ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1975

Seria: Elektryka z. 50 Nr kol. 451

ZBIGNIEW MANTORSKI, CZESŁAW MYRCIK,
BARBARA OLSZOWSKA, TADEUSZ RODACKI

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

MODELOWANIE TYRYSTOROWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO PRĄDU STAŁEGO NA MASZYNIE ANALOGOWEJ

Streszczenie. Przy pomocy maszyny analogowej przeprowadzono analizę dynamiki tyrystorowego automatycznego układu napędowego, z obwodami regulacji prądu i prędkości obrotowej określonymi przy pomocy kryteriów optimum wartości i optimum symetrycznego. Podano wyniki uzyskane w wyniku doświadczalnej korekty nastaw regulatorów i sformułowano wnioski wynikające z porównania przebiegów układu zoptymalizowanego na drodze obliczeniowej i doświadczalnej.

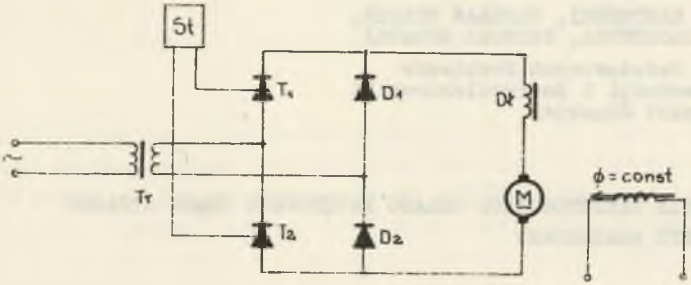
1. Wstęp

Metoda analizy charakterystyk statycznych i dynamicznych układów tyrystorowych za pomocą modelowania analogowego pozwala dość dokładnie określić cechy układu rzeczywistego, przy pracy w różnych warunkach i dla różnych jego parametrów.
Jednocześnie metoda ta daje na ogół wyniki bardziej zbliżone do rzeczywistych i jest mniej pracochłonna niż metoda analizy teoretycznej, która wymaga stosowania nieraz znacznych uproszczeń, a w wyniku daje zależności bardzo skomplikowane, wymagające obliczeń przy pomocy maszyny cyfrowej.

Celem prowadzonych badań było przeprowadzenie analizy pracy konkretnego tyrystorowego układu napędowego, optymalizacja tego układu według kryteriów "symetrycznego optimum" i "optimum wartości" i doświadczalny dobór optymalnych nastaw regulatorów.

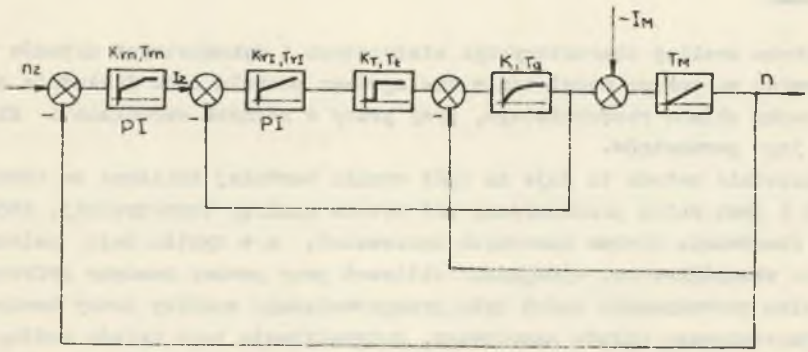
2. Tyrystorowy układ regulacji prędkości obrotowej silnika obcowzbudnego prądu stałego

Przeprowadzone badania dotyczyły rzeczywistego układu napędowego z silnikiem obcowzbudnym prądu stałego typu PZMb 44b o danych: P_n = 2,2 kW, n_n = 1450 obr/min, U_n = 220 V, I_n = 12,3 A zasilanego z niesymetrycznego 1-fazowego mostka tyrystorowego. Schemat części siłowej układu pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat części siłowej badanego układu

Silnik pracuje w typowym układzie regulacji prędkości obrotowej i prądu o strukturze szeregowej, z regulatorami typu PI i z ograniczeniem sygnału zadającego prąd w regulatorze prędkości ($I_{ogr} = 2,5\ I_n$). Schemat blokowy układu regulacji podano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy układu regulacji

3. Model analogowy układu regulacji

Zamodelowany na maszynie analogowej typu Meda 41 TA układ regulacji obejmuje:

- jednofazowy niesymetryczny prostownik tyrystorowy,
- silnik obcowzbudny prądu stałego,
- regulatory prądu i prędkości obrotowej,
- tory sprzężeń zwrotnych.

Model charakteryzuje się dwoma poważniejszymi uproszczeniami, które mogą powodować odstępstwa obliczeniowych przebiegów wielkości zmiennych układu od wartości tych przebiegów w układzie rzeczywistym. Są to:

a) wprowadzenie uśrednionej wartości komutacyjnego spadku napięcia $\Delta U_{k\,śr} = \frac{X_s}{\pi}\, i\,(t)$ w miejsce wartości chwilowej tego spadku napięcia.

b) pominięcie czasu martwego prostownika tyrystorowego. W modelu zmiana wartości napięcia sterującego $u_s(t)$ może spowodować zmiany kształtu napięcia wyjściowego prostownika, mimo iż tyrystory przewodzą, w rzeczywistości natomiast niemożliwa jest zmiana kąta wysterowania zaworów w czasie ich przewodzenia. Konsekwencją tych uproszczeń jest w zasadzie tylko odkształcenie przebiegu prądu twornika silnika i(t) w stosunku do przebiegu rzeczywistego. Wpływ odkształcenia prądu na przebieg prędkości obrotowej n(t) jest bardzo nieznaczny.

Schemat analogowego modelu układu regulacji przedstawiono na rys. 3. Występujące w schemacie maszynowym styki S_1, S_2 sterowane sygnałami $s_1(t)$, $s_2(t)$ reprezentują odpowiednio:

S_1 - element wprowadzający średnią wartość komutacyjnego spadku napięcia ΔU_k. Sposób wykrywania strefy prądów ciągłych, dla której występuje spadek napięcia ΔU_k, oraz generacja sygnału $s_1(t)$ zostały opisane szczegółowo w pracy [1],

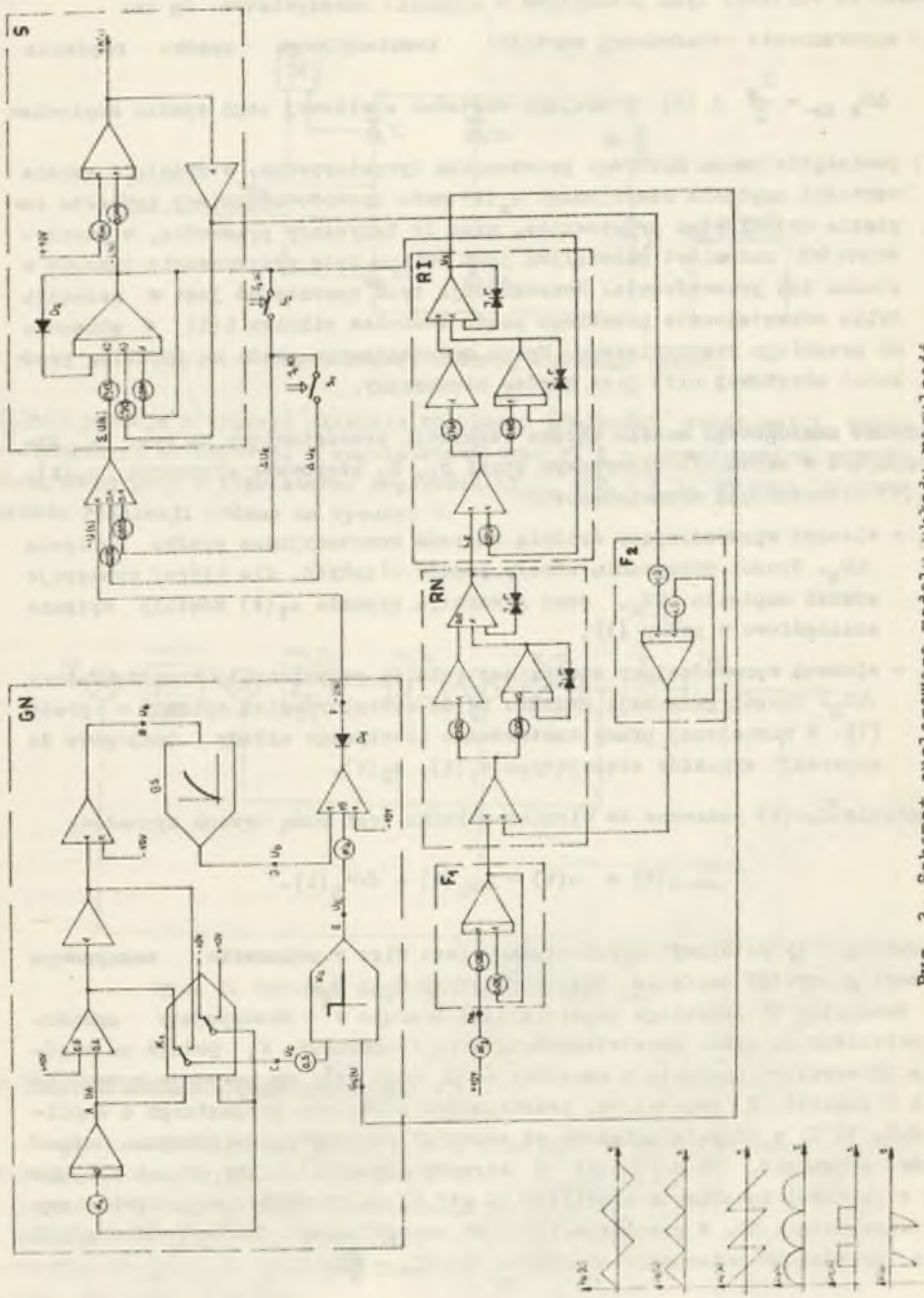
S_2 - element wprowadzający spadek napięcia na rezystancji transformatora ΔU_R. Sposób generacji sygnału $s_2(t)$ został również opisany w pracy [1]. W niniejszej pracy zastosowano identyczne układy analogowe do generacji sygnałów sterujących $s_1(t)$, $s_2(t)$.

Napięcie $\sum u(t)$ podawane do wirnika silnika jest sumą trzech sygnałów:

$$\sum u(t) = u(t) - \Delta u_k(t) - \Delta u_R(t).$$

Prostownik tyrystorowy reprezentowany jest więc w schemacie maszynowym przez: generator napięcia u(t) oraz styki S_1 i S_2.

Generator GN przebiegu napięcia u(t) pracuje w następujący sposób. Przełączany ze stałą częstotliwością styk komparatora K_1 podaje na wejście integratora napięcie o wartości $\pm\,\alpha_1 \cdot 10$ [V], co powoduje wytworzenie w punkcie A generatora, przemiennego przebiegu trójkątnego o amplitudzie 10 V, o okresie zależnym od wartości nastawy potencjometru α_1. Łatwo sprawdzić, że w punkcie B otrzyma się symetryczny sygnał trójkątny o wartości zawartej w granicach 0÷ +10 V, który wysterowuje nieliniowy przekształtnik GS. W przekształtniku GS zamodelowano funkcję Y = sin X dla przedziału zmienności argumentu $X \in (0, -\frac{\pi}{2})$.



Rys. 3. Schemat analogowego modelu układu regulacji

Na wyjściu GS (w punkcie D) otrzymuje się przebieg sinusoidalny $|\sin \omega t|$ którego pulsacja jest określona przez okres przebiegu trójkątnego w punkcie B, zaś amplituda jest równa +10 V. W punkcie C generatora, połączonym z drugim stykiem przełączalnym komparatora K_1 otrzymujemy przemienny sygnał piłowy o wartości zmiennej w granicach $\pm$ 10 V.
Przebieg ten jest sumowany na wejściu komparatora K_2 z napięciem sterującym $u_s(t)$. Jeżeli suma napięć spełnia nierówność $0{,}5\ u_C(t) + u_S(t) < 0$ to na wyjściu komparatora K_2 (punkt E) pojawia się dodatni sygnał o stałej wartości $+ U_e$, jeżeli suma ta jest dodatnia to napięcie na wyjściu K_2 jest równe zeru. Sygnały $u_D(t)$, $u_E(t)$ oraz stały sygnał o wartości - 10 V są sumowane we wzmacniaczu operacyjnym, przy czym potencjometr α_2 jest nastawiony tak, aby zachodziło: $10\alpha_2\ U_E = 10$ [V].

Napięcie generatora sinusoidy $u_D(t)$ występuje w punkcie F tylko w przypadku wysterowania komparatora K_2, a więc gdy suma napięć $0{,}5\ u_C(t) + u_S(t) < 0$. Pozostałe części przebiegu sinusoidalnego $|\sin \omega t|$ są obcinane przez diodę D_1, włączoną na wyjściu wzmacniacza sumującego. Widać, że zmianom wartości napięcia sterującego $u_S(t)$ zawartym w granicach $U_{s\,min} = -5$[V] do $U_{s\,mx} = +5$ [V] odpowiadają zmiany kąta wysterowania mostka prostowniczego w granicach $\alpha_{min} = 0$, $\alpha_{mx} = \pi$.

Przy zerowej wartości napięcia sterującego $u_S(t) = 0$, kąt wysterowania mostka $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Generator GN pozwala więc na zmiany kąta wysterowania prostownika w całym możliwym zakresie.

Aby uniemożliwić wystąpienie ujemnej wartości prądu prostownika $i(t)$, która nie istnieje w układzie rzeczywistym, objęto integrator prądu nieliniowym sprzężeniem zwrotnym - dla sygnałów dodatnich prądu $i(t) > 0$ integrator jest zwarty przez diodę D_2.

Regulatory prędkości RN i prądu RI zabezpieczono przed nasyceniem przy pomocy przeciwrównolegle włączonych diod Zenera ograniczających maksymalne sygnały na wyjściu regulatorów na żądanym poziomie. Potencjometr α_3 służy do ustalenia wartości sygnału prędkości zadanej, w miejsce tego potencjometru może być włączony dowolny generator przebiegu zadanego $n_z(t)$.

Wyżej przedstawiony model analogowy pozwala na zbadanie statyki i dynamiki układów regulacji prędkości obrotowej silnika prądu stałego, zasilanego z niesymetrycznego mostka tyrystorowego, zarówno w układzie otwartym jak i zamkniętym. Wierniejszym odtworzeniem układu rzeczywistego byłby model uwzględniający dyskretny charakter sterowania prostownika tyrystorowego oraz wartość chwilową komutacyjnego spadku napięcia, jednak wprowadzenie tych uściśleń wymaga znacznej komplikacji modelu dając w efekcie niewielkie zmiany w stosunku do przebiegów obliczeniowych.

4. Własności dynamiczne układu zoptymalizowanego według kryteriów optimum symetrycznego i optimum wartości

Doboru nastaw regulatora prądu dokonano w oparciu o kryterium optimum wartości, które daje przeregulowanie sygnału wyjściowego 4% i dość duże tłumienie $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$.

Pętlę obwodu regulacji prędkości obrotowej silnika zoptymalizowano według kryterium optimum symetrycznego (przeregulowanie 43%, szybki zanik procesu przejściowego) ze względu na działanie sygnału zakłócającego oraz według kryterium optimum wartości, ze względu na sygnał sterujący (przez zastosowanie filtra sygnału zadającego).

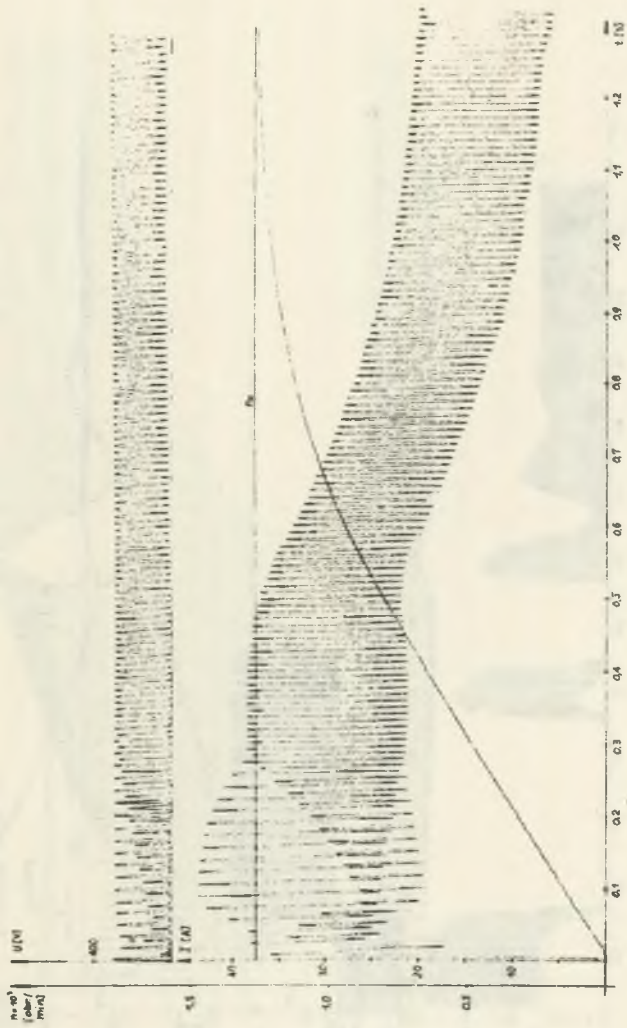
Na maszynie analogowej przeprowadzono badania własności według tych kryteriów i przy pomocy rejestratora X-Y zapisano przebiegi prądu i(t), napięcia u(t) i prędkości n(t) silnika prądu stałego, przy różnych warunkach pracy (rys. 4, 5 i 6).

Na rys. 4 przedstawiono przebiegi tych wielkości w czasie rozruchu pod obciążeniem znamionowym (M_n) przy skokowym zadaniu prędkości obrotowej n_z = 1275 obr/min, a na rys. 5 przy $n_z = 625 \frac{obr}{min}$. W obu przypadkach ciekawy jest kształt krzywych i(t) i u(t) na początku rozruchu, wywołany zbyt małą szybkością działania pętli prądowego sprzężenia zwrotnego. Czas trwania rozruchu dla pierwszego przypadku w dużym przedziale jest zdeterminowany działaniem ograniczenia prądowego i w związku z tym nie obserwuje się jego skrócenia w stosunku do pracy w układzie otwartym.

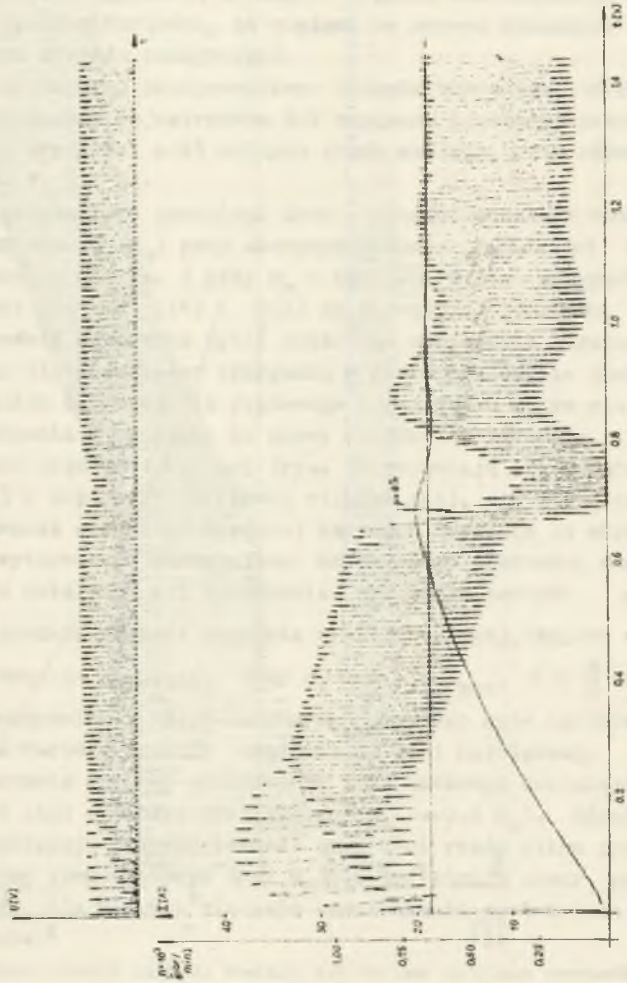
Przy obniżaniu prędkości zadanej (rys. 5) pojawiają się tłumione oscylacje prądu i(t) i prędkości obrotowej silnika n(t), a w początkowej fazie rozruchu również oscylacje średniej wartości napięcia za okres. Zjawisko to można wytłumaczyć następująco: maksymalnej prędkości zadanej odpowiada w stanie ustalonym kąt opóźnienia włączenia zaworów $\alpha = 0$ i $\frac{dU_d}{d\alpha} = 0$ (U_d - średnia wartość napięcia wyprostowanego), szybko więc ustala się wartość średnia napięcia. Przy $n_z \approx 0{,}5\, n_{z\,max}$, $\alpha \approx \frac{\pi}{2}$ i $\frac{dU_d}{d\alpha}$ osiąga wartość maksymalną i wpływ uchybu dynamicznego kąta opóźnienia włączenia $\Delta\alpha(t)$ na wartość średnią napięcia U_d jest największy.

Rys. 6 przedstawia procesy przejściowe przy skokowym dociążeniu napędu ($0{,}2\, M_n \longrightarrow M_n$) i jego skokowym odciążeniem ($M_n \longrightarrow 0{,}2\, M_n$). Również i w tym przypadku występują przeregulowania prędkości rzędu kilku procent. Stan ustalony przy biegu jałowym ($0{,}2\, M_n$) to już strefa pracy przy prądach przerywanych, dla których nie mają zastosowania zastosowane kryteria doboru regulatorów.

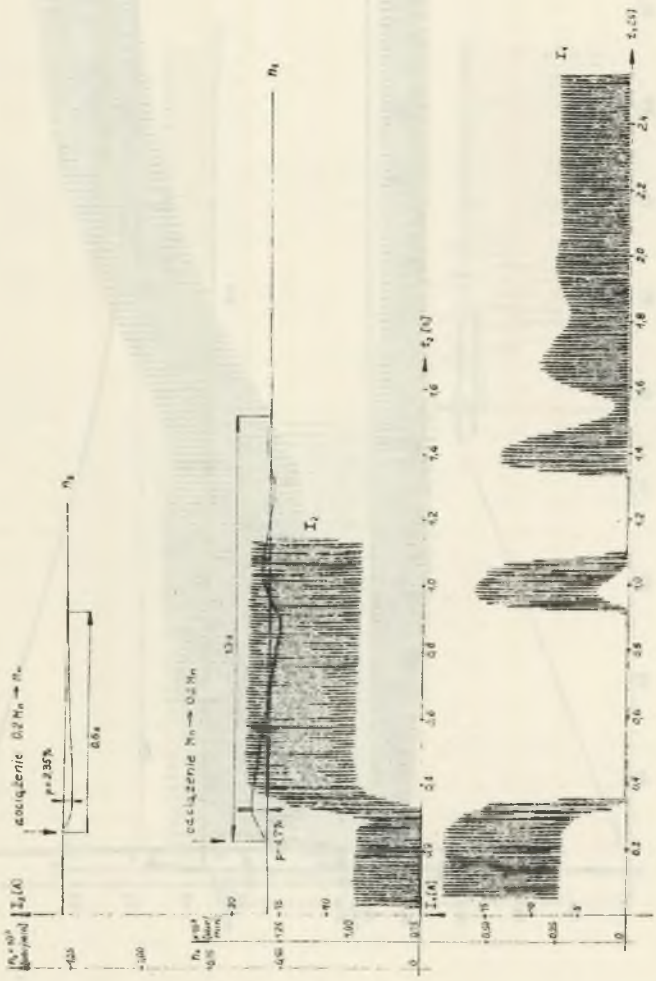
W sumie, optymalizacja układu według kryterium optimum wartość i optimum symetrycznego, nie daje zadowalających efektów co jest spowodowane nieliniową charakterystyką przekształtnika tyrystorowego (ciągłą - bo pominięto dyskretny sposób sterowania), ograniczeniem prądu od góry oraz tym, że obiekt regulacji posiada zmienne współczynniki wzmocnienia w strefie prądów przerywanych.



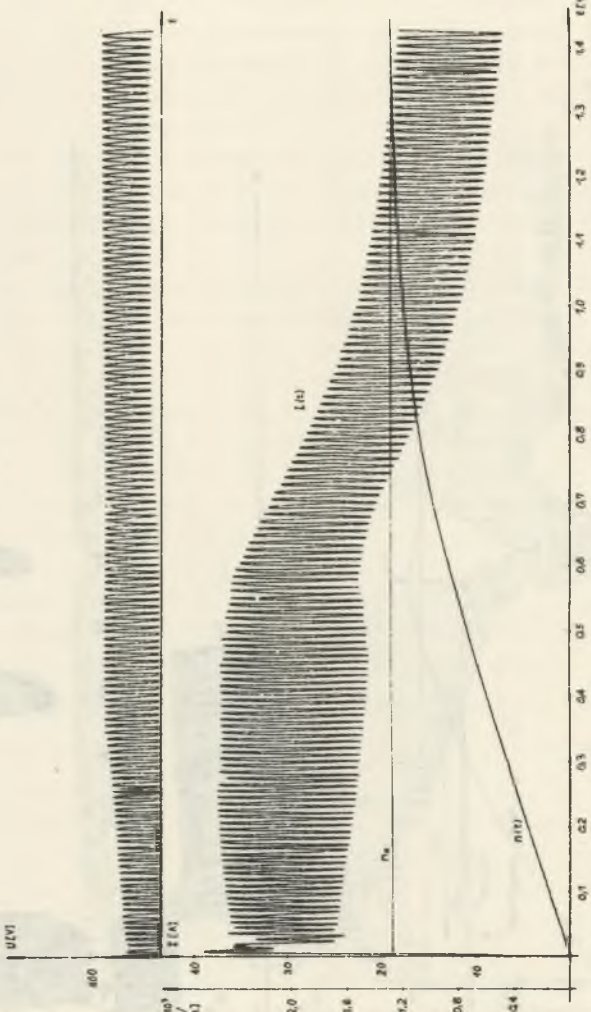
Rys. 4. Obliczeniowe przebiegi u(t), n(t), i(t), przy n_z = 1275 obr/min i $M=M_n$



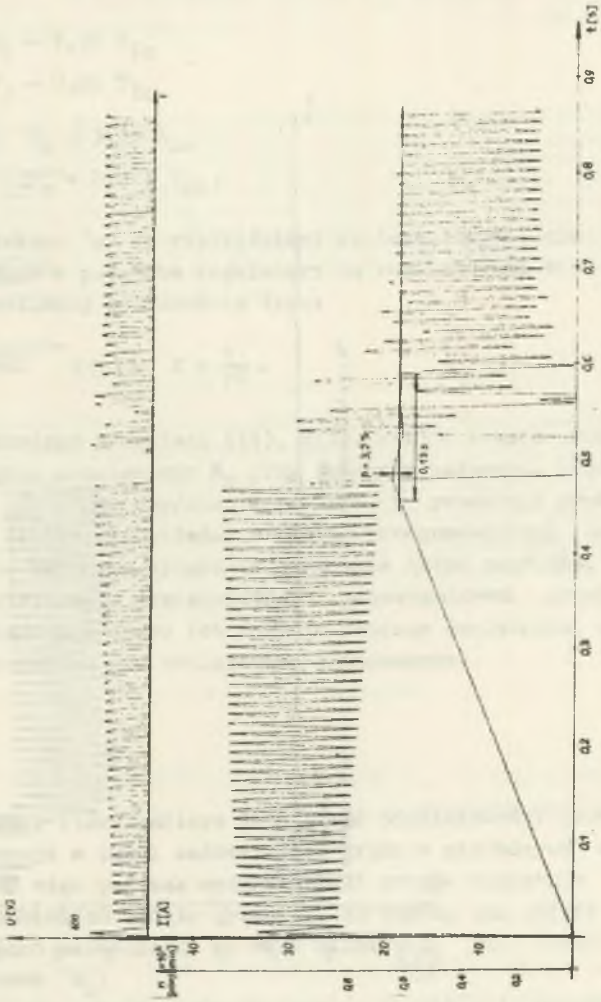
Rys. 5. Obliczeniowe przebiegu u(t), n(t), i(t), przy n_z = 625 obr/min i $M=M_n$



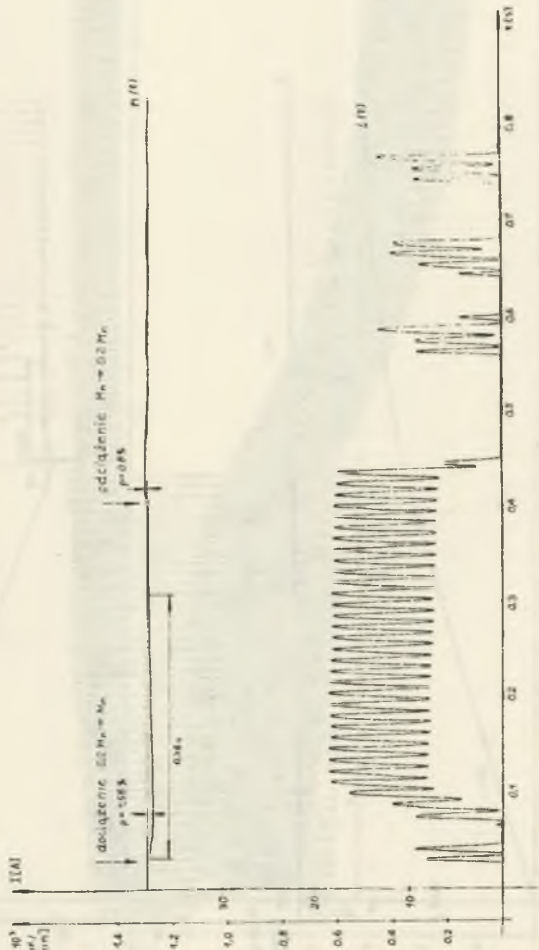
Rys. 6. Obliczeniowe przebiegi $n_z(t)$ i $i(t)$ przy skokowych zmianach obciążenia przy n_z = 1275 obr/min



Rys. 7. Doświadczalne przebiegi u(t), i(t), n(t) przy n_z = 1275 obr/min i $M=M_n$



Rys. 8. Doświadczalne przebiegu u(t), i(t), n(t) przy n_z = 625 obr/min i $M=M_n$



Rys. 9. Doświadczalne przebiegi n(t) i i(t) przy skokowych zmianach obciążenia przy n_z = 1275 obr/min

5. Doświadczalna korekta nastaw regulatorów

Ze względu na niezadowalające przebiegi dynamiczne układu uzyskane przy pracy regulatorów z obliczeniowymi nastawami przeprowadzono badania mające na celu określenie wpływu zmiany nastaw regulatorów na jakość procesów przejściowych. Wobec wspomnianych nieliniowości układu, najlepszy wynik jaki udało się uzyskać w badanym układzie był dla następujących nastaw:

- regulator prądu $K_I = 1{,}95\ K_{Io}$

  $T_I = 0{,}05\ T_{Io}$

- regulator prędkości $K_n = 3{,}18\ K_{no}$

  $T_n = 0{,}074\ T_{no}$,

gdzie wielkości z indeksem "o" są wielkościami obliczeniowymi, dla których wyniki badań podano w p.4. Oba regulatory są regulatorami typu PI o funkcji przejścia określonej zależnością typu:

$$K(p) = K + \frac{1}{pT}.$$

Na rys. 7 i 8 przedstawiono przebiegi i(t), n(t), u(t) w czasie rozruchu pod obciążeniem momentem znamionowym M_n przy skokowym zadawaniu prędkości $n_z = 1275$ obr/min i $n_z = 625$ obr/min, a na rys. 9 przebiegi przejściowe przy odciążeniu i dociążeniu układu. W wyniku przeprowadzonej korekty nastaw regulatorów nie uzyskano wprawdzie skrócenia czasu rozruchu, za to udało się uzyskać zmniejszenie występujących przeregulowań przebiegów przejściowych oraz skrócenie czasu ich trwania podczas dociążenia, odciążenia oraz w czasie rozruchu pod obciążeniem znamionowym.

6. Podsumowanie

Optymalizacja układu, który zawiera dużą ilość nieliniowości jest bardzo trudna. Układ pracuje w pełni zadowalająco tylko w niektórych warunkach pracy. Należałoby więc podczas optymalizacji przede wszystkim brać pod uwagę w jaki sposób układ będzie pracował, to znaczy jak będzie się zmieniał w czasie moment mechaniczny na wale silnika i jak będzie się zmieniać prędkość zadana n_z.
Tylko w układach o bardzo wysokich wymaganiach co do jakości regulacji i złożonych warunkach pracy opłaca się stosować korektory adaptacyjne, uwzględniające zmianę parametrów układu.

LITERATURA

1. Rodacki T., Nowak J.: Zastosowanie techniki analogowej do badania statyki i dynamiki silnika prądu stałego zasilanego z przekształtnika tyrystorowego - Zeszyty Nauk.Pol.Sl. Elektryka nr 38, 1973 r.
2. Levine L.: Metody stosowania maszyn analogowych do rozwiązywania problemów w technice - WNT Warszawa 1969.
3. Szopliński Z.: Elektroniczna technika analogowa - WNT W-wa 1968.
4. Tunia H., Winiarski B.: Układy elektroniczne w automatyce napędowej WNT W-wa 1971.

Przyjęto do druku w grudniu 1974 r.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИРИСТОРНОЙ ПРИВОДНОЙ СИСТЕМЫ
ПОСТОЯННОГО ТОКА НА АНАЛОГОВОЙ МАШИНЕ

Р е з ю м е

При помощи аналоговой вычислительной машины произведен анализ динамики тиристорной автоматизированной приводной системы с цепями регулировки тока и скорости вращения, определяемыми согласно критерию оптимум.

Приведены результаты, полученные путем экспериментальной корректировки настройки регуляторов и сделано их сравнение с результатами расчетных данных.

MODELLING OF THE D.C. THYRISTOR POWER TRANSMISSION SYSTEM
ON THE ANALOG COMPUTER

S u m m a r y

The dynamics of the d.c. thyristor power transmission system with current and speed control circuits are analysed on the analog computer.

The control circuits are calculated by the use of Kessler criterion. The results obtained in effect of the experimental correction of the regulators adjustment are given and the conclusions resulting from the comparision of the waveforms received from the calculations and from the experiment are formulated.