanych z falowników oraz kompleksowego układu sterowania.



Rys. 8. Akumulatorowy ciągnik podwieszony GAD-1 kolei górniczej [2]

Zaletą proponowanego rozwiązania jest również odzyskiwanie energii podczas hamowania, dzięki czemu wydłuża się czas eksploatacji do kolejnego ładowania baterii akumulatorów [2]. Bardzo istotną zaletą rozwiązania jest zapewnienie możliwości generowania siły pociągowej w klasycznym systemie ciernym, jak również w systemie zębatkowym. Przejście z jednego systemu napędowego na drugi odbywa się dynamicznie, bez potrzeby zatrzymywania. W celu maksymalnego wykorzystania energii z baterii akumulatorowych, do napędu ciągnika podwieszono zastosowano osiem sztuk silników napędowych PMSM tworzących cztery pary zespołów napędowych. Dzięki takiemu rozwiązaniu układu napędowego podwieszony ciągnik akumulatorowy GAD-1 dysponuje siłą pociągową na poziomie 80 kN dla napędu ciernego oraz siłą 108 kN w przypadku napędu zębatkowego. Do wykonania silników napędowych na potrzeby ciągnika GAD-1 po raz kolejny skorzystano z doświadczenia i wiedzy Branżowego Ośrodka Badawczo Rozwojowego KOMEL. Na rys.9 pokazano rzeczywisty widok zespołu napędowego z silnikami PMSM zainstalowanego w prototypie ciągnika GAD-1.



Rys. 9. Zespół napędowy akumulatorowego ciągnika podwieszono GAD-1 [2]

Każdy z ośmiu silników typu SMwsPA132M6 zasilany i sterowany jest za pośrednictwem przekształtnika energoelektronicznego. Zastosowane bezszczotkowe silniki z magnesami trwałymi cechują się wysoką sprawnością, w porównaniu z tradycyjnymi silnikami indukcyjnymi. Dzięki zabudowaniu w silnikach enkoderów inkrementalnych zapewniono sterowanie wektorem momentu, co umożliwia precyzyjny nadzór nad pracą każdego z ośmiu silników napędowych akumulatorowego ciągnika podwieszono GAD-1. Inteligentny

system sterowania opracowany na potrzeby ciągnika GAD-1 umożliwi ponadto płynne przejście w trakcie pracy z napędu ciernego, na napęd zębaty i odwrotnie. Dodatkową przewagą wykorzystania do napędu ciągnika GAD-1 silnika synchronicznego jest możliwość hamowania elektrycznego, praktycznie do zerowej wartości prędkości ciągnika. Umożliwia to rekuperację energii do akumulatorów w znacznie szerszym zakresie niż ma to miejsce w przypadku napędów z klasycznymi silnikami asynchronicznymi. W tabeli 3 pokazano parametry zastosowanych bezszczotkowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi typu SMwsPA132M6.

Tabela 3. Zestawienie parametrów silnika SMwsPA132M6 [2]

	SMwsPA132M6
Rodzaj pracy	S3 85%
Moc znamionowa P_N	9 kW
Napięcie znamionowe U_N	150 V
Prąd znamionowy I_N	45 A
Moment znamionowy T_N	116 Nm
Prędkość obrotowa n_N	740 obr/min
Współczynnik mocy $\cos\varphi_N$	-
Sprawność η_N	90 %
Masa	130 kg

Silnik napędowy ciągnika GAD-1 posiada trzy pary biegunów. Dzięki temu uniknięto konieczności stosowania dużej i niewygodnej przekładni mechanicznej do redukcji prędkości obrotowej silnika. Niestety takie wykonanie silnika SMwsPA132M6 wiąże się z powiększeniem jego gabarytów w stosunku do tradycyjnych silników synchronicznych o liczbie par biegunów równej dwa. Zastosowanie do napędu ciągnika akumulatorowego GAD-1 bezszczotkowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi poprawia sprawność całego układu napędowego, polepszając jednocześnie właściwości elektromechaniczne ciągnika GAD-1. Poza przewagą w zakresie napędu ciągnika GAD-1 nad napędami asynchronicznymi dotychczas stosowanymi, drugą istotną zaletą rozwiązania jest źródło zasilania. Wspominany wcześniej moduł baterii akumulatorowej wykorzystuje nowoczesne ogniwa litowo-jonowe, których współczynnik gęstości energii jest o ponad rząd wielkości wyższy aniżeli dotychczas stosowane rozwiązania ogniwa kwasowych. Dzięki temu w stosunkowo nie-

wielkiej obudowie można zgromadzić znacznie większą pojemność elektryczną, co pozwala na wydłużenie czasu pracy ciągnika akumulatorowego GAD-1, a zmniejszenie masy całego zestawu baterijnego przekłada się na uzyskanie wyższej wartości mocy użytecznej.

5. Podsumowanie

Tendencje rozwojowe nowych, a także modernizowanych napędów górniczych lokomotyw akumulatorowych wskazują jednoznaczny wzrost wykorzystania bezszczotkowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Właściwości elektromechaniczne napędów wykorzystujących silniki PMSM przewyższają parametry dotychczas stosowanych klasycznych silników indukcyjnych, jak i silników prądu stałego. Częstsze wykorzystywanie napędów z bezszczotkowymi silnikami synchronicznymi wynika nie tylko z lepszych ich właściwości elektromechanicznych, ale również z coraz tańszych materiałów magnetycznych służących do budowy silników. Rozwój w dziedzinie energoelektronicznych układów przekształtnikowych umożliwia stosunkowo proste wykorzystanie sterowania wektorowego, dzięki czemu można precyzyjnie sterować każdą pojedynczą jednostką napędową. Obserwując techniki napędów pojazdów elektrycznych, można zauważyć, iż coraz więcej rozwiązań sprawdzonych w warunkach transportu publicznego jest adaptowanych na potrzeby transportu podziemnego. Jednoznacznie należy uznać przewagę napędów górniczych maszyn transportu poziomego wykorzystujących bezszczotkowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, nad do tej pory stosowanymi klasycznymi rozwiązaniami silników indukcyjnych, bądź też silnikami szeregowymi prądu stałego stosowanymi w maszynach górniczych starszej generacji.

6. Literatura

- [1]. Budzyński Z., Gąsior T., Polnik B.: „Analiza porównawcza zastosowania napędu synchronicznego i asynchronicznego w górniczych lokomotywach akumulatorowych”. *Maszyny Górnicze* nr 4/2011.
- [2]. Drwiega A., Budzyński Z., Czerniak D., Polnik B.: „Pakiet innowacyjności w ciągniku podwieszonym GAD-1”. *Miesięcznik Napędy i Sterowanie* nr 10/2011.
- [3]. Budzyński Z., Gąsior S., Niedworok A., Polnik B.: „Badania wybranych rozwiązań napędu górniczej lokomotywy akumulatorowej”. *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* nr 91/2011.

[4]. Budzyński Z., Deja P.: „Nowa generacja napędów trakcyjnych lokomotyw kopalnianych”. *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* nr 79/2008.

[5]. Budzyński Z., Deja P., Kaczmarczyk K., Suffner H., Pawlicki D.: „Kopalniana lokomotywa trakcyjna napędzana nowoczesnymi silnikami z magnesami trwałymi”. Innowacyjne i bezpieczne maszyny i urządzenia dla górnictwa węgla kamiennego. Konferencja KOMTECH 2007.

[6]. Dokumentacja Instytutu Techniki Górniczej KOMAG, wykonana w ramach projektu badawczego rozwojowego nr N R01 0009 06 p.t. „Mechatroniczny układ napędowy do pojazdów szynowych przeznaczonych do pracy w atmosferze wybuchowej”. Materiały niepublikowane.

[7]. Bernatt J., Gawron S., Król E.: „Nowoczesne silniki z magnesami trwałymi do zastosowań trakcyjnych” MET 2009 - IX Międzynarodowa Konferencja "Modern Electric Traction - Nowoczesna Trakcja Elektryczna", Gdańsk, 24-26.09.2009. Materiały konferencyjne.