

Maciej CZAKAŃSKI

ALGORYTM STEROWANIA SILNIKAMI INDUKCYJNYMI NAPĘDU GŁÓWNEGO TRAMWAJU

Streszczenie. W artykule omówiono elementy algorytmu sterowania tramwajem napędzanym silnikami indukcyjnymi zasilanymi z falownika napięcia. Algorytm ten ma zapewnić energooszczędną jazdę tramwaju według zadanych charakterystyk trakcyjnych. Omówiono problemy związane z aproksymacją charakterystyk sterowania, mającą na celu ich przystosowanie do umieszczenia w pamięci sterownika mikroprocesorowego. W pracy zamieszczono również schemat blokowy przygotowywanego algorytmu.

THE CONTROL ALGORITHM FOR TRAMWAY DRIVE INDUCTION MOTORS

Summary. Some elements of the control algorithm for inverter-fed cage induction motors designed for tramway drives have been presented in the paper. The purpose of this algorithm is to determine inverter output voltage and frequency in accordance with the desired traction characteristics. The ruling criterion is the minimization of the energy consumption. The problems arising from the approximation of the control quantities have been described. The approximation of the data was done in order to store the necessary values in the microprocessor controller memory. The block diagram of the algorithm has also been given in the paper.

1. WSTĘP

Szybki rozwój energoelektroniki, a szczególnie wejście na rynek nowych, wysokonapięciowych i wysokoprądowych tranzystorów IGBT, spowodował przełom w dziedzinie napędów trakcyjnych. W konstrukcji nowoczesnych napędów trakcyjnych dominują dwie tendencje:

- napędy z silnikami szeregowymi prądu stałego zasilanymi z choppera,
- napędy z silnikami indukcyjnymi zasilanymi z falownika napięcia.

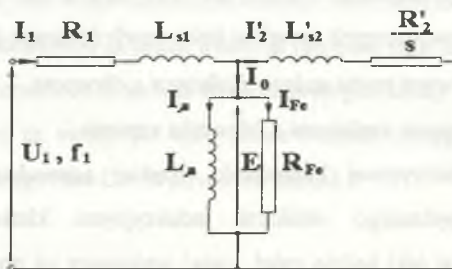
W Zakładzie Trakcji Elektrycznej Politechniki Śląskiej prowadzone są prace nad konstrukcją tramwaju napędzanego silnikami indukcyjnymi klatkowymi zasilanymi z falownika napięcia. Tramwaj taki będzie mógł zostać wykonany na podstawie konstrukcji mechanicznej masowo wykorzystywanego w Polsce tramwaju typu 105-N. Na jego potrzeby

zostały zaprojektowane i wykonane indukcyjne silniki trakcyjne STD200L4 [2], których parametry trakcyjne i gabaryty umożliwiają zainstalowanie ich w miejsce silników prądu stałego LT-220, stosowanych obecnie w tramwaju 105-N.

W niniejszej pracy przedstawiono elementy algorytmu sterowania silnikami indukcyjnymi przeznaczonymi do zastosowania w tramwaju. Przygotowując algorytm brano pod uwagę minimalizację zużycia energii przez silniki trakcyjne, realizację przez pojazd tych samych parametrów trakcyjnych, co przy napędzie tradycyjnym oraz zapewnienie pełnego komfortu i bezpieczeństwa jazdy nowego tramwaju.

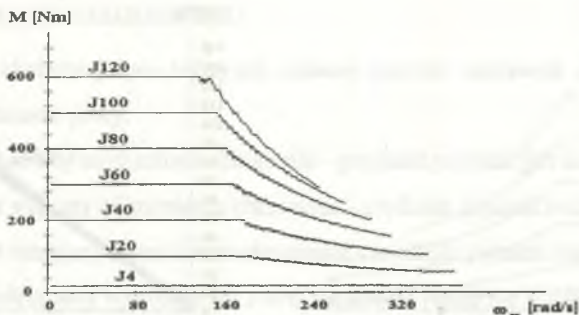
2. ZAŁOŻENIA WSTĘPNE

Opracowując algorytm wykorzystano wyniki szeregu symulacji komputerowych dokonanych przez autora. Symulacji dokonano opierając się na przedstawionym na rys.1 schemacie zastępczym silnika indukcyjnego klatkowego o pojedynczej klatce z okrągłymi prętami [4]. Dodatkowo założono pełną symetrię uzwojeń silnika o rozkładzie sinusoidalnym i symetrię obwodu magnetycznego oraz przyjęto, że pracę układu napędowego rozpatruje się quasi-stacjonarnie. W obliczeniach symulacyjnych nie uwzględniono wyższych harmonicznych. Dokładny opis algorytmu stosowanego podczas obliczeń symulacyjnych zamieszczono w pracy [1]. W celu zapewnienia optymalnego zużycia energii przez pojazd obliczono, dla jakich parametrów napięcia i częstotliwości straty w silniku osiągną wartości minimalne przy jednoczesnym realizowaniu założonych charakterystyk trakcyjnych. Przykładowe charakterystyki trakcyjne wyliczone przy założeniu minimalnego zużycia energii przedstawiono na rys.2.



Rys.1. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego, klatkowego

Fig.1. The equivalent scheme of cage induction motor



Rys.2. Charakterystyki mechaniczne tramwaju wyliczone dla różnych pozycji nastawnika jazdy przy założeniu minimalnego zużycia energii

Fig.2. Computed tramway torque vs. speed curves at different controlled positions; the energy consumption was assumed to be minimum

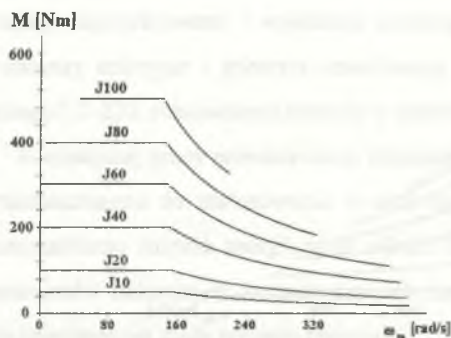
3. KRYTERIUM DOBORU METODY STEROWANIA

Z wykonanych symulacji, jak również z literatury [8] wynika, że minimalizację strat mocy uzyskuje się stosując kryterium sterowania polegające na utrzymywaniu stałego momentu M_{ust} w zakresie prędkości kątowych silnika od 0 do ω_{gr} (gdzie ω_{gr} jest prędkością zapewniającą uzyskanie zadanego momentu mechanicznego silnika M_{ust} przy jego zasilaniu napięciem o częstotliwości znamionowej f_n) oraz stałej mocy dla prędkości kątowych silnika większych od ω_{gr} . Korzystając z powyższego kryterium można na drodze symulacji komputerowej uzyskać rodzinę pożądanых charakterystyk trakcyjnych pojazdu:

$$M = f(\omega_m) \quad (1)$$

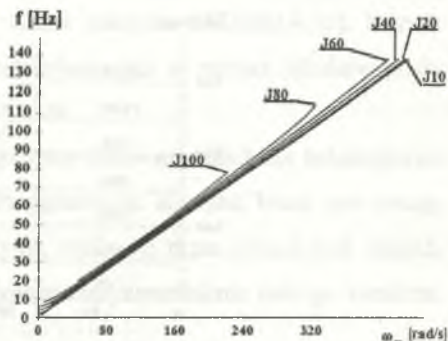
gdzie: M - moment mechaniczny silnika, ω_m - prędkość kątowa silnika.

Każda taka charakterystyka odpowiada jednej pozycji nastawnika jazdy. Zdecydowano się na zastosowanie w tramwaju 120 pozycji rozruchowych i tyłuż pozycji hamulcowych nastawnika jazdy. Daje to w sumie 240 pozycji i umożliwia przekazywanie ich cyfrowo w postaci jednobajtowej informacji. Przyjmując maksymalny moment, jaki możemy uzyskać z silnika, jako 600 N·m, uzyskamy różnicę między kolejnymi pozycjami nastawnika jazdy wynoszącą 5 N·m. Dlatego układ sterowania powinien zapewnić odchył rzeczywistego momentu uzyskanego na wale silnika w stosunku do momentu zadanego charakterystyką pożądaną, mieszczący się w granicach ± 2.5 N·m.



Rys.3. Charakterystyki mechaniczne tramwaju dla wybranych pozycji nastawnika jazdy przy uwzględnieniu parametrów falownika

Fig.3. Tramway torque-speed curves for some controller positions the converter properties were taken into consideration



Rys.4. Charakterystyki częstotliwości w funkcji prędkości silnika dla wybranych pozycji nastawnika jazdy

Fig.4. Frequency vs. motor speed for some controller positions

W większości dostępnych falowników sterowanie realizowane jest poprzez zewnętrzne zadawanie częstotliwości napięcia wyjściowego. Wartość skuteczna napięcia wyjściowego będąca funkcją tej częstotliwości jest automatycznie wypracowywana w wewnętrznym układzie sterowania falownika. Dlatego też najwygodniej jest sterować falownikiem poprzez zadawanie pożądanej częstotliwości. Jednocześnie najłatwiejszym do pomiaru w warunkach pracy trakcyjnej parametrem silnika jest jego prędkość.

Analizując powyższe kryteria algorytm sterowania tramwajem zdecydowano się oprzeć na funkcji:

$$f = f(J_x, \omega_m) \quad (2)$$

gdzie: f - częstotliwość zadana do falownika, J_x - x -ta pozycja nastawnika jazdy.

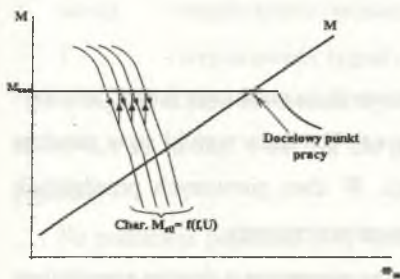
Funkcja sterowania częstotliwością jest funkcją dyskretną, powstała na drodze symulacji komputerowej. Każdy z jej punktów jest związany z odpowiednią wartością momentu M na charakterystyce trakcyjnej tramwaju $M = f(\omega_m)$, zadanej pozycją J_x nastawnika jazdy. Charakterystyki trakcyjne odpowiadające wybranym pozycjom nastawnika jazdy oraz związane z nimi charakterystyki częstotliwości w funkcji prędkości kątowej silnika przedstawiono odpowiednio na rysunkach 3 i 4.

4. ZASADA DZIAŁANIA ALGORYTMU

Poruszając się po charakterystyce trakcyjnej zadanej poprzez nastawnik jazdy możemy spotkać się z trzema stanami pracy:

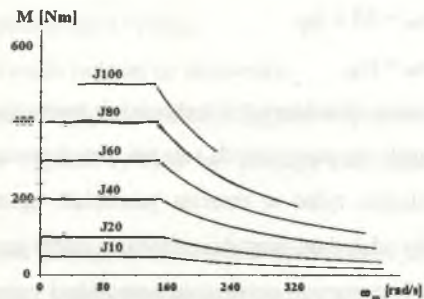
- 1) zadany moment jest równy momentowi obciążenia - prędkość pojazdu jest ustalona,
- 2) zadany moment jest większy od momentu obciążenia - prędkość pojazdu rośnie,
- 3) zadany moment jest mniejszy od momentu obciążenia - prędkość pojazdu maleje.

Z każdą częstotliwością oraz wynikającym z niej napięciem wiąże się konkretna charakterystyka mechaniczna silnika. Wyliczając z zależności (2) częstotliwość odpowiadającą aktualnej prędkości oraz pozycji nastawnika i zadając ją na falownik, uzyskujemy charakterystykę mechaniczną przechodzącą przez aktualny punkt pracy silnika. Jeżeli moment uzyskany w tym punkcie pracy nie jest równy momentowi obciążenia, punkt pracy przesuwa się po charakterystyce mechanicznej silnika odpowiednio w górę lub w dół powodując zmianę momentu na wale i co za tym idzie, zmianę prędkości silnika. W kolejnym kroku częstotliwość jest korygowana dla nowej prędkości i punkt pracy przenosi się na nową charakterystykę mechaniczną silnika, przyjmując z powrotem wartość momentu wynikającą z zadanej charakterystyki trakcyjnej pojazdu. Zasadę działania algorytmu dla stanu pracy, przy którym zadany nastawnikiem moment jest większy od momentu obciążenia i prędkość pojazdu rośnie, przedstawiono na rys.5.



Rys.5. Zasada działania algorytmu sterowania tramwaju

Fig.5. The principle of tramway's control algorithm



Rys.6. Charakterystyki mechaniczne tramwaju dla wybranych pozycji nastawnika jazdy uzyskane przy wykorzystaniu funkcji $f = f(\omega_m)$ aproksymowanej wielomianami w trzech przedziałach

Fig.6. The tramway torque-speed curve for some controller positions computed with the the function $f = f(\omega_m)$; function approximated with different polynomials in three different speed ranges

5. APROKSYMACJA WIELOMIANOWA FUNKCJI STEROWANIA CZĘSTOTLIWOŚCIĄ

Każda z dyskretnych charakterystyk $f=f(\omega_m)$ dla danego J_x , aby zapewnić pracę w zakresie $M_{zad} \pm 2.5 \text{ N}\cdot\text{m}$, musi liczyć około 7000 + 10000 punktów. Jeśli uwzględnić, że należałoby stabilizować 240 takich charakterystyk, to niezbędna do pracy sterownika tablica danych wymagałaby powyżej 8 MB pamięci komputerowej, a co za tym idzie grubo przekroczyła dostępną przestrzeń adresową mikroprocesora MCS-51 (64 kB). Dlatego niezbędnym stało się ograniczenie ilości danych. Kształt charakterystyk $f=f(\omega_m)$ (rys.4) zasugerował możliwość aproksymowania ich wielomianami 2 lub 3 rzędu. Zastosowano metodę aproksymacji wielomianowej opisaną w [4], wykorzystując dołączoną do książki procedurę „POLAPPROX” stworzoną w języku Turbo Pascal.

Aproksymacja funkcji $f=f(\omega_m)$ pojedynczym wielomianem trzeciego rzędu okazała się niewystarczająca. Odchyły uzyskanego na podstawie tego wielomianu momentu mechanicznego do momentu zadanego wyniosły ponad 30% (dla momentu zadanego o wartości 200 N·m). Aby uzyskać dostateczną dokładność aproksymacji, dokonano podziału funkcji dyskretniej $f=f(\omega_m)$ na trzy przedziały i osobno aproksymowano każdy z przedziałów. Przyjęto przedziały prędkości:

$$\omega_m = 0 \div 30 \text{ rad/s}$$

$$\omega_m = 30 \div \omega_{gr}$$

$$\omega_m > \omega_{gr}$$

Porównanie charakterystyk trakcyjnych tramwaju wyliczonych na podstawie funkcji aproksymowanych wg powyższych założeń przedstawiono na rys.6. Uzyskane wyniki są w zasadzie zadowalające tylko w trzecim przedziale aproksymacji. W dwu pierwszych przedziałach powstały odchyły od wartości pożądanego budzi jeszcze pewne zastrzeżenia.

Trwają prace nad ustaleniem optymalnej granicy między pierwszym a drugim przedziałem aproksymacji, nad indywidualnym dopasowaniem rzędu wielomianu do aproksymowanego odcinka oraz nad ograniczeniem ilości punktów z dyskretniej charakterystyki $f=f(\omega_m)$ analizowanych przez procedurę aproksymacyjną, mające na celu poprawienie wyników aproksymacji

Dzięki zastosowaniu 3-przedziałowej aproksymacji wielomianami 2 i 3 rzędu funkcji dyskretniej $f=f(\omega_m)$, możliwe stało się poważne ograniczenie ilości danych niezbędnych do sterowania tramwajem. Teraz dla zapisania 240 charakterystyk wystarcza 13 440 bajtów

pamięci ROM. Taka tablica z danymi jest do przyjęcia przy zastosowaniu praktycznie dowolnego mikroprocesora.

6. SCHEMAT BLOKOWY ALGORYTMU STEROWANIA TRAMWAJEM

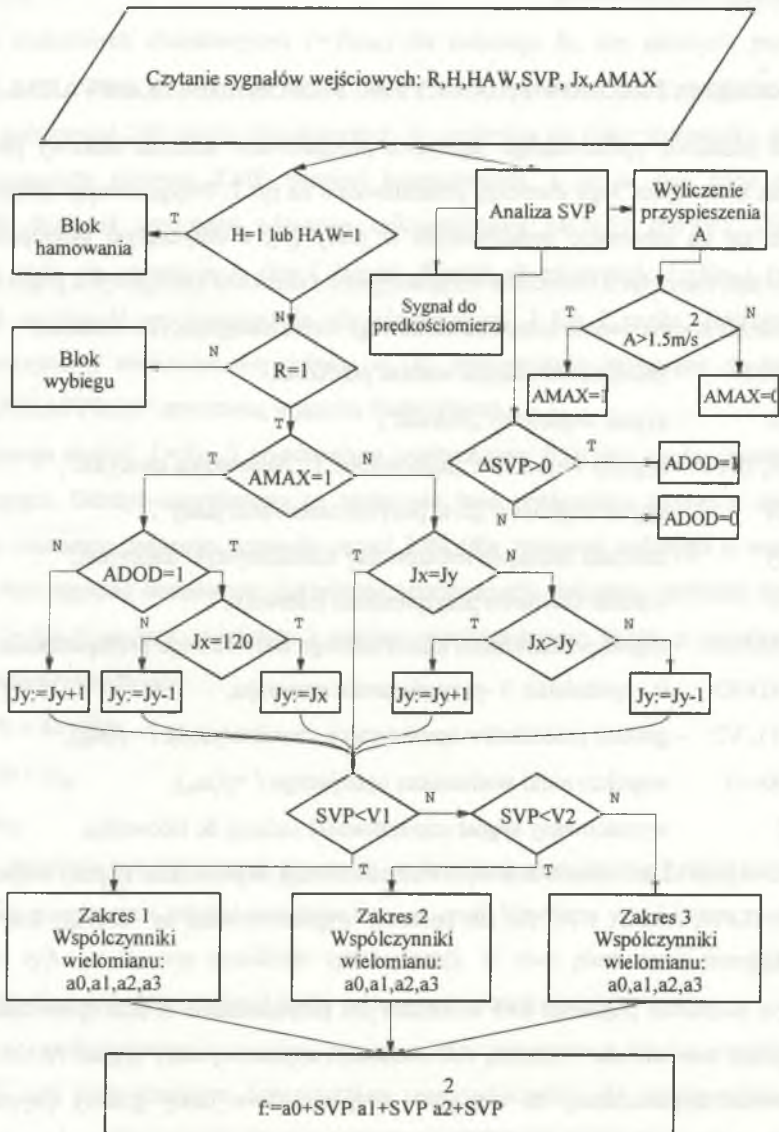
Na podstawie opracowanego algorytmu przygotowano schemat blokowy programu sterowania tramwajem. Jego elementy przedstawiono na rys.7. Przygotowując schemat blokowy oparto się na schemacie opracowanym w pracy [9], a dotyczącym mikroprocesorowego sterowania tramwaju z rozruchem rezystancyjnym i silnikami szeregowymi prądu stałego.

Podczas konstruowania schematu blokowego użyto następujących oznaczeń:

- SVP - zmienna określająca wartość prędkości,
- R - sygnał wejściowy „rozruch”,
- H, HAW - sygnały wejściowe: „hamowanie” i „hamowanie awaryjne”,
- Jx - sygnał wejściowy „x-ta pozycja nastawnika jazdy”,
- Jy - znacznik aktualnie realizowanej charakterystyki trakcyjnej,
- A - wartość chwilowa przyspieszenia tramwaju,
- AMAX - sygnał przekroczenia maksymalnego dozwolonego przyspieszenia,
- ADOD - 0 - opóźnienie, 1 - przyspieszenie tramwaju,
- V1, V2 - granice przedziałów aproksymacji charakterystyki $f=f(\omega_m)$,
- a_0+a_3 - współczynniki wielomianu opisującego $f=f(\omega_m)$,
- f - wypracowany sygnał częstotliwości zadanej do falownika.

Na wejście układu sterowania wprowadzane zostają odpowiednie sygnały wejściowe: SVP, R, H, HAW, AMAX i Jx. Na ich podstawie wypracowywane są decyzje dotyczące jazdy pojazdu.

Na podstawie prędkości SVP obliczane jest przyspieszenie A oraz sprawdzane jest, jaką przyjmuje ono wartość - ujemną lub dodatnią (wypracowywany sygnał ADOD) i czy nie przekracza dopuszczalnej ze względów bezpieczeństwa jazdy granicy (wypracowywany sygnał AMAX).



Rys.7. Algorytm sterowania tramwaju wg jego charakterystyk trakcyjnych

Fig.7. The control algorithm of the tramway based on torque-speed curves

Jeżeli aktywne są H lub HAW, to rozpoczynany jest proces hamowania. Jeżeli brak jest sygnału R, a nie zachodzi hamowanie, to przyjmuje się wystąpienie jazdy z wybiegu. Opisu opcji hamowania i jazdy z wybiegu nie uwzględniono w niniejszej pracy.

Gdy $R=1$ (rozruch), następuje kontrola, czy nie przekroczono dopuszczalnego przyspieszenia (sygnał AMAX). Jeśli przekroczono dopuszczalne przyspieszenie, niezależnie od nastawy nastawnika jazdy, wewnętrzny licznik aktualnie realizowanej charakterystyki mechanicznej J_y jest w zależności od znaku przyspieszenia odpowiednio modyfikowany tak, aby sprowadzić przyspieszenie do bezpiecznej wartości. Wyjątkiem jest sytuacja, gdy $J_x=120$ (maksymalna nastawa nastawnika jazdy). Nastawa ta traktowana jest jako awaryjna i realizowana bez względu na aktualne przyspieszenie.

Jeżeli przyspieszenie mieści się w normie, następuje kontrola czy $J_x=J_y$, to znaczy, czy wewnętrzny licznik aktualnie realizowanej charakterystyki mechanicznej jest zgodny z nastawą zadaną nastawnikiem jazdy. Jeżeli następują rozbieżności, J_y jest tak zmieniany, aby jego wartość zbliżyła się o 1 do wartości J_x . Zapewnia to stopniowe zmiany charakterystyk w kolejnych krokach programu i pozwala uniknąć nadmiernych przyspieszeń.

Po ustaleniu aktualnej wartości J_y , w zależności od tego, w jakim przedziale prędkości znajduje się SVP, wybierany jest jeden z trzech zakresów charakterystyki $f=f(J_x, \omega_m)$. Na podstawie stabelaryzowanych dla danego zakresu prędkości parametrów trójmianu, wyliczana jest częstotliwość, jaką należy zadać do zrealizowania przez falownik. Program wraca do fazy odczytywania sygnałów wejściowych.

7. PODSUMOWANIE

Przedstawiony powyżej algorytm został opracowany tak, aby sterowany przy jego zastosowaniu tramwaj spełniał kryteria bezpiecznej i energooszczędnej jazdy. Zastosowanie charakterystyk $f=f(J_x, \omega_m)$ pozwala na maksymalne uproszczenie procedur sterowania i uzależnienia uzyskiwanego na wale silnika momentu od zadanej przez motorniczego charakterystyki trakcyjnej i od aktualnej prędkości tramwaju. Poprzez aproksymację funkcji sterowania wielomianami, zminimalizowano objętość tablicy danych, umożliwiając szybkie wypracowanie sygnału sterującego częstotliwością i napięciem wyjściowym falownika zasilającego napęd tramwaju. Tak opracowany algorytm znakomicie nadaje się do realizacji nawet na nieskomplikowanym systemie mikroprocesorowym. Planuje się zastosowanie oddzielnego

mikroprocesora zajmującego się wyłącznie wypracowywaniem częstotliwości zadawanej do falownika.

Przedstawione charakterystyki dotyczą konkretnego silnika i konkretnego, przeznaczonego do pracy z nim falownika. W zasadzie wszystkie obliczenia symulacyjne muszą być wykonywane indywidualnie z uwzględnieniem parametrów zastosowanych silników i falownika.

W najbliższym czasie zostanie opracowany prototyp sterownika opartego na omówionym algorytmie. Zostanie on przetestowany na istniejącym w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Politechniki Śląskiej stanowisku laboratoryjnym składającym się z silnika indukcyjnego STD200L4, zasilającego go falownika oraz silnika LT-220 pracującego jako hamownica.

W algorytmie sterowania tramwajem napędzanym silnikami indukcyjnymi nie uwzględniono wpływu sprzężeń od prądu i od częstotliwości wyjściowej falownika. Ich opracowanie dla celów niniejszego algorytmu jest przedmiotem dalszych prac. Nie uwzględniono również układu antypoślizgowego. Jednak zastosowanie silników indukcyjnych w zasadzie eliminuje problemy z poślizgiem zwykle występujące w pojazdach z silnikami szeregowymi prądu stałego.

LITERATURA

1. Czakański M.: Układ sterowania napędem głównym tramwaju z silnikami indukcyjnymi klatkowymi. ZN Pol. Śl. Elektryka z. 139, Gliwice 1994.
2. Glinka T., Kochanowski W.: Silnik indukcyjny przeznaczony do napędu tramwaju. ZN Pol. Śl. Elektryka z. 139, Gliwice 1994.
3. Marciniak A., Gregulec D., Kaczmarek J.: Basic Numerical Procedures in Turbo Pascal for Your PC. Nakom, Poznań 1991.
4. Plamitzer A.M.: Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1986.
5. Rozenfeld, Isajew, Sidorow: Teoria eliektriczieskoj trjagi. Transport, Moskwa 1983.
6. Talar W.: Opis algorytmu działania elektronicznego bloku sterowania EBS wagonu tramwajowego 805NS. Zakład Doświadczalny Miejskiej Komunikacji Szynowej, MPK Łódź 28.07.1988.

Recenzent: Dr hab.inż. Krystyna Macek-Kamińska, prof. WSI w Opolu

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 czerwca 1995 r.

Abstract

Some elements of the control algorithm for induction motors designed for tramway drives have been presented in the paper. In order to generate this algorithm, the following factors have been taken into account:

- the traction motors energy consumption must be brought down to a minimum possible level
- the traction characteristics of the modified drive must not deteriorate in comparison with the dc series motor drive currently used
- the comfort and safety of the passengers must be assured.

Determining the algorithm was done with the help of computer simulation. In order to minimize the energy consumption it was necessary to compute the minimum energy loss of the motor at the given values of motor supply voltage and frequency. In this case the input values are motor torque and speed. The results of these computations have been set out in the form of the table; the values of the motor supply voltage are entered here as the function of the appropriate torque-speed curve of the tramway. The data contained in the table has been next approximated by polynomials. The reason for this is constituted by the limited memory capacity of the microprocessor controller which will be utilized to control the PWM voltage inverters feeding the ac induction traction motors. The principles of changing the necessary traction characteristics by the tram driver have been worked out.