

ZBIGNIEW RYCZKO

Instytut Metrologii
i Maszyn ElektrycznychMODELOWANIE SILNIKA SZEREGOWEGO
PRĄDU STAŁEGO NA MASZYNIE ANALOGOWEJ

Streszczenie. Przedstawiono sposób wykorzystania maszyny analogowej do obliczenia przebiegów czasowych wielkości elektrycznych, magnetycznych i mechanicznych silnika szeregowego zasilanego tyrystorowo oraz do analizy wpływu rodzaju sterowania na te wielkości.

1. Wstęp

Dobre własności regulacyjne maszyn prądu stałego są powszechnie wykorzystywane w różnorodnych napędach elektrycznych. Wprowadzenie techniki półprzewodnikowej do zasilania i regulacji tych maszyn spowodowało zarówno poszerzenie zakresu możliwych zastosowań jak również zwiększenie własności regulacyjnych. Przed konstruktorami maszyn elektrycznych prądu stałego i projektantami układów regulacyjnych stanęły zadania optymalnego doboru układów zasilających i odpowiednich konstrukcji maszyn przystosowanych do współczesnych tyrystorowych źródeł zasilania.

Na szczególną uwagę zasługują silniki trakcyjne prądu stałego. Ze względu na mniejsze wymiary i ciężar w porównaniu z silnikiem prądu zmiennego są one coraz częściej stosowane w lokomotywach zasilanych prądem przemianowym i wyposażonych w przekształtniki prądu przemiennego na stały. Wywołane przez nie wyższe harmoniczne w napięciu i prądzie decydują o dopuszczalnym termicznym obciążeniu uzwojeń oraz elektrycznym obciążeniu styku szotka-komutator. W szczególności o niezawodności silników trakcyjnych prądu stałego rozstrzygają własności komutacyjne.

Zawartość wyższych harmonicznych, których główna część znajduje się w prądzie zależy od wielu czynników.

Są to liczba faz, wzajemny stosunek indukcyjności po stronie prądu stałego i przemiennego (za i przed przekształtnikiem) a przede wszystkim rodzaj i typ sterowania.

Znane są trzy podstawowe rodzaje sterowania:

- amplitudowe
- fazowe
- pulsowe.

Przy sterowaniu amplitudowym żądaną średnią wartość napięcia stałego otrzymuje się na drodze zmiany napięcia zmiennego przyłożonego do prostownika niesterowanego.

Zwiększenie lub zmniejszenie kąta opóźnienia zapłonu tyrystorów zapewnia zmianę wartości średniej napięcia wyprostowanego. Przy sterowaniu pulsowym uzyskuje się za pomocą łącznika tyrystorowego zmianę wartości średniej napięcia przez formowanie interwałów czasowych przyłączenia i odłączenia źródła napięcia stałego do silnika szeregowego. Przy wszystkich wspomnianych układach występuje pulsacja prądu i związanego z nim strumienia wzbudzenia.

Analityczne wyznaczenie przebiegów czasowych wielkości określających własności eksploatacyjne oraz obliczenia parametrów elektrycznych układu transformator - prostownik - silnik z dławikiem jest utrudnione i wymaga daleko idących uproszczeń. Wykorzystanie techniki analogowej ułatwia rozwiązanie tych problemów.

W szczególności można uwzględnić nieliniowość charakterystyki magnesowania głównego obwodu magnetycznego, opóźniające działanie prądów wirowych, ograniczone wygładzenie prądu silnika, a nawet kąt komutacji.

Podano przykład zastosowania maszyny analogowej do wyznaczenia przebiegów czasowych wielkości elektro-magnetycznych i mechanicznych silnika szeregowego zasilanego tyrystorowo w stanie nieustalonym.

2. Modelowanie silnika szeregowego

Modelowanie na maszynie analogowej, przy uwzględnieniu czasu jako zmiennej niezależnej, umożliwia ocenę wpływu założeń upraszczających na skomplikowanie modelu.

W przytoczonym przykładzie pominięto wpływ oddziaływania twornika i prądów wirowych w obwodach magnetycznych na badane przebiegi. Do programowania obliczeń wymagana jest znajomość schematu strukturalnego modelowanego silnika i współczynników nastaw elementów. Współczynniki wzmocnienia osłonów operacyjnych zastępujących poszczególne osłony schematu strukturalnego określone są przez parametry konstrukcyjne silnika oraz przez skalowe współczynniki odwzorowania.

Dla silnika obowiązują zależności

$$e = k_e \omega \Phi \quad (1)$$

$$m = k_m I \Phi \quad (2)$$

oraz równanie momentów

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (m - m_{st}) \quad (3)$$

i równanie napięć silnika

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{z} (u - 1R_s - e), \quad (4)$$

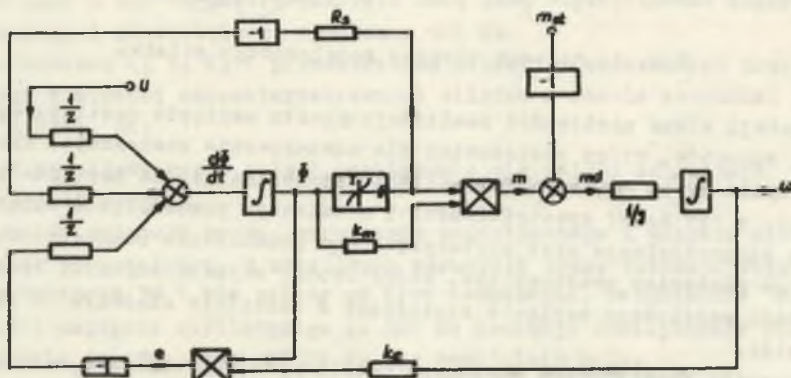
gdzie

z - całkowita liczba zwojów uzwojenia wzbudzenia

J - moment bezwładności

R_s - całkowita rezystancja uzwojeń twornika biegunów głównych i zwrotnych.

Równania silnika (1); (2); (3), (4) stanowią podstawę do wyznaczenia schematu strukturalnego modelowanego silnika. W programie uwzględniono nieliniowy charakter głównego obwodu magnetycznego silnika (rys. 1)



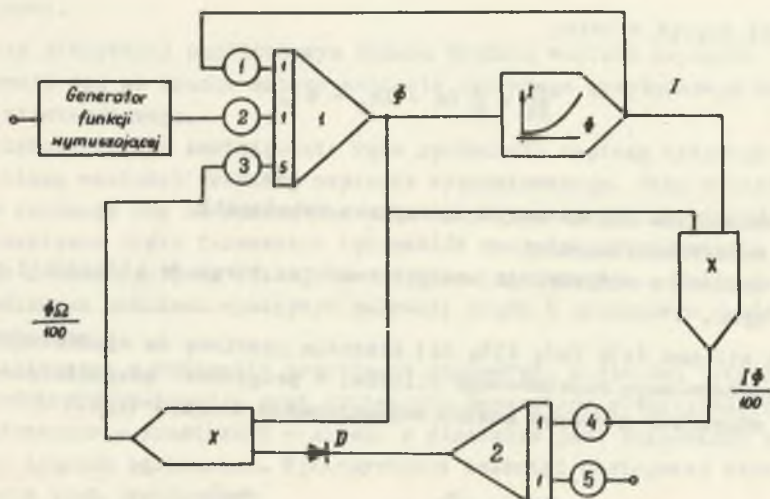
Rys. 1. Schemat strukturalny silnika szeregowego

Charakterystykę $\Phi = f(i)$ można przedstawić w nieliniowym odczynie operacyjnym maszyny analogowej. Przyjęty schemat strukturalny przedstawia silnik w układzie otwartym posiadający wejścia: dla napięcia zasilania i dla momentu obciążenia i jedno wyjście: dla prędkości kątowej wirnika.

Sygnał podany na wejścia napięciowe reprezentuje tętniące napięcie zasilania realizowane przez wymienione trzy rodzaje sterowania. Prąd silnika jest w tym przypadku odpowiedzią układu modelowego na wartość średnią i wyższe harmoniczne w napięciu zasilania silnika.

Moment elektromagnetyczny jest proporcjonalny do iloczynu wartości chwilowych strumienia magnetycznego i prądu, zaś SEM e rotacji do iloczy-

nu prędkości kątowej ω i strumienia. Bezpośrednio ze schematu strukturalnego wynika schemat blokowy (rys. 2) modelowego silnika.



Rys. 2. Schemat blokowy modelowanego silnika

Istnieją różne możliwości realizacji sygnału napięcia zasilającego. Jednym ze sposobów, który zastosowano dla odwzorowania sterowania fazowego, było użycie dwóch generatorów: napięcia sinusoidalnego i napięcia prostokątnego, o tej samej częstotliwości i o zmiennym przesunięciu fazowym napięcia sinusoidalnego oraz spolaryzowanego przekaźnika mechanicznego, sterowanego napięciem prostokątnym, który swoimi stykami czynnymi wprowadzał do układu modelowego napięcie zasilające o kształcie złożonym z wycinków sinusoidy.

Warunkiem prawidłowego działania modelu była dostatecznie mała częstotliwość przebiegu (1 Hz) na maszynie analogowej. Inaczej mówiąc, współczynnik skali czasu powinien być taki, aby czas przełączenia przekaźnika był o kilka rzędów mniejszy od okresu napięcia zasilającego. Dioda D włączona na wyjściu elementu obciążającego 2 modeluje reaktywny moment obciążenia.

3. Przykład obliczeń

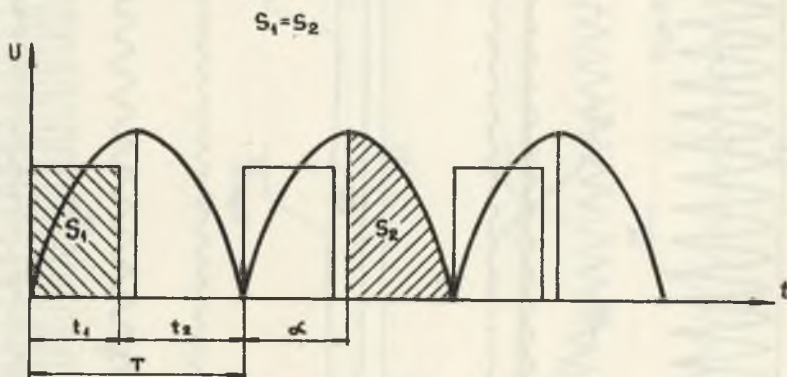
Modelowanie przeprowadzono dla silnika szeregowego 17 kW, 220 V, 580 obr/min powszechnie stosowanego w lokomotywach. Przebiegi w maszynie analogowej porównano przy sterowaniu fazowym i pulsowym każdorazowo przy zachowaniu jednakowej wartości średniej napięcia zasilającego.

$$\frac{\sqrt{2} U_g}{\pi} (1 + \cos\alpha) = U_p \frac{t_1}{t_1 + t_2} = U_p a,$$

gdzie:

U_s - amplituda napięcia sinusoidalnego

U_p - amplituda napięcia prostokątnego (rys. 3).



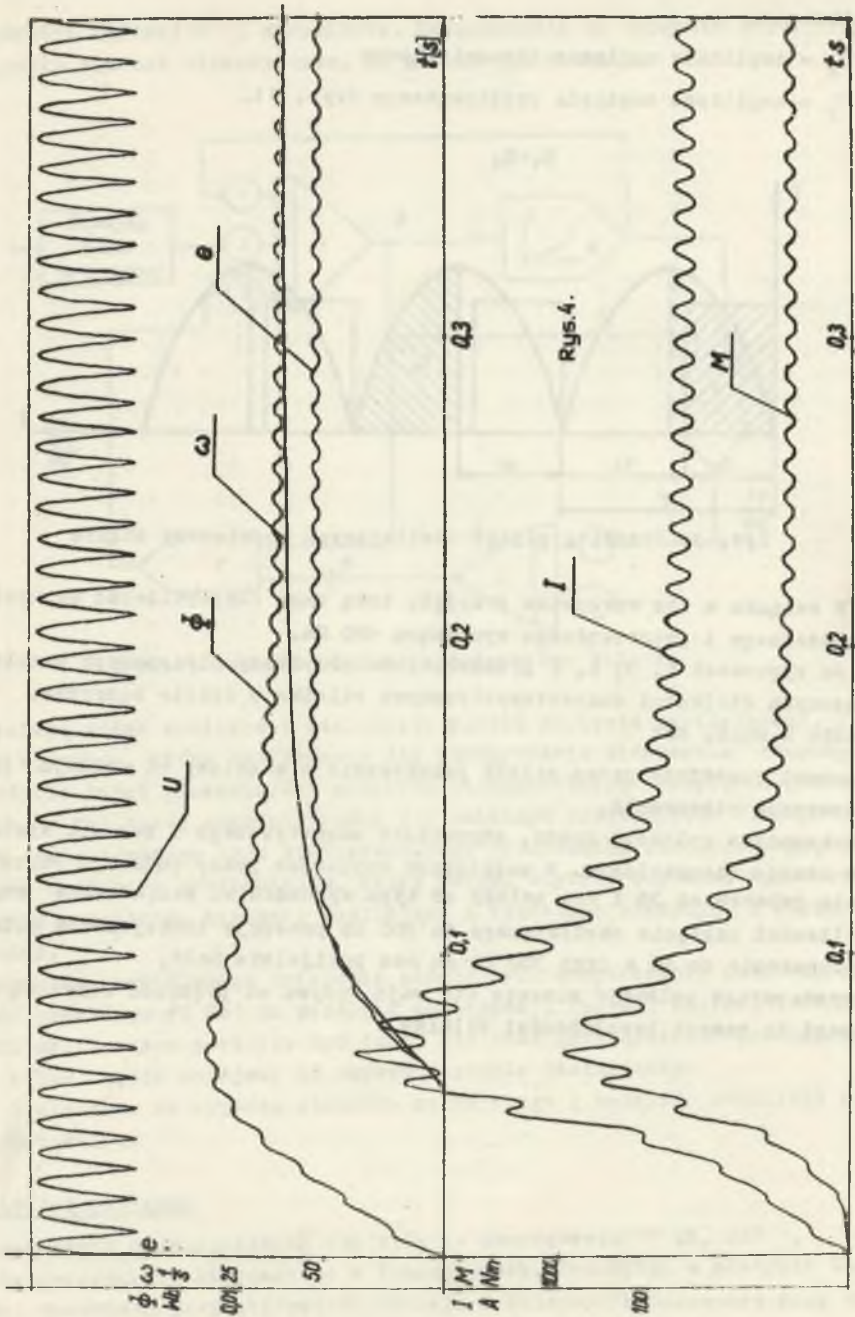
Rys. 3. Przebieg napięć zasilających modelowany silnik

W związku z tym warunkiem przyjęto taką samą częstotliwość napięcia sinusoidalnego i prostokątnego wynoszącą 100 Hz.

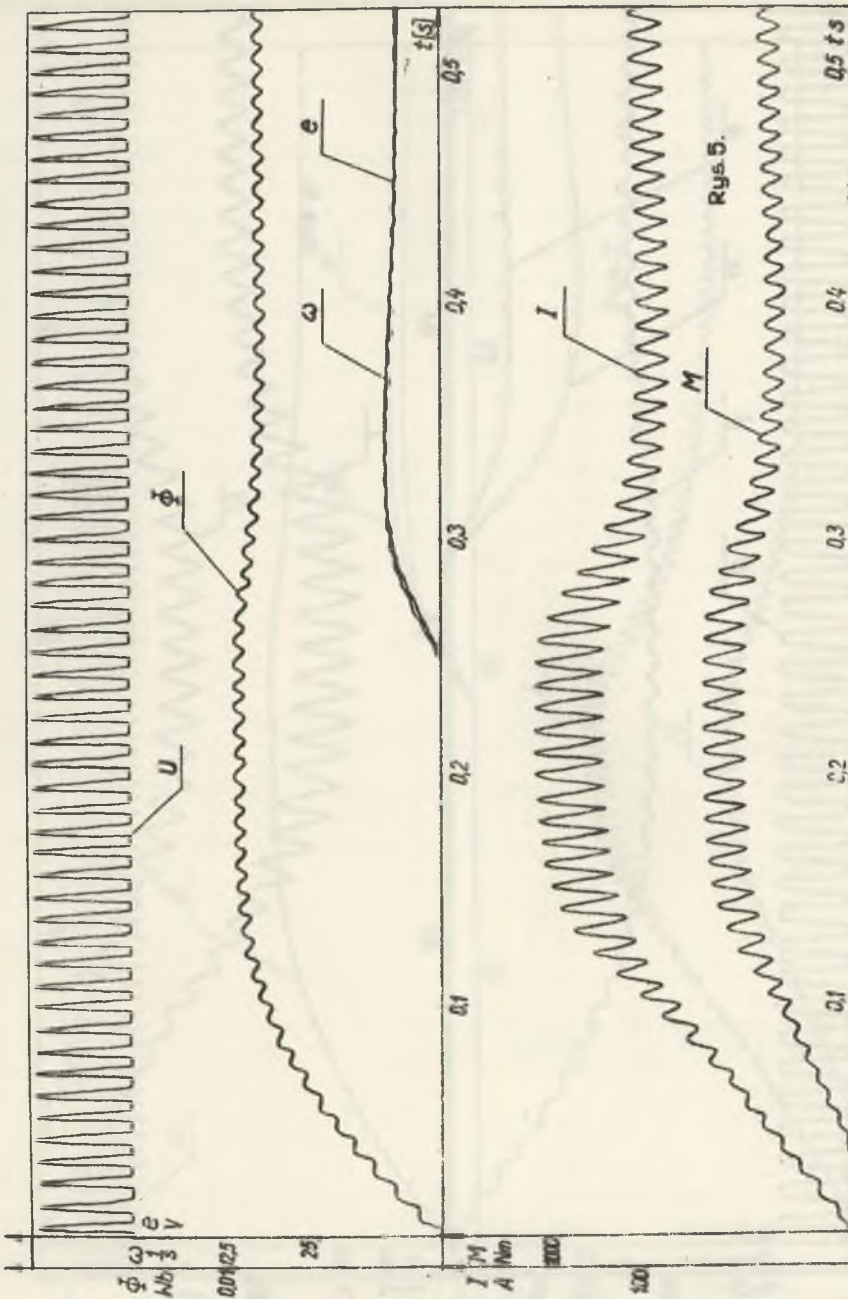
Na rysunkach 4, 5, 6, 7 przedstawiono przykłady otrzymanych przebiegów czasowych wielkości charakterystycznych silnika w czasie rozruchu.

Wynika z nich, że:

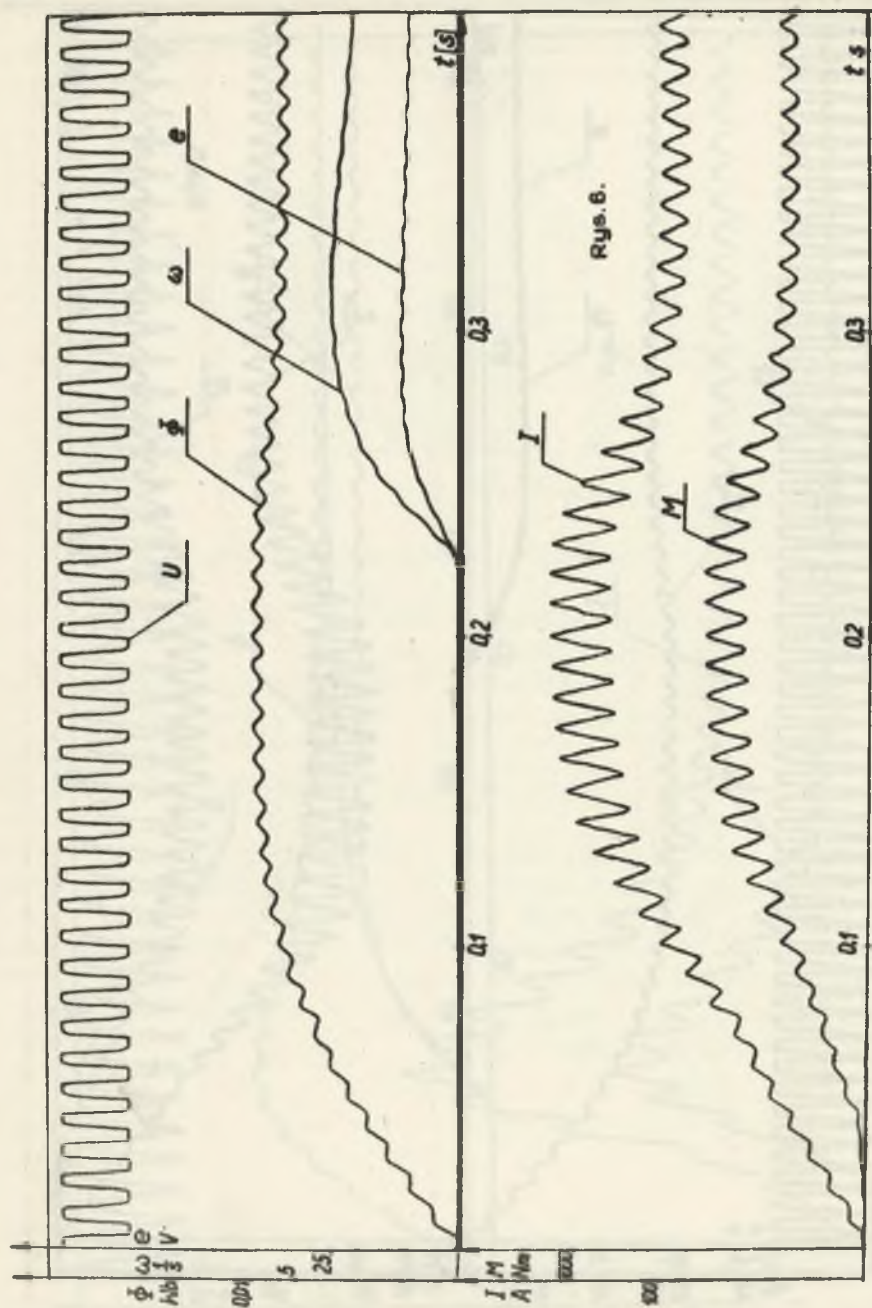
- moment rozwijany przez silnik praktycznie nie zależy od rodzaju zastosowanego sterowania,
- maksymalne pulsacje prądu, strumienia magnetycznego i momentu występują w stanie nieustalonym. W ustalonych warunkach pracy pulsacja strumienia nie przekracza 3% i nie zależy od typu wymuszenia. Zwiększenie częstotliwości napięcia zasilającego do 200 Hz powoduje zmniejszenie pulsacji strumienia do 1% a przy 300 Hz są one pomijalnie małe,
- występujące pulsacje momentu nie mają wpływu na prędkość obrotową z uwagi na moment bezwładności silnika.



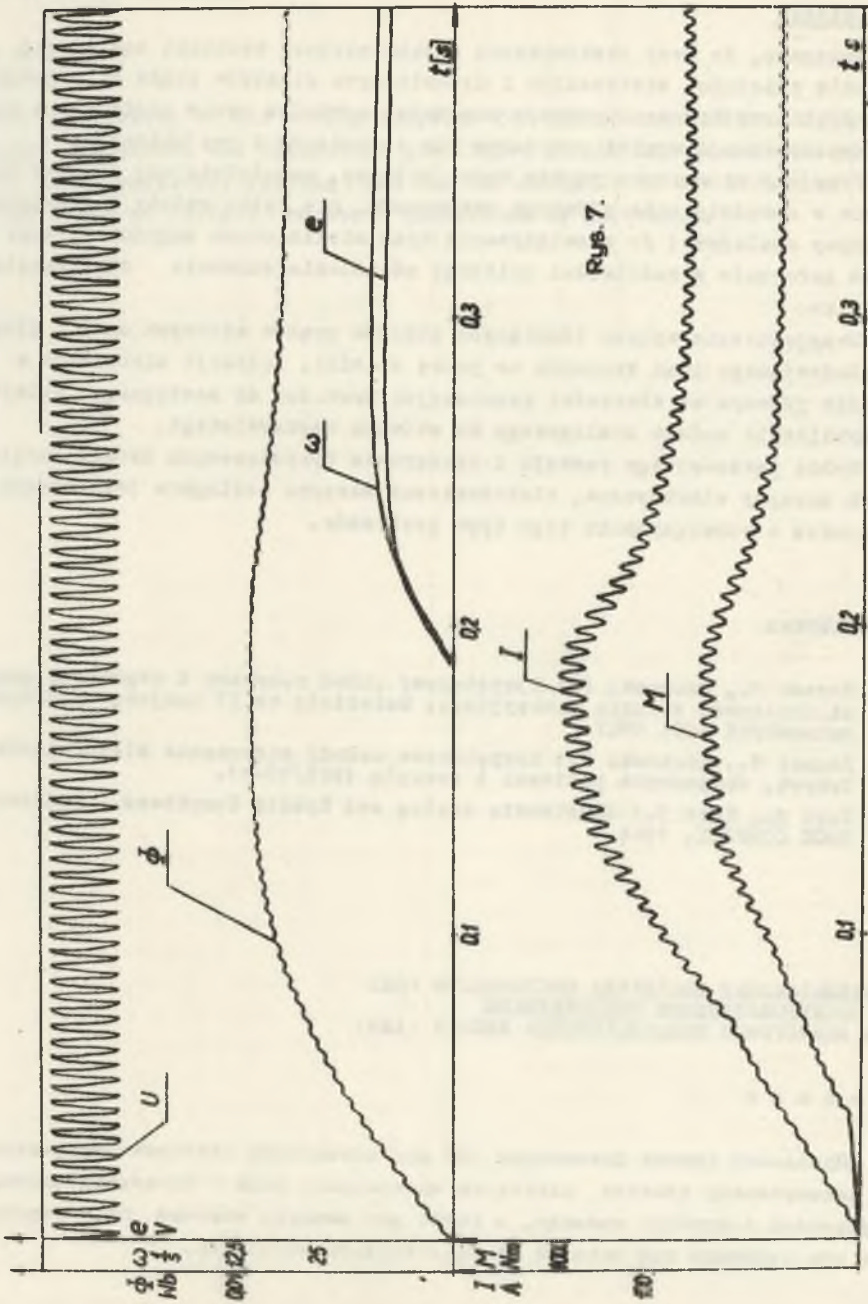
Rys. 4. Przebiegi czasowe momentu, prądu, SEM - rotacji, strumienia magnetycznego i prędkości kątowej wirnika uzyskane na maszynie analogowej dla $\alpha = 0$, $M = 0,75 M_N$, $f = 100$ Hz



Rys. 5. Przebiegi czasowe momentu, prądu, SEM rotacji, strumienia magnetycznego i prędkości katowej wirnika uzyskane na maszynie analogowej dla $\alpha = 90^\circ$, $M = 1,0 M_N$, $r = 100$ Hz



Rys. 6. Przebiegi czasowe momentu, prądu, SEM rotacji, strumienia magnetycznego i prędkości kątowej wirnika uzyskane na maszynie analogowej dla $a = 0,5$, $M = 1,0 M_N$, $f = 100$ Hz



Rys. 7. Przebiegi czasowe momentu, prądu, SEM rotacji, strumienia magnetycznego i prędkości kątowej wirnika uzyskane na maszynie analogowej dla $a = 0,5$, $M = 1,0 M_N$, $f = 200 \text{ Hz}$

4. Wnioski

Wykazano, że przy zastosowaniu elektronicznej techniki analogowej do badania własności statycznych i dynamicznych silników prądu tętniącego zasilanych tyrystorowo otrzymuje się małym nakładem pracy pogładowe i łatwe do interpretacji wyniki przydatne dla inżynierów i projektantów.

Przyjęty stosunkowo prosty model silnika, uwzględniający jedynie nasycenie w obwodzie pola głównego uwidacznia nie tylko zalety i przydatność maszyny analogowej do rozwiązywania tych nieliniowych zagadnień, lecz również informuje o możliwości dalszego uściślenia schematu strukturalnego silnika.

Uwzględnienie wpływu tłumiących obwodów prądów wirowych oraz dławika wygładzającego prąd twornika na pracę silnika, pulsacji strumienia w obwodzie głównym na własności komutacyjne prowadzi do następnego kolejnego przybliżenia modelu analogowego do obiektu rzeczywistego.

Wobec powszechnego rozwoju i stosowania tyrystorowych źródeł zasilających maszyny elektryczne, elektroniczna maszyna analogowa jest cennym narzędziem w rozwiązywaniu tego typu problemów.

LITERATURA

1. Paszek W., Szozuoki F.: Tyrystorowy układ rozruchu i regulacji prędkości obrotowej silnika trakcyjnego. Materiały na IV krajową konferencję automatyki AGH, 1967.
2. Paszek W., Szozuoki F.: Tyrystorowe układy sterowania elektrowozów dolowych. Gospodarka paliwami i energią 1969/10-11.
3. Korn G., Korn T.: Electronic Analog and Hybrid Computers. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1964.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА
С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ
НА АНАЛОГОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ (АВМ)

Резюме

Предложен способ применения АВМ для вычисления электрических, магнитных и механических величин двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением в функции времени, а также для анализа влияния типа управления на эти величины при питании от тиристорного источника.

MODELLING OF THE DIRECT-CURRENT SERIES MOTOR ON THE ANALOG COMPUTER

Summary

The application of the analog computer for calculation of transients of electric, magnetic and mechanical quantities of the direct-current series motor (with thyristor feeding) and for the analysis of the effect of different types of control on above quantities is presented.