

Janusz Biliński, Roman Frydrysiak, Emil Gmurczyk

Modernizacja systemu napędu elektrycznego zespołu trakcyjnego EN57 z zastosowaniem silników asynchronicznych

Elektryczne zespoły trakcyjne serii EN/EW/ED były zaprojektowane w większości przez Centralne Biuro Konstrukcyjne Przemysłu Taboru Kolejowego (późniejszy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Pojazdów Szynowych) w Poznaniu i wyprodukowane przez Fabrykę Wagonów „Pafawag” Wrocław. Przeznaczone były do obsługi ruchu aglomeracyjnego i podmiejskiego, ale często wykorzystywano je również dla realizacji ruchu regionalnego i międzyregionalnego. Obecnie zespoły są eksploatowane w większości przez PKP Przewozy Regionalne, spółki „Szybka Kolej Miejska” w Gdyni, „Szybka Kolej Miejska” w Warszawie oraz przez spółkę „Koleje Mazowieckie”.

Zdecydowana większość eksploatowanych zespołów jest w złym stanie technicznym, mimo że przez czterdzieści lat były one w większym lub mniejszym zakresie modernizowane i modyfikowane, a wyprodukowany tylko w jednej sztuce ponad dziesięć lat temu ED73 cechował się już nowoczesnymi – jak na tamte lata – rozwiązaniami krajowymi.

Dopiero od kilkunastu lat zaczęto w Polsce wdrażać program modernizacji zespołów EN57, EN71 oraz EW60. Program ten był realizowany przez największe zakłady taborowe w Polsce: „Pesa” Bydgoszcz, „Newag” Nowy Sącz i Zakłady Naprawcze Taboru Kolejowego „Mińsk Mazowiecki”. Cele, jakie przyświecały modernizacji, to zwiększenie komfortu pasażerów, poprawa parametrów eksploatacyjnych (zmniejszenie awaryjności, ułatwienie obsługi), spełnienie norm technicznych (w szerokim rozumieniu), przedłużenie okresu eksploatacji taboru pasażerskiego, optymalizacja kosztów obsługi i eksploatacji. Optymalnym okresem do przeprowadzenia modernizacji jest zwykle połowa planowanego całkowitego okresu „życia” taboru.

Modernizacjom podlegał także układ napędowy zespołów trakcyjnych. Od 2007 r. zmodernizowano lub podlega modernizacji w sumie 11 zespołów trakcyjnych, wykorzystujących układ chopperowy do sterowania silnikami trakcyjnymi. W ten sposób zostały zmodernizowane dwa zespoły trakcyjne EW60 (MEDCOM) i dziewięć zespołów EN57 (5 – MEDCOM, 4 – Instytut Elektrotechniki).

Następnym etapem jest modernizacja napędu z wykorzystaniem silnika asynchronicznego. Projekt ten został zainicjowany przez ZNTK Mińsk Mazowiecki we współpracy z firmami MEDCOM (falownik) i EMIT Żychlin (silnik trakcyjny). Zastosowanie napędu tego typu umożliwia wyeliminowanie najbardziej dotkliwego problemu polskich zespołów trakcyjnych – zbyt małej mo-

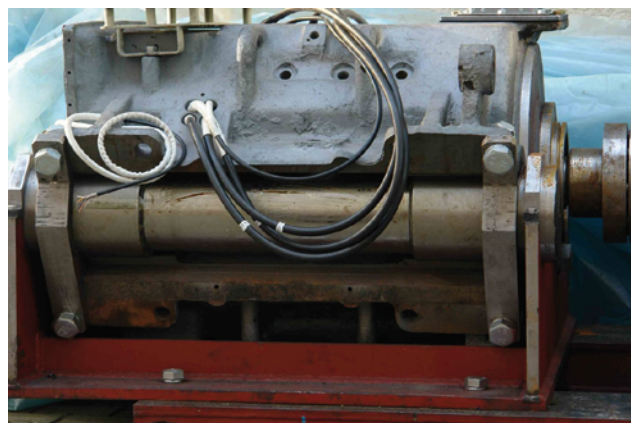
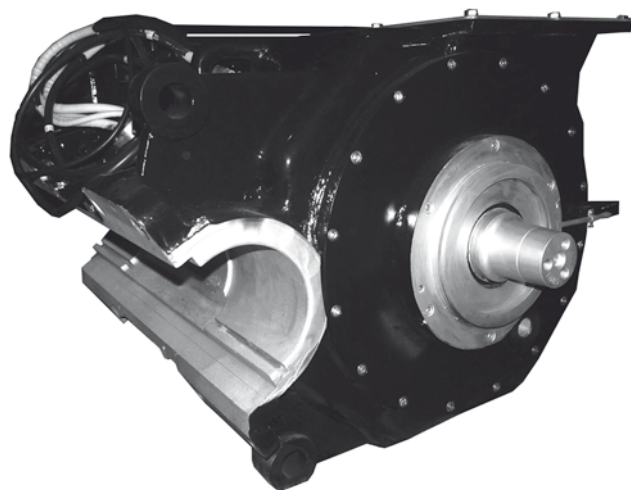
cy napędu, ograniczającej zarówno przyspieszenie rozruchu, jak i prędkość maksymalną. Parametry te zaczynają być problemem przy organizacji ruchu na zmodernizowanych do 160 km/h i znacznie obciążonych odcinkach linii głównych o ruchu mieszanym. Wprowadzenie silników prądu przemiennego umożliwi blisko dwukrotne zwiększenie mocy napędu, co może umożliwić uzyskiwanie przez EN57 prędkości do 120 km/h (ograniczonej konstrukcją mechaniczną wózka, a nie możliwościami napędu) oraz uzyskanie przyspieszenia rozruchu 1,0–1,2 m/s², porównywalnego z przyspieszeniami uzyskiwanymi w zespołach trakcyjnych nowej generacji. Niemniej ważne jest zastąpienie klasycznego rozruchu oporowego rozruchem częstotliwościowym, co w warunkach bardzo częstych zatrzymań w ruchu regionalnym – a szczególnie aglomeracyjnym – może przynieść znaczące oszczędności energii, szacowane na 30–40% mocy zużywanej aktualnie na cele trakcyjne zespołu. Układ falownikowy umożliwi zastosowanie hamowania odzyskowego i uzyskanie pełnej współpracy z systemem hamulca pneumatycznego (blending). System sterowania rozruchem i hamowaniem jest wyposażony w funkcje eliminacji poślizgu podczas rozruchu i hamowania, zapewniający optymalne warunki pracy. Dzięki temu uzyskuje się ograniczenie zużycia obręczy i klocków hamulcowych (zmniejszenie kosztów) oraz zauważalne obniżenie poziomu hałasu podczas hamowania, jak i zmniejszenie stopnia zanieczyszczenia torowisk opłatkami żelaznymi.

Modernizacja silnika trakcyjnego

Jako założenie wyjściowe przyjęto, że zmodernizowany asynchroniczny silnik trakcyjny zostanie zabudowany w kadłubie dotychczasowego silnika trakcyjnego prądu stałego typu LK-450. W rozwiązaniu pozostawiono dotychczasową przekładnię zębatą, jak też układ zawieszenia silnika trakcyjnego. Zmodernizowany silnik trakcyjny ma blisko dwukrotnie większą moc, przy czym gabaryty nie uległy zmianie. Wstępne obliczenia wytrzymałościowe przekładni trakcyjnej, wału silnika i ułożyskowania wskazują, że parametry mechaniczne konstrukcji spełniają normy bezpieczeństwa i wymagania niezawodności. Dodatkowym czynnikiem pozytywnym jest wyeliminowanie uderzeń mechanicznych działających od strony wału silnika na koła zębate, bowiem układ sterowania umożliwia płynną i bezstopniową regulację momentu i prędkości obrotowej w całym zakresie charakterystyki trakcyjnej. Dzięki takiemu rozwiązaniu będzie można zminimalizować zagadnienia związane z modernizacją przekładni, zawieszenia silnika trakcyjnego i w konsekwencji wózka napędowego. Silnik został wykonany w Zakładzie Maszyn Elektrycznych EMIT SA w Żychlinie i otrzy-

cych się w pakiecie blach wirnika. Na wale znajdują się również dwa labirynty wewnętrzne współpracujące z pokrywami wewnętrznymi łożysk od strony D i N, które służą do zabezpieczenia przed dostawaniem się smaru do wnętrza silnika. Stożkowy czop końcowy wału, od strony napędowej jest przystosowany do zamontowania małego koła zębatego współpracującego z dużym kołem zębatym, osadzonym na osi zestawu kołowego. Czop końcowy wału ma otwory, specjalny rowek i nacięcia umożliwiające ściąganie koła zębatego za pomocą pompy ciśnieniowej. Na drugim końcu wału od strony przeciwnapędowej jest zamocowana tarcza czujnika obrotów.

Tarcze łożyskowe konstrukcji spawanej są osadzone na zamkach i przykręcone śrubami do kadłuba. Konstrukcja tarcz zapew-



Rys. 2. Silnik asynchroniczny LK-450X6

nia okresowe uzupełnianie smaru łożysk dzięki zamontowanym smarowniczkom połączonym rurkami z piastą tarczy.

Tarcza od strony przeciwnapędowej ma izolowane gniazdo łożyskowe, które eliminuje szkodliwe działanie prądów łożyskowych. Zastosowanie izolowanej komory łożyskowej umożliwia zastosowanie standardowych, nie izolowanych łożysk, które są tańsze i łatwiej dostępne.

W silniku są zastosowane łożyska walcowe, w tym jedno łożysko ustalające od strony przeciwnapędowej z pierścieniem kątowym, umieszczone w izolowanym gnieździe tarczy łożyskowej. Są to łożyska o wysokiej wytrzymałości, smarowane smarami stałymi.

Silnik trakcyjny jest wyposażony w czujnik prędkości obrotowej i współpracuje z falownikiem zasilającym silnik. Generuje on sygnał wyjściowy w postaci przebiegu prostokątnego o częstotliwości proporcjonalnej do prędkości obrotowej wirnika.

Silnik został wyposażony w ekranowane termometry oporowe PT100, umieszczone w każdej fazie uzwojenia. Wyprowadzenia termometrów oporowych są podłączone do zacisków listwy zaciskowej, umieszczonej w pobliżu wylotu powietrza z silnika, a ekrany wyprowadzeń do zacisku uziomowego. Wyprowadzenia termometrów oporowych z gniazd tarcz łożyskowych podłączone są do listw zaciskowych umieszczonych na tarczach łożyskowych i służą jedynie do pomiaru temperatury w trakcie prób. Przekrój silnika przedstawiono na rysunku 3.

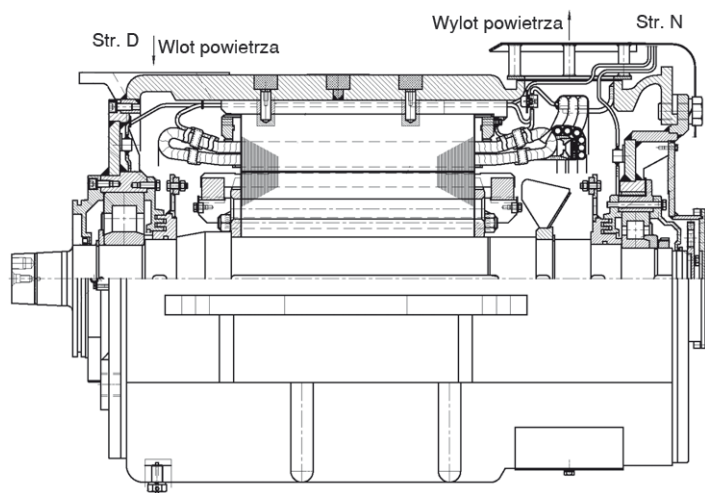
Pierwsze dwa prototypy przeszły pomyślnie próby typu, a uzyskane rzeczywiste parametry w kilku przypadkach były lepsze od zakładanych w założeniach projektowych.

Układ napędowy z falownikami HV IGBT

Falowniki FT-500-3000-UF do EN57 zostały wykonane w technologii HV IGBT 6,5 kV. Rezystory hamowania wykonane ze stali nierdzewnej gwarantują wysoką trwałość oraz niski poziom hałasu. Dzięki zastosowaniu wysokiej klasy drivera IGBT zapewniona została bezawaryjna praca przy zwarcjach w obwodzie wyjściowym falownika oraz eliminacja uszkodzeń wtórnych w następstwie awarii tranzystora. Falownik spełnia normy UIC oraz normy EN w zakresie bezpieczeństwa i kompatybilności elektromagnetycznej. Układ napędowy charakteryzuje się bardzo niskim poziomem zakłóceń niskoczęstotliwościowych generowanych do sieci trakcyjnej. Falownik pracuje poprawnie w zakresie temperatur od -40°C do $+50^{\circ}\text{C}$, a zastosowane wymuszone chłodzenie powietrzem (zamiast z czynnikiem cieczowym) zwiększa niezawodność i obniża koszty eksploatacji pojazdu. Wykonana z aluminium obudowa falownika (IP65) zapewnia odporność na wpływy atmosferyczne (deszcz, śnieg) oraz nasłonecznienie do 650 W/m^2 . Co ważne, obudowa falownika jest taka sama, jak obudowa stosowana do czoperów, co ujednotacza modernizacje pudel zespołów trakcyjnych (rys. 4).

W napędach średniego napięcia (3 kV DC) największym problemem przy projektowaniu napędu jest niska częstotliwość kluczowania, wysokonapięciowych łączników półprzewodnikowych (częstotliwość przełączania tranzystorów poniżej 1 kHz). Ograniczenie średniej częstotliwości łączeń uzyskano w układzie za pomocą modulatora typu *Bus-Clamping*. Synchronizacja modulatora ma na celu wyeliminowanie dudnień oraz ograniczenie poziomu występowania wyższych harmonicznych.

Schemat blokowy układu napędowego przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 3. Przekrój silnika asynchronicznego LK-450X6



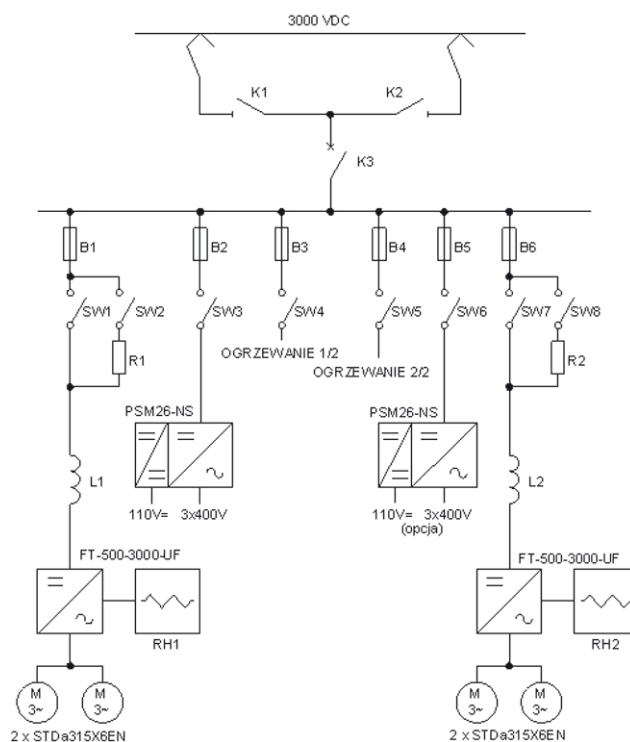
Rys. 4. Obudowa falownika FT-600-3000-UF

W systemie sterowania jest zastosowana metoda DFOC (*Digital Field Orientation Control*) z modulatorem SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*). Orientacja względem strumienia wirnika pozwoliła na całkowite odprężenie torów regulacji momentu i strumienia. Modyfikacja, polegająca na uzależnieniu zadawanego strumienia od zadawanego momentu, ma na celu ograniczenie strat. Układ jest przystosowany do współpracy z rejestratorem napięcia trakcji i parametrów falownika, który umożliwia odtworzenie warunków zasilania w przypadku zakłóceń w pracy lub podczas awarii układu napędowego. Planowane jest także wprowadzenie trybu pracy jazdy wielokrotnej z zespołami trakcyjnymi niezmodernizowanymi, by zapewnić wysoki poziom elastyczności konfiguracji eksploatacyjnej. Jest oczywiste, że w takiej konfiguracji nie są wykorzystywane możliwości zmodernizowanej jednostki.

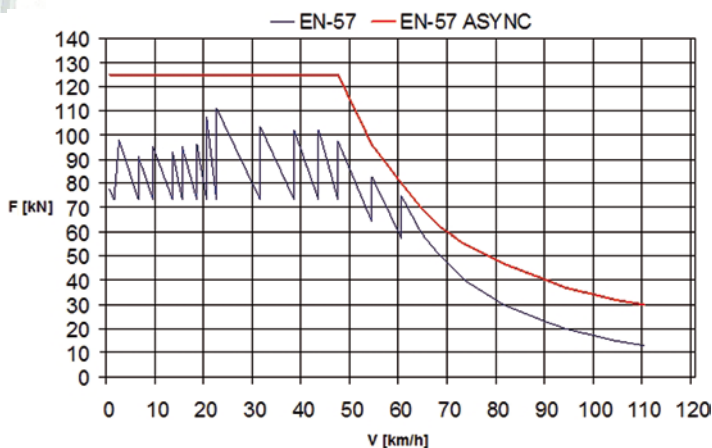
W tabeli 2 przedstawiono porównanie parametrów dotychczasowego napędu i napędu z silnikami asynchronicznymi, natomiast charakterystyki trakcyjne obydwu wariantów przedstawiono na rysunku 6.

Modernizacji będą podlegały także układ hamulca pneumatycznego oraz wyłęcznik szybki. Planowane jest zastosowanie nowej tablicy hamulca pneumatycznego, opracowanej przez IPSsz „Tabor” w Poznaniu i wyłęcznika szybkiego o odpowiedniej zdolności wyłęczania, na przykład opracowanego przez WOLTAN Łódź.

Po przeprowadzonej modernizacji każdy z elektrycznych zespołów trakcyjnych zostanie poddany odbiorom zgodnie z opracowanymi Warunkami Technicznymi Wykonania i Odbioru, a po odbyciu próbnych jazd fabrycznych przekazany do prób i badań stacjonarnych i ruchowych. Zakres prób i badań będzie dotyczył przede wszystkim sprawdzenia układów oraz urządzeń decydują-



Rys. 5. Schemat blokowy układu napędowego



Rys. 6. Porównanie charakterystyk trakcyjnych dotychczasowego napędu i napędu z silnikami asynchronicznymi

cych o bezpieczeństwie ruchu i bezpieczeństwie przewożonych pasażerów, wymagane do uzyskania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu pojazdu kolejowego, tj. badania:

- układów sterowania,
- układów hamulca,
- spokojności biegu pojazdu (do oceny możliwości zwiększenia prędkości maksymalnej zespołu trakcyjnego)
- kompatybilności elektromagnetycznej,
- właściwości akustycznych (hałasu wewnętrznego i zewnętrznego),
- właściwości trakcyjnych i gęstości pola magnetycznego.

Do uzyskania pełnej informacji o właściwościach nowego układu napędowego w zakresie nastaw, współpracy z układem hamulcowym, układami sterowania jest planowana eksploatacja nadzorowana w okresie od 3 do 6 miesięcy.

Tabela 2

Porównanie parametrów dotychczasowego napędu i napędu z silnikami asynchronicznymi

	EN57	EN57-Async
Lata produkcji/modernizacji	1961–1990	2008–2014
Układ osi	2'2'+Bo'Bo'+2'2'	2'2'+Bo'Bo'+2'2'
Napięcie zasilania [V]	3000 DC	3000 DC
Prędkość maksymalna [km/h]	110	110 (120)
Masa całkowita [t]	125	125
Moc ciągła [kW]	608	1000
Moc godzinna [kW]	740	1200
Maksymalna siła pociągowa [kN]	98 (wielk. szczytowa)	125
Typ rozruchu	oporowy	częstotliwościowy
Typ silnika trakcyjnego	LK450	LK-450X6
Przekładnia	70:19	70:19
Liczba silników trakcyjnych	4	4
Typ hamulca	Oerlikon	IPSZ
Producent	Pařawag	Przetarg
Liczba sztuk	1429	Do realizacji

Podsumowanie

Zmodernizowanie układu napędowego w elektrycznych zespołach trakcyjnych serii EN/ED/EW poprzez zastosowanie układów napędowych prądu przemiennego z hamowaniem elektrodynamicznym (wraz z jego współpracą z hamowaniem pneumatycznym), to nowość zrealizowana w krajowych zespołach trakcyjnych, dająca możliwość wykorzystania charakterystyk trakcyjnych w pełnym zakresie realizowanych prędkości. Istotnie nowatorskie jest w przypadku przedstawionej modernizacji założenie umieszczenia właściwego silnika AC (uzwojeń i pakietów blach magnetycznych) w zmodyfikowanej obudowie dotychczasowego silnika komutatorowego, co bardzo upraszcza modernizację części mechanicznej napędu. Jednak zasadnicze korzyści wynikające z modernizacji to:

- mniejsze koszty eksploatacji,
- mniejsze zużycie energii elektrycznej (rozruch, rekuperacja),
- mniejsze zużycie obręczy i klocków hamulcowych (hamowanie elektrodynamiczne),
- mniejsze koszty utrzymania (silniki bezkomutatorowe, brak elementów mechanicznych w obwodach rozrządu),
- większa niezawodność (silniki asynchroniczne),
- lepsze parametry trakcyjne i wyższy komfort jazdy (moc, przyspieszenie),
- zmniejszenie kosztów napraw rewizyjnych pozostałych eźt (odzysk części).

Przedstawione efekty mają charakter korzyści społecznych, których skala – przy masowym upowszechnieniu omawianego rozwiązania – będzie ekonomicznie znacząca. Modernizacja taboru jako proces umożliwia poprawienie istotnych parametrów technicznych znacznie szybciej i przy mniejszych nakładach niż zakupu nowego taboru. W procesie eksploatacji wymiana taboru na nowy i modernizacja taboru już eksploatowanego powinny być

realizowane równolegle. Pierwszy przetarg na wykonanie naprawy głównej 10 eźt EN57 z zastosowaniem napędu asynchronicznego ogłosiła spółka „Koleje Mazowieckie” pod koniec 2008 r. Można mieć nadzieję że tak przygotowana modernizacja nie zakończy się na niewielkiej liczbie zespołów i będzie kontynuowana zarówno na zamówienie PKP „Przewozy Regionalne”, ale także dla spółek kolejowych powoływanych przez Urzędy Marszałkowskie. □

Literatura

- [1] Orłowska – Kowalska T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2003.
- [2] Holmes D. G., Lipo T. A.: *Pulse Width Modulation for Power Converters Principles and Practice*. John Wiley & Sons, Inc. 2003.
- [3] Holz J. Quan J., Schmitt G., Ponnt O., Rodrigez J., Newman P., Miranda H.: *Design of Fast and Robust Current Regulators for High Power Drives based on Complex State Vari-ables*. IEEE Trans. on Ind. App. Vol. 40 2004.
- [4] Baranecki A., Dziuba R., Kundera A., Niewiadomski M.: *Nowoczesne asynchroniczne napędy trakcyjne*. XI Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2004, Kraków-Zakopane 2004.
- [5] Narayanan G., Ranganathan V. T.: *Analytical Evaluation of Harmonic Distortion in PWM AC Drives Using the Notion of Stator Flux Ripple*. IEEE Trans. Power Electron., pp 466 – 474 vol. 20 No. 42, March 2005.
- [6] Gmurczyk E., Kundera A., Niewiadomski M., Płatek T.: *Nowoczesne asynchroniczne napędy pojazdów trakcyjnych*. Wiadomości Elektro-techniczne nr 09/2006.
- [7] Gmurczyk E., Kundera A., Niewiadomski M., Płatek T.: *Nowoczesne asynchroniczne napędy trakcyjne w technologii IGBT*. Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej, nr 1-E / 2007.
- [8] Biliński J., Marciniak Z.: *Modernizacja krajowych elektrycznych zespołów trakcyjnych do obsługi ruchu aglomeracyjnego i podmiejskiego*. XVIII Konferencja Naukowa „Pojazdy Szynowe 2008”, Katowice-Ustroń.
- [9] Biliński J., Gmurczyk E., Niewiadomski M.: *Asynchroniczny napęd do modernizowanej jednostki EN-57*. XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2008, Kraków-Zakopane 2008.
- [10] EMIT.: *Silnik indukcyjny trójfazowy trakcyjny do napędu jednostki elektrycznej EN57 LK-450X6 (250 kW)*. Dokumentacja techniczno-ruchowa. Żychlin, 2008.

Autorzy

Janusz Biliński – ZNTK „Mińsk Mazowiecki”

Roman Frydrysiak – EMIT Żychlin

Emil Gmurczyk – MEDCOM Warszawa