

Tadeusz GLINKA
Romuald GRZENIK
Zygmunt MOŁOŃ

BADANIE PARAMETRÓW ELEKTROMECHANICZNYCH SILNIKA TRAKCYJNEGO PRĄDU STAŁEGO ZASILANEGO ZŁĄCZNIKA TRANZYSTOROWEGO

Streszczenie. Silnik szeregowy prądu stałego zasilany z łącznika tranzystorowego, przy wysokiej częstotliwości przełączania tranzystorów, większej od 10 kHz, stanowi, z uwagi na swoje charakterystyki elektromechaniczne i właściwości, w szczególności dotyczące pracy hamulcowej z rekuperacją energii jakościowo nowy rodzaj napędu pojazdu trakcyjnego. Dla tak wysokich częstotliwości przełączania parametry elektryczne silnika nie zostały dotychczas zidentyfikowane. Identyfikacja tych parametrów, przeprowadzona na przykładzie silnika tramwajowego LT 220; 40 kW; 300 V; 1890 obr./min, jest tematem tego referatu. W celu podwyższenia dokładności odwzorowania impedancji parametry tych funkcji wyznacza się eksperymentalnie dla danego typu maszyny.

INVESTIGATION OF ELECTROMECHANICAL PARAMETERS OF A D.C. TRACTION MOTOR SUPPLIED BY THE TRANSISTOR CHOPPER

Summary. A d.c. series motor supplied by the transistor chopper at high frequency of transistor switching (higher than 10 kHz) is a new kind of traction vehicle drive when considering its electromechanical characteristics and properties dealing with braking operation with power recuperation. So far electrical parameters of the motor have not been identified for such high frequencies of switching. The purpose of this paper is to identify the above parameters of the tramway motor LT 220, 40 kW, 300 V, 1890 r.p.m. To increase the accuracy of the impedance mapping the parameters of the functions are determined in an experimental way for the given type of a motor.

1. WSTĘP

Silnik szeregowy prądu stałego zasilany z łącznika tranzystorowego stanowi, z uwagi na swoje charakterystyki elektromechaniczne i właściwości, w szczególności dotyczące pracy hamulcowej z rekuperacją energii jakościowo nowy rodzaj napędu pojazdu trakcyjnego [1]. Te cechy napęd ten uzyskuje dzięki wysokiej częstotliwości przełączenia tranzystorów,

większej od 10 kHz. Nie było to możliwe do osiągnięcia przy łączniku tyrystorowym. Dla tak wysokich częstotliwości przełączenia parametry elektryczne silnika nie zostały dotychczas zidentyfikowane. Identyfikacja tych parametrów przeprowadzona na przykładzie silnika tramwajowego LT 220; 40kW; 300V; 1890 obr./min jest celem tego referatu. W paśmie częstotliwości pracy łączników tyrystorowych, to jest od 0 do 1000Hz, impedancja uzwojeń, a także strumienie wzbudzone przez te uzwojenia w maszynach prądu stałego zostały rozpoznane i opisane w literaturze [2 i 3]. Modele opisujące zarówno impedancję, jak i strumień w zależności od częstotliwości zbudowano przy szeregu założeniach upraszczających. Pomimo tego otrzymuje się bardzo uwikłane funkcje o parametrach rozłożonych. Funkcje te tylko w przybliżeniu odwzorowują charakterystyki rzeczywiste. W celu zwiększenia dokładności odwzorowania impedancji parametry tych funkcji wyznacza się eksperymentalnie dla danego typu maszyny. Zależnościami tymi można się posługiwać tylko w paśmie częstotliwości, dla których ich parametry były zweryfikowane. Nie można tych funkcji ekstrapolować na częstotliwości wyższe.

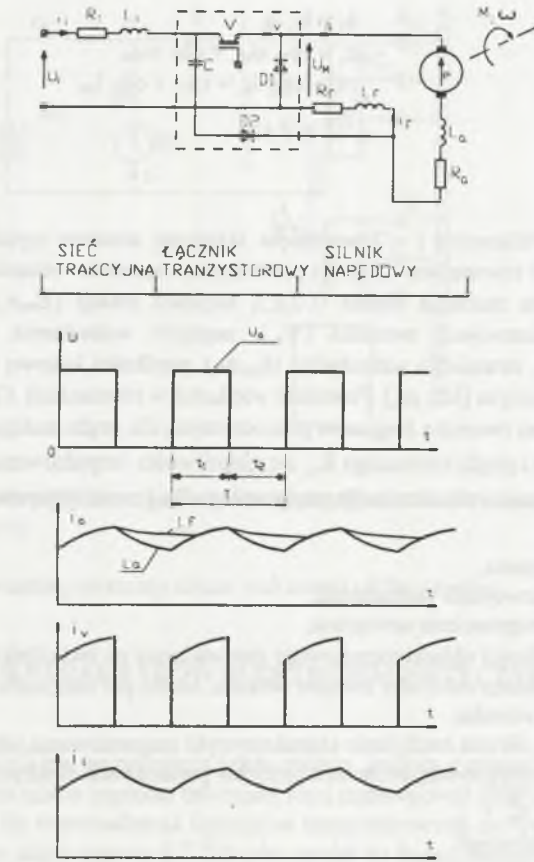
2. PARAMETRY MODELU MATEMATYCZNEGO SILNIKA SZEREGOWEGO PRĄDU STAŁEGO DLA WYSOKICH CZĘSTOTLIWOŚCI IMPULSOWANIA

Układy zasilania silników szeregowych prądu stałego z łączników tranzystorowych zaprezentowano w pracy [1]. Układy te widziane z zacisków uzwojenia silnika można uprościć do schematu jak na rys.1. Schemat ten jest bardziej czytelny do obliczania składowych prądów w poszczególnych elementach obwodu, w tym w uzwojeniach obwodu twornika i uzwojeniu wzbudzenia. Model matematyczny silnika szeregowego prądu stałego, przy zasilaniu poprzez łącznik tranzystorowy z sieci prądu stałego, przedstawiono w pracy [4]. Analizujemy stan pracy ustalonej napędu, to znaczy stan, w którym przedziały czasowe załączenia silnika do sieci (t_1) i stan wyłączenia napięcia zasilania ($t_2 = T - t_1$) powtarzają się. W czasie (t_1) załączony jest tranzystor V, a w czasie (t_2) prądy i_a ; i_f przewodzone są przez diody D1 i D2. Dla takiego stanu pracy przebiegi rzeczywiste napięcia, prądu, strumieni magnetycznych momentu elektromagnetycznego i prędkości kątowej wirnika będą zawierały składowe stałe i zmienne. Składowe zmienne można rozłożyć na szeregi Fouriera i analizę ograniczyć do pierwszych harmonicznych czasowych - rys.1.

Równania te można rozdzielić na dwa zestawy równań [4]:

- równania wiążące parametry elektromechaniczne stałe, obowiązują także w warunkach quasi- statycznych:

$$\begin{aligned} U_o &= E_o + R_o I_{a0} + U_{f0} , \\ U_{f0} &= R_f I_{f0} , \end{aligned}$$



Rys.1. Schemat elektryczny zasilania silnika trakcyjnego poprzez łącznik tranzystorowy oraz wykresy czasowe napięć i prądów w tym obwodzie.

Sieć trakcyjna. Łącznik tranzystorowy. Silnik napędowy .

Fig. 1. Circuit diagram of a supply system of d.c. series motor supplied by the transistor chopper, and voltage and current courses in the circuit. Catenary. Chopper. Motor

$$\begin{aligned}
 E_o &= c \phi_{fo} \omega_{mo} , \\
 \phi_{fo} &= k_{fo} I_{fo} , \\
 M_o &= c \phi_{fo} I_{a0} , \\
 \frac{d\omega_a}{dt} &= \frac{1}{J} (M_o - M_{ob}) ,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

- równania opisujące składowe zmienne:

$$\begin{aligned}
 \mu_a &= e_a + R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} + \mu_{f_1} , \\
 \mu_f &= R_f i_f + z_f \frac{1}{\sigma} \frac{d\phi}{dt} ,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \phi_r &= k_{f-} i_{f-} , & (2) \\
 e_- &\approx c\phi_{f_0} \omega_{m_-} + c\phi_{f-} \omega_{m_0} , \\
 m_- &\approx c\phi_{f_0} i_{a-} + c\phi_{f-} + c\phi_{f-} I_{a_0} , \\
 \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{m}{J} ,
 \end{aligned}$$

W równaniach przybliżonych (\approx) pominięto składowe zmienne wynikające z iloczynów ($\Phi_{\omega_{m_-}}$; $\Phi_{i_{a_-}}$). W równaniach (1) i (2) poszczególne symbole oznaczają składowe stałe i zmienne w: napięciu zasilania silnika (U_0, μ_-), napięciu rotacji (E_m, e_-); prądzie twornika (I_{a_0}, i_{a-}), strumieniozwojach twornika (Ψ_{a-}), napięciu wzbudzenia (U_{f_0}, μ_{f-}), prądzie wzbudzenia (I_{f_0}, i_{f-}), strumieniu wzbudzenia (ϕ_{f_0}, ϕ_{f-}), prędkości kątowej wirnika ($\omega_{m_0}, \omega_{m-}$) i momencie magnetycznym (M_0, m_-). Pozostałe wielkości w równaniach (1 i 2) to:

- rezystancja uzwojeń twornika biegunów pomocniczych dla prądu stałego R_{a_0} kompensacyjnego i prądu zmiennego R_{a-} o częstotliwości impulsowania ($\frac{1}{T}$),
- rezystancja uzwojenia wzbudzenia dla prądu stałego R_{f_0} i prądu zmiennego o częstotliwości ($\frac{1}{T}$),

M_{ob} - moment obciążenia,

z_f - liczba zwojów uzwojenia wzbudzenia,

σ_{f-} - współczynnik rozproszenia uzwojenia,

J - moment bezwładności układu napędowego sprowadzony na wał silnika,

c - parametr stały zależny od liczby zwojów wirnika, liczby par biegunów oraz wymiarów geometrycznych wirnika,

- współczynnik k_{f_0} określa nachylenie charakterystyki magnesowania silnika.

W tym artykule naszą uwagę skoncentrujemy na parametrach elektrycznych silnika:

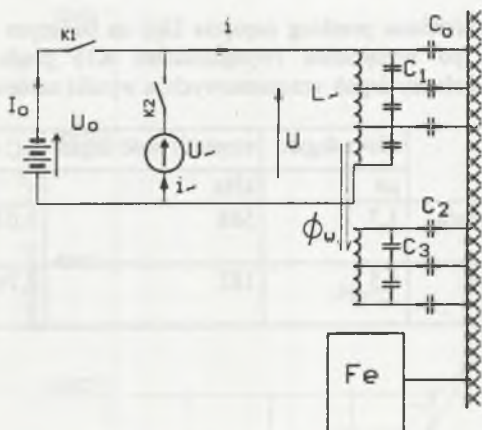
- rezystancjach $\frac{R_{a-}}{R_{a_0}}$, $\frac{R_{f-}}{R_{f_0}}$ i
- indukcyjnościach uzwojeń

$$\begin{aligned}
 \frac{L_{a-}}{L_{a_0}} &= \frac{\Psi_{a-}}{\Psi_{a_0}} \frac{I_{a_0}}{I_{a-}} , & (3) \\
 \frac{L_{f-}}{L_{f_0}} &= \frac{\phi_{f-}}{\phi_{f_0}} \frac{I_{f_0}}{I_{f-}} .
 \end{aligned}$$

przy zadanej częstotliwości impulsowania ($\frac{1}{T}$). Współczynnik rozproszenia σ_{f-} można wyznaczyć mierząc pochodną strumienia w szczelinie magnetycznej ($d\Phi_{f-}/dt$) cewką pomiarową umieszczoną w szczelinie silnika obejmującą biegun główny.

$$\sigma_{f-} = \frac{z_f \frac{d\Phi_{f-}}{dt}}{\sqrt{U^2 - (R_f I_f)^2}} , & (4)$$

przy czym U_f, I_{f-} oznacza wartości skuteczne napięcia i prądu w uzwojeniu wzbudzenia. Przy wysokiej częstotliwości impulsowania o parametrach (3 i 4) decydują zarówno obwody zwarte i elementy lite sprzężone z danym uzwojeniem, jak również wypieranie prądów w przewodach uzwojenia, a także pojemność między poszczególnymi przewodami i pojemności doziemne - rys.2.



Rys.2. Schemat układu pomiarowego parametrów uzwojenia wraz z modelem fizycznym tego uzwojenia

Fig. 2. Diagram of winding mesuring circuit and model of the winding

3. WYNIKI BADAŃ PARAMETRÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH SILNIKA LT220

Silnik LT 220 jest silnikiem szeregowym prądu stałego, jednym z czterech napędu głównego tramwaju. Z uwagi na niskie napięcie trakcyjnej sieci tramwajowej (600V) już dzisiaj istnieją warunki techniczne do wprowadzenia łączników tranzystorowych do tych napędów. Z tego też względu wybrano silnik typowy LT 220 jako model do badań eksperymentalnych. Każde z uzwojeń badano przy zasilaniu napięciem stałym (U_0) i napięciem przemiennym (U_-) o zmiennej częstotliwości w przedziale od 20Hz do 20 kHz. Przy zasilaniu napięciem stałym i obwodzie magnetycznym nienasyconym pomierzone zostały parametry silnika R_{a0} ; R_{f0} ; L_{a0} = T_{a0} R_{a0} ; L_{f0} = T_{f0} R_{f0} ; $(c\Phi_{f0})$ k_{f0} , parametry te zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

R_{a00}	R_{f0}	T_{a0}	T_{f0}	L_{a0}	L_{af}	$c\Phi_{f0}$	c	k_{f0}	δ_{f0}
mΩ	mΩ	s	s	mH	mH	Vs	-	Vs/A	-
95,8	25,8	0,031	0,43	3,0	11,1	1,4	15,4	$0,6 \cdot 10^{-3}$	0,8

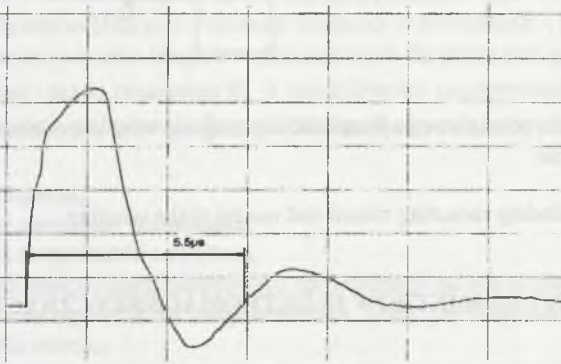
Prądem stałym przeprowadzono także weryfikację modelu fizycznego uzwojenia (rys.2) a mianowicie sprawdzono częstotliwość drgań własnych układu

$$(L_- C_-) = \frac{1}{\omega^2} \quad (5)$$

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przebieg napięcia $U(t)$ na badanym uzwojeniu (przy wyłączniku K2 otwartym) po wyłączeniu (wyłącznikiem K1) prądu stałego I_0 . Z oscylogramów tych odczytano okresy drgań rezonansowych, a wyniki zestawiono w tabeli 2.

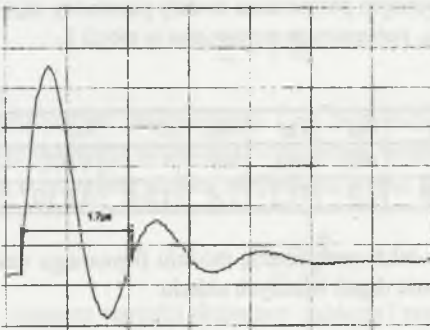
Tabela 2 -

Parametr	okres drgań	częstotliwość drgań	$LC = \frac{1}{4\pi^2 f^2}$
	μs	kHz	s^2
uzwojenie wzbudzenia E1E2	1,7	588	0,073
uzwojenie twornika A1B2	5,5	182	0,765



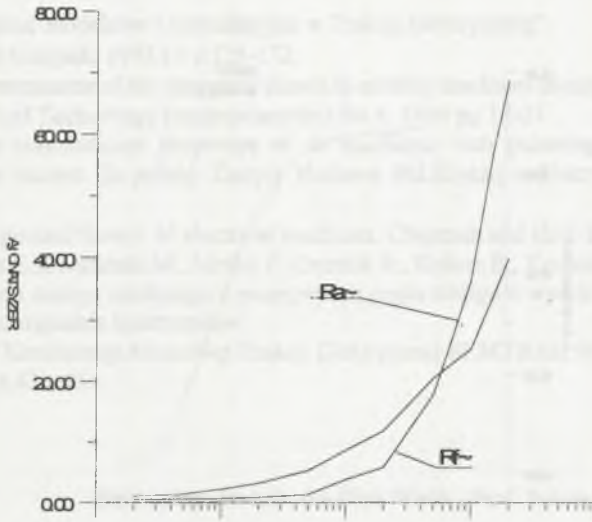
Rys.3. Wykres czasowy napięcia na uzwojeniu twornika (A1B2) po wyłączeniu prądu stałego (I_0)

Fig. 3. The course of armature winding voltage after turning off d.c. current



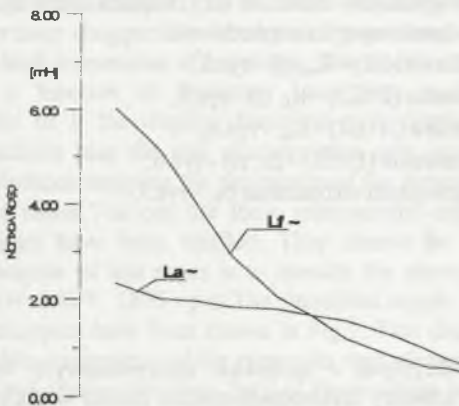
Rys.4. Wykres czasowy napięcia na uzwojeniu wzbudzenia (E1E2) po wyłączeniu prądu stałego (I_0)

Fig.4. The course of existing winding voltage after turning off d.c. current



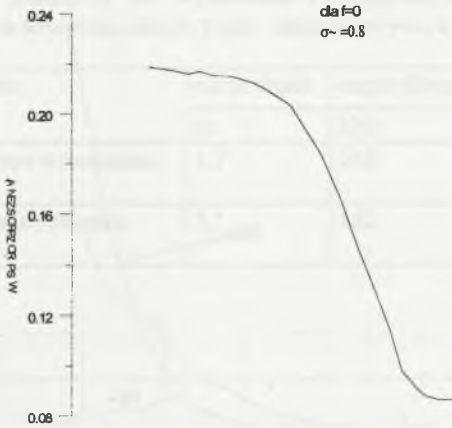
Rys.5. Zależność rezystancji uzwojeń twornika R_a i wzbudzenia R_f od częstotliwości silnika trakcyjnego LT 220

Fig. 5. Resistance of armature and existing windings versus frequency of d.c. series motor LT 220



Rys.6. Zależność indukcyjności uzwojeń twornika L_a i wzbudzenia L_f od częstotliwości silnika trakcyjnego LT 220

Fig. 6. Inductance of armature and existing windings versus frequency of d.c. series motor LT 220



Rys.7. Zależność współczynnika rozproszenia strumienia wzbudzenia σ od częstotliwości silnika trakcyjnego LT 220

Fig. 7. Leakage coefficient of existing windings versus frequency of d.c. series motor LT 220

Częstotliwość drgań rezonansowych uzwojenia wirnika jest o rząd większa od częstotliwości impulsowania łącznika tranzystorowego, a dla uzwojenia wzbudzenia częstotliwości drgań rezonansowych jest około 30 razy większa. Przy zasilaniu napięciem przemiennym U wyznaczono charakterystyki częstotliwości:

- rezystancji uzwojenia twornika (A1B2) - $R_a(f)$ - rys.5,
- rezystancji uzwojenia wzbudzenia (E1E2) - $R_f(t)$ - rys.6,
- indukcyjność uzwojenia twornika (A1B2) - L_a - rys.6,
- indukcyjność uzwojenia wzbudzenia (E1E2) - $L_f(f)$ - rys.6,
- współczynnik rozproszenia uzwojenia wzbudzenia σ_f - rys.7.

4. WNIOSKI

Przy zasilaniu silników trakcyjnych z łączników tranzystorowych występuje wysoka częstotliwość impulsowania. Parametry elektromagnetyczne silnika w dużym stopniu zależą od częstotliwości. Zależności te podano na rysunkach 5 - 7.

LITERATURA

1. Glinka T., Grzenik R., Mołoń Z.: Układ napędowy składający się z silnika szeregowego prądu stałego i łącznika tranzystorowego. Materiały Międzynarodowej Konferencji

- Naukowej "Badania Modelowe i Symulacyjne w Trakcji Elektrycznej".
Warszawa 18-20 listopada 1993 t.1 s.125-132
2. Glinka T.: The permeance of the magnetic circuit in electric machines during transients (In Russian). *Electrical Technology (электричество)* No 4, 1984 pg 17-21
 3. Glinka T.: The commutation properties of de machines with pulsating or high-speed variable armature current. (In polish). *Zeszyty Naukowe Pol.Śląskiej s. Elektryka z.44, Gliwice 1974, s.16-108.*
 4. Adkins B.: The general theory of electrical machines. Chapman and Hall. London 1959.
 5. Glinka T., Kałuża E., Czakański M., Mołoń Z., Grzenik R., Kulesz B., Kochanowski W.: Praca silnika prądu stałego zasilanego z przerywacza prądu stałego o wysokiej częstotliwości przełączenia tranzystorów. *Materiały VII-ej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 96 Pol.Krakowska, s.43 - 48.*

Recenzent: Dr hab. inż. Piotr Wach, Prof. Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 lipca 1997 r.

Abstract

A d.c. series motor supplied by the transistor chopper is a new kind of traction vehicle drive when considering its electromechanical characteristics and properties dealing with braking operation with power recuperation. These features of the drive are obtained due to the high frequency (higher than 10 kHz) of transistor switching, which has not been possible when using the thyristor chopper. So far electrical parameters of the motor have not been identified for such high frequencies of switching. The models describing both the impedance and the flux as a function of frequency have been made under some simplifying assumptions. In spite of it the implicit functions with distributed parameters have been obtained. These functions map the real characteristics only approximately. To increase the accuracy of the impedance mapping the parameters of the functions are experimental way for the given type of a motor. You can use these relationships only in the frequency band for which their parameters have been verified. They cannot be extrapolated for the higher frequencies. The purpose of this paper is to identify the above parameters of the tramway motor LT 220, 40kW, 300 V, 1890 r.p.m. The simplified supply systems of d.c. series motors by the transistors choppers have been shown in Fig.1. This diagram is more convenient for calculation of variable components of the current in each element of the circuit including the armature windings and exciting winding. Each of the windings has been tested when supplied with d.c. voltage (U_0) and a.c. voltage (U_{-}) at frequency changed from 20 Hz to 20 kHz. The following motor parameters R_{a0} , R_{f0} , $I_{a0} = I_{f0}$, $L_{f0} = T_{f0} R_{f0}$, $(c\Phi_{f0})k_{f0}$ have been measured when supplied with d.c. voltage and for non-saturated magnetic circuit. These parameters are given in Table 1. The electromagnetic parameters of a motor depend strongly on frequency. These relationships have been given in Figs. 5-7.