ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ELEKTRYKA z.139 Nr kol.1247

Tadeusz GLINKA

Eugeniusz KAŁUŻA

KIERUNKI MODERNIZACJI UKŁADU NAPĘDOWEGO TRAMWAJU

Streszczenie. W artykule przedstawiono kierunki prac wdrożeniowych i badawczych, które zostały podjęte w ramach prac związanych z modernizacją taboru trakcyjnego. Przedstawiono ocenę efektywności wprowadzania elektronizacji napędów głównych taboru tramwajowego. Zaprezentowano koncepcję układu napędowego tramwaju zestawionego z falowników napięcia i silników indukcyjnych.

THE TRENDS IN MODERNIZATION OF TRAMWAY DRIVE SYSTEM

Summary. The trends of research and development arising from the proposed modernization of tramway stock have been shown in the paper. The changes involve the introduction of semiconductior technology and power electronics devices. The costs of modernized traction drives have been estimated. The idea of new tramway drive system utilizing voltage-source inverter-fed induction motors has been presented.

НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТРАМВАЙНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Резюме. В статье рассматриваются направления работ по внедрению и исследованию, которые были начаты в рамках модернозации подвижного состава с электротягой. Представлена оценка эффективности внедрения электроники в приводах трамвайного подвижного состава. Изложена концепция создания трамвайного электропривода, созданного на базе инверторов напряжения и асинхронных двигателей.

1. WPROWADZENIE

Trakcja elektryczna jest jednym z większych odbiorców energii elektrycznej w kraju. Niski poziom techniczny urządzeń taboru trakcyjnego powoduje, że energia ta nie jest optymalnie wykorzystana. Szacuje się [1,2], że w trakcji elektrycznej niepotrzebnie traci się około 20% zużywanej energii w rezystorach w czasie rozruchu, nie odzyskując energii hamowania taboru. Poziom techniczny taboru trakcyjnego w Polsce odpowiada światowemu stanowi techniki z lat 50 i 60.

Modernizacja wyposażenia elektrycznego taboru tramwajowego powinna obejmować elektronizację układu napędowego, obwodów pomocniczych i układu sterowania. Korzyści wynikające z elektronizacji układu napędowego tramwaju, to eliminacja strat energii w rezystorach rozruchowych wydzielanych przy rozruchu pojazdu oraz możliwość odzyskania energii kinetycznej pojazdu w czasie hamowania. Możliwość pełnego odzysku energii hamowania pojazdu trakcyjnego warunkowana jest koniecznością wyposażenia podstacji trakcyjnych w prostowniki sterowane lub zasobniki energii. Wyposażenie pojazdu trakcyjnego w szeroką gamę przetworników pomiarowych, np. przyspieszenia, prędkości, prądu, napięcia i innych oraz zastosowanie mikroprocesorów w obwodach sterujących umożliwia w sposób automatyczny programowanie jazdy pojazdu trakcyjnego od przystanku do przystanku według kryterium minimum zużycia energii przy założonym czasie przejazdu.

Rozwiązania układów napędowych eksploatowanego obecnie taboru tramwajowego można podzielić na trzy grupy:

a) napędy konwencjonalne,

b) przekształtnikowe napędy prądu stałego,

c) napędy z 3-fazowymi silnikami prądu przemiennego.

Pojęciem napędy konwencjonalne określono układy napędowe z silnikami szeregowymi prądu stałego, których rozruch i hamowanie przeprowadza się za pomocą rezystorów. Trakcyjne napędy przekształtnikowe prądu stałego wykonuje się najczęściej jako układy z silnikiem szeregowym, chociaż czasem można spotkać się z zastosowaniem silnika obcowzbudnego lub szeregowo-bocznikowego. Regulację napięcia zasilającego silnik uzyskuje się dzięki zastosowaniu przerywaczy (chopperów) tyrystorowych lub tranzystorowych.

Ostatnią grupę napędów trakcyjnych stanowią napędy z 3-fazowymi silnikami prądu przemiennego. Ten typ napędów pojawił się dopiero w latach 80. Najczęściej stosowanym

układem napędowym tej grupy jest napęd z silnikiem indukcyjnym klatowym zasilanym z energoelektronicznego falownika napięcia, zestawionego z tyrystorów wyłączalnych GTO lub tranzystorów mocy typu IGBT.

2. WSTĘPNA OCENA EFEKTYWNOŚCI WPROWADZENIA ELEKTRONIZACJI NAPĘDÓW GŁÓWNYCH TABORU TRAMWAJOWEGO

Przedstawiona analiza efektywności wprowadzenia elektronizacji napędów głównych taboru tramwajowego sprowadzona została do wyznaczenia różnicy całkowitych rocznych kosztów eksploatacji taboru trakcyjnego konwencjonalnego, wyposażonego w rezystorowe układy rozruchowe i taboru, w którym zastąpiono wymienione układy rezystorowe układami przekształtnikowymi. Powyższa różnica całkowitych rocznych kosztów eksploatacji ΔK stanowi korzyść, jaką uzyska się z wprowadzenia nowoczesnych układów napędowych do taboru trakcyjnego.

W równaniu (1), opisującym różnicę omówionych kosztów eksploatacji, pomija się koszty, które znoszą się w wyniku substytucji porównywalnych składników kosztów.

$$\Delta K = (I_{rez} - I_{przek})P_{am} + (K_{en.rez} - K_{en.przek}) + \\ + (K_{rem.rez} - K_{rem.przek}) + (K_{rem.spa} - K_{rem.se}), \qquad (1)$$

gdzie:

I_{rez} - cena zakupu układu rezystorów rozruchowych (hamowania) wraz z aparaturą łączeniową,

I_{przek} - cena zakupu przekształtnika oraz rezystora hamowania

P_{am} - opisy amortyzacyjne,

$K_{en.rez}$ - koszt energii elektrycznej zużytej w ciągu 1 roku przez pojazd wyposażony w rezystorowy układ rozruchu i hamowania realizujący określoną pracę trakcyjną,

$K_{en.przek}$ - koszt energii elektrycznej zużytej w ciągu 1 roku przez pojazd wyposażony w przekształtnik realizujący porównywalną pracę trakcyjną z pracą pojazdu konwencjonalnego,

$K_{rem.rez}$, $K_{rem.przek}$ - roczne koszty przeglądów i napraw układów rezystorowych i przekształtników,

$K_{rem.sps}$, $K_{rem.sa}$, - koszty napraw silników prądu stałego i silników indukcyjnych odniesione do jednego wagonu i jednego roku.

W cenie jednostkowej energii elektrycznej obejmującej wszystkie składniki kosztów użytkowania energii uwzględniono możliwość ograniczenia kosztów zamawiania mocy szczytowej dla podstacji trakcyjnych zasilających rejony obsługiwane przez pojazdy wyposażone w przekształtniki. Pojazdy te cechją się mniejszym zużyciem energii w czasie rozruchu, ograniczając moc szczytową podstacji trakcyjnej. Różnicę kosztów energii zużytej przez pojazdy wyposażone w rezystorowe układy rozruchowe i układy przekształtnikowe można obliczyć z zależności:

$$\Delta K_{en} = K_{en.rez} - K_{en.przek} = c_{jen}\,\Delta A, \qquad (2)$$

gdzie:

ΔA - oszczędność energii wynikająca z eliminacji strat energii w rezystorach rozruchowych oraz z odzysku energii w czasie hamowania,

c_{jen} - cena jednostkowa energii elektrycznej.

Na podstawie pracy [3] jednostkowe zużycie energii przez tramwaj 105N wynosi, w warunkach polskich, przeciętnie 120-130 W·h/t·km. Wprowadzenie w miejsce układu rezystorowego impulsowego układu rozruchowego spowoduje zmniejszenie jednostkowego zużycia energii o 20-25%, a zastosowanie hamowania z odzyskiem energii zmniejszy zużycie energii o dalsze 20%. Zatem jednostkowe zużycie energii może zostać ograniczone do ok. 70-80 W·h/t·km. Stąd oszczędność energii odniesiona do pracy trakcyjnej 1 t·km wyniesie:

$$j = 120 - 80 = 40 \text{ W·h/t·km}.$$

Uwzględniając masę tramwaju typu 105N przeciętnie zapełnionego $m_w + m_{pas} = 19{,}5$ t, a także przeciętny roczny przebieg tramwaju $L_{rocz} = 60\,000$ km (dane z Wojewódzkiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Katowicach) otrzymano następującą oszczędność zużycia energii elektrycznej na 1 wagon i na 1 rok eksploatacji:

$$\Delta A = j(m_w + m_{pas})\cdot L_{rocz} = 40(16{,}5+3)\cdot 60\,000\cdot 10^{-3} = 46\,800 \text{ kWh}. \qquad (3)$$

Korzyści ΔK obliczono przy następujących założeniach:

1. Cena zakupu silnika trakcyjnego prądu stałego wraz z hamulcem bębnowym i przekładnią będzie zbliżona do ceny zakupu silnika indukcyjnego wyposażonego w hamulec tarczowy i zmodernizowaną przekładnię.

2. Składniki równania 1 odniesiono do poziomu cen z I kwartału 1994 r.

I_{rez} - 40 mln zł - cena rozrusznika GBT-373,

$I_{przek(p)}$ - 260 mln zł - cena zespołu przerywaczy tyrystorowych,

P_{am} - 0,07 - odpisy amortyzacyjne,

$K_{rem.rez}$ - = 0,5 I_{rez} (w ciągu roku przeprowadza się przeciętnie od 2 do 2,5 napraw rozrusznika, roczny koszt tych napraw mieści się 20 do 100 % ceny nowego rozrusznika),

$K_{rem.przek(f)}$ = 20 mln zł (wartość szacunkowa),

$K_{rem.przek(p)}$ = 10 mln zł (wartość szacunkowa),

$K_{rem.as}$ = 0,5 $K_{rem.sps}$ = 20 mln zł (wartość szacunkowa).

Wartość zaoszczędzonej energii elektrycznej w ciągu roku

$$K_{en} = c_{jen} A = 830 \cdot 46\,800 \cdot 10^{-6} = 39 \text{ mln zł.}$$

Korzyść wynikająca z elektronizacji taboru tramwajowego odniesiona do jednego roku eksploatacji jednego wagonu 4-osiowego wyniesie:

K = 34 mln zł - dla przerywaczy tyrystorowych,

K = 0 - dla falowników.

Mając na uwadze dalszy wzrost ceny energii elektrycznej, a także spadek cen i poprawę niezawodności przekształtników oraz wzrost kosztów remontowych, korzyść wynikająca z elektronizacji taboru tramwajowego będzie w przyszłości wyższa.

3. ELEKTRYCZNE NAPĘDY GŁÓWNE ZASTOSOWANE W TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ MIEJSKIEJ I PODMIEJSKIEJ

W trakcji miejskiej i podmiejskiej stosuje się powszechnie sieci trakcyjne prądu stałego o napięciach od kilkuset woltów do 3 kV. W rozwiązaniach konwencjonalnych korzysta się z silników szeregowych prądu stałego o rezystencyjnym układzie rozruchu i hamowania. W ten sposób jest rozwiązana praktycznie cała tramwajowa komunikacja miejska w Polsce.

W unowocześnionej wersji rozwiązania z silnikiem trakcyjnym prądu stałego zastępuje się rezystancyjny układ rozruchu tyrystorowym regulatorem napięcia (chopperem). Przykładem takiego rozwiązania może być szybki tramwaj w Karlsruhe (NRF) opracowany i wykonany przez Firmę ABB. Wagon tego tramwaju jest wyposażony w dwa silniki prądu stałego, chopper i jednostkę sterującą [4].

Nowsze rozwiązania opracowane ostatnio na świecie stosują 3-fazowe silniki prądu przemiennego zasilane z sieci prądu stałego przez falownik tyrystorowy. Przykładem takiego rozwiązania może być szybka kolej uruchomiona w końcu 1990 roku w Baltimore (USA) na trasie o długości 37 km. Kolej ta, zasilana z sieci prądu stałego o napięciu 750 V, jest wyposażona w cztery silniki indukcyjne klatkowe o mocy 160 kW każdy. Silniki te są zasilane z napięciowych falowników napięcia opartych na tyrystorach GTO [5]. Regulacja napięcia wyjściowego falowników odbywa się poprzez zmianę szerokości impulsów napięcia. Podstawowym rodzajem hamowania jest hamowanie ze zwrotem energii do sieci zasilającej prądu stałego. Oprócz hamowania elektrycznego, wagony posiadają awaryjne hamowanie mechaniczne. Podobny rodzaj silników napędowych zastosowano w pociągach metra w Monachium. Cztery silniki indukcyjne o mocy 185 kW każdy, zasilane są z sieci prądu stałego o napięciu 750 V poprzez tyrystorowy falownik prądu.

Najnowsze rozwiązania napędu głównego zastosowane zostały przez firmę Siemens w tramwajach niskopodłogowych przeznaczonych dla Frankfurtu/M [8]. W rozwiązaniu tym silnik indukcyjny chłodzony wodą zabudowany został w kole napędnym tramwaju. Wirnik silnika poprzez przekładnię planetarną napędza piastę koła, do której przymocowana jest tarcza hamulca. Silniki zestawu dwóch kół napędnych zasilane są z jednego falownika napięcia (tranzystory IGBT).

Literatura przedmiotu oraz analiza wyników eksploatacyjnych krajowych i zagranicznych przedsiębiorstw komunikacyjnych stanowią podstawę do wytyczenia zaleceń odnośnie do kierunków prac wdrożeniowych i badawczych związanych z unowocześnieniem napędów głównych taboru tramwajowego.

Jako szczególnie godne zalecenia należy wymienić dwa kierunki:

1. Powszechne zastępowanie w tramwajach już eksploatowanych napędów konwencjonalnych napędami z silnikami prądu stałego i tyrystorowymi regulatorami napięcia.
2. Opracowanie i wdrożenie do produkcji tramwaju napędzanego 3-fazowymi silnikami indukcyjnymi klatkowymi zasilanymi z tyrystorowych lub tranzystorowych falowników napięcia.

Wprowadzenie w trakcji tramwajowej napędów głównych z silnikami prądu stałego i tyrystorowymi regulatorami napięcia rozpoczęło się w chwili, gdy w roku 1988 Fabryka "Konstal" w Chorzowie wyprodukowała pierwszy, prototypowy egzemplarz tramwaju z takim napędem. Zastosowany w tym tramwaju regulator opracowano i wykonano w kraju korzystając

głównie z krajowych elementów. Od tego czasu nie zanotowano postępu w rozwoju napędów głównych tramwajów.

4. UKŁAD NAPĘDOWY TRAMWAJU Z SILNIKAMI INDUKCYJNYMI KLATKOWYMI

Na rys.1 przedstawiono nową wersję schematu blokowego układu napędowego tramwaju wraz z układem zasilania i sterowania opracowanego w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Politechniki Śląskiej w ramach pracy finansowanej przez KBN nr PB-330/9/91. Układ składa się z:

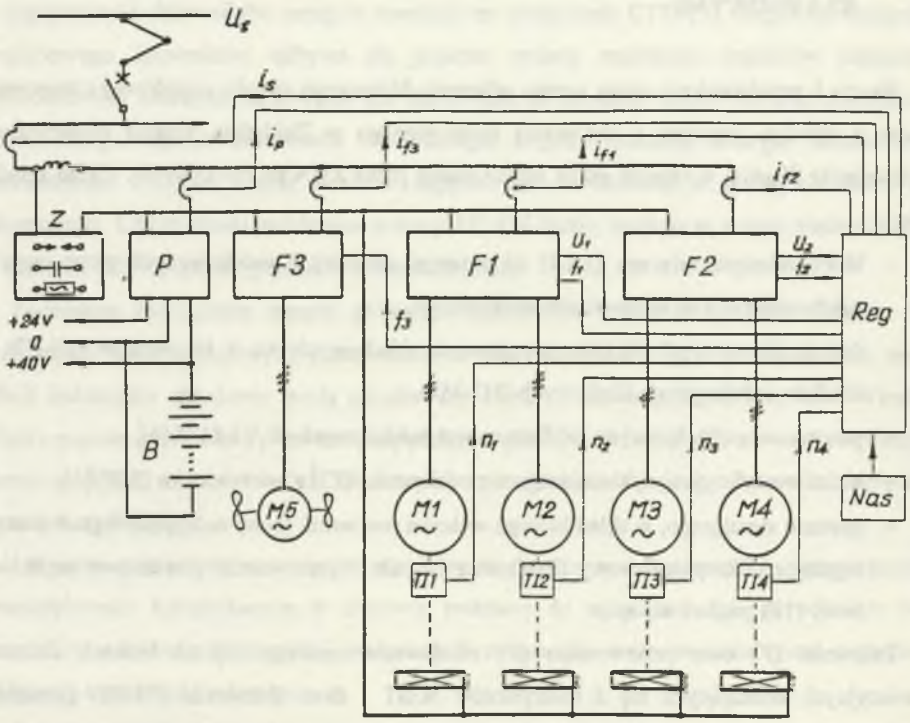
- bloku zabezpieczającego (Z,Dł) od przepięć sieciowych indukowanych przez innych użytkowników i wyładowań atmosferycznych,
- dwóch identycznych bloków napędowych składających się z falowników (F1-F2) i silników indukcyjnych klatkowych (M1-M4),
- przetwornicy (P), która jest źródłem napięć pokładowych 40 V i 24 V [6],
- bloku wentylacyjnego składającego się z falownika (F3) i wentylatorów (M5) [6],
- systemu sterującego, w skład którego wchodzi nastawnik (Nas) zadający program pracy, regulator mikroprocesorowy (Reg) oraz czujniki i przetworniki pomiarowe prędkości jazdy (TI), prądu i napięcia.

Falowniki (F) oraz przetwornica (P) zbudowano opierając się na blokach elektro-izolacyjnych składających się z tranzystorów IGBT i diod. Falowniki (F1-F2) posiadają parametry znamionowe 3x380 V; 100 kW; 60 Hz z możliwością regulacji częstotliwości w zakresie 5-140 Hz. Silniki trakcyjne (M1-M4) posiadają parametry znamionowe 3x380 V; 40 kW; 60 Hz, 1724 obr/min; (n_{max} = 4200 obr/min); [7] i są konstrukcyjnie przystosowane do zabudowy w tramwaju 105 N. Silniki wentylatorów M5-M6 są silnikami katalogowymi.

5. PODSUMOWANIE

Elektronizacja taboru trakcyjnego pozwala obniżyć zużycie energii elektrycznej i zwiększyć niezawodność pracy napędu. W przypadku tramwaju typu 105N roczne efekty ekonomiczne szacuje się na 34 mln zł dla układu napedowego prądu stałego. Obecnie eksploatowany tabor

tramwajowy może być modernizowany w ramach remontu generalnego. W celu zdobycia doświadczeń z trakcyjnymi napędami prądu przemiennego proponuje się zrealizować pełny zakres modernizacji tramwaju obejmujący wymianę obecnego układu napędowego na układ napędowy składający się z silników indukcyjnych klatkowych zasilanych z falowników napięcia sterowanych mikroprocesorem - rys.1.



Rys.1. Schemat zasilania i sterowania układem napędowym tramwaju

Fig.1. Supply and control diagram for tramway drive system

LITERATURA

1. Szczygieł A.: Produkcja taboru elektrotrakcyjnego, osiągnięty poziom i przewidywany postęp techniczny. Materiały Konferencji na temat "Przyspieszona elektryfikacja transportu w warunkach krajowych dostaw urządzeń" SEP, Wrocław 1986.
2. Bodaś J., Wróblewski St.: Nowa generacja lokomotyw elektrycznych dużej mocy. Op. cit.
3. Podoski J.: Tramwaj szybki. WKiŁ, Warszawa 1983.

4. News in brief. ABB Review 1990, nr 5.
5. Fremmeler K., Wegmar M.: The IR4 regional electric train. ABB. Review 1990, nr 3.
6. Glinka T., Grzenik R., Kałuża E., Mołoń Z.: Tranzystorowa przetwornica tramwajowa. ZN Pol.Śl., Elektryka z.139, Gliwice 1994.
7. Glinka T.: Silnik indukcyjny przeznaczony do napędu tramwaju. Materiały V Konferencji Naukowej SEMTRAK 92. Politechnika Krakowska, Monografia 137. Kraków 1992.
8. Materiały z seminarium "Komunikacja miejska" zorganizowanego w Gdańsku 24/25.02.1993 przez ZKM Gdańsk i SNV Studiengesellschaft Verkehr- Hamburg.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Teresa Orłowska-Kowalska

Wpłynęło do Redakcji 11 kwietnia 1994

Abstract

The paper presents the estimation of the costs of modernized tramway traction drives. In order to evaluate the effectiveness of modernization, an indicator has been set up based on the difference between the yearly running costs of the tramway car equipped with classical D.C. drive system and modernized tramway car with power electronics equipment. The profit arising from exchanging the starting rheostat for the power electronics chopper has been calculated to be c.34,000,000 zł (prices as of 1994). The complete modernization, i.e. Implementation of inverter - fed three-phase asynchronous motors (fig.1) does not allow for any immediate financial profit in view of the high inverter prices. Some examples of modern tramway drive systems in USA and Germany have been discussed. The design of the tramway drive system worked out in the department of electric Traction in STU has been shown (fig.1)..