

Henryk Kolka

Instytut Konstrukcji i Technologii  
Urządzeń Automatyki i Elektroniki

## DOBÓR PARAMETRÓW I PUNKTÓW PRACY IMPULSOWEGO TYRYSTOROWEGO REGULATORA NAPIĘCIA

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę pracy impulsowej przetwornicy napięcia. Otrzymane w wyniku analizy zależności pozwalają na racjonalny dobór parametrów filtra oraz punktu pracy układu. Przedstawiono graficznie i analitycznie charakterystyki statyczne układu. Zwrócona została szczególna uwaga na problem ograniczenia pulsacji napięcia na wyjściu, przy dużych zmianach współczynnika wypełnienia  $\alpha$ .

### Wstęp

Opanowanie przez przemysł technologii produkcji przyrządów tyrystorowych wpłynęło na dynamiczny rozwój przetwornic statycznych, w tym także przetwornic prądu stałego.

Podstawowy układ przetwornicy prądu stałego tworzy klucz (przeważnie tyrystorowy), wraz z filtrem.

Przez odpowiedni dobór elementów układu kluczującego i filtra oraz przez wybór odpowiedniego punktu pracy, możemy zapewnić następujące własności:

1. dużą sprawność,
2. dużą moc wyjściową,
3. dużą pewność pracy,
4. szeroki zakres regulacji napięcia,
5. dużą sztywność charakterystyki prądowo-napięciowej,
6. ograniczenie pulsacji na wyjściu w całym zakresie pracy,
7. minimalne gabaryty.

Artykuł podejmuje próbę ilościowego ujęcia podstawowych relacji w układzie, opierając się na takich wielkościach wyjściowych jak: napięcie zasilające  $V_D$ , zakres zmian napięcia wyjściowego, zakres zmian obciążenia i dopuszczalna pulsacja napięcia na wyjściu. Wyprowadzone zależności pozwalają na określenie parametrów filtra oraz układu kluczującego. Przedstawione wykresy umożliwiają właściwy wybór punktu pracy układu.

1. Analiza układu

Analiza stanów nieustalonych w układzie będzie przeprowadzona metodą wartości chwilowych. Ze względu na ograniczoną dokładność w określeniu wszystkich parametrów obwodu oraz za duży stopień złożoności końcowych rozwiązań – praktycznie uniemożliwiających ich dalszą analizę, przyjęto następujące uproszczenia:

a. Napięcie wyjściowe  $V_F = \text{const}$  w zakresie  $t \in \langle 0, T \rangle$  (ponieważ

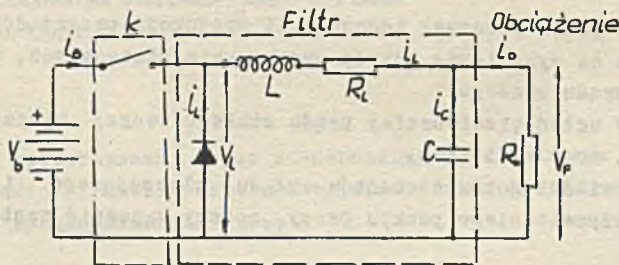
$$\frac{\Delta V_F}{V_F} \ll 1 \quad \text{np.} \quad \frac{\Delta V_F}{V_F} < 0,1$$

b.  $R_b + R_L \approx R_D + R_L = R$ .

c. Kłucz  $k$  jest idealny (bezinercyjny, bezstratny i nie powoduje przepięć).

d. Zarówno dioda  $D$  jak i dławik  $L$  są elementami liniowymi.

Dla tych założeń układ zastępczy regulatora jest pokazany na rys. 1.



Rys. 1

Praca kłucza jest pokazana na rys. 2.

Pracę układu można opisać dwoma podstawowymi równaniami:

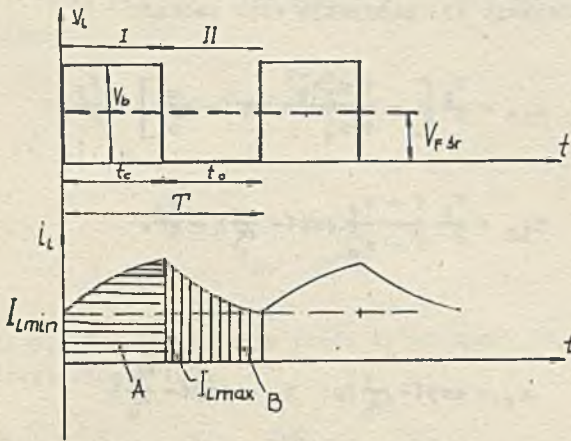
w zakresie I:

$$V_b = i_{L_1} R + L \frac{di_{L_1}}{dt} + V_F$$

w zakresie II:

$$0 = i_{L_2} R + L \frac{di_{L_2}}{dt} + V_F$$

(1)



Rys. 2

Rozwiązując równania (1) otrzymamy:

$$I_{L1} = \frac{V_b - V_F}{R} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \right] + I_{Lmin} \cdot \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \quad (2)$$

$$I_{L2} = I_{Lmax} \cdot \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) - \frac{V_F}{R} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \right],$$

przy czym:

$$\frac{I_{Lmax}}{V_b/R} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{R}{L} t_o\right)}{1 - \exp\left(-\frac{R}{L} T\right)} - \frac{V_F}{V_b} \quad (3)$$

$$\frac{I_{Lmin}}{V_b/R} = \exp\left(-\frac{R}{L} t_o\right) \frac{1 - \exp\left(-\frac{R}{L} t_o\right)}{1 - \exp\left(-\frac{R}{L} T\right)} - \frac{V_F}{V_b}$$

Aby uprościć analizę przyjmuje się, że:

$$\frac{t_o}{T} = \alpha_1; \quad \frac{R}{T} = \frac{1}{\alpha_0}; \quad \frac{R}{L} t = \frac{\alpha}{\alpha_0}; \quad \frac{R}{L} t_o = \frac{\alpha_1}{\alpha_0}, \quad \frac{t}{T} = \alpha \quad (4)$$

Przekształcone równania (2) przyjmują więc postać:

$$i_{L1} = \frac{V_b}{R} \left[ 1 - \frac{1-a_1^2 b_1^{-1}}{1-a_1^2} \exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha_0}\right) \right] - \frac{V_F}{R} \quad (2')$$

$$i_{L2} = \frac{V_b}{R} \frac{1-b_1}{1-a_1^2} \exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha_0}\right) - \frac{V_F}{R},$$

przy czym

$$a_1 = \exp\left(-\frac{1}{2\alpha_0}\right); \quad b_1 = \exp\left(-\frac{\alpha_1}{\alpha_0}\right)$$

Na podstawie tych równań można określić wartość średnią płynącego prądu:

$$I_{Lsr} = \frac{V_b}{R} \left( \alpha_1 - \frac{V_F}{V_b} \right) \quad (5)$$

Równanie to jest słuszne jedynie wówczas, gdy w indukcyjności L jest spełniony warunek ciągłości przepływu prądu, tj.

$$i_{L2}(\alpha) \Big|_{\alpha=1-\alpha_1} = I_{L2min} = I_{Lmin} > 0, \quad (6)$$

przy czym warunek

$$i_{L2}(\alpha) \Big|_{\alpha=1-\alpha_1} = I_{Lmin} = 0 \quad (6')$$

określa nam granicę przepływu prądu w L.

Z połączenia równania (2') z warunkiem (6') wynika jedno z równań parametrycznych granicy ciągłości:

$$\frac{V_F}{V_b} = a_1^2 \frac{1-b_1}{b_1(1-a_1^2)} \quad (7)$$

Ponieważ średnie wartości prądu w dławiku L i w obciążeniu  $R_0$  są sobie równe, więc

$$I_{Lsr} = I_{o\delta r} = \frac{V_F}{R} \quad (5')$$

Podstawiając (5') do (5) otrzymamy równanie określające zależność  $I_0 = f(\alpha_1)$  w postaci:

$$I_0 = \alpha_1 I_{mo},$$

przy czym

$$I_{mo} = \frac{V_b}{R_0 + R} \quad (5'')$$

Aby w zakresie ciągłości przepływu prądu  $i_L$  otrzymać charakterystykę wewnętrzną, przekształcamy (5).

$$I_{Lsr} = \frac{V_b}{R} \left( \alpha_1 - \frac{V_F}{V_b} \right) = \frac{V_b}{R+R_0} \cdot \frac{R+R_0}{R} \left( \alpha_1 - \frac{V_F}{V_b} \right) = I_{mo} \cdot \frac{1}{g} \left( \alpha_1 - \frac{V_F}{V_b} \right)$$

a stąd

$$\frac{V_F}{V_b} = \alpha_1 - g \frac{I_0}{I_{mo}}. \quad (8)$$

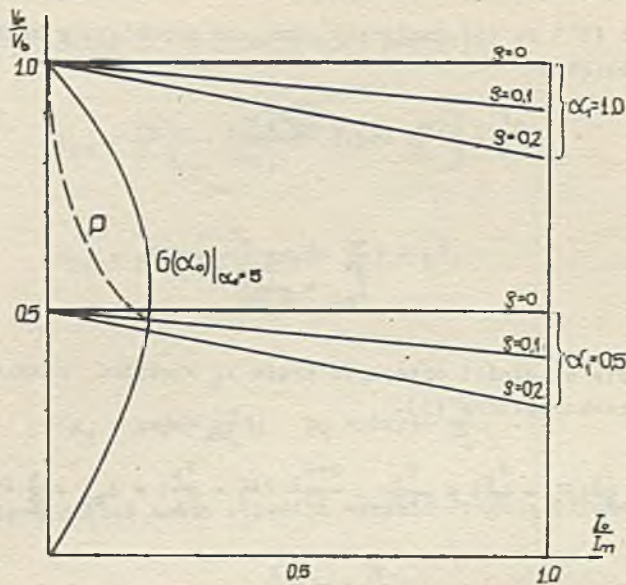
Ponieważ charakterystyka wewnętrzna jest ciągła, więc łącząc (8) z (7) otrzymamy drugie równanie parametryczne szukanej granicy ciągłości prądu:

$$\frac{I_0}{I_{mo}} \frac{gR}{1} = \frac{1}{g} \left[ \alpha_1 - a_1^2 \frac{(1-b_1)}{b_1(1-a_1^2)} \right] \quad (7')$$

## 2. Charakterystyka wewnętrzna układu

Z równania (8) wynika, że charakterystyka ta jest linicwo opadającą funkcją stosunku  $I_0/I_{mo}$ , przy czym parametrem tej funkcji jest  $\alpha_1$ . Charakterystyki te posiadają nachylenie wprost proporcjonalne do stratności układu  $g$ . Są one pokazane na rys. 3.

Równanie (8) opisuje charakterystykę wewnętrzną układu jedynie w obszarze położonym na prawo od krzywej  $G(\alpha_0)$ , będącej granicą (jest ona opisana równaniami 7 i 7'). Jest to obszar pracy liniowej, w którym możemy otrzymać charakterystykę sztywną, zależną jedynie od współczynnika  $g$ .



Rys. 3

W obszarze ograniczonym krzywą  $G(\alpha_0)$  i osią  $V_F/V_b$  mamy pracę nieliniową układu, gdzie charakterystyka wewnętrzna jest opisana równaniem:

$$\frac{V_F}{V_b} = \frac{\alpha_1 - \frac{I_0}{I_{no}} \cdot g}{\alpha_1 + \alpha_0 \cdot \ln \left[ \frac{V_F}{V_b} \cdot (1 - b_1) + b_1 \right]} \quad (9)$$

Przykładowo dla  $\alpha_0 = 5$ ,  $\alpha_1 = 0,5$ ,  $g = 0,1$  – jest ona pokazana linią przerywaną P.

Przeanalizujemy dokładniej problem ograniczenia dopuszczalnych zmian obciążenia. Obliczmy granice wyrażeń (7) i (7') dla dążących do 0 i do  $\infty$ .

$$\lim_{\alpha_0 \rightarrow 0} \frac{V_F}{V_b} \frac{g}{I_{no}} = 0; \quad \lim_{\alpha_0 \rightarrow 0} \frac{I_0}{I_{no}} \frac{g}{I_{no}} = \frac{\alpha_1}{g} \quad (10)$$

$$\lim_{\alpha_0 \rightarrow \infty} \frac{V_F}{V_b} \frac{g}{I_{no}} = \alpha_1; \quad \lim_{\alpha_0 \rightarrow \infty} \frac{I_0}{I_{no}} \frac{g}{I_{no}} = 0$$

Połączenie obu równań parametrycznych (7) i (7') pozwala na otrzymanie równania w postaci wyrażnej:

$$\frac{I_0}{I_{no}} \frac{g}{I_{no}} = \frac{1}{g} \left\{ \alpha_0 \cdot \ln \left[ \frac{V_F}{V_b} \left( \exp \frac{1}{\alpha_0} - 1 \right) + 1 \right] - \frac{V_F}{V_b} \right\} \quad (11)$$

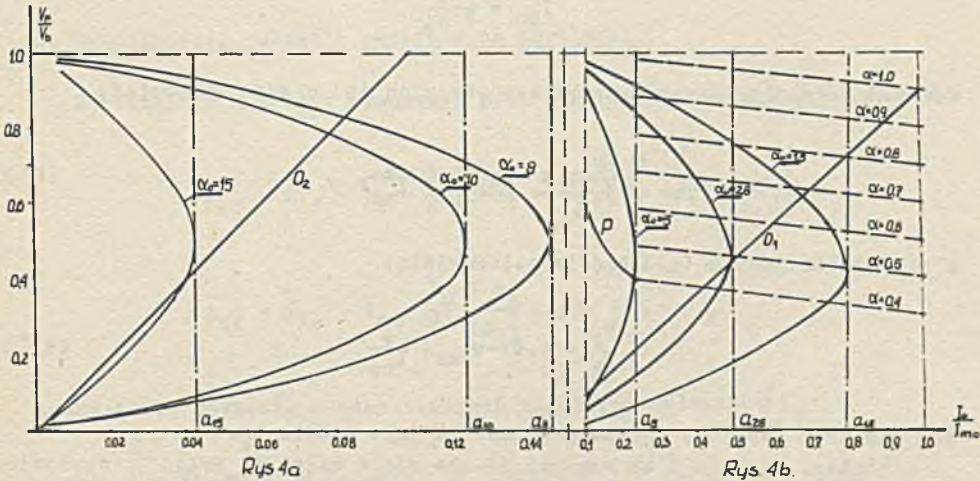
Ponieważ minimalny dopuszczalny prąd obciążenia jest ograniczony dopuszczalną wartością  $(\frac{I_o}{I_{mo}})_{\max}$ , zatem z równań (7), (7') i (11) można określić ten punkt. Ze szczegółowych rozważań wynika, że funkcja opisana równaniem (11) posiada swoje maksimum w punkcie

$$\left(\frac{V_F}{V_b}\right)_{\max} = \frac{\alpha_o \left[ \exp \frac{1}{\alpha_o} - 1 \right] - 1}{\exp \frac{1}{\alpha_o} - 1} \quad (12a)$$

Punkt ten można opisać także równaniem parametrycznym:

$$\alpha_1 = \alpha_o \cdot \ln \left[ \alpha_o \left( \exp \frac{1}{\alpha_o} - 1 \right) \right] \quad (12b)$$

Przykładowo na rys. 4 przedstawione są krzywe graniczne  $G(\alpha_o)$  dla  $\alpha_o = 1,5; 2,5; 5,0; 8,0; 10; 15$ .



Rys. 4

Takie przedstawienie krzywych granicznych  $G(\alpha_o)$ , charakterystyk wewnętrznych i prostej obciążenia  $O_1$  - o równaniu

$$\frac{V_F}{V_b} = (1-g) \quad (13)$$

we współrzędnych bezwymiarowych  $\frac{V_F}{V_b}$  i  $\frac{I_o}{I_{mo}}$ , przy czym parametrami są także wielkości bezwymiarowe  $\alpha_0, \alpha_1$  jest bardzo wygodne, gdyż umożliwia ono ogólne rozważania.

Krzywe graniczne są tu narysowane dla  $q = 0,1$ , lecz jak to wynika z zależności (11), mogą być one przeliczone dla dowolnego  $q$  poprzez zależność:

$$\left(\frac{I_o}{I_{mo}}\right)_{\max} \Big|_{\alpha_0, q_1} = \left(\frac{I_o}{I_{mo}}\right)_{\max} \Big|_{\alpha_0, q=0.1} \cdot \frac{1}{10 \cdot q_1} \quad (14)$$

Jeżeli wymagana by była analiza wpływu zmian obciążenia  $R_o$  na warunki pracy układu, to przyjmujemy, że

$$R_{o\max} = R_{o\min} \cdot k$$

$$q_{\max} = \frac{R}{R + R_{o\min}}$$

(15)

$$I_{mo} = \frac{V_b}{R + R_o}$$

wówczas równanie charakterystyk wewnętrznych (8) przyjmuje postać:

$$\frac{V_F}{V_b} = 1 - q_{\max} \cdot \frac{I_o}{I_{mo}}, \quad (8')$$

a prosta obciążenia (13) będzie zależnością:

$$\frac{V_F}{V_b} = k \cdot (1 - q_{\max}) \frac{I_o}{I_{mo}} \quad (13')$$

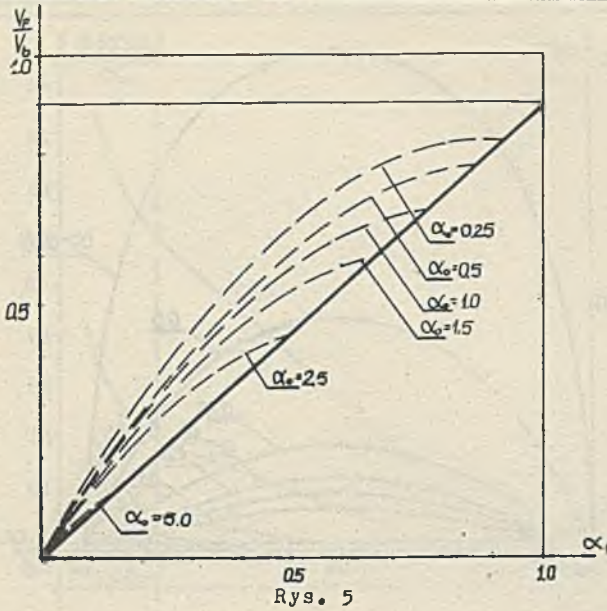
Np. dla  $k=10$  jest ona pokazana na rys. 4 jako prosta  $O_2$ .

Z analizy rys. 4a i 4b wynika, że aby móc w zakresie zmian napięcia  $\frac{V_F}{V_b} = \langle 0,5; 0,9 \rangle$  zmieniać obciążenie w stosunku  $k=10$  i aby sztywność charakterystyki była zachowana, wymagane jest aby była możliwa regulacja  $\alpha_0$  w zakresie  $\langle 2,5; 15 \rangle$ .

Wygodnie jest dla projektowania przyjmować jako granicę ciągłości linię  $a_{\alpha_0}$ .

Przy pomocy charakterystyk z rys. 4 można narysować charakterystykę regulacyjną. Przykładowo, na rys. 5 pokazana jest rodzina takich charakterystyk dla  $q = 0,1 = \text{const}$  oraz dla różnych wartości  $\alpha_0$ .





Rys. 5

3. Ograniczenie pulsacji napięcia na obciążeniu

Z równań (2') możemy wyznaczyć przebieg prądu pojemnościowego.

$$i_{o1} = i_{L1} - i_o = \frac{V_b}{R} \left[ 1 - \alpha_1 - \frac{1 - a_1^2 b_1^{-1}}{1 - a_1^2} \exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha_0}\right) \right] \quad (15)$$

$$i_{o2} = i_{L2} - i_o = \frac{V_b}{R} \frac{1 - b_1}{1 - a_1^2} \exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha_0}\right) - i$$

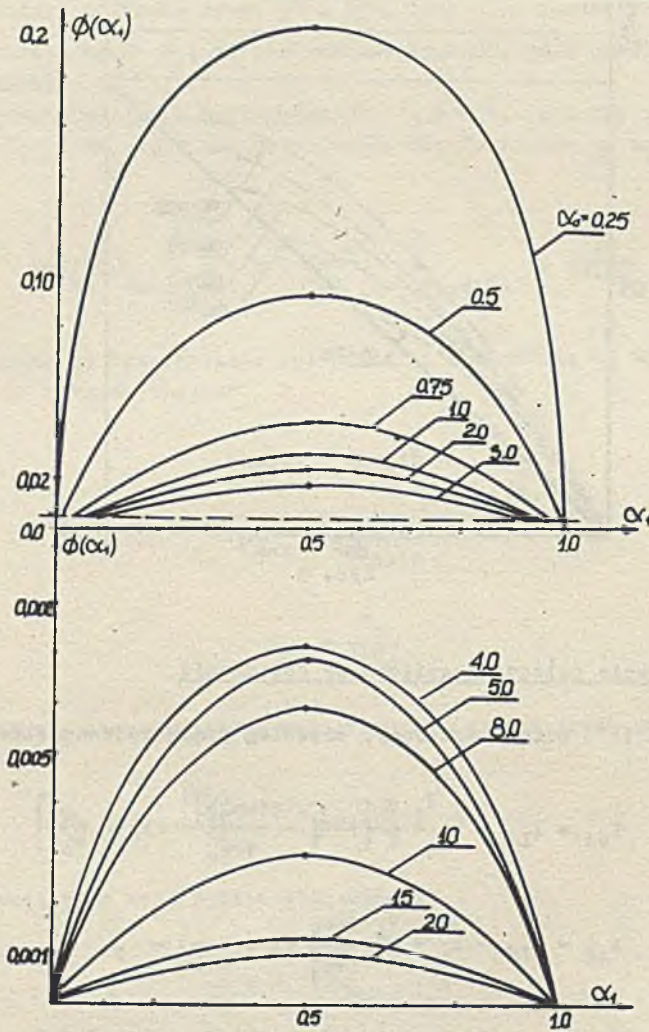
Całkując te równania możemy otrzymać amplitudę pulsacji  $\Delta U_o$ :

$$\Delta V_o = V_b \left\{ \frac{\alpha_1(1 - \alpha_1)}{RC} - \frac{\alpha_0(1 - \alpha_1)}{RC} \cdot \ln \frac{1 - a_1^2 b_1^{-1}}{(1 - \alpha_1)(1 - a_1^2)} - \frac{\alpha_1 \alpha_0}{RC} \ln \frac{1 - b_1}{\alpha_1(1 - a_1^2)} \right\} \quad (16)$$

lub w innej postaci:

$$\Delta V_o = V_F \cdot \frac{1}{RC} \frac{\Phi(\alpha_1, \alpha_0)}{\alpha_1} \quad (17)$$

Funkcja  $\Phi(\alpha_1)$  jest przedstawiona na rys. 6.

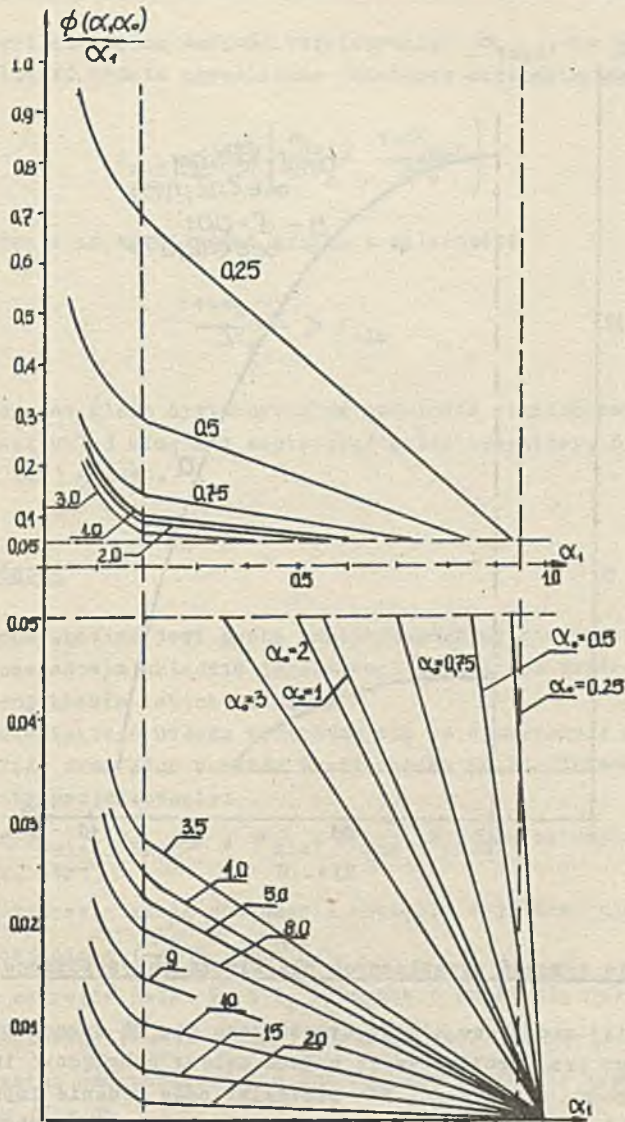


Rys. 6

Jak widać z rys. 6 największą wartość pulsacji napięcia  $\Delta V_0$  otrzymujemy dla  $\alpha_1 = 0,5$ . Maleje ona bardzo szybko ze wzrostem  $\alpha_0$ . Jednak nie wartość pulsacji winna być kryterium zmian częstotliwości (a której miarą jest  $\Phi(\alpha_1, \alpha_0)$ ), lecz funkcja:

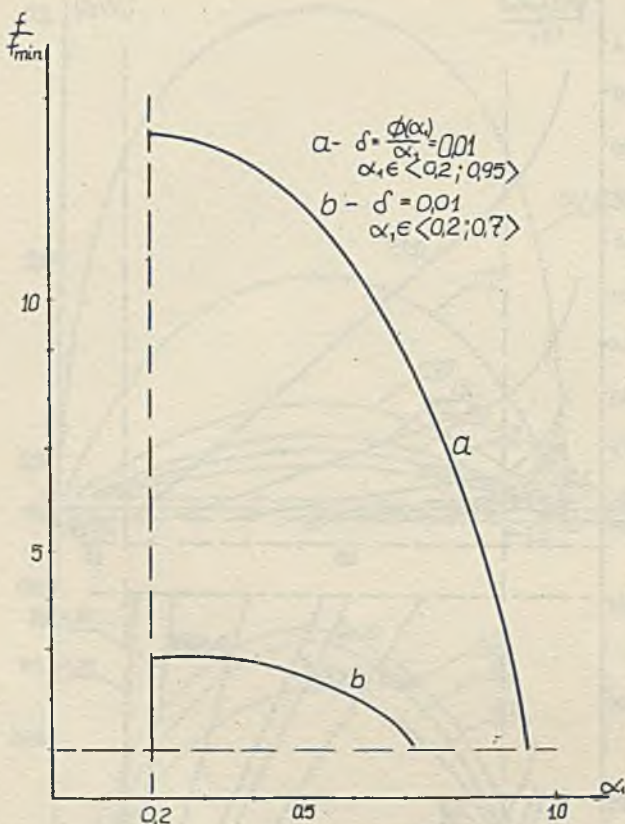
$$\frac{\Delta V_0}{V_F} = \frac{1}{RC} \cdot \frac{\Phi(\alpha_1, \alpha_0)}{\alpha_1} \quad (18)$$

Na rys. 7 są przedstawione charakterystyki  $\frac{\Phi(\alpha_1)}{\alpha_1}$  w zależności od  $\alpha_0$ .



Rys. 7

Z nich można łatwo wyznaczyć zakres zmian  $\alpha_0$  w zależności od  $\alpha_1$ . Można też określić charakterystykę wymaganych zmian  $\frac{f}{f_{\min}} = f(\alpha_1)$  tak, aby  $\frac{\Delta V_0}{F} \leq \delta_{\text{dop}}$ . Przykładowo dla  $RC = 1$  i  $Q = 0,01$ , przy zmianach  $\alpha_1$  w zakresach  $\langle 0,2; 0,95 \rangle$  i  $\langle 0,2; 0,7 \rangle$  odpowiednie zmiany  $\frac{f}{f_{\min}}$  są pokazane na rys. 8.



Rys. 8

#### 4. Określenie wymagań dynamicznych dla klucza tyrystorowego

Najczęściej stosowane klucze tyrystorowe nie są urządzeniami zbyt szybkimi, dlatego przy projektowaniu układu należy uwzględnić ich własności.

Ogólnie można powiedzieć, że minimalny czas trwania impulsu napięciowego jest  $\Delta t_z$  (ograniczony jest minimalnym czasem potrzebnym do przygotowania układu komutacyjnego do pracy), a minimalny czas trwania przerwy  $\Delta t_w$  (ograniczony czasem wyłączenia tyrystora). Wówczas maksymalna możliwa częstotliwość będzie ograniczona wartością

$$f_{\max} = \frac{1}{\Delta t_z + \Delta t_w} \quad (19)$$

Jeżeli dana jest minimalna wartość współczynnika  $\alpha_{1\min}$ , to wówczas maksymalna częstotliwość będzie ograniczona dodatkowo wartością

$$f_{\max} \leq \text{Min} \left\{ \frac{\alpha_{1\min}}{\Delta t_z}, \frac{1-\alpha_{1\min}}{\Delta t_w} \right\} \quad (20)$$

Dolne ograniczenie częstotliwości wynika z zależności

$$\frac{1-\alpha_{1\max}}{\Delta t_w} > f_{\min} \quad (21)$$

Zatem dobierając klucz tyrystorowy na podstawie wymagań wstępnych, należy dobrać taki układ klucza i zastosować takie tyrystory, by były spełnione warunki (19) - (21).

## 5. Wnioski końcowe

Przedstawiona analiza jest próbą analitycznego ujęcia procesów elektrycznych w podstawowym układzie impulsowego regulatora napięcia, z punktu widzenia projektanta takich układów.

Projektowanie takiego układu sprowadza się do wyznaczenia podstawowych parametrów układu oraz jego punktów pracy. Można tu zdefiniować trzy podstawowe warianty projektowania:

1. Dane  $V_b, < V_{F\min}, V_{F\max} >$ ;  $\eta_{\min}, R_{O\max}, R_{O\min}$  - należy dobrać filtr i klucz tak, aby:
  - a. W całym zakresie zmian obciążenia napięcie wyjściowe nie zmieniało się więcej niż o  $\left(\frac{\Delta V_F}{V_F}\right)\%$
  - b. W całym zakresie zmian  $V_F$  i  $R_O$  - zachować amplitudę pulsacji napięcia wyjściowego  $\left(\frac{\Delta V_O}{V_F}\right)\%$  poniżej dopuszczalnej wartości.
  - c. Zakres zmian częstotliwości w funkcji współczynnika wypełnienia  $\alpha_1$  tak, aby  $\eta = \eta_{\max}$ .
2. Dany filtr,  $V_b, < V_{F\min}, V_{F\max} >$ ,  $\eta_{\min}, R_{O\min}, R_{O\max}$  - dobrać klucz i jego punkt pracy tak, aby w całym zakresie pracy układu były spełnione warunki 1a, 1b, 1c.
3. Dany klucz tyrystorowy o określonych własnościach dynamicznych - należy dobrać filtr, aby przy wymaganych  $< V_{F\min}, V_{F\max} >$   $V_b, \eta_{\min}, R_{O\max}, R_{O\min}$  w całym zakresie pracy były spełnione warunki 1a, 1b, 1c.

W praktyce istnieje szereg ograniczeń konstrukcyjnych, które wymagają wprowadzenia poprawek w doborze elementów układu. Poprawki takie należy

вprowadzić, jednakże zmiany te winny być zsynchronizowane ze zmianą punktu pracy i sposobu regulacji układu.

#### LITERATURA

1. F.E. Gentry, F.W. Gutzwiller, Nick Holonyak, Jr E.E. Von Zastrow - Semiconductor controlled rectifiers, - 1964 Prentice-Hall, Inc.
2. Silicon controlled rectifier manual, - 1967 GENERAL ELECTRIC CO.
3. J. Rumberg - Design parameters for power thyristors, Elektronik Engng. 1970- nr 2.
4. F.F. Mazda - Design of high-frequency thyristor-chopper circuits. Elektronik Engng. 1970 - nr 5.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 10.IX.1971 r.

#### ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И РАБОЧИХ ТОЧЕК ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

#### Р е з ю м е

В статье представлено аналитически работу импульсного преобразователя напряжения. Получены зависимости делают возможным рациональный выбор параметров и рабочей точки системы. Представлены графически и аналитически статические характеристики системы. Обращено внимание на проблему ограничения пульсации выходного напряжения.

#### THE ANALYSIS OF THE PULSE D.C. VOLTAGE CONVERTER WITH SILICON CONTROLLED RECTIFIERS

#### S u m m a r y

The analysis of the pulse d.c. voltage converter has been presented in the paper.

The relations obtained in the paper give good filter parameters and work point of the system. The static characteristics of the system have been presented. Special attention has been given to problems of large changes in cycle time rates, and attenuation of output voltage pulsation.