

Piotr Chudzik, Andrzej Dębowski, Witold Kobos, Tomasz Lipicki, Grzegorz Lisowski, Janusz Szafran

Asynchroniczny napęd tramwajowy ze sterowaniem wektorowym – badania ruchowe (2)

*Artykuł jest kontynuacją opisu asynchronicznego napędu tramwajowego z klatkowymi silnikami indukcyjnymi z wektorowym sterowaniem momentu, zamieszczonego w **tts** 3/2004 [1]. Przedstawiono w nim zasadę działania oraz wyniki symulacji komputerowej napędu ENI-ZNAP produkcji Zakładu Elektroniki Przemysłowej ENIKA. W tej części artykułu zostaną przedstawione w skrócie rozwiązania konstrukcyjne podzespołów układu napędowego oraz parametry techniczne zarejestrowane podczas badań ruchowych tramwaju z tym napędem.*

Omawiany w tym artykule układ napędowy ENI-ZNAP został zabudowany w sierpniu 2004 r. w wagonie typu 805 nr 1416, użyczonym przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Łodzi. We współpracy z MPK Łódź oraz zespołem z Politechniki Łódzkiej w okresie od września 2003 do lutego 2004 r. zostały przeprowadzone próbne jazdy, w trakcie których testowano wszystkie możliwe stany pojazdu. Osiągnięcie wymaganych parametrów trakcyjnych przez badany tramwaj z tym rodzajem napędu zostało potwierdzone podczas badań homologacyjnych układu, wykonanych przez Instytut Gospodarki Przestrzennej i Mieszkalnictwa.

Poza próbami związanymi z uzyskaniem homologacji przeprowadzono specjalne badania, w czasie których przetestowano szereg wersji programów sterowania układem napędowym oraz kon-

figuracji połączeń obwodu głównego, przeznaczonych do zastosowań nie tylko w wagonach typu 105N. Dotyczyły one między innymi koordynacji hamulców: elektrodynamicznego, szynowego i szcękowego, a także doboru nastaw i dynamiki hamulca oporowego. Zbadano sposoby eliminacji poślizgu i blokowania zestawów kołowych podczas rozruchu i hamowania. Zbadano również wpływ nadmiernych różnic średnic zestawów kołowych w ramach jednego wózka na pracę napędu.

Zabudowa układu napędowego w wagonie

W wagonie nr 1416 wyposażonym w klasyczny układ rozruchu oporowego zdemontowano zbędne wyposażenie. W przestrzeni po rozruszniku oporowym GBT usunięto całkowicie dotychczasową aparaturę i zabudowano dwa falowniki typ ENI-F600/360/3H oraz dwa rezystory hamowania DTE-4 (rys. 1).

Wnęka jest zamykana pokrywą jak w rozwiązaniu dotychczasowym. Pomimo tego falowniki mają własne, szczelne obudowy chroniące ich wnętrza przed zanieczyszczeniami z powietrza chłodzącego radiatory i rezystory hamowania. Falowniki wyposażono w duże odejmowalne pokrywy pozwalające na wygodny dostęp do wszystkich podzespołów. Połączenia elektryczne falowników (silnoprądowe i sterujące) zrealizowano przy użyciu złączy wielostykowych, co bardzo upraszcza montaż i obsługę serwisową. Zasilanie obwodów pomocniczych, chłodzenie silników trakcyjnych oraz falowników i rezystorów hamowania zapewnia przetwornica statyczna typ ENI-PT600/40/W, umieszczona w przestrzeni po zdemontowanej przetwornicy wirującej PT-44a. W skrzyni aparatuwej zdemontowano całkowicie istniejącą aparaturę WN, pozostawiając jedynie zmodyfikowaną tablicę sterowania hamulcami szynowymi i szcękowymi oraz ogrzewania. W dostępnej przestrzeni zabudowano obwód wejściowy typ ENI-OWE/200, zawierający układ wstępnego ładowania filtra, dwa dławiki filtra, czujniki pomiaru napięcia i prądu tramwaju oraz dwa styczniki (rys. 2). W tak zabudowanej skrzyni aparatuwej pozostało dużo wolnej przestrzeni, co pozwala bądź na montaż aparatury przeniesionej z np. szafy aparatuwej bądź na zmniejszenie gabarytów samej skrzyni.

Sterownik napędu typ ENI-SNT-1 przeznaczony jest do zabudowy w szafie aparatuwej z tyłu motorniczego. Jest to możliwe, dzięki wyeliminowaniu znacznej części aparatury stykowej, która się tam znajdowała. Cztery asynchroniczne silniki trakcyjne typu STDa 200L4 produkcji EMIT Żychlin o mocy 50kW każdy, zostały zamontowane w miejsce dotychczasowych silników prądu stałego, bez żadnych zmian konstrukcyjnych wózka i mechanizmu hamulca szcękowego (rys. 3). Kable zasilające oraz przewody sterowania napędem poprowadzono pod podłogą z całkowitym pominięciem istniejącego kanału kablowego, w którym pozostało jedynie oprzewodowanie obwodów nietrakcyjnych wagonu.



Rys. 1. Dwa falowniki typu ENI-F600/360/3H oraz dwa rezystory typu DTE-4 we wnęce po rozruszniku



Rys. 2. Skrzynia aparatu z zabudowanym obwodem wejściowym typu ENI-OWE/200



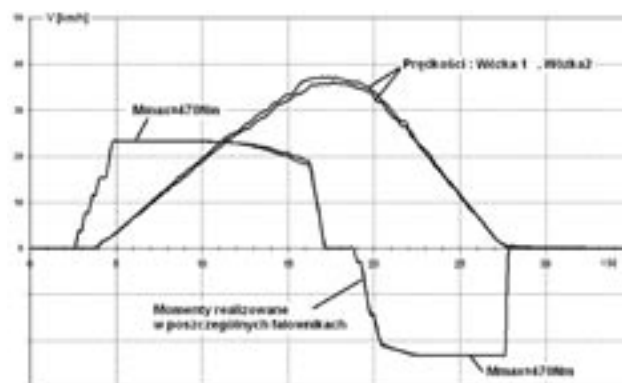
Rys. 3. Dwa silniki typu STDa200L4 zamontowane do wózka

Próby ruchowe

Podczas prób ruchowych tramwaju z zamontowanym napędem asynchronicznym badano rozruch i hamowanie pojazdu ze szczególnym uwzględnieniem hamowania odzyskowego ze zwrotem energii do sieci trakcyjnej i hamowania oporowego, zachowanie się napędu przy przejazdach pod izolatorami sekcijnymi, jazdę z maksymalną prędkością. Wybrane przebiegi zarejestrowane w czasie badań przedstawiono na poniższych rysunkach.

Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi prędkości obrotowych silników sterowanych wektorowo w obu wózkach (wyrażone w km/h) i momentów realizowanych w obu falownikach w funkcji czasu. Występujące tu przyspieszenie dla rozruchu wyniosło $0,9 \text{ m/s}^2$, natomiast opóźnienie dla hamowania – $1,3 \text{ m/s}^2$. Moment maksymalny dla tego przypadku sterowania dla pojedynczego silnika wynosił $M_{\max} = 470 \text{ Nm}$, to jest $M_{\max} = 1,89 \text{ Mn}$

(gdzie $Mn = 249 \text{ Nm}$ oznacza katalogowy moment znamionowy pojedynczego silnika). Prędkości obrotowe silników poszczególnych wózków różnią się między sobą, gdyż w tramwaju próbnym występowały zauważalne różnice średnic kół. Przedstawiony przebieg dotyczy przypadku tramwaju nie obciążonego.

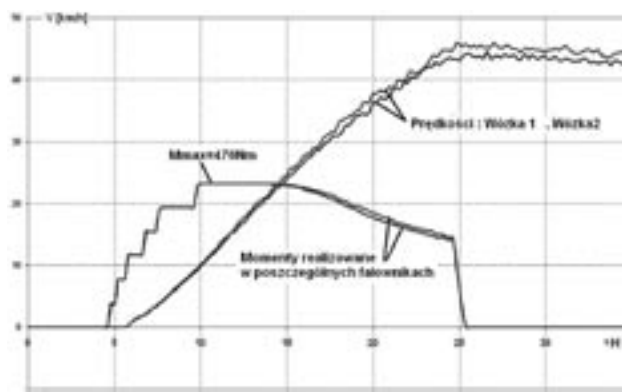


Rys. 4. Rozruch i zwykłe hamowanie elektrodynamiczne tramwaju nieobciążonego

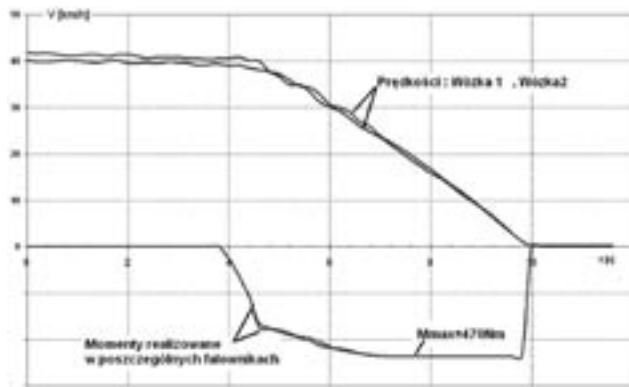
Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono rozruch i hamowanie elektrodynamiczne z jednoczesnym włączeniem hamulców szynowych tramwaju z obciążeniem dodatkowym 10 t w czasie jazdy próbnej po mieście (Łódź Widzew). W przebiegu realizowanego momentu napędowego widocznych jest wyraźnie 6 stopni nastawnika jazdy. Na szóstym stopniu zadawany jest moment maksymalny wynoszący 470 Nm dla pojedynczego silnika. Powyżej prędkości tramwaju wynoszącej 24 km/h widoczny jest wpływ celowego odwzbudzenia silników pociągającego za sobą obniżenie się wartości momentu napędowego. Przyspieszenie w czasie tej próby wyniosło $0,7 \text{ m/s}^2$.

Na rysunku 6 przedstawiono hamowanie elektrodynamiczne przy jednoczesnym załączeniu hamulców szynowych w tramwaju z obciążeniem dodatkowym 10 ton w czasie jazdy próbnej po mieście. Podobnie jak przy rozruchu przy hamowaniu elektrodynamicznym powyżej prędkości 24 km/h widoczny jest wpływ odwzbudzenia silników. Przy próbie tej osiągnięto opóźnienie $2,1 \text{ m/s}^2$ liczone od szóstej sekundy próby – gdy tramwaj ma jeszcze prędkość 30 km/h – do pełnego wyhamowania. Hamowanie to od prędkości 40 km/h do zatrzymania się tramwaju odbyło się w czasie $6,5 \text{ s}$ od chwili zadania momentu hamującego. Orientacyjna droga hamowania wyniosła 42 m .

Algorytm rozruchu napędu rozpoczyna faza wzbudzenia strumienia w silniku. Realizowany jest wtedy wektor prądu poruszają-

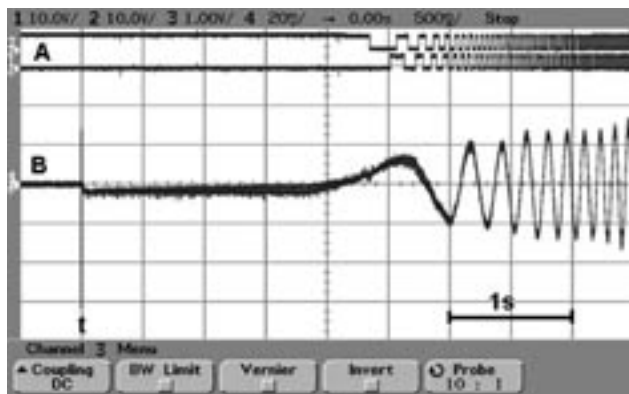


Rys. 5. Rozruch tramwaju z obciążeniem 10 t



Rys. 6. Hamowanie elektrodynamiczne tramwaju z obciążeniem 10 t przy jednoczesnym załączeniu hamulców szynowych

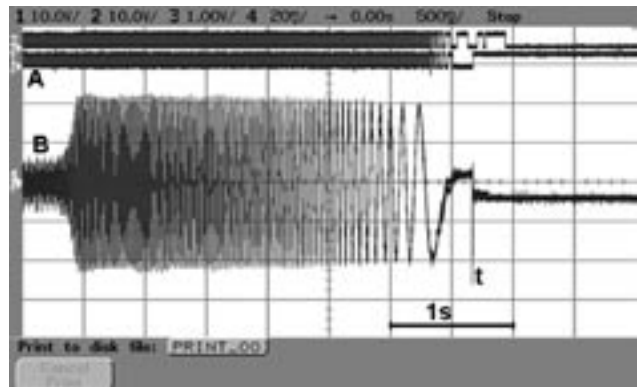
cy się synchronicznie z wirnikiem (w przypadku postoju jest to prąd stały). Po zakończeniu wzbudzenia (po ok. 2 s) silnik rozwija moment i zaczyna się obracać. Na rysunku 7 oznaczono: (A) – przebiegi sygnałów przetworników obrotowo impulsowych zamieszczonych na osiach silników jednego wózka tramwaju, (B) – przebieg prądów odpowiadających sobie faz obu silników jednego wózka (przebiegi celowo nałożono na siebie w celu pokazania ich zgodności).



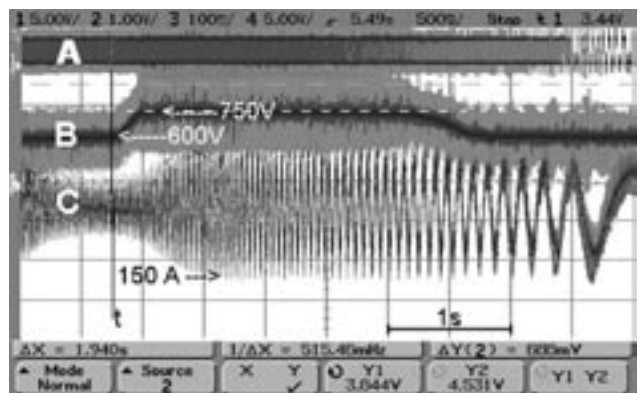
Rys. 7. Oscylogram prądów przewodowych stojana obu silników jednego z wózków w czasie rozruchu tramwaju

Algorytm hamowania i zatrzymania pojazdu realizowany jest w dwu etapach. Pierwszy etap to hamowanie odzyskowe wartością momentu zadawanego przez motorniczego za pomocą nastawnika. Po osiągnięciu przez tramwaj granicznej prędkości minimalnej, wynikającej z założeń projektowych, w chwili oznaczonej jako t następuje samoczynne przełączenie na hamowanie prądem stałym z wartością momentu już niezależną od położenia nastawnika. Oznaczenia przebiegów na rysunku 8 dla tego przypadku przyjęto jak na poprzednim rysunku.

Na rysunku 9 zamieszczono oscylogram zarejestrowany podczas hamowania pojazdu, przedstawiający czasowe przebiegi: sygnału przetwornika obrotowo impulsowego zamieszczonego na osi silnika (A), napięcia na kondensatorze obwodu pośredniczącego (B) oraz prądu jednej z faz silnika (C). W chwili t tramwaj rozpoczyna realizację algorytmu hamowania. Z opóźnieniem wynikającym z założeń projektowych (mających na celu ograniczenie szarpnięcia) silnik rozwija maksymalny moment ujemny. Rozpoczyna się oddawanie energii do sieci trakcyjnej. Kiedy napięcie w obwodzie pośredniczącym wzrasta do wartości 750 V zostaje załączony czoper z rezystorem hamowania skutecznie rozpraszają



Rys. 8. Oscylogram prądów przewodowych stojana obu silników jednego z wózków w czasie hamowania elektrodynamicznego tramwaju



Rys. 9. Oscylogram prądów przewodowych silników i napięcia w obwodzie pośredniczącym przy hamowaniu elektrodynamicznym włączonym przed przejazdem tramwaju pod izolatorem sekcijnym

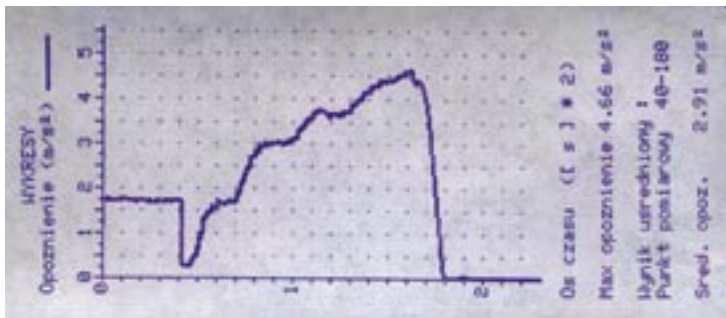
jący nadmiar energii, która nie może zostać oddana do sieci. Rozpoczęcie hamowania przed przejazdem pod izolatorem sekcijnym pozwala uniknąć rozładowania kondensatorów falowników i zapewnia ciągłą zdolność napędu asynchronicznego do pracy. Napęd ten ze względu na zdolność samowzbudzenia się pozwala na rozwinięcie skutecznego hamowania elektrodynamicznego nawet przy zaniku napięcia w sieci.

W czasie próbnych jazd tramwaju 805 Nr 1416 napęd ENI-ZNAP został poddany homologacji przez Instytut Gospodarki Przestrzennej i Mieszkalnictwa. Przykładowy wydruk przebiegu opóźnienia przy nagłym hamowaniu tramwaju z obciążeniem 10 t przy zadawaniu maksymalnego momentu hamowania elektrodynamicznego i jednoczesnym załączeniu hamulców szynowych pokazano na rysunku 10. Widoczne na wykresie zafalowania w przebiegu opóźnienia wynikają z działania układu antypoślizgowego. Na podstawie przeprowadzonych prób napędu IGPiM wystawił wymagane obowiązującymi przepisami zaświadczenie o dopuszczeniu tego napędu do eksploatacji (rys. 11).

Podsumowanie

1. Badania ruchowe potwierdziły deklarowane parametry ruchowe tramwaju, między innymi:

- możliwość hamowania przy zaniku napięcia w sieci trakcyjnej,
- hamowanie elektrodynamiczne do zatrzymania,
- możliwość jazdy jednym wózkiem z prędkością ponad 50 km/h,
- możliwość jazdy jednym silnikiem jednego wózka,
- przyspieszenie rozruchu i opóźnienie hamowania powyżej $1,5 \text{ m/s}^2$ w zakresie prędkości $0 \div 35 \text{ km/h}$, gdzie jednym



Rys. 10. Zarejestrowany w akcelerometrze przebieg opóźnienia przy nagłym hamowaniu obciążonego tramwaju; pomiar rozpoczęto w chwili 0,4 s

ograniczeniem była przyczepność zestawów kołowych, która uniemożliwiła pełne wykorzystanie dysponowanej mocy napędu.

2. Spełnienie wymaganych parametrów trakcyjnych zostało potwierdzone podczas badań homologacyjnych układu, wykonanych przez IGPIM.

3. Napęd asynchroniczny w porównaniu do napędu prądu stałego zajmuje około 20% mniej przestrzeni. Na przykład silnik asynchroniczny STDa 200L4 o mocy 50 kW ma te same gabaryty zewnętrzne co silnik prądu stałego o mocy 40 kW. Falownik napędu, realizując bezstykowo nie tylko regulację momentu ale zmianę kierunku jazdy oraz płynne i natychmiastowe przechodzenie z jazdy na wybieg i hamowanie eliminuje silnoprądową aparaturę stykową stosowaną do tych celów w klasycznym napędzie prądu stałego. Usunięcie dużych łączników wyposażonych w komory łukowe zaoszczędza przestrzeń w skrzyni aparaturowej.

4. Zastosowanie zaawansowanej techniki mikroprocesorowej oraz nowoczesnych półprzewodników mocy w napędzie asynchronicznym umożliwia ograniczenie silnoprądowej aparatury łączeniowej do minimum. W prezentowanym rozwiązaniu w obwodzie głównym są trzy styczniki: SUT-300 dotychczas stosowany, pełniący funkcję wyłącznika szybkiego tramwaju odcinający instalację tramwaju od sieci trakcyjnej oraz dwa styczniki typu STT150 odłączające bezprądowo poszczególne falowniki.

5. Przedstawiony układ napędu został celowo, ze względów konstrukcyjnych, tak podzielony na poszczególne podzespoły, aby umożliwić ich zabudowę zarówno w dostępnych przestrzeniach wagonu typu 105N jak i wagonach niskopodłogowych przystosowanych do montażu urządzeń na dachu.

Zakład Elektroniki Przemysłowej ENIKA składa serdeczne podziękowania Dyrekcji MPK Łódź i pracownikom Zakładu Remontu Taboru za pomoc i owocną współpracę przy badaniach ruchowych układu napędowego ENI-ZNAP.



Rys. 11. Świadectwo homologacji dla napędu ENI-ZNAP

Literatura

- [1] Chudzik P., Dębowski A., Kobos W., Lisowski G., Szafran J.: *Asynchroniczny napęd tramwajowy ze sterowaniem wektorowym - zasada działania (1)*. Technika Transportu Szynowego 3/2004.

Autorzy

mgr inż. Witold Kobos
mgr inż. Janusz Szafran
mgr inż. Tomasz Lipicki
Zakład Elektroniki Przemysłowej ENIKA w Łodzi

dr hab.inż. Andrzej Dębowski
dr inż. Piotr Chudzik
mgr inż. Grzegorz Lisowski
Zakład Techniki Sterowania
Instytut Automatyki I-13, Politechnika Łódzka

