

# Współczesny elektryczny napęd trakcyjny. Przykłady elektrycznych napędów trakcyjnych

Andrzej Dębowski

Przez wiele lat elektrycznym silnikiem powszechnie stosowanym do napędu wszelkich pojazdów zasilanych energią elektryczną był komutatorowy szeregowy silnik prądu stałego (DC-SM, ang. *direct-current series motor*). Wyczerpujące informacje na temat jego budowy, a także równań matematycznych opisujących zachowanie się w stanach ustalonych i dynamicznych i wynikających z nich charakterystyk mechanicznych można znaleźć przede wszystkim w literaturze poświęconej zasadom budowy i eksploatacji klasycznego elektrycznego napędu trakcyjnego, jak [A4], ale również w wielu książkach poświęconych maszynom i napędom elektrycznym, na przykład [B1, B6, B7, B8, B9, B15, B22]. Powodem tej popularności silników szeregowych były ich charakterystyki mechaniczne, wynikające z hiperbolicznej zależności momentu wewnętrznego (elektromagnetycznego) od chwilowej prędkości kątownej wału silnika  $M_{we} = f(\Omega)$ . Ta ich cecha była unikalna w czasach, gdy wszelkie silniki elektryczne były zasilane ze źródeł o stałym napięciu, a ich układy sterowania wykorzystywały jedynie dodatkowe oporniki szeregowo podłączone do uzwojeń twornika lub wzbudzenia. Przy stałych parametrach w obwodach silnoprądowych nawet przy niewielkim obniżeniu prędkości obrotowej (np. przy najechaniu koła na przeszkodę) samoczynnie (tj. bez jakiegokolwiek ingerencji ze strony zewnętrznego układu sterowania) pojawiał się wtedy prawie natychmiast wzrost momentu wewnętrznego, pozwalający na skuteczne pokonanie takiej przeszkody, i odwrotnie – przy raptownym wzroście prędkości (np. przy wystąpieniu poślizgu kół) następował gwałtowny spadek momentu wewnętrznego. Bardzo ułatwiało to prowadzenie pojazdów z takim napędem.

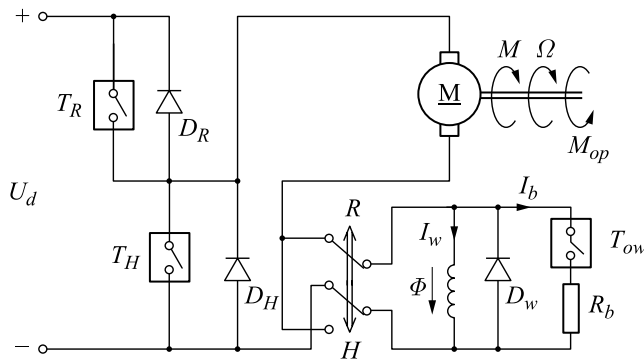
Współcześnie wymaga się jednak zdecydowanie więcej od napędów, nie tylko jeśli chodzi o ich właściwości trakcyjne związane z potrzebą precyzyjnego sterowania chwilową wartością momentu wewnętrznego rozwijanego przez silnik, chodzi także o dodatkowe możliwości, jak kontrolowany zwrot energii do źródła – sieci lub akumulatora. Wymaga to częstych i niezależnych od siebie zmian kierunków prądów twornika i wzbudzenia. Skoro uzwojenie wzbudzenia i tak w zautomatyzowanym napędzie trakcyjnym czasem musi być przełączane, to fakt, że w warunkach znamionowych płyną przez nie bardzo duże wartości prądów, nawet w epoce stosowania przekształtników energoelektronicznych sprawia liczne kłopoty – utrudnia montaż, a potem konserwację obwodów roboczych (kable są grube i sztywne, aparatura łączeniowa na duże prądy ma duże gabaryty, moduły energoelektroniczne na duże prądy są wyraźnie droższe). Ważnym utrudnieniem jest też fakt, że silniki szeregowo były projektowane do bezpośredniego podłączenia do określonego napięcia sieci trakcyjnej, a więc osobne zasilanie ich uzwojeń – przewidzianych przecież do pracy w połączeniu szeregowym – bezpośrednio z tej sieci jest utrudnione ze względu na niedopasowanie napięciowe (dotyczy to zwłaszcza szeregowego uzwojenia wzbudzenia!). Dlatego napędy trakcyjne z silnikami szeregowymi są spotykane obecnie jedynie tam, gdzie jeszcze nie opłacało się ich wymienić na inne. Przy wprowadzaniu przekształtników poprawiających właściwości napędów z tymi silnikami w istniejących pojazdach korzysta się więc doraźnie z uproszczonych rozwiązań, sprowadzających się do wykorzystania zwykłych czoperów pracujących w rozmaitych konfiguracjach. Rozwiązania takie stosuje się ze

względu na ograniczenie dostępnego miejsca w modernizowanych pojazdach czy chęć ograniczania kosztów modernizacji, a także ze względu na trudności techniczne dotyczące kompleksowej przebudowy okablowania.

Istnieje bardzo duża liczba różnych praktycznych rozwiązań zautomatyzowanych napędów trakcyjnych nadal wykorzystujących silniki szeregowo prądu stałego. Powszechnie w charakterze elementów regulacyjnych w różnych obwodach prądu stałego, więc także w napędach z silnikami elektrycznymi prądu stałego, wykorzystuje się proste i tanie przerywacze energoelektroniczne – tzw. czopery (ang. *chopper*), co nawet przyczyniło się do powstania żargonowego określenia takiego rodzaju napędu trakcyjnego – „napęd czoperoowy”. W napędach z szeregowymi silnikami prądu stałego jednak nie zawsze udaje się w pełni wykorzystać możliwości oferowane przez układ napędowy całkowicie zautomatyzowany, zwłaszcza jeśli są to napędy powstające na drodze modernizacji istniejących wcześniej rozwiązań i konieczny jest pewien kompromis między poprawą jakości napędu a kosztami jego modernizacji.

Na rysunku 1 przedstawiono jedno z proponowanych rozwiązań, które jednak daje takie możliwości. Układ silnoprądowy obejmuje: silnik szeregowo z rozdzielonymi uzwojeniami twornika i wzbudzenia, półmostek z dwoma kluczami z diodami zerowymi odwrotnie podłączonymi do kluczy, pozwalający na regulację przepływu prądu twornika w obu kierunkach (takie zestawy elementów są oferowane obecnie przez producentów jako jeden moduł), przełącznik zmiany kierunku podłączenia uzwojenia szeregowego zabezpieczonego diodą zerową do obwodu twornika (powodujący, że niezależnie od

Rys. 1. Schemat ideowy przykładowego zautomatyzowanego napędu trakcyjnego z szeregowym silnikiem prądu stałego



aktualnego kierunku prądu twornika kierunek prądu płynącego przez uzwojenie wzbudzenia, a więc i kierunek głównego strumienia magnetycznego, nie ulega zmianie przy przechodzeniu silnika od rozruchu do hamowania (elektrodynamicznego) oraz opornik bocznikujący uzwojenia wzbudzenia z szeregowo połączonym dodatkowym przerywaczem-czoperem (pozwalający na płynną regulację osłabiania pola, stosowaną przy wyższych prędkościach obrotowych silnika w celu ograniczenia wartości siły elektromotorycznej rotacji indukującej się w uzwojeniach twornika).

Przy rozpędzaniu silnika pracuje górny klucz półmostka, włączony szeregowo w obwód twornika, który działa jako elektroniczny przekształtnik DC/DC obniżający napięcie sieci (ang. *buck converter* lub *step-down converter*) do poziomu odpowiadającego danej prędkości obrotowej. W tej konfiguracji współpracuje on z diodą drugiego klucza, pełniącą rolę diody zerowej dla obwodu twornika. W trakcie hamowania elektrodynamicznego górny klucz pozostaje wyłączony i silnik pozostaje połączony z siecią przez jego diodę zwrotną. Jeżeli prędkość obrotowa silnika jest duża, a odpowiadająca jej siła elektromotoryczna rotacji przewyższa napięcie sieci, to prąd twornika płynie do sieci bezpośrednio przez diodę zwrotną górnego klucza, a regulacja wartości tego prądu odbywa się poprzez regulację stopnia osłabienia strumienia wzbudzenia dzięki regulacji współczynnika wypełnienia pracy czopera okresowo podłączającego opornik bocznikujący do uzwojenia wzbudzenia. Jeśli siła elektromotoryczna rotacji jest mniejsza od napięcia sieci, to nadal możliwe jest przekazywanie energii elektrycznej z obwodu twornika do sieci. Wymaga to jednak aktywnej pracy

dolnego klucza w półmostku, polegającej na okresowym krótkotrwałym zwieraniu obwodu twornika. Przy zwarciu tego klucza, dzięki obecności indukcyjności w obwodzie twornika, narastający prąd twornika magazynuje coraz więcej energii w polu magnetycznym uzwojenia wirnika, a w chwilach rozwarcia tego klucza – zgodnie z regułą zachowania ciągłości, zaczyna płynąć do sieci przez diodę klucza górnego i malejąc, przekazuje do niej część tej zmagazynowanej energii. Prąd twornika przy hamowaniu dynamicznym może więc popłynąć do sieci, nawet jeśli prędkość obrotowa silnika jest niewielka, ponieważ do siły elektromotorycznej rotacji silnika dodaje się siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu twornika, pojawiająca się w chwili przerwania zwarcia obwodu twornika przez otwierający się klucz. Ten klucz działa wtedy jako przekształtnik DC/DC podwyższający napięcie (ang. *boost converter* lub *step-up converter*) i jest w stanie spowodować, że krótkotrwałe – przez odpowiednią diodę – prąd popłynie do sieci, nawet jeśli jej napięcie jest wyższe niż siła elektromotoryczna rotacji istniejąca w silniku.

Jeśli sieć trakcyjna nie może odbierać energii od hamującego pojazdu, to dla uzyskania efektu hamowania elektrodynamicznego (i tym samym łatwego do kontrolowania momentu hamującego na wale silnika) w omawianym układzie, tak jak w każdym napędzie elektrycznym, równolegle do obwodu głównego podłączonego do sieci umieszcza się dodatkową gałąź zawierającą rezystor dużej mocy, służący do rozpraszania energii elektrycznej odzyskanej w wyniku hamowania. Takiego układu rozpraszania energii hamowania nie pokazano na omawianym rys. 1, bo stanowi on standardowe wyposażenie każdego napędu

elektrycznego, umożliwiające uzyskanie w napędzie momentu hamującego nawet w przypadku awaryjnym, gdy z jakiegoś powodu źródło zasilające napęd nie może odebrać energii od silnika pracującego jako prądnica (generator). Specjalny, dodatkowy czoper, szeregowo połączony z tym rezystorem, jest sterowany tak, by w czasie hamowania utrzymywać w obwodzie głównym stałe napięcie na zadanym poziomie (może ono być nawet wyższe od napięcia sieci – która, jeśli nie jest zdolna do odbierania energii, może zostać wtedy w ogóle odłączona przez stycznik główny – i w ten sposób umożliwić osiągnięcie wyjątkowo dużej wartości momentu hamującego). W napędach zautomatyzowanych możliwe jest także uzyskanie hamowania elektrodynamicznego w pojeździe, który porusza się swobodnie z dużą prędkością i nie jest w danej chwili zasilany z sieci. Po włączeniu napędu dzięki magnetyzmowi szczątkowemu w maszynie możliwe jest uzyskanie efektu samowzbudzenia się pola magnetycznego i rozwinięcie dużej wartości momentu hamującego pozostającego pod pełną kontrolą układu sterowania napędem.

Z teorii maszyn elektrycznych dotyczącej właściwości regulacyjnych obcowzbudnego silnika prądu stałego wynika, że do uzyskania pełnych możliwości regulacji momentu i sterowania przepływem energii elektrycznej trzeba mieć możliwość niezależnego sterowania prądem twornika i prądem wzbudzenia, co oznacza, że te uzwojenia powinny być fizycznie od siebie oddzielone – czyli powinna to być po prostu maszyna specjalnie skonstruowana do tego celu. Wtedy wystarczy, że uzwojenie wzbudzenia będzie nawinięte cienkim drutem, a odpowiednio zwiększona zostanie jego liczba zwojów, co spowoduje znaczne zmniejszenie wartości prądu wzbudzenia potrzebnego do uzyskania tego samego strumienia magnetycznego, a wtedy regulacja wzbudzenia potrzebna do prawidłowego wykorzystania możliwości silnika w napędzie trakcyjnym będzie łatwa do uzyskania.

Warto tu jednak zauważyć, że tradycyjne szeregowo silniki komutatorowe prądu stałego stopniowo odchodzą do historii we wszystkich zastosowaniach. Głównie z powodu bardzo poważnej

wady – obecności mechanicznego komutatora i trących się o niego szczotek. Wiąże się z tym bowiem:

- konieczność regularnego sprawdzania stanu szczotek i okresowego przetaczania komutatora, aby usunąć rowki na miedzianych wycinkach spowodowane przez szczotki, a pogarszające jakość styku (układy energoelektroniczne nie wymagają żadnej konserwacji);
- konieczność unikania nawet chwilowych przeciążeń silnika, gdyż wystąpienie dużych wartości prądu twornika w trakcie mechanicznej komutacji następującej między wycinkami komutatora powoduje pojawianie się łuku wypalającego szczotki i wycinki komutatora, a w konsekwencji na ogół poważne uszkodzenie komutatora (moduły energoelektroniczne można swobodnie przeciążać, jeśli zapewni im się odpowiednie chłodzenie);
- konieczność ochrony komutatora przed wilgocią i nadmiernymi wstrząsami (silniki prądu przemiennego, jeśli mają odpowiednią izolację, mogą pracować zalane wodą i są bardzo odporne na wszelkie wibracje).

Z tego powodu współczesne nowe konstrukcje elektrycznych napędów trakcyjnych wykorzystują niemal wyłącznie asynchroniczne lub synchroniczne silniki prądu przemiennego z trójfazowymi uzwojeniami stojanów, zasilane z mikroprocesorowo sterowanych falowników z zastosowaniem dosyć mocno złożonych obliczeniowo algorytmów sterowania.

### Tramwajowy napęd elektryczny

W Polsce na przełomie XX i XXI wieku eksploatowanych było ponad 2 tysiące tramwajów typu 105N z klasycznym napędem z szeregowymi silnikami prądu stałego, z oporowym układem regulacji prądu. Ich wersja oznaczona jako 805N była dostosowana do węższych torów, z powodów historycznych istniejących w takich miastach, jak Bydgoszcz, Elbląg, Grudziądz, Łódź czy Toruń. Przez wiele lat postęp techniczny w ich modernizacji polegał na stopniowym zastępowaniu logicznymi układami elektronicznymi pomocniczych przekaźników sterujących elektromechanicznymi stycznikami prądu stałego, służącymi nadal do

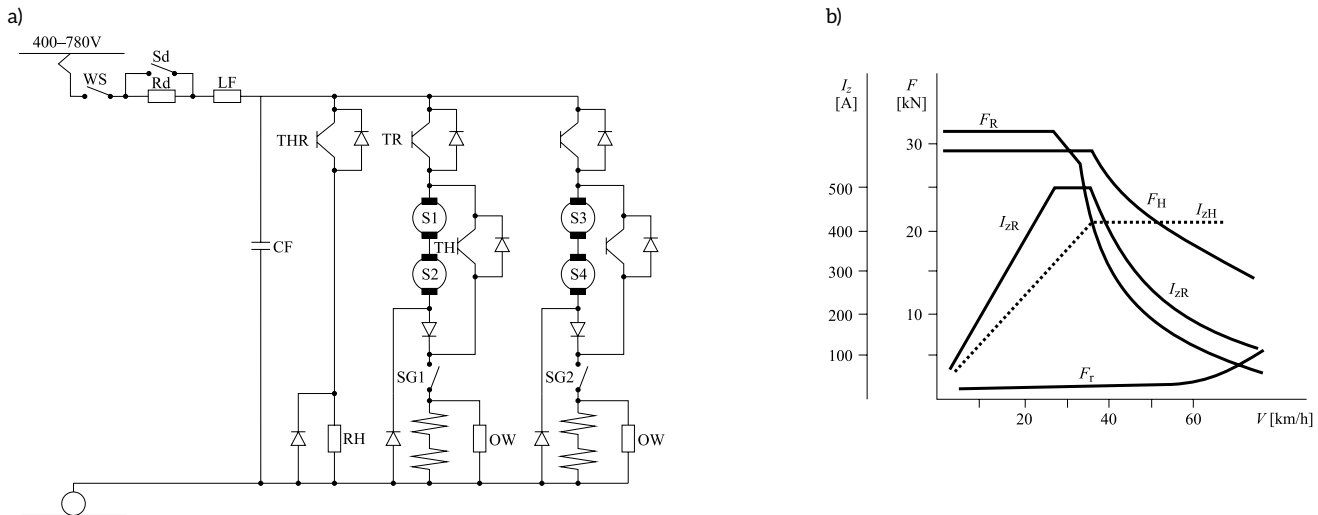
przełączania tradycyjnych rezystorów w prądowych obwodach roboczych silników. Przełom nastąpił dopiero pod koniec XX stulecia, po pojawieniu się na rynku energoelektronicznych przyrządów półprzewodnikowych. Pierwsze krajowe napędy przekształtnikowe, oparte na tyrystorach wyłączalnych GTO wykorzystywanych w charakterze przerywaczy prądu (czoperów), wyprodukował na licencji Instytutu Elektrotechniki z Międzyzlesia k. Warszawy w 1996 roku Zakład Aparatury Elektrycznej Woltan z Łodzi. Do 2001 roku zainstalowano je w ok. 150 tramwajach, wyposażonych nadal w dotychczas znajdujące się w nich silniki szeregowo. Te impulsowe układy napędowe nie tylko umożliwiły płynne sterowanie momentem napędowym silników, ale pozwalały także na ich pracę ze zwrotem energii do sieci trakcyjnej przy elektrodynamicznym hamowaniu pojazdu, czyli tzw. rekuperację (odzysk) energii kinetycznej. Należy jednak pamiętać, że ze względu na prostowniki powszechnie instalowane w transformatorowych podstacjach zasilających sieć trakcyjną taka rekuperacja jest możliwa jedynie w tym przypadku, gdy inne pojazdy zasilane akurat z tej samej sekcji sieci są w stanie wykorzystać taką nadwyżkę mocy, pojawiającą się przecież chwilowo i zwykle niespodziewanie. W przeciwnym bowiem razie wykrycie nadmiernego lokalnego wzrostu napięcia sieci trakcyjnej, mierzonego na odbieraku przez układ elektroniczny sterujący napędem hamującego tramwaju, powoduje podłączenie do obwodu twornika silnika przez ten sam czoper specjalnego rezystora hamowania i kontrolowane tym czoperem nieodwracalne już rozproszenie w nim istniejącej nadwyżki energii kinetycznej pojazdu. Hamulce mechaniczne tramwaju są wtedy nadal oszczędzane, ale odzysku (rekuperacji) energii elektrycznej – nie ma. W dalszych wersjach tych napędów w charakterze kluczy pracujących impulsowo zastosowano nowoczesne tranzystory mocy, czyli bipolarne tranzystory z izolowaną bramką, tzw. IGBT (ang. *insulated gate bipolar transistor*), (rys. 2).

Tramwajowy napęd impulsowy pokazany na rysunku 2a charakteryzuje się bezstykową realizacją poszczególnych faz jazdy: rozruch – wybieg – hamowanie.

W jego skład wchodzi następujące elementy: WS – wyłącznik główny, Rd – opornik ograniczający prąd ładowania kondensatora filtra sieciowego przy włączaniu napędu, Sd – stycznik zwierający opornik filtra po dokonaniu włączenia napędu, LF – dławik filtra sieciowego, CF – kondensator filtra sieciowego, THR – tranzystor hamowania oporowego, RH – rezystor hamowania (zestaw oporników), S1, S2 oraz S3, S4 – uzwojenia tworników silników trakcyjnych połączone ze sobą szeregowo, parami instalowanych na tym samym wózku, SG1, SG2 – styczniki główne dla poszczególnych grup silników. W każdej z tych dwóch grup silników oznaczono: TR – tranzystor rozruchu, TH – tranzystor hamowania, OW – układ osłabiania wzbudzenia silników (bocznikujący połączone szeregowo uzwojenia wzbudzenia obu silników znajdujących się w danej gałęzi obwodu). Diody występujące na tym schemacie bez oznaczeń są diodami zwrotnymi (tzw. zerowymi) i służą do likwidacji przepięć, które pojawiają się przy przerywaniu prądów płynących w obwodach zawierających indukcyjności przez otwierające się klucze tranzystorowe.

Dwie grupy silników są zasilane przez oddzielne przekształtniki IGBT. Dwutranzystorowy moduł IGBT włączony jest tak, że faza rozruchu jest regulowana tranzystorem TR, a faza hamowania tranzystorem TH. Przejście z jazdy na hamowanie nie wymaga żadnych przełączeń, lecz tylko wyłączenia tranzystorów TR i włączenia tranzystorów TH. W ten sposób w porównaniu z układem tradycyjnym uzyskuje się znaczne skrócenie czasu uzyskania pełnej siły hamowania oraz skrócenie drogi hamowania tramwaju. W obwodzie występują tylko styczniki grupowe (załączenia grupy silników), włączane i wyłączane bezprądowo przed uruchomieniem tramwaju.

Pierwsze polskie tramwajowe napędy asynchroniczne, z grupowym skalarnym sterowaniem napięciowym, w którym falowniki przydzielone do poszczególnych wózków napędowych zasilają w systemie otwartym (tzn. bez prądowych sprzężeń zwrotnych) klatkowe silniki indukcyjne połączone w pary (rys. 3), zaczęto instalować w modernizowanych tramwajach na przełomie



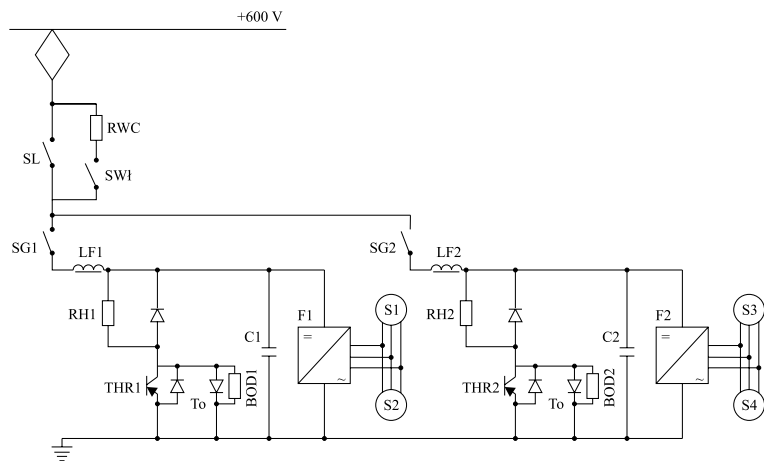
**Rys. 2.** Impulsowy napęd prądu stałego ze wspólnym prądowym sterowaniem obu silników szeregowych prądu stałego w każdym z wózków wagonu silnikowego, przeznaczony do tramwajów typu 105N, opracowany w IEL Warszawa i produkowany przez ZAE WOLTAN w Łodzi: a) schemat ideowy obwodu głównego; b) graniczne charakterystyki trakcyjne ( $F_R$  – siły napędowej przy rozpędzaniu;  $F_H$  – siły napędowej przy hamowaniu, skierowanej w przeciwną stronę do ruchu pojazdu;  $F_r$  – siły oporów ruchu;  $I_{zR}$  – prądu roboczego przy rozpędzaniu;  $I_{zH}$  – prądu roboczego przy hamowaniu)

Źródło: [A21, A23]

stuleci. Takimi napędami były falownikowe napędy asynchroniczne opracowane w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie we współpracy z Tramwajami Warszawskimi [A22] oraz w firmie MEDCOM z Warszawy [A20].

W skład tramwajowego napędu asynchronicznego, pokazanego na rysunku 3, wchodzi następujące elementy: SL – stycznik liniowy, SG1, SG2 – styczniki główne dla poszczególnych grup silników, SW1 – stycznik wstępnego ładowania filtra, RWC – opornik ograniczający prąd ładowania filtra, LF1, LF2 – dławiki grupowych filtrów sieciowych, C1, C2 – kondensatory grupowych filtrów sieciowych, S1, S2 oraz S3, S4 – trójfazowe trakcyjne silniki asynchroniczne z uzwojeniami stojanów połączonymi ze sobą równolegle, parami instalowane na tym samym wózku, F1, F2 – falowniki napięciowe z tranzystorami IGBT zasilające każdą z dwóch grup silników asynchronicznych, THR1, THR2 – tranzystory hamowania oporowego (z podłączonym równolegle do każdego z nich własnym zestawem ochronnym, składającym się z tyrystora ochronnego  $T_o$  sterowanego układem nadnapięciowym BOD), RH1, RH2 – rezystory hamowania (zestawy oporników).

Sterowanie skalarne polega, jak wiadomo, wyłącznie na wytwarzaniu przez



**Rys. 3.** Falownikowy napęd asynchroniczny z grupowym, wspólnym napięciowym sterowaniem obu silników w każdym z wózków, przeznaczony do tramwajów typu 105N, opracowany w IEL Warszawa we współpracy z Tramwajami Warszawskimi

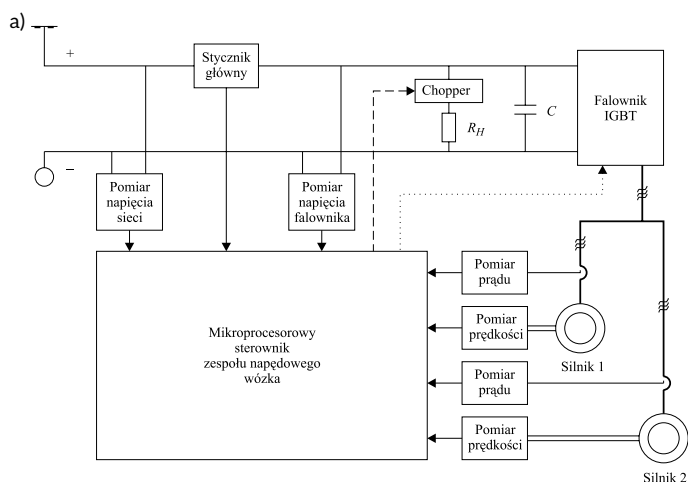
Źródło: [A22]

falownik napięcia o regulowanej częstotliwości przy zachowaniu stałego stosunku amplitudy tego napięcia do częstotliwości (tzw. sterowanie  $U/f$ ), bez podporządkowanej mu, jak w kaskadowych napędach prądu stałego, regulacji prądu roboczego silnika i bez kontrolowania wartości momentu rozwijanego przez silnik [B6, B19, B25, B30, B33].

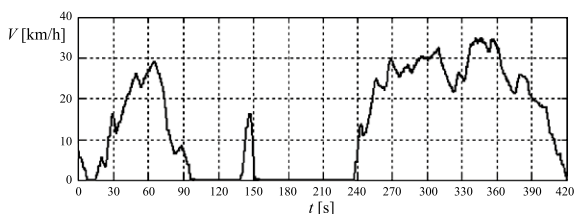
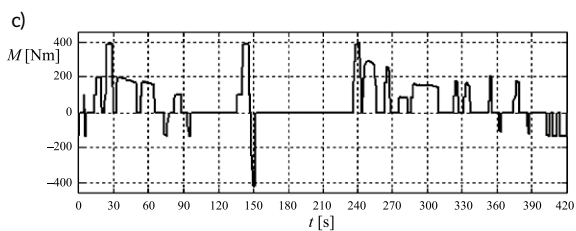
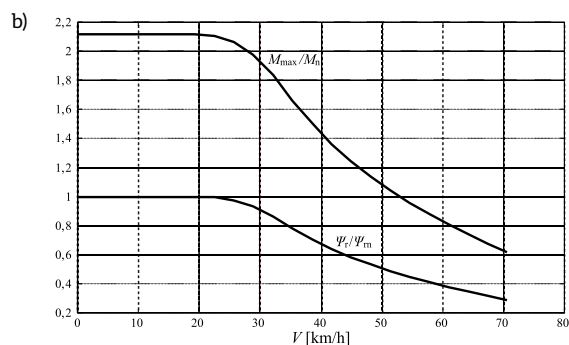
Na rysunku 4 przedstawiono przykład napędu, opracowanego w 2003 roku w Instytucie Automatyki PŁ we współpracy z ZEP ENIKA w Łodzi i po raz

pierwszy przetestowanego na modernizowanym tramwaju udostępnionym przez MPK Łódź. W układzie napędowym ENI-ZNAP także są wykorzystane dwa silniki indukcyjne zasilane z jednego falownika napięciowego. Ale zastosowano tu już po raz pierwszy w Polsce sterowanie wektorowe według własnego pomysłu, a mianowicie sterowanie prądowo zorientowane [A7, A8, A9, A10, A13, A14, A15, A16, A39]. Omawiane tu rozwiązanie jest przeznaczone do zabudowy w modernizowanych wagonach





**Rys. 4.** Falownikowy, asynchroniczny napęd wózka tramwajowego z wektorowym sterowaniem prądowo zorientowanym jednego z silników, przeznaczony do tramwajów typu 105N, opracowany w Politechnice Łódzkiej we współpracy z ZEP ENIKA w Łodzi: a) schemat ideowy; b) założone charakterystyki statyczne zależności od prędkości jazdy tramwaju: amplitudy strumienia magnetycznego skojarzonego z uzwojeniem wirnika oraz momentu wewnętrznego dla pojedynczego silnika; c) przebieg prędkości tramwaju (poniżej) i momentu zadawanego przez motorniczego na każdy z silników (powyżej), zarejestrowane w czasie jazdy ulicznej Źródło: [A7, A10]



typu 105N, nadal eksploatowanych w Polsce, w których zamiast dotychczasowych silników prądu stałego są montowane cztery asynchroniczne silniki trakcyjne typu STDa 200L4 produkcji EMIT Żychlin o mocy 50 kW każdy. Silniki są zasilane za pomocą falowników ENI-F600/360/3H zamontowanych w przestrzeni po rozruszniku oporowym GBT.

Sterowanie to stanowiło rozwinięcie koncepcji sterowania opracowanej i wdrożonej w tyrystorowych falownikach prądowych z klatkowymi silnikami indukcyjnymi o mocy 10 kW, skonstruowanych na początku lat osiemdziesiątych XX wieku w Instytucie Automatyki PŁ na zamówienie Ośrodka Badawczo-Rozwojowego CHEMOAUTOMATYKA z Warszawy i zastosowanych do napędu tanków fermentacyjnych w Zakładach Farmaceutycznych POLFA w Pabianicach.

W omawianym tu napędzie sterowanie momentem wewnętrznym silnika odbywa się za pośrednictwem zadawania amplitudy wektora prądu stojana i chwilowego położenia kąowego zsynchronizowanego wirującego układu współrzędnych odniesienia. Do tego

wirującego, prądowo zorientowanego układu współrzędnych są przeliczane składowe rzeczywistego wektora prądu stojana mierzone w nieruchomym układzie współrzędnych i porównywane z wartościami zadanymi (zadawana składowa urojona prądu jest oczywiście zawsze równa zero). Na podstawie tak wyznaczonych błędów odtwarzania przez falownik w uzwojeniach silnika zadawanego wektora prądu wektorowy regulator prądu oblicza odpowiednie składowe wektora napięcia stojana, które po przeliczeniu do układu nieruchomego służą w modulatorze PWM do wyznaczania chwil przełączeń kluczy falownika napięciowego.

W układzie napędowym przedstawionym na rysunku 4 oba silniki są zasilane z tego samego falownika, ale wektorowo jest sterowany tylko jeden z nich – ten, który wybrano do pracy w układzie zamkniętym ze sprzężeniami zwrotnymi od wektora prądu stojana i od prędkości kąowej wirnika. W sytuacji, gdy w drugim silniku (identycznym jak ten pierwszy – sterowany, i za nim nadążającym) uzwojenia jego stojana są zasilane dokładnie tym samym napięciem, a jego wał pozostaje praktycznie

sprzęgnięty za pośrednictwem kół o tych samych średnicach, toczących się po tym samym podłożu, mamy do czynienia ze specyficzną odmianą napędu grupowego. Nadążanie tego drugiego silnika, zasilanego napięciem w układzie otwartym, towarzyszącego pierwszemu – sterowanemu, wynika z naturalnych właściwości maszyn asynchronicznych. W silnikach indukcyjnych moment napędowy jest funkcją różnicy prędkości (poślizgu) występującego pomiędzy wirującym polem magnetycznym stojana a wirnikiem. Jeśli wał silnika towarzyszącego (nadążającego za silnikiem sterowanym) przyspieszy w stosunku do wału silnika sterowanego, to jego poślizg się zmniejszy i zmniejszy się rozwijany moment napędowy, nie pozwalając na nadmierny wzrost prędkości. I odwrotnie, jeżeli silnik towarzyszący zostanie przyhamowany, to jego poślizg wzrośnie i odpowiednio wzrośnie moment napędowy, pozwalając na pokonanie zwiększonych oporów. Pomiary prądu i prędkości w silniku niesterowanym (towarzyszącym) służą jedynie kontroli poprawności jego pracy i zwiększeniu niezawodności napędu. W przypadku uszkodzenia układów pomiarowych w silniku sterowanym

sterowanie może być przeniesione na drugi silnik. Przeniesienie sterowania może również nastąpić w przypadku stwierdzenia zbyt dużych różnic między stanami silników obserwowanych na podstawie mierzonych przebiegów prądu i prędkości kątowej.

Choć obecnie w Polsce w nowych tramwajach projektowane są głównie układy napędowe z silnikami asynchronicznymi, jednak czoperowy napęd DC jest nadal konkurencyjny w przypadku modernizacji istniejących tramwajów wyposażonych w szeregowy silnik prądu stałego. Ze względu na mniejsze gabaryty silników AC przy tych samych mocach uważa się, że napęd asynchroniczny jest uzasadniony technicznie dla pojazdów szynowych o mocy większej niż 1 MW na oś oraz w tramwajach niskopodłogowych. W pozostałych przypadkach tego uzasadnienia nie ma. Dlatego rozwiązania sterowania impulsowo silnika prądu stałego mogą znajdować zastosowanie przede wszystkim w tramwajach. Problemem pozostaje jednak w tym przypadku awaryjność silników prądu stałego i częstsze przeglądy konserwacyjne.

Eksploatacja pierwszych tramwajowych napędów asynchronicznych z silnikami indukcyjnymi zasilanymi grupowo ze wspólnego falownika napięciowego i sterowanymi w układach otwartych (bez prądowych sprzężeń zwrotnych) wykazała, że w przypadku wystąpienia w jednym z silników należących do takiej grupy raptownych zaburzeń w jednostajnym ruchu obrotowym jego wirnika, w stosunku do wirowania wektora napięcia wyjściowego falownika w uzwojeniach fazowych jego stojana, pojawiają się duże wartości chwilowe w przebiegach prądów [A7, A9, A10]. Takie gwałtowne skoki wartości prądów obciążenia falownika mogą w skrajnym przypadku doprowadzić do nieoczekiwanych wyłączeń całego napędu w trybie awaryjnym, co jest wielce niepożądane ze względów ruchowych, gdyż niespodziewane zatrzymanie tramwaju w trakcie normalnej jazdy w mieście pociąga za sobą poważne zakłócenia w działaniu komunikacji miejskiej. Powód ten przez bardzo długi czas był przyczyną pewnej niechęci pracowników przedsiębiorstw komunikacji miejskiej do wprowadzania napędów asynchronicznych do

normalnej eksploatacji w pojazdach takich, jak tramwaje czy trolejbusy. Przyczyną takich zaburzeń mogą być czasem nieoczekiwane poślizgi jednej z dwóch osi kół napędowych danego wózka, ale przede wszystkim są nimi przejazdy pojazdu poruszającego się ze zbyt dużą prędkością przez zwrotnice, rozjazdy i krzyżaki, które powodują „stukanie” kół natrafiających na poprzeczne nierówności torowiska. Szczególnie może być to dotkliwie, gdy koła napędzane przez różne silniki, ale zasilane z tego samego falownika, w wyniku niejednakowego zużycia ich obręczy mają zauważalne różnice w średnicach.

W trakcie normalnej jazdy po gładkim torze obręcze (wieńce) kół pojazdu szynowego toczą się swoimi powierzchniami tocznymi po płaskiej główce szyny. Obrzeża tych obręczy, znajdujące się od strony wewnętrznej, mają nieco większą średnicę po to, by pojazd w czasie jazdy nie zsunął się z torowiska w bok. Wysokość obrzeża w odniesieniu do powierzchni tocznej obręczy zależy od typu pojazdu (kolej, tramwaj itp.) oraz od stopnia zużycia i waha się zwykle w granicach od 2,5 do 3,5 cm. Jeśli koło takie trafia na lukę w torze i jego obręcz przez krótką chwilę opiera się nie swoją powierzchnią roboczą na główce szyny, lecz jej obrzeżem na płaskim połączeniu pomiędzy szynami różnych torów, to może to oznaczać, że w ułamku sekundy pojazd oparty na osi takiego koła na krótką chwilę może unieść się nawet o 3,5 cm. Jak wiadomo z dostępnej literatury, w tramwaju 105N masa wagonu z pasażerami wynosi ok. 26 ton, zastosowane w napędach asynchronicznych cztery silniki mają moc po 50 kW każdy, a średnica kół wynosi 64 cm. Silniki asynchroniczne, mające po dwie pary biegunów, produkowane w zakładach EMIT w Żychlinie, zostały w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie zaprojektowane tak, by w modernizowanych tramwajach można je było wstawiać na miejsce dawnych silników szeregowych prądu stałego, łącząc z istniejącymi przekładniami mechanicznymi wózków. W wyniku tego znamionowej częstotliwości napięcia zasilania tych silników otrzymanego z falowników wynoszącej 65 Hz odpowiada prędkość jazdy tramwaju wynosząca 31,5 km/h.

Jak wynika z powyższych danych, masa tramwaju przypadająca na jedną oś to  $26 \text{ ton} / 4 = 6500 \text{ kg}$ . W razie raptownego najeżdżania koła na tak niewielką wydatkałoby się przeszkodę (co oznacza skokowy wzrost średnicy koła o  $3,5 / 64 \cdot 100\% = 5,5\%$ ), przyrost energii potencjalnej związanej z uniesieniem takiej masy w górę wyniesie  $6500 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,035 \text{ m} = 2,23 \text{ kWs}$ . Przyrost tej energii odbywa się kosztem utraty energii kinetycznej, związanej z jadącym tramwajem, czy inaczej z obracającym się kołem lub jeszcze inaczej z wałem silnika sztywno sprzęgniętego z tym kołem. Taką utratę energii kinetycznej w pojeździe o stałej masie powoduje pojawienie się dodatkowego składnika momentu oporowego na wale silnika, mającego postać krótkotrwałego impulsu. Żeby nie pogrążyć się w żmudnych obliczeniach związanych ze szczegółową analizą czasową zjawisk towarzyszących takiemu zdarzeniu, można posłużyć się prostym oszacowaniem. Jeżeli czas trwania zdarzenia polegającego na najeżdżaniu koła na poprzeczną krawędź przeszkody oceni się na 0,1 sekundy, to następujący w tym czasie wzrost mocy obciążającej wał silnika wyniesie  $2,23 \text{ kWs} / 0,1 \text{ s} = 22,3 \text{ kW}$  (ponieważ dla uproszczenia przekładnia została tu uznana za bezstratną). Jeśli tramwaj najeżdża na taki element torowiska z prędkością 15 km/h, to oznacza, że stojany wszystkich silników są zasilane napięciem o częstotliwości  $(15 \cdot 65) / 31,5 = \text{ok. } 31 \text{ Hz}$ , czyli wał silnika wykonuje  $31 \text{ Hz} / 2 \text{ pary biegunów} = 15,5 \text{ obrotów}$  na sekundę, czyli obraca się z prędkością kątową ok.  $2\pi \cdot 15,5 = 97,4 \text{ rad/s}$ . Stąd skok momentu oporowego odpowiadającego obliczonemu wyżej skokowi mocy wynosi  $22 \text{ 300 W} / 97,4 \text{ rad/s} = 229 \text{ Nm}$ . Dla wyobrażenia sobie, co takie zdarzenie oznacza dla silnika indukcyjnego zasilanego ze źródła napięciowego, warto porównać tę liczbę z wartością znamionową momentu obrotowego tych silników. Przy zasilaniu ich napięciem o częstotliwości 65 Hz synchroniczna prędkość kątowa wału wynosi  $2\pi \cdot 65 / 2 = 204,2 \text{ rad/s}$ , a wartość znamionowa momentu – w przybliżeniu (pomijając niewielki poślizg)  $50 \text{ kW} / 204,2 \text{ rad/s} = 245 \text{ Nm}$ . Dlatego też trakcyjne napędy grupowe z kilkoma silnikami

asynchronicznymi zasilanymi ze wspólnego falownika są szczególnie wrażliwe na wszelkie zakłócenia związane z gwałtownymi szarpnięciami pojawiającymi się w ruchu obrotowym napędzanych nimi kół.

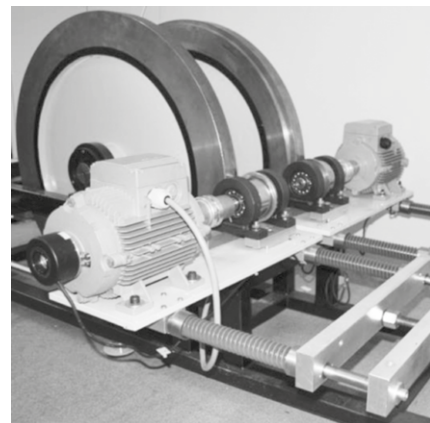
Jak z przeprowadzonych wyżej rozważań wynika, nawet tak niewielkie wydawałoby się „stuknięcie” koła o nierówność torowiska (tu trwające 0,1 s) wywołuje w sprzęgniętym z tym kołem silniku efekt gwałtownego, ale krótkotrwałego, pojawienia się na wale momentu obciążenia o wartości porównywalnej z wartością momentu znamionowego silnika. Problemowi związanemu ze zjawiskami zakłóceń pojawiających się w pracy dwusilnikowego napędu trakcyjnego, powodowanych nierównomiernością toczenia się kół jezdnych po wspólnym podłożu, postanowiono dokładniej przyjrzeć się w Zakładzie Techniki Sterowania Instytutu Automatyki PŁ w ramach projektu badawczego MNiSzW nr N N510 679740 pt.: „Grupowy trakcyjny napęd indukcyjny z pośrednią kontrolą momentu, zasilany z falownika napięciowego, pracującego z obniżoną częstotliwością przełączeń”, realizowanego w latach 2011–2013 [A11, A12]. W ramach tego projektu zbudowano oryginalne stanowisko badawcze do praktycznego testowania algorytmów sterowania dwusilnikowym napędem grupowym, przewidzianych do wykorzystania w trakcyjnych napędach asynchronicznych pojazdów szynowych (rys. 5).

Zamiast budować rzeczywisty tor z naturalnymi przeszkodami odwzorowującymi obecność zwrotnic, rozjazdów czy krzyżaków na trasie przejazdu, po którym jeździłby niewielki pojazd eksperymentalny, postanowiono odwrócić problem. Oba badane silniki zamocowano do nieruchomej ramy, a po ich kółkach o małych średnicach zamocowanych na ich wałach toczyło się „torowisko” w postaci dwóch sztywno ze sobą połączonych masywnych dużych stalowych kół (o łącznej masie ok. 350 kg) z zagłębioną na ich obwodzie powierzchnią toczną, wyfrezowaną mimośrodowo względem kolistej krawędzi zewnętrznej obrzeży. Uzyskane w ten sposób zmiany wielkości tego zagłębienia odpowiadały zjawisku „stawania” na krawędzi obrzeża

koła jezdnego w rzeczywistym pojeździe szynowym. Dzięki takiemu podejściu do rozwiązania problemu budowy stanowiska badawczego jego całość, zamiast zajmować spory obszar w terenie na zewnątrz budynku, zmieściła się na niewielkiej powierzchni w pokoju laboratoryjnym.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że w przypadku napędów grupowych, gdzie dwa silniki są ze sobą połączone od strony zasilania elektrycznie tym samym falownikiem napięciowym, a od strony wałów mechanicznie – poprzez koła toczące się z tarciem lub bez, ale po wspólnej, lecz nierównej jezdni, istnieje zawsze możliwość takiego doboru algorytmu sterowania tymi silnikami, która pozwoli zmniejszyć niepożądane skoki wartości prądów w stojanach – bardziej lub mniej, ale nie wyeliminować całkowicie. Najskuteczniejsze jednak ograniczenie opisanych wyżej negatywnych zjawisk w każdym przypadku da się uzyskać jedynie w wyniku zastosowania do zasilania tych silników oddzielnych, niezależnych od siebie falowników, najlepiej z własnymi algorytmami sterowania wektorowego opartymi na możliwie dokładnej regulacji wektorów prądu obu stojanów. Ponieważ w przedstawionym wyżej stanowisku badawczym był zainstalowany jedynie jeden falownik, więc aby uzyskać potwierdzenie powyżej sformułowanej tezy, posłużono się modelowaniem komputerowym w programie PSIM tego „pojazdu”, jakim fizycznie to stanowisko było. Wyniki porównawczych badań symulacyjnych przedstawiono na rysunku 6.

Obniżające się ciągle ceny wszelkich komponentów niezbędnych do budowy przekształtników energoelektronicznych oraz ich mikroprocesorowych sterowników powodują, że podzielenie w pojeździe jednego falownika o dużej mocy na kilka mniejszych falowników nie wiąże się już z nadmiernym wzrostem kosztów produkcji takich zindywidualizowanych napędów. Z punktu widzenia rozlokowania wewnątrz pojazdu urządzeń napędowych jest to nawet bardzo korzystne, bo zawsze łatwiej jest zbudować kilka mniejszych skrzynek niż jedną wielką. A ponadto wygoda polegająca na uproszczeniu algorytmów regulacyjnych oraz

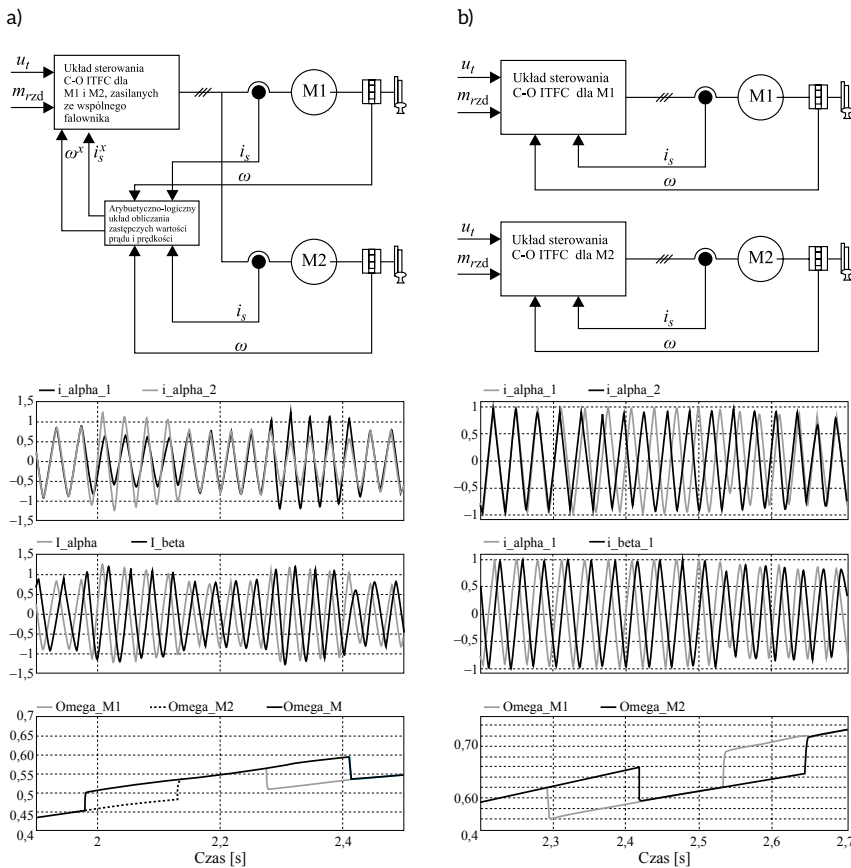


Rys. 5. Stanowisko badawcze do modelowania pracy napędu trakcyjnego w stanach wywołanych nagłą zmianą prędkości kątowej kół pojazdu (Zakład Techniki Sterowania Instytutu Automatyki PŁ) Źródło: [A11]

pojawiająca się możliwość radykalnego poprawienia właściwości trakcyjnych pojazdów, dzięki niezależnemu od siebie kontrolowaniu zachowania się poszczególnych kół, jest znaczna. Warto przy tej okazji zauważyć, że w dawnych czasach, gdy w charakterze napędów o najwyższej jakości stosowane były powszechnie napędy prądu stałego z silnikami obcowzbudnymi i kaskadowym sterowaniem z podporządkowaną regulacją prądu twornika, każdy z tych silników miał przecież własny, od innych napędów zupełnie niezależny komutator. Także więc teraz w napędach z trójfazowymi silnikami prądu przemiennego falowniki zasilające uzwojenia stojanów stanowią rodzaj „komutatorów elektronicznych” (nawet o większych możliwościach regulacji niż te dawne – mechaniczne). Nie powinno więc być zaskoczeniem, że dla zapewnienia jak najlepszych właściwości eksploatacyjnych takich napędów te „komutatory” (czyli falowniki) rzeczywiście powinny być zindywidualizowane, czyli przypisane do konkretnego silnika. I taki trend wśród producentów tych silników jest już obecnie obserwowany, wiele bowiem firm produkujących kompaktowe silniki synchroniczne PMSM do specjalnych zastosowań (a więc dosyć drogie) oferuje je właśnie z falownikami i ich sterownikami już wmontowanymi bezpośrednio w obudowach stojanów.

Takich problemów z niejednakowym obciążeniem wałów kilku silników elektrycznych poruszających pojazd,





**Rys. 6.** Wyniki porównawczych badań symulacyjnych grupowego napędu trakcyjnego przy „jeździe” modelowego „pojazdu laboratoryjnego” po nierównościach torowiska w przypadku zasilania silników: a) z jednego falownika i wyborze większej spośród wartości modułu wektora prądu stojana pomierzonych w każdym z obu silników; b) z dwóch oddzielnych falowników z pełnym sterowaniem wektorowym dla każdego silnika, całkowicie niezależnych od siebie (C-O ITFC: prądowo zorientowane sterowanie pośrednie momentem i strumieniem, ang. *current-oriented indirect torque and flux control*)

Źródło: [A12]

wynikającego ze zmieniających się raptownie warunków terenowych, na jakie natrafiają toczące się po powierzchni terenu koła napędowe pojazdu, nie spotyka się w trolejbusach, pojazdach w swej budowie i zasadach eksploatacji bardzo podobnych do tramwajów.

Trolejbusy to rodzaj autobusów wyposażonych w silnik elektryczny zainstalowany w nich zamiast silnika spalinowego, jeżdżących po ulicach miast na ogumionych kołach, ale mających na dachu dwa niezależne od siebie pałaki z odbierakami prądu ślizgającymi się po, w tym przypadku – podwójnych, przewodach elektrycznych sieci trakcyjnej, zawieszonych nad jezdnią tak jak w przypadku sieci tramwajowej. W napędach trolejbusów zwykle nie pojawiają się tak nieprzyjemne zjawiska, jak wspomniane

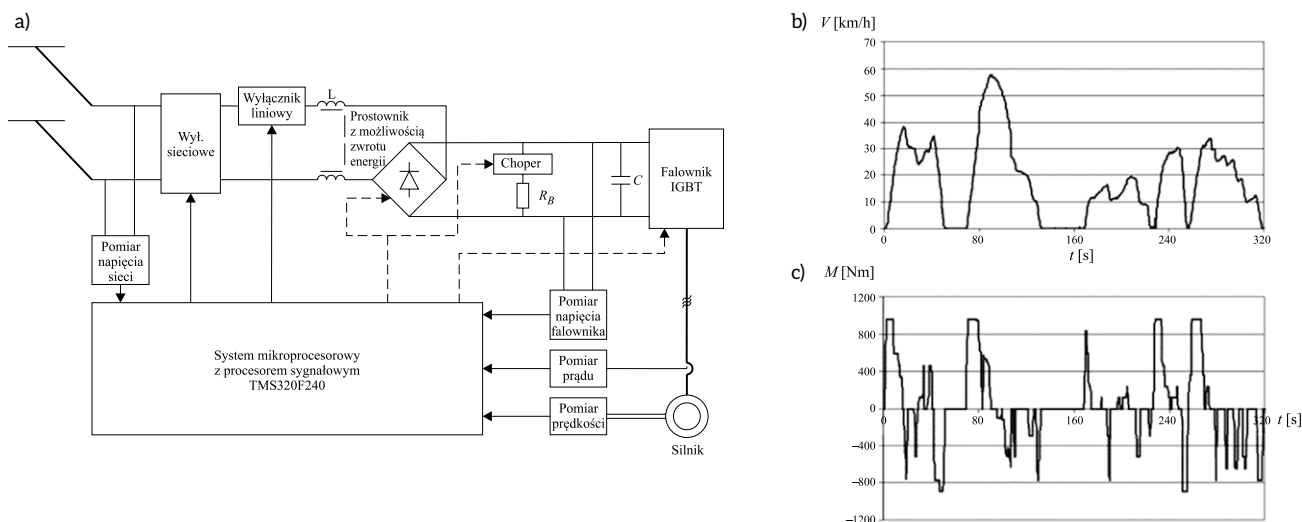
wyżej krótkotrwałe, raptowne podskoki wartości prądu roboczego. Po pierwsze, tego rodzaju pojazdy są napędzane tylko jednym silnikiem elektrycznym, ale o odpowiednio dużej mocy, więc do obwodu elektrycznego stojana zakłócenia od strony mechanicznej docierają tylko jednym torem. Po drugie zaś, koła należące do tej samej osi, znajdujące się po obu stronach pojazdu i w związku z tym mogące natrafić na różną jakość powierzchni drogi, są połączone ze sobą zawsze mechanizmem różnicowym jak w zwykłym samochodzie. Mechanizm ten, do którego dochodzi główny wał napędowy przenoszący moment obrotowy od silnika, na drodze mechanicznej dokonuje bez żadnego opóźnienia natychmiastowego podziału tego momentu pomiędzy napędzane koła

tak, że w przypadku natrafienia koła na poprzeczną przeszkodę tylko po jednej stronie pojazdu następuje od razu (zgodnie z zasadą dźwigni dwuramiennej) zmiana momentu napędowego przypadająca na drugie koło tej samej osi, a zatem nie pojawia się żaden skok w wypadkowym obciążeniu wału silnika elektrycznego.

Na rysunku 7 przedstawiono jako przykład napędu trolejbusowego asynchroniczny napęd opracowany w Politechnice Łódzkiej we współpracy z ZEP ENIKA w Łodzi, stanowiący kontynuację wcześniej opracowanego i wdrożonego falownikowego napędu tramwajowego opartego na tym samym algorytmie sterowania wektorowego prądowo zorientowanego. Jednostką napędową trolejbusu był silnik indukcyjny STDA 200 6B o mocy 165 kW, wykonany w zakładach EMIT w Żychlinie na zamówienie ZEP ENIKA. Silnik ten odpowiada gabarytami silnikowi prądu stałego o mocy 110 kW, produkowanemu przez zakłady ELMOR, stosowanemu powszechnie wcześniej w trolejbusach w Polsce [A8]. Zastosowany w tym trolejbusie falownik również ma taką samą strukturę jak falownik w napędzie tramwaju przedstawionym wcześniej. Jest zbudowany z inteligentnych modułów IGBT (tj. z rozbudowanym wewnętrznym systemem zabezpieczeń) połączonych w mostek 6T z dodatkowym tranzystorem (czoperem) umożliwiającym, podobnie jak w tramwajach, wytracanie na specjalnym rezystorze nadmiernej ilości energii elektrycznej podczas hamowania w sytuacji, gdy sieć trakcyjna nie jest w stanie jej odebrać.

Znaczącą różnicę w budowie napędu trolejbusowego i tramwajowego stanowi sposób połączenia z siecią trakcyjną. W tramwaju pantograf dotyka zawsze przewodu o tej samej polaryzacji, natomiast w trolejbusie występują dwa odbieraki prądu ślizgające się po dwuprzewodowej sieci trakcyjnej. W związku z tym na skrzyżowaniach linii trolejbusowych mogą wystąpić zwarcia pomiędzy odbierakami bądź chwilowe zamiany znaków napięcia zasilania. Układ napędowy trolejbusu musi być odporny na takie ewentualności. Aby zabezpieczyć się przed zmianą polaryzacji napięcia, wystarczy zastosować nawrotnik





**Rys. 7.** Falownikowy napęd asynchroniczny z wektorowym sterowaniem prądowo zorientowanym, przeznaczony do trolejbusu PR110E w Lublinie: a) schemat ideowy, b), c) przebieg prędkości trolejbusu (powyżej) i momentu napędowego silnika zadawanego przez kierowcę (poniżej), zarejestrowane w czasie jazdy ulicznej Źródło: [A8]

mechaniczny bądź półprzewodnikowy. Nawrotniki mechaniczne są bardzo drogie ze względu na konieczność stosowania styczników potrafiących przełączać prądy rzędu setek amperów. Nawrotnik półprzewodnikowy jest tańszy i można go wykonać, stosując tzw. mostek Graetza. Niestety obecność takiego mostka uniemożliwia zwrot energii do sieci trakcyjnej, co wpływa niekorzystnie na sprawność energetyczną całego napędu. Aby można było zwracać energię do sieci, należy zastosować dodatkowe elementy półprzewodnikowe. W omawianym napędzie w nawrotniku zastosowano dodatkowo tyrystory. Ich połączenie pozwala prądowi podczas hamowania „omijać” mostek Graetza i zwracać energię do sieci. Zwracanie energii do sieci jest możliwe jednak tylko przy jednej biegunowości napięcia. Budowanie układu pozwalającego na oddawanie energii dla obu biegunowości nie jest konieczne, gdyż „przebiegunowania” występują przede wszystkim w zajezdniach i na skrzyżowaniach. Struktura złożona z mostka prostowniczego i tyrystorów nie jest jednak rozwiązaniem doskonałym. Istnieje bowiem niebezpieczeństwo, że podczas hamowania z oddawaniem energii do sieci może nastąpić zwarcie odbieraków. Zagrożenie takie występuje szczególnie podczas przejazdu przez niektóre typy skrzyżowań. Przez załączone tyrystory popłynie

wtedy prąd o dużej wartości, którego nie będzie można już wyłączyć aż do całkowitego rozładowania kondensatorów w falowniku, co z kolei doprowadza do wyłączenia napędu. Należy się przed tym zabezpieczać i umożliwić kierowcy wyłączenie hamowania odzyskowego przed wjazdem na odcinek o innej polaryzacji zasilania lub przed przejazdem przez zwarcie tak, aby nie było możliwości zainicjowania przepływu prądu w tyrystorach.

Pomimo tych dodatkowych (w porównaniu z tramwajami) utrudnień trolejbusy nadal chętnie są użytkowane w niektórych dużych miastach. Zawdzięczają to swojej zwrotności, zdecydowanie większej niż w przypadku tramwajów, dającej możliwość omijania nieoczekiwanych przeszkód pojawiających się na trasie przejazdu. Szczególnie dotyczy to obszarów o gęstej zabudowie i wysokich budynkach, gdzie ulice bywają wąskie i kręte, ale potrzebna jest sieć komunikacji miejskiej o możliwie dużej przepustowości. W takich przypadkach, przy ograniczonej możliwości naturalnej wymiany powietrza, użytkowanie zwykłych autobusów z typowym napędem spalinowym zagraża wręcz zdrowiu mieszkańców. W Polsce trolejbusy są nadal eksploatowane przez przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej w trzech miastach: Gdyni, Lublinie i w Tychach.

Z powyższego omówienia dotyczącego trolejbusów wynika, że nawet bezpośrednie podłączenie samochodu elektrycznego przewodami do źródła energii elektrycznej nie uwalnia nas od licznych problemów związanych z bezpieczną eksploatacją takich pojazdów w ruchu miejskim. W przypadku komunikacji miejskiej dobrym, kompromisowym rozwiązaniem będzie wprowadzenie na szeroką skalę autobusów z napędem hybrydowym (ale z zakazem używania silnika spalinowego na określonych odcinkach trasy – czyli w obszarach najbardziej zagrożonych smogiem) lub autobusów wyłącznie z napędem elektrycznym, typu BEV (czyli z akumulatorem okresowo doładowywanym), co pozwoli na zachowanie czystego powietrza i uwolnienie się od już niepotrzebnej wtedy sieci trakcyjnej, w sumie przecież nie tylko niezbyt praktycznej, ale i poważnie szpecącej wygląd miasta. ■

Bibliografia dostępna pod linkiem: [nis.com.pl/bibliografia.html](https://nis.com.pl/bibliografia.html)

Fragment pochodzi z książki: *Elektryczny napęd trakcyjny*, Andrzej Dębowski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019