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

Tadeusz GLINKA

Wojciech KOCHANOWSKI

SILNIK INDUKCYJNY PRZEZNACZONY DO NAPĘDU TRAMWAJU

Streszczenie. Zaprojektowany silnik indukcyjny posiada parametry i charakterystyki elektromechaniczne takie, jak silnik prądu stałego lt-220. Wykorzystując algorytm i program obliczeń projektowych silników indukcyjnych klatkowych, metodą kolejnych prób, znaleziono rozwiązanie obwodu elektromagnetycznego silnika spełniające stawiane mu wymagania. Przedstawiono kartę uzwojenia silnika oraz jego charakterystyki elektromechaniczne. W silniku zabudowano układ impulsowego pomiaru prędkości obrotowej. Zbudowany silnik poddano badaniom eksperymentalnym przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym i z falownika MSI.

INDUCTION MOTOR FOR TRAMWAY DRIVE

Summary. The ratings of the designed motor had to be the same as rating of d.c. LT-220 motor. The solution of motor electromagnetic circuit is accomplished with use of numerical procedures applied in squirrel cage induction motor design. The initial values put into the program by the programmer are changed as many times as neccessary until the desired result is obtained. The motor winding specification, torque - speed characteristics and characteristics taken during experimental researches for feeding it by sinusoidal source and by PWM inverter have been presented in the paper.

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ ПРИВОДА ТРАМВАЕВ

Резюме. Для привода трамвая типа 105 применяются электродвигатели (4 шт.) постоянного тока последовательного возбуждения типа LT-220. Для привода токого трамвая разработана конструкция альтернативного асинхронного двигателя STD 200L4 и созданы 4 шт. таких двигателей. В электродвигатель встроена импульсная система измерения скорости вращения. Электродвигатель STD 200L4 был подтвергнут экспериментальным испитаниям при питании трехфазным синусоидальным напряжением и напряжением от инвертора MSI. Проведенные исследования подтвердили, что так же как потери мощности в двигателе, так и нагревание обмоток зависят от посылки импульсов напряжения.

1. WSTĘP

Nowoczesne pojazdy trakcyjne budowane przez czołowe firmy europejskie, jak SIMENS i ABB, są wyposażone w układy napędowe z silnikami indukcyjnymi klatkowymi zasilanymi z falowników [1,2].

W Polsce nie ma ani jednego tego typu pojazdu trakcyjnego, dlatego też nie mamy żadnego w tym zakresie doświadczenia konstrukcyjnego i eksploatacyjnego. Brak doświadczenia zmusza nas do pewnej ostrożności postępowania i w związku z tym nierozważne byłoby rozpoczynać prace eksperymentalne od napędów lokomotyw i zespołów trakcyjnych zasilanych z sieci 3 kV prądu stałego. Dlatego też jako obiekt pierwszych eksperymentów wybrano napęd wozu tramwajowego, w którym moc znamionowa silników napędowych wynosi 4x40 kW, a napięcie sieci zasilającej 600 V. Wartość tego napięcia pozwala budować falowniki napięcia opierając się na zespołach półprzewodnikowych IGBT.

Napęd tramwajowy nadaje się do eksperymentu z uwagi na dosyć łatwą możliwość przeprowadzenia jego badań eksploatacyjnych.

Specyfika i wymagania stawiane układowi napędowemu tramwaju wykluczają możliwość zastosowania silnika katalogowego, stąd zaszła potrzeba zaprojektowania silnika, którego parametry i charakterystyki elektromechaniczne byłyby dopasowane do wymagań napędu tramwaju.

2. ZAŁOŻENIA

Zakłada się, że badania eksploatacyjne modelowego układu napędowego składającego się z 2 falowników napięcia i 4 silników indukcyjnych klatkowych o mocy (4x40 kW) zostaną przeprowadzone w tramwaju 105N. Z tego też względu silnik musi być przystosowany konstrukcyjnie do zabudowania go w tym wozie. Stąd wynikają założenia konstrukcyjne dla silnika:

- wymiary gabarytowe silnika muszą być mniejsze od wymiarów przestrzeni między wózkiem a pudłem tramwaju, w której będzie zabudowany silnik, wymiary te powinny być zbliżone do wymiarów silnika prądu stałego LT-220, który napędza tramwaj, a końcówka układu wału silnika powinna być identyczna z użytą w silniku obecnie stosowanym LT-220.

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

- moment znamionowy M_N =202 Nm,
- przeciążalność momentem M_{max}/M_N =2,5 Nm,
- prędkość obrotowa znamionowa n_N=1890 obr/min,
- prędkość obrotowa maksymalna n_{max}=4200 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.

Zmienność napięcia sieci trakcyjnej: 420 V - 720 V.

Opierając się na powyższych danych założono, że projektowany silnik powinien posiadać:

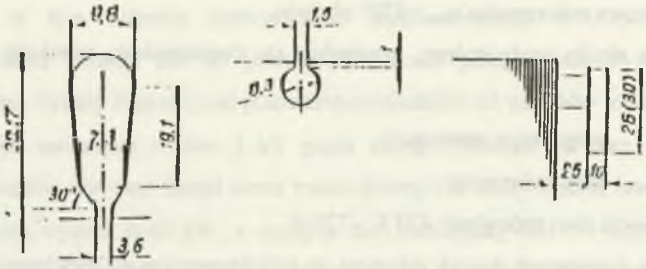
- liczbę par biegunów p =2,
- napięcie znamionowe U_N = 3x380 V,
- częstotliwość znamionową f_N=60 Hz,
- zakres zmian napięcia zasilania od 3x32 V przy f=3 Hz do 3x380 V przy f=60 Hz i przy f=140 Hz z możliwością jego podwyższenia o 10%, to jest do napięcia 3x420 V,
- zakres zmian częstotliwości od 3 Hz do 140 Hz,
- wentylację obcą o wydatku powietrza 7,5 m^3/min,
- klasa izolacji F.

3. OBLICZENIA PROJEKTOWE SILNIKA

Obliczenia silnika wykonano wykorzystując algorytm obliczeń projektowych silników indukcyjnych Branżowego OBR Maszyn Elektrycznych w Katowicach. Program ten obejmuje:

- obliczenia uzwojeń (obwodów elektrycznych),
- obliczenia obwodu magnetycznego,
- obliczenia cieplno-wentylacyjne,
- obliczenia parametrów i charakterystyk elektromechanicznych silnika.

Wykorzystując ten program, metodą kolejnych prób udało się znaleźć rozwiązanie obwodu elektromagnetycznego silnika, które spełnia w przybliżeniu wszystkie podane wcześniej założenia.



Rys.1. Wymiary żłobków stojana i wirnika oraz pierścienia zwierającego

Fig.1. The stator rotor slots and grinding ring dimensions

Do tego silnika w tablicy 1 podano kartę uzwojeń, a na rys.1 kształt żłobków stojana i wirnika oraz kształt pierścienia łączącego pręty wirnika. Szczegółowe obliczenia parametrów i charakterystyk elektromechanicznych silnika przeprowadzono przy różnych wartościach częstotliwości i napięcia zasilania. Na bazie tych obliczeń wykreślono rodzinę charakterystyk elektromechanicznych silnika $M=f(n)$ i $I_1=f(n)$ przy $U_1=const$ i $f_1=const$. - rys. 2 i 3.

Charakterystyki te można wykorzystać przy opracowaniu algorytmu sterowania silnika dobierając taką wartość napięcia i częstotliwości przy danej prędkości obrotowej i zadanym momencie dynamicznym (przyspieszeniu), aby prąd silnika był minimalny. Na rys. 4 przedstawiono charakterystykę maksymalnych wartości napięcia zasilania silników przy zadanej częstotliwości.

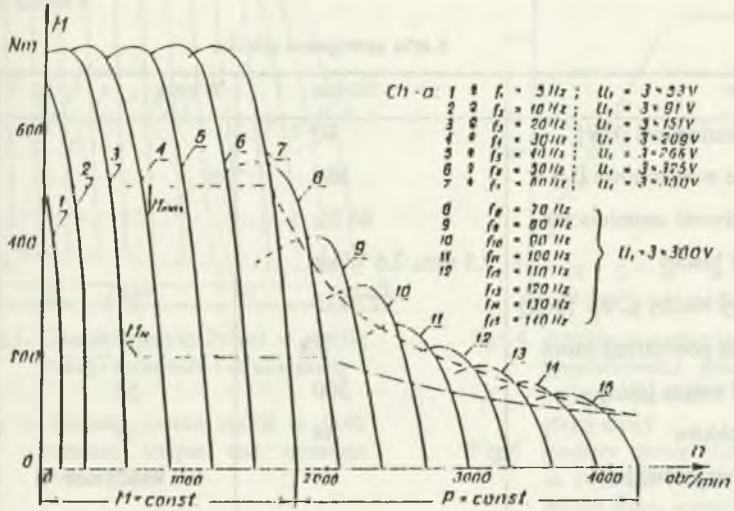
Z obliczeń elektromagnetycznych silnika można określić między innymi:

- parametry znamionowe silnika:

U_N= 3x380 V; f_N= 60 Hz; P_N= 40 kW;

n_N= 1724 obr/min; I_{1N}= 71,7 A; M_N= 221,5 Nm;

M_{max}= 740 Nm; η_N= 90,8%; $\cos\varphi_N$= 0,931;



Rys.2. Charakterystyki M=f(n) przy f=const i U_1=const

Fig.2. Torque versus speed with M = const and U_1 = const

- parametry silnika przy zasilaniu częstotliwością minimalną:

U_1= 3x53 V; f_1= 5 Hz; M_{roz}= 502 Nm;

I_{1roz}= 149,6 A; (jest to zarazem prąd maksymalny falownika),

- parametry silnika przy zasilaniu częstotliwościa maksymalną:

U_{1N}= 3x380 V; f_1= 140 Hz;

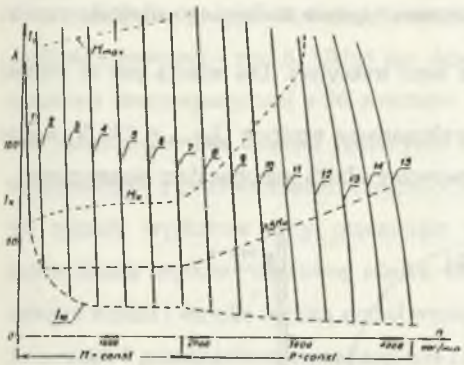
M_{max}= 130 Nm przy I_1= 124,6 A = 1,74 I_{1N} oraz M = 97 Nm przy prądzie I_1= I_{1N} i n = 3990 obr/min.

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

Tablica 1

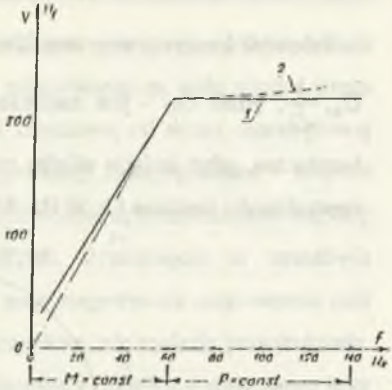
Karta uzwojenia silnika

Dane	Stojan	Wirnik
Moc znamionowa [kW]	40	
Napięcie znamionowe [V]	380	
Częstotliwość znamionowa	60 Hz	
Gatunek blachy	0,5 mm; 2,6 W/kg	
Wymiary blachy ϕ_z/ϕ_w [mm]	327/215	213
Szczelina powietrzna [mm]	0,8	
Długość żelaza [mm]	300	30
Ilość żłobków	48	38
Kanały wentylacyjne		9xϕ25mm
Rodzaj uzwojenia	2 W	pręty+pierścień
Podskok uzwojenia	10	
Zwojów szereg./fazę	44	
Zwojów/zezwój	16	
Drutów równolegle	3	
Drutów/żłobek	3x22=66	
Wymiary przewodów [mm]	ϕ1,25	pręty ϕ 8x370 pierścień 10x26
Oznaczenie przewodu	PN 2E 180	pręty M1E-z6 pierścień MO 59
Połączenie uzwojeń	4gr II/	



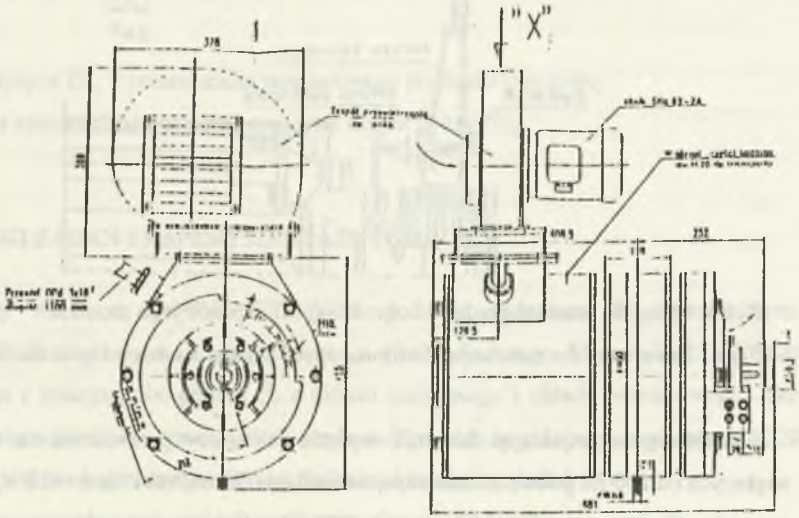
Rys.3. Charakterystyki I=f(n) w strefie stałego momentu i strefie stałej

Fig. 3. Current versus speed in both constant torque and constant power zones



Rys.4. Regulacja napięcia U w funkcji częstotliwości mocy w strefie stałego momentu i w strefie stałej mocy

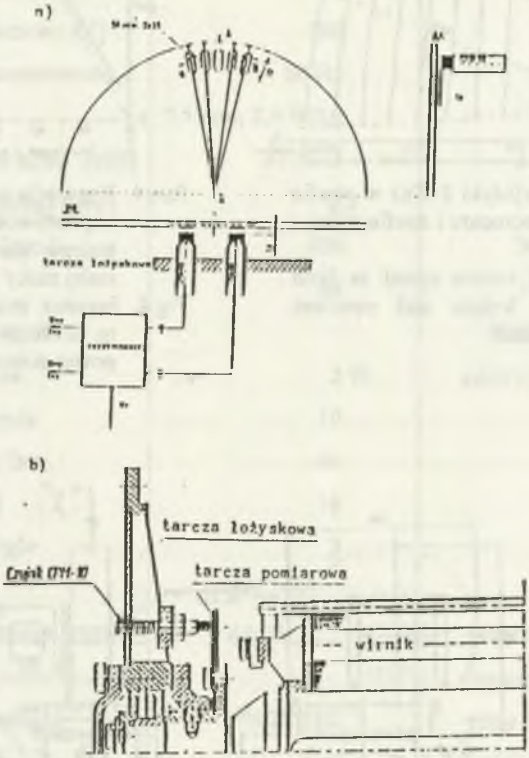
Fig.4. Inverter motor contrrol strategy in constant torque and constant power zones respectively



Rys.5. Rysunek wymiarowy silnika STD200LA

Fig.5. The dimensioned drawing of STD200L4 motor

Falownik tranzystorowy umożliwia podwyższenie napięcia zasilającego silnik do wartości $U_{ST}\frac{1}{\sqrt{2}}$, gdzie U_{ST} - jest napięciem stałym sieci trakcyjnej. Dla silnika jest to wartość bezpieczna, gdyż izolacja silnika musi być wykonana na napięcie $U_{ST\,max}$= 750 V, a przy częstotliwości zasilania f > 60 Hz obwód magnetyczny silnika jest obwodem nienasyconym.



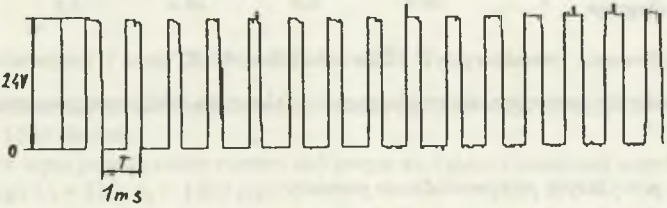
Rys.6. Układ do pomiaru prędkości obrotowej (a) i sposób jego montażu

Fig.6. The system for measuring rotational speed (a) and its assembly in the motor (b)

Wydaje się, że projektując falownik napięcia należałoby przewidzieć dla częstotliwości większych od 100 Hz podwyższanie napięcia zasilania do wartości około 420 V, zwiększy się w ten sposób moment maksymalny o około 20%. Z obliczeń wynika, że temperatura ustalona uzwojeń przy obciążeniu ciągłym prądem znamionowym w całym zakresie zmian prędkości obrotowej nie przekracza 100°C, co dla klasy izolacji F nie jest temperaturą wysoką.

Przy współpracy Zakładów Maszyn Elektrycznych EMIT w Żychlinie opracowano dokumentację silnika. Na rys.5 przedstawiono widok silnika zmontowanego z naniesionymi

wymiarami gabarytowymi. Nowością konstrukcyjną silnika jest rozwiązanie układu pomiaru prędkości obrotowej - rys. 6. Układ ten składa się z zabudowanej na wale silnika tarczy metalowej ferromagnetycznej z 56 otworami. W tarczy łożyskowej od strony nienapędowej "N" 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 indentyfikację prędkości obrotowej silnika. Obawy, że pola magnetyczne rozproszenia czół uzwojeń stojana i wirnika zakłócą sygnał wyjściowy z czujników, nie znalazły potwierdzenia. Na rysunku 7 przedstawiono sygnał napięcia U_{wy} otrzymywany z czujnika pomiarowego przy prędkości silnika 1000 obr/min. Jak widać, sygnał ten jest dostatecznie czysty i pozwala odczytać w sposób cyfrowy prędkość obrotową silnika z dokładnością 1/56 obr/min.



Rys.7. Napięcie U_{wy} z przetwornika pomiarowego prędkości obrotowej

Fig.7. The course of measurement converter output voltage U_{wy}

4. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Wykonany silnik o symbolu STD200L4 poddano badaniom eksperymentalnym. Stanowisko badawcze - rys. 8, składało się z silnika badanego M (silnik STD200L4) sprzęgniętego z maszyną obciążającą H, z układu zasilającego i układu pomiarowego. Jako maszynę obciążająca wykorzystano silnik prądu stałego napędu głównego tramwaju LT-220 pracujący w reżimie prądnicowym. Układ zasilania składał sie z dwóch źródeł:

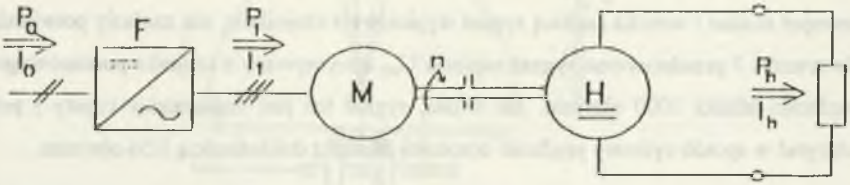
- 3 - fazowego napięcia sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz i nastawianej wartości,
- z falownika tranzystorowego F generującego 3 - fazowe napięcie o sinusoidalnej wartości średniej o nastawionej częstotliwości impulsowania.

Układ pomiarowy obejmował:

- pomiary prądu, napięcia i mocy w sieci prądu stałego zasilającej falownik,

- pomiary prądu, napięcia, mocy i częstotliwości na wejściu silnika M,
- pomiary prędkości obrotowej i mocy oddawanej przez prądnice obciążającą H,
- pomiar temperatury uzwojeń silnika.

Układ pomiarowy (rys.8) nie umożliwiał bezpośredniego pomiaru momentu mechanicznego na wale silnika M. Moment ten obliczono z mocy P_h i prędkości obrotowej. Tak wyliczona wartość momentu jest zaniżona o straty w prądnicy H.



Rys.8. Schemat układu pomiarowego
Fig.8.Circuit diagram

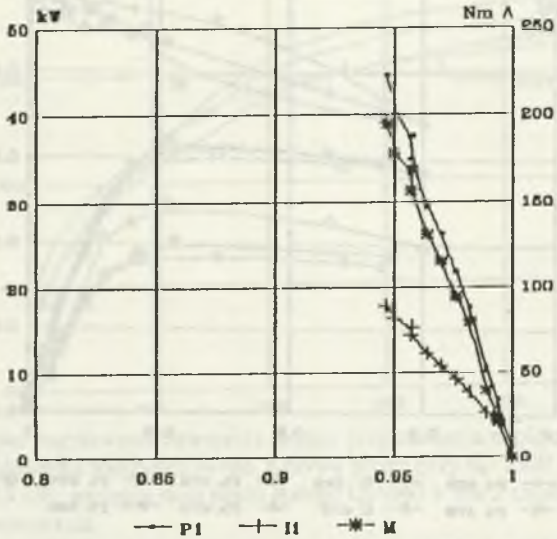
W celu porównania charakterystyk elektromechanicznych, strat i temperatury uzwojeń silnika przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym i z falownika takie postępowanie wydaje się poprawne.

W układzie powyższym przeprowadzono pomiary:

- charakterystyk elektromechanicznych silnika P_1; I_1; $M = f(n/n_0)$ przy napięciu sinusoidalnym U = 320 V i częstotliwości 50 Hz - rys. 9,
- charakterystyk elektromechanicznych silnika P_1; I_1; $M = f(n/n_0)$ oraz wartości skutecznej napięcia $U = f(n/n_0)$ przy zasilaniu z falownika tranzystorowego F przy częstotliwości wyjściowej 50 Hz i wartości sieci pradu stałego 600 V - rys.10a,b,c,
- krzywych nagrzewania uzwojenia silnika przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym U = 320 Hz o częstotliwości 50 Hz, obciążeniu mocą 19 kW oraz przy zasilaniu z falownika tranzystorowego i przy napięciu sieci prądu stałego U_0 = 600 V, stałej wartości mocy P_h = 19 kW i częstotliwości wyjściowej 50 Hz - rys.11.

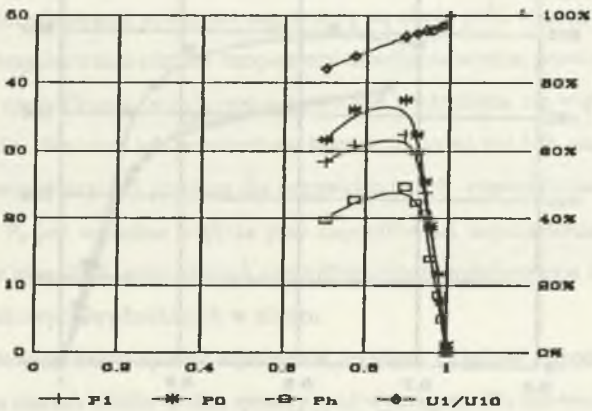
5. WNIOSKI

Możliwe okazało się skonstruowanie silnika indukcyjnego klatkowego o charakterystyce trakcyjnej i wymiarach odpowiadających silnikowi prądu stałego LT-220. Badania potwierdziły także, że można zabudować układ do pomiaru prędkości obrotowej z czujnikami



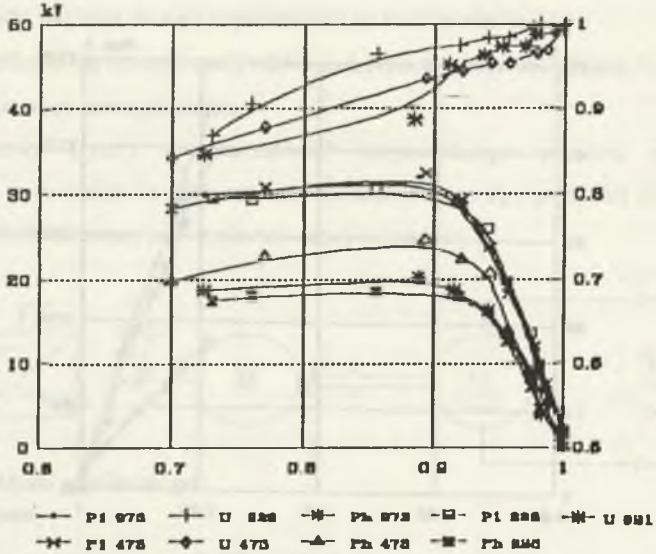
Rys.9. Charakterystyki elektromechaniczne silnika P_l; I_l; $M = f(n/n_l)$ przy $U_l = 320$; $n_0 = 1500$ obr/min

Fig.9. Motor input power, stator current and torque vs. relative rotational speed at supply voltage $U_l = 320$; $n_0 = 1500$ rpm



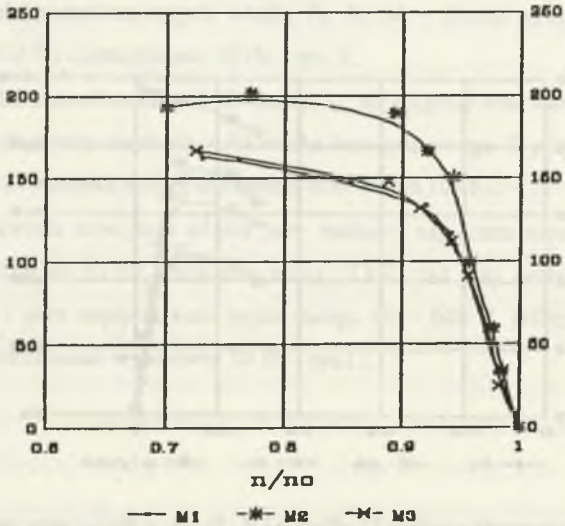
Rys.10a. Charakterystyki napięcia $U_l = f(n/n_0)$ i P_o; P_l i $P_h = f(n/n_0)$ przy zasilaniu z falownika z sieci o napięciu 600 V i $n_0 = 1500$ obr/min

Fig.10a. Motor supply voltage U_l, inverter input power P_0, inverter output power P_l and output power P_h vs. relative rotational speed n/n_0; the motor is inverter-fed; the d.c. network voltage is 600 V, the synchronous speed n_0=1500 rpm



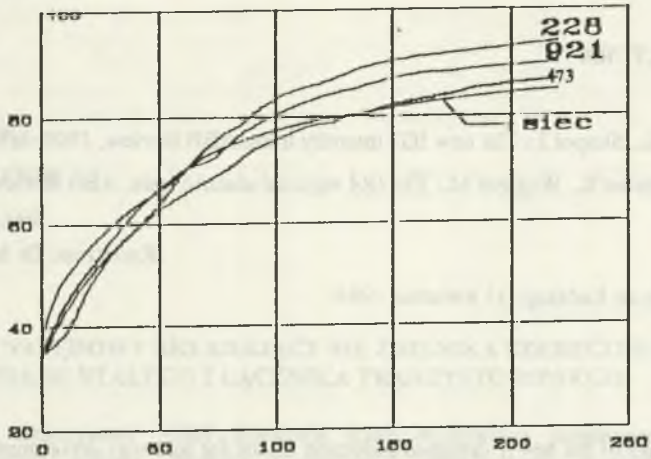
Rys.10b. Charakterystyki napięcia U_l/U_{10} i mocy P_l; $P_h = f(n/n_0)$

Fig.10b. Motor relative supply voltage, inverter output power P_l and autput power P_h vs. relative rotational speed



Rys.10c. Charakterystyki momentu $M=f(n/n_0)$ obliczone z mocy P_h jak na rys. 10b

Fig.10c. Motor torque vs. relative rotational speed, calculated from output power P_h (cf. Fig.10b)



Rys.11. Krzywe nagrzewania uzwojenia stojana przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym i z falownika tranzystorowego. Krzywe zdjęto przy n_0=1500 obr/min i mocy P_h=19 kW; napięciu sieci prądu stałego U_0=600 V dla 3 częstotliwości impulsowania

Fig.11. The comparison of the temperature rise curves of stator winding while feeding the motor from either sinusoidal source of PWM inverter. The measurements were taken at synchronous speed of n_0=1500 rpm, output power P_h=19 kW; d.c.network voltage U_0=600 V at three different switching frequencies

indukcyjnymi wewnątrz silnika. Badania porównawcze nagrzewania silnika (rys.11) przy napięciu sinusoidalnym i z falownika napięcia wykazały, że przy najbardziej korzystnej częstotliwości impulsowania uzwojenia nagrzewają się około 10°C więcej, przy niekorzystnej częstotliwości impulsowania różnica temperatury uzwojenia wynosi prawie 20°C. Zbyt niska i zbyt wysoka częstotliwość impulsowania powoduje wydzielanie się większych strat mocy czynnej w silniku. Wniosek ten potwierdzają krzywe mocy na rys.10b, na którym widać, że moc P_l ma prawie identyczny przebieg dla wszystkich trzech częstotliwości impulsowania, natomiast moc P_h jest wyraźnie większa przy częstotliwości impulsowania oznaczonej jako 473. Różnica w mocach P_h przy różnych częstotliwościach impulsowania dowodzi pośrednio o stratach dodatkowych wydzielanych w silniku.

Zaprojektowany silnik spełnia wymagania stawiane układowi napędowemu tramwaju. Opierając się na danych silnika można sprecyzować wymagania dla falownika napięcia:

- zakres regulacji częstotliwości 5-150 Hz,
- zakres regulacji napięcia 3x32 V do 3x420 V,
- maksymalny prąd obciążenia 150 A.

LITERATURA

1. Hvid K., Skopol J.: The new IG3 intercity train. ABB Review, 1990, nr 6.
2. Fremmelev K., Wegmar M.: The IR4 regional electric train. ABB Review, 1990, nr 3.

Recenzent: Dr hab. Jan Zawilak

Wpłynęło do Redakcji 11 kwietnia 1994

Abstract

The ratings of the newly designed induction motor for tramway drive must be the same as the ratings of d.c. LT-220 motor. The solution of the motor electromagnetic circuit is accomplished with the use of numerical procedures applied in squirrel cage induction motor design - fig.1. The initial values put into the program by the programmer are modified as many times as necessary until the desired result is obtained. The motor winding specification is presented. Torque-speed characteristics at constant supply voltage and constant frequency are shown in fig.2. Motor current vs. rotational speed curve is demonstrated in fig.3. The voltage control strategy in constant torque and constant power zones is depicted in fig.4. Dimensional drawing of the motor itself is represented in fig.5. The inductive sensor used for measuring the rotational speed has been built into the motor. The speed measuring setup is rendered in fig.6, while fig.7 shows the measuring sensor's output signal. The laboratory tests of the motor and its supply system have been run. Their results are displayed in figs.9 &10, while the representation of the circuit diagram is shown in fig.8. The comparison of the temperature rise curves of stator winding while feeding the motor from either sinusoidal source or PWM inverter is given in fig.11.