

Zbigniew MANTORSKI

Tadeusz RODACKI

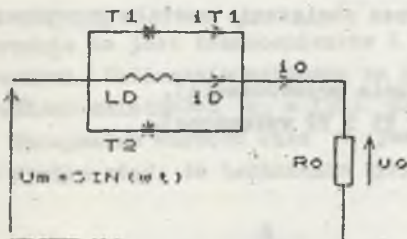
TYRYSTOROWY REGULATOR NAPIĘCIA PRZEMIENNEGO Z DŁAWIKIEM

Streszczenie. W artykule zostały przedstawione wyniki analizy pracy jednofazowego tyrystorowego regulatora napięcia przemiennego, pracującego na obciążenie czysto rezystancyjne, symulujące łuk elektryczny. Za pomocą mikrokomputera obliczono przebiegi prądu obciążenia dla różnych warunków pracy oraz w funkcji kąta opóźnienia wyłączenia tyrystorów charakterystyki kąta wyłączenia tyrystorów, charakterystyki skutecznych wartości prądów obciążenia, dławika i tyrystora oraz charakterystyki mocy czynnej i biernej pobieranej przez układ. Przedstawione charakterystyki dają możliwość poprawnego doboru dławika i tyrystorów, jak również optymalnych parametrów elektrycznych określonych przez technologię przy zasilaniu odbiornika łukowego.

Układy zasilania odbiorników łukowych powinny spełniać wymagania związane nie tylko z zapewnieniem stabilnego wyładowania łukowego, ale także powinny zapewniać możliwość łatwego i szybkiego nastawiania optymalnych parametrów elektrycznych wymaganych przez technologię. Dobór tych parametrów sprowadza się do wyznaczania odpowiednich wartości napięć, prądów lub mocy, które w danym okresie procesu technologicznego zapewniają najkorzystniejsze wskaźniki, np. dla pieca łukowego, takie jak: najkrótszy czas roztapiania wsadu, najmniejsze zużycie energii na jednostkę wagową wsadu, najmniejszą wartość współczynnika zużycia elektrod itp.

Tyrystorowe układy regulacji napięcia łuku zapewniają dokładną i szybką zmianę napięcia i prądu zasilającego elektrody pieca łukowego. Pozwalają też na zrezygnowanie z przełącznika zaczeów transformatora piecowego i stwarzają możliwość likwidacji asymetrii obciążenia poszczególnych faz. Tyrystorowe regulatory umożliwiają również pracę w układach automatycznej regulacji ze sterowaniem programowym.

Poniżej została przeprowadzona analiza jednofazowego tyrystorowego regulatora napięcia przemiennego



Rys. 1. Schemat zastępczy układu
Fig. 1. System equivalent circuit

z dławikiem, którego schemat zastępczy przedstawiono na rys. 1. Zasadniczą zaletą tego układu jest to, że stosunkowo niewielkim kosztem (dławik) zapewnia pewien minimalny ciągły prąd łuku, posiadając przy tym dobre własności regulacyjne. Brak w dostępnej literaturze odpowiednich charakterystyk skłonił autorów do przeprowadzenia niniejszej analizy.

Analizę przeprowadzono przy następujących założeniach:

- tyrystory są zaworami idealnymi,
- tyrystory są wysterowane symetrycznie,
- obciążenie regulatora ma charakter czysto rezystancyjny.

Oznaczenia

U_m - maksymalna wartość napięcia zasilającego,

i_o - prąd obciążenia,

i_D - prąd dławika,

i_T - prąd tyrystora,

α - kąt opóźnienia włączenia tyrystora,

α_g - kąt wyłączenia tyrystora,

R_o - rezystancja obciążenia,

L_D - indukcyjność dławika,

P_o - moc czynna obciążenia,

Q - moc bierna układu,

ϕ - współczynnik mocy układu,

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L_D}{R_o},$$

ω - pulsacja.

Małymi literami oznaczono wartości chwilowe prądów, a dużymi skuteczne.

Wielkości przedstawione w jednostkach względnych podkreślono.

Analiza przebiegów prądu płynącego przez obciążenie została przeprowadzona dla dwóch przedziałów:

- I, gdy $\alpha < \omega t < \alpha_g$ [tyrystor T1 w stanie przewodzenia],
- II, gdy $\alpha_g < \omega t < \alpha + \pi$ (oba tyrystory T1 i T2 wyłączone).

Przedział I

$$i_o = \frac{U_m}{R_o} \sin \omega t$$

lub w jednostkach względnych:

$$i_o = \sin \omega t,$$

gdzie:

$$i_0 = \frac{i_0}{Y_m} = \frac{i_0 R_0}{U_m}$$

Prąd płynący przez diodę

$$i_D = \text{const} = i_0,$$

gdzie i_0 jest wartością prądu obciążenia dla $\omega t = \alpha$, a prąd płynący przez tyrystor T1

$$i_T = i_0 - i_D.$$

Przedział II

$$U_m \sin \omega t = \omega L_D \frac{di}{d(\omega t)} + R_0 i_0.$$

Rozwiązaniem tego równania jest wyrażenie:

$$i_0 = \cos \varphi \sin(\omega t - \varphi) + [\sin \varphi \cos \varphi + i_0(0)] \exp\left(-\frac{\omega t}{T_D}\right),$$

gdzie $i_0(0)$ jest wartością początkową na początku II przedziału. Stąd po obliczeniu tej wartości:

$$i_0 = \cos \varphi \sin(\omega t - \varphi) + [\sin \alpha_g - \cos \varphi \sin(\alpha_g - \varphi)] \exp\left(\frac{\alpha_g - \omega t}{T_D \varphi}\right).$$

Przy $\omega t = \alpha_g$ prąd płynący przez tyrystor T1 osiąga wartość 0.

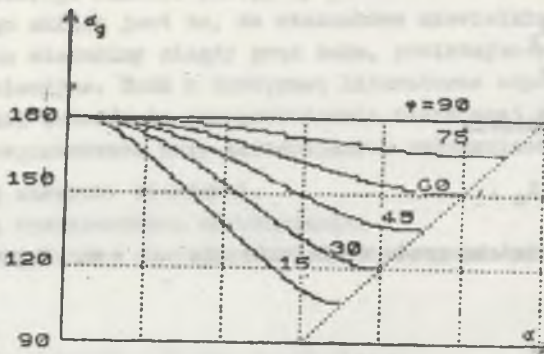
Uwzględniając ten warunek otrzymuje się:

$$\sin \alpha_g - \cos \varphi \sin(\alpha_g - \varphi) + [\sin \alpha_g - \cos \varphi \sin(\alpha_g - \varphi)] \exp\left(\frac{\alpha_g - \alpha_g - \pi}{T_D \varphi}\right) = 0.$$

Równanie to jest transcendentne i możliwe do rozwiązania metodami numerycznymi. Obliczenia wykonano za pomocą mikrokomputera, a na rys. 2 określono zależności $\alpha_g = f(\alpha)$ dla różnych wartości kąta α .

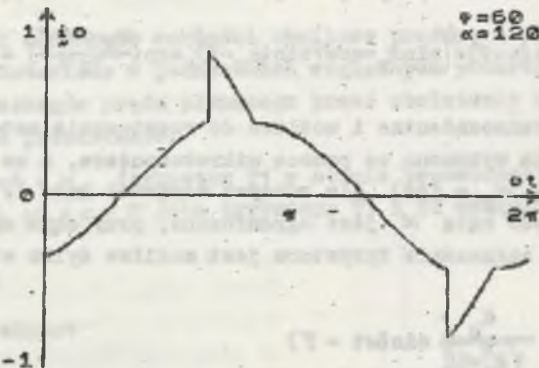
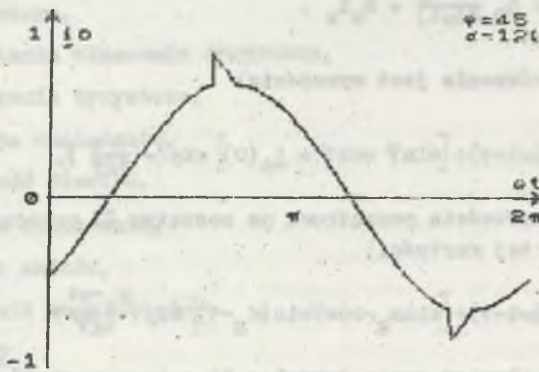
Maksymalna wartość kąta α jest ograniczona, przy czym ograniczenie to wynika stąd, że załączenie tyrystora jest możliwe tylko wtedy, gdy:

$$U_m \sin \alpha > U_m \frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 + L_D^2}} \sin(\omega t - \varphi)$$



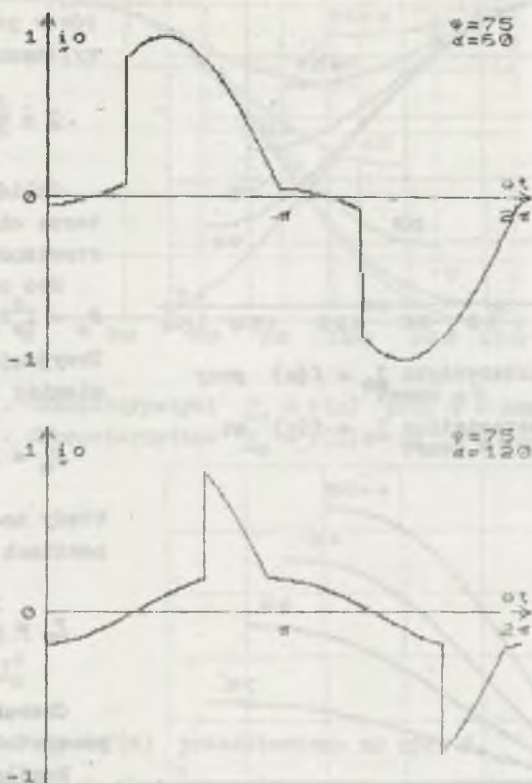
Rys. 2. Charakterystyki $\alpha_g = f(\alpha)$ przy $\psi = \text{const}$

Fig. 2. Characteristics $\alpha_g = f(\alpha)$ at $\psi = \text{const}$



Rys. 3. Przebiegi prądu i_0 przy $\alpha = \text{const}$ i $\psi = \text{const}$

Fig. 3. Waveforms of the current i_0 at $\alpha = \text{const}$ and at $\psi = \text{const}$



Rys. 3. Przebiegi prądu i_o przy $\alpha = \text{const}$ i $\varphi = \text{const}$
 Fig. 3. Waveforms of the current i_o at $\alpha = \text{const}$ and at $\varphi = \text{const}$

czyli

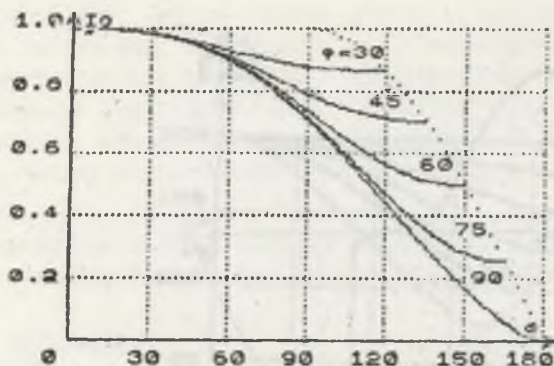
$$\alpha_{\max} = \frac{\pi}{2} + \varphi.$$

Na rys. 2 tę granicę oznaczono linią przerywaną.

Przedstawione rozważania umożliwiły obliczenie przebiegów prądu obciążenia i_o . Na rys. 3 przedstawiono kilka przykładowych przebiegów obliczonych dla różnych kątów φ i α .

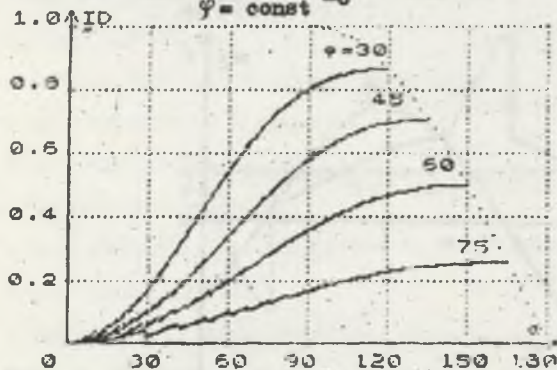
Przeprowadzona wyżej analiza umożliwiła również obliczenie przy różnych kątach φ charakterystyk skutecznych wartości prądów obciążenia I_o , dławika I_D i tyrystora I_R w funkcji kąta α . Prądy te przedstawiono w jednostkach względnych, przy czym wielkością odniesienia był prąd:

$$I_B = \frac{U_B}{\sqrt{2} R_o} = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$$



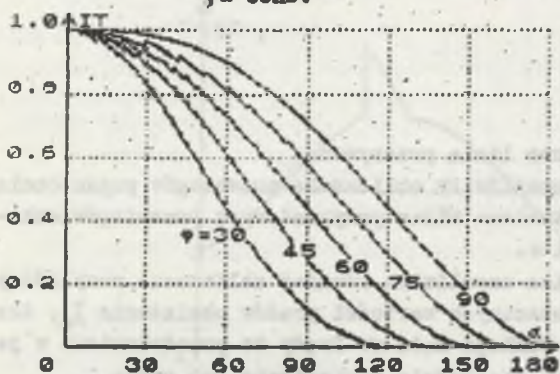
Rys. 4. Charakterystyki $I_0 = f(\alpha)$ przy $\psi = \text{const}$

Fig. 4. Characteristics $I_0 = f(\alpha)$ at $\psi = \text{const}$



Rys. 5. Charakterystyki $I_D = f(\alpha)$ przy $\psi = \text{const}$

Fig. 5. Characteristics $I_D = f(\alpha)$ at $\psi = \text{const}$



Rys. 6. Charakterystyki $I_T = f(\alpha)$ przy $\psi = \text{const}$

Fig. 6. Characteristics $I_T = f(\alpha)$ at $\psi = \text{const}$

stąd wartości skuteczne prądów w jednostkach względnych wyliczono jako:

$$\underline{I} = \frac{I}{I_0}$$

Obliczone na mikrokomputerze charakterystyki przedstawiono na rys. 4, 5 i 6.

Moc czynna obciążenia $P_0 = I_0^2 R_0$.

Przyjmując jako moc odniesienia:

$$P_M = I_M^2 R_0$$

wtedy moc obciążenia w jednostkach względnych:

$$P_0 = \frac{P_0}{P_M} = I_0^2$$

Charakterystyki $P_0 = f(\alpha)$ przedstawiono na rys. 7.

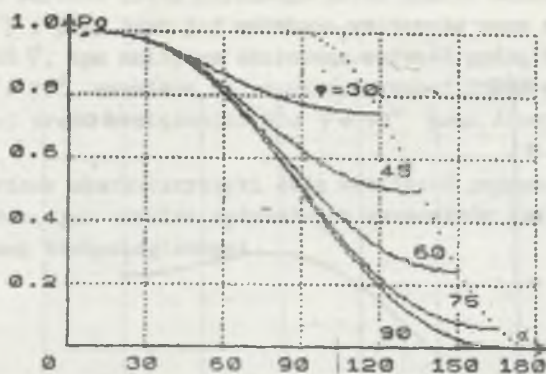
Współczynnik mocy układu jest opisany relacją:

$$\phi = \frac{P_0}{S} = \frac{I_0^2 R_0}{U I_0} = I_0$$

Wynika stąd, że charakterystyki $I_0 = f(\alpha)$ są jednocześnie charakterystykami współczynnika mocy ϕ w funkcji kąta α .

Moc bierna zdefiniowano zgodnie z definicją prof. Fryzego [4], ważną również dla przebiegów odkształconych jako:

$$Q = \sqrt{S^2 - P_0^2}$$

Rys. 7. Charakterystyki $P_o = f(\alpha)$ przy $\varphi = \text{const}$ Fig. 7. Characteristics $P_o = f(\alpha)$ at $\varphi = \text{const}$

stad:

$$Q = \frac{P}{\tan \alpha}$$

$$Q = \sqrt{I_o^2 - I_o^4}$$

Charakterystyki $Q = f(\alpha)$ przedstawiono na rys. 8.

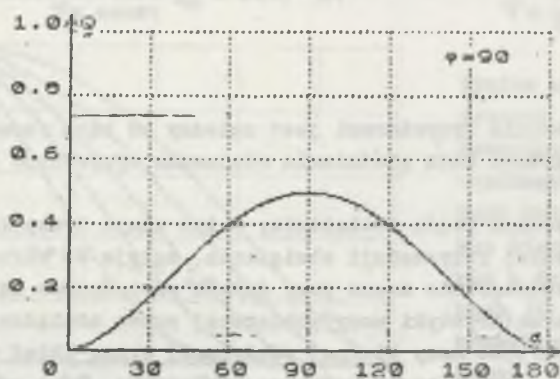
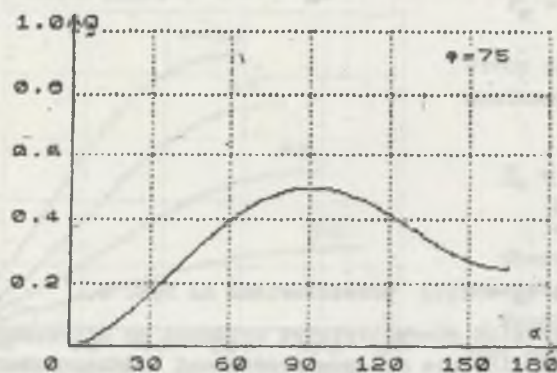
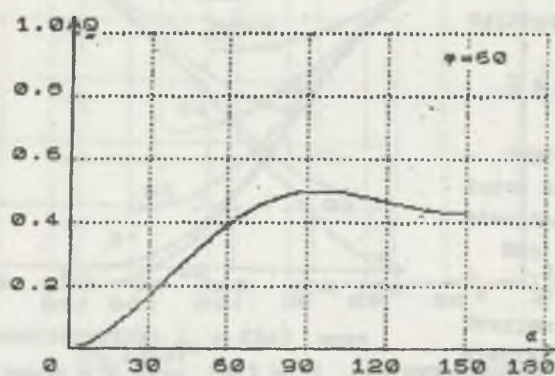
Obliczenia wszystkich charakterystyk wykonano na mikrokomputerze ZX Spectrum. Obliczenia kąta α przeprowadzono z dokładnością do jednego stopnia, co rzutuje na dokładność wszystkich pozostałych obliczeń.

Wnioski

1. Zakres sterowania tyrystorami jest zależny od kąta fazowego φ , przy czym maksymalna wartość kąta opóźnienia włączenia tyrystorów jest równa $\varphi + \frac{\pi}{2}$.

2. Wartość skuteczna prądu obciążenia, a tym samym i współczynnika mocy układu, przy stałej rezystancji obciążenia, maleje ze wzrostem kąta α , przy czym maleje szczególnie mocno przy dużych wartościach kąta φ . Podobny charakter mają charakterystyki mocy pobieranej przez obciążenie.

3. Maksymalna wartość mocy biernej pobieranej przez układ wynosi 50% maksymalnej mocy czynnej pobieranej przez obciążenie, przy czym maksimum to występuje przy kątach $\alpha > \frac{\pi}{2}$. Dla dużych kątów φ można przyjąć, że maksymalna wartość Q wystąpi przy $\alpha = \frac{\pi}{2}$.



Rys. 8. Charakterystyki $Q = f(\alpha)$ przy $\varphi = \text{const}$
 Fig. 8. Characteristics $Q = f(\alpha)$ at $\varphi = \text{const}$

4. Skuteczna wartość prądu płynącego przez dławik zależy zarówno od kąta α , jak i φ , przy czym jej maksimum występuje przy α_{\max} . Im większa jest wartość φ , tym mniejsza skuteczna wartość prądu dławika. Przykładowo, dla $\varphi = 75^\circ$ maksimum tej wartości wynosi 25,9% maksymalnej skutecznej wartości prądu obciążenia. Dla $\varphi = 90^\circ$ prąd dławika jest równy zero.

5. Przedstawione charakterystyki dają możliwość poprawnego doboru dławika i tyrystorów, jak również optymalnych parametrów elektrycznych określonych względami technologicznymi.

LITERATURA

- [1] Poźniak T.: Sterowniki prądu przemiennego tyrystorowo-magnetyczne i tyrystorowe. Przegląd Elektrotechniczny Nr 1, 1976.
- [2] Rodacki T.: Analiza i synteza tyrystorowych układów zasilania odbiorników łukowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka z. 96, 1985.
- [3] Gelman M.W., Lochoy S.P.: Tiristornyje regulatory pieremiennogo napriazhenija. Energija, Moskwa 1975.
- [4] Fryze S.: Moc czynna, bierna i pozorna w obwodach o przebiegach odkształconych prądu i napięcia. Przegląd Elektrotechniczny nr 7, 8; 1931.

Recenzent: doc. dr inż. Józef Dancewicz

Wpłynęło do redakcji dn. 1 października 1986 r.

ТИРИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ С РЕАКТОРОМ

Р е з ю м е

В статье представлены результаты анализа системы однофазного тиристорного регулятора переменного напряжения, работающего с чисто резисторной нагрузкой, симулирующей электрическую дугу. При помощи микро-ЭВМ рассчитаны переходные процессы тока нагрузки и характеристики угла выключения тиристоров, характеристики действующих значений токов нагрузки, реактора и тиристора а также характеристики активной и реактивной мощности системы.

Приведённые характеристики используются для подбора реактора и тиристоров а также оптимальных электрических параметров системы питающей электрической дугу.

THYRISTOR A.C. VOLTAGE CONTROLLER WITH REACTOR

Summary

Results of the single-phase thyristor ac voltage controller analysis with resistive load, which simulates electric arc, are presented in the paper.

Using microcomputer there are calculated load current waveforms and characteristics of the thyristor extinction angle, characteristics of the rms load, reactor and thyristor currents and characteristics of the system active and reactive power as a function of the firing angle.

Correct selection of the reactor and thyristors is possible using the presented characteristics. The estimation of the optimal electric arc parameters using this characteristics is possible, too.

