

Tadeusz RODACKI, Kazimierz GIERLOTKA,
Bogusław GRZESIK

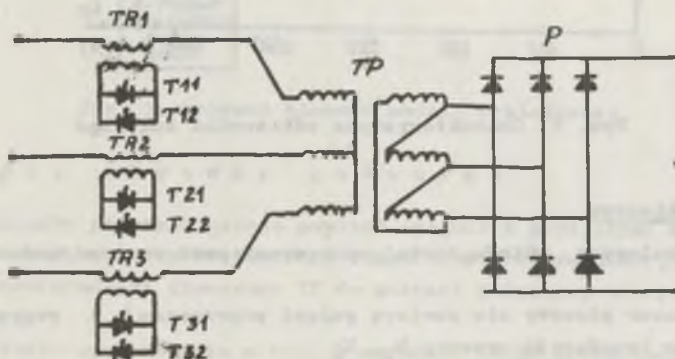
Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

MODEL ANALOGOWY I BADANIA TYRYSTOROWEGO
UKŁADU ZASILANIA ODBIORNIKA ŁUKOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób modelowania na maszynie analogowej układu zasilania odbiornika łukowego z tyrystorowymi regulatorami napięcia przemiennego włączonymi po wtórnej stronie transformatorów regulacyjnych oraz wyniki badań na modelu analogowym.

1. Wstęp

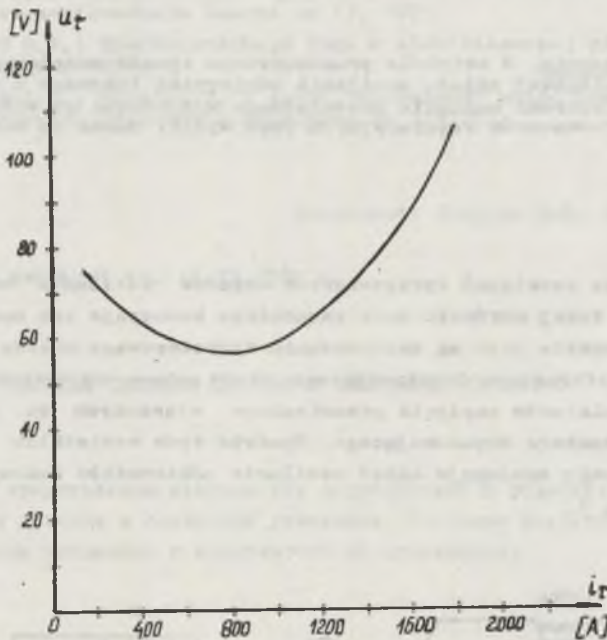
Istnieje wiele rozwiązań tyrystorowych układów zasilania odbiorników łukowych. Można tutaj wyróżnić dwie zasadnicze koncepcje ich budowy. Pierwsza koncepcja oparta jest na zastosowaniu tyrystorowego mostka po wtórnej stronie transformatora dopasowującego, druga polega na zastosowaniu tyrystorowych regulatorów napięcia przemiennego włączonych po pierwotnej stronie transformatora dopasowującego. Spośród tych wszystkich rozwiązań na szczególną uwagę zasługuje układ zasilania odbiorników łukowych przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy tyrystorowego układu zasilania odbiornika łukowego

Regulacja napięcia zasilania łuku, a tym samym prądu łuku odbywa się po stronie pierwotnej transformatora dopasowującego TP. Zasada regulacji polega na zmianie reaktancji jednofazowych transformatorów regulacyjnych TR1 - TR3 poprzez zmianę kąta wysterowania tyristorów (lub triaków) włączonych po stronie wtórnej transformatorów regulacyjnych. Odpowiedni dobór transformatorów regulacyjnych zapewnia przepływ ciągłego minimalnego prądu łuku oraz pozwala stosować tyristory o dowolnej klasie napięciowej.

W pracy przeprowadzono badania na modelu analogowym układu o mocy 410 kW zasilanego napięciem 6 kV. Charakterystykę odbiornika łukowego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyka odbiornika łukowego

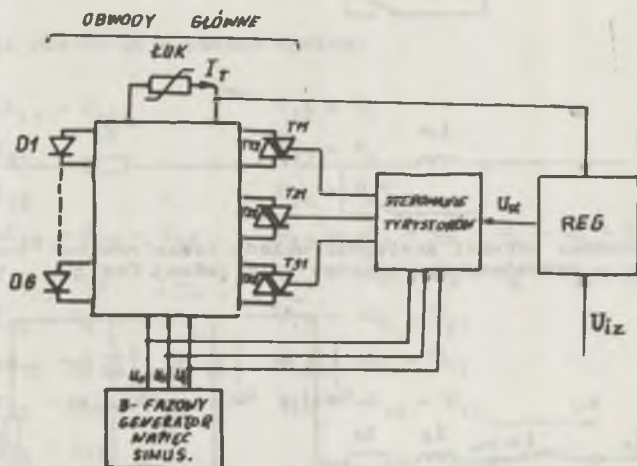
2. Model analogowy

Model analogowy układu został opracowany przy następujących założeniach:

- transformator piecowy nie zawiera gałęzi poprzecznej i reprezentowany jest przez impedancję zwarcia R_z, X_z ,

- transformator regulacyjny reprezentowany jest schematem zastępczym z rys. 4, rezystancję podłużną tego transformatora wyprowadzono na zewnątrz przyjmując ją równą R_z ,
- układ sprowadzono do strony wtórnej transformatora piecowego,
- modele zaworów (diod i tyrystorów) przyjęto jako rezystancje zmienne będące funkcją sterowania bramkowego, ich prądów i napięć; rezystancja zaowodu w stanie przewodzenia jest ok. $12 \cdot 10^{-3} \Omega$, natomiast w stanie nieprzewodzenia ok. $2 \cdot 10^3 \Omega$, co jest wystarczająco dobrym odwzorowaniem,
- zastosowana metoda bezpośrednia modelowania układów energoelektronicznych umożliwia odtworzenie w modelu tych wszystkich stanów układu rzeczywistego, które są możliwe do osiągnięcia przez przyjęte do obliczeń modele zaworów,
- model został wyposażony w arc cos system sterowania tyrystorami.

Najogólniejszą postać modelu pokazano na rys. 3 w postaci schematu blokowego.

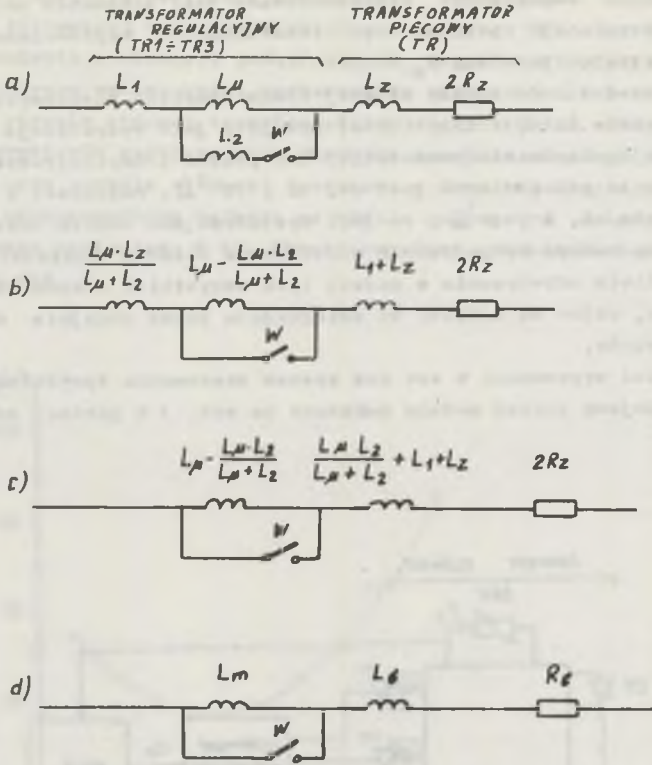


Rys. 3. Schemat blokowy modelu analogowego

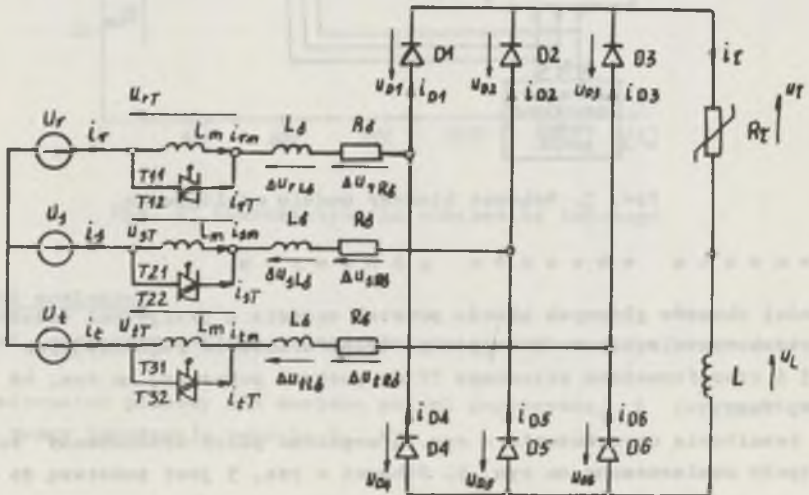
Równania obwodów głównych

Model obwodów głównych układu powstał zgodnie z przyjętymi założeniami po zredukowaniu schematu zastępczego transformatorów regulacyjnych $TR1 - TR3$ i transformatora piecowego TP do postaci pokazanej na rys. 4d dla jednej fazy.

W rezultacie uproszczenia z rys. 4 uzyskano pełny zredukowany schemat zastępczy zamieszczony na rys. 5. Schemat z rys. 5 jest podstawą do opra-

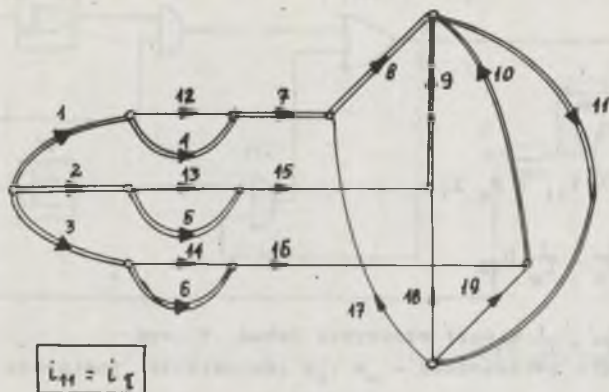


Rys. 4. Zredukowany schemat zastępczy układu transformator regulacyjny - transformator piecowy (dla jednej fazy)



Rys. 5. Pełny zredukowany schemat zastępczy

owania modelu obwodów głównych. Graf obwodu z pogrubionymi gałęziami przyjętego drzewa przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Graf schematu obwodów głównych

Równania obwodu mają postać ogólną:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= -I_{15} - I_{16} & U_{12} &= U_4 \\
 I_2 &= I_{15} & U_{13} &= U_5 \\
 I_3 &= I_{16} & U_{14} &= U_6 \\
 I_4 &= -I_{12} - I_{15} - I_{16} & U_{15} &= -U_1 + U_2 + U_4 - U_5 + U_7 + U_8 - U_9 \\
 I_5 &= I_{15} - I_{13} & U_{16} &= -U_1 + U_3 + U_4 - U_6 + U_7 + U_8 - U_{10} \\
 I_6 &= I_{16} - I_4 & U_{17} &= -U_8 - U_{11} \\
 I_7 &= -I_{15} - I_{16} & U_{18} &= -U_9 - U_{11} \\
 I_8 &= I_{17} - I_{15} - I_{16} & U_{19} &= -U_{10} - U_{11} \\
 I_9 &= I_{15} + I_{18} \\
 I_{10} &= I_{16} + I_{19} \\
 I_{11} &= I_{17} + I_{18} + I_{19}
 \end{aligned}$$

Równania maszynowe w postaci ogólnej:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= E_r \\
 U_2 &= E_s \\
 U_3 &= E_t \\
 U_4 &= Z_4 I_4 \\
 U_5 &= Z_5 I_5
 \end{aligned}$$

$$U_6 = Z_6 I_6$$

$$U_7 = s \frac{S_t S_u}{S_1} L_6 I_7 + \frac{S_{u7}}{S_1} R_6 I_7$$

$$U_8 = Z_8 I_8$$

$$U_9 = Z_9 I_9$$

$$U_{10} = Z_{10} I_{10}$$

$$U_{11} = s \frac{S_t S_u}{S_1} L I_{11} + N_{\tau} I_{11}$$

$$I_{12} = \frac{1}{s} \cdot \frac{S_1}{S_t S_u} \cdot \frac{1}{L_m} U_{12}$$

$$I_{13} = \frac{1}{s} \cdot \frac{S_1}{S_t S_u} \cdot \frac{1}{L_m} U_{13}$$

$$I_{14} = \frac{1}{s} \cdot \frac{S_1}{S_t S_u} \cdot \frac{1}{L_m} U_{14}$$

$$I_{15} = \frac{1}{s} \left(\frac{S_1}{S_t S_u} \cdot \frac{1}{L_6} U_{15} - \frac{R_6}{S_t} \cdot \frac{1}{L_6} I_{15} \right)$$

$$I_{16} = \frac{1}{s} \left(\frac{S_1}{S_t S_u} \cdot \frac{1}{L_6} U_{16} - \frac{R_6}{S_t} \cdot \frac{1}{L_6} I_{16} \right)$$

$$I_{17} = G_{17} U_{17}$$

$$I_{18} = G_{18} U_{18}$$

$$I_{19} = G_{19} U_{16}$$

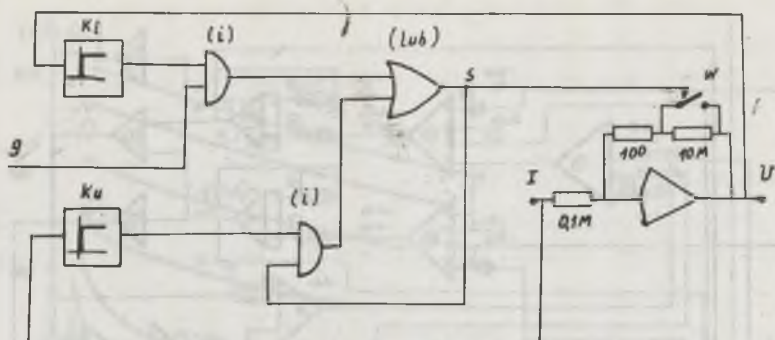
Modele z aworów

- Tyrystor

Jest to model typu R, tzn. wykonuje operację $U = RI$. Schemat modelu pokazano na rys. 7. W pełnym modelu układu (rys. 8) pary tyrystorów odzorowane są na wzmacniaczach T11, T12 - 42, T21; T22 - 29, T31, T32-27.

- Dioda typu R

Model ten wykonuje operację $U = RI$. Jest więc podobny do modelu tyryстора z rys. 7, z tym że pozbawiony jest sieci logicznej. Modele takie zawiera schemat blokowy na rys. 8, są one zrealizowane na wzmacniaczach 44, 3, 14.



Rys. 7. Model tyrystora typu R

g - sygnał sterujący tyrystorem, k_I , k_U - komparatory odpowiednio prądu i napięcia

- Dioda typu G

Wykonuje operację $I = G U$. Schemat takiej diody można prześledzić na schemacie blokowym (rys. 8). Diody są tam wykonane przy użyciu wzmacniaczy 4, 9, 11.

S c h e m a t b l o k o w y

Na podstawie równań maszynowych w postaci ogólnej opracowano schemat blokowy. Schemat ten pokazano na rys. 8 z wpisanymi na nim wartościami nastaw obliczonymi z parametrów układu rzeczywistego i przyjętych współczynników skal.

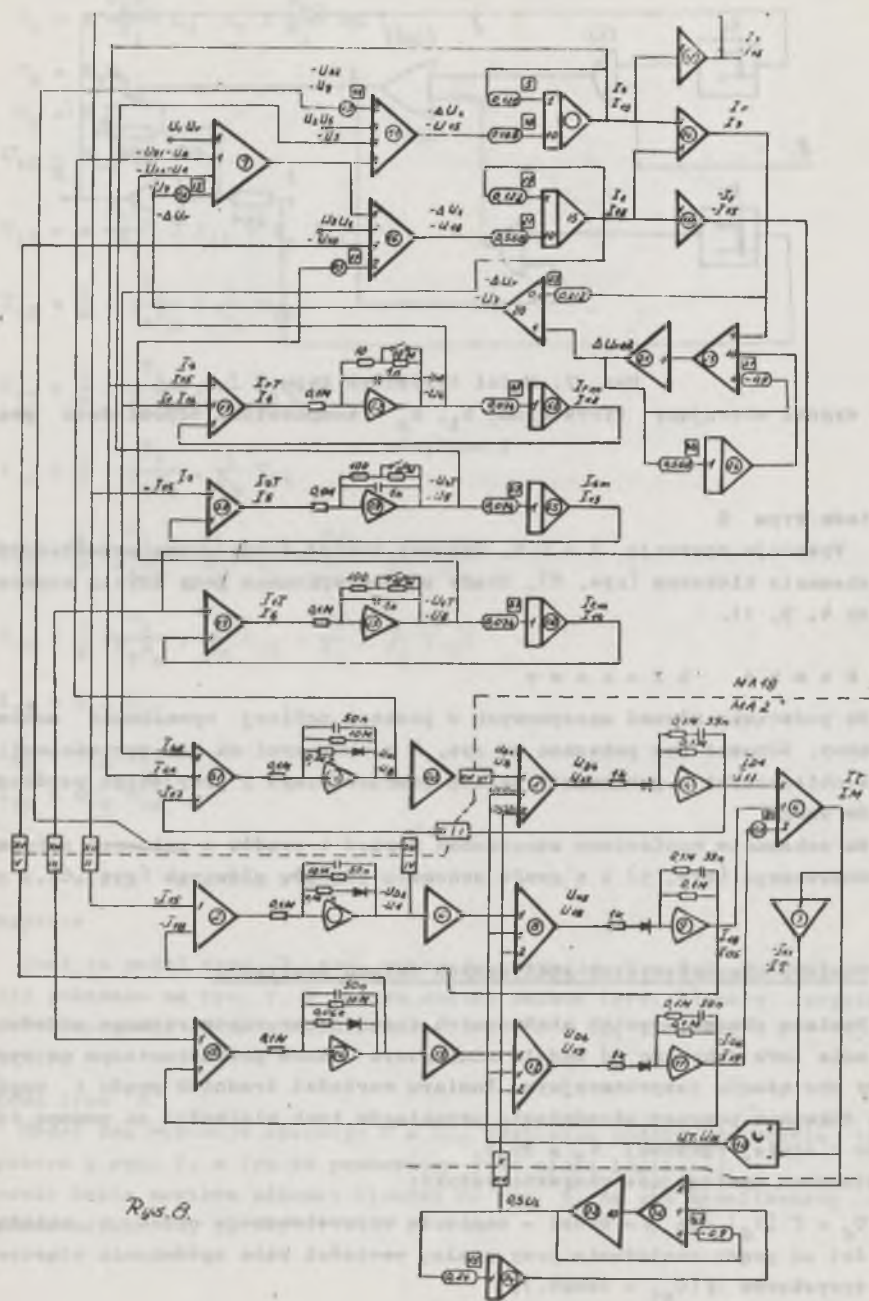
Na schemacie naniesiono oznaczenia napięć i prądów z pełnego schematu zredukowanego (rys. 5) i z grafu schematu obwodów głównych (rys. 6).

3. Pomiary charakterystyk statycznych układu zasilania

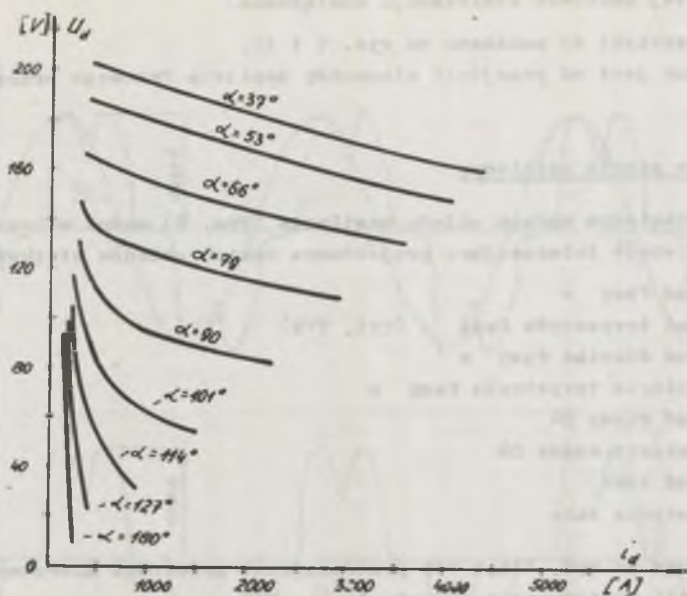
Pomiaru charakterystyk statycznych tyrystorowo-magnetycznego układu zasilania łuku dokonano na modelu analogowym układu przedstawionym na rys. 8 przy obciążeniu rezystancyjnym. Pomiaru wartości średnich prądu i napięcia dokonano poprzez uśrednienie przebiegów tych wielkości za pomocą filtrów o stałej czasowej $\tau_F = 20 \text{ s}$.

Pomierzono następujące charakterystyki:

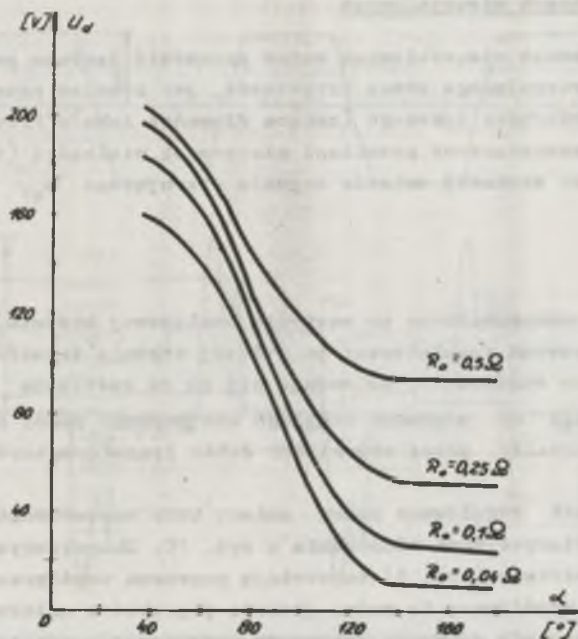
- a) $U_d = f(i_d)$ dla $\alpha = \text{const}$ - napięcia wyprostowanego układu w zależności od prądu obciążenia przy stałej wartości kąta opóźnienia włączenia tyrystorów ($U_{gt} = \text{const}$),



Rys. 8. Model analogowy badanego ukladu



Rys. 9. Charakterystyki zewnętrzne $u_d = f(i_d)$ przy $\omega = \text{const.}$



Rys. 10. Charakterystyki sterowania $u_d = f(\alpha)$ przy $R_o = \text{const.}$

- b) $U_d = f(\alpha) R_{obo} = \text{const}$ - napięcia wyprostowanego w zależności od kąta przy stałej wartości rezystancji obciążenia.

Charakterystyki te pokazano na rys. 9 i 10.

Kąt α liczony jest od przejścia sinusoidy napięcia fazowego przez zero.

4. Pomiary w stanie ustalonym

W przedstawionym modelu układu zasilania (rys. 8) można mierzyć i rejestrować wszystkie interesujące projektanta takich układów wielkości, np.:

- i_r - prąd fazy r
- i_{rT} - prąd tyrystorów fazy r (T11, T12)
- i_{rm} - prąd dławika fazy r
- u_{rT} - napięcie tyrystorów fazy r
- i_{D4} - prąd diody D4
- u_{D4} - napięcie diody D4
- i_L - prąd łuku
- u_L - napięcie łuku

Przykładowo na rys. 11a i 11b przedstawiono przebiegi mierzonych wielkości dla kąta wysterowania tyrystorów $\alpha = 77^\circ$.

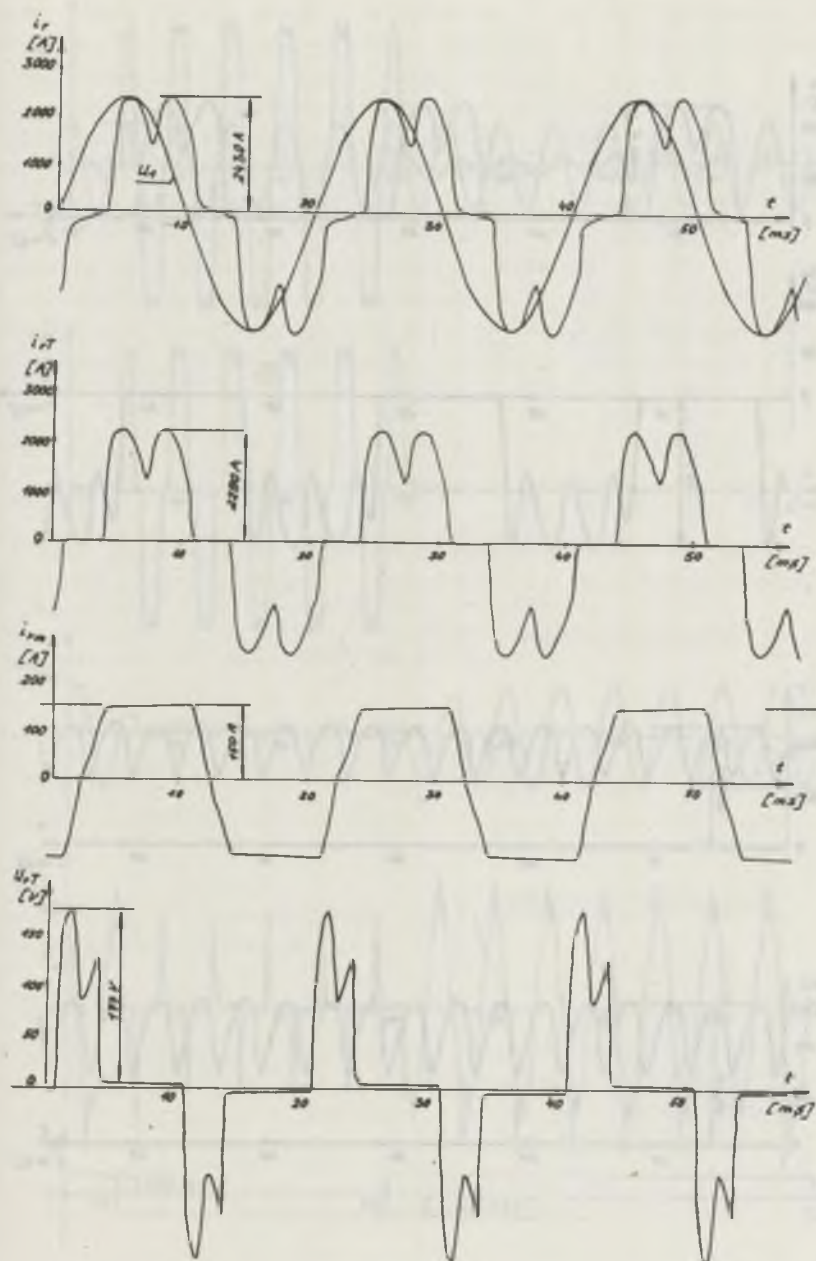
5. Pomiary w stanach nieustalonych

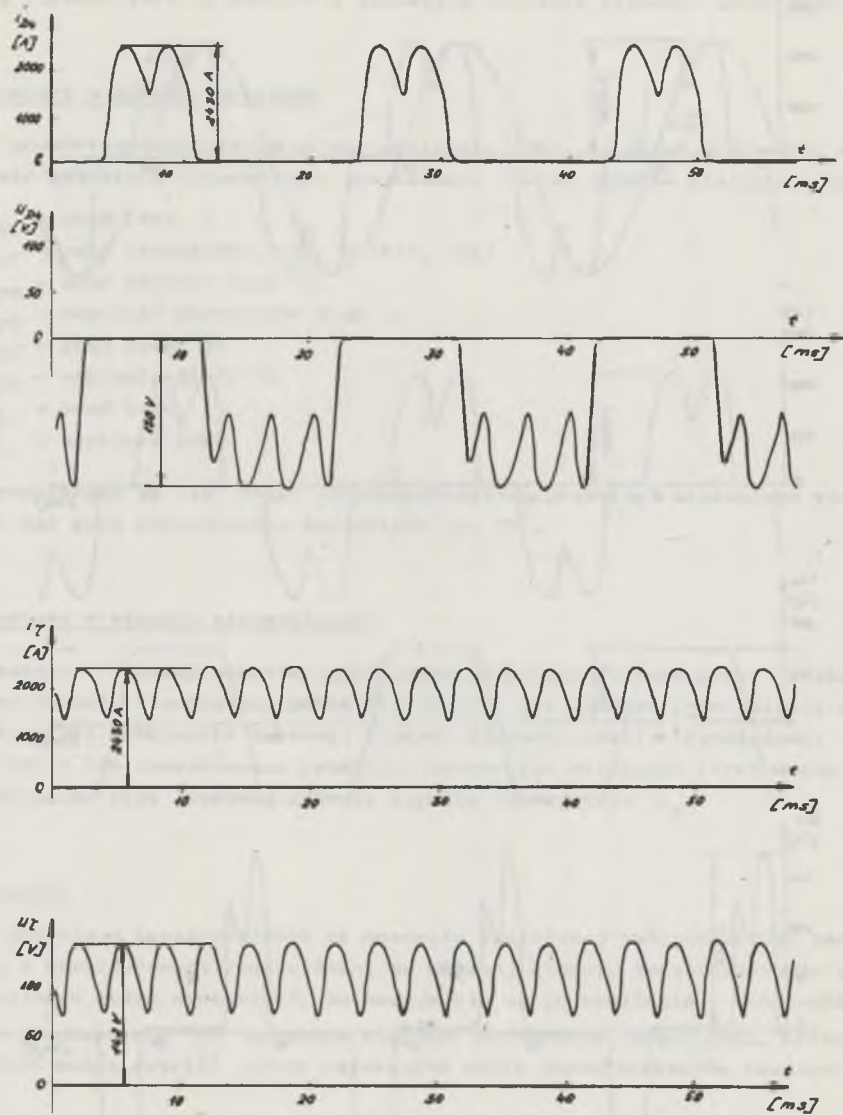
Badania w stanach nieustalonych można prowadzić zarówno przez skokową zmianę sygnału sterującego pracą tyrystorów, jak również przy zmianie charakterystyki odbiornika łukowego (zmiana długości łuku). Przykładowo, na rys. 12a i 12b zamieszczono przebiegi mierzonych wielkości (tych samych co w punkcie 4) przy skokowej zmianie sygnału sterującego u_s .

6. Wnioski

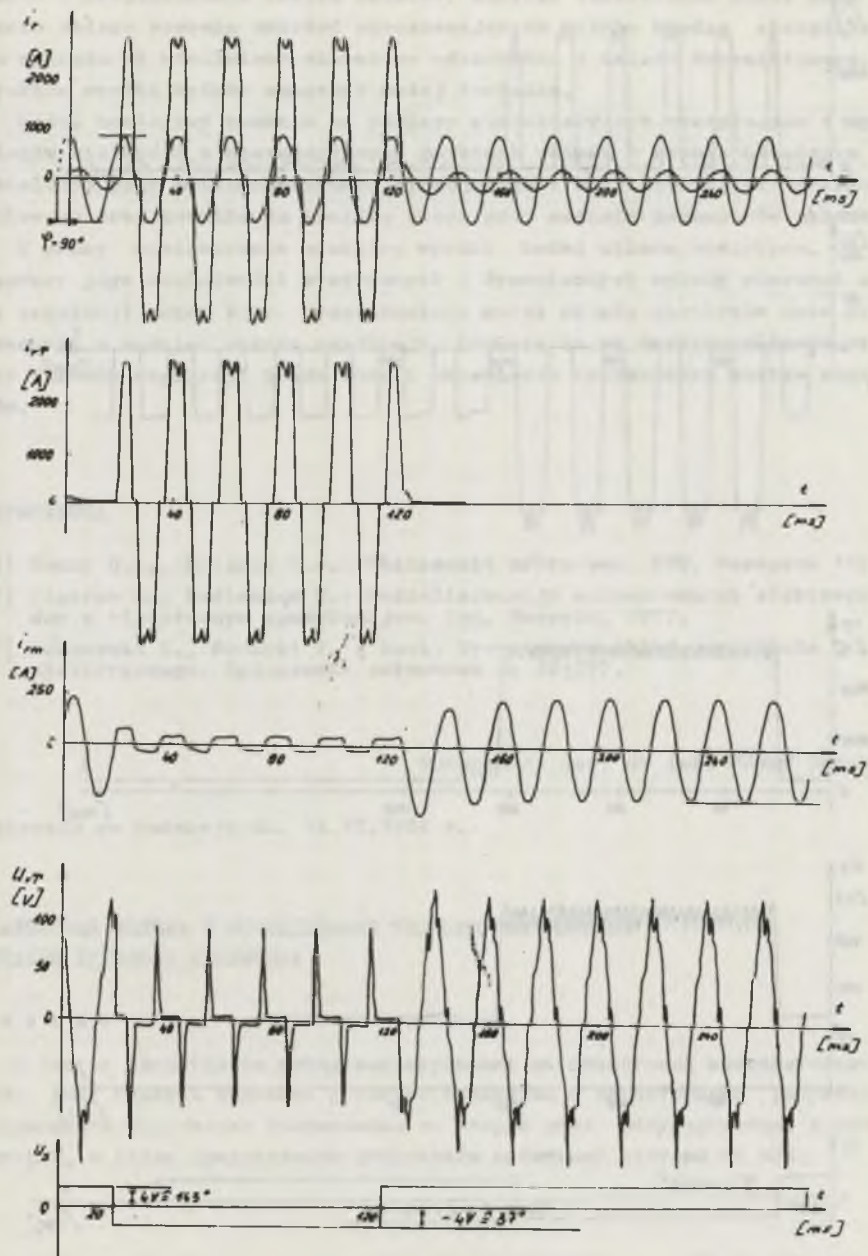
W oparciu o przeprowadzone na maszynie analogowej badania układu zasilania z tyrystorowymi regulatorami po wtórnej stronie transformatorów regulacyjnych można stwierdzić, że nadaje się on do zasilania odbiorników łukowych. Zapewnia on przepływ ciągłego minimalnego prądu łuku, którego wielkość można ustalić przez odpowiedni dobór transformatorów regulacyjnych.

Prąd łuku jest regulowany przez zmianę kąta wysterowania tyrystorów zgodnie z charakterystykami sterowania z rys. 10. Charakterystyki zewnętrzne układu otwartego (rys. 9) zapewniają poprawną współpracę z odbiornikiem łukowym; współpracę tę można jeszcze poprawić w układzie zamkniętym przez zastosowanie ujemnego prądowego sprzężenia zwrotnego.

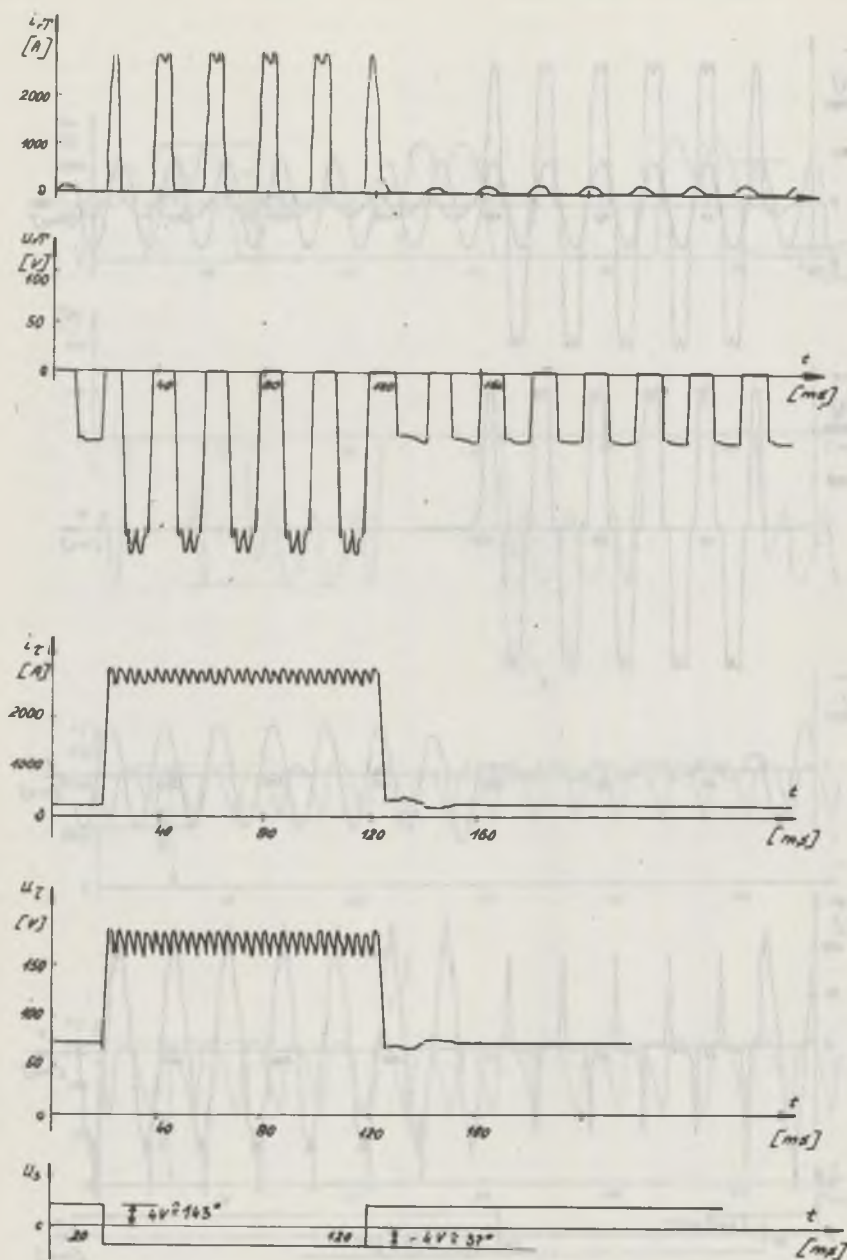
Rys. 11a. Przebiegi mierzonych wielkości dla $\alpha = 77^\circ$



Rys. 11b. Przebiegi mierzonych wielkości dla $\alpha = 77^\circ$



Rys. 12a. Przebiegi mierzonych wielkości przy skokowej zmianie sygnału sterującego



Rys. 12b. Przebiegi mierzonych wielkości przy skokowej zmianie sygnału sterującego

Zastosowanie metody modelowania analogowego jest bardzo przydatne do badania i projektowania takich układów. Analiza teoretyczna nawet przy przyjęciu całego szeregu założeń upraszczających byłaby bardzo skomplikowana ze względu na nieliniowy charakter odbiornika i układu tyrystorowego, a uzyskane wyniki byłyby znacznie mniej dokładne.

Model analogowy pozwala na pomiary charakterystyk statycznych i przebiegów wielkości w poszczególnych punktach układu w stanie ustalonym i niestalonym przy zmianach sygnału sterującego i charakterystyki odbiornika łukowego oraz pozwala na analizę pracy przy zmianie parametrów układu.

W pracy zamieszczono niektóre wyniki badań układu otwartego. W celu poprawy jego właściwości statycznych i dynamicznych należy stosować układy regulacji prądu łuku. Przedstawiony model układu zasilania może współpracować z modelem układu regulacji. Pozwala to na analizę różnych struktur układów regulacji prądu łuku i określenie optymalnych nastaw regulatorów.

LITERATURA

- [1] Bekoy G.A., Karplus W.J.: Obliczenia hybrydowe. WNT, Warszawa 1976.
- [2] Pietrow L., Ładniew W.: Modelowanie asynchronnych elektroprzewodów z tyrystorowym upravlaniem. Izd. Energia, 1977.
- [3] Kuczewski Z., Rodacki T. i inni: Tyrystorowy układ zasilania łuku elektrycznego. Zgłoszenie patentowe nr 225777.

Recenzent: doc. dr inż. Józef Daniewicz

Wpłynęło do redakcji dn. 15.VI.1982 r.

АНАЛОГОВАЯ МОДЕЛЬ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРНОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ДУГОВОГО ПРИЕМНИКА

Резюме

В статье представлен метод моделирования на аналоговой вычислительной машине АВМ системы питания дугового приемника с тиристорными регуляторами переменного напряжения включенными во вторую цепь регулировочных трансформаторов, а также представлены результаты испытаний системы на АВМ.

THE ANALOG MODEL AND EXAMINATIONS OF THE THYRISTOR SUPPLYING SYSTEM OF THE ELECTRIC ARC

Summary

The method of the simulation on analog computer of the supplying system of the electric arc, with thyristor transducer of alternating voltage in secondary winding of the control transformer is presented in the article. The results of the examinations on analog computer are given.

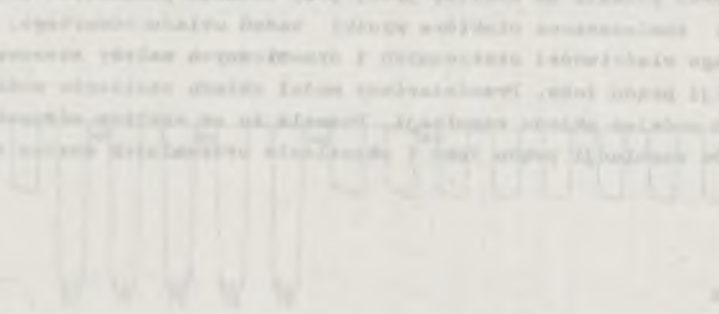


Fig. 1

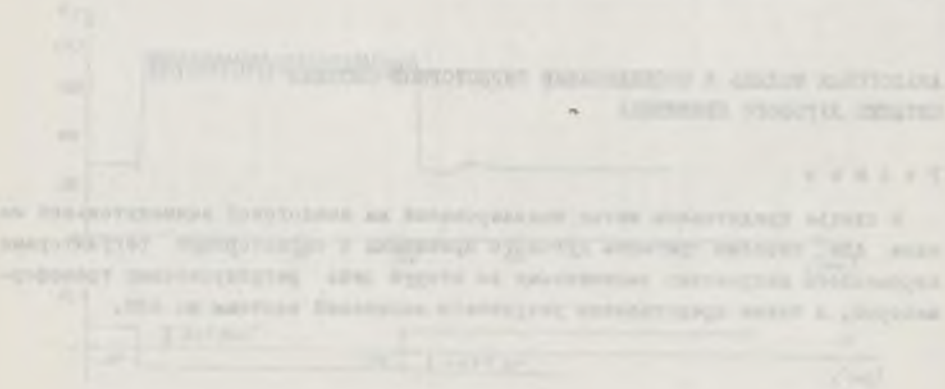


Fig. 2