

EDWARD PRZENIOSŁO, HENRYK KOLKA

## PRZETWORNICA TYRYSTOROWA Z KOMUTACJĄ SZEREGOWĄ

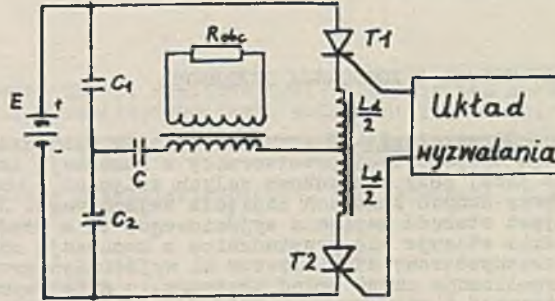
**Streszczenie.** W artykule została przedstawiona koncepcja tyrystorowej przetwornicy z komutacją szeregową, pracującej przy stosunkowo małych zmianach obciążenia, lecz przy dużych zmianach napięcia wejściowego. Jeżeli wymagana jest stałość napięcia wyjściowego, to w tradycyjnym układzie stosuje się przetwornicę z komutacją równoległą oraz tranzystorowy stabilizator na wyjściu (po prostowniku). Taka realizacja czyni układ złożonym, o małej sprawności energetycznej i nie zawsze możliwym do realizacji z powodu ograniczeń napięciowych (dopuszczalne napięcie dla tranzystorów stabilizatora). W artykule problem ten rozwiązano, przyjmując koncepcję przetwornicy z komutacją szeregową, której układ sterujący jest przetwornicą Royera zasilaną mostkowo. To pozwala na regulację napięcia wyjściowego przy zmianach częstotliwości pracy układu wyzwalającego.

Niniejszy artykuł zawiera analizę i sposób doboru elementów przetwornicy z komutacją szeregową oraz uwagi dotyczące regulacji napięcia wyjściowego przy dużych zmianach napięcia zasilającego. Uwagi te nasunęły się przy wykonywaniu przez autorów praktycznego układu. W rozwiązaniu przyjęto wersję przetwornicy z szeregową komutacją, której układ sterujący jest zasilany mostkowo napięciem stałym  $E$  i napięciem proporcjonalnym do napięcia wyjściowego na uzwojeniu wtórnym transformatora. Zmiany napięcia wyjściowego spowodowane zmianami napięcia zasilającego są kompensowane przez zmianę częstotliwości pracy układu sterującego. Pozwala to wyeliminować bardzo niekorzystny pod względem energetycznym tranzystorowy stabilizator napięcia. Rozwiązanie takie jest możliwe, gdy układem sterującym jest przetwornica Royera, której częstotliwość pracy zależy od napięcia zasilającego. W artykule opisano sprawdzony praktycznie przez autorów sposób doboru elementów przetwornicy ze względu na maksymalne napięcie wyjściowe. Zaletami przetwornicy szeregowej, które zadecydowały o jej przydatności w tym przypadku były:

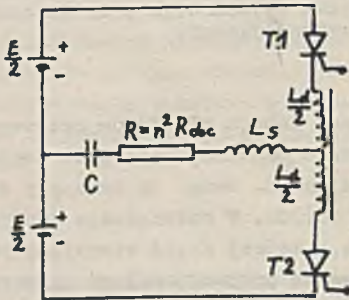
- sinusoidalne napięcie wyjściowe przy odpowiednim doborze elementów i częstotliwości pracy,
- mniejsze straty komutacyjne przy większych częstotliwościach (powyżej 500 Hz) w stosunku do przetwornicy z komutacją równoległą,
- awaria układu sterującego nie powoduje zwarcia źródła zasilania,
- czas wyłączenia tyrystora może stanowić poważną część okresu,

- zastosowanie dławików sprzęgniętych magnetycznie stwarza lepsze warunki komutacji przy zmianach obciążenia w szerokich granicach.

Wykonywana przetwornica była realizowana w układzie z rys. 1. Obciążenie czysto oporowe jest włączone poprzez transformator o przekładni  $n$ .



Rys. 1. Podstawowy układ przetwornicy szeregowej



Rys. 2. Zmodyfikowany układ przetwornicy szeregowej

Ponieważ w praktycznym układzie musi zachodzić zależność  $C_1 = C_2 \gg C$ , to do analizy wygodniej jest ten układ przekształcić do postaci z rys. 2, w którym

$$R = n^2 \cdot R_{obc} \quad (1)$$

Przy załączonym tyrystorze T1 obwód rezonansowy:  $C, R, L = L_s + L_d/2$  zostaje załączony na napięcie  $\frac{E}{2}$ . Wpływ pozostałej indukcyjności  $L_d/2$  można pominąć przy założeniu, że czas wyłączenia tyrystorów jest bardzo mały w stosunku do okresu pracy przetwornicy. Wyłączenie tyrystora nastąpi w momencie, gdy przebieg oscylacyjny prądu przejdzie przez zero. Warunkiem wystąpienia przebiegów oscylacyjnych jest

$$R < 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

Przy tym założeniu prąd i napięcia w obwodzie przewodzącego tyrystora są wyrażone równaniami:

prąd tyrystora

$$i(t) = \frac{\frac{E}{2} + U_{co}}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (3)$$

napięcie na oporności

$$u_R(t) = \frac{\frac{E}{2} + U_{co}}{\omega L R} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (4)$$



napięcie na kondensatorze komutacyjnym

$$u_c(t) = E \left[ 0,5 - \left( \cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) e^{-\alpha t} \right], \quad (5)$$

gdzie

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Napięcie kondensatora opisane równaniem (5) osiąga wartość  $U_{c0}$  w chwili, gdy prąd obciążenia przechodzi przez zero ( $t = \frac{\pi}{\omega}$ )

$$U_{c0} = E \left( 0,5 + e^{-\frac{\alpha \pi}{\omega}} \right). \quad (6)$$

Parametry układu były dobierane ze względu na maksymalną wartość sinusoidalnego napięcia na obciążeniu. Po rozwiązaniu równania

$$\frac{d U_R(t)}{dt} = 0$$

otrzymano w postaci bezwymiarowej zależność przedstawioną na rys. 3

$$\frac{U_{Rmax}}{E} = x \left( 1 + e^{-\frac{\pi x}{\sqrt{4-x^2}}} e^{-x \frac{\arctg \frac{\sqrt{4-x^2}}{x}}{\sqrt{4-x^2}}} \right), \quad (7)$$

gdzie

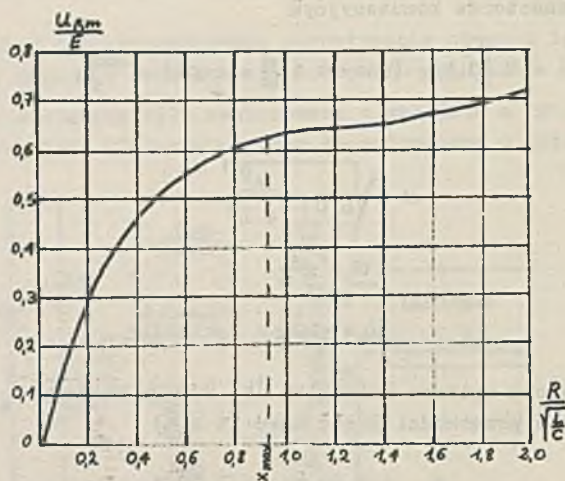
$$x = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

Aby układ pracował prawidłowo, maksymalna wartość zastępczej oporności obciążenia musi spełnić warunek (2). Ze względu na tolerancję elementów i zmiany parametrów układu przyjmuje się

$$\omega \Big|_{\text{dla } R_{obc \max}} = 0,9 \omega_n,$$

skąd otrzymano warunek minimalnego obciążenia zaznaczony na rys. 3 linią przerywaną

$$x_{\max} = \frac{R_{\max}}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = 0,87. \quad (8)$$



Rys. 3. Zależność maksymalnego napięcia na oporności od parametrów obwodu i obciążenia

Zakładając częstotliwość sterowania równą  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$  przy wymaganej wartości napięcia wyjściowego i zmianach obciążenia na podstawie rys. 3 znajdujemy  $L$  i  $C$ .

Obliczenia  $L_{d/2}$  i  $L_g$  dokonuje się na podstawie znajomości  $Q = \frac{\omega L}{R}$  [1] [4]. Tyryistory T1 i T2 dobierane są ze względu na średnią wartość prądu płynącego w nim [1].

Analiza układu została przeprowadzona przy założeniu stałego napięcia zasilającego i niezmiennego obciążenia. W realizowanym układzie napięcie zasilające zmieniało się o  $-30\% \div +10\%$ . Przy tak dużych zmianach nieekonomiczne jest załączenie na wyjściu przetwornicy stabilizatora tranzystorowego. Korzystniejsza jest regulacja napięcia wyjściowego przez zmianę częstotliwości sterowania przetwornicy (zasilanie mostkowe układu sterującego - rys. 4).

Analizując mostek składający się z elementów  $R_1, R_2, R_3, R_4$  i diody Zenera ( $U_z, r_z$ ) przy założeniach

$$R_1 \gg r_z, \quad R_4 \gg r, \quad R_2 + R_3 \gg r, \quad R_2 + R_3 \gg R_4$$

otrzymano zależność określającą napięcie zasilające generatora

$$U_r = \frac{U_z - a E - b U_{wy}}{R_r + a R_2} R_r, \quad (9)$$

gdzie

$$a = \frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4}$$





Analiza teoretyczna i wyniki przy jej pomocy otrzymane zostały w pełni potwierdzone przez pomiary praktycznego układu. W trakcie opracowywania układu przetwornicy szeregowej wynikły następujące wnioski i uwagi:

- najlepszą częstotliwością pracy jest  $600 \div 900$  Hz, gdyż powyżej tej częstotliwości straty w elementach indukcyjnych znacznie rosną;
- w przypadku, gdy częstotliwość wyzwalająca jest większa od częstotliwości drgań układu, można otrzymać przebiegi o ostrych zboczach, co w szczególnych przypadkach jest wygodne (przy obciążeniu układu prostownikiem);
- przy odpowiednim doborze elementów osiąga się sprawność przetwornicy ponad 50%, co przy mocy kilkudziesięciu watów jest znacznie korzystniejsze niż przy przetwornicy równoległej dla tej samej częstotliwości pracy;
- znaczne podwyższenie częstotliwości przetwarzania ( $\sim 900$  Hz) pozwala na wyraźne zmniejszenie filtra wejściowego i wyjściowego oraz wymiarów transformatora;
- przy krótkotrwałych przerwach w dostarczaniu napięcia E przetwornica nie wykazuje tendencji do zwierania źródła zasilania, co niestety stwierdzono w układach z komutacją równoległą,
- właściwie zaprojektowany układ ma możliwość pracy przy stanach bliskich zwarciovym.

Układ posiada jednak szereg istotnych wad, które ograniczają jego zastosowania. Są to:

- przy danym obwodzie komutacyjnym - ograniczony zakres zmian  $R_{obc}$ , ze względu na wynikające stąd dosyć duże zmiany  $U_{Rmax}$  (7) oraz zmiany  $\omega$ . Jeżeli przetwornica pracuje na układ prostowniczy, to zmianę  $U_{Rmax} = f(R)$  można wyraźnie zmniejszyć przez wprowadzenie napięcia proporcjonalnego do  $U_{wy \text{ } \acute{s}r}$  na opornik  $R_4$  mostka zasilającego układ sterujący. Zmiany  $U_{wy \text{ } \acute{s}r}$  powodują zmiany częstotliwości pracy układu sterującego i zgodnie z zależnością (10) zmieniają  $U_{wy \text{ } \acute{s}r}$  uniezależniając go od zmian  $R_{obc}$ ,
- zbyt wysoka częstotliwość pracy powoduje duże straty w dławikach - co wyraźnie obniża sprawność,
- modyfikacja podstawowego układu polegająca na wprowadzeniu diod D1 i D2 (rys. 4) wymaga bardzo starannego doboru tych elementów ze względu na ich własności dynamiczne.

#### LITERATURA

1. Gentry F.E., Gutzwiller F.W., Holonyak N., Von Zastrow E.E.: Tyrystory półprzewodnikowe prostowniki sterowane. Warszawa 1969. WNT.
2. Lekorgije Ż.: Uprawlamyje elektriczeskije wentili i ich primienienie. Moskwa 1971. Energia.
3. Atabekow G.I.: Teoria liniowych obwodów elektrycznych. Warszawa 1964. WNT.



4. Mapham N.: An SCR inverter with good regulation and sinewave output. New York 1967. General Electric Company.
5. Kulik W.D.: Wybor pojemności filtra tyrystorowo inwertora. Elektryczystwo nr 3. 1970.
6. Iwiński G.W.: Tyrystorowe przetwornice dla elektrotermicznych urządzeń. Elektrotermia nr 12. 1970.

### ТИРИСТОРНЫЙ ИНВЕРТЕР С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ КОМУТАЦИЕЙ

#### Р е з ю м е

В статье освещается предложение тиристорного инвертера с последовательной коммутацией, работающей при сравнительно незначительных изменениях нагрузки, однако при больших изменениях входного напряжения. Если требуется постоянное входное напряжение то в традиционной системе применяются инвертер с транзисторным стабилизатором у выхода. Такая последовательность сложнее, мало эффективна энергетически а не всегда возможна в практике по поводу ограничения напряжения. В этой статье задача решается при условии принятия возможность инвертера с последовательной коммутацией, который управляется инвертером Роера питаемой мостком. Это позволяет регулировать входное напряжение при переменах частоты работы управляемой системы.

### THYRISTOR INVERTER WITH SERIES COMMUTATION

#### S u m m a r y

An idea of the thyristor inverter with series commutation, performing at comparatively small changes of the load, but rather high changes of the input voltage, is given. Usually, in cases where output voltage should be constant a parallel inverter with transistor voltage regulator is employed. This unit, however, has a rather complicated and its watt-hour efficiency is low. To avoid this, a series inverter with bridge Royer inverter as a control device was used. Consequently, the output voltage of the inverter is controlled by changing the operating frequency of the control device.