ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1972

Seria: ELEKTRYKA z. 36 Nr kol. 343

ZBIGNIEW MANTORSKI

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki

PRACA 3-FAZOWEGO NIESYMETRYCZNEGO MOSTKA TYRYSTOROWEGO PRZY PRZEWODZENIU PRZERYWANYM

Streszczenie. W artykule podano zależności opisujące pracę 3-fazowego niesymetrycznego mostka tyrystorowego. Dla różnych parametrów obwodu obciążenia i różnych kątów opóźnienia włączenia rozwiązano te zależności na maszynie cyfrowej i w wyniku tych obliczeń określono kąt wyłączenia prądu wyprostowanego oraz charakterystyki graniczne pomiędzy zakresem prądów ciągłych i przerywanych.

1. Wstęp

W celu określenia punktu pracy układu przy przewodzeniu przerywanym konieczna jest znajomość kąta wyłączenia prądu wyprostowanego. O ile dla przekształtnika w układzie 3-fazowego mostka symetrycznego obliczenie potrzebnych wielkości, ze względu na obszerną literaturę, nie nastręcza większych trudności, o tyle przy określaniu tych parametrów dla przekształtnika w układzie 3-fazowego mostka niesymetrycznego obliczenie może być kłopotliwe. W związku z tym w opracowaniu przeprowadzono krótką analizę pracy układu przy przewodzeniu przerywanym i na jej podstawie określono przybiegi kąta wyłączenia prądu wyprostowanego w funkcji kąta opóźnienia włączania oraz charakterystyki graniczne pomiędzy zakresem prądów ciągłych i przerywanych.

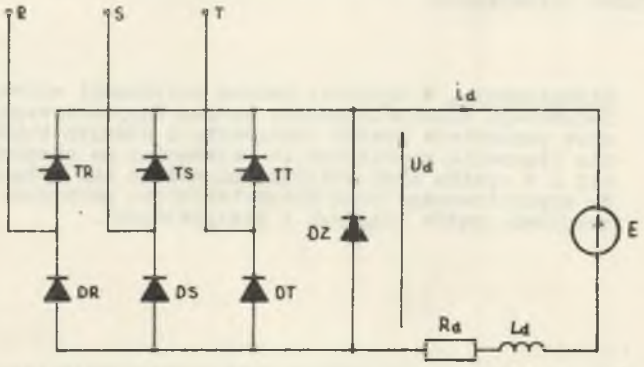
2. Przebiegi ustalone prądu i napięcia wyprostowanego przy przewodzeniu przerywanym

Do rozważań przyjęto otwarty układ sterowania prędkości obrotowej silnika prądu stałego przedstawiony na rys. 1. W układzie tym wirnik silnika obcowzbudnego jest zasilany ze źródła prądu przemiennego poprzez przekształtnik tyrystorowy złożony z trzech diod (ze wspólną anodą) i z trzech tyrystorów (ze wspólną katodą).

Dioda zerowa DZ połączona równolegle z wirnikiem silnika umożliwia rozładowanie energii elektromagnetycznej obwodu wirnika wtedy, gdy sem silnika jest większa niż chwilowa wartość napięcia przemiennego, względnie

gdy przy sem silnika równej zero chwilowa wartość napięcia przemiennego jest ujemna oraz ułatwia wyłączenie układu.

Analizę przeprowadzono przy założeniu, że w całym zakresie obciążeń, przy których pracuje silnik, jego sem jest wielkością stałą oraz, że zachodzi liniowa zależność pomiędzy prądem wirnika a momentem. Poza tym założono, że tyrystory i diody są zaworami idealnymi, to znaczy, że można pominąć występujące na nich spadki napięć (rezystancja dla kierunku przewodzenia równa zero) oraz że ich rezystancja dla stanu zaworowego względnie blokowania wynosi nieskończoność.



Rys. 1. Układ sterowania

Po uwzględnieniu powyższych założeń równanie dla obwodu wirnika silnika przyjmie postać:

$$L_d \frac{di_d}{dt} + R_d i_d + E = u_d, \tag{1}$$

gdzie

L_d, R_d – całkowita indukcyjność i całkowita rezystancja układu sprowadzona na stronę prądu wyprostowanego

i_d, u_d – chwilowa wartość prądu i napięcia wyprostowanego

E – sem silnika.

Oznaczając przez

$\vartheta = \omega t$ – kąt fazowy

$\varphi = \operatorname{arc\,tg} \frac{\omega L_d}{R_d}$ – kąt fazowy obwodu obciążenia

oraz wprowadzając jednostki względne:

$i = \frac{i_d R_d}{U_m}$ – względna, chwilowa wartość prądu wyprostowanego

$\varepsilon = \frac{E}{U_m}$ – względna wartość sem silnika

$v = \frac{u_d}{U_m}$ – względna, chwilowa wartość napięcia wyprostowanego,

gdzie

U_m – maksymalna wartość międzyprzewodowego napięcia zasilającego przekształtnik

równanie (1) przyjmie postać:

$$\frac{di}{d\vartheta} + i\,\mathrm{ctg}\,\varphi = (v-\varepsilon)\mathrm{ctg}\,\varphi. \qquad (2)$$

Rozwiązaniem tego równania jest całka ogólna:

$$= C\exp(-\vartheta\,\mathrm{ctg}\,\varphi) - \varepsilon + \mathrm{ctg}\,\varphi\exp(-\vartheta\,\mathrm{ctg}\,\varphi)\int v\exp(\vartheta\,\mathrm{ctg}\,\varphi)d\vartheta \qquad (3)$$

Ze względu na to, że poszczególne przebiegi w zależności od parametrów obwodu obciążenia i od stopnia wysterowania przekształtnika są opisywane różnymi równaniami (różne granice całkowania w równaniu 3), dalszą analizę pracy układu należy przeprowadzić dla różnych przypadków.

Są to przy przewodzeniu ciągłym (rys. 2):

przypadek I dla $0 \leqslant \alpha \leqslant \frac{\pi}{3}$ (α – kąt opóźnienia włączenia)

przypadek II dla $\frac{\pi}{3} \leqslant \alpha \leqslant \pi$

i przy przewodzeniu przerywanym (rys. 3):

przypadek III dla $0 \leqslant \alpha \leqslant \frac{\pi}{3}$; $\frac{\pi}{3} \leqslant \alpha_g \leqslant \frac{2\pi}{3} + \alpha$

(α_g – kąt wyłączenia prądu wyprostowanego)

przypadek IV dla $0 \leqslant \alpha \leqslant \frac{\pi}{3}$; $\alpha \leqslant \alpha_g \leqslant \frac{\pi}{3}$

przypadek V dla $\frac{\pi}{3} \leqslant \alpha \leqslant \pi$; $\pi \leqslant \alpha_g \leqslant \frac{2\pi}{3} + \alpha$

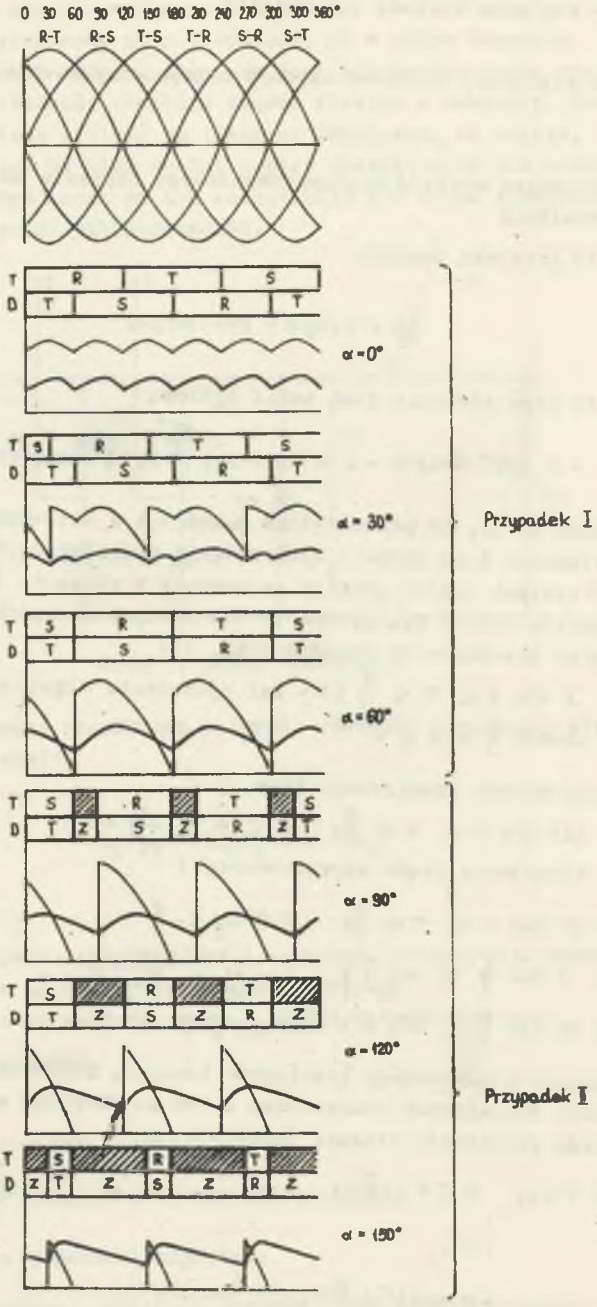
przypadek VI dla $\frac{\pi}{3} \leqslant \alpha \leqslant \pi$; $\alpha \leqslant \alpha_g \leqslant \pi$

Dla każdego z powyższych przypadków istnieją różne przedziały czasowe, które należy rozpatrywać oddzielnie. I tak na przykład w przypadku III występują trzy przedziały czasowe (rys. 3):

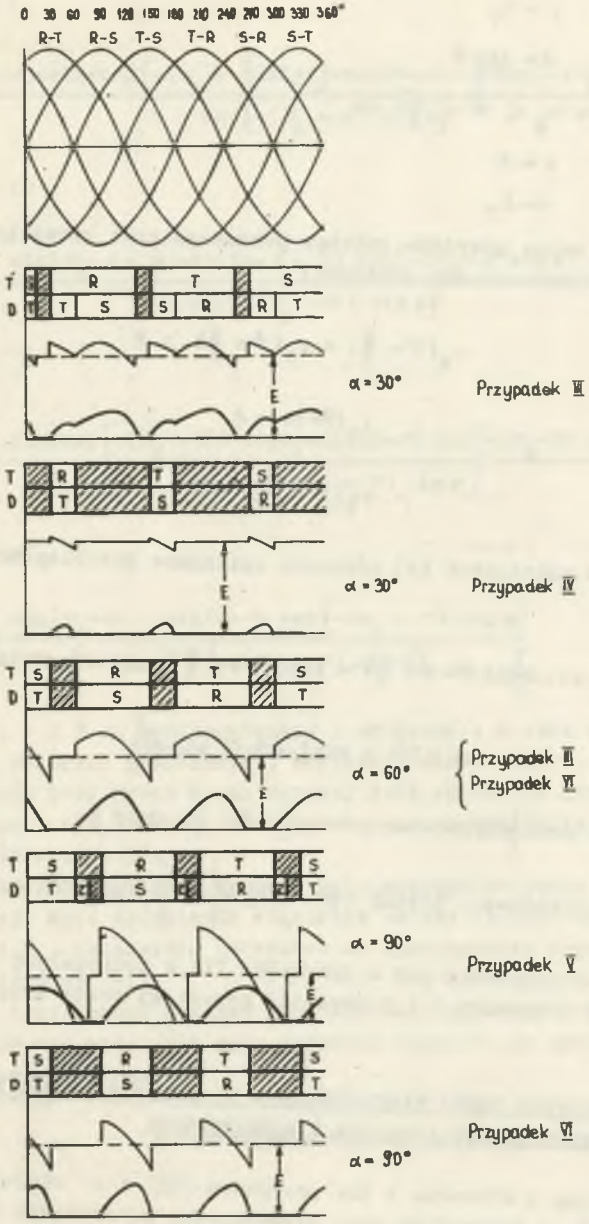
przedział IIIa: $\alpha \leqslant \vartheta \leqslant \frac{\pi}{3}$

$$i = i_a$$

$$v = \sin(\vartheta + \frac{\pi}{3})$$



Rys. 2. Przebiegi prądu i napięcia wyprostowanego przy przewodzeniu ciągłym; ——— napięcie, ——— prąd



Rys. 3. Przebiegi prądu i napięcia wyprostowanego przy przewodzeniu przerywanym; ——— napięcie, ——— prąd

przedział IIIb: $\frac{\pi}{3} \leqslant \vartheta \leqslant \alpha_g$

$$i = i_b$$

$$v = \sin\vartheta$$

przedział IIIc: $\alpha_g \leqslant \vartheta \leqslant \frac{2\pi}{3} + \alpha$

$$i = 0$$

$$v = \varepsilon .$$

Biorąc pod uwagę powyższe granice poszczególnych przedziałów i uwzględniając następujące warunki brzegowe:

$$i_a(\vartheta = \tfrac{\pi}{3}) = i_b(\vartheta = \tfrac{\pi}{3}) \geqslant 0$$

$$i_a(\vartheta = \alpha) = 0$$

$$i_b(\vartheta = \alpha_g) = 0$$

otrzyma się z zależności (3) równania opisujące przebieg prądu wyprostowanego:

$$i_a = \cos\varphi\left\{\sin(\vartheta - \varphi + \tfrac{\pi}{3}) - \sin(\alpha - \varphi + \tfrac{\pi}{3})\left[\exp -(\vartheta - \alpha)\operatorname{tg}\varphi\right]\right\} - \varepsilon\left\{1 - \exp\left[-(\vartheta - \alpha)\operatorname{tg}\varphi\right]\right\} \tag{4}$$

$$i_b = \cos\varphi\left\{\sin(\vartheta - \varphi) + \sin\varphi\exp\left[-(\vartheta - \tfrac{\pi}{3})\operatorname{tg}\varphi\right] - \sin(\alpha - \varphi + \tfrac{\pi}{3})\left[\exp -(\vartheta - \alpha)\operatorname{tg}\varphi\right]\right\} - \varepsilon\left\{1 - \exp\left[-(\vartheta - \alpha)\operatorname{tg}\varphi\right]\right\} \tag{5}$$

Postępując analogicznie jak w przypadku III w pozostałych przypadkach, można w oparciu o rysunki 2 i 3 określić przebiegi prądu wyprostowanego.

3. Kąt wyłączenia prądu wyprostowanego i charakterystyki graniczne pomiędzy zakresem prądów ciągłych i przerywanych

Korzystając z równania 5 dla przypadku III i z analogicznych równań dla pozostałych przypadków przy przewodzeniu przerywanym można określić kąt wyłączenia prądu wyprostowanego α_g wstawiając: $\vartheta = \alpha_g$ dla $i = 0$. Otrzyma się wówczas następujące zależności:

dla przypadku III

$$\varepsilon = \cos\varphi\, X$$

$$X\ \frac{\sin(\alpha_g-\varphi)+\sin\varphi\exp\left[-(\alpha_g-\frac{\pi}{3})\operatorname{ctg}\varphi\right]-\sin(\alpha-\varphi+\frac{\pi}{3})\exp\left[-(\alpha_g-\alpha)\operatorname{ctg}\varphi\right]}{1-\exp\left[-(\alpha_g-\alpha)\operatorname{ctg}\varphi\right]} \tag{6}$$

dla przypadku IV

$$\varepsilon = \cos\varphi\,\frac{\sin(\alpha_g-\varphi+\frac{\pi}{3})-\sin(\alpha-\varphi+\frac{\pi}{3})\exp\left[-(\alpha_g-\alpha)\operatorname{ctg}\varphi\right]}{1-\exp\left[-(\alpha_g-\alpha)\operatorname{ctg}\varphi\right]} \tag{7}$$

dla przypadku V

$$\varepsilon = \cos\varphi\,\frac{\sin\varphi\exp\left[-(\alpha_g-\pi)\operatorname{ctg}\varphi\right]-\sin(\alpha-\varphi)\exp\left[-(\alpha_g-\alpha)\operatorname{ctg}\varphi\right]}{1-\exp\left[-(\alpha_g-\alpha)\operatorname{ctg}\varphi\right]} \tag{8}$$

dla przypadku VI

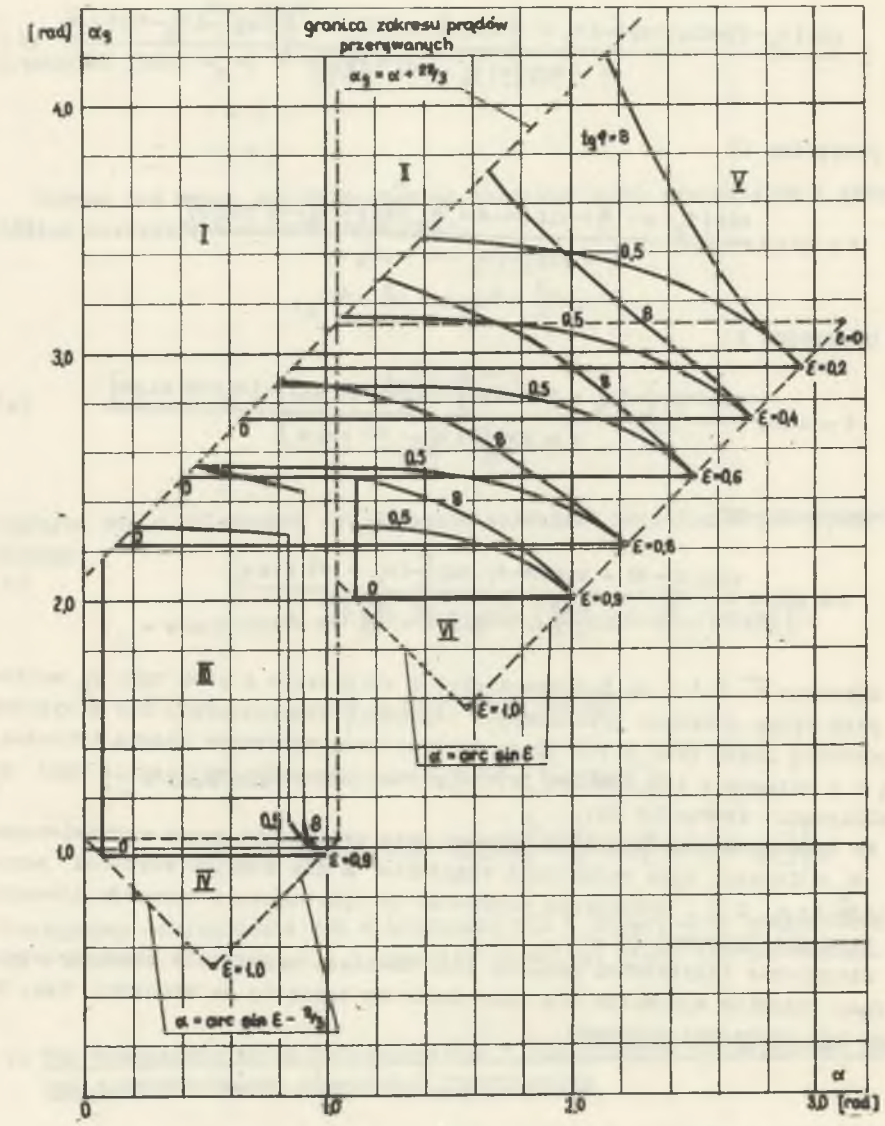
$$\varepsilon = \cos\varphi\,\frac{\sin(\alpha_g-\varphi)-\sin(\alpha-\varphi)\exp\left[-(\alpha_g-\alpha)\operatorname{ctg}\varphi\right]}{1-\exp\left[-(\alpha_g-\alpha)\operatorname{ctg}\varphi\right]} \tag{9}$$

Równania 6, 7 i 9 są transcendentne i obliczenie z nich kąta α_g możliwe jest tylko metodami graficznymi, względnie numerycznymi. Dla przypadku V przebieg prądu przy pracy diody zerowej jest opisywany krzywą wykładniczą i w związku z tym możliwe jest dla tego przypadku obliczenie kąta α_g analitycznie (równanie 8).

Na rysunku 4 przedstawiono wykresy kąta wyłączenia prądu wyprostowanego α_g w funkcji kąta opóźnienia włączenia α dla różnych wartości parametrów $\operatorname{tg}\varphi$ i ε. Obliczenia potrzebne do sporządzenia wykresów wykazano na maszynie cyfrowej [2].

Sterowanie tyrystorami możliwe jest wówczas, gdy impuls bramkowy otwierający tyrystor wprowadza się przy dodatnim napięciu na anodzie, tzn. że musi być spełniony warunek:

$$v - \varepsilon \geqslant 0,$$



Rys. 4. Wykres kąta wyłączenia α_g w funkcji kąta opóźnienia włączenia α (Mostek niesymetryczny)

czyli że muszą być spełnione nierówności:

$$\sin(\alpha + \tfrac{\pi}{3}) \geqslant \varepsilon \qquad \text{dla} \quad 0 \leqslant \alpha \leqslant \tfrac{\pi}{3} \tag{10}$$

$$\sin \alpha \geqslant \varepsilon \qquad \text{dla} \quad \tfrac{\pi}{3} \leqslant \alpha \leqslant \pi . \tag{11}$$

Warunek ten określa "zakres sterowności" układu.

Na rysunku 4 liniami przerywanymi zaznaczono granice "zakresu sterowności" oraz zakresy występowania poszczególnych przypadków, a cyframi rzymskimi oznaczono obszary ich występowania. Dla dużych wartości ε (na rys.4 dla $\varepsilon = 0,9$) może wystąpić skok wartości α_g.
W wypadku, gdy wartość kąta wyłączenia α_g przekroczy wartość $\vartheta = \arcsin \varepsilon$ (dla $\vartheta \leqslant \frac{\pi}{2}$), na tyrystor zostaje powtórnie przyłożone napięcie w kierunku przewodzenia i nie może on zostać wyłączony przy $\alpha_g < \frac{2\pi}{3}$.

Charakterystyki graniczne pomiędzy zakresem prądów ciągłych i przerywanych uzyskuje się wstawiając do równań (6) i (8) graniczną wartość kąta wyłączenia prądu wyprostowanego $\alpha_g = \alpha + \frac{2\pi}{3}$ i wtedy dla $\alpha \leqslant \frac{\pi}{3}$ (przypadek III):

$$\varepsilon_{gr} = \cos\varphi \, \frac{\sin(\alpha - \varphi + \frac{2\pi}{3}) + \sin\varphi \exp\left[-(\alpha + \frac{\pi}{3}) \operatorname{ctg}\varphi\right]}{1 - \exp(-\frac{2\pi}{3} \operatorname{ctg}\varphi)} - \frac{\sin(\alpha - \varphi + \frac{\pi}{3}) \exp(-\frac{2\pi}{3} \operatorname{ctg}\varphi)}{1 - \exp(-\frac{2\pi}{3} \operatorname{ctg}\varphi)} \tag{12}$$

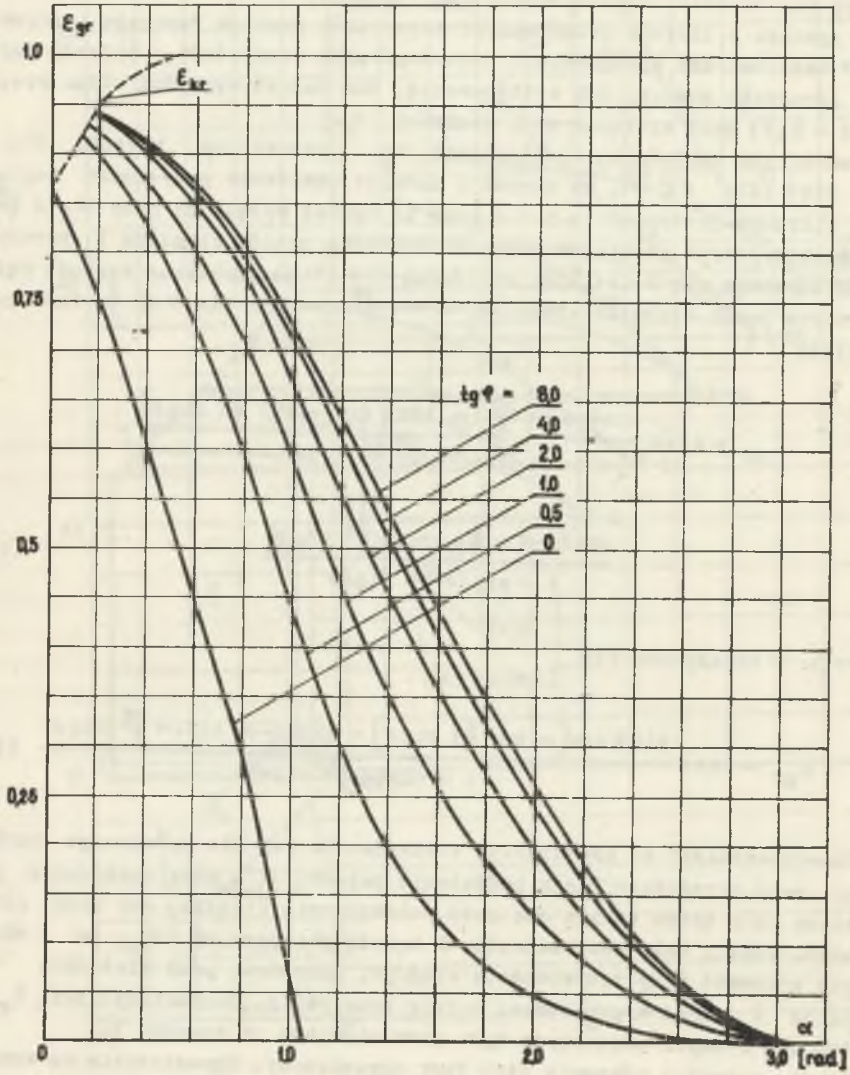
dla $\alpha \geqslant \frac{\pi}{3}$ (przypadek V):

$$\varepsilon_{gr} = \cos\varphi \, \frac{\sin\varphi \exp\left[-(\alpha - \frac{\pi}{3}) \operatorname{ctg}\varphi\right] - \sin(\alpha - \varphi) \exp(-\frac{2\pi}{3} \operatorname{ctg}\varphi)}{1 - \exp(-\frac{2\pi}{3} \operatorname{ctg}\varphi)} \tag{13}$$

Charakterystyki te umożliwiają stwierdzenie czy dla założonego punktu pracy, przy określonym kącie opóźnienia zapłonu α i przy określonym parametrze $\operatorname{tg}\alpha$ praca odbywa się przy przewodzeniu ciągłym, czy przy przerywanym. Jeżeli założona wielkość ε będzie mniejsza od ε_{gr}, to układ będzie pracować przy przewodzeniu ciągłym, natomiast przy wielkości większej od ε_{gr} prąd wyprostowany będzie przerywany. Charakterystyki $\varepsilon_{gr} = f(\alpha)$ dla różnych parametrów $\operatorname{tg}\varphi$ przedstawiono na rysunku 5.

Zakres ważności równania (12) jest ograniczony. Ograniczenie to wynika z istnienia określonego "zakresu sterowności" opisywanego nierównością (10). Wynika stąd, że najmniejsza krytyczna wartość kąta opóźnienia włączenia α_{kr} wyniesie:

$$\alpha_{kr} = \arcsin \varepsilon - \frac{\pi}{3}$$



Rys. 5. Charakterystyki graniczne pomiędzy zakresem prądów ciągłych i przerywanych – $\varepsilon_{gr} = f(\alpha)$. Mostek niesymetryczny

Wartości tej odpowiada maksymalna (krytyczna) wartość sem ε_{kr} powyżej której zależność 12 przestaje obowiązywać.
Wartość ε_{kr} można obliczyć podstawiając $\alpha = \alpha_{kr}$ do tej zależności ($\alpha_{kr} + \frac{\pi}{3} = \arcsin \varepsilon_{kr}$):

$$\varepsilon_{kr} = \sin(\alpha_{kr} + \frac{\pi}{3}) = \cos\Phi \frac{\sin(\alpha_{kr} - \Phi + \frac{2\pi}{3})}{1 - \exp(-\frac{2\pi}{3}\operatorname{ctg}\Phi)} +$$

$$+ \frac{\sin\Phi\exp\left[-(\alpha_{kr} + \frac{\pi}{3})\operatorname{ctg}\Phi\right] - \sin(\alpha_{kr} - \Phi + \frac{\pi}{3})\exp(-\frac{2\pi}{3}\operatorname{ctg}\Phi)}{1 - \exp(-\frac{2\pi}{3}\operatorname{ctg}\Phi)}. \qquad (14)$$

4. Podsumowanie

Znajomość kąta wyłączenia prądu wyprostowanego oraz charakterystyk granicznych pomiędzy zakresem prądów ciągłych i przerywanych ma zasadnicze znaczenie przy projektowaniu układów napędowych. Jest ona konieczna do obliczenia charakterystyk mechanicznych i charakterystyk sterowania układu, a tym samym do wyznaczania jego punktu pracy przy przewodzeniu przerywanym. Również do obliczania stanów przejściowych przy prądach przerywanych należy znać wielkość kąta wyłączenia.

Wykresy kąta wyłączenia α_g prądu wyprostowanego w funkcji kąta opóźnienia włączenia α dla układu z 3-fazowym mostkiem symetrycznym, podawane w literaturze [1], [4], mające charakter uniwersalny i mogące znaleźć zastosowanie w odniesieniu do układów z przewodem zerowym i mostkowych symetrycznych o innej ilości faz, w przypadku 3-fazowego mostka niesymetrycznego tracą ważność i muszą być zastąpione wykresami przedstawionymi na rysunku 4.

LITERATURA

1. BUŁGAKOW A.A.: Elektroniczne urządzenia automatycznej regulacji. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1962.
2. MANTORSKI Z.: Analiza niesymetrycznego 3-fazowego tyrystorowego układu mostkowego przy pracy z siłą elektromotoryczną, w obwodzie prądu wyprostowanego. Praca doktorska, Gliwice, 1971.
3. SEIDEL H.: Das Betriebsverhalten der halbgesteuerten Drehstrombrückenschaltung. Wiss. Z. Elektrotechnik, Nr 4, 1967.
4. TUNIA H., WINIARSKI B.: Układy elektroniczne w automatyce napędowej. WNT Warszawa 1969.

Przyjęto do druku w lutym 1972 r.

ПРЕРЫВИСТАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНОГО НЕСИММЕТРИЧЕСКОГО ТИРИСТОРНОГО МОСТОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Р е з ю м е

В статье поданы уравнения определяющие работу трехфазного несимметрического тиристорного мостового преобразователя. Для различных параметров цепи нагрузки и для различных углов управления расчитано эти уравнения при помощи вычислительной машины и в результате получено угол выключения выпрямленного тока а также граничные характеристики между диапазоном непрерывных и прерывистых токов.

PERFORMANCE OF A THREE-PHASE ASYMMETRICAL THYRISTOR BRIDGE AT INTERMITTENT TRANSMITTANCE

S u m m a r y

In the paper equations giving performance of three-phase asymmetrical thyristor bridge are presented. The equations have been solved using a computer for various loading circuit parameters and various ignition delay angles, to obtain the dropp-off angle of the rectified current and the limit characteristics in the range between the continuous and intermittent currents.