

Dionizy SANIAWA¹

EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA NAPĘDÓW TRAKCYJNYCH

W artykule przedstawiono sposoby zwiększania efektywności elektrycznych napędów trakcyjnych. Zwiększające się ceny energii elektrycznej i wymogi ochrony środowiska powodują, że przetwarzanie energii elektrycznej przez pojazd staje się zagadnieniem priorytetowym. Przedstawiono praktyczne metody zwiększenia efektywności. Dotyczą one stosowania: energooszczędnych silników elektrycznych, sterowania silnikiem dla osiągnięcia optymalnej sprawności w danych warunkach, rekuperacyjnego hamowania, strategii prowadzenia pojazdu na danym odcinku, optymalnych układów przeniesienia napędu. Podano rodzaje zmian w silniku dla ograniczenia jego strat.

ENERGETIC EFFECTIVENESS OF TRACTION DRIVES

Increasing prices of electrical energy along with environmental protection requirements cause that a conversion of an electrical energy by a vehicle is becoming a priority issue. In the article practical methods of traction drives effectiveness increase are presented. These methods concern: energy-efficient electrical motors, control of the motor in order to achieve optimal efficiency in given conditions, energy recuperating braking, strategy of a vehicle control on a given section, optimal system of drive transfer. Moreover, types of motor changes which decrease its losses are given.

1. WSTĘP

Współczesny napęd trakcyjny wykorzystuje przemienniki częstotliwości do regulacji prędkości obrotowej silników prądu zmiennego. Obecnie, najbardziej rozpowszechnionym jest napęd z silnikiem asynchronicznym klatkowym[1,2,3,4,5,6,7,8,9].

Efektywność przetwarzania energii w pojeździe zależy od wielu czynników, do których jako główne, należy zaliczyć:

- sprawność silnika,
- sterowanie pracą napędów,
- dobór silnika do napędu,
- sposób przeniesienia napędu,
- możliwość hamowania rekuperacyjnego.

¹Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki, d.saniawa@pr.radom.pl

2. SILNIKI O PODWYŻSZONEJ SPRAWNOŚCI

W celu podwyższenia sprawności silnika elektrycznego należy zmniejszać jego straty. Straty dzielimy na podstawowe i dodatkowe. Sposoby modyfikacji konstrukcji silników dla zmniejszenia ich strat, zostaną przedstawione na przykładzie silnika indukcyjnego klatkowego.

Na straty podstawowe składają się:

- straty prądowe w uzwojeniach stojana i wirnika,
- straty w obwodzie magnetycznym,
- straty mechaniczne.

Na straty dodatkowe składają się straty pulsacyjne i powierzchniowe. Pierwsze z nich powstają w wyniku zmian wzajemnego położenia zębów wirnika względem zębów stojana. Wskutek tego zmienia się ciągle przewodność magnetyczna, co z kolei powoduje zmiany wartości strumienia w zębach. Częstotliwość tych zmian (pulsacji) zależy od liczby żłobków. Straty powierzchniowe powstają na skutek schodkowego a nie sinusoidalnego kształtu pola oraz wywołane strumieniem rozproszenia straty w częściach konstrukcyjnych silnika i uzwojeniach stojana.

2.1 Straty w uzwojeniach stojana i wirnika

Zmniejszenie strat w uzwojeniach stojana jest możliwe poprzez zmniejszenie rezystancji uzwojeń.

Uzyskuje się to poprzez [8,10,11,12,13]:

- wzrost przekroju przewodów z których wykonane jest uzwojenie,
- zastosowanie przewodów o mniejszej rezystywności np. z miedzi modyfikowanej,
- zmniejszenie długości połączeń czołowych.

Aby przy tej samej liczbie zwojów zwiększyć przekrój przewodu, należy zwiększyć przekrój żłobka. Opracowywane są technologie pozwalające zwiększyć współczynnik wypełnienia żłobków np. wykorzystanie udarów prądowych przy maszynowym wciąganiu cewek do żłobków lub innej konstrukcji obwodu magnetycznego pozwalającej na układaniu prefabrykowanych cewek sprasowanych. Ostatni sposób jest możliwy przy wykonywaniu obwodu magnetycznego technologią proszkową (Soft Magnetic Composites). Modyfikacja kształtu żłobków lub konstrukcji obwodu magnetycznego wykonywana jest również ze względu na możliwość skrócenia połączeń czołowych.

Zmniejszenie rezystancji wirnika uzyskuje się przez [8,10,12,14]:

- zwiększenie przekroju żłobków (prętów) i pierścieni zwierających,
- zastosowanie miedzi do prętowania wirnika,
- zastąpienie klatki pojedynczej klatką podwójną.

Zmniejszenie rezystancji wirnika skutkuje wzrostem prądu i zmniejszeniem momentu rozruchowego.

2.2 Straty w obwodzie magnetycznym

Podstawowe straty w rdzeniu są dwójakiego rodzaju : na histerezę i na prądy wirowe. Zależą one od kwadratu indukcji magnetycznej w poszczególnych częściach obwodu, rodzaju materiału z którego wykonany jest obwód i częstotliwości zmian pola magnetycznego. W przypadku zasilania silnika z przemiennika częstotliwości pojawiają się straty w rdzeniu w wyniku występowania wyższych harmonicznych strumienia[15].

Zmniejszenie strat uzyskuje się w zasadzie dwoma drogami. Pierwsza to zmniejszenie indukcji magnetycznej w rdzeniu. Przy tym samym strumieniu zwiększenie przekroju rdzenia obniża wartość indukcji co prowadzi do redukcji strat. Zmienia to jednak wymiary i wagę silnika[10].

Druga to w przypadku wykonywania obwodu z blach zastosowanie blach o mniejszej grubości (ograniczenie prądów wirowych) i o mniejszej stratności przy dużej wartości indukcji magnetycznej.

Nowoczesne tendencje rozwojowe w inżynierii materiałów magnetycznych przebiegają trójtorowo. Opracowywane są technologie poprawiające własności konwencjonalnych blach elektrotechnicznych. Rezultatem tych badań są wysokokrzemowe blachy elektrotechniczne posiadające strukturę mikrokrystaliczną. Wzrost zawartości krzemu powoduje prawie dwukrotny wzrost rezystywności. Blachy te mają obniżoną indukcję nasycenia.

Tor drugi to prace nad nowymi jakościowo miękkimi materiałami -stopami o strukturze amorficznej i nanokrystalicznej. Dzięki własnościom magnetycznym oraz małej grubości taśm amorficznych straty w rdzeniu można ograniczyć nawet o ponad 70% w porównaniu z rdzeniami z konwencjonalnych blach elektrotechnicznych.

Trzeci tor to wykonywanie obwodów magnetycznych technologią proszkową- Soft Magnetic Composites[16,17,18,19,20].

2.3 Straty mechaniczne

Na straty mechaniczne składają się straty wentylacyjne i straty w wyniku tarcia w łożyskach. Właściwy dobór wielkości i rodzaju łożysk powinien spowodować zmniejszenie strat. Łożyska obciążone są nie tylko masą wirnika, ale również siłami naciągu magnetycznego wywołanymi przede wszystkim nierównomiernością szczeliny między wirnikiem a stojanem. Zwiększając dokładność wykonania (centryczność wirnika w otworze stojana) zmniejszamy straty w łożyskach. W silnikach w których zmniejszono straty, zmniejszają się wymagania dotyczące wentylacji. Optymalizując kształt i wymiary przewietrzników ograniczamy wentylacyjne straty mocy[10,11,12].

2.4 Zmniejszanie strat dodatkowych

Praktyczne metody zmniejszenia strat dodatkowych obciążeniowych związane są głównie z jakością procesu technologicznego. Ograniczenie niszczenia izolacji międzyblachowej, ograniczenie prądów między prętami wirnika a blachami obwodu magnetycznego (czasami wprowadza się izolacje prętów wirnika), zmniejsza straty.

Dyskutowana w literaturze możliwość optymalizacji szczeliny powietrznej ograniczona jest brakiem analitycznych zależności szacowania strat dodatkowych.

Zwiększenie szczeliny spowoduje zmniejszenie strat dodatkowych ale pogorszy współczynnik mocy co skutkuje zwiększeniem strat prądowych[10,12,13].

3. STEROWANIE PRACĄ NAPĘDÓW

3.1 Sterowanie napędem dla optymalizacji efektywności silnika

Podstawowy cel sterowania pracą napędów dla podwyższenia ich efektywności, to wybór takiego napięcia dla danego momentu i prędkości obrotowej aby uzyskać minimalizację strat w silniku. W silniku indukcyjnym straty w rdzeniu zależą od częstotliwości napięcia zasilającego i od nasycenia obwodu magnetycznego, a straty obciążenia proporcjonalne są do kwadratu wartości prądu. Aby sterować momentem silnika, kontroluje się iloczyn wartości strumienia magnetycznego i prądu. Przy małych częstotliwościach zwiększając strumień, zwiększa się wartość indukcji magnetycznej, a tym samym zwiększa się straty w żelazie. Wzrost tych strat może jednak być mniejszy niż zmniejszenie strat prądowych w wyniku zmniejszenia prądu, przy stałej wartości momentu obciążenia. Przy dużych prędkościach (dużych częstotliwościach napięcia zasilającego), zysk możemy osiągnąć zmniejszając wartość strumienia magnetycznego i zwiększając prąd pobierany przez silnik. Wzrosną straty ohmowe w silniku ale zmniejszenie strat w rdzeniu będzie większe i sprawność napędu może wzrosnąć[6,21,22,23].

W praktycznych zastosowaniach używane są dwa modele.

Pierwszy z nich opiera się o analizę strat dla każdego punktu pracy. Program bazuje na modelu strat silnika. Niestety modele strat budowane są na bazie założeń wprowadzających duże uproszczenia, które negatywnie wpływają na dokładność poszukiwanych parametrów zasilania[21,22].

Drugie podejście to stosowanie strategii poszukiwawczych. Zastosowany kontroler w czasie rzeczywistym, mierzy moc lub prąd pobierany przez napęd. Kontroler nadzoruje pracę przemiennika częstotliwości współpracującego z silnikiem. Układ taki dokonuje zmian napięcia zasilającego aż moc lub prąd stojana osiąga minimum[21,23]. Strategie te nie wymagają znajomości parametrów silnika i jest to ich główna zaleta. Niestety są wrażliwe na chwilowe zmiany obciążenia lub napięcia zasilającego oraz cechuje je długi czas dochodzenia do punktu pracy optymalnej.

Dla ograniczenia wad obu metod stosowana jest technika hybrydowa. Metodą bazującą na modelu określane są wstępne parametry regulacyjne a metodą poszukiwawczą uzyskuje się dostrojenie do minimalnej mocy pobieranej przez układ[23].

3.2 Sterowanie napędem trakcyjnym w stanach przejściowych

Przez odpowiednie planowanie przebiegu rozruchu, fazy jazdy ze stałą prędkością, wybiegu i hamowania, można uzyskać minimalizację zużycia energii. Opracowywane są algorytmy energooszczędnego przejazdu na podstawie profilu trasy, charakterystyk trakcyjnej i hamowania napędu, ograniczeń prędkości, wymaganego czasu przejazdu. Sposoby wyznaczania punktu pracy przy optymalnej sprawności, dotyczą głównie pracy ustalonej napędu. Ze względu na długi czas rozruchu niektórych napędów trakcyjnych (pociągi), optymalizuje się pracę układu napędowego w trakcie rozruchu. Proces rozruchu dzieli się na kilka przedziałów. Wybrany przedział rozruchu traktuje się jako stan ustalony i stosuje się procedury optymalizacyjne przygotowane dla pracy ustalonej[24,25,26,27].

4. DOBÓR SILNIKA DO NAPĘDU

Podstawowym warunkiem właściwego doboru, jest dopasowanie mocy silnika do wymagań napędu. Sprawność silnika niedociążonego jest niższa od sprawności znamionowej. Przeciętnie silnik powinien pracować z obciążeniem powyżej 60% jego mocy nominalnej, inaczej jego efektywność spada [28].

Napędy trakcyjne narzucają ostre wymagania. Dotyczą one momentu maksymalnego przy małej prędkości obrotowej, mocy znamionowej, zakresu regulacji prędkości obrotowej. Najczęściej wymagania te spełnia się, dla silnika indukcyjnego, dobierając liczbę par biegunów, moc znamionową silnika, przełożenie przekładni mechanicznej. Powszechnie spotykanym rozwiązaniem w napędach trakcyjnych, jest dobór takiego silnika, by jego moc znamionowa była dopasowana do średnich prędkości, z którymi pojazd porusza się najczęściej[6].

Specjalne wymagania związane z dużym momentem przy małej prędkości oraz z szerokim zakresem regulacji prędkości obrotowej (stosunek maksymalnej prędkości przy stałym momencie do maksymalnej prędkości przy stałej mocy 4-5), powodują najczęściej przewymiarowanie mocy silnika i przemiennika, co prowadzi do zwiększania kosztów inwestycyjnych i zmniejszenia efektywności pracy napędu. Problem ten można rozwiązać wprowadzając napędy z silnikami indukcyjnymi o zmiennej liczbie par biegunów[29].

5. SPOSÓB PRZENIESIENIA NAPĘDU

Klasyczne układy napędowe pojazdów trakcyjnych charakteryzują się różną prędkością obrotową koła i silnika elektrycznego. Przekazywanie momentu odbywa się za pomocą przekładni mechanicznej, redukującej prędkość obrotową silnika. Przekładnia powoduje obniżenie efektywności układu napędowego. Obecnie przekładnia z jedną redukcją prędkości jest potrzebna dla spełnienia wszystkich wymagań dotyczących mocy, momentu, prędkości w napędach z zaawansowanymi systemami sterowania silnikiem[29].

Straty mocy w czasie rozruchu mogą być zredukowane przez zmniejszenie momentu bezwładności układu napędowego. Można to uzyskać zwiększając liczbę mniejszych silników lub stosując maszyny o wydłużonym rotorze[13].

6. HAMOWANIE REKUPERACYJNE

Obecnie większość przekształtników trakcyjnych ma potencjalną możliwość hamowania rekuperacyjnego. Hamowanie odzyskowe jest jednak możliwe tam gdzie istnieją warunki odbioru lub magazynowania odzyskanej energii hamowania. Warunki takie stwarza inny pojazd na tym samym odcinku sieci, zasobnik energii zainstalowany w podstacji sieci trakcyjnej lub na pojeździe, albo odpowiednia struktura podstacji, umożliwiająca przepływ energii w obu kierunkach. Zasobnikami energii mogą być np.: układy z masami wirującymi, superkondensatory lub baterie chemiczne. Na rynku pojawiają się coraz nowsze układy zasobnikowe, wśród nich w przyszłości największą rolę odgrywały będą: baterie chemiczne (litowo jonowa, sodowo siarkowa, kwasowo ołowiowa), ogniwa paliwowe, koła zamachowe i cewki nadprzewodzące. Zasobniki te są w stanie reagować na szybkie zmiany mocy produkowanej.

Postęp w tym obszarze związany jest z koniecznością stabilizacji współpracy elektrowni energii odnawialnych z systemem elektroenergetycznym (głównie elektrowniami wiatrowymi) [2,30,31,32].

Możliwość wykorzystania energii hamowania pozwala zmniejszyć zużycie energii o 20 - 30% w stosunku do przejazdów bez zwrotów energii[30].

7. PRZEWIDYWANE KIERUNKI ROZWOJU NAPĘDÓW TRAKCYJNYCH

Od początku istnienia trakcji elektrycznej poszukiwano rozwiązań pozwalających na realizację bezpośredniego napędu elektrycznego. Zastosowanie silników synchronicznych z magnesami trwałymi umożliwia uzyskanie takiego napędu (możliwość zastosowania silników z dużą liczbą par biegunów). Zwiększy to efektywność układu napędowego o straty w przekładni mechanicznej. Efektywność silników synchronicznych jest wyższa w porównaniu z silnikiem asynchronicznym ze względu na straty mocy w rotorze, związanych z poślizgiem, co jest istotne przy małych prędkościach kątowych. Konstrukcja silników z zewnętrznym wirnikiem umożliwia zwiększenie momentu silnika. Wadą jest jednak wyższa cena silnika[5,33,34,35,36,37].

Stosowanie trójpoziomowych falowników z elementami o większej liczbie łączy ogranicza zawartość wyższych harmonicznych w napięciu podawanym na silnik, a tym samym zmniejsza momenty pasożytnicze w silniku. Ograniczenie zawartości wyższych harmonicznych ma również wpływ na zmniejszenie strat w rdzeniu jak i strat ohmowych w uzwojeniach.

8. PODSUMOWANIE

W najbliższej przyszłości należy oczekiwać postępu praktycznie w każdej zaprezentowanej metodzie zwiększania efektywności napędu trakcyjnego.

- Zwiększanie sprawności silników elektrycznych następować będzie w wyniku wdrażania nowych materiałów stosowanych w obwodach magnetycznych i na uzwojenia. Również optymalizowanie konstrukcji silnika (m.in. kształty żłobków, wielkość szczeliny, wymiary silnika), staranność wykonania, prowadzi do ograniczania strat. Należy oczekiwać szerszego wprowadzania do eksploatacji droższych ale bardziej efektywnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi.
- Algorytmy optymalizujące jazdę pojazdu na danym odcinku zawierają wpływ zakłóceń ruchu (takich jak: nieplanowane ograniczenia prędkości, niezamierzone postoje na trasie, zmiany napięcia w sieci trakcyjnej), co prowadzi do dalszych oszczędności energii.
- Nowe możliwości akumulowania energii elektrycznej zwiększą efektywność hamowania rekuperacyjnego pojazdów trakcyjnych (możliwość ciągłego odbioru energii, wykorzystanie szerszego zakresu prędkości z hamowaniem rekuperacyjnym). Należy oczekiwać powszechnego wdrażania hamowania rekuperacyjnego zarówno w nowych pojazdach jak też w pojazdach modernizowanych.
- Mimo wielu wysiłków nad zwiększeniem dokładności identyfikacji parametrów modelu matematycznego silnika, spodziewać się należy stosowania metody hybrydowej dla określania optymalnych parametrów pracy silnika.

- Możliwości silników synchronicznych z magnesami trwałymi umożliwią likwidację przekładni mechanicznych i innych elementów pośredniczących, powodując bezpośredni napęd koła przez silnik.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Januszewski S.: *Nowe rozwiązania konstrukcyjno - układowe elektrotrakcyjnych napędów kolejowych*, Wiadomości Elektrotechniczne Nr 6/2002.
- [2] Nagiwa Y., Ueno: *Advance in Drive Control Technology and Speeding Up of Shinkansen EMUs*, Japanese Railway Engineering No 149, 2002.
- [3] Naunin D.: *Electric Driver Systems for Electric Vehicles*, International Scientific Conference, "Energy Saving in Electrical Engineering", Warsaw University of Technology, Warsaw 2001.
- [4] Williamson S.S., Rajashekara K.: *Comprehensive Efficiency Modeling of Electric Traction Motor Drives for Hybrid Vehicle Propulsion Applications*, IEEE Trans.Veh. Technol., vol 56 No 4, July 2007.
- [5] Lipiński L., Miszewski M. Żarnowski R.: *Nowoczesne asynchroniczne napędy przekształtnikowe dla pasażerów pojazdów trakcyjnych na napięcie 3kV prądu stałego*, Wiadomości Elektrotechniczne Nr 6/2007.
- [6] Dembowski A , Chudzik P., Kobos W.: *Oslabianie strumienia magnetycznego w trakcyjnych silnikach indukcyjnych*, Zeszyty Problemowe –Maszyny Elektryczne Nr.80/2008.
- [7] Endo T.: *Development of AC train –Commuting/suburban –type train for the next generation*, Japanese Railway Engineering No 149, 2002.
- [8] Mecrow B.C., Jack A.G.: *Efficiency Trends in Electric Machines and Drives*, Energy Policy 36, 2008.
- [9] Dąbrowski J.: *Koncepcja napędu do przyszłych lokomotyw i wagonów silnikowych*, TTS Nr 10/1999.
- [10] Jakubiec M.: *Efektywność energetyczna silników indukcyjnych*, Wiadomości Elektrotechniczne Nr.6/1999.
- [11] Malinowski J., McCormick, Dunn K.: *Advances in Construction Techniques of AC Induction Motors : Preparation for Super –Premium Efficiency Levels*, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.40 No6, November/ December 2004.
- [12] Umans S.D.: *AC Induction Motor Efficiency*, Electrical Electronics Insulation Conference 1989 Chicago '89 EEIC Exposition.
- [13] Tripathy S.C.: *Energy Conservation with Efficient Electric Drives*, Energy Convers.Mgmt. Vol.36 No2, 1995.
- [14] Szczęsny D.: *Nowoczesne asynchroniczne silniki trakcyjne*, TTS Nr 12/1997.
- [15] Moses A.J. , Tutkun N.: *Localised losses in stator lamination of an induction motor under PWM excitation*, Journal of Materials Processing Technology 161/2005.
- [16] Johnson L.A., Bailey D.J., Cornel E.P., Hegyi S.M.: *Application of Low Loss Amorphous Metals in Motors and Transformers*, IEEE Trans. Power App. Syst., Vol PAS-101, No.7, July 1982.
- [17] Hultman L.O., Jack A.G.: *Soft Magnetic Composites –Materials and Application*, Electric Machines and Drives Conference 2003, IEMDC '03 IEEE International.
- [18] Najgebauer M ., Szczygłowski J.: *Nowoczesne tendencje rozwojowe w inżynierii materiałów magnetycznych*, Przegląd Elektrotechniczny Nr 4/2008.

- [19] Kolano R., Kolano –Burian A.: *Magnetyczne miękkie materiały amorficzne i nanokrystaliczne –nowa generacja materiałów dla elektrotechniki*, Przegląd Elektrotechniczny Nr.11/2002.
- [20] Jack A.G., Mecrow B.C., Dickinson P.G., Stephenson D., Burdess J.S., Fawcett N., Evans J.T.: *Permanent – Magnet Machines with Powdered Iron Cores and Prepressed Windings*, IEEE Trans. Ind. Applicatt., vol.36, No4, July/August 2000.
- [21] Kirschen D.S., Novotny D.W., Lipo T.A.: *Optimal Efficiency Control of an Induction Drive*, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.EC-2, No. 1,1987,
- [22] Lipiński L.: *Praktyczne metody regulacji trakcyjnych silników indukcyjnych optymalne pod względem energetycznym*, Zeszyty Problemowe –Maszyny Elektryczne Nr.78/2007.
- [23] Chakraborty C.,Hori Y.: *Fast Efficiency Optimization Techniques for the Indirect Vector –Controlled Induction Motor Drives*, IEEE Trans. Ind. Applicatt., vol.39, No4, July/August 2003.
- [24] Rawicki S.: *Nowoczesny system sterowania pojazdu tramwajowego przy minimum zużycia energii elektrycznej*, Zeszyty Problemowe –Maszyny Elektryczne Nr.73/2005.
- [25] Barbier C.E., Nogarede B., Meyer H.L.: *Global Control Strategy Optimization of an Asynchronous Drive System for an Electric Vehikle*, Control. Eng. Practice. Vol 4. No8, 1996.
- [26] Liu R.R., Golovitcher I.M.: *Energy – efficient operation of rail vehicles*, Transportation Research Part A 37/2003.
- [27] Wnuk M.: *Wyznaczanie parametrów optymalnych pojazdu trakcyjnego z silnikami asynchronicznymi*, MET’20015th International Conference –Modern Electric Traction in Regional and Urban Transport, Gdańsk 2001
- [28] Saidur R.: *A review on electrical motors energy use and energy savings*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009.
- [29] Osama M., Lipo T.A.: *A New Inverter Control Scheme for Induction Motor driver Requiring wide speed range*, IEEE Transaction On Industry Application, Vol. 38 No.4. July/August 1996.
- [30] Solarek T.: *Efektywność energetyczna hamowania z odzyskiem energii w ruchu tramwajowym*, TTS 11/2004.
- [31] Czucha J., Karwowski K., Mizan M., Pazdro P.: *Efektywność odzysku energii hamowania elektrodynamicznego w komunikacji miejskiej*, Przegląd Elektrotechniczny R.80 Nr 10/2004.
- [32] Dmowski A., Kłós M., Rosłaniec L.: *Przekształtniki energoelektroniczne w elektrowniach wiatrowych*, XII Międzynarodowa Konferencja „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”, Koźienice 24-25 marzec 2009.
- [33] Hisatomi K.: *Evolution of Pure Electric System to Medium –and High –Speed Ranges*, Japanese Railway Engineering No 149, 2002.
- [34] Kunz M., Horl F., Hauser A.: *Innovative Power Train Components for future Rail Vehicles*, IV International Conference MET’99 Warsaw 1999.
- [35] *Alstom Makes Advances in Traction Power*, International Railway Journal No. 4/2004.
- [36] Saniawa D.: *Trendy rozwojowe elektrycznych napędów trakcyjnych*, LogiTrans, Szczyrk 26-28 kwiecień 2006.

-
- [37] Dąbrowski J.: *Silnik synchroniczny jako napęd pojazdów*, Wiadomości elektrotechniczne Nr 4/1996.