

BOGUSŁAW GRZESIK  
HENRYK WOSIŃSKI

Instytut Podstawowych Problemów  
Elektrotechniki i Energoelektroniki

#### MODELOWY PRZEMIENNIK CZĘSTOTLIWOŚCI Z KSZTAŁTOWANIEM NAPIĘCIA WYJŚCIOWEGO POPRAZ MODULACJE SZEROKOŚCI IMPULSÓW

Streszczenie. W artykule przedstawiono budowę obwodów głównych i sterowniczych modelowego przemiennika częstotliwości z pośredniczącym obwodem prądu stałego. Przemiennik jest przeznaczony do zasilania trójfazowego silnika asynchronicznego. Napięcie wyjściowe przemiennika o zmiennej częstotliwości kształtowane jest przez modulację szerokości impulsów w falowniku z komutacją impulsową.

Omawiany przemiennik częstotliwości jest przeznaczony do zasilania silników napędzających urządzenia dźwigniowe.

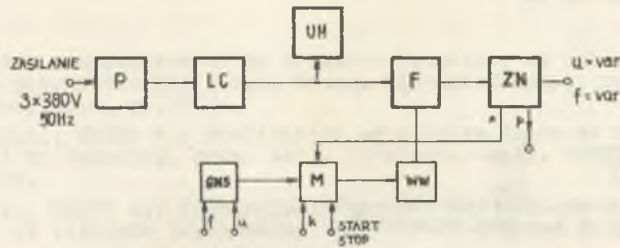
Podstawy teoretyczne dotyczące omawianego układu zostały podane w artykule B. Grzesika i W. Wosińskiego pt. "Problemy falowników z modulacją szerokości impulsów przeznaczonych do zasilania silników asynchronicznych".

Do budowy wybrano układ, który cechował się następującymi własnościami:

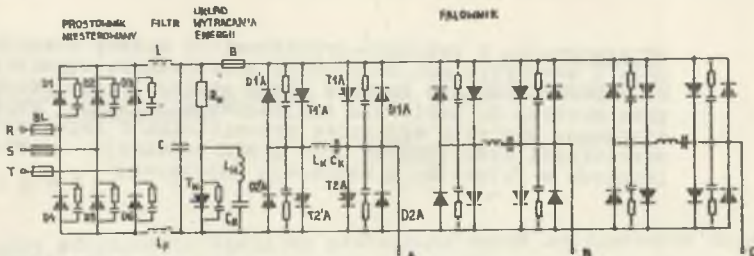
- 1) szerokim zakresem płynnej zmiany częstotliwości i amplitudy napięcia wyjściowego,
- 2) możliwością uzyskania częstotliwości równej zero,
- 3) bezstykową zmianą kolejności faz,
- 4) dwukierunkowym przepływem energii,
- 5) możliwością współpracy z typowymi silnikami asynchronicznymi.

Model przemiennika wykonany w laboratorium zawiera falownik trójfazowy o komutacji grupowej, w którym zachodzi dwupolarna, jednostronna modulacja szerokości impulsów drugiego rzędu.

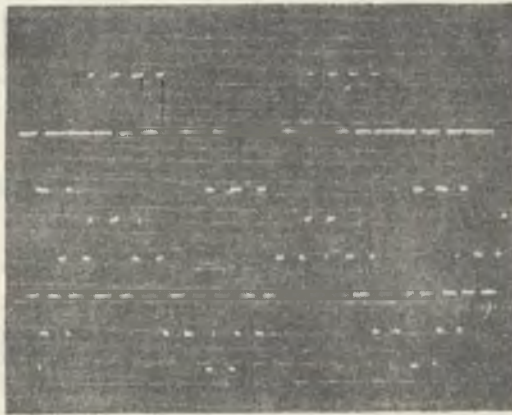
Schemat blokowy przemiennika częstotliwości przedstawiono na rys. 1 zaś schemat obwodów głównych na rys. 2. Pośredniczący obwód prądu stałego o nieregulowanym napięciu zasilany jest z siecią przemysłowej poprzez niesterowany prostownik P i filtr dolnoprzepustowy L, C. W falowniku F następuje przemiana napięcia wyprostowanego na napięcie o regulowanej amplitudzie i częstotliwości. Regulacja odbywa się na drodze sinusoidalnej modulacji szerokości impulsów napięcia, przy czym amplituda i częstotliwość napięcia zmieniają się proporcjonalnie do sygnałów  $u$  i  $f$  (rys. 1).



Rys. 1. Schemat blokowy modelowego układu przemiennika częstotliwości, gdzie: P - prostownik niesterowany, LC - filtr dolnoprzepustowy, UH - układ hamowania, F - falownik, ZN - blok pomiaru prądu, GNS - generator napięcia sinusoidalnego, M - modulator, WW - wzmacniacze wyjściowe



Rys. 2. Schemat obwodów głównych przemiennika częstotliwości



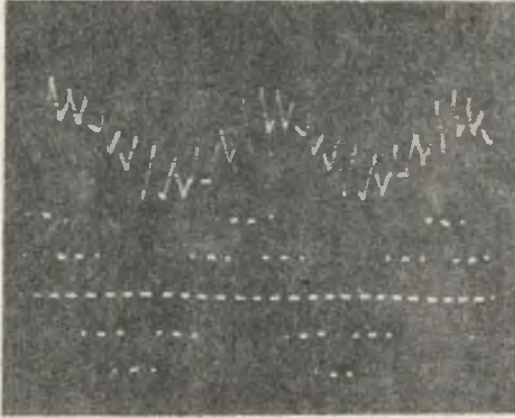
Rys. 3. Oscylogram napięcia międzyprzewodowego (a) i napięcia fazowego (b) przy częstotliwości 30 Hz

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono oscylogramy napięcia fazowego i międzyprzewodowego oraz prąd fazowy przy obciążeniu RL.

Trójfazowy falownik modelowy F zbudowany jest z trzech jednakowych falowników jednofazowych z grupowym obwodem komutacji.

Z bloku pomiarowego prądu ZN (patrz rys. 1) podawany jest sygnał "z" wyłączający falownik z pracy przy przekroczeniu określonej wartości obciąż-

żenia. Nastawienie progu prądowego dla sygnału "z" jest uwarunkowane zdolnością wyłączania węzła komutacji. Sygnał wyjściowy p (rys. 1) może być wykorzystany do sprzężenia prądowego w układzie automatycznej regulacji.

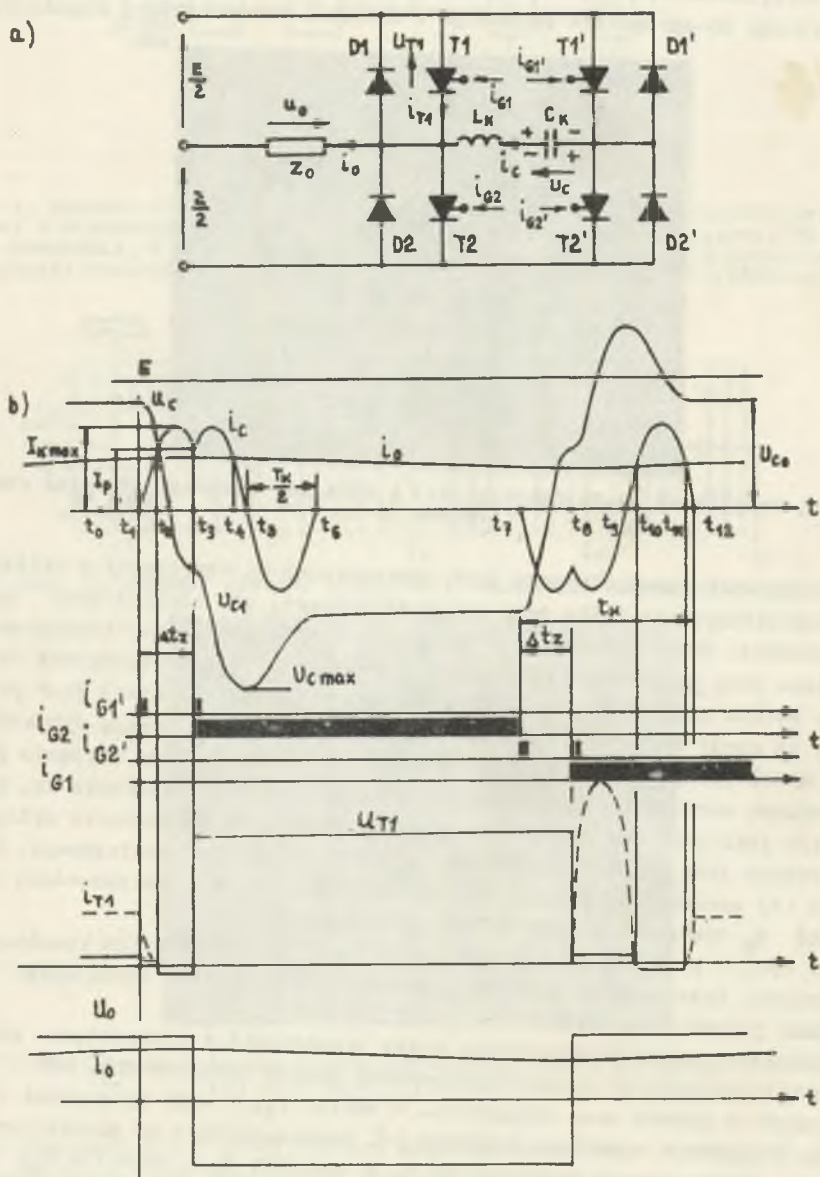


Hys. 4. Oscylogram prądu fazowego (a) i napięcia fazowego (b) przy częstotliwości 30 Hz

Przemiennik częstotliwości jest przeznaczony do współpracy z silnikiem asynchronicznym nie tylko przy pracy silnikowej, ale również przy pracy prądnicowej. Układ hamowania UH (rys. 1), w którym energia elektryczna zamieniana jest na ciepło na oporniku  $R_H$  rozszerza zakres współpracy falownik - silnik asynchroniczny. Obwód sterujący układu hamowania jest przyłączony do anody tyrystora  $T_H$  (rys. 2), tzn. do napięcia prądu wyprostowanego zasilającego falownik. Przy każdym przekroczeniu tego napięcia ponad nastawioną wartość progową następuje włączenie układu hamowania UH, który pracuje jako przerywacz prądu stałego. Wartość progowa napięcia układu UH nastawiona jest powyżej maksymalnej wartości napięcia zasilającego. Ponieważ w tej sytuacji prostownik P jest zablokowany, energia hamowania na opornik  $R_H$  dostarczana jest tylko od strony falownika F.

Na rys. 5 przedstawiono przebiegi napięć i prądów w węzle komutacyjnym falownika. Przebiegi te dotyczą falownika jednofazowego pracującego w układzie jednokierunkowym.

Działanie węzła komutacyjnego można przedstawić w następujący sposób. W chwili początkowej  $t_0$  na kondensatorze panuje napięcie  $U_{C0}$ , zaś przez tyrystor  $T1$  płynie prąd obciążenia. W chwili  $t_1$ , w celu wyłączenia tyrystora  $T1$  zostaje wyzwolony tyrystor  $T2$ . Zapoczątkowuje to proces przeładowania rezonansowego kondensatora  $C_k$  w obwodzie  $C_k-L_k-T1-T1^2-C_k$ , który trwa do chwili  $t_2$ , gdy  $i_0 = i_{T1}$ . W chwili  $t_2$  następuje wyłączenie tyrystora  $T1$  i przejęcie przewodzenia przez diodę  $D1$ . Od tej chwili różnica pomiędzy prądem przeładowania rezonansowego i prądem obciążenia  $i_0$  popłynie przez diodę  $D1$ , a napięcie przewodzenia diody  $D1$  będzie napięciem wstecz-



Rys. 5. Schemat jednofazowego falownika (a); przebiegi czasowe napięć i prądów w układzie jednokierunkowym (b) gdzie  $i_{G1}$ ,  $i_{G2}$ ,  $i_{G2}$ ,  $i_{G1}$  są prądami bramki odpowiednich tyrystorów

nym wyłączonego tyrystora T1. W chwili  $t_3$  impuls sterujący wyzwala tyrystor T2, co zmienia biegunowość na obciążeniu. Prąd obciążenia  $i_o$  zaczyna maleć.

W chwili  $t_3$  kondensator  $C_k$  osiągnął napięcie  $U_{C1} < E$ , przy czym włączenie tyrystora T2 rozpoczyna proces doładowania rezonansowego kondensatora  $C_k$  w obwodzie:  $C_k-L_k-T2-E-T1'-C_k$ . W chwili  $t_5$  napięcie na kondensatorze  $C_k$  osiąga wartość maksymalną  $U_{Cmax}$ , a prąd obwodu komutacyjnego jest równy zero. W chwili  $t_4$  gdy  $i_o = i_o$  przestaje przewodzić tyrystor T2 a rozpoczyna pracę dioda D2 umożliwiając przepływ prądu obciążenia  $i_o$ .

W chwili  $t_5$  rozpoczyna się rozładowanie rezonansowe kondensatora  $C_k$ ; prąd rozładowania płynie do źródła E w obwodzie:  $C_k-D1'-E-D2-L_k-C_k$  ponieważ napięcie  $U_{Cmax}$  jest większe od E. Proces komutacji kończy się w chwili  $t_6$ , gdy  $i_o = 0$ . Biegunowość okładek kondensatora  $C_k$  zmienia się na przeciwną w stosunku do biegunowości jaka była w chwili  $t_0$ . Daną biegunowość okładek kondensatora zaznaczono na rys. 5 pod kondensatorem. Kondensator jest więc przygotowany do kolejnej komutacji. Napięcie na obciążeniu w chwili  $t_6$  posiada przeciwną biegunowość niż w chwili  $t_0$ .

Zmiana kierunku prądu obciążenia przerywa przewodzenie diody D2 i tyrystor T2 może wejść w przewodzenie. W związku z tym na bramce tyrystora T2 powinien trwać od chwili  $t_3$  lub pojawić się w chwili zmiany kierunku prądu obciążenia  $i_o$  impuls wyzwalający.

Celem włączenia na obciążenie w chwili  $T_7$  napięcia o biegunowości dodatniej, na bramkę tyrystora T2' przykłada się impuls sterujący. Załączenie tyrystora T2' zapoczątkowuje proces przeładowania rezonansowego kondensatora  $C_k$  w obwodzie:  $C_k-T2'-D2-L_k-C_k$ , przez co zabezpiecza się wyłączenie tyrystora T2 w przypadku gdyby przewodził.

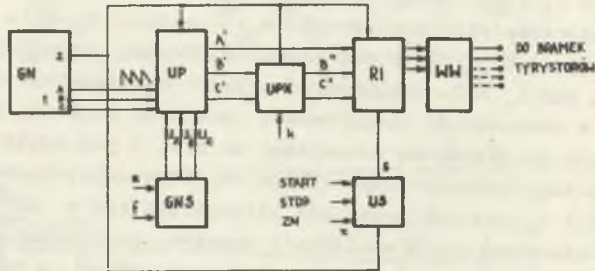
W chwili  $t_8$  włącza się tyrystor T1 przejmując prąd  $i_o$ . Rozpoczyna to proces rezonansowego doładowania kondensatora  $C_k$  w obwodzie:  $C_k-T2'-E-T1-L_k-C_k$ . Napięcie na obciążeniu  $u_o$  zmienia biegunowość, a prąd  $i_o$  zaczyna wzrastać. W chwili  $t_9$  rozpoczyna się rozładowanie kondensatora  $C_k$  w obwodzie:  $C_k-L_k-T1-E-D2'-C_k$ , które kończy się, gdy  $i_o = i_o$ . Różnica prądu  $i_o$  i prądu obciążenia  $i_o$  przepływa w okresie  $t_{10}$  do  $t_{11}$  przez diodę D1 dając na tyrystorze T1 napięcie w kierunku wstecznym. Aby w chwili  $t_{11}$  tyrystor T1 rozpoczął pracę na jego bramkę, należy podać sygnał sterujący. Sygnał sterujący na bramce tyrystora T1 powinien trwać co najmniej od chwili  $t_8$  do chwili  $t_{12}$ .

Proces cyklu komutacji falownika kończy się w chwili  $t_{12}$ .

Działanie węzła komutacyjnego przedstawiono dla czasu zwłoki  $\Delta t_z < \frac{T_k}{2}$  (rys. 5). Gdyby  $\Delta t_z > \frac{T_k}{2}$ , to w chwilach rozpoczynania doładowania, na tyrystory T1' i T2' należałoby podać dodatkowe impulsy sterujące o czasie trwania dłuższym od  $\Delta t_z$ .

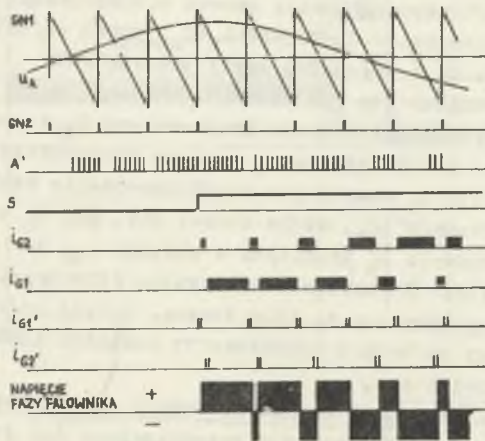
Konieczność uzyskania jak najmniejszego maksymalnego napięcia w kierunku przewodzenia tyrystorów falownika zdecydowała o wyborze węzła komutacji. W omawianym układzie napięcie to jest równe napięciu źródła E. Węzeł

komutacyjny w układzie modelowym pracuje przy czasie zwłoki  $\Delta t_z < \frac{T_k}{2}$  z tym, że maksymalna wartość prądu obciążenia  $I_{O \max}$  w chwilach  $t_3$  i  $t_8$  jest mniejsza od prądu komutacji  $I_p$ , co uniezależnia napięcie na kondensatorze  $U_{O0}$  od prądu obciążenia  $I_O$ . W wyniku tego falownik uzyskuje stałą zdolność komutacji, przy czym dynamiczne własności obwodu obciążenia nie mają wpływu na proces komutacji. W wyniku uniezależnienia procesów komutacyjnych od charakteru obciążenia falownika, uzyskuje się prostokątny przebieg napięcia na obciążeniu.



Rys. 6. Schemat blokowy układu sterującego:

GN - generator częstotliwości nośnej, UP - układ porównujący, UPK - układ przełączający kolejność faz, RI - rozdzielacz impulsów, WW - wzmacniacze wyjściowe, GNS - generator napięcia sinusoidalnego, US - układ startowy

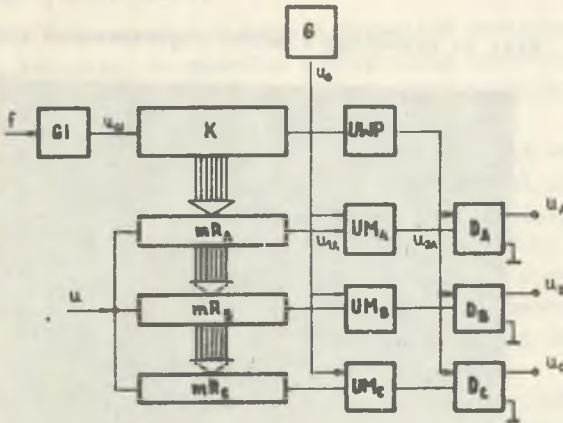


Rys. 7. Przebiegi czasowe sygnałów w układzie sterującym (oznaczenia jak na rys. 5)

Na rys. 6 przedstawiono schemat blokowy układu sterującego, a na rys. 7 przebiegi czasowe sygnałów w poszczególnych punktach tego układu, przebiegi sygnałów brankowych poszczególnych tyrystorów oraz przebieg napięcia fazowego falownika.

Układ sterujący z rys. 6 składa się z następujących bloków:

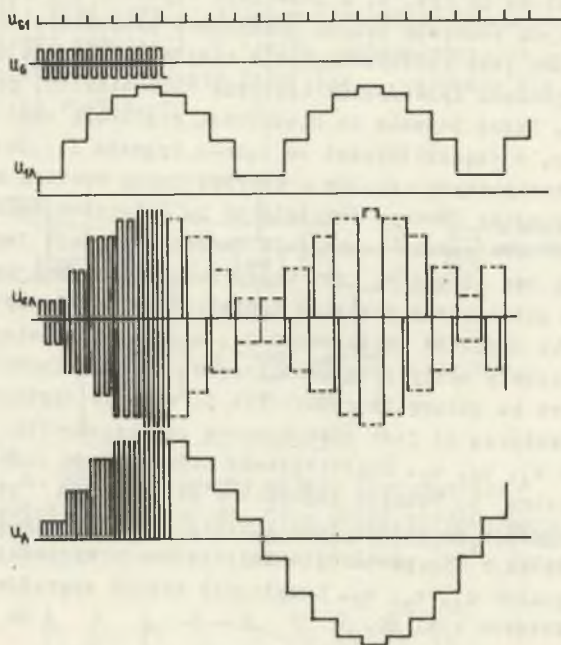
GNS - generator napięcia sinusoidalnego. Schemat blokowy tego generatora przedstawiono na rys. 8, a przebiegi sygnałów dla jednej fazy w poszczególnych punktach układu generatora przedstawiono na rys. 9. Generator GNS jest źródłem napięcia trójfazowego modulującego; daje on na wyjściach symetryczne napięcia sinusoidalne, przesunięte w fazie o  $\frac{2\pi}{3}$ . Układ pozwala na niezależną regulację amplitudy za pomocą sygnału  $u$ , a częstotliwości za pomocą sygnału  $f$ . Składa się on z trzech identycznych kanałów z których każdy zawiera matrycę  $mR$ , układ modulujący UM oraz demodulator D. Elementem umożliwiającym zapisanie i odtworzenie na wyjściu dowolnej funkcji jest matryca  $mR$ . Pozostałe dwa elementy, tzn. układ modulujący UM i demodulator D zapewniają galwaniczny rozdział wszystkich wyjść i uzyskanieżądanego znaku sygnałów wyjściowych  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$ . Komutator K wyznacza kolejno elementy matrycy  $mR$  określające zapisaną funkcję. W tym przypadku jest to sinusoida. Generator GI steruje szybkością przełączania komutatora, co jest równoznaczne ze sterowaniem częstotliwości sygnałów  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$ . Częstotliwość nośną układu modulacyjnego podaje generator G. Funkcja zapisana w matrycy  $mR$  jest przenoszona, przez sygnał  $u$  do układu modulacyjnego UM i demodulatora D dzięki czemu uzyskuje się proporcjonalnie do zmian sygnału  $u$  zmiany amplitudy sygnałów  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$ . Oscylogram napięć sygnałów wyjściowych  $u_A$ ,  $u_B$  przedstawia rys. 10.



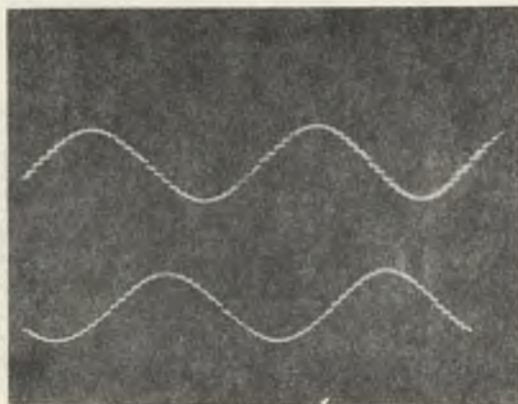
Rys. 8. Schemat blokowy generatora napięcia sinusoidalnego GNS

GN - generator częstotliwości nośnej. Generator ten wytwarza na wyjściu 1 napięcie piłkowe o określonej częstotliwości, a na wyjściu 2 na początku okresu napięcia piłkowego impuls taktowy. Generator jest zbudowany na elementach krzemowych i pracuje w układzie rozładowania kondensatora stałym prądem. Sygnał z wyjścia 2 generatora kierowany

jest do układu porównującego UP, układu przełączającego kolejność faz UPK, układu rozdzielającego impulsy RI oraz układu startowego US.



Rys. 9. Przebiegi czasowe w generatorze GNS



Rys. 10. Oscylogramy napięć sygnałów wyjściowych  $u_A$ ,  $u_B$  generatora GNS

UP -- układ porównujący. Składa się z trzech identycznych kanałów fazowych. W każdym kanale w chwili gdy napięcie pilowe z generatora GN



jest równe napięciu sinusoidalnemu danej fazy generatora GNS (rys. 7) generowany jest impuls.

UPK - układ przełączający kolejność faz. Dokonuje bezstykowej zmiany kolejności impulsów faz B' i C' podawanych do rozdzielacza impulsów RI. Układ przełącza kolejność faz pod wpływem sygnału k, z tym, że zmiana ta może nastąpić jedynie w chwili kiedy wszystkie tyrystory falownika są wyłączone.

RI - rozdzielacz impulsów. Kształtuje i rozdziela impulsy wzmacniane we wzmacniaczach WW) na poszczególne tyrystory falownika. Rozdzielacz impulsów rozpoczyna pracę w chwili otrzymania sygnału startowego S. Początek sygnału startowego może wystąpić jedynie na początku okresu taktu. Spełnienie tego warunku zapewnia układ startowy US.

US - układ startowy. Układ ten otrzymuje sygnał "z" z układu pomiaru prądu ZN rys. 1. Sygnał ten wyłącza rozdzielacz impulsów RI jak również i falownik F.

Omawiany układ zasilany jest z sieci przemysłowej 3x380 V, 50 Hz. Zakres zmian częstotliwości napięcia wyjściowego wynosi 0,6 do 50 Hz, przy czym przejście z częstotliwości 0,6 Hz na częstotliwość zerową odbywa się skokowo. Uzyskane wyjściowe napięcie międzyprzewodowe mieści się w zakresie od 12 V do 220 V. Układ pracuje przy częstotliwości nośnej 400 Hz. Napięcie progowe, przy którym włącza się układ hamowania wynosi 543 V, przy znamionowym napięciu obwodu prądu stałego równym 530 V.

Doświadczenia zebrane przy budowie i badaniach omówionego przemiennika częstotliwości wskazują, że poprawna i niezawodna praca całego układu zależy przede wszystkim od poprawnej i niezawodnej pracy układu sterującego.

Układ sterujący powinien cechować się odpornością na zakłócenia przemysłowe, których bardzo silnym źródłem są obwody główne przemiennika częstotliwości. Zastosowany układ sterujący jest uniwersalny, gdyż można z niego uzyskać dowolne funkcje modulujące np. prostokątną, trapezową, sinusoidalną. W układzie istnieje możliwość regulowania częstotliwości nośnej. W przypadku gdy częstotliwość nośna jest równa częstotliwości wyjściowej omawiany układ pracuje jak falownik o kolejnych komutacjach bez modulacji szerokości impulsów.

Bezinercyjne sterowanie amplitudy i częstotliwości pozwala na elastyczną pracę przemiennika częstotliwości w układach automatycznej regulacji.

Zasilanie przemiennika częstotliwości z sieci przemysłowej prądu przemiennego poprzez prostownik niesterowany pozwala uzyskać na wejściu stały współczynnik mocy bliski jedności. Układ ten umożliwia zasilanie falownika F bezpośrednio z dowolnego źródła prądu stałego o stałym napięciu. Przy projektowaniu tego typu przemiennika częstotliwości należy szczególną uwagę zwrócić na własności dynamiczne tyrystorów. Należy stwierdzić, że ty-

rystory o lepszych własnościach dynamicznych pozwalają między innymi na uzyskanie wyższego napięcia i wyższej częstotliwości na wyjściu przemiennika.

#### LITERATURA

1. Silicon controlled rectifier manual, General Electric Co., New York, 1967.
2. PAŁCZYŃSKI B., STEFAŃSKI W.: Projektowanie układów z przyrządami półprzewodnikowymi, WKŁ W-wa 1969.
3. SCHÖNUNG A., STEMLER H.: Geregelter Drehstrom-Umkehrantrieb mit gesteuertem Umrichter nach dem Unterschwingungsverfahren, Brown Boveri Mitt 1964 nr 8/9.
4. SITNIK N.H.: Avtonomnyje inwertory s otdielenymi ot nagruzki kondensatorami, Moskwa 1968.
5. Priebrazowatielnaja tehnika, Nowosibirski Instytut Elektrotehniki 1968.
6. II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Zautomatyzowanego napędu - materiały - Praha 1971.
7. BUŁGAKOW A.A.: Czastotnoje upravlenie asinohronnymi elektrowigatielami, Nauka, Moskwa 1966.
8. ABRAHAM L., NEUMANN K., KOPPELMANN F.: Wechselrichter zur Drehzalsteuerung von Käfiglaufermotoren, AEG Mitt. 1964. 1/2.
9. GRZESIK B., WOSIŃSKI H.: Problemy falowników z modulacją szerokości impulsów przeznaczonych do zasilania silników asynchronicznych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka nr 35 1972.
10. Praca zbiorowa pod red. Z. Kuozewskiego "Tyrystorowe napędy elektryczne" Katowice 1970.

Przyjęto do druku w styczniu 1972 r.

#### МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

#### Резюме

В статье представлено построение силовых и управляемых цепей модельного преобразователя частоты со звеном постоянного тока, предназначенного для питания трехфазных асинхронных двигателей. Формировку выходного напряжения преобразователя с регулируемой частотой получаем в этой установке при помощи инвертора с широтно-импульсной, синусоидальной модуляцией.

A DESIGN OF FREQUENCY CONVERTER FOR SHAPING THE OUTPUT VOLTAGE BY PULSE WIDTH MODULATION

S u m m a r y

Arrangement of main and control wiring of a new frequency converter with an intermediate. D.C. circuit intended for feeding three-phase asynchronous motors is presented. Output voltage of the variable frequency converter is shaped by pulse width modulation with a forced commutation inverter.