

dr inż. Piotr Chudzik
dr hab. inż. Andrzej Dębowski
mgr inż. Grzegorz Lisowski
Politechnika Łódzka
mgr inż. Witold Kobos
mgr inż. Tomasz Lipicki
mgr inż. Janusz Szafran
Zakład Elektroniki Przemysłowej ENIKA

Wyniki badań asynchronicznego napędu tramwajowego ze sterowaniem wektorowym

Artykuł przedstawia wyniki badań układu napędowego z silnikami asynchronicznymi zrealizowanego na potrzeby modernizacji taboru tramwajowego w Polsce. W pracy omówiono koncepcję sterowania oraz techniczne aspekty zabudowy napędu w modernizowanym wagonie. Dokonano analizy stanów pracy napędu związanych z rozruchem i hamowaniem pojazdu, ze szczególnym uwzględnieniem hamowania odzyskowego ze zwrotem energii do sieci trakcyjnej i hamowania oporowego. Badano zachowanie się napędu przy przejazdach pod izolatorami sekcyjnymi oraz jazdę z maksymalną prędkością.

1. Koncepcja sterowania

Potrzeba modernizacji istniejącego taboru tramwajowego w kraju doprowadziła do podjęcia prób opracowania własnej nowoczesnej konstrukcji układu napędowego. Jako jednostkę napędową wybrano silnik indukcyjny, ze względu na prostą budowę, dużą niezawodność i odporność na trudne warunki eksploatacji. Poszukiwanie możliwości wykorzystania silnika indukcyjnego przy jednoczesnym spełnieniu rygorystycznych wymagań ekonomicznych doprowadziło do zaproponowania omawianego w pracach [5,6] układu pośredniego sterowania momentu i strumienia wirnika silnika indukcyjnego.

Układ sterowania realizuje algorytm polegający na jednoczesnym pośrednim sterowaniu momentem i strumieniem wirnika [3,4]. Wykorzystanie w proponowanym rozwiązaniu naturalnych sygnałów sterujących jakimi są amplituda prądu stojana i pulsacja poślizgu pozwala zbudować napęd szczególnie przydatny w zastosowaniach trakcyjnych. Jedną z najważniejszych zalet omawianego rozwiązania jest obecność w układzie regulatorów prądu silnika. Poza spełnianiem zadań wynikających z realizacji algorytmu sterowania umożliwiają one kontrolę wartości prądu przepływającego przez silnik dzięki czemu pozwalają na optymalne wykorzystanie falownika. Pod tym względem prezentowane rozwiązanie jest zdecydowanie lepsze od stosowanego często sterowania skalarnego nazywanego popularnie „U/f”. Metoda skalarnego sterowania częstotliwościowego, polegająca na bezpośrednim kształtowaniu amplitudy i częstotliwości podstawowej harmonicznej trójfazowej fali napięcia wytwarzanego przez falownik naraża silnik i falownik na niekontrolowany przepływ prądów o bardzo dużej amplitudzie, w wyniku braku możliwości kontroli zjawisk zachodzących w napędzie w stanach dynamicznych. Właściwość ta ma bardzo duży wpływ na koszt całego napędu, gdyż przewymiarowany falownik jest jego najdroższym elementem.

Wektorowe podejście do zagadnienia poślizgu, czyli różnicy pomiędzy pulsacją zasilania stojana i elektryczną prędkością kątową wirnika, pozwala na osiągnięcie bardzo dobrych właściwości regulacyjnych w stanach dynamicznych związanych z poślizgami czy nierówną pracą kół

podczas przejazdu przez zwrotnice. Wykorzystanie w proponowanym sterowaniu pulsacji poślizgu wirnika ma jeszcze jedną zaletę. Ważny dla trójfazowej pracy napędu, odpowiadający jeździe z wybiegiem silnika osiąga się wówczas bardzo łatwo, narzucając po prostu wartość tego poślizgu równą zeru. Podejście takie było już w Polsce wykorzystywane w pracach nad konstrukcją napędu dla samochodu elektrycznego [2].

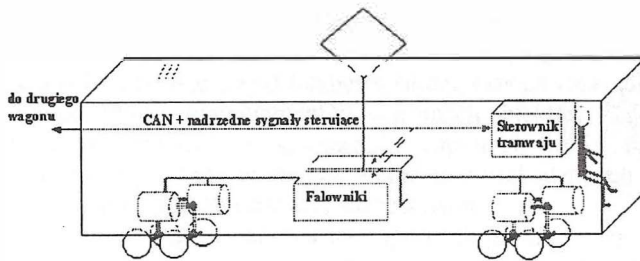
2. Budowa układu napędowego.

Opisywaną powyżej metodę pośredniego sterowania momentu i strumienia wirnika silnika indukcyjnego zastosowano w falownikowym napędzie w wagonie typu 805N nr 1416, użyczonym przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Łodzi (rys.1) [6,7].



Rys. 1. Tramwaj próbny w zajezdni przy ul. Telefonicznej w Łodzi.

Jednostkę napędową stanowią cztery asynchroniczne silniki trakcyjne typu STDa 200L4 produkcji EMIT Żychlin o mocy 50kW każdy, które zostały zamontowane w miejsce dotychczasowych silników prądu stałego (rys.2), bez żadnych zmian konstrukcyjnych wózka i mechanizmu hamulca szczękowego.



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia podstawowych elementów napędu.

W wagonie zdemontowano zbędne wyposażenie związane z klasycznym układem rozruchu oporowego. W przestrzeni po rozruszniku oporowym GBT usunięto całkowicie dotychczasową aparaturę i zabudowano dwa falowniki typu ENI-F600/360/3H oraz dwa rezystory hamowania DTE-4. Każdy z falowników zawiera niezależny, kompletny system mikroprocesorowy z procesorem sygnałowym firmy TEXAS INSTRUMENTS. System ten jest odpowiedzialny za realizację, algorytmu sterowania pośredniego. Poza procesorem sygnałowym w układzie elektronicznym znajdują się niezbędne moduły służące do przetwarzania analogowych i cyfrowych sygnałów pomiarowych, zapewnienia transmisji danych pomiędzy sterownikami oraz nadzorowania poszczególnych elementów układu.

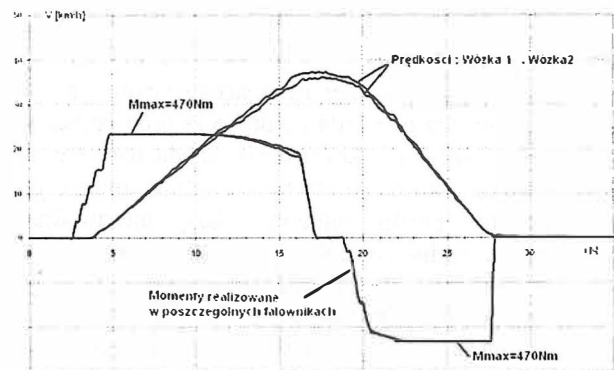
Wnęka po rozruszniku, w której znajdują się falowniki, jest zamykana pokrywą jak w rozwiązaniu dotychczasowym. Pomimo tego falowniki mają własne, szczelne obudowy chroniące ich wnętrza przed zanieczyszczeniami z powietrza chłodzącego radiatory i rezystory hamowania. Falowniki wyposażono w duże odemowalne pokrywy pozwalające na wygodny dostęp do wszystkich podzespołów. Połączenia elektryczne falowników (silnopiętrowe i sterujące) zrealizowano przy użyciu złącz 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 szczękowymi oraz ogrzewania. W dostępnej przestrzeni zabudowano obwód wejściowy typ ENI-OWE/200, zawierający układ wstępnego ładowania filtru, dwa dławiki filtru, czujniki pomiaru napięcia i prądu tramwaju oraz dwa styczniki. 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.

3. Wyniki badań

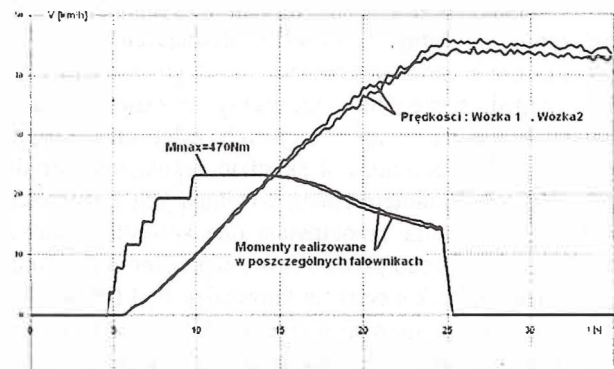
W okresie od września 2003 do lutego 2004 Zakład Elektroniki Przemysłowej ENIKA we współpracy z MPK Łódź oraz zespołem z Politechniki Łódzkiej przeprowadził próbną jazdę, w trakcie których testowano wszystkie możliwe stany pojazdu z omawianym napędem. Stosowanie napędu trakcyjnego w tramwaju związane jest z pracą przy dużych zmianach wielkości dynamicznych wynikających z charakteru obciążenia i warunków jazdy miejskiej.

W czasie prób ruchowych tramwaju zarejestrowano przebiegi czasowe wybranych sygnałów. Badano szczególnie dokładnie zjawiska związane ze stanami przejściowymi występującymi podczas rozruchu i hamowania tramwaju. Przeprowadzono próby jazdy wózka w różnych warunkach obciążenia i przyczepności kół.

Na rysunku 3 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 przy rozruchu wyniosło 0.9 m/s^2 , natomiast opóźnienie dla hamowania - 1.3 m/s^2 . Moment maksymalny dla tego przypadku sterowania dla pojedynczego silnika wyniósł $M_{\text{max}} = 470 \text{ Nm}$, to jest $M_{\text{max}} = 1,89 M_n$ (gdzie $M_n = 249 \text{ Nm}$ 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.



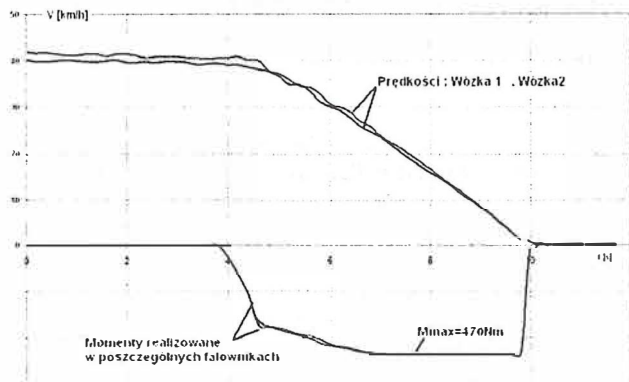
Rys. 3. Rozruch i zwykłe hamowanie elektrodynamiczne tramwaju nieobciążonego



Rys. 4. Rozruch tramwaju z obciążeniem 10 ton

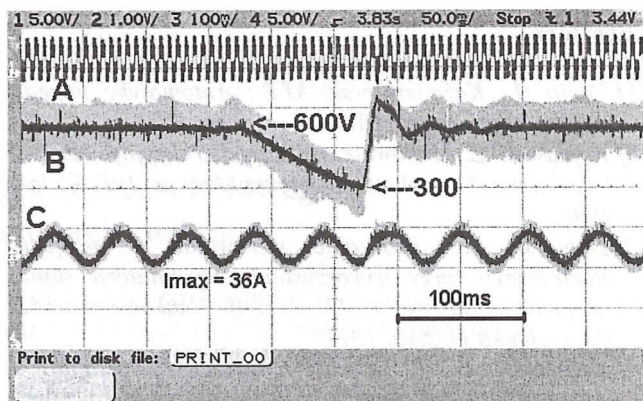
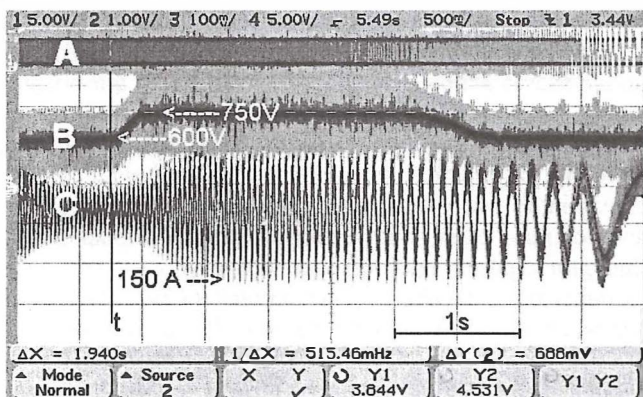
Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono rozruch i hamowanie elektrodynamiczne z jednoczesnym włączeniem hamulców szynowych tramwaju z obciążeniem dodatkowym 10 ton w czasie jazdy próbnej po mieście (Łódź-Widzew). W przebiegu realizowanego momentu napędowego widocznych jest wyraźnie 6 stopni nastawnika jazdy. Na tym stopniu zadawany jest moment maksymalny wynoszący 470 Nm dla pojedynczego silnika. Przy prędkości tramwaju powyżej 24 km/h widoczny jest wpływ celowego odzwabiania silników, pociągającego za sobą obniżenie się wartości momentu napędowego. Przyspieszenie w czasie tej próby wyniosło 0.7 m/s^2 .

Na rysunku 5 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 m/s^2 , liczne od 6-tej sekundy próby - gdy tramwaj ma jeszcze prędkość 30 km/h - do pełnego wyhamowania. Hamowanie od prędkości 40 km/h do zatrzymania się tramwaju odbyło się w czasie 6,5 s. od chwili zadania momentu hamującego. Orientacyjna droga hamowania wyniosła 42 m.



Rys. 5. Hamowanie elektrodynamiczne tramwaju z obciążeniem 10 ton przy jednoczesnym załączeniu hamulców szynowych

Ze względu na udział tramwaju w ruchu miejskim niezbędne było opracowanie sterowania pojazdu w warunkach poślizgów kół, występujących zarówno podczas rozpędzania jak i hamowania. Przebadano również zachowanie napędu w warunkach przejazdu przez zwrotnice, rozjazdy i różnego typu nierówności czy odkształcenia kół i szyn związane z ich zużyciem. Otrzymane wyniki pokazały korzyści płynące w tych przypadkach z zastosowanej w omawianym napędzie metody sterowania. Poza badaniami o charakterze ruchowym przeprowadzono dokładną analizę zjawisk związanych z wielkościami elektrycznymi i elektromagnetycznymi charakterystycznymi dla tego typu napędu. Na rysunku 6 zamieszczono oscylogramy zarejestrowane podczas przejazdu pod izolatorem w stanie hamowania pojazdu i wybiegu, przedstawiające czasowe przebiegi: sygnału przetwornika obrotowo impulsowego zamieszczonego na osi silnika (A), napięcia na kondensatorze obwodu pośredniczącego (B) oraz prądu jednej z faz silnika (C).



Rys. 6 Oscylogramy prądów przewodowych silników i napięcia w obwodzie pośredniczącym przy hamowaniu elektrodynamicznym włączonym przed przejazdem tramwaju podizolatorem sekcyjnym oraz podczas przejazdu pod izolatorem w stanie wybiegu.

Szczególny nacisk położono na przebadanie stanów niestabilnych występujących w poszczególnych elementach układu a związanych z zasilaniem napędu za pomocą sieci trakcyjnej. Przeprowadzono obserwację napięcia zasilającego falownik podczas przejazdu tramwaju przez izolator sekcyjny w różnych stanach pracy. Otrzymane wyniki badań zostały wykorzystane do stworzenia nadrzędnego algorytmu sterowania, umożliwiającego automatyzowanie zasad postępowania podczas przejazdu pod izolatorem. Opracowano również algorytm postępowania w sterowaniu napędem w przypadku chwilowych odskoków pantografu jak również w przypadku trwałego bądź chwilowego zaniku napięcia w sieci trakcyjnej.

4. Podsumowanie

Proponowany układ napędowy zapewnia właściwości dynamiczne podobne jak w przypadku zastosowania do syntezy układu sterowania metody połowo-zorientowanej czy DTC, dzięki czemu umożliwiła pełne wykorzystanie silnika.

Badania ruchowe potwierdziły deklarowane parametry ruchowe tramwaju, między innymi:

- możliwość hamowania przy zaniku napięcia w sieci trakcyjnej,
- hamowanie elektrodynamiczne do prędkości 0 km/h,
- 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 $0-35 \text{ km/h}$, gdzie jedynym ograniczeniem była przyczepność zestawów kołowych, która uniemożliwiła pełne wykorzystanie dysponowanej mocy napędu.

W czasie próbnych jazd tramwaju 805N Nr 1416 napęd ENI-ZNAP został poddany homologacji przez Instytut Gospodarki Przestrzennej i Mieszkalnictwa. Na podstawie przeprowadzonych prób napędu IGPIM wystawił wymagane obowiązującymi przepisami zaświadczenie o dopuszczeniu tego napędu do eksploatacji.

Literatura

- [1] Tunia H., Kaźmierkowski M.P.: *Automatyka napędu przekształtnikowego*. PWN, Warszawa, 1987.
- [2] Popławski E.: *Falownikowy napęd trakcyjny*. Skrypty Uczelniane Politechniki Świętokrzyskiej, nr 195, Kielce, 1990.
- [3] Dębowski A.: *Pośrednie sterowanie w napędzie elektrycznym przy wykorzystaniu stymulatora stanu*. Rozprawy Naukowe z.111, Zeszyty Naukowe Nr 552, Politechnika Łódzka, 1991.
- [4] Dębowski A.: *O możliwościach wykorzystania w napędzie trakcyjnym silników indukcyjnych sterowanych wektorowo*. Technika Transportu Szynowego, 2002.
- [5] Dębowski A.: *Koncepcja tramwajowego napędu falownikowego sterowanego wektorowo*. Mat. XV Konferencji Naukowo-Technicznej „Pojazdy Szynowe 2002”, Szklarska Poręba, 2002, t.I.
- [6] Chudzik P., Dębowski A., Kobos W., Lisowski G., Szafran J.: *Asynchroniczny napęd tramwajowy ze sterowaniem wektorowym - zasada działania (1)*, Technika Transportu Szynowego 3/2004.
- [7] Chudzik P., Dębowski A., Kobos W., Lisowski G., Szafran J.: *Asynchroniczny napęd tramwajowy ze sterowaniem wektorowym - badania ruchowe (2)*, Technika Transportu Szynowego 4/2004.