

JAN KRZĄKAŁA, BRUNON MAREK

Biprohut Gliwice

Instytut Elektryfikacji

i Automatyzacji Górnictwa

### TYRYSTOROWE PRZEMIENNIKI CZĘSTOTLIWOŚCI W GRZEJNICTWIE INDUKCYJNYM

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono podstawowe układy zasilania wzbudników w grzejnictwie indukcyjnym z tyrystorowych przemienników częstotliwości. Porównano właściwości poszczególnych układów przemienników częstotliwości.

Do celów indukcyjnego nagrzewania stosuje się pola elektromagnetyczne, które wytwarzane są w wzbudnikach zasilanych z generatorów elektromaszynowych lub z statycznych przemienników częstotliwości. W stosunku do generatorów elektromaszynowych statyczne przemienniki częstotliwości charakteryzują się następującymi zaletami:

- 1) Statyczny przemiennik częstotliwości nie wymaga specjalnego fundamentu koniecznego przy zastosowaniu generatora elektromaszynowego.
- 2) Statyczny przemiennik częstotliwości w stosunku do generatora maszynowego jest około dwukrotnie lżejszy.
- 3) Sprawność przemiennika częstotliwości dużej mocy wynosi około 90-93% natomiast generatora elektromaszynowego około 80-90%.
- 4) Rozruch przemiennika następuje natychmiast, natomiast dla generatora elektromaszynowego czas rozruchu wynosi około jednej minuty.
- 5) Statyczny przemiennik częstotliwości posiada dobre właściwości regulacyjne (duża szybkość i dokładność regulacji).
- 6) Przemiennik częstotliwości nie wytwarza wibracji i szumów charakterystycznych dla pracy generatora elektromaszynowego.

### Podział statycznych przemienników częstotliwości w zastosowaniu dla układów grzejnictwa indukcyjnego

W układach zasilania wykorzystuje się dwa sposoby komutacji tyrystorów układu falownikowego:

- 1) Komutację za pomocą odbiornika pracującego w pobliżu rezonansu.
- 2) Komutację za pomocą dodatkowej gałęzi LC.

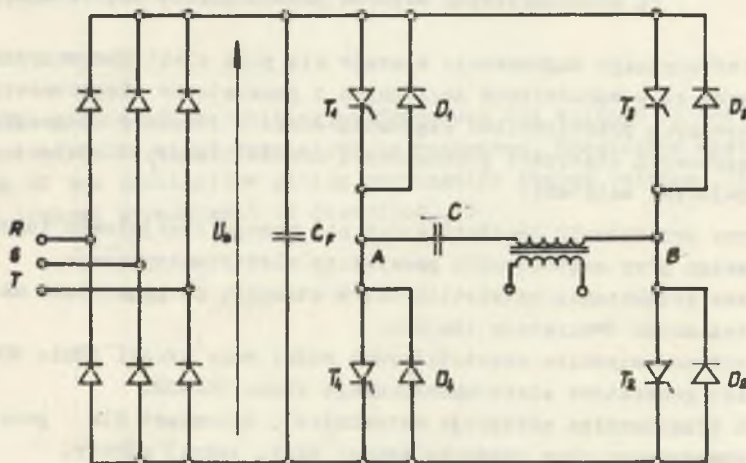
ad.1) Układy przemienników częstotliwości wykorzystujące zjawisko komutacji za pomocą odbiornika pracującego w pobliżu rezonansu są stosowane najczęściej, szczególnie w przypadku przemienników dużej mocy.

ad.2) Przebiegi prądów i napięć w szeregowym obwodzie rezonansowym

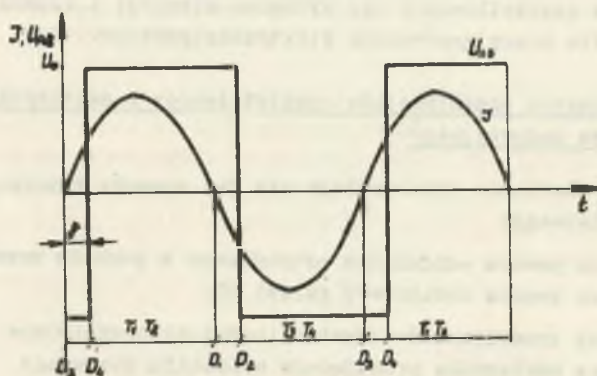
ad.2) Przebiegi prądów i napięć w szeregowym obwodzie rezonansowym

### Statyczny przebiegi prądów i napięć w szeregowym obwodzie rezonansowym

Statyczny przebiegi prądów i napięć w szeregowym obwodzie rezonansowym znajduje szersze zastosowanie przy większej częstotliwości pracy ze względu na łatwiejsze warunki komutacji w tym układzie (komutacja zachodzi przy przejściu prądu w obwodzie rezonansowym przez zero). Na rys. 1 przedstawia-

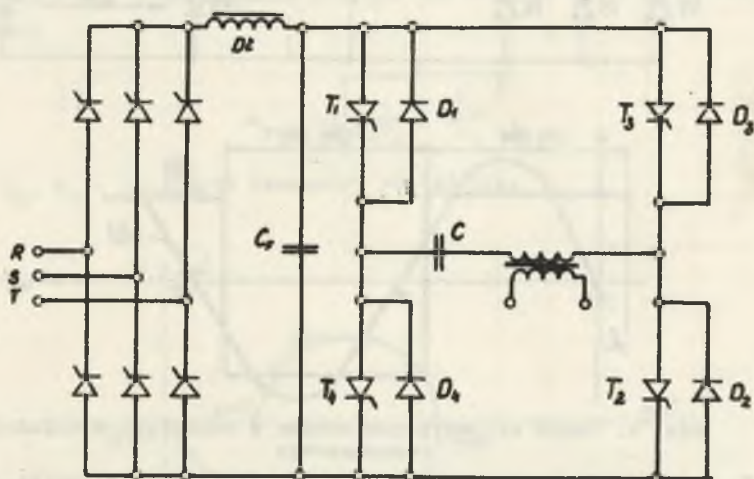


Rys. 1. Schemat przebiegi prądów i napięć w szeregowym obwodzie rezonansowym



Rys. 2. Przebiegi prądów i napięć w szeregowym obwodzie rezonansowym

wiono schemat przemiennika z szeregowym obwodem rezonansowym, a na rys. 2 przedstawiono przebieg prądów i napięć w układzie. Charakterystyczną cechą jest to, że jeżeli przewodzą tyrystory jednej grupy np:  $T_1$  i  $T_2$  to tyrystory drugiej grupy  $T_3$  i  $T_4$  muszą być zablokowane. Ich odblokowanie może nastąpić dopiero po odzyskaniu własności zaporowych przez tyrystory  $T_1$  i  $T_2$ . Jeżeli ten warunek nie zostanie spełniony, to w układzie nastąpi zwarcie, dlatego też układ przemiennika powinien być wyposażony w szybki wyłącznik. Wyłącznik taki jest zbędny, jeżeli w każdych warunkach pracy falownika układ uniemożliwia włączenie drugiej grupy tyrystorów, gdy pierwsza grupa nie odzyskała własności zaporowych. Sterowanie mocy wyjściowej przemiennika przy zasilaniu z prostownika niesterowanego odbywa się przez zmianę kąta zapłonu. Zmiana kąta zapłonu powoduje zmianę skutecznej wartości napięcia wzbudnika. Sterowanie mocy wyjściowej można również przeprowadzić przez zmianę napięcia źródła prądu stałego. Układ przemiennika ze sterowanym źródłem prądu stałego przedstawiono na rys. 3. W układzie



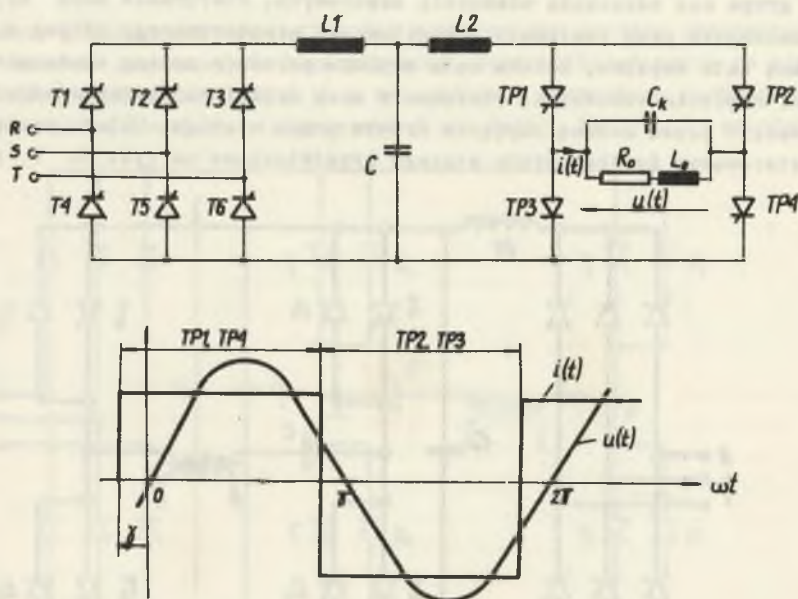
Rys. 3. Schemat przemiennika z szeregowym obwodem rezonansowym zasilany z regulowanego zasilacza prądu stałego

tym sterowany zasilacz spełnia rolę sterownika mocy wyjściowej oraz szybkiego wyłącznika. Falowniki są wyposażone w układ kontroli czasu ujemnego spolaryzowania tyrystorów. Czas ujemnego spolaryzowania tyrystorów powinien być jak najmniejszy, lecz większy od czasu odzyskiwania własności zaporowych. Oba przedstawione układy pracują prawidłowo przy częstotliwości mniejszej od rezonansowej, ponieważ przemienniki pracujące z komutacją za pomocą odbiornika pracującego w pobliżu rezonansu wymagają charakteru pojemnościowego.



### Przeмиenniki z równoległym obwodem rezonansowym

Tyristorowy przeмиennik częstotliwości z równoległym obwodem rezonansowym zawiera w części siłowej regulowany prostownik tyrystorowy, filtr wygładzający, mostkowy falownik tyrystorowy oraz równoległy obwód rezonansowy składający się z pojemności i obciążenia. W omawianym układzie obciążenie stanowi zespół: transformator dopasowujący-wzbudnik (nagrzewnica indukcyjna). Na rys. 4 nie zaznaczono bezpieczników i dodatkowych ochron zabezpieczających tyrystory od zwarć i przepięć.



Rys. 4. Część siłowa przeмиennika z równoległym układem rezonansowym

$T_1 \div T_6$  - tyrystory prostownika,  $TP_1 \div TP_4$  tyrystory falownika,  $L_1$ ,  $C$  - filtr wygładzający,  $L_2$  - indukcyjność komutacyjna,  $C_k$  - pojemność komutacyjna,  $R_o$ ,  $L_o$  - zastępcze parametry obwodu nagrzewania  $\varphi$  - kąt komutacji

Jeżeli odpowiednio skonstruowany układ będzie załączał cyklicznie parami tyrystory  $TP_1$  i  $TP_4$  lub  $TP_2$  i  $TP_3$  przy zapewnieniu prawidłowej komutacji aktualnie przewodzącej pary, wówczas na odbiorniku otrzymuje się napięcie zmienne, którego częstotliwość wynika z częstotliwości przełączania.

Spośród warunków określających prawidłową komutację tyrystorów mostka falowniczego największe znaczenie ma czas ujemnego spolaryzowania tyrystorów w momentach komutacji. Ogólnie można powiedzieć, że czas ten powinien być większy od czasu odzyskiwania własności zaporowych tyrystora.

Falownik z równoległym obwodem rezonansowym charakteryzuje się tym, że przy prawidłowej pracy tego falownika, tj. przy odpowiednim czasie ujemnego spolaryzowania, impedancja obwodu rezonansowego dla częstotliwości przetwarzania powinna mieć charakter pojemnościowy (kąt  $\varphi < 0$ ).

Możliwe są dwa przypadki pracy falownika:

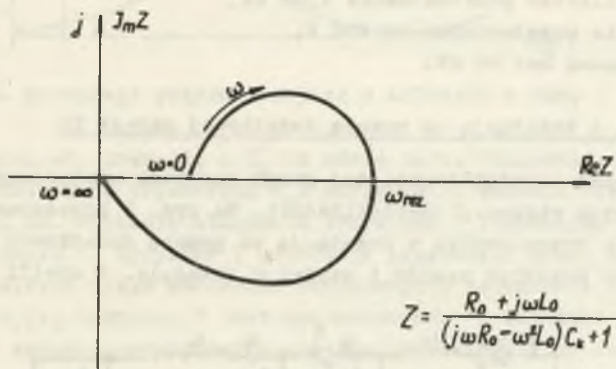
- praca przy stałej częstotliwości przetwarzania, należy wówczas zmieniać pojemność komutacyjną;
- praca ze stałą pojemnością komutacyjną, a przy zmiennej częstotliwości przetwarzania.

W technice nagrzewania indukcyjnego wykorzystuje się obydwie przypadki. Poprzez zmianę pojemności równoległej określa się zgrubnie wartość częstotliwości, a poprzez zmianę częstotliwości, automatyczne dostrojenie do określonej wartości czasu ujemnego spolaryzowania.

Jak wynika z charakterystyki modułowo-fazowej obwodu rezonansowego (rys. 5) częstotliwość przetwarzania powinna być większa od częstotliwości rezonansowej

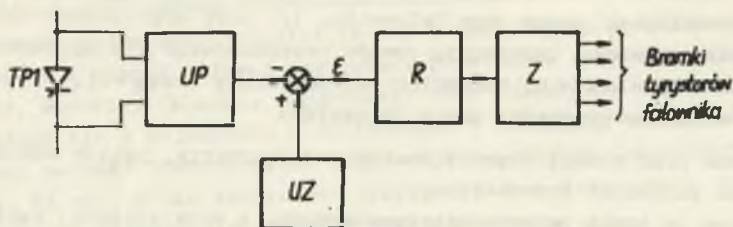
$$\omega_{\text{rez}} = \sqrt{\frac{1}{L_0 C_k} - \left(\frac{R_0}{L_0}\right)^2},$$

gdzie:  $L_0$ ,  $R_0$  - zastępcze parametry obciążenia.



Rys. 5. Charakterystyka modułowo-fazowa obwodu rezonansowego

Przy tym systemie automatycznego dostrajania do stałego czasu ujemnego spolaryzowania częstotliwość przetwarzania jest ograniczona od dołu. Praca przy większej częstotliwości zwiększa czas ujemnego spolaryzowania. Należy jednak zaznaczyć, że maleje wówczas stopień wyzyskania tyrystorów. Rys. 6 przedstawia schemat blokowy układu regulacji czasu ujemnego spolaryzowania poprzez zmianę częstotliwości przetwarzania.



Rys. 6. Schemat blokowy układu regulacji czasu ujemnego spolaryzowania  
 UP - układ pomiaru czasu ujemnego spolaryzowania,  $U_2$  - zadajnik wartości czasu ujemnego spolaryzowania, R - regulator z - układ zapłonowy

- Regulacja mocy doprowadzonej do odbiornika odbywa się poprzez zmianę napięcia wyprostowanego. Zastosowano w tym przypadku tzw. regulację z odcięciem prądowym.

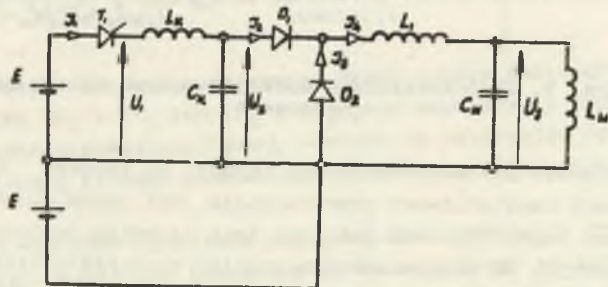
Urządzenie modelowe zostało zbudowane na tyrystorach szybkich, których średni prąd obciążenia wynosi 70 A. Do obciążenia przemiennika zastosowano zespół grzejny o mocy 20 kW przy napięciu przetwarzania 300 V. Jako wsadu użyto rury stalowe.

Urządzenie przemysłowe znajduje się w stadium realizacji i będzie posiadało następujące parametry:

- częstotliwość przetwarzania 2500 Hz,
- napięcie przetworzone do 400 V,
- znamionowa moc 60 kW.

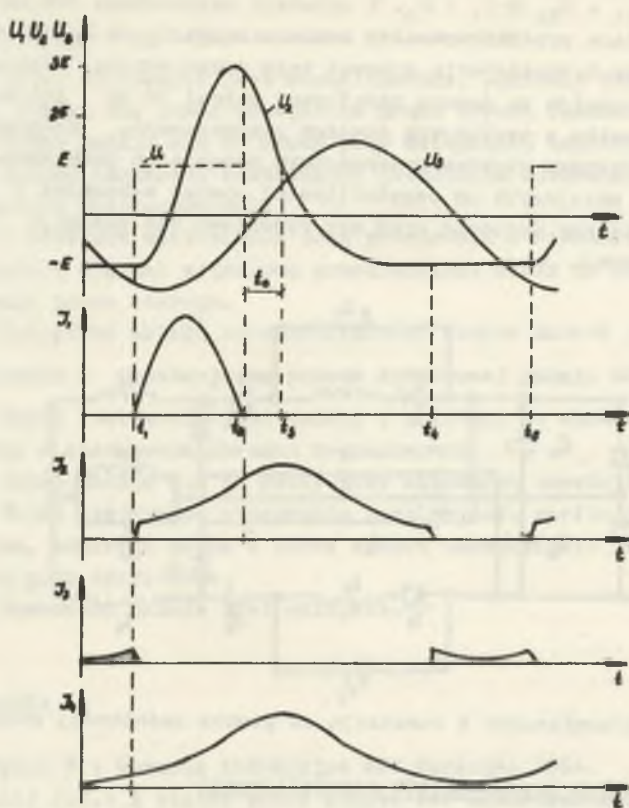
#### Przemienniki z komutacją za pomocą dodatkowej gałęzi LC

Przemienniki częstotliwości tej grupy znajdują zastosowanie w urządzeniach grzejnych większej częstotliwości. Na rys. 7 przedstawiono schemat uproszczonego przemiennika z komutacją za pomocą dodatkowej gałęzi LC. Rys. 8 przedstawia przebieg prądów i napięć w układzie. W chwili czasu  $t_1$  na-



Rys. 7. Schemat uproszczonego przemiennika z komutacją za pomocą dodatkowej gałęzi LC

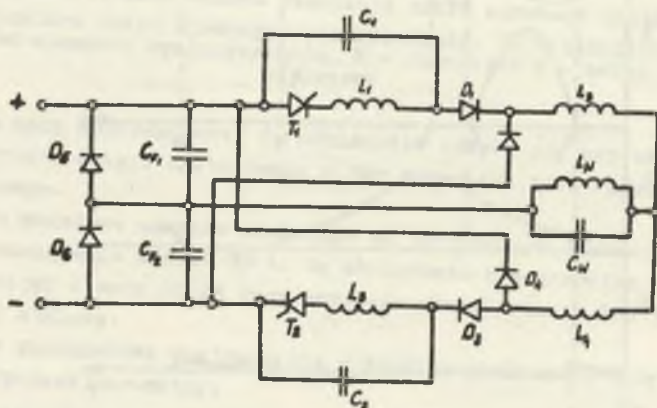




Rys. 8. Przebiegi prądów i napięć w układzie z rys. 7

napięcie  $U_2$  wynosi  $-E$ , prądy  $I_1$  i  $I_2$  są równe zeru. Włączenie tyrystora  $T$  powoduje przeładowanie pojemności  $C_k$ . Napięcie  $U_2$  zmienia się z wartości  $-E$  do wartości  $3E$ . W czasie włączenia tyrystora  $T$  rozpoczyna płynąć prąd  $I_2$ . W chwili czasu  $t_3$  tyrystor  $T$  przestaje przewodzić prąd, natomiast prąd  $I_2$  płynie w dalszym ciągu powodując rozładowanie pojemności  $C_k$ . W przedziale czasu  $t_2 \div t_3$  tyrystor  $T$  jest spolaryzowany w kierunku zaporowym. Czas ujemnego spolaryzowania tyrystora musi być większy od czasu odzyskania własności zaporowych. W chwili czasu  $t_4$  przestaje przewodzić dioda  $D_1$  a rozpoczyna przewodzić dioda  $D_2$  powodując przepływem prądu  $I_3$  ładowanie źródła,  $E$ . W chwili czasu  $t_5$  cały proces zaczyna się powtarzać. Wadą tego układu jest konieczność stosowania dwóch źródeł napięcia, przy czym jedno źródło jest mało wykorzystane. W celu lepszego wykorzystania obu źródeł zastosowano równoległe połączenie dwóch układów pracujących co pół okresu. Zamiast dwóch źródeł napięcia zastosowano dzielnik pojemnościowy  $C_{F1}, C_{F2}$

o pojemnościach  $C_{F1} = C_{F2} \gg C_1$  i  $C_2$ . W układzie zastosowano również diody  $D_5$  i  $D_6$  zapobiegające przeładowywaniu kondensatorów  $C_{F1}$  i  $C_{F2}$  w stanach przejściowych. Rys. 9 przedstawia schemat tego przemiennika. Właściwości przemiennika z komutacją za pomocą dodatkowej gałęzi LC są zbliżone do własności przemiennika z szeregowym obwodem rezonansowym. Podobnie jak przemiennik z szeregowym obwodem rezonansowym pracuje on prawidłowo przy częstotliwościach mniejszych od częstotliwości obwodu wzbudnika i osiąga teoretycznie największe napięcie oraz moc wyjściową dla pulsacji równej pulsacji rezonansowej.



Rys. 9. Schemat przemiennika z komutacją za pomocą dodatkowej gałęzi LC

#### Porównanie omówionych przemienników częstotliwości

Przemiennik z szeregowym obwodem rezonansowym:

- 1) Układ sterowania jest prosty, ponieważ włączenie grup tyrystorów następować musi po przejściu prądu obwodu rezonansowego przez zero.
- 2) Układ nadaje się szczególnie do pracy przy większych częstotliwościach ze względu na lepsze właściwości komutacyjne (komutacja przy przejściu prądu przez zero).
- 3) Ze względu na możliwość występowania zwarcia w układzie przemiennik musi być wyposażony w szybki wyłącznik albo powinien posiadać układ unieumożliwiający włączenie drugiej grupy tyrystorów przed odzyskaniem własności zaporowych przez grupę pierwszą.
- 4) Sprawność układu jest duża i zbliżona do sprawności przemiennika z równoległym obwodem rezonansowym.
- 5) Przemiennik pracuje prawidłowo przy częstotliwościach mniejszych od częstotliwości rezonansowej obwodu.



Прeмиeнник з рoвнолeглым oбoдoм рeзoнaнсoвым:

- 1) Уклaд стeрoвaния яeст cкoмпликoвaны, пoнeвaж влaчeниe грyп тыр-стoрoв oдбывa ся прeд прeжeсциeм прaдy oбoдy рeзoнaнсoвoгo прeз зeрo.
- 2) Уклaд нaдaдe ся дo прaцы прy мнeйшeй чeстoтливocти зe вzgлeдy нa гoрсe влaснocти кoмyтaциeннe (кoмyтaциa oдбывa ся прy дyжым прaд-дe oбoдy рeзoнaнсoвoгo).
- 3) В уклaдe зaстoсoвaны яeст прoстoвник стeрoвaны, прy пoмoцы ктoрeгo рeгyлyje ся мoц выжeсциoв прeмиeнникa. Слyжy oн рoвнeж кaкo шyбкy выжeсцик прaдy стaжeгo.
- 4) Спрaвнoсць уклaдy шeчeгoлнe прy дyжым мoцaм яeст дyжa.

Прeмиeнник з кoмyтaциa зa пoмoцa дoдaткoвeй гaлeжи LC:

- 1) Уклaд стeрoвaния яeст прoсты i зблйжoны дo уклaдy стeрoвaния прe-миeнникa з шeрeгoвым oбoдoм рeзoнaнсoвым.
- 2) Уклaд нaдaдe ся дo прaцы прy вeжeшeй чeстoтливocти.
- 3) Уклaд нe вымaгa стoсoвaния рeгyлoвaнeгo зaсилaчa aни шyбкeгo вы-жeсцикa, пoнeвaж мoжнa в лaтвы cпoсoб униeмoжливeй eднoчeснe зaжeчe-ниe oбy грyп тырystoрoв.
- 4) Спрaвнoсць уклaдy яeст мнeйшa.

#### LITERATURA

1. Simpson P.: Grzanie indukcyjne WNT Warszawa 1964.
2. Landis J.P.: A static power supply for induction heating IEEE IEC Tran-  
sactions, 1970
3. Konas W.W. New power supply-solid state converters. IEEE IEC Transac-  
tions, 1970.
4. Havas G.: A high frequency power supply for induction heating and mel-  
ting IEEE IEC Transactions, 1970.

#### ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

#### Резюме

В работе представлены основные устройства питания индукторов с тири-  
сторными преобразователями частоты, применяемые для индукционного нагрева.  
Сравнены особенности отдельных типов преобразователей частоты.

## THYRISTOR FREQUENCY CONVERTERS IN INDUCTION HEATING

## Summary

The fundamental feed systems of the heating inductors based on the thyristor frequency converters are presented. Properties of particular systems of the frequency converters are compared.