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

Maciej CZAKAŃSKI

UKŁAD STEROWANIA NAPĘDEM GŁÓWNYM TRAMWAJU Z SILNIKAMI INDUKCYJNYMI KLATKOWYMI

Streszczenie. W pracy przygotowano założenia do konstrukcji sterownika mikroprocesorowego dla tramwaju z silnikami indukcyjnymi, mające na celu zminimalizowanie zużycia energii i realizację przez pojazd tych samych parametrów trakcyjnych, co przy sterowaniu tradycyjnym. W tym celu korzystając z metod symulacji komputerowej wyznaczono charakterystyki trakcyjne, przy których uzyskamy minimalny prąd silnika przy stałym momencie obciążenia, oraz charakterystyki trakcyjne zapewniające pracę silnika przy stałym prądzie dla obciążeń występujących w stosowanych dotychczas silnikach prądu stałego.

THE CONTROL CIRCUIT OF TRAMWAY INDUCTION MOTOR DRIVE

Summary. The design principles of microprocessor controller used for tramway asynchronous traction motor have been presented in this paper. The objective to be achieved is the minimization of the energy consumption while the performing standard of proposed a.c. traction motors is no worse than that of the d.c. motors used today. The motor torque-speed relationship has been determined by numerical computation with the criteria of minimum stator current at constant load torque and tractive effort remaining the same as in d.c. traction motors currently in use.

СИСТЕМА УПРАВАЕНИЯ ПРИВОДОМ ТРАМВАЯ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

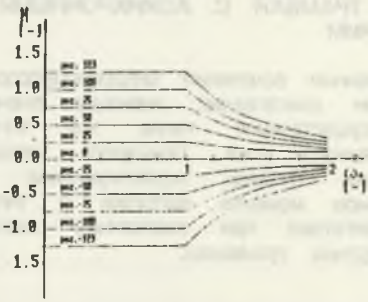
Резюме. В статье приведены конструкционные основания микропроцессорного контроллера для трамвая с асинхронными двигателями, имеющие значение для минимизации энергии и для осуществления таких же тяговых параметров, как для двигателей постояанного тока. Пользуюсь методами компютерного моделирования мы получим тяговые характеристики для минимального тока двигателя при постоянном моменте нагрузки и тяговые характеристики гарантирующие работу двигателя при постоянном значении тока и параметрах выступающих в стандартных трамваях.

1. WPROWADZENIE

Jedną ze światowych tendencji w konstruowaniu pojazdów trakcyjnych jest wyposażanie ich w układy napędowe oparte na silnikach indukcyjnych klatkowych zasilanych z falowników. Prace nad tramwajem napędzanym silnikami indukcyjnymi są prowadzone również w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Politechniki Śląskiej. Tramwaj modelowy zostanie wykonany na bazie istniejącej instrukcji mechanicznej tramwaju 105-N będącego od dawna w eksploatacji. Przewiduje się wyposażenie tramwaju w silniki indukcyjne zasilane z falowników napięcia oraz w przetwornicę tranzystorową prąd stały - prąd przemienny. Modernizacja tramwaju powinna być tak przeprowadzona, aby motorniczy tramwaju nie odczuwał różnicy w sposobie jego prowadzenia. Oczywiście, z zastosowaniem nowego napędu wiążą się wymierne korzyści związane z oszczędnością energii w czasie rozruchu i hamowania tramwaju. Oczekuje się także zwiększenia niezawodności pojazdów z uwagi na brak komutatora i szczotek.

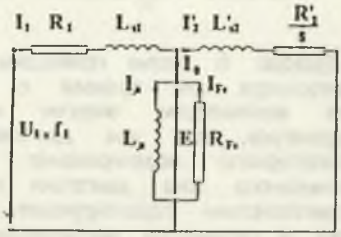
2. PODSTAWOWE ZADANIA UKŁADU STEROWANIA NAPĘDEM GŁÓWNYM NOWEGO TRAMWAJU

Identyfikacja warunków pracy tramwaju została przeprowadzona w obecnym układzie napędowym. Na jej podstawie określono charakterystyki mechaniczne, które muszą realizować silniki indukcyjne. Przykładowe kształty tych charakterystyk przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowe charakterystyki mechaniczne tramwaju dla różnych pozycji nastawnika jazdy

Fig.1. Some examples of torque-speed curves of the tramway; different curves given for chosen control positions



Rys. 2. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego, klatkowego

Fig.2. The equivalent scheme of cage induction motor

Aby móc dokonać modernizacji istniejącego tramwaju 105-N, niezbędne stało się opracowanie takiego systemu sterowania silnikami indukcyjnymi zainstalowanymi w tramwaju, aby były realizowane charakterystyki mechaniczne zbliżone do występujących w układzie napędowym z silnikami prądu stałego. Przyjęto w tym celu następujące założenia:

1) Założono pełną symetrię uzwojeń silnika o rozkładzie sinusoidalnym i symetrię obwodu magnetycznego.
2) Ponieważ silnik indukcyjny klatkowy posiada klatkę pojedynczą o prętach okrągłych, możliwe stało się zastąpienie uzwojenia wirnika w schemacie zastępczym za pomocą jednej gałęzi RL - rys. 2.
3) Praca układu napędowego rozpatrywana jest quasi-stacjonarnie, tzn. zmiany związane ze zmianami prędkości uważa się za tak wolne w stosunku do zmian parametrów elektromagnetycznych silnika, że parametry te można uważać za ustalone. Upoważnia to do zastosowania schematu zastępczego silnika indukcyjnego dla stanu ustalonego.
4) W algorytmie obliczeń uwzględniono zależności nieliniowe $L_\mu = f(E/f_1)$ i $R_{Fe} = f(f_1)$ oraz liniowe: $L_{s1} = f(s)$ i $L_{r2} = f(s)$. Pozostałe parametry schematu zastępczego przyjęto jako stałe.

Parametry schematu zastępczego uzyskno na podstawie obliczeń projektowych silnika indukcyjnego [1].

3. ALGORYTM OBLICZEŃ PARAMETRÓW SCHEMATU ZASTĘPCZEGO

Zaprojektowany silnik charakteryzuje się następującymi danymi znamionowymi:

$U_n = 380$ V, $f_n = 60$ Hz, $P_n = 40$ kW,

$M_n = 221$ N·m, $n_n = 1724$ obr/min, $p_b = 2$.

System sterowania silnika indukcyjnego zasilanego z falownika napięcia opracowano wykorzystując rodzinę charakterystyk mechanicznych silnika przy różnych wartościach U_1 i f_1. Aby system sterowania pozwolił realizować pracę energooszczędną, należy w nim uwzględnić charakterystyki $I_1 = f(\omega_m)$ i odpowiadające im charakterystyki $U_1 = f(f_1)$ przy $M_{obc} = \text{const}$.

Charakterystyki te wyznaczono na drodze symulacji komputerowej. Posłużono się następującym algorytmem obliczeń parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego:

1) Parametry zadane: $U_1 = (0 \div 220)$ V,

$f_1 = (1 \div 140)$ Hz,

$\omega_m = (1 \div 2\pi f/p_b)$ rad/s,

2) $\omega_1 = 2\pi f_1$

3) $s = \dfrac{(\omega_1 / p_b) - \omega_m}{(\omega_1 / p_b)}$,

4) $L_\mu = f(U_1, \omega_1)$ (ze stablicowanych charakterystyk),

5) $R_{Fe} = f(\omega_1)$ (ze stablicowanych charakterystyk),

6) $L_{s1} = f(s) = (0.647 - 0.133s)$ mH,

7) $L'_{s2} = f(s) = (0.733 - 0.210s)$ mH,

8) $Z_1 = R_1 + j\omega_1 L_{s1}$ (impedancja schem. zast. stojana),

9) $Z_2 = R'_2/s + j\omega_2 L'_{s2}$ (impedancja schem. zast. wirnika),

10) $Z_3 = \dfrac{jR_{Fe}\omega_1 L_\mu}{R_{Fe} + j\omega_1 L_\mu}$ (impedancja gał. poprz. schem. zast. silnika),

11) $Z = Z_1 + \dfrac{Z_3 Z_2}{Z_3 + Z_2}$ (impedancja schem. zast. silnika),

12) $I_1 = U_1/Z$,

13) $E = U_1 - Z_1 I_1$,

14) $I'_2 = E/Z_2$,

15) $P_\Psi = 3|I'_2|^2 \dfrac{R'_2}{s}$,

16) $M_{obr} = p_b \dfrac{P_\Psi}{\omega_1}$.

4. KOMPUTEROWA SYMULACJA PRACY SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO

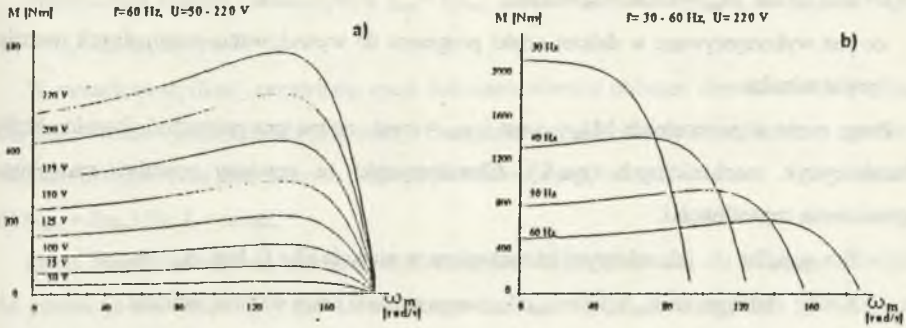
Opierając się na przytoczonym algorytmie napisano program komputerowy, pozwalający na drodze symulacji uzyskiwać różne rodziny charakterystyk silnika indukcyjnego. Program ten zawiera następujące opcje:

1) $M_{obc} = f(\omega_m)$ dla: U_1 = const, f_1 = const, ω_m = variab,

co daje możliwość uzyskania dowolnej charakterystyki mechanicznej silnika (rys. 3.a i 3.b).

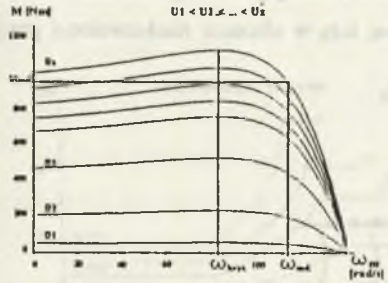
2) $M_{obc} = f(\omega_m)$ dla: $U_1 = U_n \cdot f_1/f_n$, f_1 = const, ω_m = variab,

co pozwala uzyskać rodzinę charakterystyk o równoległych przedziałach stabilnych.



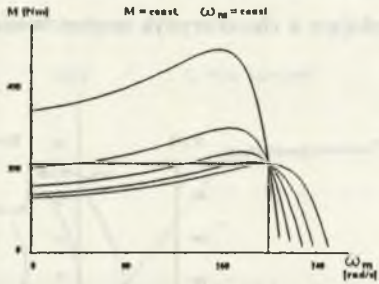
Rys. 3. Przykładowe charakterystyki $M_{obc} = f(\omega_m)$ dla różnych wartości U_1 i f_1

Fig.3. Some examples of load torque vs. rotating speed; Voltage and frequency differ from curve to curve



Rys. 4. Charakterystyki $M = f(\omega_m)$ dla stałej częstotliwości f_1 i rosnącego napięcia U_1

Fig.4. Load torque vs. rotating speed; frequency is constant and voltage increases with each curve



Rys. 5. Przykładowe charakterystyki mechaniczne dla dowolnego punktu pracy

Fig.5. The possible load torque vs. rotating speed curves for given load and speed values

3) $M_{obc} = f(\omega_m)$ dla: $M_k = M_{kn}$ = const, f_1 = const, ω_m = variab,

co pozwala porównać charakterystyki o takim samym momencie krytycznym. Przy wyliczaniu charakterystyk według opcji 3) wykorzystano stałość poślizgu krytycznego s dla różnych napięć przy stałej częstotliwości (rys. 4.). Najpierw szuka się momentu krytycznego dla U_n i f_n, a następnie dla U_n i zadanego f_1 poszukuje się poślizgu krytycznego i związanej z nim ω_{mk}. Dla znalezionego ω_{mk} i zadanego f_1 szuka się takiego U_1, aby $M(\omega_{mk}) = M_k$.

Opcje od 1 do 3 powstały w celu przetestowania prawidłowości działania algorytmu obliczeń parametrów schematu zastępczego.

4) $I = f(U_1, f_1)$ dla: M_{obc} = const i ω_m = const,

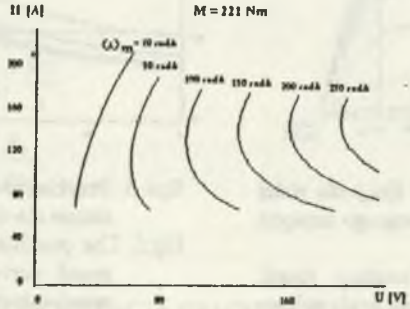
co jest wykorzystywane w dalszej części programu do wyszukiwania minimalnych wartości prądu wirnika.

Przez punkt o parametrach M_{obc} = const i ω_m = const można przeprowadzić dowolną liczbę charakterystyk mechanicznych (rys.5.). Charakterystyki te powinny spełniać następujące ograniczenia częstotliwości:

- $f_1 > \omega_m p_b / 2\pi$ (charakterystyka zaczepiona w punkcie M = 0 Nm, $\omega_m = \omega_{mzad}$)
- $f_1 < f_x$ takiego, że $\omega_{mk}(f_x) < \omega_{mzad}$ (koniec przedziału pracy stabilnej silnika).

Poszukiwane napięcie uzyskuje się zwiększając napięcie od U_1 = 1 V do takiej wartości U_n, przy której moment obliczony równa się zadanemu: $M_{obl} = M_{zad}$ (rys. 4.).

Przykładowe charakterystyki $I_1 = f(U_1)$ przedstawiono na rys. 6. Jak widać, nie uzyskuje się widocznego minimum prądu. Takie minima występują, ale ze względu na ograniczenia wartości E/f_1 wynikające z charakterystyk magnesowania silnika, leżą w obszarze niedozwolonej pracy silnika.



Rys. 6 Rodzina charakterystyk $I_1 = f(U_1)$ dla stałego momentu obciążenia M_{obc} i wybranych prędkości kątowych ω_m

Fig. 6. The stator current vs. supply voltage at constant load and different rotational speeds

5) $I_{min} = f(\omega_m)$ dla: M_{obc} = const (można uzyskać również funkcje pochodne, np. $U_1 = f(f_1)$ dla rodziny I_{min}).

W ramach tej opcji poszukuje się minimalnego prądu I_1 korzystając z opcji 4) w zakresie $\omega_m = 1 \div 2\pi 140/p_b$.

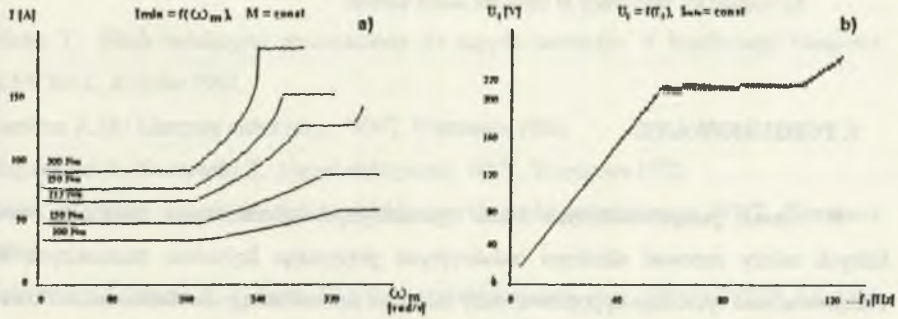
Przykładową rodzinę charakterystyk $I_{min} = f(\omega_m)$ przedstawiono na rys. 7a, a charakterystykę $U_1 = f(f_1)$ dla I_{min} na rys. 7b.

W ramach modyfikacji omawianej opcji dokonano również obliczeń charakterystyk $I = f(\omega_m)$ dla M_{obc} = const i minimalnych strat mocy. Otrzymane wyniki okazały się całkowicie zgodne z wynikami obliczeń dla minimalnych prądów, przedstawionymi na rys. 7.

6) $M_{obc} = f(\omega_m)$ dla: I_1 = const,

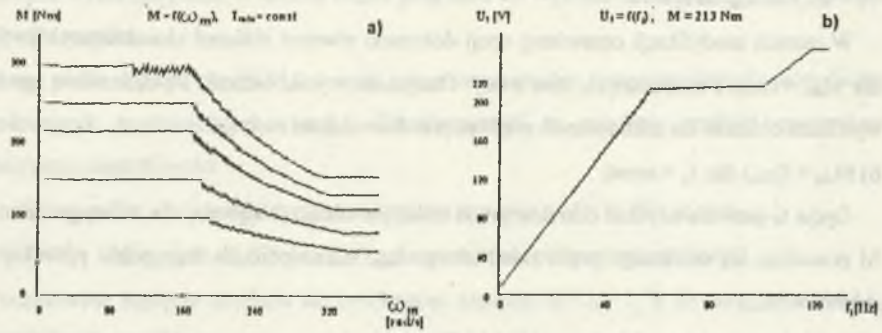
Opcja ta pozwala uzyskać charakterystyki trakcyjne silnika. Najpierw, dla zadanego momentu M poszukuje się ustalonego prądu minimalnego I_{min}, a następnie dla tego prądu poszukuje się momentu M_{max}.

Przykładową rodzinę charakterystyk $M = f(\omega_m)$ przedstawiono na rys. 8a, a charakterystykę $U_1 = f(f_1)$ dla I_1 = const na rys. 8b.



Rys. 7. Charakterystyki przy minimalizowanym prądzie I_1: a) $I_{min} = f(\omega_\mu)$, b) $U_1 = f(f_1)$

Fig. 7. a) Minimized stator current vs. Rotational speed at constant load torque b) voltage vs. frequency at rated load torque. Stator current is kept at minimum possible value



Rys. 8. a) Charakterystyki trakcyjne przy I_1 = const,

b) Charakterystyka $U_1 = f(f_1)$ dla I_1 = const

Fig. 8. a) Traction characteristics at constant stator current

b) voltage vs. frequency at constant stator current

5. PODSUMOWANIE

W ramach przeprowadzonych badań symulacyjnych zdefiniowano zależności, według których należy sterować silnikami indukcyjnymi przyjmując kryterium minimalnych strat. Przeprowadzone symulacje są poprawne przy założeniu sinusoidalnego zasilania silnika. Ponieważ w tramwaju zostaną zastosowane falowniki, planuje się symulację zasilania silnika prądem odkształconym zgodnym z rzeczywistymi przebiegami zmierzonymi na wyjściu falownika. Dla takich warunków symulacji zostaną ponownie obliczone zależności pozwalające sterować silnikami synchronicznymi - tramwajowymi wg kryterium minimalnych strat. W dalszym toku prac przewiduje się stabelaryzowanie uzyskanych zależności lub ich aproksymację w sposób umożliwiający wykorzystanie przez sterownik zainstalowany w tramwaju. Uzyskane charakterystyki mechaniczne silnika są zbliżone do charakterystyk uzyskiwanych przy zastosowaniu napędu tradycyjnego.

Podczas pisania i testowania programu zaobserwowano problemy wynikające z krokowej zmiany częstotliwości zadawanej na falowniku. Aby uniknąć zakłóceń wynikających z

gwałtownych skoków prądu minimalnego, należy zastosować krok obliczeń $\Delta f \leq 0.2$ Hz. W układzie sterowania muszą zostać uwzględnione dodatkowe czynniki, takie jak:

- układ antypoślizgowy dla kół tramwaju,
- ograniczenia prądowe wynikające z parametrów zastosowanej aparatury trakcyjnej,
- ograniczenia termiczne,
- ewentualny układ śledzący prędkość.

Planowana jest też weryfikacja charakterystyk uzyskanych w wyniku symulacji komputerowej. Zostaną przeprowadzone badania laboratoryjne silnika indukcyjnego zasilanego z falownika przy niezależnym sterowaniu napięciem i częstotliwością, oraz przy sterowanym momencie obciążenia.

LITERATURA

1. Glinka T.: Silnik indukcyjny przeznaczony do napędu tramwaju. V konferencja Naukowa SEMTRAK, Kraków 1992.
2. Plamitzer A.M.: Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1986.
3. Gogolewski Z., Kuczewski Z.: Napęd elektryczny. WNT, Warszawa 1972.
4. Paszek W.: Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego. WNT, Warszawa 1986
5. Rozenfeld A., Isajew P., Sidorow W.: Teoria eliektriczieskoj tjagi. TRANSPORT, Moskwa 1983.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Zawilak

Wpłynęło do Redakcji 20 marca 1994

Abstract

The design principles of microprocessor controller used for tramway asynchronous traction motor have been presented in this paper. The motor torque-speed relationship has been determined by numerical computation. Traction characteristics with minimum stator current (or minimum

motor losses) at constant load torque have been calculated (fig.7). Figure 8 shows traction characteristics of induction motor at constant current, rendering the same tractive effort as d.c. traction motors used today. The goal of the work was to define control factors for asynchronous traction motor, securing the minimum energy consumption under identical operating conditions as in d.c. traction motors. The work provides the grounds for further investigation, which will consider the influence of non - sinusoidal inverter output signals. The inverter constitutes the supply source for the induction traction motors.