

**Tadeusz Glinka, Eugeniusz Kaluża,
Wojciech Kochanowski, Barbara Kulesz**

ELEKTRONIZACJA TABORU TRAMWAJOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono kierunki prac wdrożeniowych i badawczych, które zostały podjęte w ramach prac związanych z modernizacją taboru trakcyjnego. Zaprezentowano koncepcję układu napędowego tramwaju zestawionego z falowników napięcia i silników indukcyjnych.

INTRODUCING POWER ELECTRONICS INTO TRAMWAY DRIVES

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

1. WSTĘP

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, że w trakcji elektrycznej niepotrzebnie traci się około 20% zużywanego 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.

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, co daje

oszczędność zużycia energii elektrycznej na 1 wagon i na 1 rok eksploatacji równą 46800 kWh [1].

W trakcji miejskiej i podmiejskiej stosuje się powszechnie sieci trakcyjne prądu stałego o napięciach od kilkuset woltów do 3 kV.

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

- a) napędy konwencjonalne - układy napędowe z silnikami prądu stałego z rozruchem rezystancyjnym - w ten sposób jest rozwiązana praktycznie cała tramwajowa komunikacja miejska w Polsce,
- b) przekształtnikowe napędy prądu stałego - układy z silnikami prądu stałego i z rozruchem impulsowym,
- c) napędy z 3-fazowymi silnikami prądu przemiennego - najczęściej stosowanym układem napędowym tej grupy jest napęd z silnikiem indukcyjnym klatkowym zasilanym z energoelektronicznego falownika napięcia.

Przykładem rozwiązania z trójfazowymi silnikami prądu przemiennego zasilanymi z sieci prądu stałego poprzez falowniki napięcia 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 falowników napięcia opartych na tyrystorach GTO. 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 trakcyjne silniki indukcyjne o mocy 185 kW każdy, zasilane są z sieci prądu stałego o napięciu 750 V poprzez tyrystorowy falownik prądu.

Firma "Siemens" w tramwajach niskopodłogowych przeznaczonych dla Frankfurtu/M zastosowała silnik indukcyjny chłodzony wodą, zabudowany w kole napędym 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).

W Polsce wprowadzenie w trakcji tramwajowej napędów przekształtnikowych prądu stałego napotyka na duże trudności. W 1988 roku Fabryka "Konstal" w Chorzowie wyprodukowała pierwszy egzemplarz tramwaju z takim napędem, przy czym zastosowany w tym tramwaju regulator opracowano i wykonano w kraju, korzystając głównie z krajowych elementów. Podobny układ napędowy został również opracowany i przebadany na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Dotychczas rozwiązania te nie wyszły poza fazę eksperymentu i produkcji małoseryjnej.

2. KIERUNKI MODERNIZACJI TABORU TRAMWAJOWEGO

Prowadzone od kilku lat w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Politechniki Śląskiej prace mają na celu modernizację układu zasilania obwodów pomocniczych, sterowania oraz napędu głównego.

Przy opracowywaniu nowego układu napędowego tramwaju wzięto pod uwagę dwie możliwości:

- a) zamontowanie przekształtnikowego układu napędowego w nowo budowanych tramwajach, przy czym można by również rozważyć przekonstruowanie układu zawieszenia, przekładni itd.

b) modernizacja wagonów tramwajowych obecnie eksploatowanych, przeprowadzana np. podczas napraw głównych.

Wydaje się, że możliwość druga jest atrakcyjna ze względów ekonomicznych (długa żywotność wagonów oraz brak zamówień na nowy tabor).

Z dostępnych materiałów wynika, że również w Niemczech firma AEG montuje obecnie zmodernizowane układy napędowe w eksploatowanych od wielu lat tramwajach w dawnej NRD, nie siląc się na wprowadzanie od razu nowych konstrukcji.

Dla potrzeb napędu głównego zaprojektowano silnik indukcyjny typu STD200L4, którego cztery sztuki zostały następnie wykonane przez Zakłady "EMIT" w Żychlinie. Prototypy falownika do układu napędowego silników oraz przetwornicy pokładowej zostały wykonane na Politechnice Śląskiej. Zaprojektowany specjalnie silnik indukcyjny [2] posiada konstrukcję mechaniczną umożliwiającą zabudowanie go w miejscu obecnie eksploatowanego silnika typu LTa-220 w tramwaju 105N.

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy układu napędowego tramwaju wraz z układem zasilania i sterowania. Układ składa się z:

- a) bloku zabezpieczającego (Z,DI) od przepięć sieciowych indukowanych przez innych użytkowników i wylądowań atmosferycznych,
- b) dwóch identycznych bloków napędowych składających się z falowników (F1-F2) i silników indukcyjnych klatkowych (M1-M4),
- c) przetwornicy (P), która jest źródłem napięć pokładowych 40 V i 24 V [3],
- d) bloku wentylacyjnego składającego się z falownika (F3) i wentylatorów (M5) [3],
- e) systemu sterującego, w skład którego wchodzi nastawnik (Nas) zadający program pracy, regulator mikroprocesorowy (Reg) oraz czujniki i przetworniki pomiarowe prędkości jazdy (T1), prądu i napięcia.

Znaczny postęp technologiczny w dziedzinie techniki półprzewodnikowej umożliwia budowę przekształtników dla napędu głównego o mocy do kilkudziesięciu kW w oparciu o tranzystory IGBT. Rozwiązanie z przekształtnikami opartymi na tranzystorach IGBT charakteryzuje się tym, że w stosunku do rozwiązania opartego na tyrystorach klasycznych wymaga znacznie prostszego układu sterowania, a nad układem opartym na tyrystorach GTO góruje niższą ceną przy porównywalnych parametrach eksploatacyjnych.

Falowniki (F) oraz przetwornicę (P) zbudowano opierając się na blokach elektroizolacyjnych, składających się z tranzystorów IGBT i diod.

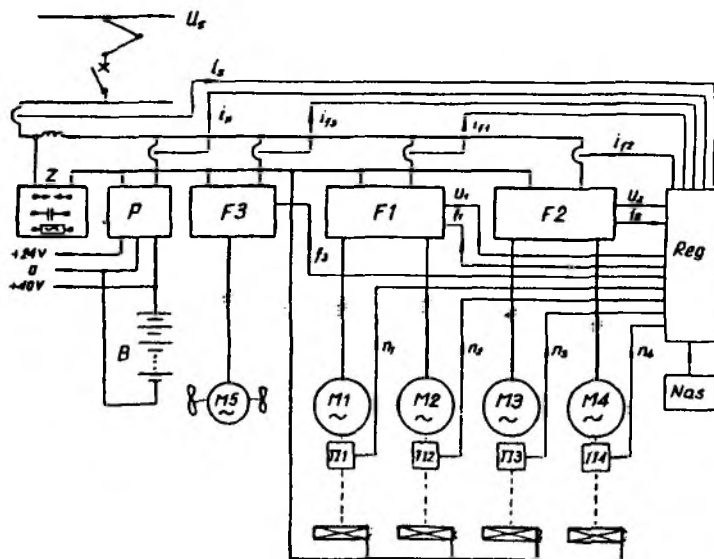
3. PRZETWORNICA TRAMWAJOWA 600V/40V/24V

Przetwornica tramwajowa jest przeznaczona do zasilania obwodów pomocniczych tramwaju i ładowania akumulatora pokładowego. Wymagania stawiane przetwornicy tramwajowej są następujące:

- napięcie zasilania prądu stałego 600 V (od -33.3% do +20%), przy czym jest możliwy w pewnych przedziałach czasu wzrost napięcia do 800 V,
- parametry wyjściowe $P_2=2.7$ kW, $U_2=40$ V; $I_2=52.5$ A ; $U_3=24$ V; $I_3=25$ A,
- napięcia wyjściowe muszą być gwałtownie oddzielone od napięcia sieci trakcyjnej.

W tramwajach dotychczas produkowanych i eksploatowanych typu 105N stosowana jest przetwornica elektromaszynowa typu Pta44, składająca się z silnika prądu stałego o wzbudzeniu szeregowo-bocznikowym (5.1kW; 600V; 2000obr./min) i prądnicy bocznikowej prądu stałego

(2.7kW; 40V; 67A; 2000obr./min) zabudowanych we wspólnej obudowie i na wspólnym wale. Na obydwóch wolnych końcach wału są zabudowane wentylatory odśrodkowe.



Rys. 1. Schemat blokowy układu napędowego tramwaju wraz z układem zasilania i sterowania

Fig. 1. The block diagram of tramway drive; the supply and control systems are depicted

Wentylatory przewietrzają (chłodzią) silniki trakcyjne, rezystory rozrusznika i przetwornicę. Ponadto w tramwaju jest stosowany przekształtnik PTR 40/24V, 25A do zasilania świateł drogowych i urządzenia nagłaśniającego.

Zastępując przetwornicę elektromaszynową przetwornicą tranzystorową należy równocześnie zapewnić chłodzenie silników i rezystorów rozruchowych na dotychczasowym poziomie. Funkcje obecnej przetwornicy może spełniać [3] następujący zespół przekształtnikowy:

- przetwornica tranzystorowa 600/40/24V, pełniąca funkcje źródła napięcia pokładowego,
- tranzystorowy falownik napięcia przetwarzający napięcie sieci trakcyjnej na 3-fazowe napięcie zmienne 3x380V; 30±70Hz o mocy 4kW, przeznaczony do zasilania silnika wentylatorów.

Zastępując przetwornicę elektromaszynową przetwornicą tranzystorową zmniejsza się masę o 203 kg, co stanowi 69% masy obecnej przetwornicy, oraz straty mocy czynnej o 1.65 kW, co stanowi 53% strat obecnej przetwornicy.

W eksploatowanych obecnie tramwajach do przetwornicy elektromaszynowej umieszczonej na podwoziu często przedostaje się woda, będąc przyczyną awarii. Układy tranzystorowe (przetwornica i falownik) zabudowane będą w szczelnej obudowie i całkowicie zabezpieczone przed przedostawaniem się wody, natomiast indukcyjny silnik wentylatorów posiada zamkniętą i szczelną obudowę. Zastosowanie opisanego przekształtnikowego układu powinno więc zapewnić

mniejszą awaryjność przetwornicy, związaną z warunkami atmosferycznymi.

Przeprowadzone badania laboratoryjne oraz badania eksploatacyjne w tramwaju w czasie jego normalnej jazdy wykazały pełną przydatność przetwornicy do zainstalowania jej zarówno w tramwajach remontowych jak i tramwajach nowo budowanych.

4. FALOWNIK NAPIĘCIA

Falownik napięcia powinien spełniać następujące wymagania:

- napięcie zasilania DC ($420 \div 750$) V;
- znamionowe parametry wyjściowe 3×380 V; 60 Hz; 100 kV·A;
- zakres regulacji napięcia i częstotliwości w dwóch podzakresach ($1 \div 60$) Hz przy napięciu ($30 \div 380$) V i ($60 \div 140$) Hz przy napięciu ($380 \div 420$) V.

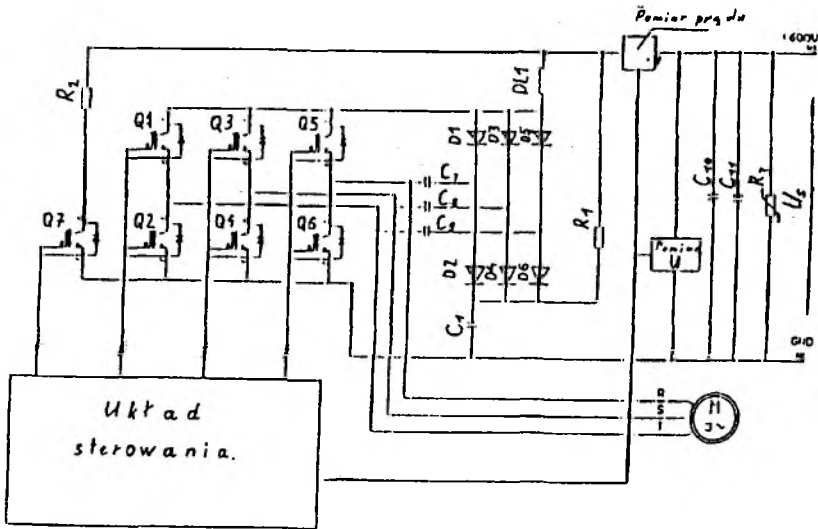
Dla zabezpieczenia tranzystorów IGBT przed skutkami zwarć i przeciążeń skonstruowano specjalny układ elektroniczny, który wyłącza impulsy bramkowe w przypadku przekroczenia prądu dopuszczalnego tranzystora. Pomiar prądu tranzystora jest dokonywany przez czujniki halotronowe. Układ ten jest przedmiotem zgłoszenia patentowego.

4.1. Opis konstrukcji falownika

Falownik na wejściu jest wyposażony w układ ochraniający od przepięć występujących w sieci trakcyjnej. Schemat ideowy obwodu głównego falownika przedstawiono na rys.2.

Falownik tworzą bloki tranzystorowe Q1-Q6, ponadto falownik jest wyposażony w sieć odciążającą, gałąź hamulcową, układ pomiarowy prądu i napięcia oraz filtr wejściowy. Sieć odciążająca przejmuje energię wydzielaną w czasie komutacji tranzystorów Q1-Q6. Sieć tę tworzą elementy: diody D1-D6, kondensatory C1, C7-C9, dławik DL1 i rezystor R1. Gałąź hamulcowa jest złożona z tranzystora Q7 i rezystora R2. Gałąź ta jest włączana (tranzystorem Q7) przy pracy hamulcowej (prądnicowej) silnika M w przypadku, gdy napięcie sieci trakcyjnej uzyska wartość 750 V. Dzieje się to wówczas, gdy sieć nie może przejąć energii hamowania, co prowadzi do wzrostu napięcia sieci. Układ pomiarowy składa się z przetworników pomiaru prądu i napięcia zbudowanych na elementach halotronowych. Zaletą tego typu przetworników jest galwaniczna separacja sygnału pomiarowego od napięcia sieci.

Jako sygnały wejściowe do układu sterowania podaje się sygnały analogowe napięciowe proporcjonalne do częstotliwości f_{ZAD} i napięcia sieci trakcyjnej U_S . Przetworniki IC5 i IC18 przetwarzają te sygnały na sygnały cyfrowe. Element IC1 służy do nastawiania częstotliwości pracy kluczy tranzystorowych. Element IC2 wypracowuje czas opóźnienia w załączaniu tranzystorów w jednej gałęzi (np. Q1 i Q2); czas ten ustawiono na 10 μ s. Modulator impulsów HEF moduluje sinusoidalny przebieg wartości średniej napięcia wyjściowego falownika. Układ załączający UZ zapewnia opóźnienie włączenia sygnałów sterujących tranzystorów po załączeniu napięcia zasilającego falownik U_S . Sygnały wyjściowe z modulatora HEF są podawane na wzmacniacz sygnałów wyjściowych WSW, dopasowujący pod względem energetycznym te sygnały do załączania tranzystorów Q1-Q6.



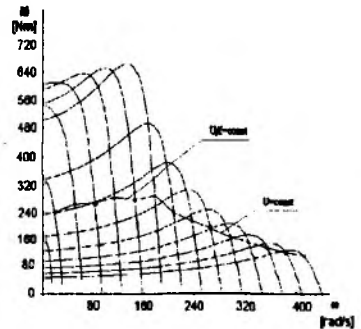
Rys.2. Schemat ideowy obwodu głównego falownika: Q1÷Q7 - tranzystory IGBT, D1 ÷ D6 - diody, R1-rezystor odciążający, R2 - rezystor hamujący, R3 - warystor
 Fig.2. Inverter circuit diagram: Q1 ÷ Q7 - IGBT transistors, D1 ÷ D6 - diodes, R1 -unload resistor, R2 - braking resistor, R3 - varistor

4.2. Algorytm sterowania falownika

Do sterowania falownika zasilającego silniki trakcyjne przewiduje się zastosowanie sterownika mikroprocesorowego. Sterowanie powinno umożliwić uzyskanie charakterystyk trakcyjnych przy jednoczesnym zapewnieniu optymalizacji zużycia energii.

Sterowanie silnikiem będzie odbywać się wg następującej zasady: w pierwszej strefie sterowania utrzymywany będzie stały stosunek napięcia do częstotliwości ($\phi = \text{const.}$), w drugiej strefie sterowania utrzymywana będzie stała wartość napięcia przy zmieniającej się częstotliwości. Maksymalny moment rozwijany przez silnik przy danej prędkości obrotowej ograniczony jest przez dopuszczalne wartości strumienia, prądu i napięcia silnika (p.rys.3).

Sygnal sterujący (wejściowy) dla falownika powinien zostać wypracowany przez sterownik mikroprocesorowy. Wartość sygnału sterującego powinna odpowiadać żądanej wartości siły pociągowej tramwaju (momentu elektromagnetycznego silnika) przy narzuconej prędkości pojazdu (prędkości obrotowej silnika) [4].



Rys.3. Charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego wraz z charakterystyką trakcyjną
 Fig.3. Torque-speed curves of induction motor; traction characteristics is also shown

5. SILNIK STD200L4

Parametry trakcyjne silnika indukcyjnego powinny być zbliżone do parametrów silnika prądu stałego LT-220:

- moment znamionowy $M_N = 202 \text{ N}\cdot\text{m}$, przeciążalność momentem $M_{\text{max}}/M_N = 2.5$,
- prędkość obrotowa znamionowa $n_N = 1890 \text{ obr./min}$, prędkość obrotowa maksymalna $n_{\text{max}} = 4200 \text{ obr./min}$.

Podobnie jak w silniku prądu stałego przewiduje się dwustopniową regulację prędkości obrotowej:

- od $n = 0$ do n_N przy stałym momencie,
- od $n = n_N$ do n_{max} przy stałej mocy.

Zmiennosc napięcia sieci trakcyjnej: $420 \text{ V} \div 750 \text{ V}$.

Na podstawie powyższych danych założono, że silnik ten powinien posiadać :

- liczbę par biegunów $p = 2$,
- napięcie znamionowe $U_N = 3 \times 380 \text{ V}$,
- częstotliwość znamionową $f_N = 60 \text{ Hz}$,
- zakres zmian napięcia zasilania od $3 \times 32 \text{ V}$ przy $f = 3 \text{ Hz}$ do $3 \times 380 \text{ V}$ przy $f = 60 \text{ Hz}$ i $f = 140 \text{ Hz}$ z możliwością jego podwyższenia o 10%, tj. do napięcia $3 \times 420 \text{ V}$,
- zakres zmian częstotliwości od 3 Hz do 140 Hz ,
- wentylację obcą o wydatku powietrza $7.5 \text{ m}^3/\text{min}$,
- klasę izolacji F.

Moment odpowiadający prądowi znamionowemu i $f = 140 \text{ Hz}$ przekracza około 6% moment silnika prądu stałego przy prędkości maksymalnej. Maksymalna prędkość obrotowa silnika przy zasilaniu napięciem U_N o częstotliwości $f_{\text{max}} = 140 \text{ Hz}$ i obciążeniu momentem znamionowym wynosi $n_{\text{max}} = 3990 \text{ obr./min}$ i jest zbliżona do prędkości maksymalnej silnika prądu stałego. Prędkość tę można zwiększyć do 4275 obr./min zwiększając częstotliwość napięcia zasilania do 150 Hz . W tym przypadku, aby uzyskać moment większy od $90 \text{ N}\cdot\text{m}$, można podnieść napięcie zasilania około 420 V .

Falownik tranzystorowy umożliwia podwyższenie napięcia zasilającego silnik do $(1/\sqrt{2})U_{ST}$, gdzie U_{ST} jest napięciem sieci trakcyjnej. Dla silnika jest to wartość bezpieczna, gdyż izolacja silnika musi być wykonana na napięcie $U_{ST\text{max}} = 750 \text{ V}$.

Nowością konstrukcyjną silnika jest rozwiązanie układu prędkości obrotowej. Układ ten składa się z zabudowanej na wale silnika tarczy metalowej ferromagnetycznej z 56 otworami. W tarczy łożyska od strony nienapędowej zabudowano dwa czujniki indukcyjne CPM-10 produkcji Energopomiaru - Gliwice, współpracujące z przetwornikiem. Czujniki CPM-10 na obwodzie są rozmieszczone tak, aby ich sygnały wyjściowe były przesunięte o 1/4 okresu. Przesunięcie to umożliwia identyfikację kierunku obrotów silnika.

5.1. Współpraca silnika z falownikiem

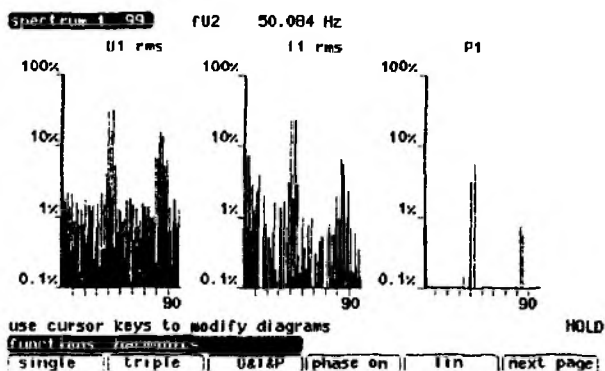
W ramach pomiarów współpracy silnika indukcyjnego z falownikiem przeprowadzono analizę zawartości wyższych harmonicznych w napięciu, prądzie i mocy falownika.

Wszystkie pomiary zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym na Politechnice Śląskiej. Pomiary wszystkich wielkości odkształconych dokonywano z pomocą analizatora mocy D6100M v.D6133 firmy NGI Austria, udostępnionego przez BOBRME "Komel" w

Katowicach. Analizator ten został bliżej przedstawiony w publikacji [5].

Wykorzystując opcję analizy widmowej analizatora dokonano analizy zawartości harmonicznych w przebiegach napięć i prądów zasilających oraz mocy pobieranej przez silnik zasilany z falownika MSI. Zakres częstotliwości zasilania wynosił od 12 do 140 Hz. Przykładowe widma harmonicznych zamieszczono na rys.4 (dla $f=50$ Hz).

Znaczący udział w widmie napięcia mają harmoniczne o częstotliwościach będących wielokrotnością częstotliwości przełączania tranzystorów w falowniku ($f_{prz} \approx 2000$ Hz). Ich udział dochodzi maksymalnie do 56% harmonicznej podstawowej. Zawartość wyższych harmonicznych mocy zmienia się od około 4% do ok. 13% harmonicznej podstawowej.



Rys.4. Widmo zawartości harmonicznych w napięciu, prądzie i mocy czynnej silnika; $f=50.08$ Hz

Fig.4. The harmonics spectra of motor voltage, current and active power; $f=50.08$ Hz

5.2. Badanie nagrzewania poszczególnych elementów silnika

W trakcie nagrzewania silnik STD200L4 obciążono silnikiem prądu stałego L.Ta220, pracującym jako hamownica. Wszystkich pomiarów dokonano dla silnika obciążonego mocą 17 kW. Przeprowadzono próby nagrzewania silnika mierząc przyrosty temperatury w sześciu punktach silnika. Pomiarów dokonywano w zakresie częstotliwości $25 \div 50$ Hz.

Jako źródło zasilania w poszczególnych próbach zastosowano:

- generator synchroniczny o mocy 25 kV·A,
- prototypowy model falownika o mocy 40 kV·A,
- falownik firmy ENEL o mocy 100 kV·A.

Napięcie harmonicznej podstawowej U_1 wynosiło 380 V przy 50 Hz dla obu falowników, napięcie generatora wynosiło 380 V przy 50 Hz.

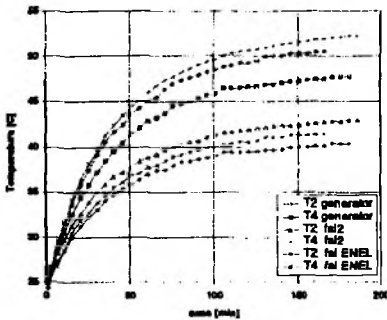
Przykładowe wyniki nagrzewania czoł uzwojeń stojana oraz rdzenia stojana przedstawiono na rys.5. Czoła uzwojeń stojana wybrano z tego względu, że jest to pracująca w najbardziej niekorzystnych warunkach termicznych część stojana, czyli jej temperatura determinuje dopuszczalną obciążalność silnika.

Silnik nagrzewał się najmniej przy zasilaniu z generatora. Ustalony przyrost temperatury przy

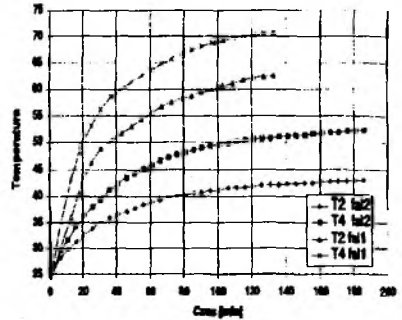
zasilaniu z falowników był o ok. 3°C wyższy niż przy zasilaniu z generatora dla falownika firmy ENEL i o ok. 5°C wyższy przy zasilaniu z prototypowego falownika.

Przeprowadzono również próbę polegającą na zmianie charakterystyki falownika U/f tak, aby napięcie podstawowej harmonicznej 380 V odpowiadało częstotliwości 60 Hz . Daje to napięcie 317 V przy 50 Hz , czyli dla tej samej częstotliwości falownik generuje niższe napięcie. Zarazem należy podkreślić fakt, że silnik został zwymiarowany na napięcie 380 V przy 60 Hz . Porównanie nagrzewania silnika przy identycznych mocach obciążenia dla tych dwóch nastaw falownika pokazano na rys.6.

Po przestrojeniu falownika, czyli przejściu na charakterystykę, którą w dalszym ciągu będziemy umownie nazywać $380\text{V}/60\text{Hz}$, przyrosty temperatury w rozważanych punktach silnika były o ok. 20°C wyższe niż przy korzystaniu z charakterystyki $380\text{V}/50\text{ Hz}$.



a)



b)

Rys.5.

- Przebieg nagrzewania silnika przy zasilaniu z generatora, falownika prototypowego i falownika firmy ENEL;
 - Porównanie nagrzewania silnika przy zasilaniu z falownika prototypowego; fal1 - 380 V przy 60 Hz ; fal2 - 380 V przy 50 Hz ;
- T2 - temperatura jarzma stojana, T4 - temperatura uzwojeń stojana; $P_{\text{obc}} = 17\text{ kW}$; $f = 50\text{ Hz}$

Fig.5.

- The transient of temperature rise; the motor was alternately supplied from generator, prototype inverter and ENEL inverter;
 - The comparison of motor transient temperature rise; the motor was supplied by prototype inverter; fal1 - 380V at 60Hz ; fal2 - 380V at 50 Hz ;
- T2 - stator iron temperature; T4 - stator windings temperature; $P_{\text{obc}} = 17\text{ kW}$; $f = 50\text{ Hz}$

Jednocześnie powtórzenie tej próby dla zasilania z generatora nie spowodowało znaczącej różnicy w ustalonym przyroście temperatury (ok. 2°C).

Biorąc pod uwagę, że silnik w czasie badań obciążony był mocą mniejszą od połowy mocy znamionowej oraz że dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń dla izolacji klasy F wynosi 105°C , a przyrost temperatury osiągnięty w czasie badań wyniósł już 47°C dla falownika

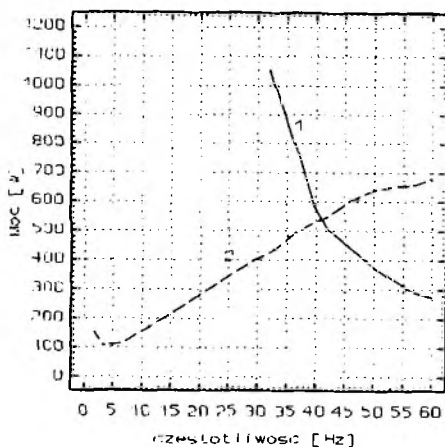
pracującego na charakterystyce 380V/60Hz wydaje się, że silnik ten powinien pracować przy falowniku przestrojonym na charakterystykę 380V/50Hz.

5.3. Rozdział strat mocy w silniku

Dla potrzeb określenia wpływu poszczególnych strat mocy na przyrosty temperatur silnika przeprowadzono pomiary mocy silnika pracującego na biegu jałowym, zasilając silnik alternatywnie z generatora synchronicznego i prototypu falownika 380V/60Hz. Pomiaru mocy, napięcia i prądu dla przebiegów odkształconych dokonano, jak poprzednio, analizatorem mocy D6100. Pomiarów dla zasilania sinusoidalnego dokonano metodami klasycznymi. Silnik przy zasilaniu sinusoidalnym był zasilany napięciem równym wartości skutecznej napięcia falownika dla tych samych częstotliwości.

Porównanie strat całkowitych silnika przy zasilaniu z generatora i falownika zamieszczono na rys.7. Straty mechaniczne silnika są niewielkie, rzędu 80 W przy 1500 obr./min.

Straty w rdzeniu stojana ustalają się na mniej więcej stałym poziomie w zakresie częstotliwości powyżej 50 Hz, gdzie ma miejsce zmiana nachylenia charakterystyki U/f falownika. Dla częstotliwości 60 Hz straty w rdzeniu przy zasilaniu napięciem odkształconym są o ok.400 W wyższe niż przy zasilaniu sinusoidalnym, tj. są 4 razy większe. Straty całkowite, przy zasilaniu z generatora i falownika, są prawie równe dla częstotliwości ok. 42 Hz (przy charakterystyce falownika 380V/60Hz). Można stąd wnosić, że po zmianie nastaw falownika i przestrojeniu go na charakterystykę 380V/50Hz, czyli wzroście napięcia dla tej samej częstotliwości, poziom strat przy zasilaniu falownikowym będzie odpowiadał poziomowi strat przy zasilaniu sinusoidalnym dla częstotliwości ok. 50 Hz.



Rys.7. Porównanie całkowitych strat mocy: 1 - zasilanie z generatora, 2 - zasilanie z falownika

Fig.7. The comparison of total power loss: 1 - generator supply, 2 - inverter supply

6. PODSUMOWANIE

Zaprezentowana koncepcja zmodernizowanego układu napędu oraz zasilania obwodów pomocniczych tramwaju 105N jest jedną z wielu możliwości unowocześnienia taboru tramwajowego w Polsce. Rozwiązanie to posiada następujące cechy:

- pozwala na modernizację napędu tramwaju w ramach napraw okresowych bez konieczności wymiany taboru, co jest atrakcyjne ze względów finansowych;
 - silnik trakcyjny, silnik wentylatorów i część elektroniki to urządzenia i konstrukcje, które można wyprodukować w kraju zamiast zakupu drogich urządzeń produkcji zagranicznej;
- Niższe koszty eksploatacji silników asynchronicznych i mniejsza ich awaryjność w porównaniu

z silnikami prądu stałego oraz względy ekonomiczne przemawiają za przyjętą koncepcją modernizacji taboru tramwajowego w Polsce.

Literatura

- [1] Glinka T., Kałuża E.: Kierunki modernizacji układu napędowego tramwaju. ZN Pol. Śl., s. Elektryka z. 139, Gliwice 1994.
- [2] Glinka T., Kochanowski W.: Silnik indukcyjny przeznaczony do napędu tramwaju. Materiały XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Kazimierz Dolny 1994.
- [3] Glinka T., Grzenik R., Kałuża E., Mołoń Z.: Tranzystorowa przetwornica tramwajowa. ZN Pol. Śl., s. Elektryka z. 139, Gliwice 1994.
- [4] Czakański M.: Elementy sterowania silnikiem indukcyjnym napędu głównego tramwaju. Referat zgłoszony na konferencję "Współczesne systemy zasilania i napędu pojazdów trakcyjnych", Warszawa 1995.
- [5] Kłapciński K., Bernatt J.: Zastosowanie analizatora mocy serii D6100 do wspomagania badań maszyn elektrycznych na stanowiskach pomiarowych laboratorium maszyn elektrycznych BOBRME Komel Katowice. Materiały IV Seminarium technicznego BOBRME Komel Ustroń 1995. Zeszyty Problemowe "Komelu" 50/1995.

Recenzent: doc. dr inż. Zbigniew Ginalski

Wpłynęło do redakcji: 10.07.1995 r.

Abstract

The trends of research and development arising from the proposed modernization of tramway stock have been described in the paper. The changes involve the introduction of semiconductor technology and power electronics devices. The idea of new tramway drive system utilizing voltage-source inverter-fed induction motors has been presented. The changes proposed include the switching from d.c. series traction motors to cage induction traction motors fed from the catenary via the voltage-source inverters and replacing secondary and control circuits devices. The power electronics devices have been designed with IGBT transistors. Figure 1 shows the block diagram of the new drive system as well as secondary and control circuits. Chapter 1 describes the present of tramway stock in Poland and abroad. Chapter 2 gives the overall view of new power electronics devices. Chapter 3 presents technical data of the static converter supplying tramway secondary circuits. The comparison of the new converter and conventional motor-generator set has been mad, showing the technical and economical superiority of the new equipment. Chapter 4 deals with the design of the voltage inverter feeding the traction drives. The technical data is given as well as principle of operation. Figure 2 shows the diagram of the inverter's circuit. The

conception of how to control the inverter in order to generate the traction curve, has been worked out. Chapter 5 gives the technical data of induction traction motor STD200L4. Moreover, the built-in system for measuring the rotational speed of the motor has been described. The next chapters show the test results of the inverter= motor unit performance.