

Falownikowy układ napędowy do nowych i modernizowanych tramwajów

W Polsce eksploatowanych jest ponad 2 tys. tramwajów 105N z klasycznym, oporowym układem regulacji prądu stałego, oraz ok. 150 tramwajów z impulsowym układem regulacji. Tramwaje z impulsowym układem regulacji (GTO) produkowane są przez Alstom Konstal z wyposażeniem elektrycznym produkowanym przez zakład WOLTAN i Instytut Elektrotechniki.

Kilkuletnia już eksploatacja tych tramwajów wykazała bardzo wysoką niezawodność pracy układów regulacyjnych – wskaźnik zjazdów ze wszystkich powodów mniejszy niż 0,2 na 10 tys. km oraz wysoka – około 0,95 gotowość ruchu. Znacznemu zmniejszeniu uległa również awaryjność sil-

ników trakcyjnych (w Warszawie na 500 tys. km uległy uszkodzeniu tylko 4 silniki).

Opracowany również przez Instytut Elektrotechniki tranzystorowy (IGBT) układ regulacyjny zastosowany został w modernizowanych tramwajach w Łodzi i Warszawie. Proponowane więc przez Instytut Elektrotechniki i WOLTAN nowoczesne układy regulacyjne prądu stałego mogą być stosowane zarówno w nowych, jak i w modernizowanych tramwajach, jednak ze względu na nasilający się trend stosowania w nowych tramwajach napędu z silnikami asynchronicznymi Instytut Elektrotechniki opracował, wykonał i zbadał falownikowy układ napędowy przeznaczony zarówno do nowych, jak i modernizowanych tramwajów.

Układ ten opracowany w ramach Projektu Celowego, współfinansowanego przez KBN i przy dobrej współpracy Tramwajów Warszawskich, został przebadany ruchowo w prototypowym tramwaju typu 105N z pozytywnym wynikiem.

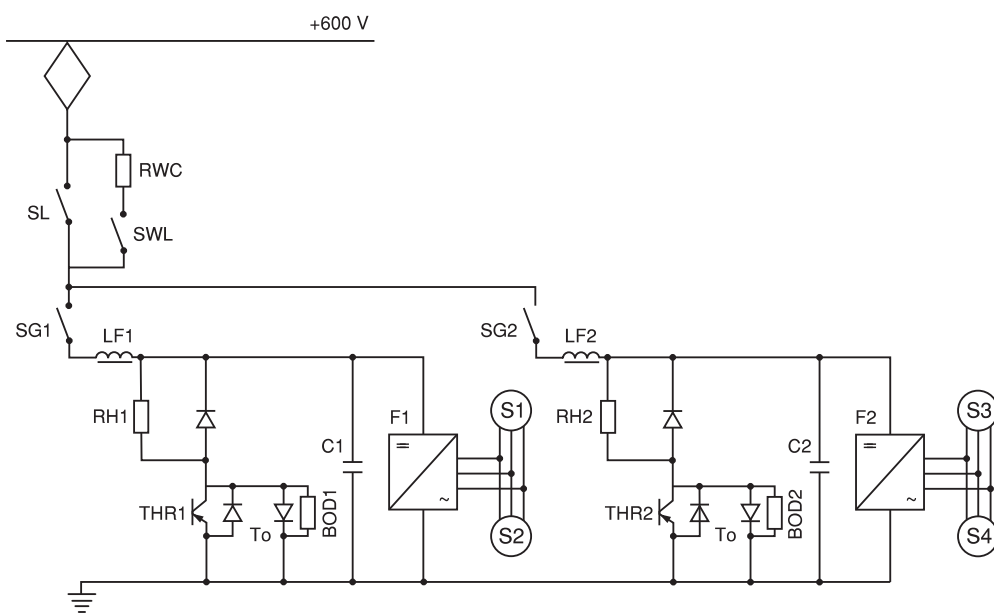
Obecnie w nowe układy falownikowe wyposażone są dwa tramwaje serii informacyjnej. Seryjna produkcja falownikowych układów napędowych będzie rozpoczęta od 2002 r.

Układ elektryczny tramwaju

Układ napędowy tramwajów składa się z czterech silników asynchronicznych (4×50 kW), dwóch niezależnych falowników IGBT, dwóch choperów hamowania oporowego, filtra sieciowego LC, układu zabezpieczeń nadnapięciowych, dwóch rezystorów hamowania, sterowników napędu oraz sterownika tramwaju.

Falowniki wraz z kondensatorami filtra i sterownikami napędu umieszczone są w skrzyni rozrusznikowej tramwaju, natomiast rezystory hamowania, dławiki filtra i aparatura stycznikowa w skrzyni aparatuwej.

oferty



Rys. 1. Schemat ideowy obwodu głównego tramwaju

SL - stycznik liniowy; SG1, SG2 - styczniki grup silników; LF1, LF2 - dławiki filtrów; THR1, THR2 - tranzystory hamowania oporowego; To - tyrystor ochronny; RH1, RH2 - rezystory hamowania; F1, F2 - falowniki; S1-S4 - silniki trakcyjne; SWŁ - stycznik wstępnego ładowania filtra

Tramwaj napędzany jest przez 4 silniki asynchroniczne (*S1–S4*) regulowane za pomocą dwóch falowników IGBT (*F1* i *F2*). Skrzynie falowników wyposażone są dodatkowo w kondensatory filtra (*C1* i *C2*), tranzystory hamowania oporowego (*THR*) oraz tyrystory ochronne *To* sterowane układem nadnapięciowym *BOD*.

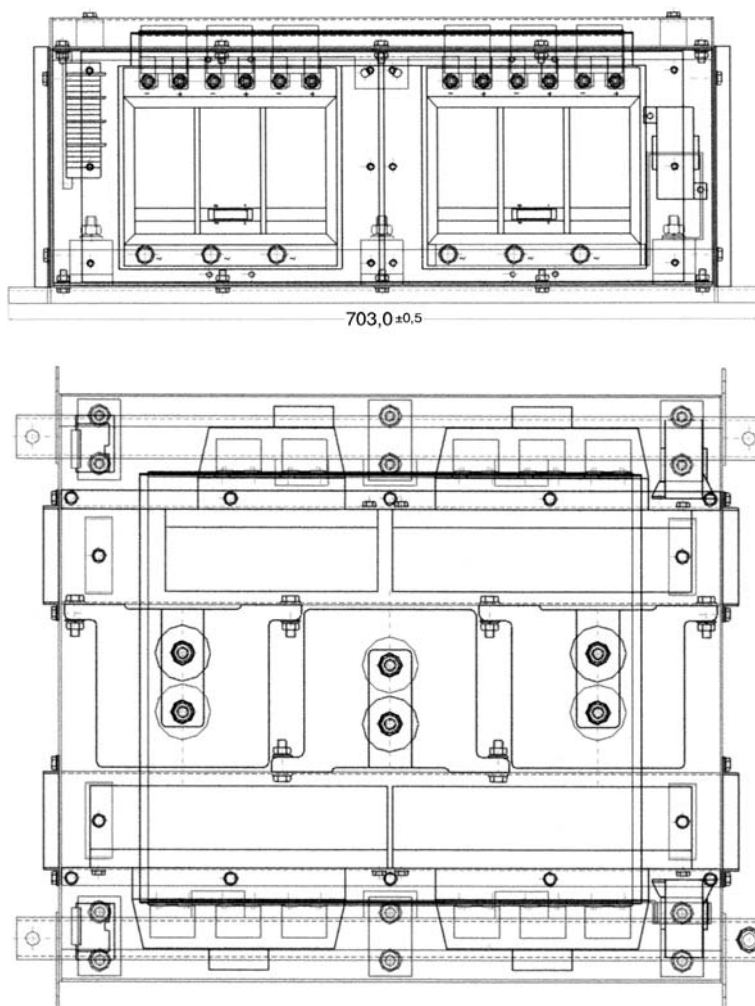
Układ napędowy tramwaju zasilany jest z sieci trakcyjnej poprzez wyłącznik główny *SL* i dławik filtra sieciowego *LF*.

Dwa niezależnie pracujące układy napędowe zasilane są poprzez styczniki *SG1* i *SG2*.

Układ tramwaju zaprojektowany jest tak, że możliwa jest jazda i hamowanie z pełnymi parametrami falownika przy odłączonej jednej grupie silników.

Dane techniczne falownika

Napięcie wejściowe	600+200 V
Prąd wejściowy	200 A
Maksymalny prąd fazowy	600 A
Częstotliwość kluczenia zaworów	1 kHz
Częstotliwość prądu fazowego	120 Hz
Rezystor hamowania	2 Ω
Chłodzenie	wymuszone
Zabezpieczenie od przepięć	



Rys. 2. Konstrukcja falowników

Uproszczony schemat blokowy układu napędowego tramwaju przedstawiono na rysunku 3. Przedstawiony układ dla jednego wózka tramwaju typu 105N steruje dwoma silnikami asynchronicznymi. W układzie tym wyróżnić można następujące podstawowe bloki:

- wejściowy obwód zasilający,
- tranzystorowy falownik napięcia,
- układ wytracania energii hamowania (UH),
- układ pomiaru napięcia zasilającego falownik (UF),
- układy pomiaru prądów wyjściowych falownika (IU, IV, IW),
- prądu zasilającego falownik (IF).

Tranzystorowy falownik napięcia składa się z trzech faz (MTU, MTV, MTW). Każda faza zbudowana została przy wykorzystaniu dwutranzystorowego, elektroizolowanego, inteligentnego modułu IGBT, umieszczonego na osobnym radiatorze. Do ochrony tranzystorów przed przepięciami, zastosowano przy każdym z modułów specjalne kondensatory odciążające. Moduły tranzystorowe mają wewnętrzne układy bezpośredniego sterowania i kontroli każdego tranzystora zasilane napięciem stałym +24 V z przetwornicy PZM. Wszystkie tranzystory falownika sterowane są sygnałami z płyty sterownika mikroprocesorowego (USMP) za pośrednictwem światłowodów. Również za pomocą światłowodów przesyłane są sygnały kontrolne w przypadku wadliwej pracy tranzystora. Prądy wyjściowe trzech faz falownika (IU, IV, IW) mierzone są przez układ pomiarowy z transduktorami LEM.

Układ hamowania (UH) przeznaczony jest do kontrolowanego wytracania na zewnętrznej rezystancji *RH* nadmiaru energii, która gromadzi się w kondensatorach filtra obwodu pośredniczącego w trakcie hamowania generatorowego silnika przy zbyt małym odbiorze tej energii przez sieć trakcyjną. Elementem wykonawczym tego układu jest dwutranzystorowy inteligentny moduł IGBT, wyposażony w blok kondensatorów odciążających.

Dodatkowym zabezpieczeniem przed przekroczeniem dopuszczalnego napięcia zasilającego falownik jest tyrystor *TY*. Włączany jest on za pomocą boda w przypadku przekroczenia napięcia 1000 V. Powoduje on ciągłe obciążenie kondensatorów w filtrze falownika rezystancją zewnętrzną hamowania *RH*. Prąd tyrystora wykrywany jest układem pomiaru z transduktorem LEM i sygnalizowany do centralnego sterownika, który poprzez odłączenie układu od sieci zasilającej wyłącza tyrystor.

Sterownik pojazdu

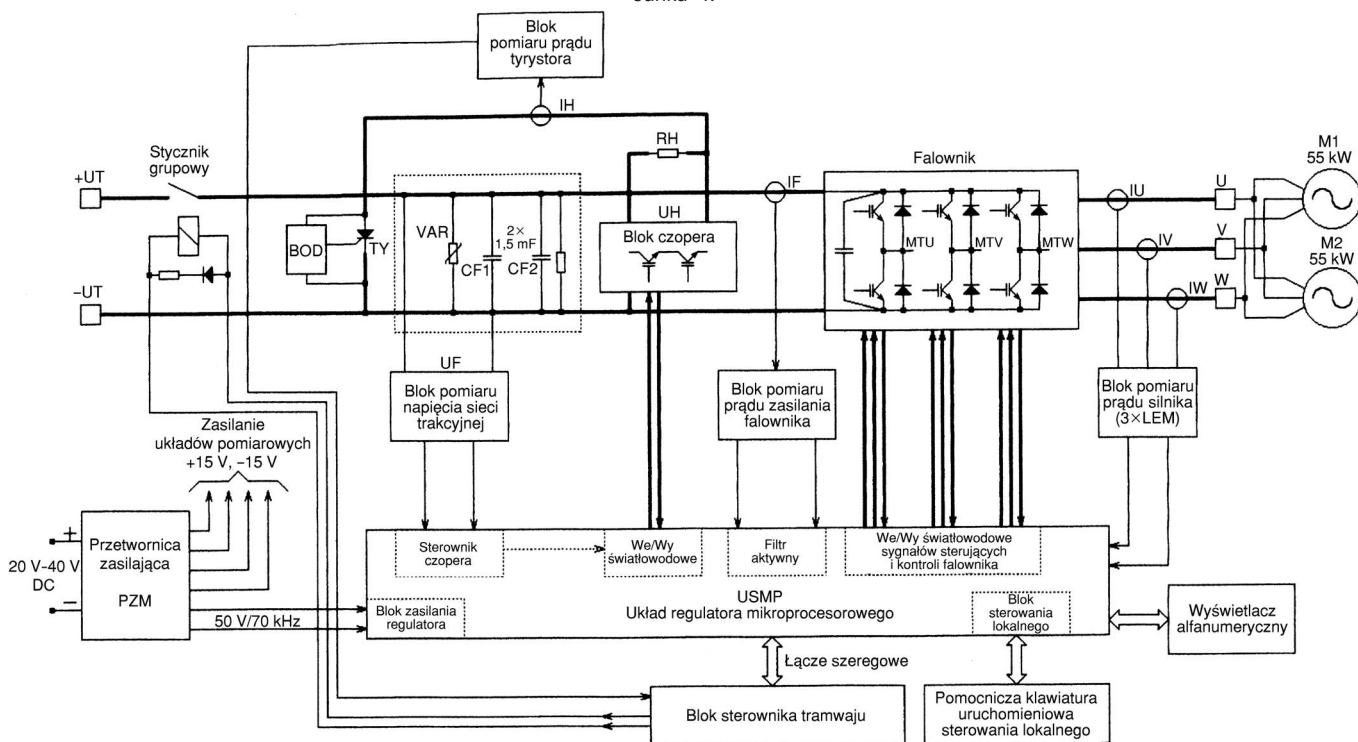
Dla projektowanego układu napędowego tramwaju z silnikami asynchronicznymi zastosowano układ sterowania o rozłożonej inteligencji. W strukturze sterowania wydzielono moduł sterownika pojazdu (STEP) kontrolujący obwody sterowania trakcyjnego i sterownik napędu (STEN) realizujący algorytm sterowania silnikami trakcyjnymi. Zadaniem sterownika pojazdu jest generowanie rozkazów sterujących pracą napędu na podstawie analizy stanu łączników obwodu sterowania trakcyjnego.

Sterownik pojazdu umieszczono na tablicy sterowania zamocowanej w szafie aparatu za motorniczym. Sterowniki napędu umieszczono w modułach falownika mocowanych pod wagonem. Komunikacja między sterownikami została zrealizowana za pomocą interfejsu RS485.

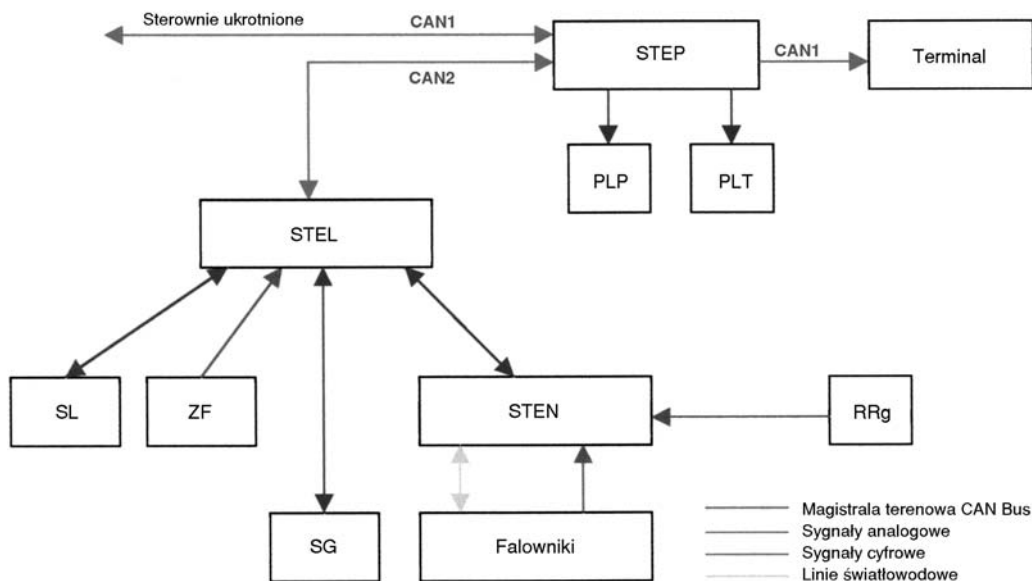
Sterowanie rozproszone tramwaju prototypowego

W układzie modelowym zastosowano modułowy sterownik mikroprocesorowy ze względu na łatwość rekonfiguracji

sprzętowej i programowej wymaganej na tym etapie prac. Jak wykazały badania układu, do budowy prototypu, zamiast sterownika modułowego o dużej mocy obliczeniowej, rozwiązaniem wystarczającym jest zastosowanie systemu PLC do obsługi sterowania trakcyjnego. Zaproponowano (sprawdzone w innych układach sterowania trakcyjnego) rozproszony system sterowania SELECONTROL® MASTraffic z zastosowaniem magistrali terenowej CAN Bus. Konfiguracja układu sterowania dla wersji prototypu przedstawiona jest na rysunku 4.



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy układu napędowego tramwaju



Rys. 4. Schemat blokowy układu sterowania

STEP - sterownik pojazdu; STEL - sterownik lokalny; STEN - sterownik napędu; SL - stycznik liniowy; SG - stycznik grup silników; ZF - zespół filtra wejściowego; PLP - pulpit przedni; PLT - pulpit tylni; RRg - zadajnik poziomu regulacji

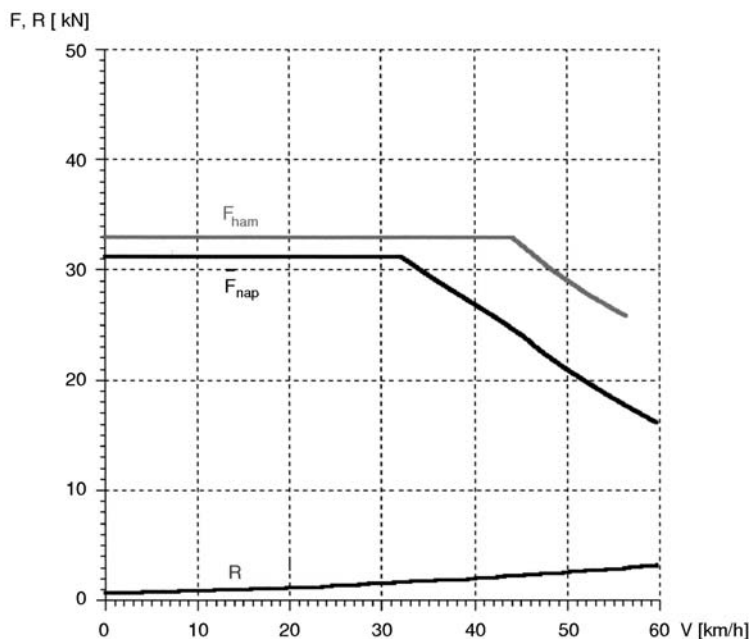
Dodatkowym blokiem sterowania jest sterownik lokalny STEL obsługujący transmisję (równoległą) ze sterownikiem STEN z analizą stanów awaryjnych i realizujący obsługę sprzętowo-programową zespołu filtra ZF i styczników grupowych (SG).

Komunikacja między sterownikiem STEP, STEL i terminalem motorniczego realizowana jest przez magistralę CAN1. Drugi tor transmisji CAN2 wykorzystany jest do sterowania ukrotnionego. Sygnał zadawania włączony jest bezpośrednio do sterownika STEN.

Silniki napędowe

Wstępne parametry projektowanego asynchronicznego silnika napędowego wyznaczono w oparciu o wymagania ruchowe stawiane tramwajowi typu 105N o ściśle określonych i nie przewidzianych do zmian wielkościach konstrukcyjnych, takich jak: masa, przełożenie przekładni, średnica koła itp. Założono, że silnik winien wpisywać się w dotychczasowy gabaryt i mieć konstrukcję mechaniczną umożliwiającą zabudowanie go w miejscu obecnie stosowanego silnika Lta 220.

Wynikiem wielowariantowych prac obliczeniowych, obejmujących dobór parametrów obwodu elektromagnetycznego maszyny, wyznaczenie charakterystyk obciążenia przy zasilaniu z falownika napięciem odkształconym i obliczenia trakcyjne, był projekt wstępny silnika. Projekt ten stanowił materiał wyjściowy do prowadzenia rozmów technicznych z potencjalnymi wykonawcami maszyn i po wytypowaniu wytwórcy stanowił podstawę do opracowania dokumentacji prototypu. Dokumentacja projektowa i techniczno-ruchowa wykonana została na zlecenie Instytutu Elektrotechniki w Zakładzie Wytwórczym Maszyn Elektrycznych i Transformatorów EMIT S.A. w Żychlinie.



Rys. 5. Charakterystyki trakcyjne
Tramwaj typ 105N2kf (26 Mg), zapełnienie 100%, silnik typu
STDa 200L4

Na podstawie wyników wykonanych przez producenta badań silnika prototypowego oraz prób przeprowadzonych w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki sprezyrowano parametry znamionowe silnika.

Parametry znamionowe silnika trakcyjnego

Typ	STDa 200L4
Moc	50 kW
Napięcie	3×380 V
Prąd	88 A
Częstotliwość	65 Hz
$\cos \varphi$	0,92
Prędkość obrotowa	1917 obr./min
Maksymalna prędkość obrotowa	4875 obr./min
Sprawność	0,94
Klasa izolacji	H
Masa	280 kg

Silnik indukcyjny trójfazowy jest budowy okapturzonej o stopniu ochrony wnętrza IP22, z wirnikiem klatkowym (pręty Cu), w wykonaniu dwułożyskowym, z mocowaniem za kadłub do wózka tramwaju. Uzwojenie stojana w izolacji klasy H z początkami faz uzwojenia wyprowadzonymi w postaci jednego kabla Opd 3×25 mm². Silnik jest wyposażony w czujnik temperatury PT 100 i czujnik do pomiaru prędkości wirowania.

Charakterystyki trakcyjne

Na rysunku 5 przedstawione są charakterystyki trakcyjne: siła napędowa F_{nap} i siła hamowania F_{ham} oraz opory ruchu R przy pochyleniu terenu 0‰ w funkcji prędkości tramwaju 105N o zapełnieniu 100%, a więc o masie 26 Mg.

Zastosowane w falownikowym układzie napędowym cztery silniki asynchroniczne typu STDa 200L4 o mocy 50 kW zapewniają korzystny przebieg wymienionych charakterystyk.

Maksymalna siła ruchowa – 31,2 kN zapewnia w przypadku tramwaju zapełnionego przyspieszenie 1,1 m/s² do prędkości 32 km/h, a przy prędkości 60 km/h występuje nadwyżka siły napędowej ok. 12 kN. Maksymalna siła hamowania $F_h = 33$ kN zapewnia opóźnienie hamowania o wartości ok. 1,25 m/s² od prędkości 44,0 km/h.

Na rysunku 6 przedstawiono teoretyczny przejazd tramwaju na odcinku 600 m, opisany charakterystykami prędkości – V , drogi – L i prądu pobieranego z serii I w funkcji czasu przejazdu.

Pojazd charakteryzuje się dobrymi parametrami, gdyż prędkość techniczna $V_t = 41,0$ km/h, a prędkość komunikacyjna, przy założonym postoju 15 s – $V_z = 32$ km/h. Jednostkowe zużycie energii wynosi 1,9 kWh/km.

Wnioski

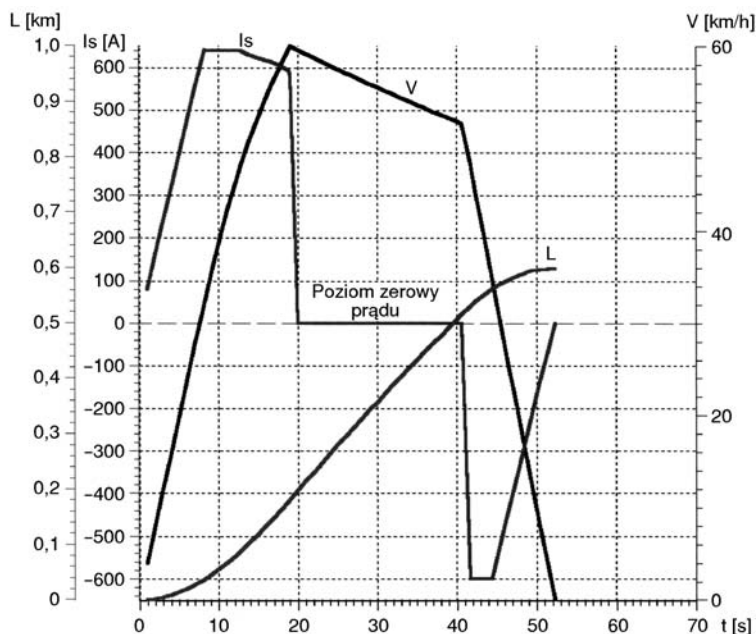
Opracowany przez Instytut Elektrotechniki falownikowy układ napędowy może być stosowany zarówno w nowych, jak i w modernizowanych tramwajach typu 105N i pochodnych: 805N, 102N, 803N. Konstrukcja falowników dostosowana jest do montażu w typowych skrzyniach rozrusznikowych. Silniki asynchroniczne są gabarytowo wymienne z silnikami LT-220 i przystosowane do montażu w istniejących wózkach.

Pozytywne wyniki badań tramwaju prototypowego pozwalają na uruchomienie produkcji seryjnej falownikowych układów napędowych. Produkcja silników AC została już wdrożona w Zakładzie EMIT w Żychlinie, natomiast sterowników napędu i tramwaju w Instytucie Elektrotechniki.

Proponowany falownikowy układ napędowy o mocy 200 kW może być również stosowany w tramwajach z niskopodłogowym wagonem doczepnym.

Przewidywany koszt falownikowego układu napędowego jest wyższy o ok. 20% niż dla napędów prądu stałego, głównie ze względu na konieczność zakupu nowych silników prądu przemiennego.

□ R-15/2001



Rys. 6. Charakterystyki $V, L, I = f(t)$

Tramwaj typ 105N2kf (26 Mg), załadowanie 100%, silnik typ STDa-200-L4, $V_t = 41$ km/h

Autor

prof. dr inż. Zygmunt Giziński

Instytut Elektrotechniki Zakład Trakcji Elektrycznej



Instytut Elektrotechniki

04-703 Warszawa, ul. M. Pożaryskiego 28
tel. (22) 812 00 21, fax (22) 615 75 35
e-mail: nte@iel.waw.pl



Woltan

Zakład Aparatury Elektrycznej Sp. z o.o.
90-5360 Łódź, ul. Gdańska 138
tel./fax (42) 636 14 03