

WALDEMAR KEMPSKI
BRUNON MAREK

Instytut Elektryfikacji
i Automatykacji Górniczo

TYRYSTOROWE UKŁADY ZASILANIA W GRZEJNICTWIE INDUKCYJNYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono dwa podstawowe układy zasilania wzbudników jako podstawowych elementów w grzejnictwie indukcyjnym z tyrystorowymi przemiennikami częstotliwości. Są to układy z równoległym lub szeregowym obwodem rezonansowym stanowiącym obciążenie falownika tyrystorowego. W pracy przeanalizowano wpływ parametrów układu oraz częstotliwości względnej na moc wyjściową, napięcie i czas odzyskiwania własności zaporowych.

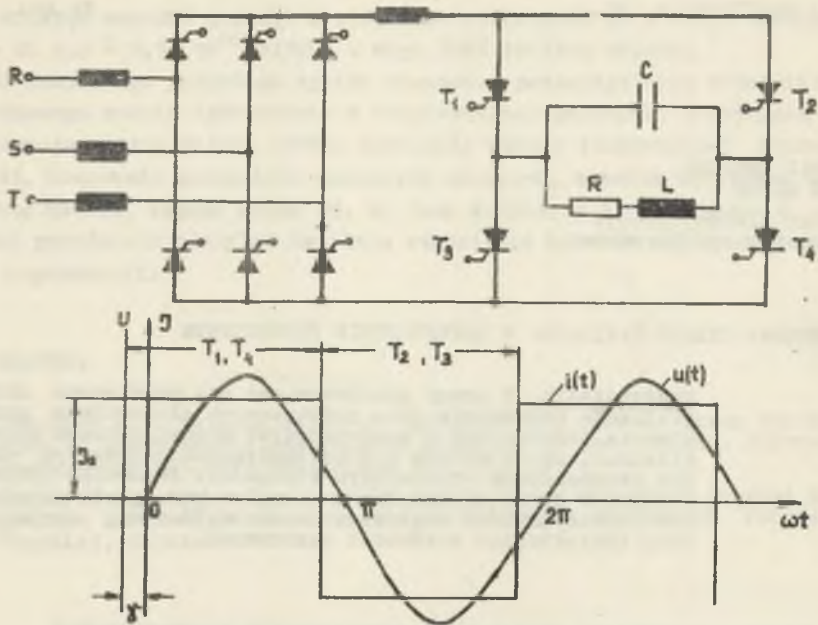
1. Omówienie stosowanych statycznych przemienników częstotliwości

Do celów indukcyjnego nagrzewania stosuje się pola elektromagnetyczna w zakresie częstotliwości od 50 Hz do kilkuset kHz. W zakresie częstotliwości od 150 Hz do 10 kHz wykorzystuje się jako źródła zasilające przetwornice elektromaszynowe. Obecnie stosuje się oprócz przetwornic elektromaszynowych tyrystorowe przemienniki częstotliwości. W tyrystorowych przemiennikach częstotliwości, w zastosowaniu do grzejnictwa indukcyjnego stosuje się tyrystory o małych czasach odzyskiwania własności zaporowych. Rozróżniamy tu dwa podstawowe typy przemienników:

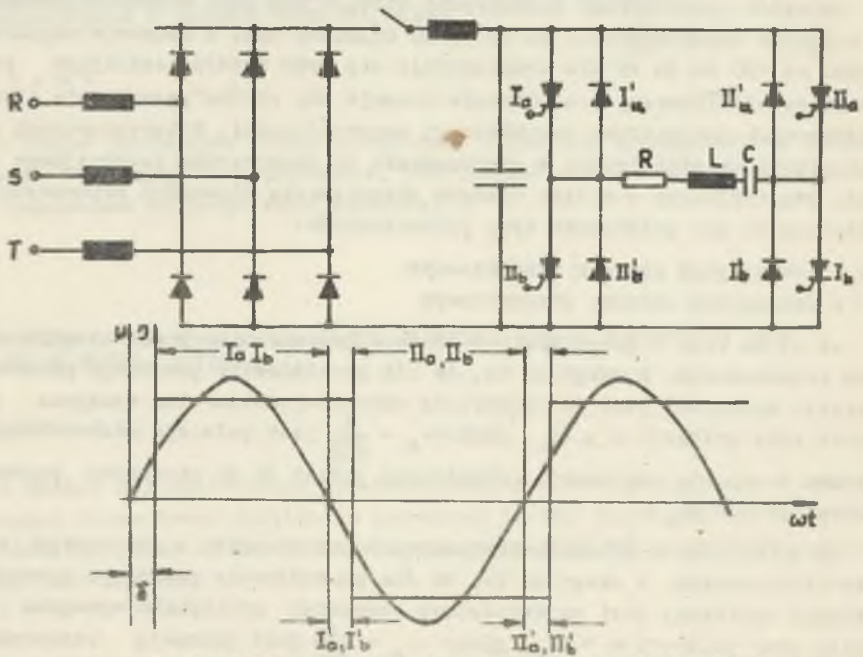
- a) z równoległym obwodem rezonansowym
- b) z szeregowym obwodem rezonansowym

ad a) Na rys. 1 przedstawiono schemat przemiennika z równoległym obwodem rezonansowym. Z uwagi na to, że dla prawidłowego przebiegu procesu komutacji konieczny jest pojemnościowy charakter odbiornika wymagana jest praca przy pulsacji $\omega > \omega_0$, gdzie $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ jest pulsacją rezonansową. Jak wynika z rys. 3, reaktancja równoległej gałęzi LC ma charakter pojemnościowy dla $\omega > \omega_0$.

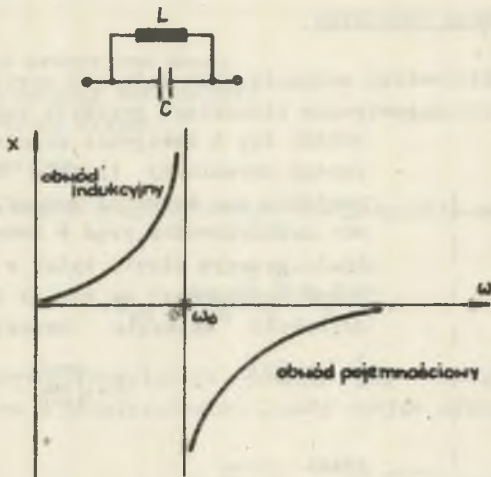
ad b) Na rys. 2 przedstawiono schemat przemiennika z szeregowym obwodem rezonansowym. Z uwagi na to, że dla prawidłowego przebiegu procesu komutacji konieczny jest pojemnościowy charakter odbiornika wymagana jest praca przy pulsacji $\omega < \omega_0$, gdzie $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ jest pulsacją rezonansową. Jak wynika z rys. 4, reaktancja szeregowej gałęzi LC ma charakter pojemnościowy dla $\omega < \omega_0$.



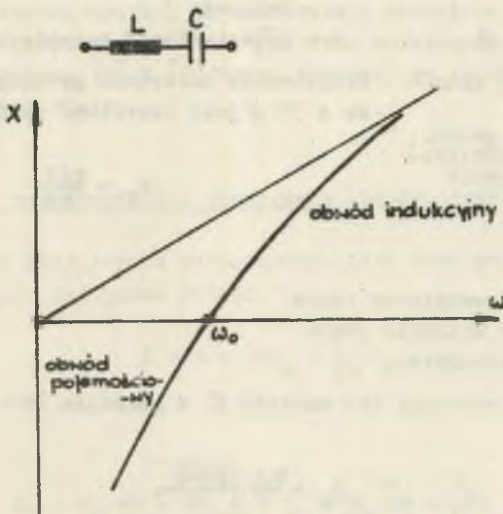
Rys. 1. Przebiennik z równoległym obwodem rezonansowym



Rys. 2. Przebiennik z szeregowym obwodem rezonansowym



Rys. 3. Charakterystyka częstotliwościowa reaktancji gałęzi równoległej LC



Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa reaktancji gałęzi szeregowej LC

2. Schemat zastępczy wzbudnika

Na rys. 5 przedstawiono schematycznie solenoid zasilany prądem wytwarzający pole elektromagnetyczne stanowiące przekrój wzbudnika. Wzbudnik składa się z uzwojenia chłodzonego wodą obejmującego ceramiczny tygiel. Wewnątrz wzbudnika znajduje się materiał grzany. Na skutek zjawiska naskórkowości prąd w uzwojeniu oraz w materiale grzanym płynie tylko w części przyszczelinyowej zaznaczonej na rys. 5 przez zaczerwienie. Głębokość wnikania określa się zależnością

$$[1] \text{ i } [3] \quad \delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1)$$

gdzie

- δ - głębokość wnikania prądu
- ρ - rezystywność
- ω - pulsacja
- μ - przenikalność magnetyczna.

Rys. 5. Przekrój wzbudnika

1. materiał grzany,
2. ceramiczne wypełnienie,
3. uzwojenie

Rezystancja materiału grzanego przy założeniu, że $d \gg \delta$ jest określona zależnością:

$$R_g = \frac{\pi d \rho}{h \delta} \quad (2)$$

gdzie

- d - średnica zewnętrzna wsadu
- δ - głębokość wnikania prądu
- h - długość wzbudnika.

Podstawiając do równania (2) wartość δ z równania (1) otrzymujemy

$$R_g = \frac{\pi d}{h} \sqrt{\frac{\mu \omega \rho}{2}} \quad (3)$$

W wzbudniku prąd płynie przez przekrój prostokątny jak to przedstawiono schematycznie na rys. 5. Przez analogię można zatem na podstawie równania (3) określić rezystancję uzwojenia wzbudnika

$$R_{ou} = \frac{(d + 2s) \pi w^2}{h} \sqrt{\frac{\rho_{ou} \mu_0 \omega}{2}} \quad (4)$$

gdzie

- d - średnica zewnętrzna wsadu
- s - grubość warstwy ceramicznej
- ρ_{ou} - rezystywność miedzi
- w - liczba zwojów

Ponieważ $d \gg s$, wobec czego zależność (4) przyjmuje postać:

$$R_{ou} = \frac{\pi d w^2}{h} \sqrt{\frac{\rho_{ou} \mu_0 \omega}{2}} \quad (5)$$

Przedstawione powyżej rezystancje sumują się w rezystancji zastępczej wzbudnika z wsadem z uwzględnieniem liczby zwojów solenoidu.

$$R = R_{ou} + w^2 R_g = \frac{\pi d w^2}{h} \sqrt{\frac{\mu_0 s}{2}} (\sqrt{R_r} + \sqrt{\frac{\rho_{ou}}{s}}) \sqrt{\omega} = C_1 \sqrt{\omega} \quad (6)$$

Z powyższej zależności wynika, że rezystancja zastępcza obciążonego wzbudnika zmienia się proporcjonalnie do $\sqrt{\omega}$. Przy założeniu: $d \gg s$ i $h \gg d$ jak wykazano w pracach [1] i [2] można przyjąć, że indukcyjność obciążonego wzbudnika jest stała.

3. Analiza pracy przemiennika z szeregowym obwodem rezonansowym

Zakładając, że obciążeniem przemiennika jest szeregowy obwód rezonansowy, to impedancja zastępcza układu

$$\hat{Z} = R + j(X_L - X_C) \quad (7)$$

Ponieważ

$$X_L = X_C \frac{\omega}{\omega_0} = k X_C, \quad X_C = X_C \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{X_C}{k},$$

$$R = R_C \sqrt{\frac{\omega}{\omega_0}} = R_C \sqrt{k}, \quad Q = \frac{X_C}{R_C}$$

gdzie $k = \frac{\omega}{\omega_0}$ - odstrojenie od rezonansu.

Wobec tego, wstawiając powyższe zależności do równania (7),

$$\hat{Z} = R_C \sqrt{k} + j X_C (k - \frac{1}{k}) \quad (8)$$

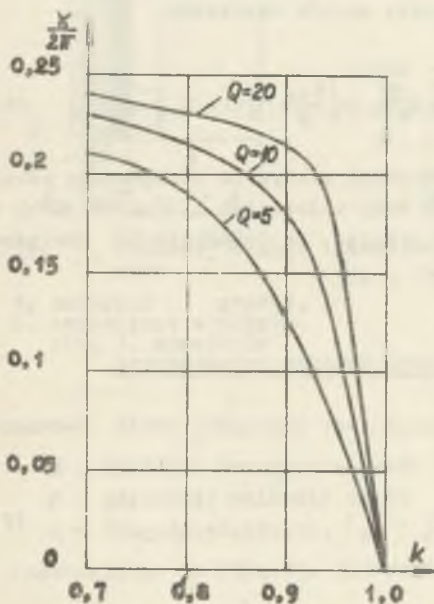
Z trójkąta impedancji szeregowego obwodu rezonansowego

$$\operatorname{tg} \chi = Q \sqrt{k \left(1 - \frac{1}{k^2}\right)},$$

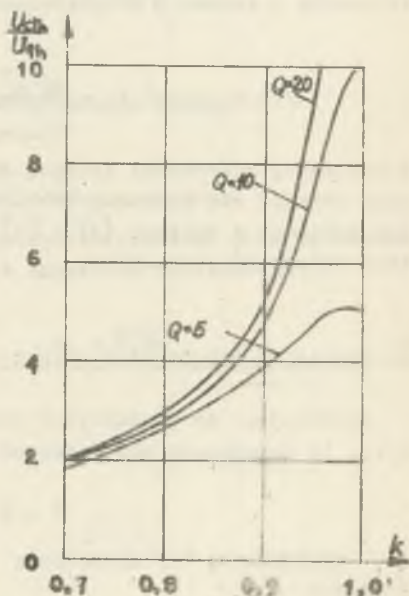
uwzględniając zależność $t_s = \frac{\chi}{\omega} = \frac{\chi \pi}{2\pi}$

$$\frac{t_s}{\pi} = \frac{\arctg Q \sqrt{k \left(1 - \frac{1}{k^2}\right)}}{2\pi} \quad (9)$$

Zależność $\frac{t_s}{\pi}$ w funkcji k dla różnych Q przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Zależność $\frac{t_s}{\pi}$ w funkcji k dla różnych Q



Rys. 7. Zależność $\frac{U_{01h}}{U_{1h}}$ w funkcji k dla różnych Q

Pierwsza harmoniczna napięcia U_{01h} na pojemności

$$\hat{U}_{01h} = \hat{U}_{1h} \frac{-jX_C}{R + j(X_L - X_C)}$$

Po przekształceniach otrzymujemy:

$$\frac{U_{01h}}{U_{1h}} = \frac{Q}{k \sqrt{1 + Q^2 (k - \frac{1}{k})^2}} \quad (10)$$

Zależność $\frac{U_{01h}}{U_{1h}}$ w funkcji k dla różnych Q przedstawiono na rys. 7.

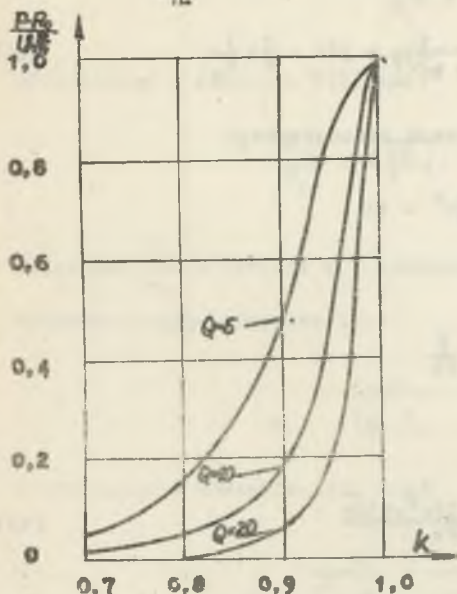
Moc czynna wydzielona w szeregowym obwodzie rezonansowym jest w dużym przybliżeniu równa mocy czynnej pierwszej harmonicznej z uwagi na dużą dobrotę obwodu.

$$P_{1h} = I_{1h}^2 R$$

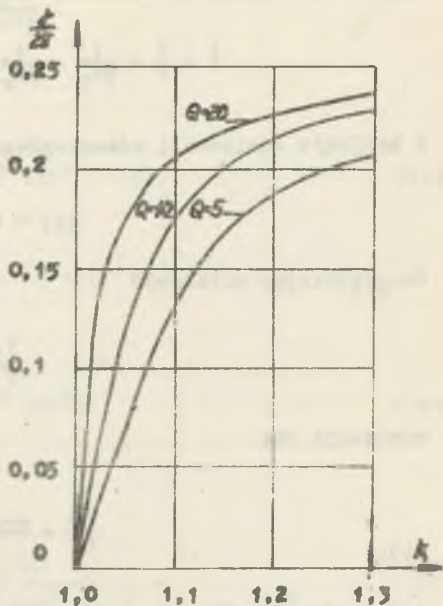
Po przekształceniu

$$\frac{P_{1h} R_0}{U_{1h}^2} = \frac{1}{\sqrt{k [1 + Q^2 k (1 - \frac{1}{k})^2]}} \quad (11)$$

Zależność $\frac{P_{1h} R_0}{U_{1h}^2}$ w funkcji k dla różnych Q przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Zależność $\frac{P_{1h} R_0}{U_{1h}^2}$ w funkcji k dla różnych Q



Rys. 9. Zależność $\frac{P_{1h}}{U_{1h}^2}$ w funkcji k dla różnych Q

4. Analiza pracy przemiennika z równoległym obwodem rezonansowym

Można przekształcić szeregowe połączenie R, X_L na równoważny obwód równoległy r, x_L , dla którego są obowiązujące wyżej podane relacje.

Przy założonej równoważności obu układów

$$R + jX_L = \frac{r \cdot jx_L}{r + jx_L}$$

Po przekształceniach przy założeniu, że w rozpatrywanym zakresie częstotliwości zachodzi $X_L \gg R$

$$X_L = x_L \quad \text{oraz} \quad r = \frac{X_L^2}{R} = C_2 \omega^{3/2}$$

Zakładając, że dla pulsacji ω_0 : $r = r_0$

$$r = r_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{3/2} = r_0 k^{3/2}$$

Admitancja zastępcza równoległego obwodu rezonansowego

$$\hat{Y} = \frac{1}{r} + \frac{1}{jx_L} - \frac{1}{jx_0} = \frac{1}{r k^{3/2}} + j\left(k - \frac{1}{k}\right) \frac{1}{x_0} \quad (12)$$

Z trójkąta admitancji równoległego obwodu rezonansowego

$$\operatorname{tg} \varphi = Q \sqrt{k(k^2 - 1)}$$

Uwzględniając zależność

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi}{T} = \frac{\varphi}{2\pi}$$

otrzymuje się

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi}{T} = \frac{\arctg Q(k^2 - 1) \sqrt{k}}{2\pi} \quad (13)$$

Zależność $\frac{\operatorname{tg} \varphi}{T}$ w funkcji k dla różnych Q przedstawiono na rys. 9. Dla układu przemiennika z równoległym obwodem rezonansowym moo oznyna jest w du-

żym przybliżeniu równa mocy czynnej pierwszej harmonicznej z uwagi na dużą dobroć obwodu.

$$P = U_0 I_0 = \frac{U_{1h}^2}{r}, \quad (14)$$

gdzie

U_0 - napięcie źródła prądu stałego

I_0 - prąd źródła prądu stałego

Przebieg prądu obwodu rezonansowego jest zbliżony do przebiegu prostokątnego, ponieważ dobroć obwodu $Q \gg 1$. Wartość pierwszej harmonicznej tego prądu

$$I_{1h} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_0$$

wobec tego uwzględniając, że $Z_{1h} = \frac{U_{1h}}{I_{1h}}$

$$\frac{U_{1h}}{U_0} = \frac{\pi\sqrt{2}}{4 \cos \delta}$$

Wyznaczając z równania (12) $\cos \delta$

$$\frac{U_{1h}}{U_0} = \frac{\pi\sqrt{2}}{4} \sqrt{1 + Q^2 k(k^2 - 1)^2} \quad (15)$$

Zależność $\frac{U_{1h}}{U_0}$ w funkcji k przedstawiono na rys. 10.

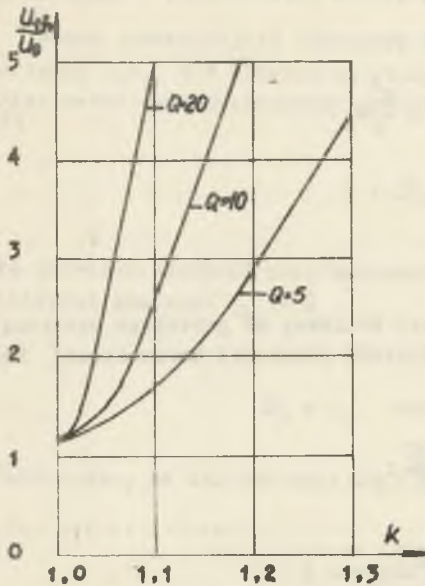
Przekształcając równanie (14)

$$\frac{P}{I_{1h}^2 r_0} = k^{3/2} \cos^2 \delta \quad (16)$$

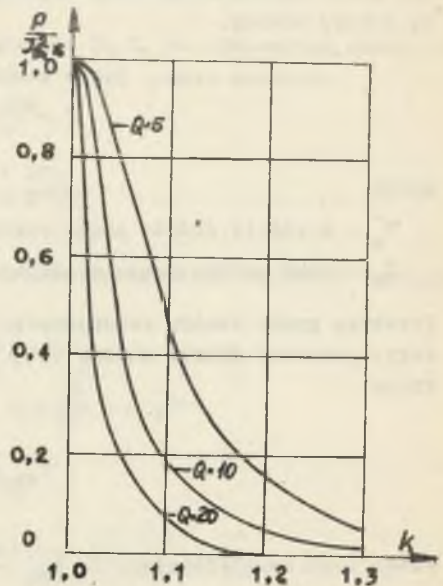
Wyznaczając z równania (12) $\cos \delta$

$$\frac{P}{I_{1h}^2 r_0} = \frac{k^{3/2}}{1 + Q^2 k(k^2 - 1)^2} \quad (17)$$

Zależność $\frac{P}{I_{1h}^2 r}$ w funkcji k dla różnych Q przedstawiono na rys. 11.



Rys. 10. Zależność $\frac{U_{1h}}{U_0}$ w funkcji k dla różnych Q



Rys. 11. Zależność $\frac{P}{P_{1h}}$ w funkcji k dla różnych Q

5. Własności przemienników częstotliwości

Przedstawione dwa typy przemienników tyrystorowych charakteryzują się następującymi właściwościami:

1) Przemiennik z szeregowym obwodem rezonansowym

a) Układ sterowania przemiennika nie jest skomplikowany. Zapłon tyrystorów odbywa się w stałym przedziale czasu po przejściu prądu obwodu rezonansowego przez zero. Zbyteczne jest stosowanie układu startowego.

b) Regulacja mocy wyjściowej może się odbywać przez zmianę fazy impulsu zapłonowego, ponieważ zwiększenie kąta zapłonu powoduje zmniejszenie amplitudy napięcia wyjściowego.

c) Przy częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości rezonansowej obwodu napięcie występujące na wzbudniku jest większe od napięcia wyjściowego przemiennika.

d) Przy zwarciach wzbudnika tyrystory przewodzą prądy zwarcia przeto muszą być dobrane odpowiednio do tego stanu awaryjnego.

2. Przemienник z równoległym obwodem rezonansowym

a) Układ sterowania przemiennika jest skomplikowany, ponieważ zapłon tyrystorów odbywa się w stałym przedziale czasu przed przejściem napięcia na wzbudniku przez zero.

b) Regulacja mocy wyjściowej odbywa się przez zmianę wyjściowego napięcia prostownika prądu stałego.

c) Napięcie na wzbudniku jest równe napięciu wyjściowemu przemiennika.

d) Praca przemiennika na szyny zbiorcze, do których przyłączono kilka wzbudników jest możliwa.

e) Przy zwarciach wzbudnika udarowy prąd rozładowania kondensatora równoległego obwodu rezonansowego zamyka się przez zwarty wzbudnik, omijając tyrystory układu falownikowego.

LITERATURA

1. GEISEL H.: Das Betriebsverhalten von Schwingkreisumrichtern für induktive Erwärmung. Int. Elektrowärme 1968 nr 4.
2. SCHÖNBACHER K.: Zur Berechnung von Induktionsöfen. ETZA 1952 H 23.
3. CHOLEWICKI T.: Elektrotechnika teoretyczna. WNT W-wa 1971.

ТИРИСТОРНЫЕ ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Резюме

В статье представлено две основные системы питания индукционного нагревателя методического действия как основного элемента в индукционном нагреве с тиристорными преобразователями частоты.

Эти системы с параллельной или последовательной резонансной цепью работают как нагрузка тиристорного преобразователя частоты.

В статье анализируется влияние подбора элементов системы а также относительной частоты на выходную мощность, напряжение и время восстановления запирания свойств тиристорев.

THYRISTOR SYSTEMS OF SUPPLY IN INDUCTIVE HEATING

S u m m a r y

In the paper two fundamental systems of supplying exoitors as the fundamental elements in inductive heating with thyristors frequency Changers has been presented.

These are the systems with parallel or series resonant circuits which form the load of the thyristor statio frequency changers. In the paper the influence of systems parameters has been analysed and a frequency ratio on the output power, voltage and blocking time has been discussed.