ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1972

Seria: ELEKTRYKA z. 38 Nr kol. 357

WŁADYSŁAW PASZEK, FRANCISZEK SZCZUCKI

Instytut Metrologii i Maszyn Elektrycznych

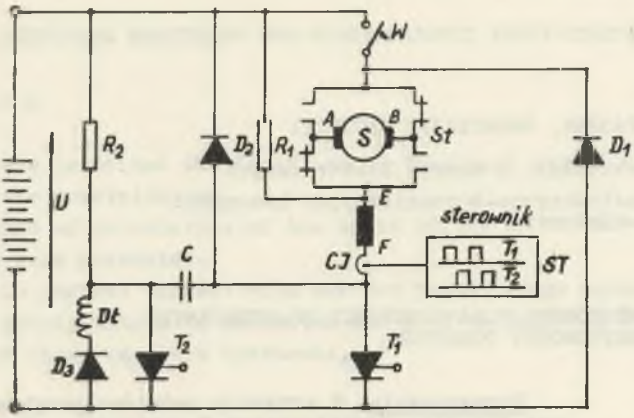
Zakłady Konstrukcyjno-Mechanizacyjne Przemysłu Węglowego - Katowice

ŁĄCZNIK TYRYSTOROWY W ZASTOSOWANIU DO STEROWANIA NAPĘDÓW ELEKTROWOZÓW DOŁOWYCH

Streszczenie. W artykule omówiono przykład zastosowania łącznika tyrystorowego do pulsowego sterowanie elektrowozów dołowych. Podano podstawowe zależności, które z dostateczną dokładnością dla celów projektowo-konstrukcyjnych pozwalają na wyznaczenie i ocenę charakterystyk regulacyjnych napędów elektrowozów. Ponadto przedstawiono przykładowe oscylogramy dla rozruchu i hamowania szeregowego silnika prądu stałego sterowanego pulsowo oraz rozwiązania konstrukcyjne łącznika tyrystorowego i elektronicznego sterownika stosowanego w elektrowozach dołowych.

1. Wstęp

Transport poziomy w przemyśle górniczym jest oparty głównie na trakcji elektrycznej, przy wykorzystaniu której w samym tylko górnictwie węglowym przewozi się rocznie około 140 milionów ton urobku na trasach o średniej długości 3 ÷ 4 km. Stąd też urządzeniom transportowym, a szczególnie elektrowozom stawiane są coraz większe wymagania, które inspirują konstruktorów do poszukiwania nowych rozwiązań technicznych, tych urządzeń. W ostatnich latach, dzięki rozwojowi półprzewodnikowych elementów mocy, a zwłaszcza tyrystorów, zostały opracowane i są wdrażane przemysłowo nowe układy sterowania elektrowozów dołowych. Do nich należą między innymi tyrystorowy układ pulsowego sterowania przedstawiony na rys. 1, który w stosunku do dotychczasowych rozwiązań klasycznych pozwala na znaczne zmniejszenie strat energii elektrycznej podczas rozruchu i regulacji prędkości elektrowozów, bezłukowe przerywanie obwodów elektrycznych oraz włączenie elektrowozów do centralnego systemu zdalnego sterowania przy wykorzystaniu specjalistycznych maszyn matematycznych. Ponadto układ ten umożliwia hamowanie dynamiczne i hamowanie z częściowym zwrotem energii do źródła zasilania o regulowanej wartości prądu, co w dotychczasowych rozwiązaniach elektrowozów było praktycznie nie do wykonania. Rozruch i regulacja prędkości oraz odzysk energii podczas hamowania ma szczególne znaczenie dla elektrowozów akumulatorowych, gdyż pozwala na zwiększenie około 25% efektywnego czasu wykorzystania elektrowozu bez potrzeby wymiany baterii.



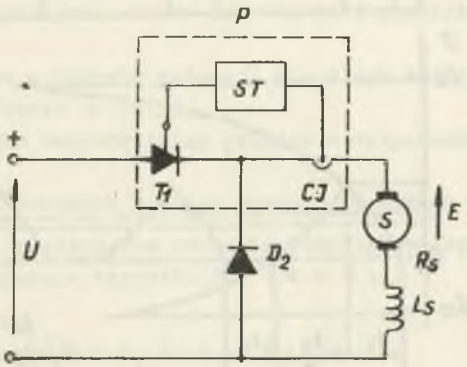
Rys. 1. Schemat ideowy układu sterowania elektrowozu dołowego

W - wyłącznik nadmiarowy, St - stycznik do zmiany kierunku wirowania silnika, S - silnik trakcyjny, ST - elektroniczny sterownik do wyzwalania tyrystorów T_1 i T_2, CI - czujnik transduktorowy do pomiaru granicznych wartości prądu w obwodzie silnika, T_1 - tyrystor pracujący w cyklu "załącz" "wyłącz" T_2, D_3, DŁ, C - obwód gaszący dla tyrystora T_1, D_1 - dioda przewodząca w okresie wzbudzania silnika, D_2 - dioda dla rozładowania energii elektromagnetycznej w okresie blokowania T_1

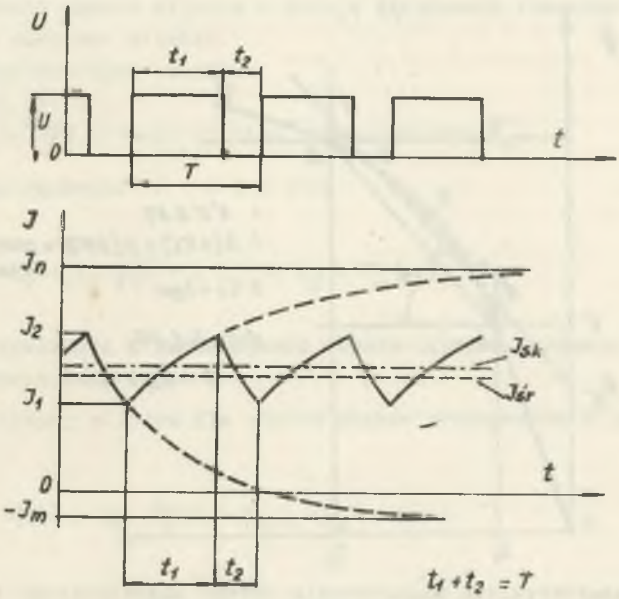
W przedstawionym na rys. 1 układzie regulacja napięcia na zaciskach silnika polega na cyklicznym załączaniu i wyłączaniu tyrystora T_1, spełniającego rolę łącznika prądu, przy czym parametrami zmiennymi są częstotliwość i względny czas załączenia przerywacza, natomiast parametrem stałym, nastawianym w układzie regulacji jest średni prąd w obwodzie silnika. Tyrystor T_1 spełnia rolę łącznika tak dla pracy silnikowej jak i podczas hamowania, natomiast tyrystor T_2, dioda D_3, dławik Dł i kondensator C stanowią układ wygaszania (komutacji) tyrystora T_1. Dioda D_2 stanowi obwód dla rozładowania energii elektromagnetycznej w czasie blokowania tyrystora T_1 natomiast przez diodę D_1 zamyka się obwód wzbudzenia silnika w okresie hamowania z częściowym zwrotem energii (patrz rys. 7). Sterownik ST i czujnik prądu CI służą do sterowania pracą łącznika, natomiast stycznik St jest wykorzystywany do zmiany kierunku wirowania silnika. Wyłącznik W jest zamknięty dla pracy silnikowej i otwarty w przypadku hamowania dynamicznego i hamowania z częściowym odzyskiem energii. Rezystor R_1 służy do ustalenia prądu wzbudzenia wymaganego w czasie samowzbudzenia się silnika po zmianie kierunku wirowania, natomiast przez rezystor R_2 jest doładowywany kondensator C w czasie przewodzenia tyrystora T_1.

1. Analiza pracy szeregowego silnika prądu stałego sterowanego pulsowo

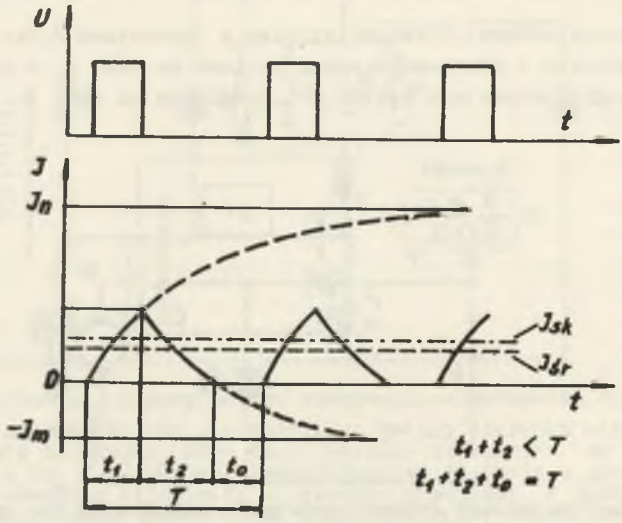
Uproszczony schemat połączeń silnika z łącznikiem P bez uwzględnienia obwodów gaszenia i sterowania przedstawiono na rys. 2, a przebiegi napięcia i prądu odpowiadające sterowaniu pulsowemu na rys. 3 i 4.



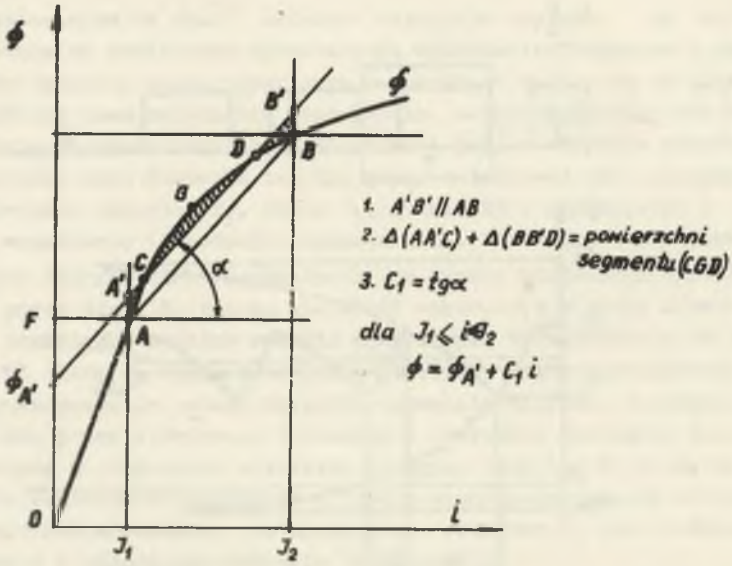
Rys. 2. Uproszczony schemat pulsowego sterowania dla pracy silnikowej P - łącznik prądu, R_s - rezystancja obwodu silnika, L_s - indukcyjność obwodu silnika



Rys. 3. Przebieg napięcia i prądu w obwodzie silnika sterowanego pulsowo



Rys. 4. Przebieg napięcia i prądu w obwodzie silnika sterowanego pulsowo przy prądzie przerywanym



Rys. 5. Charakterystyka magnesowania obwodu magnetycznego silnika aproksymowana do dwóch odcinków

Równania opisujące prace silnika sterowanego pulsowo wyprowadzono przy dokonaniu następujących założeń upraszczających:

- różnica pomiędzy ekstremalnymi wartościami prądu I_2 i I_1 nie przekracza 20%,
- częstotliwość pulsacji jest dostatecznie duża,
- stała czasowa elektromagnetyczna obwodu silnika jest znacznie większa od okresu pulsacji $T_e \gg T$
- prędkość obrotowa silnika w okresie pulsacji nie ulega zmianie,
- pominięto wpływ oddziaływania twornika,
- krzywą magnesowania obwodu magnetycznego silnika aproksymowano do dwóch odcinków (rys. 5).
- czas t jest liczony od początku każdego przedziału okresu pulsacji,

Założeniom tym odpowiadają następujące równania różniczkowe opisujące prace silnika. Dla stanu załączenia łącznika P $0 < t < t_1$

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + n k_e C_1 i_1 + E_o = U, \tag{1}$$

gdzie R_1 - sumaryczna rezystancja źródła zasilania, łącznika P w stanie przewodzenia silnika

L_1 - indukcyjność obwodu silnika w stanie załączania łącznika

n - prędkość obrotowa silnika

k_e - stała konstrukcyjna silnika

C_1 - $tg\alpha$ (rys. 5)

E_o - $n k_e \Phi_A'$ - SEM rotacji silnika odpowiadająca Φ_A'

Dla stanu wyłączenia łącznika P $0 < t < t_2$

$$R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + n k_e C_1 i_2 + E_o = 0, \tag{2}$$

gdzie R_2 i L_2 - rezystancja i indukcyjność obwodu silnika w stanie wyłączenia łącznika.

Moment elektromagnetyczny silnika dla obydwu stanów przerywacza P jest określony równaniem

$$M(t) = k_m \Phi i = k_m i (\Phi_A' + C_1 i) \tag{3}$$

gdzie $k_m = \frac{k_e}{2\pi}$

Uwzględniając warunki brzegowe, odpowiadające:

- stanowi załączenia łącznika P

$$t = 0, \quad i = I_1, \quad t = t_2, \quad i = I_2 \tag{4}$$

- stanowi wyłączenia łącznika P

$$t = 0, \quad i = I_2, \quad t = t_2, \quad i = I_1. \tag{5}$$

Z rozwiązania równań (1) i (2) otrzymano

$$i_1 = I_n - (I_n - I_1)\, e^{\frac{-t}{T_{e1}}} \tag{6}$$

$$i_2 = (I_2 + I_m)\, e^{\frac{-t}{T_{e2}}} - I_m, \tag{7}$$

gdzie $$I_n = \frac{U - E_o}{R_1 + k_e C_1 n} \tag{8}$$

$$I_m = \frac{E_o}{R_2 + k_e C_1 n} \tag{9}$$

$$T_{e1} = \frac{L_1}{R_1 + k_e C_1 n} \qquad T_{e2} = \frac{L_2}{R_2 + k_e C_2 n}. \tag{10}$$

Z równań (6) i (7) po uwzględnieniu warunków brzegowych (4) i (5) otrzymano

$$t_1 = T_{e1} \ln \frac{I_n - I_1}{I_n - I_2} \tag{11}$$

$$t_2 = T_{e2} \ln \frac{I_2 + I_m}{I_1 + I_m} \tag{12}$$

Dla $I_1 \neq 0$ $\qquad T = t_1 + t_2$

Dla $I_1 = 0$ $\qquad T = t_1 + t_2 + t_o,$ (13)

Średni i skuteczny prąd silnika oraz moment elektromagnetyczny są określone równaniami

$$I_{s\,śr} = \frac{1}{T}\left(\int_0^{t_1} i_1 dt + \int_0^{t_2} i_2 dt\right) = \frac{1}{T}\left(I_n t_1 - I_m t_2\right) \tag{14}$$

$$I_{s\,sk}^2 = \frac{1}{T}\left(\int_0^{t_1} i_1^2\,dt + \int_0^{t_2} i_2\,dt\right) = \frac{1}{T}\Big[I_n^2\,t_1 + I_m^2\,t_2 +$$

$$+ \frac{1}{2}\left(I_2^2 - I_1^2\right)\left(T_{e1} - T_{e2}\right) - \left(I_n\,T_{e1} + I_m\,T_{e2}\right)\left(I_2 - I_1\right)\Big] \qquad (15)$$

$$M_{s\,śr} = \frac{1}{T}\left(\int_0^{t_1} M(t)\,dt + \int_0^{t_2} M(t)\,dt\right) = k_m\left(\Phi_A'\,I_{s\,śr} + C_1\,I_{s\,sk}^2\right) \qquad (16)$$

Przekształcając równanie (14) z uwzględnieniem zależności (8) i (9) przy założeniu $R_1 = R_2$ oraz $L_1 = L_2$ uzyskuje się równanie na prędkość obrotową silnika

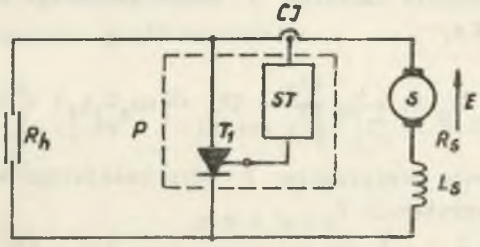
$$n = \frac{U\frac{t_1}{T} - I_{s\,śr}\,R_1}{I_{s\,śr}\,k_e\,C_1 + k_e\,\Phi_A'} \qquad (17)$$

Równania (14), (15), (16) i (17) pozwalają z dostateczną dokładnością dla celów projektowo-konstrukcyjnych na ocenę pulsowej regulacji silnika szeregowego oraz na wyznaczenie charakterystyk silnika n(I) i M(I)
Równania te mogą być również wykorzystane przy rozpatrywaniu silnika o wzbudzeniu bocznikowym. W tym przypadku $\Phi = \Phi_A'$.

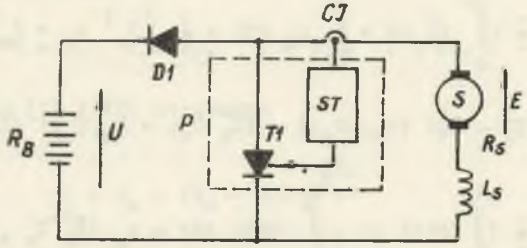
$$C_1 = 0, \quad T_{e1} = \frac{L_1}{R_1}, \qquad T_{e2} = \frac{L_2}{R_2}$$

2. Analiza pracy szeregowego silnika prądu stałego sterowanego pulsowo podczas hamowania

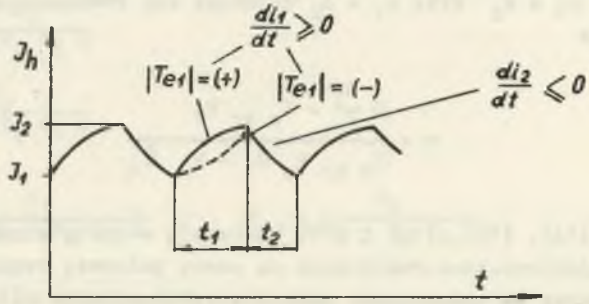
Jedną z podstawowych zalet sterowania pulsowego szeregowych silników prądu stałego jest możliwość hamowania dynamicznego i hamowania z częściowym zwrotem energii do źródła zasilania przy czym prąd hamowania w obydwu przypadkach może być płynnie regulowany.



Rys. 6. Uproszczony schemat pulsowego sterowania w okresie hamowania dynamicznego silnika R_h - rezystancha hamowania



Rys. 7. Uproszczony schemat pulsowego sterowania w okresie hamowania z częściowym zwrotem energii do źródła zasilania R_B - rezystancja źródła zasilania



Rys. 8. Przebieg prądu w obwodzie silnika podczas hamowania dynamicznego i hamowania z częściowym zwrotem energii do źródła zasilania

T_{e1} - stała czasowa elektromagnetyczna przy przewodzeniu tyrystora T_1

Na rys. 6 przedstawiono uproszczony schemat układu hamowania dynamicznego a na rys. 7 hamowania z częściowym zwrotem energii do źródła zasilania. Na rys. 8 podano przebieg prądu dla obydwu przypadków hamowania. Równania opisujące prace silnika podczas hamowania wyprowadzono przy zachowaniu założeń upraszczających i oznaczeń literowych jak w punkcie 1. Stycznik St. (rys. 1) przełącza przy hamowaniu zaciski twornika.

2.1. Hamowanie dynamiczne (rys. 6)

Dla stanu załączania łącznika P odpowiadającego stanowi wzbudzenia silnika $0 \leqslant t \leqslant t_1$

$$R_s i_1 + L_s \frac{di_1}{dt} - (E_o + nk_e C_1 i_1) = 0 \tag{18}$$

Dla stanu wyłączenia przerywacza P odpowiadającego wytraceniu energii elektrycznej na rezystancji R_h $0 \leqslant t \leqslant t_2$

$$(R_h + R_s)\, i_2 + L_s \frac{di_2}{dt} - (E_o + nk_e C_1 i_2) = 0 \tag{19}$$

Po rozwiązaniu równań (18) i (19) otrzymano

$$i_1 = I_n - (I_n - I_1)\, e^{\frac{-t}{T_{e1}}}, \tag{20}$$

gdzie

$$I_n = \frac{E_o}{R_s - k_e C_1 n} \tag{21}$$

$$T_{e1} = \frac{L_s}{R_e - k_e C_1 n} \tag{22}$$

$$t_1 = T_{e1} \cdot \ln \frac{I_n - I_1}{I_n - I_2} \tag{23}$$

$$i_2 = (I_2 + I_m)\, e^{\frac{-t}{T_{e2}}} - I_m, \tag{24}$$

gdzie

$$I_m = \frac{-E_o}{(R_h + R_s) - k_e C_1 n} \tag{25}$$

$$T_{e2} = \frac{L_s}{(R_h + R_s) - k_e C_1 n} \tag{26}$$

$$t_2 = T_{e2} \ln \frac{I_2 + I_m}{I_1 + I_m} \tag{26a}$$

Średnia wartość prądu hamowania

$$I_{h\,sr} = \frac{1}{T}\left(\int_0^{t_1} i_1 dt + \int_0^{t_2} i_2 dt\right) = \frac{1}{T}\left[I_n \cdot t_1 - I_m \cdot t_2 - (I_2 - I_1)(T_{e1} - T_{e2})\right] \tag{27}$$

Skuteczna wartość prądu hamowania

$$I^2_{h\,sk} = \frac{1}{T}\left(\int_0^{t_1} i_1^2\, dt + \int_0^{t_2} i_2^2\, dt\right) = \frac{1}{T}\left[I_n^2\, t_1 + I_m^2\, t_2 + \frac{1}{2}(I_2^2 - I_1^2)\right.$$

$$\left.(T_{e1} - T_{e2}) - (I_2 - I_1)(I_n T_{e1} + I_m T_{e2})\right] \tag{28}$$

Średni moment hamowania

$$M_{h\,śr} = \frac{k_m}{T}\left[\int_0^{t_1}(\Phi_A' + C_1\, i_1)\, i_1\, dt + \int_0^{t_2}(\Phi_A' + C_1\, i_2)\, i_2\, dt\right] =$$

$$= k_m\,(\Phi_A'\, I_{h\,śr} + C_1\, I_{h\,sk}^2) \tag{29}$$

Warunkiem samowzbudzenia silnika w okresie hamowania dynamicznego w stanie załączenia łącznika P jest spełnienie nierówności

$$\left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=t_1} \geqslant 0,$$

która po uwzględnieniu równania (18) ma postać

$$\left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=t_1} = \frac{1}{L_s}\left[i_1\,(n\,k_e\;C_1 - R_s) + E_o\right] \geqslant 0 \tag{30}$$

Warunkiem osiągnięcia efektu hamowania w okresie wyłączenia łącznika P jest spełnienie zależności

$$\left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=t_2} = \frac{1}{L_s}\left\{i_2\left[n\,k_e\,C_1 - (R_h + R_s)\right] + E_o\right\} < 0 \tag{31}$$

2.2. Hamowanie z częściowym zwrotem energii elektrycznej do źródła zasilania (rys. 7)

Dla stanu załączenia przerywacza P odpowiadającego wzbudzeniu silnika obowiązuje jak dla przypadku hamowania dynamicznego równanie (20)

$$i_1 = I_n - (I_n - I_1)\, e^{\frac{-t1}{T_{e1}}}. \tag{32}$$

Dla stanu wyłączenia łącznika P, podczas którego energia elektryczna jest zwracana do źródła zasilania obowiązuje równanie

$$E_o + k_e\, C_1\, n\, i_2 - U = i_2\, R_2 + L\,\frac{di_2}{dt} \tag{33}$$

Skąd po rozwiązaniu

$$i_2 = (I_2 + I_m)\, e^{\frac{-t}{T_{e2}}} - I_m \tag{34}$$

gdzie

$$I_m = \frac{U - E_o}{R_2 - k_e C_1 n} \tag{35}$$

$$T_{e2} = \frac{L_s}{R_2 - k_e C_1 n} \tag{36}$$

$$R_2 = R_s + R_B.$$

Średnia wartość prądu hamowania

$$I_{h\ śr} = \frac{1}{T}\left(\int_0^{t_1} i_1 dt + \int_0^{t_2} i_2\, dt\right) = \frac{1}{T}\left[I_n\, t_1 - I_m\, t_2 - (I_2 - I_1)\,(T_{e1} - T_{e2})\right] \tag{37}$$

Średnia wartość prądu hamowania zwracanego do źródła zasilania

$$I_{h\ śr} = \frac{1}{t_2}\int_0^{t_2} i_2\, dt = \frac{T_{e2}}{t_2}(I_2 - I_1) - I_m. \tag{38}$$

Średnia wartość mocy odzyskanej

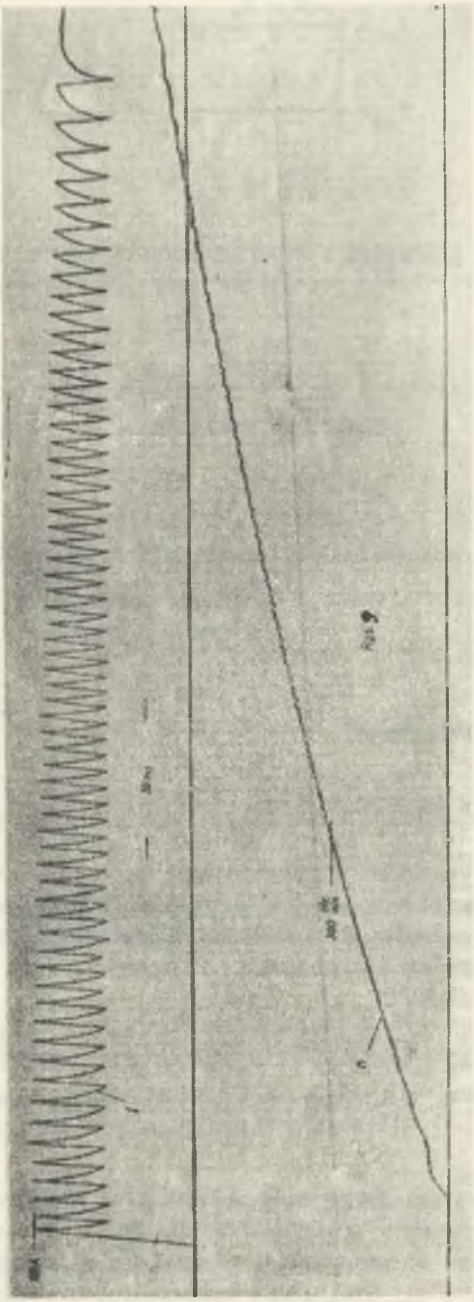
$$P_{śr} = U\, I_{h\ śr}\frac{t_2}{T} = \frac{U}{T}\left[T_{e2}\,(I_2 - I_1) - I_m\, t_2\right] \tag{39}$$

Dla stanu załączenia łącznika P obowiązują te same warunki samowzbudzenia dla hamowania odzyskowego jak dla hamowania dynamicznego, natomiast dla stanu wyłączenia łącznika P, warunkiem występowania zwrotu energii do źródła zasilania w zakresie zmian prądu $I_1 < i < I_2$ jest

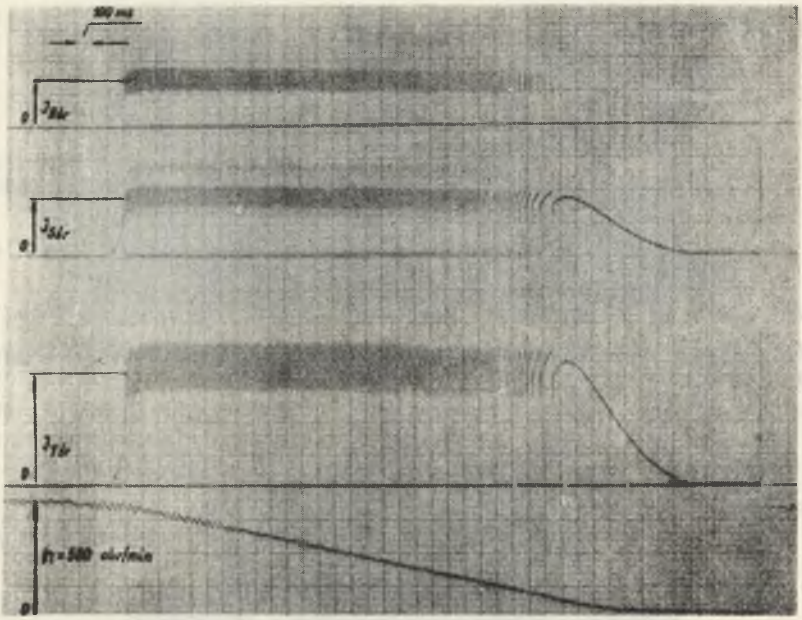
$$\left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=t_2} = \frac{1}{L_s}\left[E_o - U + n\, k_e\, C_1\, i_2 - i_2\,(R_s - R_B)\right] < 0 \tag{40}$$

3. Podsumowanie

Przedstawiony układ pulsowego sterowania dla szeregowego silnika prądu stałego i otrzymane równania pozwalają na określenie prądu, momentu i prędkości obrotowej silnika w poszczególnych okresach pulsacji, wyznaczenie charakterystyk n (I), M (I) oraz ocenę właściwości projektowanego napędu.

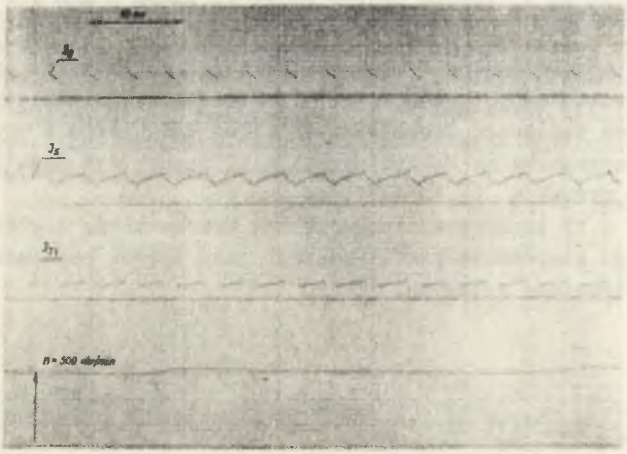


Rys. 9. Przebieg prądu i prędkości obrotowej silnika w czasie rozruchu



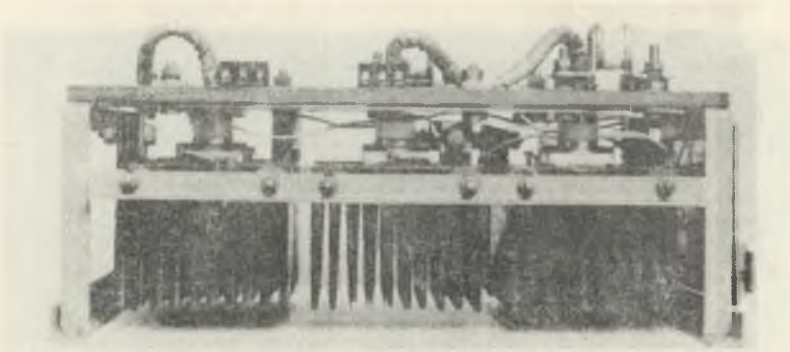
Rys. 10, Przebieg prądu i prędkości obrotowej silnika w czasie hamowania z częściowym zwrotem energii do źródła zasilania

I_B - prąd zwracany do baterii, I_S - prąd silnika, I_T - prąd przepływający przez tyrystor T_1

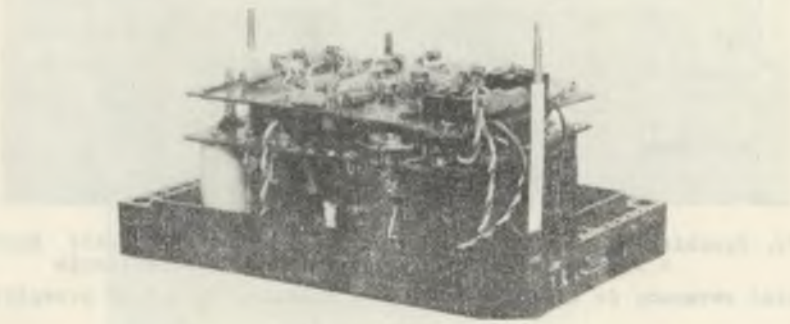


Rys. 11. Przebiegi prądów w czasie hamowania z częściowym zwrotem energii do źródła zasilania

I_B-prąd zwracany do źródła zasilania, I_S-prąd silnika, I_T-prąd w okresie wzbudzania silnika (przewodzenie T_1), n - prędkość obrotowa silnika



Rys. 12. Łącznik tyrystorowy dla elektrowozów dołowych z obwodem gaszenia i diodami D_1 i D_2 (I_n = 300 A, U_n = 250 V)



Rys. 13. Elektroniczny sterownik do sterowania tyrystorowego przerywacza z obwodem sprzężenia prądowego

$\Delta I = I_2 - I_1$ = 20 A, zakres nastaw prądu I_2 do 20 ÷ 300 A

Równania mają postać ogólną i mogą być wykorzystane również przy rozpatrywaniu układu pulsowego sterowania silnika bocznikowego. Zalety pulsowego sterowania oraz zbieżność teoretycznych przebiegów prądu z rzeczywistymi przebiegami uzyskanymi na konkretnym silniku trakcyjnym typu LDO 20 wynikają wprost z rysunków 9, 10 i 11.

Na rysunku 12 i 13 przedstawiono podzespół energetyczny i elektroniczny układu pulsowego sterowania przewidywanego jako typowe rozwiązanie dla przewodowych elektrowozów dołowych.

LITERATURA

1. Franklin P.W.: Theory of D.C. motor controlled by power pulses. IEEE Transactions 1970 r.
2. Luciński J. Układy tyrystorowe. WNT 1972 r.
4. Paszek W., Szczucki F.: Tyrystorowe układy w urządzeniach i napędach górniczych. Materiały V Krajowej Konferencji Automatyki Wydaw.Pol.Gdańskiej 1971 r., tom VI (str. 39-44).

4. Paszek W., Szczucki F.: Tyrystorowe układy sterowania elektrowozów dołowych. Gospodarka Paliwami i Energią - 1969 nr. nr 10/11.
5. Szczucki F.: Tyrystorowy układ sterowania elektrowozu dołowego. Patent nr 623443 - 1968 r.

ТИРИСТОРНЫЙ КЛЮЧ В ПРИМЕНЕНИИ К УПРАВЛЕНИЮ ПРИВОДОМ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Р е з ю м е

В реферате приведен пример применения тиристорного ключа для импульсного управления шахтных электровозов. Даны основные зависимости, которые с точностью, достаточной для целей проектно-конструкторских, позволяют определение и оценку характеристик регулируемых приводов электровозов. Кроме этого представлены в приложение осцилограммы разгона и торможения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением управляемого импульсами, а также конструктивное решение тиристорного ключа и электронного блока управления, применяемого в шахтных электровозах.

APPLICATION OF THE THYRISTOR SWITCH IN CONTROL OF THE MINE ELECTRIC-LOCOMOTIVE

S u m m a r y

An example of application of thyristor switch in pulse control of the electric-locomotive is discussed. The basic relations allowing to determine and estimate the control characteristics of the electro-locomotive drive are presented. The realtions are sufficiently exact for design and constructional purposes. The exemplary oscillograph records of starting and braking action of the direct-current series motor with pulse control are presented. The thyristor switch and electronic controller used in mine electric-locomotives are presented.