ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1974

Seria: Elektryka z. 46 Nr kol. 427

Czesław Myrcik, Roman Nowak,
Zbigniew Olszewski, Zbigniew Mantorski

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki

DYNAMIKA TYRYSTOROWEGO UKŁADU PRĄDU STAŁEGO O DWUSTREFOWEJ REGULACJI PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono model analogowy i wyniki badań modelu układu automatycznej regulacji prędkości obrotowej z silnikiem prądu stałego, pracującego w dwu strefach regulacji. Podano przebiegi czasowe wielkości zmiennych w pewnych przypadkach pracy układu oraz zasadnicze wnioski dotyczące optymalizacji jego dynamiki.

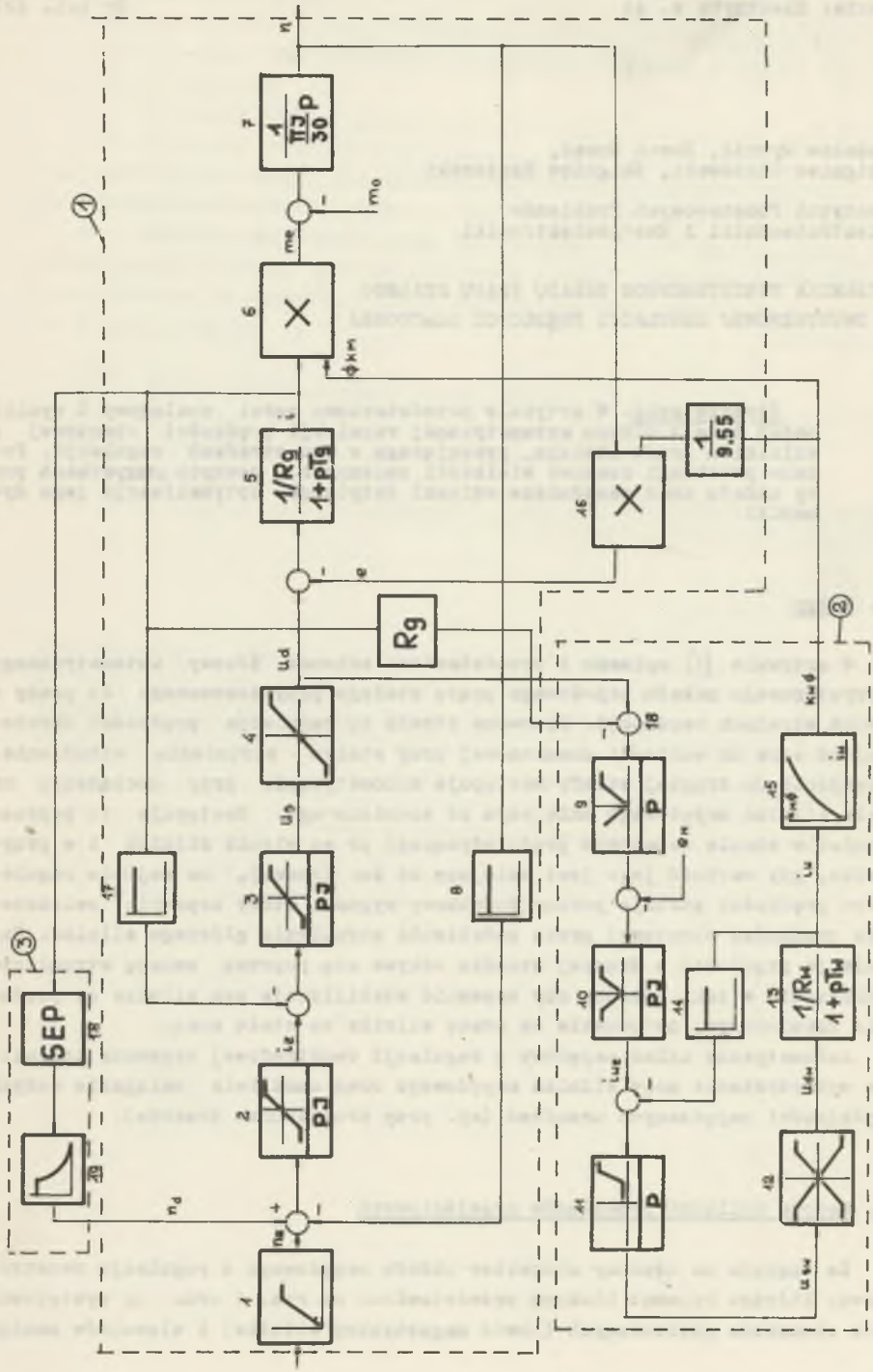
1. Wstęp

W artykule [1] opisano i przedstawiono schemat ideowy automatycznego tyrystorowego układu napędowego prądu stałego przystosowanego do pracy w dwóch strefach regulacji. Pierwsza strefa to regulacja prędkości obrotowej od zera do wartości znamionowej przy stałym strumieniu wzbudzenia. Przejście do drugiej strefy następuje automatycznie przy obciążeniu na wale silnika napędowego mniejszym od znamionowego. Następuje to poprzez pomiar w stanie ustalonym prądu płynącego przez wirnik silnika i w przypadku, gdy wartość jego jest mniejsza od znamionowej, na wejście regulatora prędkości zostaje podany dodatkowy sygnał, który zapewnia zwiększenie prędkości obrotowej przez osłabienie strumienia głównego silnika. Regulacja prędkości w drugiej strefie odbywa się poprzez zmianę strumienia wzbudzenia w taki sposób, aby zapewnić stabilizację sem silnika na poziomie znamionowym, co pozwala na pracę silnika ze stałą mocą.

Automatyczny układ napędowy o regulacji dwustrefowej zapewnia optymalne wykorzystanie mocy silnika napędowego oraz umożliwia osiąganie dużych wydajności napędzanych urządzeń (np. przy przeładunku towarów).

2. Metoda obliczeń przebiegów przejściowych

Ze względu na złożony charakter układu napędowego z regulacją dwustrefową, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 1 oraz na występowanie elementów nieliniowych (obwód magnetyczny silnika) i elementów mnożą-



Rys. 1. Schemat blokowy układu regulacji

cych obliczenia przebiegów przejściowych zostały wykonane na maszynie analogowej Meda 41 TA.

Obliczeń dokonano, przyjmując za punkt wyjścia schemat blokowy układu regulacji (rys. 1) oraz dane znamionowe elementów tego schematu, po wprowadzeniu uproszczeń i aproksymacji narzuconych przez możliwości operacyjne wyżej wymienionej maszyny analogowej.

Ze względu na ograniczone możliwości operacyjne maszyny analogowej przyjęto następujące założenia upraszczające:

- pominięto nieliniowości i opóźnienia przekształtników tyrystorowych zasilających obwody twornika i wzbudzenia silnika. Przekształtniki te potraktowano jako elementy liniowe i bezinercyjne, charakteryzowane tylko wartością współczynnika wzmocnienia statycznego,
- założono niezmienność stałej czasowej obwodu wzbudzenia. Przyjęta do obliczeń stała czasowa T_w jest średnią stałą czasową wynikającą ze znamionowej charakterystyki magnesowania, podczas gdy rzeczywisty obwód wzbudzenia jest reprezentowany przez transmitancję wyższego rzędu o współczynnikach (stałych czasowych) zależnych od wartości strumienia. Błąd wynikający z tego uproszczenia jest jednak niewielki, ponieważ strumień jest regulowany tylko poniżej znamionowego, gdzie zmienność głównej stałej czasowej T_w jest niewielka,
- aproksymowano linią prostą charakterystykę elementu zadającego dodatkowy sygnał prędkości obrotowej w funkcji prądu ustalonego odpowiadającego przy stałym strumieniu wzbudzenia (Φ = const) momentowi obciążenia. Charakterystyka ta winna być zbliżona do hiperboli. Konsekwencją tego uproszczenia, które będzie jeszcze omówione, jest fakt, że silnik w drugiej strefie nie pracuje przy stałej mocy znamionowej.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy układu regulacji stanowiący podstawę do sporządzenia schematu maszynowego. Silnik przyjęty do obliczeń posiadał dane znamionowe: P_N = 75 kW, U_N = 440 V, n_N = 1000 $\frac{obr}{min}$.

W schemacie blokowym można wyróżnić trzy główne tory:

1. Tor regulacji w obwodzie głównym na który składają się:

1	- Element formujący sygnał zadany prędkości obrotowej
2	- Regulator prędkości obrotowej
3	- Regulator prądu twornika silnika prądu stałego
4	- Przekształtnik tyrystorowy w obwodzie twornika
5	- Twornik silnika prądu stałego
6, 7, 16	- Elementy mnożące i element całkujący
8	- Element pomiarowy prędkości obrotowej
17	- Element pomiarowy prądu twornika.

2. Tor regulacji strumienia wzbudzenia na który składają się:

18	- Węzeł sumujący stanowiący element pomiarowy sem E
9	- Element obliczający moduł E

10 - Regulator sem E silnika
11 - Regulator prądu wzbudzenia
12 - Przekształtnik tyrystorowy w obwodzie wzbudzenia
13 - Obwód prądu wzbudzenia silnika
14 - Element pomiarowy prądu wzbudzenia
15 - Element nieliniowy realizujący zależność $\Phi = f(i_w)$

3. Tor automatycznego zadawania prędkości obrotowej w drugiej strefie regulacji na który składają się:

18 - Sterowany element pomiaru i pamięci
19 - Element nieliniowy zadający prędkość w funkcji ustalonego prądu obciążenia.

Wartości współczynników wzmocnienia elementów wynoszą:

Przekształtnik w torze głównym ④ - $k_p = 50$
Przekształtnik w obwodzie wzbudzenia ⑫ - $k_p = 24$
Element pomiarowy prędkości ⑧ - $k_{mg} = 0{,}01$
Element pomiarowy prądu twornika ⑰ - $k_{pI} = 0{,}025$
Element pomiarowy prądu wzbudzenia ⑭ - $k_{Iw} = 3$

3. Schemat maszynowy i dobór nastaw regulatorów

W celu zbudowania schematu maszynowego wykorzystano poniższe równania różniczkowe i operatorowe.

3.1. Obwód główny silnika

Równania różniczkowe silnika:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_s + L_d}(u - R\,i - k_e\,\Phi\,n)$$
$$\frac{dn}{dt} = \frac{30}{\pi J_z}(k_M\,\Phi\,i - M_m) \tag{1}$$

gdzie:

L_s - indukcyjność silnika,
L_d - indukcyjność dodatkowa włączona do obwodu twornika,
J_z - sumaryczny moment bezwładności układu.

Nastawy regulatora prędkości RN oraz regulatora prądu RI obliczono postępując zgodnie z metodyką podaną w artykule [2]. Nastawy te są obliczone wg kryteriów Kesslera: modułowego dla RI oraz symetrii dla RN.

Po przeliczeniach otrzymano wartości współczynnika wzmocnienia i stałych czasowych regulatorów typu PI prędkości i prądu, przy czym regula-

tor prądu i element wykonawczy (przekształtnik tyrystorowy) potraktowano jako całość, ponieważ po uproszczeniach przekształtnik charakteryzuje się tylko wartością wzmocnienia.

Transmitancja regulatora prądu RI ma postać:

$$K_r^I(p) = k_r^I(1 + \frac{1}{pT_r^I}) \tag{2}$$

Transmitancja regulatora prędkości RN:

$$K_r^N(p) = k_r^N(1 + \frac{1}{pT_r^N}) \tag{3}$$

Zgodnie z równaniami (1), (2) i (3) i po uwzględnieniu niezbędnych ograniczeń sygnałów wyjściowych regulatorów, a także wartości prądu twornika zbudowano schemat maszynowy układu regulacji przedstawiony na rys.2.

Potencjometry α, β służą do nastawiania i skokowego przełączania wartości ograniczenia prądu twornika na wartość $2\ I_N$ i I_N. Potencjometr A służy do nastawiania stromości narastania sygnału prędkości zadanej n.

Maksymalne wartości sygnałów wyjściowych elementów zadających i regulatorów ograniczono na poziomie jednostki maszynowej przy pomocy dokładnie dobranych diod Zenera.

3.2. Obwód wzbudzenia

Schemat maszynowy obwodu wzbudzenia sporządzono przyjmując, że regulacja strumienia wzbudzenia w drugiej strefie pracy napędu ma na celu stabilizację wartości sem na poziomie znamionowym. Przy budowaniu schematu maszynowego posługiwano się poniższymi równaniami operatorowymi obwodu wzbudzenia i regulatorów, przy czym przekształtnik tyrystorowy i uzwojenie wzbudzenia potraktowano jako całość.

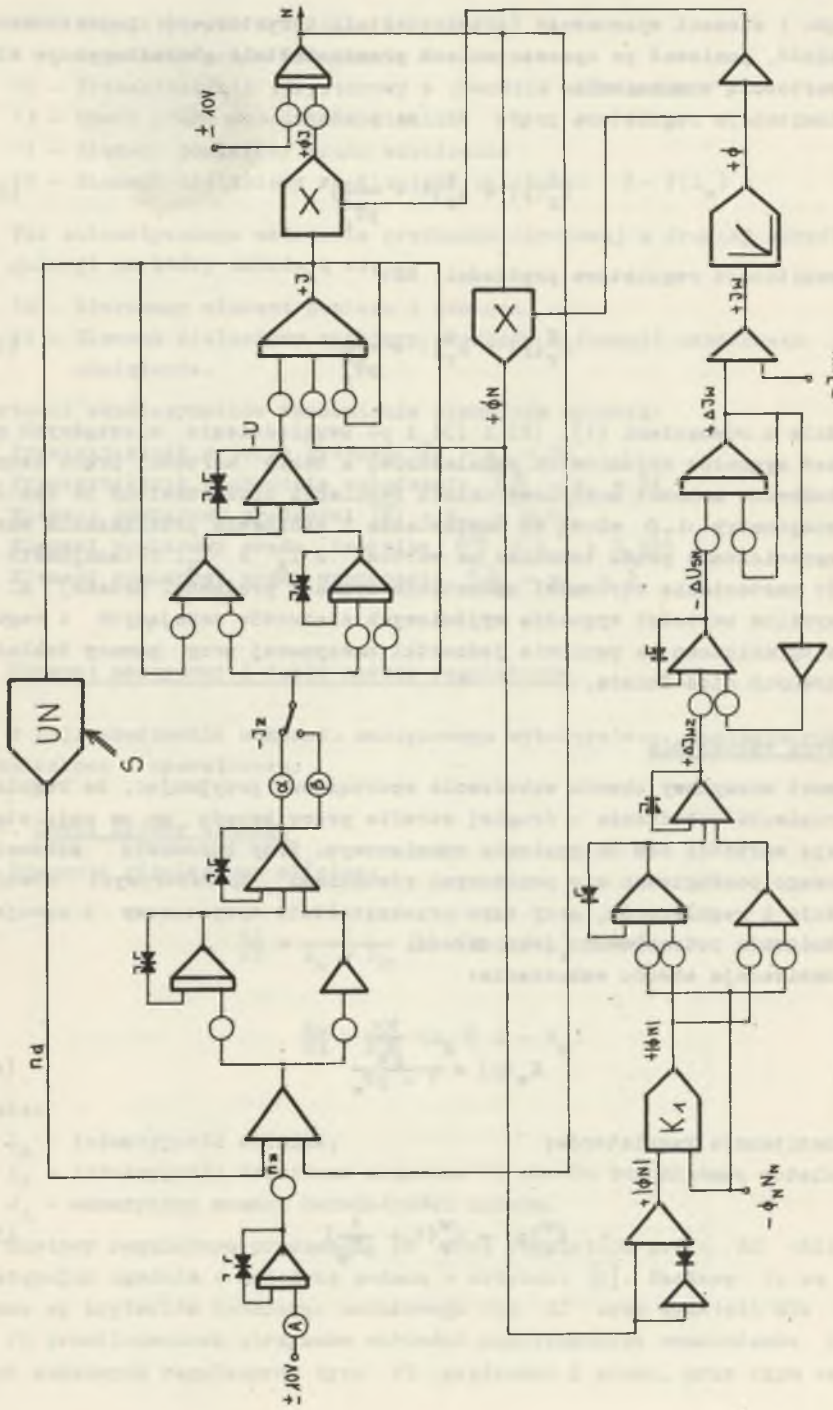
Transmitancja obwodu wzbudzenia:

$$K_w(p) = \frac{\frac{1}{R_w}}{1 + pT_w} \tag{4}$$

Transmitancja regulatorów:

regulator sem

$$K_r^w(p) = k_r^w(1 + \frac{1}{pT_w}) \tag{5}$$



Rys. 2. Schemat maszynowy układu regulacji
UN - układ nieliniowy przedstawiony na rysunku 4

regulator prądu wzbudzenia

$$K_p(p) = k_p \tag{6}$$

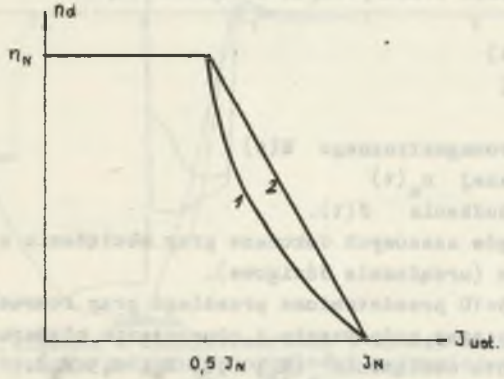
Schemat maszynowy przedstawiono na rys. 2.

3.3. Układ automatycznego zadawania prędkości obrotowej w drugiej strefie regulacji

Podstawowym celem układu automatycznego zadawania prędkości obrotowej jest stabilizacja mocy silnika pracującego w drugiej strefie regulacji na wartość znamionową niezależnie od obciążenia.

Aby spełnić powyższy warunek, układ mierzy wartość momentu obciążenia i po dokonaniu pomiaru zadaje na układ regulacji dodatkowy sygnał prędkości obrotowej n_d, tak aby osiągnąć stabilizację mocy w stanie ustalonym. Taka praca zapewnia jednocześnie osiągnięcie maksymalnej możliwej przy danym momencie obciążenia prędkości obrotowej, przy której nie następuje przeciążenie maszyny mocą (prądem). Oczywiste jest, że przy momentach obciążenia większych od znamionowego $M_m > M_N$ sygnał n_d jest równy zero.

Jednocześnie założono, że $n_{max} \leqslant 2\, n_N$, skąd wynika, że największy możliwy sygnał n_d jest równy sygnałowi prędkości znamionowej $n_{dmax} = n_{nz}$ - wartość ta wystąpi przy obciążeniu momentem $M_m = 0{,}5\, M_N$. Dla momentów obciążenia $M_m < 0{,}5\, M_N$ sygnał prędkości dodatkowej jest stały i równy maksymalnemu n_{dmax} - silnik będzie pracował ze stałą prędkością $2\, n_N$ przy prądzie i mocy mniejszych od znamionowych. Pomiar momentu jest dokonywany poprzez pomiar ustalonego prądu obciążenia po zakończeniu rozruchu w pierwszej strefie regulacji. Ponieważ strumień wzbudzenia jest w tym punkcie znamionowy, wartość prądu określa jednoznacznie wartość momentu obciążenia. Charakterystyka wiążąca sygnał prędkości dodatkowej n_d z wartością prądu ustalonego (momentu) ma kształt hiperboli i po uwzględnieniu ograniczenia n_{max} powinna przebiegać jak krzywa 1 na rys. 3.



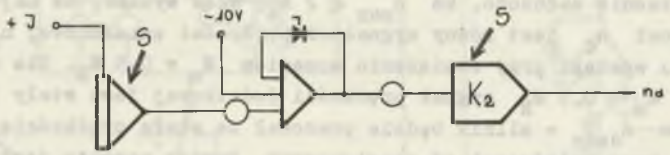
Rys. 3. Zależność sygnału zadającego prędkość dodatkowy n_d od ustalonego prądu obciążenia

Z powodu braku elementu nieliniowego aproksymowano tę charakterystykę linią prostą 2, co oczywiście wnosi błąd, w wyniku czego moc silnika nie jest stabilizowana na wartości znamionowej, lecz na nieco większej. Maksymalne odchylenie, jak wynika z pomiarów, wynosi ok. 25% i występuje przy momencie obciążenia $M_m = 0,75\ M_N$.

Układ pomiaru prądu ustalonego zamodelowano wykorzystując integrator pracujący w takcie iteracji WP-PAM, sterowany sygnałem zerojedynkowym s(t), przy czym dla s = 0 integrator jest w stanie śledzenia wartości chwilowej prądu, zaś przy s = 1 w stanie pamięci. Sygnał s steruje tak że stykowym komparatorem K_2, który przy s = 1 podaje sygnał wyjściowy elementu nieliniowego na wejście regulatora prędkości obrotowej.

Sygnał s był zadawany ręcznie, zmiana jego wartości z s = 0 na s = 1 następowała natychmiast po ustaleniu się przebiegów n(t), I(t) po rozruchu w pierwszej strefie.

Rysunek 4 przedstawia schemat maszynowy układu automatycznego pomiaru prądu ustalonego i zadawania prędkości obrotowej w drugiej strefie regulacji.



Rys. 4. Układ automatycznego zadawania prędkości w funkcji obciążenia

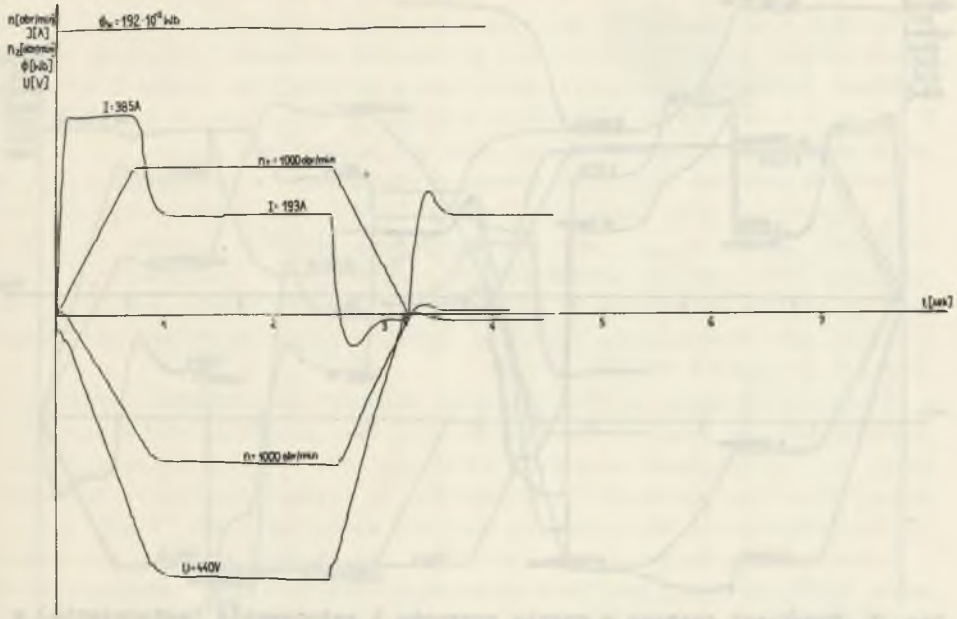
4. Wyniki obliczeń

W zamodelowanym układzie regulacji zarejestrowano przebiegi czasowe wszystkich wielkości elektrycznych i mechanicznych:

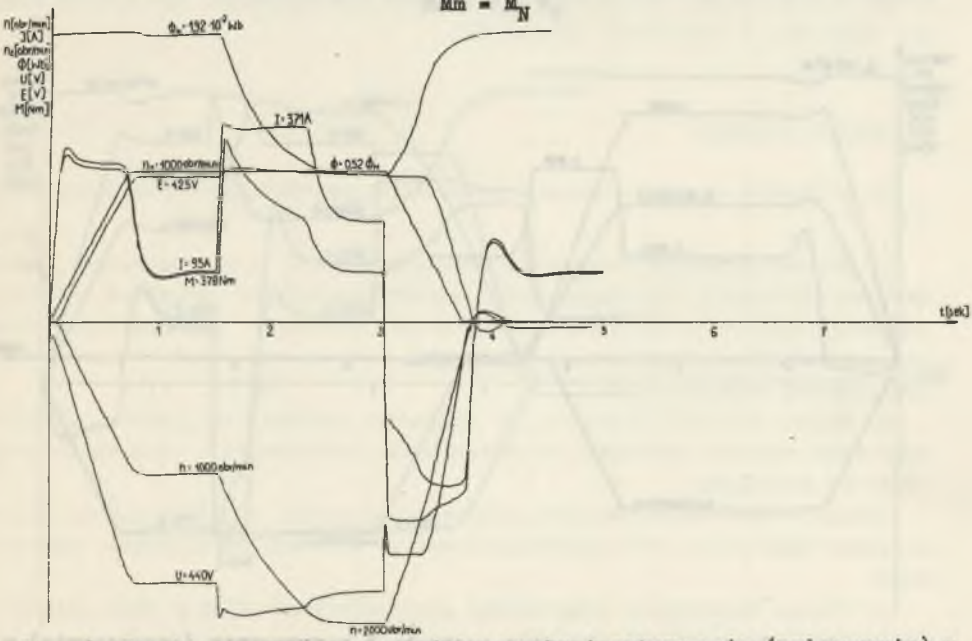
prądu I(t)
prędkości n(t)
napięcia U(t)
sem E(t)
momentu elektromagnetycznego M(t)
prędkości zadanej $n_z(t)$
strumienia wzbudzenia $\Phi(t)$.

Obliczeń przebiegów czasowych dokonano przy obciążeniu silnika napędowego momentem aktywnym (urządzenie dźwigowe).

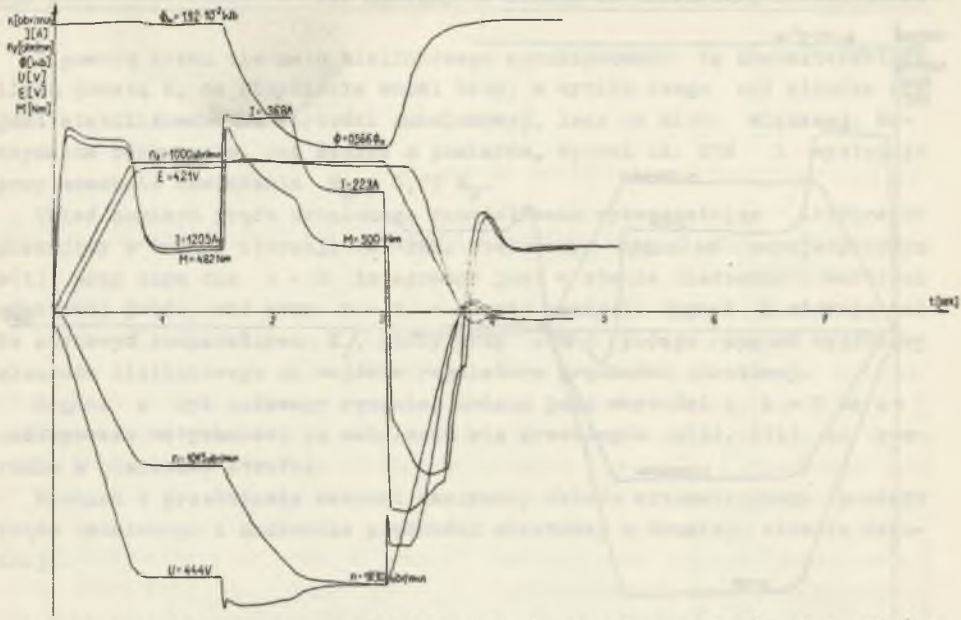
Na rysunkach 5-10 przedstawiono przebiegi przy rozruchu i zatrzymaniu układu napędowego przy podnoszeniu i opuszczaniu ciężaru i trzech różnych wartościach momentu obciążenia (M_N; 0,65 M_N; 0,5 M_N).



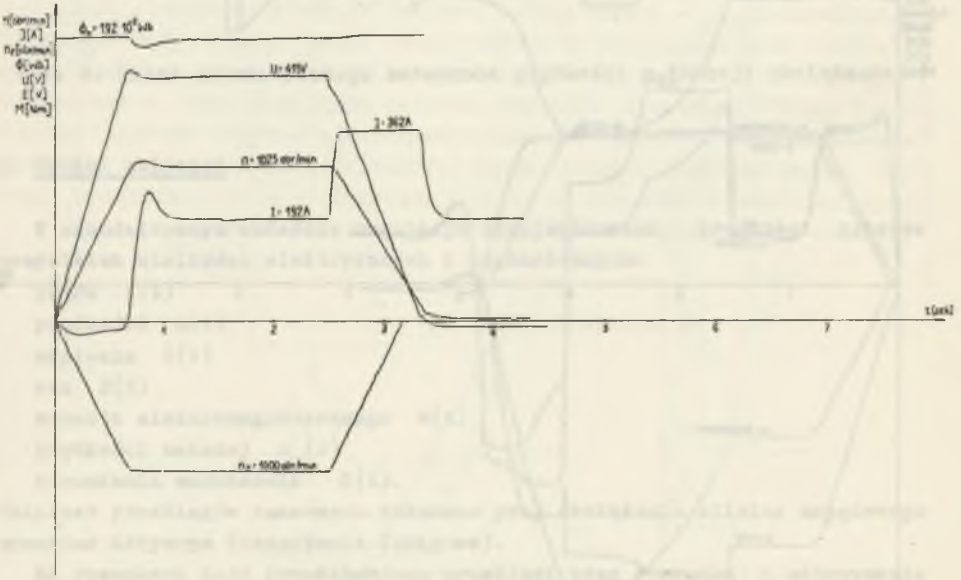
Rys. 5. Przebiegi czasowe w czasie rozruchu i zatrzymanie (podnoszenie) w układzie z automatycznym zadawaniem prędkości w drugiej strefie regulacji $M_m = M_N$



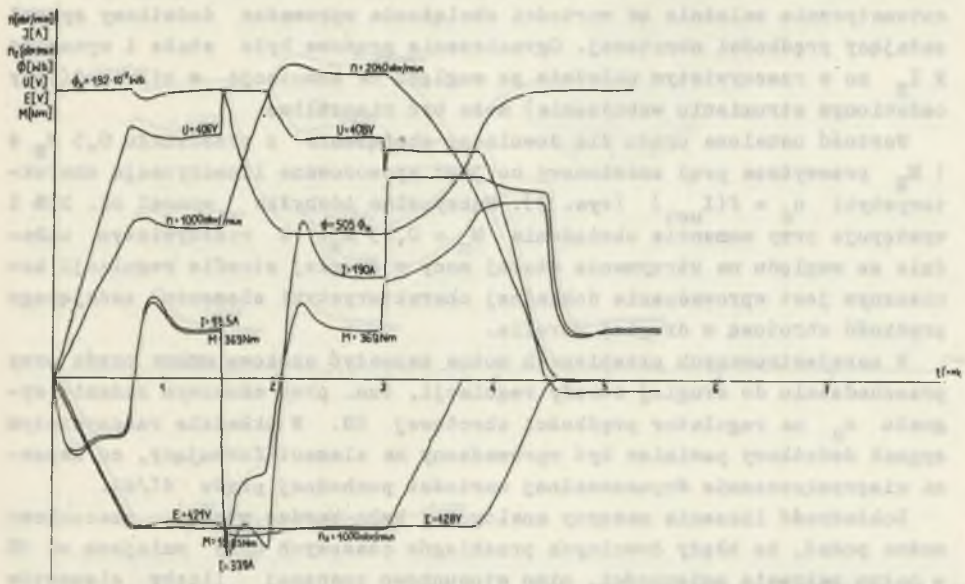
Rys. 6. Przebiegi czasowe w czasie rozruchu i zatrzymanie (podnoszenie) w układzie z automatycznym zadawaniem prędkości w drugiej strefie regulacji $M_m = 0,5\ M_N$



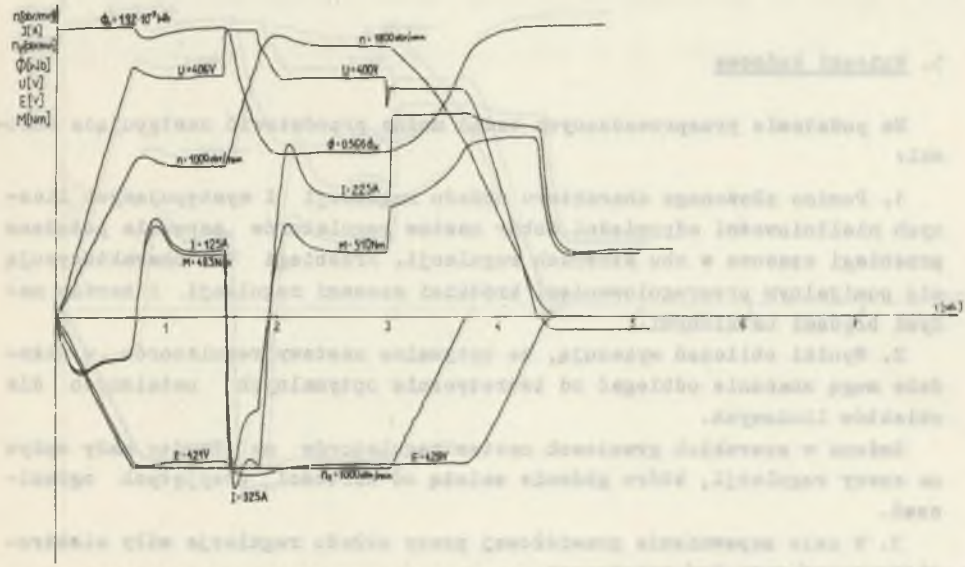
Rys. 7. Przebiegi czasowe w czasie rozruchu i zatrzymanie (podnoszenie) w układzie z automatycznym zadawaniem prędkości w drugiej strefie regulacji $M_m = 0,65\ M_N$



Rys. 8. Przebiegi czasowe w czasie rozruchu i zatrzymanie (opuszczanie) w układzie z automatycznym zadawaniem prędkości w drugiej strefie regulacji $M_m = M_N$



Rys. 9. Przebiegi czasowe w czasie rozruchu i zatrzymanie (opuszczanie) w układzie z automatycznym zadawaniem prędkości w drugiej strefie regulacji $M_m = 0{,}5\ M_N$



Rys. 10. Przebiegi czasowe w czasie rozruchu i zatrzymanie (opuszczenie) w układzie z automatycznym zadawaniem prędkości w drugiej strefie regulacji $M_m = 0{,}65\ M_N$

Analiza tych przebiegów wykazuje prawidłowe działanie układu, który automatycznie zależnie od wartości obciążenia wprowadza dodatkowy sygnał zadający prędkości obrotowej. Ograniczenie prądowe było stałe i wynosiło 2 I_N co w rzeczywistym układzie ze względu na komutację w silniku (przy osłabionym strumieniu wzbudzenia) może być niemożliwe.

Wartość ustalona prądu dla dowolnego obciążenia z przedziału 0,5 $M_N \div$ 1 M_N przewyższa prąd znamionowy co jest spowodowane linearyzacją charakterystyki $n_d = f(I_{ust})$ (rys. 3). Maksymalna odchyłka wynosi ok. 25% i występuje przy momencie obciążenia $M_m = 0,75\ M_N$. W rzeczywistym układzie ze względu na utrzymanie stałej mocy w drugiej strefie regulacji koniecznym jest wprowadzenie dokładnej charakterystyki elementu zadającego prędkość obrotową w drugiej strefie.

W zarejestrowanych przebiegach można zauważyć skokowe zmiany prądu przy przechodzeniu do drugiej strefy regulacji, tzn. przy skokowym zadaniu sygnału n_d na regulator prędkości obrotowej RN. W układzie rzeczywistym sygnał dodatkowy powinien być wprowadzony na element formujący, co zapewni nieprzekroczenie dopuszczalnej wartości pochodnej prądu dI/dt.

Dokładność liczenia maszyny analogowej była bardzo wysoka - szacunkowo można podać, że błędy dowolnych przebiegów czasowych były mniejsze od 1% w całym zakresie zmienności, mimo stosunkowo znacznej liczby elementów nieliniowych w układzie obliczeniowym. Oznacza to, że rozbieżność przebiegów obliczonych i otrzymanych w układzie rzeczywistym wynikałaby prawie wyłącznie z przyjętych uproszczeń.

5. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań można przedstawić następujące wnioski:

1. Pomimo złożonego charakteru układu regulacji i występujących licznych nieliniowości odpowiedni dobór nastaw regulatorów zapewnia pożądane przebiegi czasowe w obu strefach regulacji. Przebiegi te charakteryzują się pomijalnym przeregulowaniem, krótkimi czasami regulacji i bardzo małymi błędami ustalonymi.

2. Wyniki obliczeń wykazują, że optymalne nastawy regulatorów w układzie mogą znacznie odbiegać od teoretycznie optymalnych ustalonych dla obiektów liniowych.

Zmiana w szerokich granicach nastaw regulatorów ma bardzo mały wpływ na czasy regulacji, które głównie zależą od wartości przyjętych ograniczeń.

3. W celu zapewnienia prawidłowej pracy układu regulacja siły elektromotorycznej musi być astatyczna.

4. Element formujący powinien zapewnić takie nachylenie sygnału zadającego, aby nie przekroczyć dopuszczalnych wartości pochodnej prądu dI/dt.

5. Przy pracy w drugiej strefie regulacji ograniczenie prądu twornika winno się zmieniać w sposób ciągły w funkcji strumienia wzbudzenia silnika.

6. Aby zapewnić stabilizację mocy w drugiej strefie regulacji na poziomie znamionowym należy dokładnie uzależnić wartość dodatkowego sygnału zadanego prędkości obrotowej n_d od wielkości obciążenia.

7. Zastosowanie maszyny analogowej do analizy dynamiki układów napędowych o znacznej złożoności jest bardzo celowe i charakteryzuje się prostotą i dużą dokładnością. Błędy obliczeń wynikają w głównej mierze z przyjętych założeń upraszczających.

LITERATURA

[1] Mantorski Z., Nowak R., Olszewski Z.: Automatyczny tyrystorowy układ o regulacji dwustrefowej - Zeszyty Naukowe Pol. Śl. ELEKTRYKA z. 46 1975.

[2] Nejmark W.E., Pistrak M.: Sinties bystrodiejstwuszczich sistiem uprawlienija wentilnym elektropriwodom - Elektriczestwo Nr 4 1967.

[3] Lebiediew E.D., Nejmark R.W.E., Pistrak M., Sleżanowskij O.W.: Uprawlenije wentilnymi elektropriwodami postojannogo toka - Energija Moskwa 1970.

[4] Palusiński O. i inni: Maszyna analogowa MA 48, Gliwice 1972.

Przyjęto do druku w maju 1974 r.

ДИНАМИКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТИРИСТОРНОЙ СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА, РАБОТАЮЩЕЙ В ДВУХ ЗОНАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье представлена аналоговая модель и результаты исследований автоматического регулирования системы управления скорости вращения двигателя постоянного тока, работающего в двух зонах регулирования. Приведены осциллограммы изменяющихся величин в определенных режимах работы системы и ряд выводов, касающихся оптимизации динамики системы.

DYNAMIC PROCESSES IN THE AUTOMATIC THYRISTOR DC DRIVE SYSTEM WITH TWO-ZONE ROTATIONAL SPEED CONTROL

S u m m a r y

The analogue model and the results of examinations on an analog computer of the automatic control system model of the d.-c. motor rotational speed operating in two zones of control are presented in this paper. The transients of the controlled variables in some operation cases of the drive system and the basic conclusions concerned with its optimization are given.