

Tadeusz SKOCZKOWSKI
Marian KALUS

Instytut Elektrotechniki
Teoretycznej i Przemysłowej
Politechniki Śląskiej

UKŁAD STEROWANIA I REGULACJI FALOWNIKA RÓWNOLEGŁEGO ZASILAJĄCEGO NAGRZEWNICĘ INDUKCYJNĄ

Streszczenie. W artykule omówiono ogólną koncepcję układu sterowania i regulacji falownika tyrystorowego prądu zasilającego nagrzewnicę indukcyjną. Podano strukturę i zasadę działania układu regulacji zawierającego pętle regulacji prądu falownika, napięcia wyjściowego falownika i mocy czynnej dostarczonej do obciążenia. Omówiono zachowanie się układu regulacji w normalnym i awaryjnym stanie pracy. Przedstawiono szczegółowo układy sterowania falownika według algorytmu stałego kąta i stałego czasu wyłączenia tyrystorów. Podano przebiegi czasowe ilustrujące zasadę działania każdego z nich oraz omówiono ich wady i zalety. Poprawność pracy przedstawionych układów potwierdziły paroletnie doświadczenia eksploatacyjne.

1. Wstęp

Falowniki tyrystorowe począwszy od lat sześćdziesiątych zaczęły wypierać generatory elektromaszynowe, które stanowiły do tej pory podstawowe źródło zasilania nagrzewnic indukcyjnych średniej częstotliwości do około 10 kHz. Budowa i zalety falowników tyrystorowych w porównaniu z generatorami elektromaszynowymi w zastosowaniach elektrotermicznych są dobrze opisane w literaturze [1,5,6,7,8,9] .

Podstawową strukturą falownika wykorzystywaną w grzejnictwie indukcyjnym jest falownik równoległy prądu [6,7,9] . Głównymi zaletami tego falownika są prosta budowa części energoelektronicznej, duża odporność na zwarcia, zdolność do pracy w szerokim zakresie częstotliwości (5 do 1), małe zniekształcenia generowane do sieci (takie same jak prostownika sterowanego), brak wewnętrznych elementów komutacyjnych i związana między innymi z tym wysoka sprawność. Do wad tego typu falowników literatura zalicza przede wszystkim złożony w porównaniu np. z falownikami napięcia układ sterowania i regulacji oraz problemy związane z tzw. "startem" falownika równoległego.

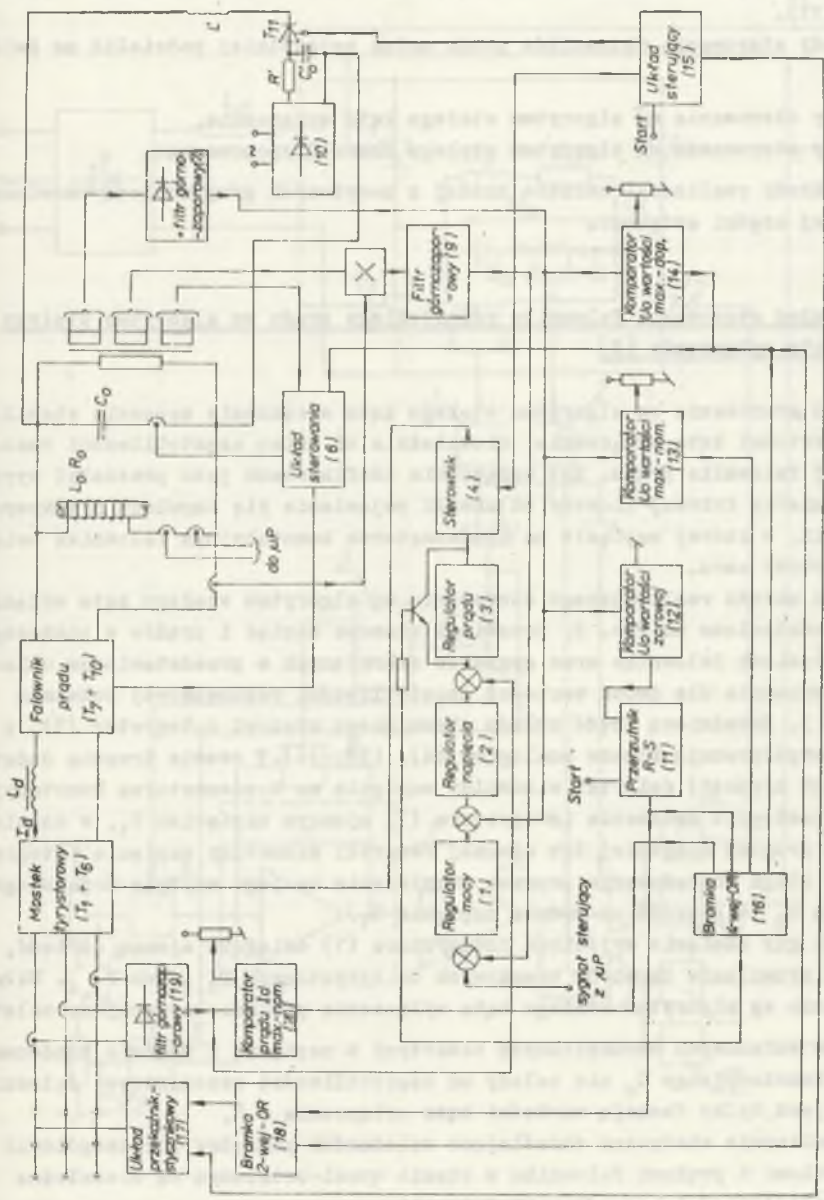
Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie układów sterowania i regulacji falownika równoległego prądu zasilającego nagrzewnicę indukcyjną. Z literatury znane są jedynie ogólne zasady sterowania tego typu falownikami, brak jest natomiast prac omawiających rozwiązania szczegółowe [1,9] .

2. Koncepcja układu sterowania falownika

Schemat blokowy układu sterowania falownika równoległego przedstawiono na rys. 1. Układ sterujący (6) wysterowuje przemiennie pary tyrystorów falownika (T_7, T_{10} i T_8, T_9) w sposób zsynchronizowany ze zmianami napięcia o przebiegu quasi-sinusoidalnym w gałęzi kondensatora komutacyjnego C_0 , przy czym impulsy bramkowe generowane są w takiej chwili, by czas dysponowany dla pary blokowanej tyrystorów był większy od ich czasu wyłączenia.

W celu zapewnienia niezawodnej i bezpiecznej pracy falownika prądowego układ sterowania wyposażony został w blok regulatora kaskadowego, w którym można wyróżnić regulator mocy (1), regulator napięcia kondensatora komutacyjnego (2) oraz regulator prądu w obwodzie pośredniczącym falownika (3). Sygnał wyjściowy regulatora prądu steruje kątem opóźnienia wysterowania tyrystorów ($T_1 - T_6$), w trójfazowym mostku tyrystorowym. Układ regulatora kaskadowego nie zapewnia jednak kontroli napięcia w gałęzi kondensatora komutacyjnego C_0 i prądu I_d w obwodzie pośredniczącym na granicy maksymalnej wartości obydwu wielkości, ze względu na zmianę transmitancji pomiarowej w obydwu torach spowodowanej silną zmianą parametrów obwodu obciążenia L_0, R_0 w funkcji temperatury. Aby temu zapobiec, zastosowano w obydwu torach pomiarowych komparatory maksymalnej wartości prądu (20) i napięcia (13), wyjścia których współpracują z 4-wejściową branką typu OR. W przypadku gdy prąd w obwodzie pośredniczącym falownika lub napięcie na kondensatorze komutacyjnym C_0 przekroczy wartość maksymalną, na wyjściu bramki typu OR-(16) pojawi się wysoki potencjał, który spowoduje blokowanie sygnału wyjściowego z regulatora prądu (3). Prąd w obwodzie pośredniczącym falownika maleje eksponencjalnie do chwili, w której komparator prądu (20) lub napięcia (13) przejdzie ze stanu wysokiego w stan niski. Od tego momentu działanie komparatorów powtarza się. Widać więc, że komparatory prądu lub napięcia wpływają stabilizująco na wielkość prądu w obwodzie pośredniczącym falownika lub napięcia szczytowego w gałęzi kondensatora komutacyjnego C_0 . Kształt prądu (napięcia) ma charakter oscylacyjny typu eksponencjalnego, przy czym wielkość strefy oscylacji zależy od szerokości charakterystyki histerezy komparatorów.

W razie wystąpienia awarii regulatora prądu (3) lub pojawienia się przerwy w obwodzie wzbudnika na skutek przegrzania (stan bardzo groźny) następuje ingerencja komparatora wartości maksymalnej napięcia (14), który powoduje wyzwolenie wszystkich tyrystorów falownika ($T_7 - T_{10}$) oraz wysterowuje trójfazowy mostek tyrystorowy z maksymalną wartością kąta opóźnienia (stan pracy falowniczej), a następnie odłącza falownik od napięcia sieci zasilającej. Komparator wartości zerowej (12) powoduje odłączenie falownika z sieci zasilającej w chwili zaniku napięcia na kondensatorze komutacyjnym C_0 , tj. wówczas, gdy zostanie zerwana komutacja falownika lub wtedy, gdy brak jest warunków gwarantujących prawidłowy start.



Rys. 1. Schemat blokowy układu sterowania falownika równoległego z pętlami regulacji prądu, napięcia i mocy falownika
 Fig. 1. Block diagram of the parallel inverter control system with the control loops of the current, voltage and power of the inverter

Układ sterujący (15) generuje ciąg impulsów sterujących w fazie rozruchu falownika prądu. Współpracuje on z układem startu (mostek diodowy (10) R , C_0 , T_{11} , L), układem sterownika (4) oraz układem przekąźnikowo-stycznikowym (17).

Układy sterowania falowników prądu można najogólniej podzielić na dwie grupy:

- układy sterowania wg algorytmu stałego kąta wyłączenia,
- układy sterowania wg algorytmu stałego czasu dysponowanego.

Przykłady realizacji układów każdej z powyższych grup zostaną omówione w dalszej części artykułu.

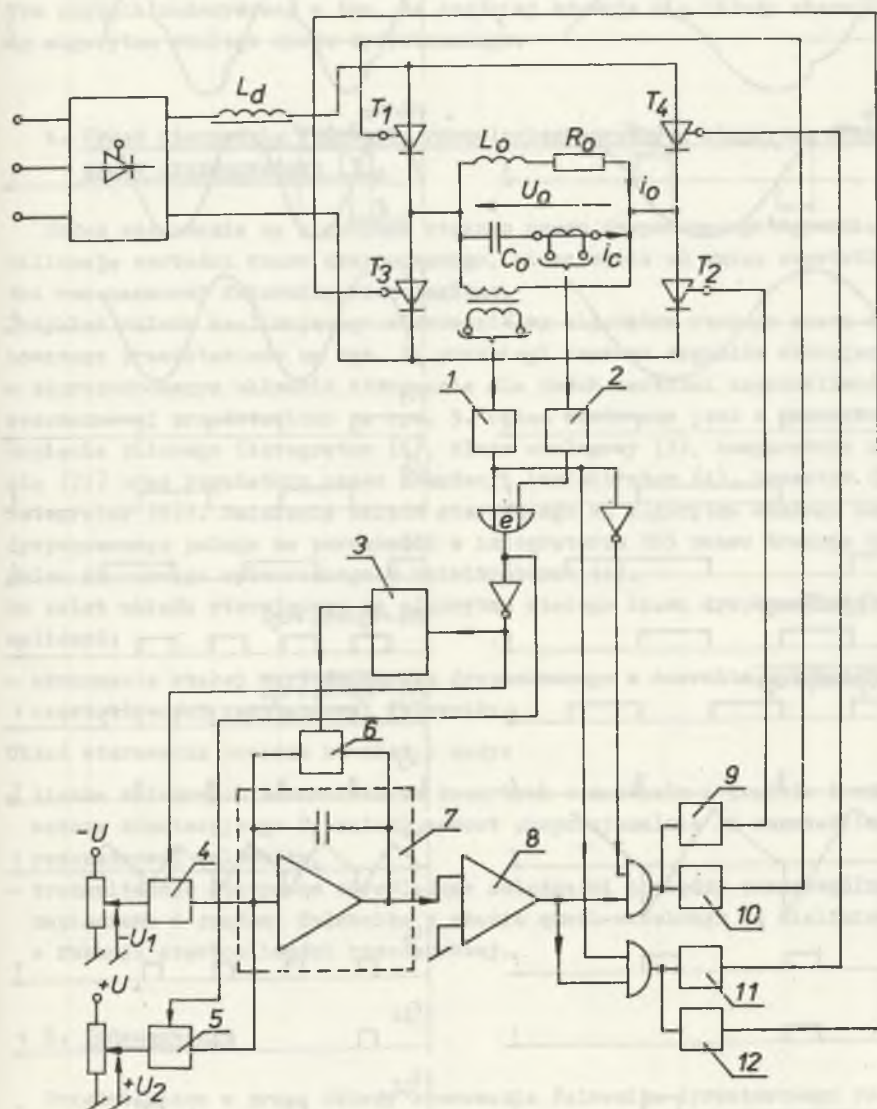
3. Układ sterowania falownika równoległego prądu wg algorytmu stałego kąta wyłączenia [2]

Układ sterowania wg algorytmu stałego kąta wyłączenia zapewnia stabilizację wartości kąta wyłączenia, niezależnie od zmian częstotliwości rezonansowej falownika prądu. Kąt wyłączenia zdefiniowano jako przedział wyrażony w mierze łukowej liczony od chwili pojawienia się impulsów bramkowych do chwili, w której napięcie na kondensatorze komutacyjnym falownika osiągnie wartość zero.

Przykład układu realizującego sterowanie wg algorytmu stałego kąta wyłączenia przedstawiono na rys. 2, przebiegi czasowe napięć i prądów w poszczególnych gałęziach falownika oraz sygnałów sterujących w przedstawionym układzie sterowania dla dwóch wartości częstotliwości rezonansowej pokazano na rys. 3. Zasadniczą część układu sterującego stanowi integrator (7), z którym współpracują klucze analogowe (4), (5), (6). W czasie trwania dodatniej (lub ujemnej) ćwiartki sinusoidy napięcia na kondensatorze komutacyjnym C_0 następuje ładowanie integratora (7) ujemnym napięciem U_1 , w czasie trwania drugiej dodatniej lub ujemnej ćwiartki sinusoidy napięcia integrator (7) ulega rozładowaniu poprzez przyłożenie na jego wejście dodatniego napięcia U_2 (większego od modułu napięcia U_1).

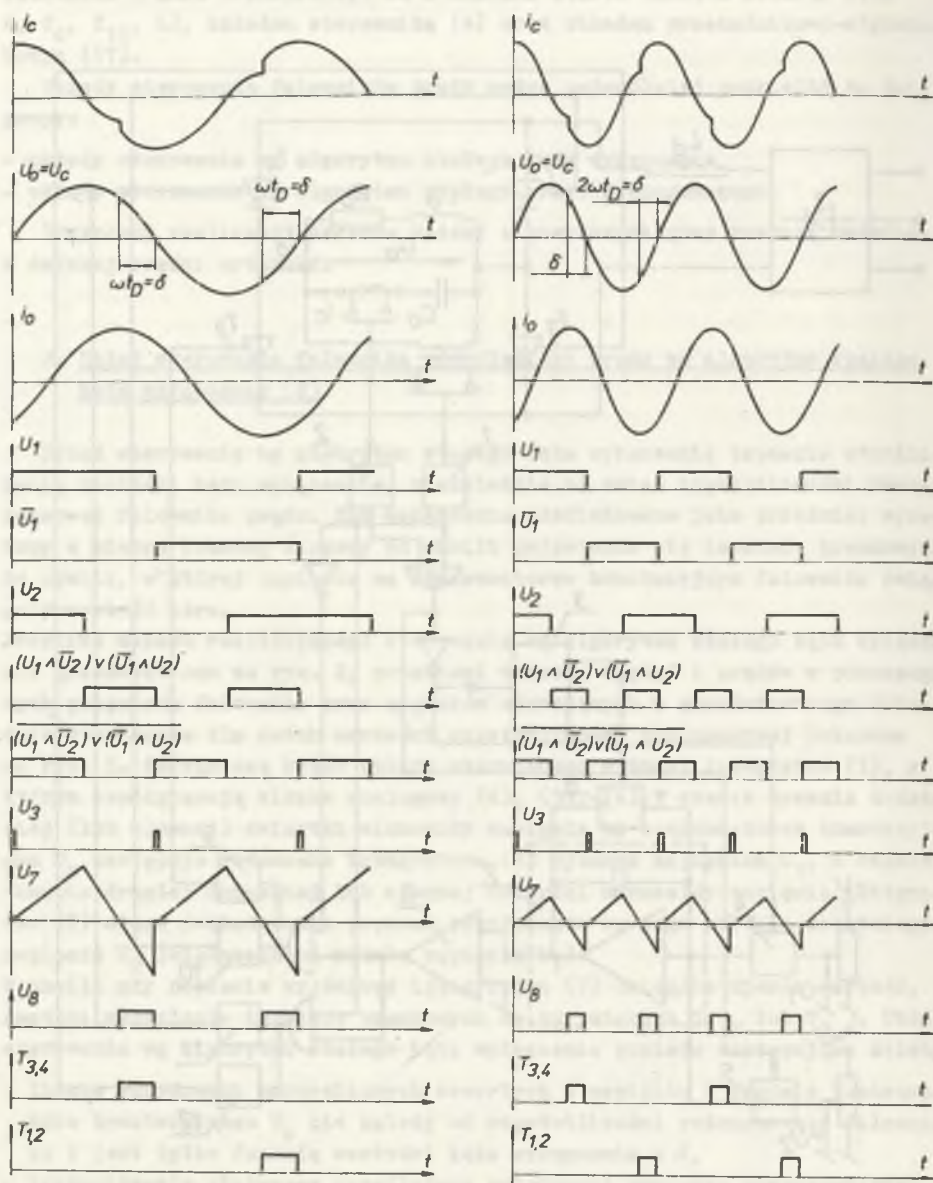
W chwili gdy napięcie wyjściowe integratora (7) osiągnie ujemną wartość, nastąpi wyzwolenie impulsów bramkowych na tyrystorach $T_{1,2}$ lub $T_{3,4}$. Układ sterowania wg algorytmu stałego kąta wyłączenia posiada następujące zalety:

- liczba składowych harmonicznych zawartych w napięciu i prądzie kondensatora komutacyjnego C_0 nie zależy od częstotliwości rezonansowej falownika i jest tylko funkcją wartości kąta wyłączenia - δ ,
- transmitancje statyczne określające zależności pomiędzy poszczególnymi napięciami i prądami falownika w stanie quasi-ustalonym są niezależne od częstotliwości rezonansowej falownika.



Rys. 2. Schemat układu sterowania według algorytmu stałego kąta wyłączenia tyrystorów falownika

Fig. 2. Scheme of the control system based on the constant turn-off angle principle of the inverter thyristors



Rys. 3. Przebiegi czasowe w poszczególnych gałęziach falownika oraz w układzie sterowania z rys. 2

Fig. 3. Waveforms in particular limbs of the inverter and in the control system from Fig. 2

Układ sterujący posiada jedną zasadniczą wadę, a mianowicie to, że czas dysponowany jest zależny odwrotnie proporcjonalnie od częstotliwości rezonansowej - $t_D = \frac{1}{\omega_0}$.

Ten czynnik zadecydował o tym, że częściej stosuje się układy sterujące wg algorytmu stałego czasu dysponowanego.

4. Układ sterowania falownika równoległego prądu wg algorytmu stałego czasu dysponowanego [3].

Układ sterowania wg algorytmu stałego czasu dysponowanego zapewnia stabilizację wartości czasu dysponowanego, niezależnie od zmian częstotliwości rezonansowej falownika równoległego.

Przykład układu realizującego sterowanie wg algorytmu stałego czasu dysponowanego przedstawiono na rys. 4, przebiegi czasowe sygnałów sterujących w zaprezentowanym układzie sterowania dla dwóch wartości częstotliwości rezonansowej przedstawiono na rys. 5. Układ zbudowany jest z generatora napięcia piłowego (integrator (6), klucz analogowy (3), komparatora napięcia (7)) oraz regulatora czasu komutacji (uniwibrator (4), inwertor (5), integrator (8)). Działanie układu sterującego wg algorytmu stałego czasu dysponowanego polega na porównaniu w integratorze (8) czasu trwania impulsu wzorcowego wytworzonego w uniwibratorze (4).

Do zalet układu sterującego wg algorytmu stałego czasu dysponowanego można zaliczyć:

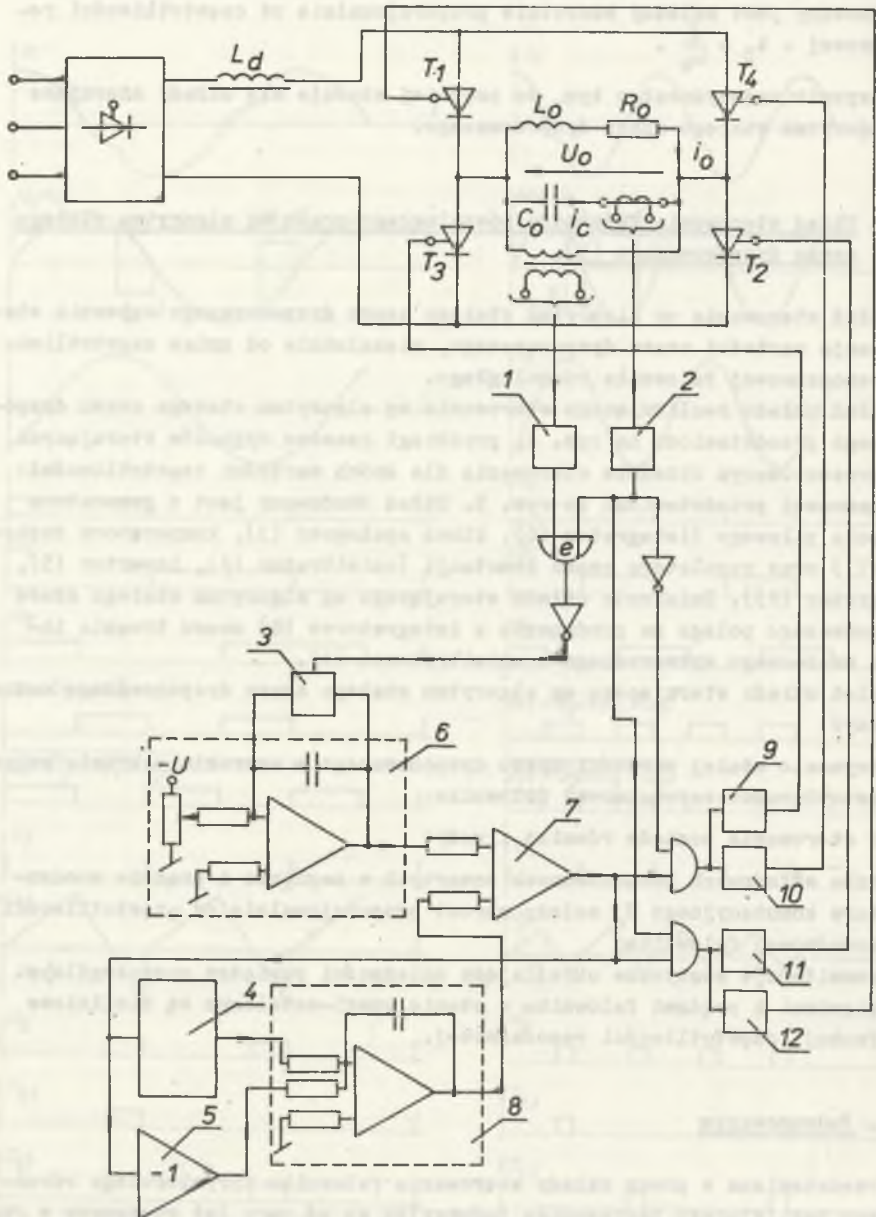
- utrzymanie stałej wartości czasu dysponowanego w szerokim zakresie zmian częstotliwości rezonansowej falownika.

Układ sterowania posiada również i wady:

- liczba składowych harmonicznnych zawartych w napięciu i prądzie kondensatora komutacyjnego C_0 zależy wprost proporcjonalnie od częstotliwości rezonansowej falownika,
- transmitancje statyczne określające zależności pomiędzy poszczególnymi napięciami i prądami falownika w stanie quasi-ustalonym są nieliniowe w funkcji częstotliwości rezonansowej.

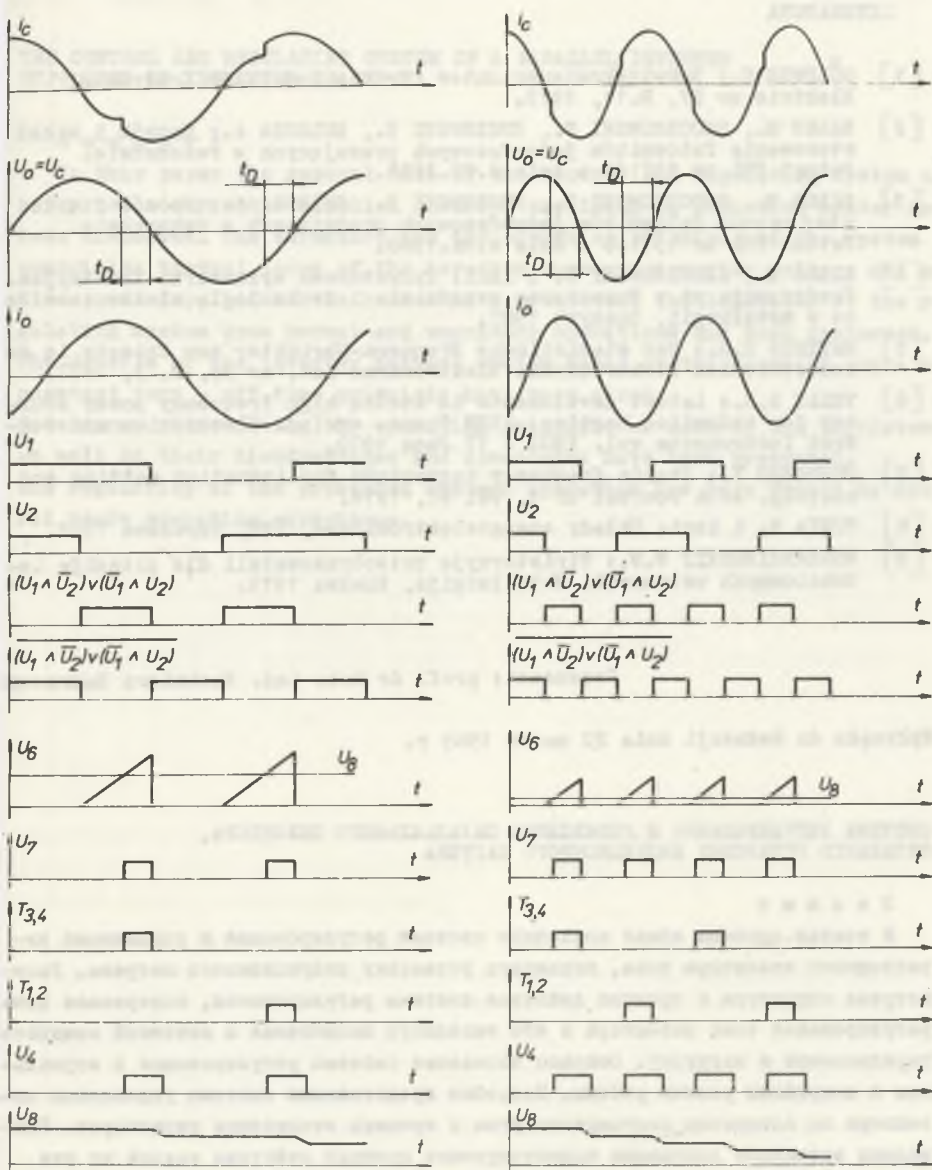
5. Podsumowanie

Przedstawione w pracy układy sterowania falownika tyrystorowego równoległego zasilającego nagrzewnicę indukcyjną są od paru lat stosowane w rozwiązaniach przemysłowych [4]. Zebrane doświadczenia potwierdziły ich pełną przydatność do pracy w bardzo trudnych warunkach eksploatacyjnych. W chwili obecnej trwają prace zmierzające do zastąpienia wszystkich funkcji układów sterowania, regulacji i zabezpieczeń falownika przez system mikroprocesorowy.



Rys. 4. Schemat układu sterowania według algorytmu stałego czasu dysponowanego na wyłączenie tyrystorów falownika

Fig. 4. Scheme of the control system based on the constant turn-off time principle of the inverter thyristors



Rys. 5. Przebiegi czasowe w poszczególnych gałęziach falownika oraz w układzie sterowania z rys. 4

Fig. 5. Waveforms in particular limbs of the inverter and in the control system from Fig. 4

LITERATURA

- [1] GULDNER H.: Schwingkreisumrichter für die induktive Erwärmung. *Elektrie* nr 27, H.11, 1973.
- [2] KALUS M., SKOCZKOWSKI T., KUCZEWSKI Z., KULESZA A.: Sposób i układ sterowania falowników jednofazowych pracujących w rezonansie. Patent PRL nr 137148 z dnia 4.08.1988.
- [3] KALUS M., SKOCZKOWSKI T., KUCZEWSKI Z., KULESZA A.: Sposób i układ sterowania falowników jednofazowych pracujących w rezonansie. Patent PRL nr 137149 z dnia 4.08.1988.
- [4] KALUS M., SKOCZKOWSKI T. i inni: Tyristorowe wyżarzarki indukcyjne. Konferencja pt.: Nowoczesne urządzenia i technologie elektrotermiczne w metalurgii, Szczyrk 1987.
- [5] MATTHES H.G.: Der statistische Frequenz-Umrichter zum Einsatz in der industriellen Elektrowärme. *Elektrowärme Int.* nr 35, B. 3, 1977.
- [6] PELLY B.R.: Latest developments in static high frequency power sources for induction heating. *IEEE Trans. on Ind. Electronics and Control Instruments* vol. IECJ - 17 June 1970.
- [7] SUNDBERG Y.: Static frequency converters for induction melting and heating. *ASEA Journal* nr 1, vol 47, 1974.
- [8] TUNIA H. i inni: Układy energoelektroniczne, WNT, Warszawa 1982.
- [9] WOSKRESIENSKIJ W.W.: Tiristornyje priobrazowateli dla pitanijsa indukcionnyh ustanowok. *Metallurgija*, Moskwa 1979.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski

Wpłynęło do Redakcji dnia 22 marca 1989 r.

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ИНВЕНТОРА,
ПИТАЮЩЕГО УСТАНОВКУ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Р е з ю м е

В статье описана общая концепция системы регулирования и управления тиристорного инвентора тока, питающего установку индукционного нагрева. Рассмотрена структура и принцип действия системы регулирования, содержащая цепь регулирования тока инвентора и его выходного напряжения и активной мощности передаваемой в нагрузку. Описано поведение системы регулирования в нормальном и аварийном режиме работы. Подробно представлены системы управления инвентора по алгоритму постоянного угла и времени отключения тиристорov. Приведены временные диаграммы иллюстрирующие принцип действия каждой из них, описаны их преимущества и недостатки. Безупречность работы предложенных систем подтвердила эксплуатация длящаяся несколько лет.

THE CONTROL AND REGULATING SYSTEM OF A PARALLEL INVERTER
SUPPLYING AN INDUCTION HEATER

S u m m a r y

In this paper the general idea of the control and regulating system of a thyristor current - supplied inverter supplying an induction heater has been discussed. The structure and the operating principle of the system comprising control loops of the inverter current, inverter voltage and active power supplied to the heater have been presented. The behaviour of the regulating system upon normal and emergency operations has been discussed. The details of the inverter control system based on the constant angle and constant turn - off time principle have been given. Wave forms illustrating the operating principle of each of the thyristors as well as their disadvantages and advantages have been presented. The regularity of the presented systems operation has been proved by several years operating experience.