

Janusz Biliński, Sylwester Buta, Emil Gmurczyk, Jerzy Kaska

# Asynchroniczny napęd z hamowaniem odzyskowym do elektrycznych zespołów trakcyjnych serii EN57 i EN71

*Od kilkunastu lat jest wdrażany program modernizacji elektrycznych zespołów trakcyjnych serii EN57. Cele jakie przyświecają modernizacji to podniesienie komfortu pasażerów oraz parametrów eksploatacyjnych (zmniejszenie awaryjności, ułatwienie obsługi), spełnienie norm technicznych, przedłużenie okresu eksploatacji taboru pasażerskiego, optymalizacja kosztów obsługi i eksploatacji. Optymalnym okresem do przeprowadzenia modernizacji jest zwykle połowa planowanego całkowitego okresu „życia” taboru.*

W bieżącym roku są realizowane modernizacje napędu zespołów z wykorzystaniem silnika asynchronicznego, modernizacje wykonano dla spółek „Koleje Mazowieckie” – ezT EN57 AKM i „Szybka Kolej Miejska w Trójmieście” – ezT EN71 „SKM”. Zastosowanie napędu tego typu pozwala na wyeliminowanie najbardziej dotkliwego problemu zespołów trakcyjnych – zbyt małej mocy napędu, ograniczającej zarówno przyspieszenie rozruchu, jak i prędkość maksymalną. Parametry te zaczynają być problemem przy organizacji ruchu na liniach zmodernizowanych do 160 km/h i znacznie obciążonych odcinkach linii głównych o ruchu mieszanym. Wprowadzenie silników prądu przemiennego pozwoliło na blisko dwukrotne zwiększenie mocy napędu, co umożliwiło podniesienie prędkości maksymalnej EN57 AKM do 120 km/h (ograniczonej konstrukcją mechaniczną wózka, a nie możliwościami napędu), uzyskanie przyspieszenia rozruchu około 1,0–1,2 m/s<sup>2</sup> dla EN57 i około 1,4 m/s<sup>2</sup> dla EN71 oraz uzyskanie opóźnienia hamowania ok. 0,9 m/s<sup>2</sup>. Przyspieszenia te są porównywalne z wartościami przyspieszeń uzyskiwanych przez zespoły trakcyjne nowej generacji. Niemniej ważne jest zastąpienie klasycznego rozruchu rezystorowego rozruchem częstotliwościowym i hamowania z rekuperacją energii, co w warunkach bardzo częstych za-

trzymań w ruchu regionalnym – a szczególnie aglomeracyjnym – przynosi znaczące oszczędności energii, szacowane na 30÷40% mocy zużywanej na cele trakcyjne zespołu. Układ falownikowy umożliwia zastosowanie hamowania odzyskowego i uzyskanie pełnej współpracy z systemem hamulca pneumatycznego (blending). System sterowania jest wyposażony w funkcję eliminacji poślizgu podczas rozruchu i hamowania, zapewniającą ograniczenie zużycia obręczy i klocków hamulcowych (zmniejszenie kosztów oraz zmniejszenie stopnia zanieczyszczenia torowisk opitkami żelaznymi), jak i zauważalne obniżenie poziomu hałasu podczas hamowania.

Na początku projektu modernizacji zostały przyjęte określone założenia zakresu i efektów modernizacji. Założonymi celami modernizacji były:

- zwiększenie mocy i prędkości ezT,
- zwiększenie przyspieszenia rozruchowego,
- zmniejszenie zużycia energii,
- rekuperacja energii,
- brak zmian w konstrukcji wózka i przekładni mechanicznej,
- wysoka niezawodność napędu (silnika, falownika),
- zmniejszenie kosztów eksploatacji,
- wydłużenie przebiegów międzynaprawczych.

W efekcie prac projektowych powstał układ napędu asynchronicznego do EN57/EN71 z falownikami HV IGBT i silnikami prądu przemiennego.

## Układ napędowy z falownikami HV IGBT

Falowniki FT-500-3000-UF do EN57/EN71 zostały wykonane w technologii HV IGBT 6,5 kV. Schemat blokowy układu napędowego wagonu silnikowego przedstawiono na rysunku 2.

Napęd FT500-3000-UF umożliwia rozruch, jazdę z zadanym momentem, jazdę z zadaną prędkością (tempomat), wybieg oraz hamowanie pojazdu. Układ jest przystosowany do współpracy z rejestratorem napięcia trójfazowej trakcji i parametrów falownika, który pozwala na odtworzenie warunków zasilania w przypadku zakłóceń w pracy lub podczas awarii układu napędowego. Został także wprowadzony tryb pracy jazdy wielokrotnej, by zapewnić wysoki poziom elastyczności konfiguracji eksploatacyjnej. Parametry falownika przedstawiono w tabeli. Skrzynię falownika przedstawiono na rysunku 3.

## Silnik trakcyjny STDa 315 X6EN

Zmodernizowany elektryczny silnik trakcyjny prądu przemiennego STDa 315 X6EN produkcji EMIT Żychlin (rys. 4) – wyposażony w czujnik prędkości i czujnik temperatury – został umieszczony w zmodyfikowanym korpusie silnika trakcyjnego prądu stałego typu Lk-450. Asynchroniczny silnik trakcyjny ma dwukrotnie większą moc w porównaniu do silników prądu stałego – jego moc znamionowa wynosi 250 kW, natomiast moc godzinna 300 kW.



Rys. 1. Zmodernizowany zespół serii EN57 (AKM)



Tabela 1

**Parametry falownika FT500-3000-UF**

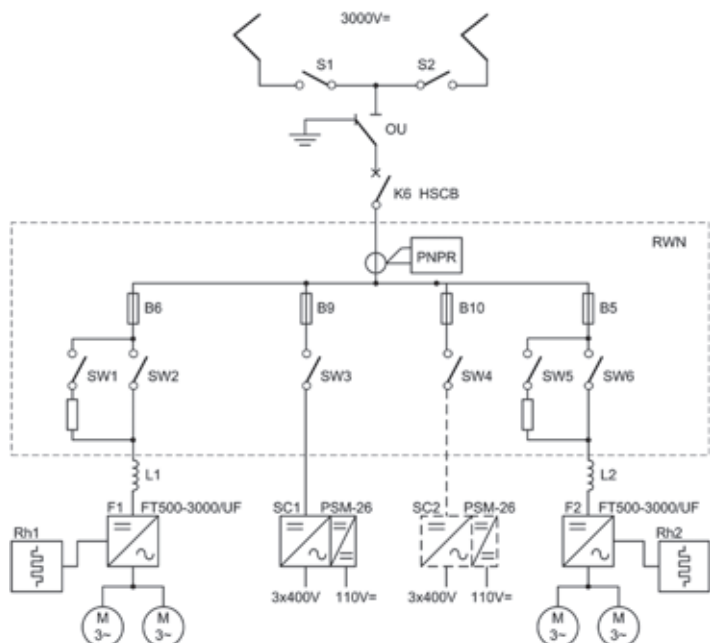
Napięcie wejściowe	3000 V DC (2000 ÷ 4000 V)
Prąd znamionowy	200 Arms
Maksymalny prąd wyjściowy	250 Arms
Moc znamionowa	500 kW
Częstotliwość	0 ÷ 160 Hz
Częstotliwość PWM	460 ÷ 1100 Hz
Wytrzymałość izolacji	10 kV
Temperatura otoczenia	-30°C do +40°C
Chłodzenie	wymuszone powietrzne
Masa (bez dławików wejściowych)	ok. 450 kg
Wymiary szer. × gł. × wys.	1108 × 700 × 2050 mm

Silniki, falowniki trakcyjne oraz dławiki sieciowe są chłodzone powietrzem z wymuszeniem zewnętrznym. Rezystory hamowania są chłodzone obiegiem naturalnym.

**System sterowania TCMS**

System sterowania TCMS (*Train Control and Monitoring System*) zespołu trakcyjnego jest systemem wykorzystującym cyfrową





Rys. 2. Schemat blokowy układu napędowego w pojedynczym wagonie silnikowym HSCB – wyłącznik szybki, PNPR – przekaźnik nadmiarowo-różnicowo-prądowy, RWN – rozdzielnia wysokiego napięcia, F1, F2 – falownik trakcyjny, Rh1, Rh2 – rezystor hamowania, SC1, SC2 – przetwornica statyczna



Rys. 4. Silnik STDa 315 X6EN

Tabela 2

### Parametry silnika STDa 315 X6EN

Typ silnika	STDa 315 X6EN EMIT Żychlin	
Punkt pracy	S1	S2-1h
Moc znamionowa	$P_n$ 250 kW	300 kW
Prędkość znamionowa	$n_n$ 1000 obr/min	
Prędkość maksymalna	$n_{max}$ 2400 obr/min (120 Hz)	
Napięcie znamionowe	$U_n$ 2340 V	
Prąd znamionowy	$I_n$ 80 A	
Prąd rozruchowy maks.	$I_{max}$ 160 A	
Moment znamionowy	$M_n$ 2400 Nm (50 Hz)	
Moment maksymalny	$M_{max}$ 4400 Nm (50 Hz)	
Sprawność	$\eta$ 95%	
Stopień ochrony	IP22	
Temperatura otoczenia	$T_{amb}$ -30°C do +45°C	
Klasa izolacji	H (200°C)	



Rys. 3. Skrzynka falownika

magistralę danych CAN Open. Mikroprocesorowy system sterowania umożliwia:

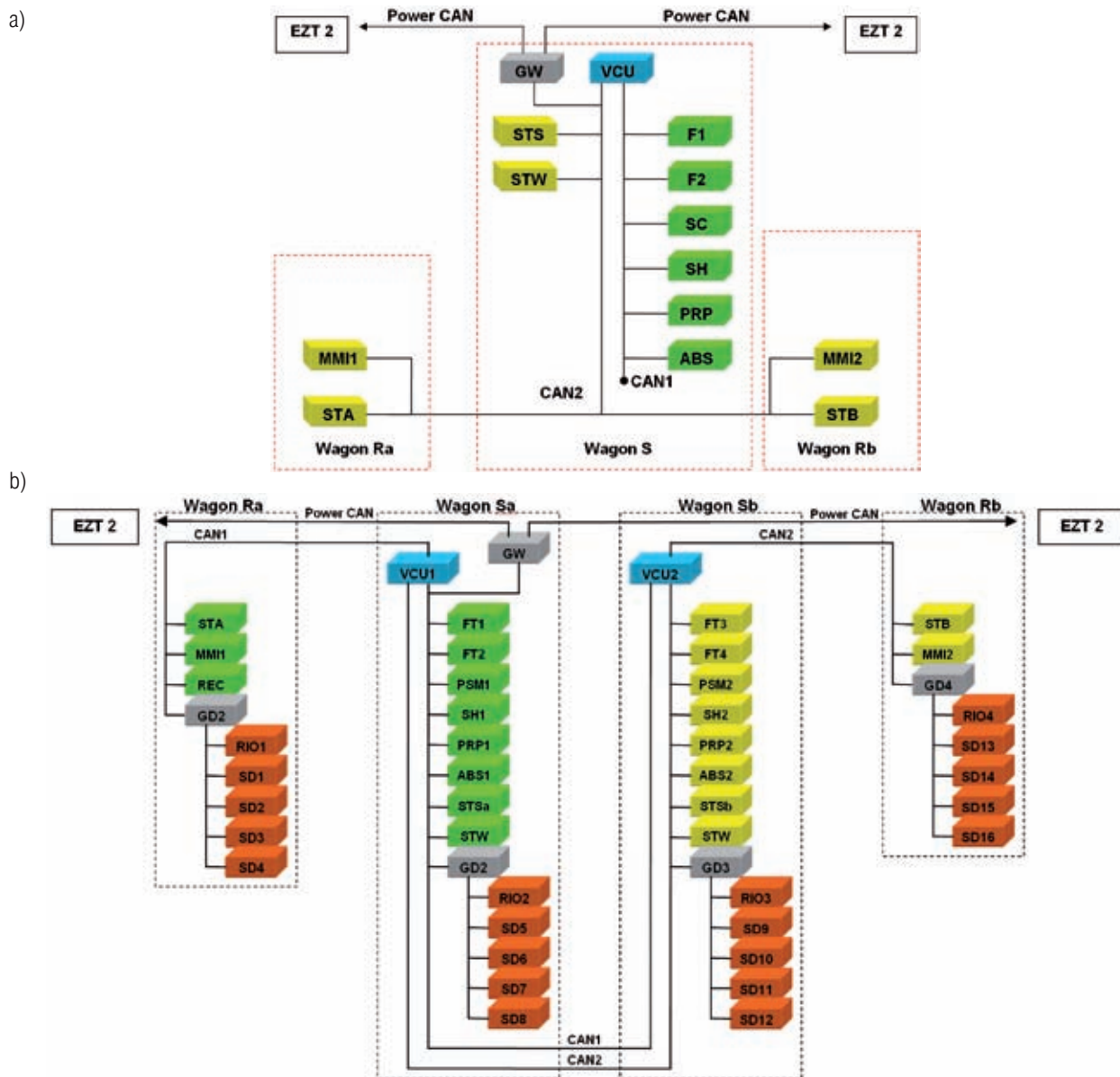
- sterowanie systemem napędowym (stabilizacją prędkości, hamowaniem ED, trakcją wielokrotną, eliminacją poślizgów),
- sterowanie zespołami ezł (przetwornicami, sprężarką, wyłącznikiem szybkim, stycznikami liniowymi),
- diagnozowanie i rejestrowanie stanu pracy,
- transmisję danych w systemie,
- integrację współpracujących systemów i urządzeń.

Sterowanie napędem jest realizowane poprzez sterownik nadrzędny, który wypracowuje sygnały momentu rozruchowego i hamującego dla napędu. Zadawanie momentu rozruchowego podczas normalnej jazdy realizuje maszynista, przemieszczając dźwignię zadajnika jazdy. Schemat blokowy systemu sterowania TCMS w EN57 AKM oraz EN71 „SKM” przedstawiono na rysunku 5.

Na rysunku 6 przedstawiono widok pulpitu maszynisty EN57 AKM. Na pulpicie znajduje się wyświetlacz maszynisty (panel sterowania), nastawnik jazdy i nastawnik hamulca.

### Rozruch i hamowanie pojazdu

Wychylenie dźwigni nastawnika jazdy do przodu powoduje rozpoczęcie jazdy. Wychylenie dźwigni jest możliwe po wcześniejszym wciśnięciu gałki na końcu dźwigni nastawnika. Stopień wychylenia dźwigni nastawnika sygnalizowany jest na terminalu i wskazuje na moment (prąd) rozruchowy z jakim następuje rozruch silników trakcyjnych. Układ sterowania napędem uwzględni korekcję momentu napędowego w przypadku poślizgu kół przy ruszaniu pojazdu oraz hamowaniu elektrodynamicznym. Sterownik przeciwoślizgu na podstawie sygnałów z czujników obrotów kontroluje różnice prędkości obrotowej wszystkich silników trakcyjnych. W przypadku poślizgu kół sterownik napędu, na podstawie infor-



Rys. 5. Schemat blokowy systemu sterowania TCMS: a) EN57 AKM, b) EN71 „SKM”

VCU – sterownik nadrzędny pojazdu, GW – sterownik magistrali wielokrotnej, FT – falownik trakcyjny, PSM – przetwornica statyczna, SH – sterownik hamulca, PRP – sterownik zabezpieczeń nadmiarowych, ABS – sterownik przeciwoślizgu, MMI – wyświetlacz maszynisty, STS, STW, STA, STB – sterowniki lokalne, REC – rejestrator pojazdu, GD – sterownik bramek drzwi, RIO – moduł I/O drzwi, SD – sterowniki lokalne drzwi

macji od sterownika przeciwoślizgu, zmniejsza wartość zadaną momentu napędowego (lub hamującego) dla silników trakcyjnych. Informacja o wystąpieniu poślizgu przesyłana jest również do sterownika nadrzędnego pojazdu, który zmniejsza wartość zadaną momentu dla układu sterowania napędem. Sterownik przeciwoślizgu na podstawie sygnałów z czujników obrotów oblicza przyspieszenie każdego silnika. Wzrost wartości przyspieszeń powyżej maksymalnej wartości świadczy o wystąpieniu poślizgu i prowadzi do zmniejszenia wartości zadanej momentu.

Informacje o stanie pojazdu są wyświetlane na wyświetlaczu maszynisty (panelu sterowania), którego ekran przedstawiono na rysunku 7.

Elektryczny zespół trakcyjny EN57 AKM i EN71 „SKM” zostały wyposażony w mikroprocesorowy system sterowania hamulcami, zaprojektowany i oprogramowany w Instytucie Pojazdów Szynowych TABOR. Układ umożliwia sterowanie następującymi hamulcami zespołu trakcyjnego:



Rys. 6. Pulpit maszynisty EM57 AKM

- hamulcem elektrodynamicznym (hamulcem ED) i jego współpracą z pozostałymi hamulcami zespołu,
- hamulcem elektropneumatycznym typu bezpośredniego (hamulcem EP-B),
- zespolonym hamulcem pneumatycznym (hamulcem PN),
- sprzężowym hamulcem postojowym (hamulcem SP).

W warunkach pełnej sprawności układu hamulcowego do wykonywania hamowań służbowych służą współpracujące ze sobą hamulce ED i EP-B. W razie niesprawności hamulca ED funkcję tę wykonuje samodzielnie hamulec EP-B. Hamulec PN pełni w zespole trakcyjnym funkcję hamulca podstawowego, gwarantującego bezpieczeństwo ruchu tego zespołu. Pozostając w stanie gotowości podczas jazdy zespołu, zapewnia on wymagany poziom bezpieczeństwa jazdy, gdyż wykorzystywany jest do wykonywania hamowań nagłych inicjowanych zarówno przez maszynistę, jak i przez pasażerów (za pośrednictwem hamulca bezpieczeństwa). Hamulec PN jest też uruchamiany na polecenie układów nadzorujących ruch pociągu (SHP, CA, radiostop) bądź samoczynnie, w razie braku reakcji maszynisty na awaryjną utratę szczelności przez przewód główny, czyli we wszystkich stanach awaryjnych. Ponadto hamulec PN umożliwia również realizację

hamowań służbowych w razie awarii hamulców ED i EP-B lub z wyboru maszynisty (na przykład do wykonania wymaganego odpowiednimi przepisami hamowania kontrolnego).

Hamowanie elektrodynamiczne (ED) działa w trzech obszarach: stałej mocy (określonej przez moc silników trakcyjnych), stałego momentu hamującego (przy prędkości powyżej 10 km/h) i blendingu – współpracy hamulca elektrodynamicznego i pneumatycznego w zakresie prędkości od 10 km/h do zatrzymania zespołu trakcyjnego. Maksymalne napięcie w sieci jezdnej podczas rekuperacji przy hamowaniu ED zostało ustalone na 3900 V – po osiągnięciu tej wartości napięcia energia jest tracona w rezystorze hamowania.

W przypadku wjazdu hamującego elektrodynamicznie zespołu na zwarty odcinek zasilania, następuje zadziałanie wyłącznika szybkiego, odłączającego zasilanie zespołu trakcyjnego.

System hamowania elektrodynamicznego jest objęty pokładowym systemem diagnostycznym. Maszynista ma możliwość uzyskania informacji o stanie systemu. Widok ekranu diagnostycznego hamulca na terminalu maszynisty przedstawiono na rysunku 8.

Maszynista otrzymuje informacje o zadanej sile hamowania na obwodzie koła jezdnego przez silniki pierwszego i drugiego wózka napędowego (Fzad1, Fzad2), opóźnieniu zadany za pomocą manipulatora hamulca (A\_MN), realizowanej sile hamowania na obwodzie koła jezdnego przez silniki pierwszego i drugiego wózka napędowego (Freal1, Freal2), rzeczywistej prędkości pojazdu (V\_poj) i rzeczywistym opóźnieniu pojazdu (A\_poj).

Dodatkowymi informacjami są informacje o załączeniu hamulca elektrodynamicznego, sygnalizacja zwiększonej masy wagonów z czujników ugięcia, gotowości hamulca ED wózków napędowych oraz sygnał o wystąpieniu poślizgu osi wózków napędowych.

### Parametry trakcyjne EN57 AKM i EN71 „SKM”

Zastosowanie asynchronicznego napędu trakcyjnego znacząco poprawiło parametry trakcyjne ezt – zwiększyła się prędkość maksymalna jazdy do 120 km/h oraz przyspieszenie rozruchu.

Charakterystyki trakcyjne EN57 AKM i EN71 „SKM” przedstawiono na rysunku 9.

Zestawienie tabelaryczne uzyskanych parametrów i efektów modernizacji przedstawiono w tabeli 3.

### Jazdy próbne

Po przeprowadzonej modernizacji, elektryczne zespoły trakcyjne przeszły pomyślnie testy stacjonarne i ruchowe. Zakres prób i badań obejmował przede wszystkim sprawdzenia układów oraz urządzeń decydujących 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.

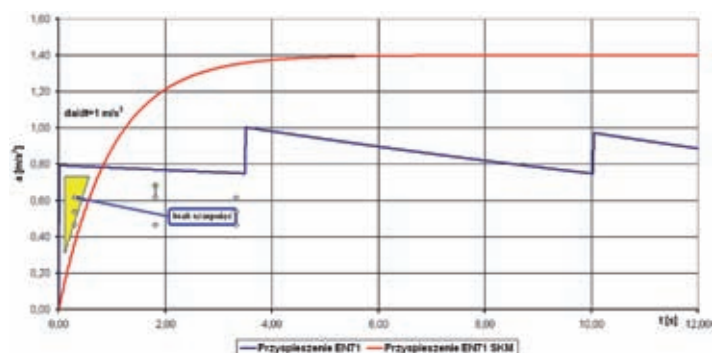
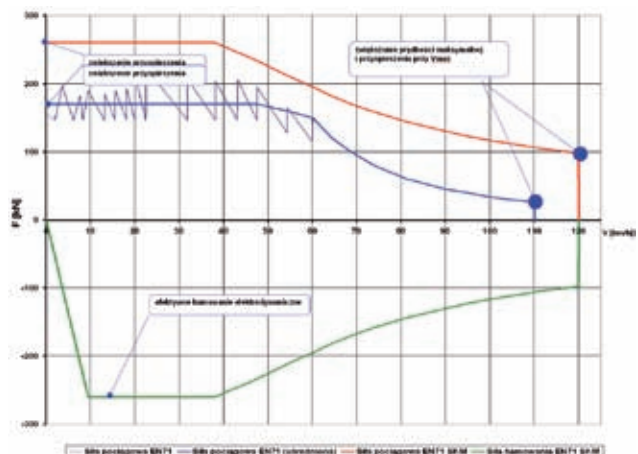
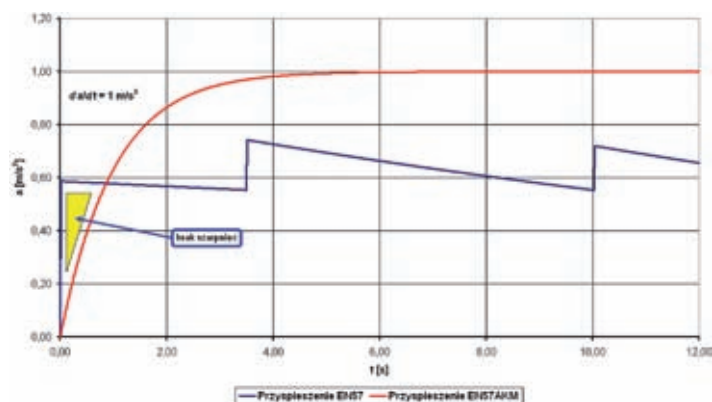
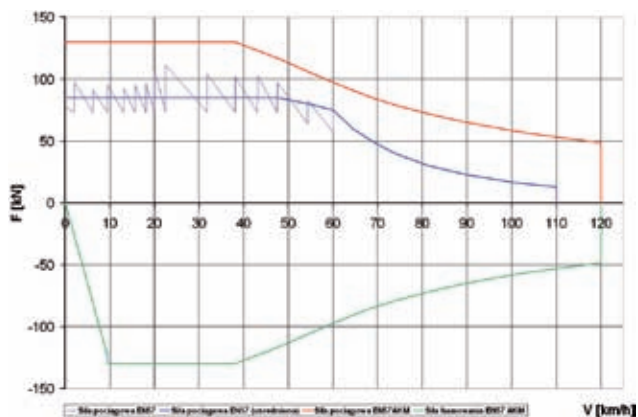


Rys. 7. Panel sterowania w kabinie maszynisty



Rys. 8. Ekran diagnostyczny sterownika hamulca na terminalu maszynisty





Rys. 9. Porównanie charakterystyk EN57 vs. EN57 AKM oraz EN71 vs. EN71 „SKM”

Badania właściwości jezdnych pozwoliły na zwiększenie prędkości maksymalnej EN57 AKM i EN71 „SKM” do 120 km/h.

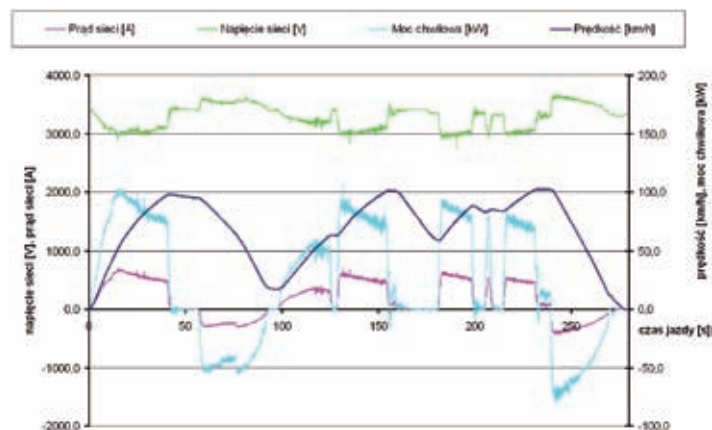
Podczas jazd próbnych dokonywano rejestracji parametrów systemu zasilania. Na kolejnych rysunkach przedstawiono wykresy wartości prądu i mocy falowników podczas przejazdu na odcinku Tarnów – Bochnia, zarejestrowane na pokładzie ezt EN57 AKM nr 1572.

Na rysunku 10 przedstawiono wartości napięcia sieci trakcyjnej, chwilowych wartości mocy pobieranej/rekuperowanej przez falowniki, chwilowych wartości prądu sieci pobieranego przez falowniki oraz prędkości jazdy w funkcji czasu. Celem próby było sprawdzenie funkcjonowania układów w czasie kolejnych cykli rozruch – hamowanie z wykorzystaniem hamowania ED i EP. Układ płynnie przełączał się z trybu napędowego w tryb hamowania odzyskowego.

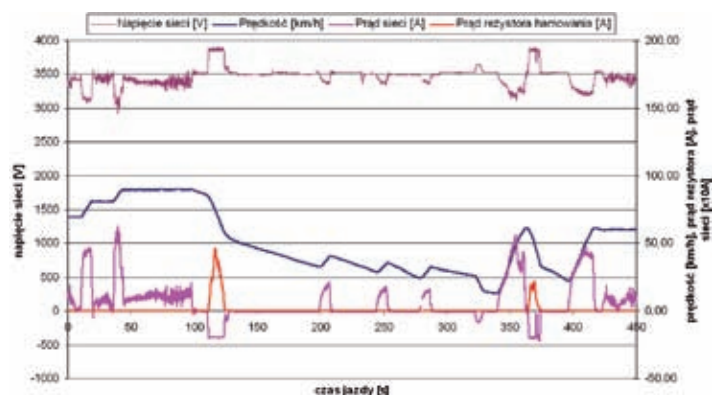
Rysunek 11 przedstawia wartości prądów i napięć podczas hamowania odzyskowego w sytuacji, gdy napięcie sieci jezdnej osiąga wartość maksymalną (3900 V) i następuje załączenie rezystora hamowania. Widać to podczas gwałtownego hamowania pod koniec drugiej i szóstej minuty jazdy, wówczas wartość prądu rezystora hamowania osiąga wartości wyższe niż wartość prądu zwracanego do sieci jezdnej.

**Podsumowanie**

Zmodernizowanie układu napędowego w elektrycznych zespołach trakcyjnych serii EN57 i EN71 poprzez zastosowanie układów napędowych prądu przemiennego z hamowaniem elektrodynamicznym (wraz z jego współpracą z hamowaniem pneumatycznym)



Rys. 10. Przebiegi zarejestrowane podczas jazd próbnych



Rys. 11. Przebiegi prądów i napięć podczas hamowania odzyskowego

## Zestawienie uzyskanych parametrów i efektów modernizacji

Parametry ogólne	EN57	EN57 AKM	EN71 „SKM”
Lata produkcji/modernizacji	1961 - 1993	2008 - 2014	2009 i następane
Układ osi	2'2' + Bo'Bo' + 2'2'	2'2' + Bo'Bo' + 2'2'	2'2' + Bo'Bo' + Bo'Bo' + 2'2'
Napięcie zasilania	3000 V DC	3000 V DC	3000 V DC
Prędkość maksymalna	110 km/h	120 km/h	120 km/h
Masa całkowita	125 t	125 t	182 t
Moc ciągła	608 kW	1000 kW	2000 kW
Moc godzinna	740 kW	1200 kW	2400 kW
Maksymalna siła pociągowa	98 kN (wartość średnia)	127 kN	256 kN
Przyspieszenie 0 ÷ 40 km/h	0,5 m/s <sup>2</sup>	1,0 m/s <sup>2</sup>	1,4 m/s <sup>2</sup>
Przyspieszenie przy Vmax	~0 m/s <sup>2</sup>	0,3 m/s <sup>2</sup>	0,6 m/s <sup>2</sup>
Czas rozpędzania do 100 km/h	120 s	42 s	30 s
Typ rozruchu	rezystorowy	IGBT VVVF	IGBT VVVF
Sterowanie rozruchem	wał kułakowy	mikroprocesorowe	mikroprocesorowe
Typ silnika trakcyjnego	LK450	STDa 315 X6EN	STDa 315 X6EN
Liczba silników trakcyjnych	4	4	8
Przetwornica główna	LKPa 330	PSM-26NS	2xPSM-26NS
Przekładnia	70:19	70:19	70:19
Typ hamulca	Oerlikon	IPS „Tabor”	IPS „Tabor”
Hamulec EP	✓	✓	✓
Hamulec ED	—	✓	✓
Hamowanie odzyskowe (ED)	—	✓	✓
Układ antypoślizgowy	—	✓	✓
Układ ograniczenia zrywu	—	✓	✓
Układ ograniczenia prędkości maksymalnej	—	✓	✓
Układ stabilizacji prędkości jazdy	—	✓	✓
Mikroprocesorowy układ diagnostyczny	—	✓	✓
Monitory LCD diagnostyczne	—	✓	✓
Zadajnik jazdy bezstopniowy	—	✓	✓
Pomiar energii zużytej i oddanej	—	✓	✓
Możliwość trakcji wielokrotnej	✓	✓	✓
Diagnostyka przy trakcji wielokrotnej	—	✓	✓
Mikroprocesorowy rejestrator zdarzeń	—	✓	✓

nym) to nowość zrealizowana w krajowych zespołach trakcyjnych, dająca możliwość wykorzystania charakterystyk trakcyjnych w pełnym zakresie prędkości jazdy. Jednak zasadnicze korzyści wynikające z zastosowania hamowania elektrodynamicznego to:

- lepsze parametry trakcyjne (moc, przyspieszenie),
- zmniejszenie zużycia energii elektrycznej,
- zwiększenie komfortu jazdy – płynne zmiany momentu (brak szarpnięć),
- zwiększenie prędkości maksymalnej,
- układ stabilizacji prędkości jazdy,
- hamowanie elektrodynamiczne (mniejsze zużycie klocków i obręczy),
- uproszczenie okablowania,
- zwiększenie niezawodności systemu sterowania ezt,
- wprowadzenie redundancji systemu sterowania,
- skrócenie czasu postoju w naprawie,
- zmniejszenie kosztów eksploatacji i napraw ezt dzięki wykorzystaniu diagnostyki pokładowej (integracja na poziomie zespołu).

Modernizacja taboru pozwala na poprawienie istotnych parametrów technicznych znacznie szybciej i przy mniejszych nakładach niż zakup nowego taboru. W procesie eksploatacji wymiana taboru na nowy i modernizacja taboru już eksploatowanego powinny być realizowane równolegle. Można mieć nadzieję, że tak przygotowana modernizacja nie będzie kontynuowana przez spółki kolejowe, eksploatujące EN57 i EN71, umożliwiając w sposób istotny podniesienie parametrów trakcyjnych elektrycznych zespołów trakcyjnych serii EN57 i EN71.

### Autorzy

dr inż. Janusz Biliński  
mgr inż. Sylwester Buta  
mgr inż. Emil Gmurczyk  
mgr inż. Jerzy Kaska  
MEDCOM Sp. z o.o.