

JANUSZ DZIULAK

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i EnergoelektronikiZASILANIE SILNIKA BOCZNIKOWEGO PRĄDU STAŁEGO
PRZECIWRÓWNOLEGŁYM UKŁADEM 2 TYRYSTORÓW
STEROWANYCH NIESYMETRYCZNIE

Streszczenie. Artykuł zawiera krótką analizę teoretyczną przeciwrównoległego układu 2 tyrystorów sterowanych niesymetrycznie i nieliniowo, zasilającego silnik bocznikowy prądu stałego.

Omówiono korzyści płynące ze sterowania nieliniowego, statykę i dynamikę układu napędowego i podano jego charakterystyki.

1. Wstęp

Tyrystorowy napęd prądu stałego w zakresie małych mocy bardzo często używany jest w napędach nadążnych (serwonapędach), układach sterowania programowego oraz w obrabiarkach kopiujących.

Napędy takie posiadają szereg specyficznych własności uwarunkowanych samymi tyrystorami jak i układami sterowania bramkowego.

Ze względu na to, że tyrystorowe przemienniki prądu stałego najczęściej wykonuje się z niewielką ilością diod sterowanych, silnik w takich układach pracuje głównie w warunkach impulsowych prądów przerywanych.

2. Przeciwrównoległy układ 2 tyrystorów

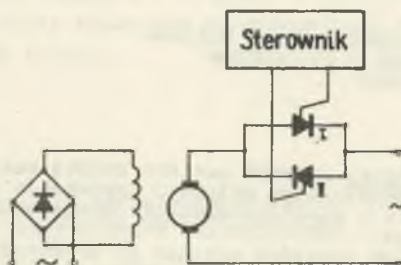
Wszystkie znane obecnie tyrystorowe napędy nawrotne prądu stałego, charakteryzują się tym, że zmiana kierunku wirowania silnika odbywa się przy pomocy:

- a) rewersji prądu w obwodzie wzbudzenia (układy stycznikowe, bądź bezstykowe)
- b) rewersji prądu w obwodzie twornika maszyny (także układy stycznikowe lub bezstykowe).

Rewersja w obwodzie wzbudzenia, ze względu na dużą stałą czasową uzwojenia wzbudzenia, nie pozwala na uzyskanie krótkich czasów nawrotów i dla

tego tam, gdzie wymagany jest bardzo szybki układ nawrotny rewersja powinna być uzyskiwana przez zmianę składowej stałej napięcia podawanego na twornik silnika.

Powyższe postulaty spełnia układ, w którym twornik silnika zasilany jest bezpośrednio z sieci prądu przemiennego poprzez 2 prostowniki połączone w układzie odwrotnie równoległym i sterowanym niesymetrycznie, przy stałym wzbudzeniu od trzeciego prostownika. Schemat połączeń pokazany jest na rysunku 1.



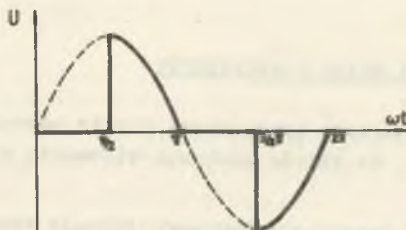
Rys. 1

W takim układzie można wyróżnić zasadniczo 3 stany pracy silnika:

1^o - prędkość obrotowa silnika jest równa zero:

Kąty opóźnienia zapłonu liczone są od ohwili przejścia przez zero odpowiedniej połówki krzywej napięcia zasilającego, tzn. tej części napięcia sinusoidalnego, podczas której anoda tyrystora otrzymuje napięcie dodatnie względem katody.

W przypadku, gdy prędkość obrotowa silnika wynosi zero, kąty opóźnienia zapłonu obu tyrystorów są jednakowe i wynoszą 90°. Wtedy silnik zasilany jest napięciem, którego przebieg pokazano na rysunku 2.



Rys. 2

Przy takimysterowaniu tyrystorów wartość średnia napięcia za okres jest równa zero i silnik pomimo przepływającego prądu dzięki bezwładności mechanicznej wirnika ma prędkość obrotową równą zero. Stan taki podobny jest do stanu zwarcia silnika.

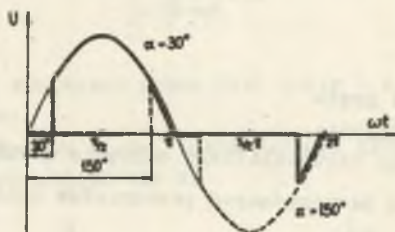
2° - prędkość obrotowa silnika jest różna od zera

Przy takim założeniu kąty opóźnienia zapłonu obu tyrystorów I i II są różne i zmieniają się wg zależności:

α dla tyrystora I

$180^{\circ} - \alpha$ dla tyrystora II.

Jeżeli dla przykładu przyjmiemy, że np. $\alpha = 30^{\circ}$, wtedy przebieg napięcia na obciążeniu będzie wyglądał jak na rysunku 3.



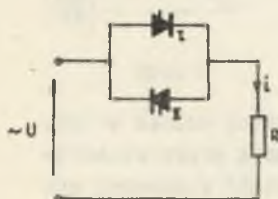
Rys. 3

Przy takimysterowaniu wartość średnia napięcia za okres jest różna od zera i wtedy silnik wiruje z ustaloną prędkością obrotową np. w prawo. Analogicznie, gdy $\alpha = 150^{\circ}$ moduł prędkości obrotowej silnika jest taki sam, ale silnik wiruje w stronę przeciwną, tj. w lewo.

Widać, że poprzez zmianę kąta opóźnienia zapłonu - wartość średnia (składowa stała) napięcia zmienia się w sposób ciągły od ujemnej poprzez zero do dodatniej, umożliwiając ciągłą regulację prędkości obrotowej w obu kierunkach.

3. Podstawy teoretyczne sterowania niesymetrycznego układu 2 tyrystorów połączonych przeciwnolegle

Dla uproszczenia analizy przyjmijmy, że obwód obciążenia zawiera tylko rezystancję R i wygląda jak na rysunku 4.



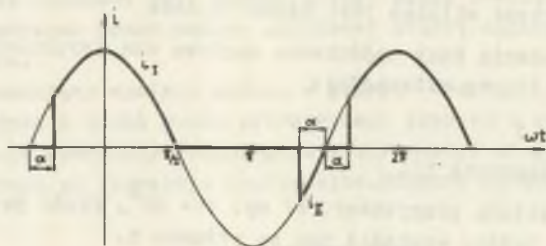
Rys. 4

Nie bierzmy też pod uwagę spadku napięcia na tyrystorach, który jest pomijalnie mały.

Wygodnie będzie dla dalszej analizy stanów ustalonych przesunąć oś rzędnych o kąt $\frac{\pi}{2}$ do przodu, co obrazuje rysunek 5.

Przy takim zapisie chwilowa wartość prądu płynącego przez obciążenie R wyniesie:

$$i = \frac{\sqrt{2} U \cos \omega t}{R},$$



Rys. 5

gdzie

i - wartość chwilowa prądu

R - rezystancja obciążenia

U - wartość skuteczna sinusoidalnego napięcia zasilającego.

Wzór ten obowiązuje dla następujących przedziałów kątowych przewodzenia prądu.

$$-\frac{\pi}{2} + \alpha < \omega t < \frac{1}{2}\pi$$

oraz

$$\frac{3}{2}\pi + \alpha' < \omega t < \frac{5}{2}\pi,$$

gdzie $\alpha' = \pi - \alpha$.

α i α' są kątami opóźnienia zapłonu odpowiednich tyrystorów I i II.

Wartość skuteczna prądu I wynosi:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_I + i_{II})^2 dt}$$

we wzorze tym i_I , i_{II} oznaczają wartości chwilowe prądów tyrystorów I i II

T - okres zmienności funkcji

Rozwijając dalej - otrzymamy:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{II}^2 dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_{II}^2 dt} = \frac{\sqrt{2}U}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_{-\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{\pi}{2}} \cos \omega t d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3}{2}\pi} \cos \omega t d(\omega t) \right]} =$$

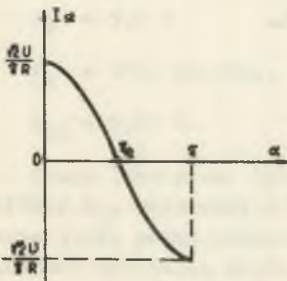
$$= \frac{\sqrt{2}U}{2R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\left(\omega t + \frac{1}{2} \sin 2\omega t \right) \Big|_{-\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{\pi}{2}} + \left(\omega t + \frac{1}{2} \sin 2\omega t \right) \Big|_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3}{2}\pi} \right]} = \frac{\sqrt{2}U}{2R}$$

Widać, że wartość skuteczna prądu jest stała i nie zależy od kąta wystęrowania tyrystorów.

Obliczmy teraz składową stałą, czyli wartość średnią całokresową prądu I_{st} płynącego przez obciążenie R.

$$I_{st} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_{-\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sqrt{2} U \cos \omega t}{R} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3}{2}\pi} \frac{\sqrt{2} U \cos \omega t}{R} d(\omega t) \right] =$$

$$= \frac{\sqrt{2} U}{R 2\pi} \left[\sin \omega t \Big|_{-\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{\pi}{2}} + \sin \omega t \Big|_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3}{2}\pi} \right] = \frac{\sqrt{2} U}{R} \cos \alpha$$



Rys. 6

Wynika stąd bardzo prosty algorytm sterowania według funkcji cosinus: Rysunek 6 przedstawia zmianę składowej stałej prądu (lub napięcia) w funkcji kąta opóźnienia zapłonu (przy $R = \text{const}$). Analizując powyższy rysunek należy jednak pamiętać, że α jest kątem opóźnienia zapłonu tylko dla tyrystora I, natomiast tyrystor II ma kąt opóźnienia zapłonu $\alpha = 180^\circ - \alpha$. Oba kąty zapłonu tyrystorów liczone są od chwili przejścia odpowiedniej połowki napięcia zasilającego przez zero.

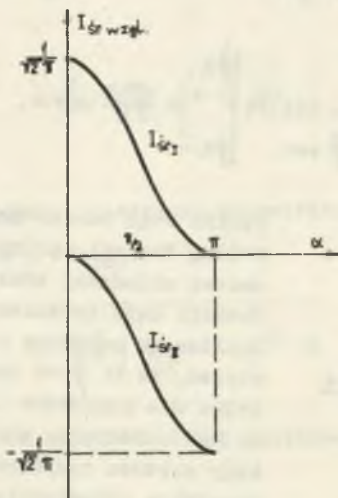
Prąd średni I_{gr} przepływający przez I tyrystor w czasie całego okresu napięcia zasilającego obliczymy z relacji na składową stałą prądu obciążenia - biorąc tylko odpowiedni człon wyrażenia dla jednego z tyrystorów.

Rozwijając te wyrażenia otrzymamy:

$$I_{srI} = \frac{\sqrt{2} U}{R^2 \pi} \int_{-\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{\pi}{2}} \cos \omega t \, d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U}{R^2 \pi} \left[1 - \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos \alpha - \right. \\ \left. - \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) \sin \alpha \right] = \frac{U}{\sqrt{2} \pi R} [\cos \alpha + 1].$$

Analogicznie dla drugiego tyrystora przy niezmienionej nastawie kąta opóźnienia zapłonu otrzymamy:

$$I_{srII} = \frac{\sqrt{2} U}{R^2 \pi} \int_{\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{3}{2}\pi} \cos \omega t \, d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U}{R^2 \pi} \int_{\frac{3}{2}\pi - \alpha}^{\frac{3}{2}\pi} \cos \omega t \, d(\omega t) = \\ = \frac{\sqrt{2} U}{R^2 \pi} \left[-1 - \sin \frac{3}{2}\pi \cos \alpha + \cos \frac{3}{2}\pi \sin \alpha \right] = \frac{U}{\sqrt{2} \pi R} [\cos \alpha - 1].$$

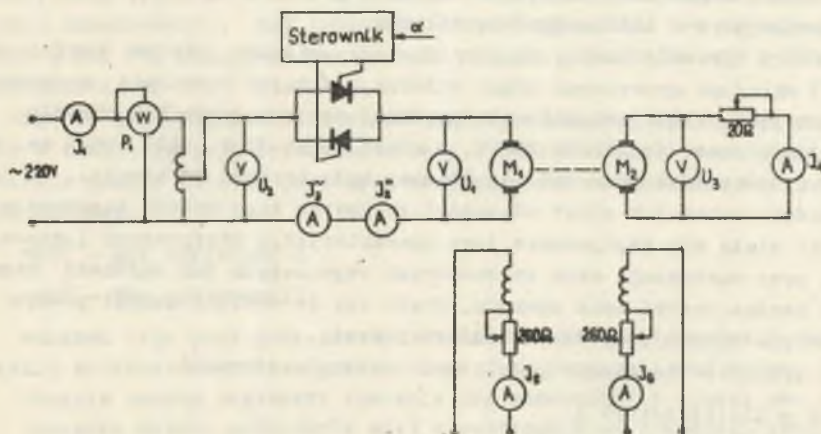


Rys. 7

Rysując wykres prądów I_{sr} w skali względnej otrzymamy przebieg podany na rysunku 7.

4. Układ napędowy

Celem sprawdzenia powyższego układu został wykonany sterownik tyrystorowy zapewniający sterowanie niesymetryczne. Badania zostały przeprowadzone w następującym układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 8.



Rys. 8

W układzie tym badanym silnikiem (M_1) był booznikowy silnik prądu stałego o następujących danych znamionowych:

$$P_N = 0,7 \text{ kW},$$

$$U_N = 110 \text{ V},$$

$$J_N = 9,6 \text{ A}$$

$$n_N = 1500 \text{ obr/min},$$

$$I_{wN} = 0,67 \text{ A}.$$

Drugi identyczny silnik (M_2) stanowi hamulec elektryczny, obciążający silnik M_1 , połączony z nim na wspólnym wale. Amperomierz J_2 mierzy składową stałą prądu płynącego przez silnik, natomiast amperomierz J_3 mierzy wartość skuteczną prądu.

Ze względów termicznych (straty w silniku) napięcie wtórne autotransformatora U_2 zostało ograniczone do wartości 85 V.

Sterownik tyrystorowy wyposażony jest w skalę wycochowaną w stopniach kąta opóźnienia zapłonu jednego z tyrystorów, tak więc położeniu $\alpha = 0^\circ$ odpowiada maksymalna prędkość obrotowa silnika w jednym kierunku, kąt $\alpha = 90^\circ$ odpowiada postojowi silnika, a dla $\alpha = 180^\circ$ silnik wiruje z maksymalną prędkością w kierunku przeciwnym.

Wzbudzenie silnika M_1 w trakcie prób utrzymywane było na poziomie znamionowym. W trakcie prób okazało się, że ze względu na pracę z prądami przerywanymi indukcyjność istniejąca w obwodzie obciążenia zmniejsza teoretyczny zakres regulacji $\alpha = 0^\circ \div 180^\circ$ do przedziału: $\phi \div (180^\circ - \phi)$, gdzie ϕ jest kątem fazowym obciążenia.

Przy nastawach regulatora α poza granicami tego zakresu układ napędowy stawał się niestabilny, co wiązało się z wymianą energii między obwodem zasilającym a indukcyjnością silnika.

Pomiary wykazały także, że przy postoju silnika płynie bardzo duża ($\sim 9A$) składowa przemienna prądu silnika, powodując nadmierne nagrzewanie się uzwojeń. Silnik osiągał małą prędkość obrotową - do 400 obr/min, pobierając z sieci moc około 300 W, z czego tylko 30 W było mocą na wale silnika, natomiast pozostała część mocy była tracona na ciepło.

Oczywiście wobec tak złych własności ruchowych tego układu napędowego konieczne stało się polepszenie jego charakterystyk statycznych i dynamicznych, przy zachowaniu cech podstawowych tego napędu jak szybkość regulacji i bardzo krótki czas nawrotu. Stało się to możliwe dzięki pewnym modyfikacjom wprowadzonym do układu sterowania.

O ile przedtem sterowanie przebiegało według zależności:

α - dla tyrystora I

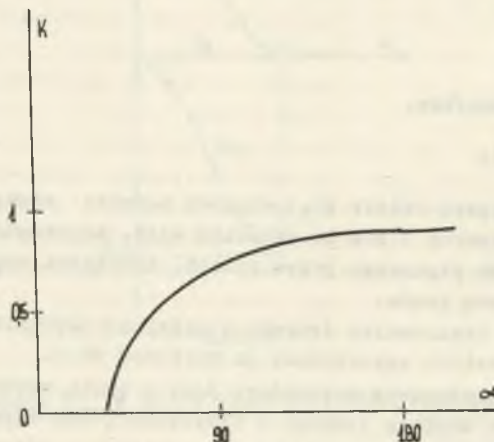
$180 - \alpha$ dla tyrystora II,

to obecnie po wprowadzeniu sterowania algorytmem nieliniowym kąty opóźnienia zapłonu dla poszczególnych tyrystorów zmieniają się następująco:

α - dla tyrystora I

$180^\circ - k\alpha$ - dla tyrystora II.

Przebieg zmian nieliniowego współczynnika k pokazano na rysunku 9.



Rys. 9

Jak widać, przy niesymetrycznym nieliniowym sterowaniu wraz ze wzrostem wartości bezwzględnej prędkości obrotowej silnika zmniejsza się bardzo istotnie udział momentu hamującego pochodzącego od części napięcia zasilającego skierowanej przeciwnie do tej części napięcia, od której pochodzi główny moment napędowy silnika.

Maksymalna prędkość obrotowa silnika wzrosła do 1500 obr/min (tj. do prędkości znamionowej), moc pobierana z sieci pozostała bez większych zmian ($150 \div 300$ W), natomiast moc na wale silnika wzrosła do $100 \div 200$ W (poprzednio do 30 W).

Oprócz tego celem zmniejszenia prądu przemiennego płynącego przez silnik w czasie postoju przesunięto kąty opóźnienia zapłonu obu tyrystorów i obecnie postój silnika jest przy następujących wartościach kąta opóźnienia zapłonu:

100° - dla tyrystora I

100° - dla tyrystora II.

Wskutek tego prąd przy postoju zmalał do wartości 6A, a skala kąta opóźnienia zapłonu α stała się nieliniowa i zagęszczona przy końcu.

Obecnie zakres regulacji znacznie się rozszerzył i wynosi $\alpha = 0^\circ - 180^\circ$.

Dynamika układu polepszyła się: w zależności od prędkości ustalonej po nawrocie, czas nawrotu wynosi $0,5 \div 0,8$ sekundy a układ jest stabilny w całym nie zawężonym zakresie regulacji.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wykreślono najbardziej interesujące charakterystyki.

Ponieważ moment obrotowy silnika M_1 pochodzi tylko od składowej stałej prądu, charakterystyki mechaniczne wykreślono w następującym układzie współrzędnych: $n = f(J_2^-)$. Parametrami stałymi podczas tych pomiarów były następujące wielkości: $U_2 = 85$ V, $J_5 = 0,67$ A; kąt opóźnienia zapłonu występuje jako parametr rodziny charakterystyk.

Ze względu na stałe wzbudzenie silnika M_1 przebieg charakterystyk obciążenia $n = f(M_{0bo})$ będzie identyczny.

Charakterystyki mechaniczne ze względu na to, że jest to układ nawrotny zdejmowano parami, tj. dla odpowiadających sobie w obydwu kierunkach prędkości obrotowych silnika wartości kąta α .

Charakterystyki te są pokazane na rysunku 10. Dla kąta $\alpha = 95^\circ$ prędkość obrotowa silnika wynosiła zero ($J_2^- = 0$), natomiast przez silnik płynęła składowa przemienna prądu wynosząca $J_3^- = 5,8$ A.

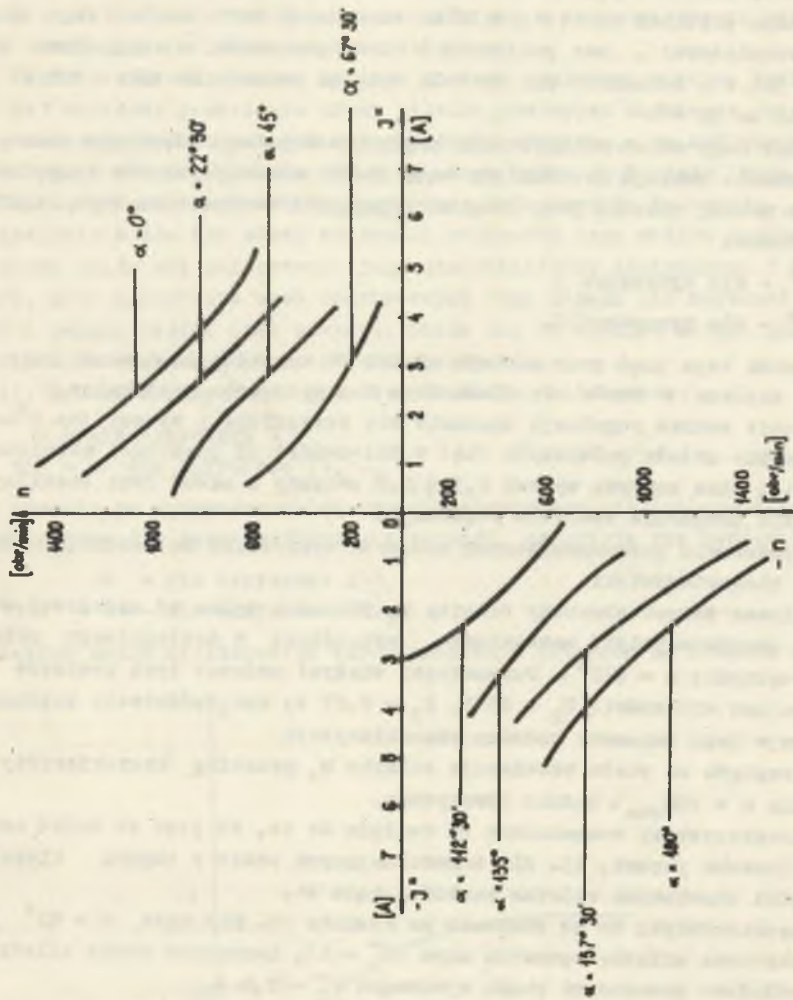
Na rysunku tym daje się zauważyć, że następujące pary charakterystyk dla α :

0° i 180°

$22^\circ 30'$ i $157^\circ 30'$

45° i 135°

$67^\circ 30'$ i $112^\circ 30'$



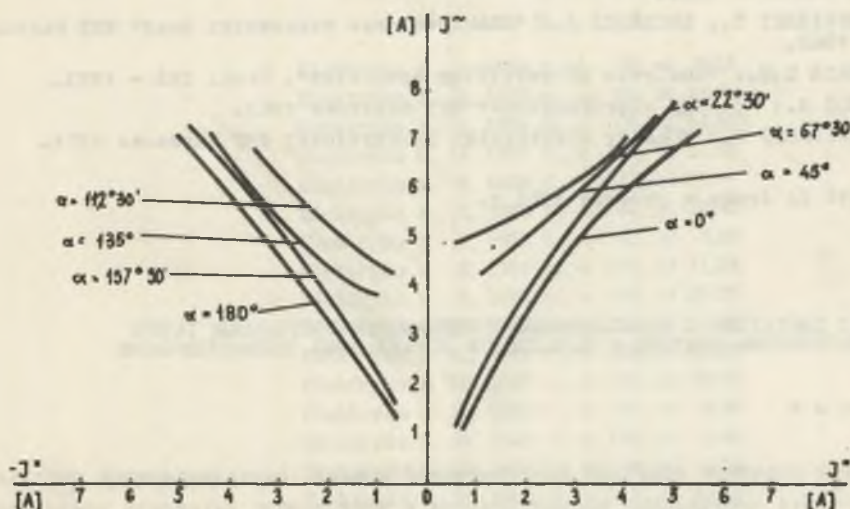
RYS. 10

- nie są zupełnie symetryczne, co wynika z nieliniowego sterowania opisanego wcześniej. Odchylenia te nie są duże i nie wywierają istotnego wpływu na pracę układu.

Sztwywność charakterystyk mechanicznych jest dla różnych kątów opóźnienia zapłonu α w przybliżeniu stała i waha się w zakresie od 22% do 30%.

Oczywiście zastosowanie w tym układzie najbardziej odpowiedniego -prędkościowego sprzężenia zwrotnego usztywniłoby charakterystykę mechaniczną do kilku procent, ale wobec wymaganej prostoty układu nie wydaje się to celowe.

Dla określenia strat i maksymalnego zakresu obciążenia silnika na podstawie wyników pomiarowych wykreślono wykresy zależności $J_3^{\sim} = f(J_2^{\sim})$ dla kolejnych stałych wartości dla rodziny kątów α .



Rys. 11

Charakterystyki prądowe przedstawione są na rysunku 11. Ponieważ uzwojenia silnika są nagrzewane zarówno składową stałą jak i zmienną prądu, dlatego też o stratach decyduje prąd skuteczny J_3^{\sim} , natomiast moment obrotowy pochodzi tylko od składowej J_2^{\sim} .

Mając charakterystyki $n = f(J_2^{\sim})$ i $J_3^{\sim} = f(J_2^{\sim})$ dla tego samego kąta można określić dopuszczalne obciążenie silnika przy różnych prędkościach obrotowych.

W oparciu o pomiary wykonane w układzie modelowym obliczono sprawność i współczynnik mocy $\cos \phi$ całego układu.

W całym przedziale mierzonych wielkości parametry te przybierały następujące wartości:

$$\eta = 0,25 \div 0,62$$

$$\cos \phi = 0,23 \div 0,43.$$

5. Wnioski

Opisany układ napędowy wykazuje szereg specyficznych własności decydujących o jego zastosowaniu. Ze względu na dużą szybkość regulacji, brak strefy nieozułości, szybki nawrót i płynną regulację prędkości obrotowej w obu kierunkach układ ten powinien być stosowany w układach automatycznej regulacji obrabiarek automatycznych i w napędach serwo mechanizmów. Stosunkowo niskie wartości sprawności i współczynnika mocy nie są zbyt istotne w podanych wyżej zastosowaniach.

LITERATURA

1. GENTRY F.E., GUTZWILLER F.W., MOLONYAK N., ZASTROW E.E.: "Tyrystory" WNT Warszawa 1969.
2. KONOPIŃSKI T., LUCIŃSKI J.: "Elektroniczne sterowniki mocy" WNT Warszawa 1962.
3. SCHADE O.H.: "Analysis of rectifier operation". Proc. IRE - 1953.
4. SEELY S.: "Układy elektroniczne" WNT Warszawa 1963.
5. ZAGAJEWSKI T.: "Układy elektroniki przemysłowej" WNT Warszawa 1971.

Przyjęto do druku w grudniu 1971 r.

ПИТАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ПРОТИВОПОЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ 2 ТИРИСТОРОВ УПРАВЛЯЕМЫХ НЕСИММЕТРИЧЕСКИ

Резюме

Статья содержит короткий теоретический анализ противоположной системы 2 тиристорov управляемых несимметрически и нелинейного питающего двигателя с параллельным возбуждением постоянным током.

В статье обсуждены преимущества какие даёт нелинейное управление, статику система привода, как и приведено его характеристику.

NON-LINEAR FEEDING OF A DC SHUNT MOTOR BY MEANS OF A COUNTERPARALLEL SYSTEM OF TWO UNSYMMETRICALLY CONTROLLED THYRISTORS

Summary

The article gives a short theoretical analysis of a counterparallel system of two symmetrically controlled thyristors intended for non-linear feeding DC shunt motor. Advantages from the non-linear control, statics and dynamics of the drive unit and the presented characteristics of the system, are discussed.