# ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ



**4.0**-LECIE Politechniki Sląskiej

TADEUSZ RODACKI

ANALIZA I SYNTEZA TYRYSTOROWYCH UKŁADÓW ZASILANIA I REGULACJI PEWNYCH ODBIORNIKÓW ŁUKOWYCH

# ELEKTRYKA

Z. 96 GLIWICE 1985



Nr 824

Worken Octoold (astronom manager), Colla Clehomaka (redaktor dalain), etcona Stimmo (marches redaktor)

TADEUSZ RODACKI

# ANALIZA J SYNTEZA TYRYSTOBOWYCH UKŁADÓW ZASILANIA I REGULACJI PEWNYCH ODBIORNIKÓW ŁUKOWYCH

GLIWICE 1985

# OPINIODAWCY:

Prof. dr hab. Kazimierz Zakrzewski Doc. dr hab. inż. Aleksy Kurbiel

# KOLEGIUM REDAKCYJNE

Wiesław Gabzdyl (redaktor naczelny), Zofia Cichowska (redaktor działu), Elżbieta Stinzing (sekretarz redakcji)

#### Printing and an

OPRACOWANIE REDAKCYJNE Alicja Nowacka

CREADOW RASILANDA I BROULACH

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0072-4688

# Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Skład, fotokopie, druk i oprawę wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

#### SPIS TRESCI

Str.

1.	WSTEP	5
2.	WPŁYW PARAMETRÓW UKŁADU ZASILANIA NA JAKOŚĆ PLONIĘCIA ŁUKU ELEK- TRYCZNEGO	9
	2.1. Charakterystyki odbiornika łukowego	9
	2.2. Stabilność statyczna wyładowania łukowego	14
	2.3. Stabilność dynamiczna wyładowania łukowego	16
	2.4. Dodatkowe wymagania dla łuku prądu przemiennego	17
	2.5. Wnioski	19
3.	WYBOR UKLADU ZASILANIA ODBIORNIKA ŁUKOWEGO	22
	3.1. Układy rezonansowe (parametryczne)	22
	3.2. Układy tyrystorowe	24
	3.3. Kryteria wyboru układu zasilania odbiornika łukowego	31
	second a second distant account many a second biological part	
4.	ANALIZA UKLADÓW ZASILANIA ODBIORNIKOW ŁUKOWYCH Z TYRYSTOROWYMI STEROWNIKAMI NAPIĘCIA PRZEMIENNEGO	34
	4.1. Układy dwóch połączonych przeciwrównolegie tyrystorów z dła- wikiem	34
	4.2. Układy dwóch połączonych przeciwrównolegie tyrystorów po wtórnej stronie transformatora regulacyjnego	40
	4.3. Układy tyrystorowo-magnetyczne	43
	4.4. Uniwersalny model analogowy układu zasilania odbiorników łu- kowych z tyrystorowymi sterownikami napięcia przemiennego	50
5.	SYNTEZA UKŁADÓW REGULACJI PRĄDU ŁUKU	57
	5.1. Model matematyozny układu zasilania i regulacji prądu od- biornika łukowego	57
	5.2. Układy z regulatorem typu PI i PID	61
	5.3. Układy z regulatorem prądu i napięcia łuku	64
	5.4. Uklady inwariantne	67
	5.5. Układy adaptacy jne	70
6.	UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI	80
LT	reratura	83
		0-
STI	RESZCZENIA	87

A second process in state of the second process in second states . A

IN NAMES AND POST OFFICE ADDRESS OF TAXABLE ADDRESS ADDRE

W urządzeniach, w których wykorzystywany jest łuk elektryczny stosowane są w kraju klasyczne już układy zasilania łuku, takie jak: transformator ze szozeline powietrzna, transformator z dławikami lub rezystorami. transformator a podmagnesowywanym rdzeniem, transformator z transduktorami. Takie zasilacze pozwalają poprzez odpowiedni dobór ich parametrów i połączeń układu zapewnić pełny zapłon i stabilne płonięcie łuku elektryczmego. W ostatnich latach pastapił jednak szybki rozwój urządzeń łukowych. zwiększył się zakres ich zastosowań wzrosły wymagania co do jakości procesów technologicznych, kosztów eksploatacyjnych i możliwości automatyczned pracy.

Diatego tež w wielu krajach prowadzone sa intensywne badania zmierzajace do opracowania nowoczesnego układu zasilania odbiornika łukowego, tzn. takiego, który:

- spelnia wymagania zepewniające niezawodny zapłon i stabilne płoniecie luku elektryoznego.
- zapewnia możliwość płynnej nastawy prądu w szerokim zakresie, jego regulacji i stabilizacji z dużą dokładnością (często poniżej 1%),
- pozwala ograniczyć przeregulowania prądu w stanach przejściowych przy możliwie krótkim czasie ich trwania, w przypadku zakłóceń od stronywielkości wymuszających i od strony odbiornika.

- pozwala na automatyzację całego procesu technologicznego i sterowanie programowe.

- posiada wysoki współczynnik sprawności.

W chwili obecnej te wysokie wymagania mogą najlepiej spełnić zasilacze tyrystorowe wyposażone w elektroniczne układy regulacji.

Analizując możliwości zastosowania do tych celów układów tyrystorowych należy zwrócić uwagę między innymi na konieczność spełnienia warunku nieprzerwanego płoniecia łuku. Stąd wynika, że można stosować układy. W których przy niewysterowanych tyrystorach płynie pewien minimalny ciągły prąd łuku lub też układy, w których tyrystory mają ograniczony kąt wysterowania zapewniający przy danych parametrach obwodu elektrycznego przepływ minimalnego cięgłego prądu łuku. Należy przy tym również zwrócić uwage na inne wymagania, jakie powinien spełniać układ zasilania odbiornika lukowego, aby zapewnić stabilne plonięcie luku elektrycznego oraz na vplyw parametrów układu na charakterystyki luku. Zasilacze tyrystorowe pracujące w układzie otwartym ze względu na swoje charakterystyki nie bar- 6 -

dzo nadają się do zasilania łuku. Dlatego też, aby zapewnić poprawną praog w szerokim zakresie zmian prądu i przy różnych charakterystykach odbiornika należy je wyposażyć w elektroniczne układy regulacji, których zadaniem będzie odpowiednie uformowanie charakterystyki zewnętrznej zasilacza, zapewnienie dużej dokładności regulacji prądu, ograniczenie przeregulowań w stanach przejściowych przy zapewnieniu możliwie najkrótszego czasu trwania stanów przejściowych. W rozwiązaniach tradycyjnych stabilizację mocy luku osiąga się poprzez zmianę odległości elektrod. Układy regulacji posuwu elektrod ze względu ma dużą strefę nieczułości oraz duże stałe czasowe nie mogą sprostać stawianym wymaganiom. Zastosowanie zasilaczy tyrystorowych pozwala regulować parametry elektryczne przez dokładne i szybkie sterowanie napięcia i prądu łuku, natomiast układ posuwu elektrod może służyć jedynie do zgrubnej regulacji tych parametrów lub do uzyskania żądanej dlugości luku, Analiza i optymalizacja tyrystorowych układów zasilania odbiorników łukowych wymaga określenia właściwości łuku elektrycznego jako obiektu regulacji. Łuk elektryczny jest obiektem o silnie nieliniowej, niejednoznacznej i niestacjonarnej charakterystyce prądowo-napięciowej. Skomplikowana współzależność wielu procesów fizycznych składających się na wyładowanie łukowe oraz wpływ często losowy wielu czynników zewnętrznych są powodem, że do chwili obecnej nie opracowano pełnego modelu matematyoznego tego zjawiska. Podejmowane przez licznych autorów próby analitycznego określenia wielkości charakteryzujących łuk doprowadziły jedynie do opisu matematycznego jego charakteryatyki prądowo-napięciowej, ale uzyskane zależności odnosiły się tylko do ściśle określonych warunków płonięcia łuku, przy czym występujące w nich stałe należało wyznaczyć empirycznie. Właściwości eksploatacyjne łuku elektrycznego najlepiej można określić poprzez doświadczalne wyznaczenie obszaru możliwej pracy urządzenia łukowego oraz pomiar rodziny charakterystyk napięciowo-prądowych statycznych i dynamicznych. Szerokie zastosowanie w przemyśle układów tyrystorowych do zasilania odbiorników łukowych wiąże się zdaniem autora ze azozegółowym rozpracowaniem następujących zagadnień:

- wybór układu zasilania uwzględniający wymagania jakie stawia odbiornik łukowy i proces technologiczny.
- metody analizy właściwości statycznych i dynamicznych tych układów,
- analiza różnych możliwych do zastosowania struktur układów regulacji, wybór odpowiedniej struktury w zależności od wymagań,
- synteza układów regulacji i optymalny dobór nastaw regulatorów.

Zagadnienia te nie są kompleksowo rozpracowane w dostępnej literaturze, a nieliczne publikacje dotyczą tylko wycinków tego szerokiego tematu. Niniejaza praca jest próbą całościowego i azczegółowego opracowania tych zgaadnień oraz próbą rozwiązania technicznego niektórych problemów. W rozdziale drugim pracy określono wpływ parametrów układu zasilania na proces płonięcia łuku elektrycznego.

Apalizowano charakterystyki napięciowo-prądowe łuku, wymagania wynikające z warunków statycznej i dynamicznej stabilności płonięcia łuku, dodatkowe wymagania dla łuku przemiennego prądu oram zakłócenia w procesie płonięcia łuku elektrycznego.

W rozdziale trzecim przedatawiono kierunki badań i rozwoju tyrystorowych układów zasilania oraz opracowane kryteria i warunki pozwalające na wybór najkorzystniejszej wersji układu zasilania w zależności od rodzaju odbiornika łukowego i wymagań technologicznych. Kryteria te określają jedpocześnie pewną klasę odbiorników łukowych, do których odnoszą się praktyczne wnioski wynikające z pracy. W wyniku analizy do zasilania tych odbiorników łukowych zaproponowano zastosowanie opracowanych przez autora trzech wariantów tyrystorowych układów zasilania z regulacją po stronie pierwotnej transformatora dopasowującego: układu z dławikami, układu z transformatorami jednofazowymi i układu tyrystorowo-magnetycznego.Rozwiązania te zgloszono do opatentowania. Układy te zdaniem autora dobrze spełpiają wymagania atawiane zasilaczom odbiorników łukowych. W następnym rozdziale pracy przeprowadzono analizę właściwości i charakterystyk proponowanych rozwiązań sterowników tyrystorowych oraz przedatawiono uniwersalny model analogowy układu zasilania łuku elektrycznego z regulacją po atronie napiecia przemiennego.

Zastosowanie symulacji analogowej pozwala analizować charakteryatyki statyczne i dynamiczne układu zasilania, badać współpracę układu zasilania z odbiornikiem łukowym o różnych charakterystykach napięciowo-prądowych oraz dobrać najkorzystniej parametry obwodów elektrycznych.

W dalazej ozęści pracy przedstawiono zagadnienia związane z układami regulacji prądu przeznaczonymi do tyrystorowych zasilaczy łuku elektrycznego.

Opracowano model matematyczny, który pozwolił na analizę wazystkich możliwych do zastosowania struktur układów regulacji: układu regulacji z regulatorem prądu PI lub PID, układu regulacji z regulatorem prądu typu PI i napięcia typu PD, inwariantnego układu regulacji i adaptacyjnych układów regulacji. Dla poszczególnych typów regulatorów określono warunki stabilności dynamicznej całego układu oraz w sposób syntetyczny ujęto zasady doboru optymalnych nastaw regulatorów. Rozwiązania teoretyczne uzupełniono badaniami cymulacyjnymi na maszynie analogowej oraz porównano z wynikami pomiarów w układzie laboratoryjnym o mocy 55 kW.

Niniejsza monografia jest podsumowaniem wyników badań własnych autora oraz prac wykonanych przez autora w ramach problemu resortowego MNSzWiT ur 1.2 pt. "Zastosowanie niskotemperaturowej plazmy w przemyśle".

Przedatawione w niej rozważania stanowią próbę całościowego ujęcia problemu zastosowania układów tyrystorowych do zasilania i sterowania odbiorników łukowych. Zawiera rozważania dotyczące zarówno zagadnień wyboru roz-

- 7 -

wiązania zasilacza tyrystorowego i odpowiedniej struktury układu regulaoji jak też zagadnień metody analizy i syntezy tych układów w oparciu o charakterystyki prądowo-napięciowe odbiorników łukowych.

- 8 -

Przyjęcie pewnych założeń upraszozających pozwoliło uzyskać stosunkowo proste (możliwe do stosowania w praktyce inżynierskiej) zależności pozwalające obliczyć optymalne nastawy regulatorów.

Wyniki niniejszej pracy potwierdzają zalety i pełną przydatność tyrystorowych układów do zasilania odbiorników łukowych o różnych przebiegach charakterystyk prądowo-napięciowych oraz umożliwiają projektowanie i optymalny dobór parametrów takich układów przy zadanych właściwościach urządzenia łukowego i określonych wymaganiach procesu tschnologicznego.

- The second second in the second se

And a second sec

2. WPŁYW PARAMETRÓW UKŁADU ZASILANIA NA JAKOŚĆ PŁONIĘCIA ŁUKU ELEKTRYCZNEGO

#### 2.1. Charakterystyki odbiornika lukowego

W urządzeniach, w których wykorzystywany jest łuk elektryczny możemy wyróżnić dwa rodzaje wyładowania łukowego. Pierwszym jest łuk swobodny płonący pomiędzy elektrodami doprowadzającymi prąd. w którym możliwości keztałtowania warunków jego płonięcia przez kontrolowane czynniki zewnętrzne są bardzo ograniczone. Drugim rodzajem jest łuk plazmowy płonący w kontrolowanym wymuszonym osiowym przepływie gazu plazmotwórozego, co powoduje ujednorodnienie środowiska, w którym płonie łuk,a jednocześnie plazma w nim wytworzona zostaje skierowana na przedmiot podlegający działaniu cieplnemu. Wyładowanie łukowe jest złożonym procesem przewodzenia prądu elektrycznego przez zjonizowany gaz (plazmę) o odpowiednio dużej koncentraoji czątek naładowanych. W przestrzeni międzyelektrodowej zachodzi cały szereg zjawisk fizycznych, jak np.: jonizacja stopniowa i udarowa, termojonizacja, termo i autoemieja, dejonizacja [6], [73], dziažanie siž elektromagnetycznych [4], [11]. Zjawiska te nie przebiegają jednakowo w całej kolumnie wyładowania. Można tu rozróżnić trzy strefy: strefę katodową dłucości rzedu 10<sup>-5</sup> + 10<sup>-3</sup> cm, na której spadek napięcia wynosi 8 ÷ 18 V i jest w małym stopniu zależny od długości łuku, strefę słupa łuku, na której spadek napięcia silnie zależy od długości żuku oraz strefę anodową o długości nieco większej od strefy katodowej, na której spadek napięcia jest rzędu 2 ± 6 V.

Skomplikowany i nieliniowy przebieg zachodzących w łuku zjawisk, operowanie przy ich opisie wielkościami trudnymi do ilościowego określenia,wpływ ozysto stochastyczny warunków otoczenia jest powodem, że próby stworzenia matematycznego modelu łuku przydatnego w pracy inżynierskiej, a określającego wzajemny związek między fizycznymi parametrami zjonizowanego gazu, warunkami chłodzenia łuku i parametrami obwodu elektrycznego nie dały pozytywnych rezultatów. Dlatego też w praciu o jego oharakterystyki przedstawiające związki pomiędzy niektórymi jego wielkościami:  $U_2 = f(1_2)$ ,  $U_2 = f(1_2)$ ,  $R_2 = f(1_2)$  przy założeniu stałości pozostałych parametrów. Największe znaczenie posiadają statyczne i dynamiczne oharakterystyki zewnętrzne łuku,tzn. zależność napięcia łuku od prądu łuku.

$$U_2 = f(I_2, E_j, P, I_2, T, V_0)$$
 (2.1)

- 10 -

gdzie:

- U, napięcie łuku,
- I, prąd łuku,
- E, potencjał jonizacji zależny od składu chemicznego środowiska.
- p ciánienie,
- 1, długość łuku,
- T temperatura,
- Y praca wyjścia elektronu zależna od materiału elektrod.

W przypadku łuku plazmowego napięcie łuku zależy również od rodzaju gazu plazmotwórozego i natężenia jego przepływu M<sub>g</sub>. Zależność (2.1) jest funkcją nieliniową i niestacjonarną. Można ją wyznaczyć doświadozalnie lub po przyjęciu silnych założeń upraszczających określić analitycznie. Próby analitycznego ujęcia tych charakterystyk podejmowane były przez licznych autorów w pracach: [31], [39], [51], [66], [69], [73]. Dla palników plazmowych najbardziej uniwersalne zależności określono w pracy [31], w której dla łuku wewnętrznego zaproponowano zależność:

$$U_{\lambda} = A + BM_g + \frac{C + DM}{I_{\lambda}}$$

A, B, C, D - stałe współczynniki ustalone doświadczalnie,  $\alpha$  - współczynnik zależny od materiału elektrod:

zaś dla łuku zewnętrznego:

$$U_{\underline{1}} = a_0 + a_1 M_g + (b_0 + b_1 M_g) I_{\underline{1}} + \frac{o_0 + o_1 M_g + (d_0 + d_1 M_g) I_{\underline{1}}}{I_1}$$
(2.3)

a<sub>o</sub>,a<sub>1</sub>,b<sub>o</sub>,b<sub>1</sub>,o<sub>0</sub>,o<sub>1</sub>,d<sub>0</sub>,d<sub>1</sub> - współczynniki wyznaczone doświadczalnie. W pracy [76] obarakterystykę zewnętrzną łuku opisano zależnością:

$$U_{2} = \frac{P_{k}^{1+k}}{\frac{1-k}{1+k}}$$
(2.4)

gdzie:

- k wepółczynnik nieliniowości,
- P. stała zależna od współczynnika nieliniowości.

W wyprowadzonych zależnościach zawsze występują współczynniki, które należy wyznaczyć doświadczalnie, dlatego też znacznie prościej będzie analizować właściwości odbiornika łukowego w oparciu o pomiary w rzeczywistym układzie. Charakterystyki statyczne mogą być wyznaczone przy powolnych zmianach prądu łuku przy różnych długościach łuku, ciśnieniach itp., a w przypadku łuku plazmowego dla różnych gazów plazmotwórozych i różnych natężeń przepływu tych gazów. Przykładowo charakterystyki takie przedstawiono na rys. 1 i 2 [46], [50].



Rys. 1. Charakteryetyki zewnętrzne palników plazmewych z łukiem wewnętrznym dla różnych natężeń przepływu gazu plazmotwórczego M i różnych gazów plazmotwórczych



Na obarakterystykach tych można wyróżnić trzy przedziały: przedział pierwszy, w którym przy wzroście prądu napięcie maleje (K<sub>1</sub> =  $\frac{dU_2}{dI_1} \le 0$ ), przedział drugi, w którym przy wzroście prądu napięcie pozostaje niezmienione (K<sub>2</sub> = 0) i przedział trzeci, w którym przy wzroście prądu napięcie wzrasta (K<sub>2</sub> > 0). Odbiorniki łukowe pracujące przy małych prądach mają

Rys. 2. Charakterystyka zewnętrzna palnika plazmowego z łukiem zewnętrznym

oharakterystyki w przedziałe pierwszym i drugim, pracujące przy dużych prądach mają charakterystyki w przedziałe drugim i trzecim. W odbiorulkach, które pracują w szerokim zakresie zmian prądu charakterystyki leżą we wazystkich trzech przedziałach. Dużą rplę odgrywa tu również środowisko, w którym łuk płonie, materiał i geometria elektrod. Oprócz omówionych ozymników na przebieg charakterystyk zewnętrznych ma wpływ jeszcze występująca często składowa prądu o podwyższonej częstotliwości. Składowa prądu o podwyższonej częstotliwości może być wymuszona przez układ zasilania lub spowodowana występującymi pulsacjami plazmy. Stwierdzono występowanie pulsacji plazmy w łuku o średniej częstotliwości do 2 kHz oraz o wysokiej

częstotliwości 10-60 kHz [29], [45]. Wpływ tej składowej na charakterystyki pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Wpływ składowej prądu o podwyższonoj częstotliwości na charakterystyki zewnętrzne łuku

W oparciu o rozważania przeprowadzone w pracy [76] možna stwierdzić, że przy wystąpieniu w prądzie łuku składowej pradu  $i_{\Omega}(t) = \sqrt{2} I_{\Omega} \sin \Omega t$  jeżeli 20.0>>1 (gdzie 8 pazywana jest termiczną stałą ozasową luku) charakterystyka zewnetrzna przebiega poniżej charakterystyki dla składowej stalej (b na rys. 3), a dla małych prądów luku może pojawić się ozęść wzrastejąca. Tzw. termiozna stala ozasowa jest zdefiniowana jako [66] :

0 = 0

gdzie:

Q<sub>o</sub> - energia zawarta w łuku w stanie ustalonym, P - moc oddana przez łuk.

Może ona być w przybliżeniu obliczone z zależności [76] :

gdzie:

ę, C<sub>p</sub>, c - odpowiednio gęstość, pojemność cieplna i przewodność cieplna plazay. d

 $\theta = g \frac{c_p}{d} d^2$ 

- średnica kanalu wyładowania.

Wartość termioznej stalej czasowej waha się w granicach 100 - 200 µs 10, [66] . Powyższe rozważania dotyczyły statycznych charakterystyk odbiorników łukowych obliczonych lub mierzonych przy spełnieniu warunku  $\frac{dI_2}{dt} = 0$ . Bardzo złożonym problemem, któremu poświęcono niewiele miejsca w literaturze są obarakterystyki zewnętrzne dynamiczne mierzone w stanach, gdy dI.  $\frac{dI_2}{dt} \neq 0$ . Niewątpliwie ich kształt zależy od konstrukcji urządzenia, układu zasilania oraz od szybkości zmian prądu. Dla określonego odbiornika łukowego można charakterystykę zewnętrzną dynamiozną przedstawić jako zależność:

$$U_{\underline{1}} = f(I_{\underline{1}}, \frac{dI_{\underline{1}}}{dt})$$
(2.5)

Jak wykazały pomiary [50] i [51] oharakterystyki te są niejednoznaczne i mogą przybierać różne keztałty. Przykładowo takie obarakterystyki dla odbiornika lukowego prądu stalego przedstawiono na rys. 4.



4. Charakterystyki zewnętrzne dynamiczne palnika plazmowego z łukiem wewnętrznym dla tych samych warunków pracy i różnych układów zasilania



nikiem lukowym, którego charakterystyki są zależne od wielu ozynników ozęsto losowo zmienia jących się, bardzo przydatne jest określenie obezaru możliwej pracy urządzenia łukowego, Na rysunku 5 przedstawiono przykładowo obszar możliwej pracy palnika plazmowego pradu stalego [30] . [46] . Obszar ten ograniczony jest ozterema krzywymi: od góry DE - graniosna charakterystyką źródła zasilania U = = f(I), od dolu charakterystyką żuku przy minimalnym wydatku gazu plasmowotwórozego CF, od strony malych prądów krzywą CD określająca granicę stabilnej

Przy analizie współpracy

układu zasilania z odbior-

Rys. 5. Obszar możliwej pracy i technologiozny obszar pracy palnika plazmowego

pracy, od strony dużych prądów wytrzymalością prądową palnika plazmowego EF. Biorac pod uwagę wymagania procesu technologicznego, zdaniem autora, obszar pracy urządzenia można jeszcze bardziej ograniczyć wprowadzając pojęcie technologicznego obszaru pracy (zakreskowanego na rys. 5). Obszar ten ograniczony jest minimalnym i maksymalnym prądem łuku oraz granicznymi cha-

- 12 -

rakterystykami odbiornika łukowego. Ograniczenia te muszą być tak dobrane, aby zapewnić prawidłową realizację całego procesu technologicznego. Projektując układ zasilania odbiornika łukowego należy mieć na uwadze, aby w każdym punkcie technologicznego obszaru pracy uzyskać stabilną pracę przy parametrach najlepiej spełniających wymagania realizowanego procesu technologicznego.

- 14 -

#### 2.2. Stabilność statyczna wyładowania łukowego



Rys. 6. Schemat obwodu zasilania Łuku

runek aby zmiana energii  $\frac{dQ}{dt}$  = =  $P_d - P_o$  ( $P_d$  - moo dostarosona,  $P_o$  - moo oddawana przez luk) byla równa zeru. Ponieważ w stanie ustalonym  $P_o$  można uważać za wartość stałą, więo stabilność pracy określona jest przez stałość mocy dostarozanej do luku. Zakładając, że w obwodzie istnieje dużą indukcyjność schemat ideowy obwodu luku przedstawiono na rys. 6. Można więc napisać, że:

Najbardziej pożądanym dla

procesu ploniecia luku jest wa-

$$U(I) = L \frac{dI_2}{dt} + U_2(I_2),$$
 (2.6)

gdzie: U(I) określa obarakterystykę źródła zasilania, a  $U_2(I_2)$  obarakterystykę statyczną luku (rys. 7).

Funkt pracy układu wyznaczony jest przez punkty A,B przecięcia charakterystyk statycznych.

Zakładając, że w ohwili t = 0 z dowolnej przyczyny prąd łuku uległ zmienie o wartość  $\triangle$ I od wartości w pkt. A lub B i cznaczając przez i(t) obwilową wartość odobylenia prądu łuku dla każdej obwili t > 0 równania (2.6) można dla punktów A i B zapisać w postaci:

$$U(I + i) = L \frac{d}{dt} (I_1 + i) + U_2(I_2 + i)$$
 (2.7)

Linearyzując funkcję U(I) i  $U_{\underline{i}}(I_{\underline{i}})$  w otoczeniu punktów A i B po przekształceniach otrzymany równanie

$$\frac{\partial U}{\partial I} i - \frac{\partial U_2}{\partial I_2} i = L \frac{di}{dt}$$
(2.8)



Rys. 7. Charakterystyki źródła zasilania i łuku elektrycznego

Rozwiązując równanie (2.8) w punktach A i B przy uwzględnieniu, że dla t = 0,  $1 = \triangle I$  otrzymany:

$$i = \Delta I \exp \left[ -\frac{1}{L} \left( \frac{\partial U_2}{\partial I_2} - \frac{\partial U}{\partial I} \right) \right]$$
(2.9)

Z równania (2.9) wynika warunek konieczny stabilnej pracy urządzenia łukowego w punkcie przecięcia się charakterystyk zewnętrznych źródła zasilania i łuku

$$\mathbf{k} = \frac{\partial \mathbf{U}_{\mathbf{\lambda}}}{\partial \mathbf{I}_{\mathbf{\lambda}}} - \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{I}} > 0, \qquad (2.10)$$

gdzie k nazywamy statycznym współczynnikiem stabilności łuku. Widać stąd że stabilnym punktem pracy na rys. 7 jest tylko punkt B. Im większy jest współczynnik k tym krótszy jest czas powrotu do warunków ustalonych przy zmianie prądu łuku wywołanej zaburzeniami

$$\frac{d1}{dt} = -\frac{\Delta T}{L} k \cdot \frac{k}{L}$$
(2.11)

Z warunków tych wynika, że najkorzystniejsze właściwości mają układy zasilania łuku o charakterystykach zewnętrznych zbliżonych do charakterystyki idealnego źródła prądowego.

- 15 -

#### 2.3. Stabilność dynamiczna wyładowania łukowego

Stabilność dynamiozna związana jest ze zjawiskami zachodzącymi w przestrzeni międzyelektrodowej przy prądach łuku bliskich zeru.Następuje wtedy wzrost działania ozynników dejonizujących, co może przyspieszyć zgaszenie łuku i uniemożliwia ponowny zapłon. Dlatego też zagadnienie stabilności dynamicznej związane jest nie tylko z parametrami układu zasilania, ale także z właściwościami przestrzeni międzyelektrodowej.

W oparciu o równanie bilansu energii luku i zależność rezystancji luku od energii dostarozonej do luku [56], [66] można dla stanu nieustalonego otrzymać równanie:

$$\Theta(R_{2} \frac{di_{2}}{dt} - \frac{du_{2}}{dt}) = u_{2} + R_{2}i_{2},$$
 (2.12)

gdzie:

R,

u<sub>1</sub>(t), i<sub>1</sub>(t) ~ obwilowe wartości odobyłek napięcia i prądu łuku od stanu ustalonego,

- rezystancja łuku w stanie ustalonym przed zaburzeniem.



Rys. 8. Sohemat zastępczy obwodu zasilania łuku

W oparciu o schemat zastępczy obwodu łuku (rys. 8) dla stanu nieustalonego przy niewielkich wymuszonych odchyleniach mapięcia i prądu łuku dla chwilowych wartości tych odchyleń otrzymuje się równanie:

$$LC \frac{d^2 u_1}{dt^2} + RC \frac{du_2}{dt} + L \frac{di_2}{dt} + Ri_1 + u_2 = 0 \qquad (2.13)$$

Rozwiązując układ równań (2,12) i (2,13) otrzymano równanie operatorowe pozwalające określić przebieg prądu  $i_{2}(t)$ 

$$a_3 = \frac{3}{1_2}(a) + a_2 = \frac{2}{1_2}(a) + a_1 = \frac{1_2}{1_2}(a) + a_0 = 0, \quad (2.14)$$

gdsie:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_3 &= 1, \quad \mathbf{a}_2 = \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{L}} - \frac{1}{\Theta} + \frac{1}{\mathbf{R}_2 \mathbf{C}}, \\ \mathbf{a}_1 &= \frac{1}{\mathbf{L}\mathbf{C}} - \frac{1}{\mathbf{L}\Theta} + \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{L}\mathbf{C} \mathbf{R}_2} + \frac{1}{\mathbf{R}_2 \mathbf{C}\Theta}, \quad \mathbf{a}_0 = \frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}_2}{\mathbf{L}\mathbf{C}\mathbf{R}_2 \Theta}. \end{aligned}$$

Układ opisany zależnością (2.14) będzie stabilny jeżeli spełnione będą warunki:

$$a_1, a_2, a_3, a_4 > 0$$
 i  $a_1a_2 - a_0a_3 > 1$ 

Ponieważ w układzie rzeczywistym  $a_1$  jest zawsze większe od zera [66]oraz  $\frac{R}{CR_1}$  to warunki dynamicznej stabilności wyładowania łukowego mają postać:

$$\frac{1}{CR_{\underline{1}}} > \frac{1}{\theta} \quad \underline{i} \quad \frac{R}{R_{\underline{1}}} - 1 > 0 \qquad (2.15)$$

# 2.4. Dodatkowe wymagania dla łuku prądu przemiennego



Schemat zastępozy obwodu zasilania łuku pokazano na rys. 9. Łuk zasilany jest ze źródła napięcia przemiennego u(t) = U\_sin( $\omega$ t+ $\mathcal{C}$ ). Podstawowym warunkiem nieprzerwanego palenia się łuku jest spałnienie zależności:

$$U_{\underline{m}}\sin \varphi \ge U_{\underline{z}},$$
 (2.16)

Rys. 9. Sohemat zastępozy obwodu zasilania łuku prądu przemiennego

U<sub>z</sub> - napięcie, przy którym luk zapala się.

Przebieg prądu łuku można obliczyć z równania:

$$U_{m} \sin(\omega t + \psi) = u_{2} + L \frac{di_{2}}{dt} + Ri_{2} \qquad (2.17)$$

Zakładając  $R \leq \omega L$  i dla t = 0  $i_{\lambda} = 0$  otrzymano:

$$\mathbf{i}_{1} = \frac{\mathbf{U}_{m}}{\omega \mathbf{L}} \left[ \cos \varphi - \cos(\omega \mathbf{t} + \varphi) \right] - \frac{\mathbf{U}_{1}}{\omega \mathbf{L}} \omega \mathbf{t} \qquad (2.18)$$

gdzie:



Rzeczywiste przebiegi i i u pokazano na rys. 10 (linią przerywaną zaznaczono teoretyczny przebieg u ). Z równania (2.18) można określić kąt, przy którym łuk płonie ciągle przedstawiając i z = 0 przy t =  $\frac{12}{2}$ .

$$os \varphi = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_2}{U_2} \qquad (2.19)$$

Varunek nieprzerwanego płonięcia łuku prądu przemiennego można więc określić ze wzorów (2.16) i (2.19) jako:

Rys. 10. Przebiegi napięcia i prądu łuku

$$\frac{U_{m}}{U_{2}} \ge \sqrt{\frac{g^{2}}{4} + n^{2}}, \qquad (2.20)$$

gdzie:

 $n = \frac{U_{g}}{U_{h}}$ 

Wynika stąd, że łuk płonie nieprzerwanie jeśli napięcie maksymalne źródła zasilania U<sub>m</sub> przewyższa napięcie łuku U<sub>1</sub> minimum 1,86 razy (przy n = 1). Jeżeli U<sub>g</sub> > U<sub>2</sub> wymagana wartość U<sub>m</sub> wzrasta i dla n = 2 wynosi 2,11 U<sub>2</sub> Jednakże i w tym przypadku przy prądach bliskich zeru wyładowanie łukowe ulega przerwaniu, co potwierdzają rzeczywiste przebiegi napięcia łuku U<sub>2</sub> (rys. 10), na których występują charakterystyczne przepięcia. Jak wykazały liczne doświadozenia proces płonięcia łuku prądu przemiennego zależy zarówno od zdolności jożizacyjnej przestrzeni międzyelektrodowej jak i od parametrów transformatora zasilającego i jego konstrukcji. Interesujący sposób cceny i przydatności transformatora przedstawiono w pracy [65]. Zdefiniowano tam dwa współczynniki:

- 18 -

$$P = \frac{UT}{20 L_{m}} tg \alpha_{g} \qquad (2.21)$$

oznaczenia podano na rys. 11,

$$A = \frac{tg\sqrt{}}{tg\omega}$$
(2.22)

oznaczenia podano na rys. 12.



Rys. 11. Przebieg prądu zwarcia transformatora



Zarówno P jak i A można wyznaczyć w oparciu o przebiegi  $i_z$  i  $i_1$  zmierzone w rzeczywistym układzie. Parametr P określa właściwości transformatora zasilającego.Dla dobrego transformatora P > 50. Parametr A określa właściwości obwodu łuku. Są one lepsze im A bliższe jest jedności. W oparciu o przebieg prądu łuku (2.18), zakładając że w prądzie zwarcia  $i_z$  występuje tylko harmoniczna pierwsza i trzecia, wykazano że P i A związane są zależnością:

Rys. 12. Przebieg prądu łuku

$$A = \frac{m P - 1}{m P + 1}, \qquad (2.23)$$

Rys. 13. Zależność A = f(m)przy różnych wartościach P

Zależność A = f(m) przedstawiono na rys. 13. Pozwalają one ocenić prawidłowość konstrukcji transformatora i jego współpracę z odbiornikiem łukowym.

12 sint

gdzie:

#### 2.5. Whioski

- 19 -

- 20 -

ka k ulega skróceniu ozas ustalania się prądu przy zaburzeniu od strony łuku, wzrasta elastyczność łuku czyli możliwość zwiększania jego długości. Przy pracy z małymi prądami łuku i w przypadku zaburzeń wymuszających gaszenie łuku, istotną rolę odgrywają warunki dynamicznej stabilności wyładowania łukowego, które można sprowadzić do postaci:  $\theta > CR_2$ ,  $R > R_2$ . Proces wyładowania łukowego jest bardzo złożony. Oddziałują na niego czynniki związane z konstrukcją odbiornika i prowadzonym procesem technologicznym oraz czynniki związane z konstrukcją i parametrami zasilania. Poprawę stabilności pracy urządzenia można uzyskać przez:

- zwiększenie tzw. termicznej stałej ozasowej<sup>0</sup>, np.: przez wprowadzenie do przestrzeni międzyelektrodowej dodatków o niskim potenojale jonizaoji;
- zmniejszenie rezystanoji łuku R<sub>1</sub>. Może to być osiągnięte przez wprowadzenie do elektrod materiałów o niskiej pracy wyjścia elektronów lub też przez nałożenie na prąd łuku I<sub>2</sub> prądu wysokiej częstotliwości i<sub>Ω</sub> = =  $\sqrt{2}$  I<sub>Ω</sub> sinΩ t, takiej aby 2Ω θ >> 1;
- zmniejszenie pojemności C przez odpowiednią konstrukcję odbiornika i toru zasilającego;
- zwiększenie rezystanoji obwodu R. Ten sposób pociąga jednak za sobą zmniejszenie sprawności;
- zwiększenie wartości napięcia źródła zasilania w chwili poprzedzającej gaśnięcie łuku;
- zwiększenie napięcia biegu jalowego źródła zasilania;
- zwiększenie indukowjności L w obwodzie zasilania Łuku.
- Takie postępowanie ma korzystny wpływ przy zaburzeniach od strony łuku, ale powoduje wzrost elektromagnetycznej stałej czasowej obwodu łuku  $\frac{L}{R}$ , zwiększa czas regulacji przy zmianie wielkości zadanej;

- zmniejszenie długości łuku w chwili poprzedzającej jego gaśnięcie.

Jak wykazały pomiary [50], [51] parametry układu zasilania mają też wpływ na przebieg charakterystyk napięciowo prądowych odbiornika łukowego,szczególnie dynamicznych. Zagadnienie to nie jest dotychczas rozpracowane analitycznie. Próbą oceny tych zjawisk jest zależność (2.23), która w oparciu o pomiary pozwala ocenić współpracę układu zasilania z odbiornikiem łukowym prądu przemiennego. Biorąc pod uwagę takie czynniki, jak: wpływ parametrów układu zasilania na proces wyładowania łukowego,wymagania technologiozne, zmiany często losowe długości łuku i właściwości jonizacyjnych przestrzeni międzyelektrodowej itp. można postawić wniosek, że niemożliwe jest jednoznaczne określenie punktu pracy urządzenia łukowego na drodze analitycznej, czy nawet pomiarowej. Możliwe natomiast jest określenie technologicznego obszaru pracy urządzenia (rys. 5),tzn. obszaru,w którym muszą być zawarte wszystkie charakterystyki, na których odbywa się praca, tak aby zapewnić pełną realizację procesu technologicznego. Dlatego też do zasilania odbiornika łukowego powinien być wybrany układ o takiej strukturze, aby po pierwsze zapewnić stabilną pracę i najlepsze parametry w każdym punkcie technologicznego obszaru pracy, po drugie nie dopuścić do pracy poza technologicznym obszarem pracy przy wystąpieniu przewidywanych zaburzeń w procesie, po trzecie wyłączyć układ w przypadku zaburzeń awaryjnych.

A light of the second s

tates electric sarry is have entry instances and any is have entry instances, the makepee of a stren instances, the makepee of a stren instances and the strength of a strength instances and the strength of a strength instances and the strength of a strength of a

at all & lording a hang attention

A second and a second at the s

and a standard water and a standard an

#### 3. WYBÓR UKŁADU ZASILANIA ODBIORNIKA

W chwili obecnej zarysowały się dwa kierunki konstrukcji nowoczesnych układów zasilania odbiorników łukowych. Pierwszy oparty jest na układach rezonansowych, nazywanych często parametrycznymi, drugi wykorzystuje różne warianty połączeń układów tyrystorowych.

#### 3.1. Układy rezonansowe (parametryczne)

Zasilaoze rezonansowe opracowane zostały w ZSRR. Prowadzone tam badania pozwoliły wdrożyć do przemysłu szereg układów tego typu o mocach do kilkunastu MW. Zasada działania takich układów oparta jest na wykorzystaniu zjawiska rezonansu w obwodach prądu przemiennego-sinusoidalnego. Dla schematu podanego na rys. 14 równanie prądu w gałęzi A ma postać:

$$I_{A} = \frac{U_{AB}Z_{C} - U_{CA}Z_{B}}{Z_{A}(Z_{B} + Z_{C}) + Z_{B}Z_{C}}$$
(3.1)

Wynika stąd, że układ spełnia rolę źródła prądu w odniesieniu do gałęzi A jeśli spełniony jest warunek:  $Z_B$  + +  $Z_C = 0$ , tzn. w gałęzi B włączony jest ideslny dławik  $Z_B = jX_L$ , a w gałęzi C idealny kondensator  $Z_C = -jX_C$ , Gdy  $X_L = X_C = X$  to prąd w fazie A określony jest zależnością:

$$I_A = -j \frac{1}{X} (U_{AB} + U_{CA}) = j \frac{U_{BC}}{X} (3.2)$$

Rys. 14. Schemat zasilacza rezonabsowego

Teoretycznie prąd w gałęzi A nie zależy od zmian impedancji obciążenia

 $Z_A$ . W praktyce zbliżenie się do warunków teoretycznych zależy głównie od dobroci dławika L. Dla dobrze wykonanego dławika  $\left(\frac{X_L}{R_L} > 30\right)$  przy zmianie  $Z_A$  od zera do wartości znamionowej zakres zmian natężenia prądu I<sub>A</sub> wynosi 4-6%. W takim układzie nie można dopuścić do przerwy w obwodzie fazy A z powodu wystąpienia rezonansowych przepięć w szeregowym układzie zasilanym z faz B i C. Dlatego też w rozwiązaniach praktycznych odbiornik łukowy zasilany jest przez transformator dopasowujący. Sposób połączenia transformatora w prmypadku wyjścia jednofazowego pokazano na rys. 15, a w przypadku wyjścia trójfazowego na rys. 16. Zasilacze rezonansowe pozwalają uzyskać dwie różne charakterystyki zewnętrzne (rys. 17).



Rys. 15. Sohemat zasila-

gza z transformatorem 1

wyjściem jednofazowym

Charakterystykę prądową (a) uzyskuje się przy połączeniu elementów w układzie rezonansowym, natomiast charakterystykę źródła napięciowego z indukcyjnością (b) uzyskuje się przez odłączenie baterii kondensatorów.

Możliwość skokowej regulacji prądu  $I_A$  można osiągnąć przez zastosowanie odczepów po stronie pierwotnej transformatora Tr. Wtedy praktyczny zakres regulacji prądu wynosi  $(0,5-1)I_N$ . Ciągłą regulację prądu można uzyskać przez wprowadzenie dodatkowego dławika w fazie A sprzężonego magnetycznie z dławikiem w fazie B, jednak w miarę wzrostu zakresu regulacji prądu moc tych dławików rośnie. Ekonomicznie uzasad-





Rys. 16. Schemat zasilacza z transformatorem i wyjściem trójfazowym

Rys. 17. Charakterystyki zasilacza z odłączalną pojemnością

niony zakres regulacji w takim przypadku wynosi  $(0,5 - 1)I_N$ . Celem poszerzenia zakresu regulacji stosuje się układy kombinowane: przełącznik zaozepów po stronie pierwotnej Tr i zmiana sprzężenia magnetycznego dławików w fazach A i B. Zasilacze rezonansowe posiadają szereg zalet, takich jak: prosta budowa, duża niezawodność działania, wysoki współczynnik sprmności (powyżej 90%), pojemnościowy współczynnik mocy. Posiadają też jednak szereg wad: stosunkowo maża dokładność regulacji prądu luku około 6%, duża masa, trudności z realizacją praktyczną szerokiego zakresu regulacji prądu wynikające z monieczności budowy dławików (o dużej indukoyjności i mocy) sprzężonych magnetycznie, trudności przy realizacji automatycznego sterowania procesem technologicznym. Problematyka zasilaczy rezonansowych omówiona jest dość szeroko w pracach: [17], [18], [68], [76]. W kraju obecnie nie są prowadzone żadne badania związane z wykorzystaniem zasilaczy rezonansowych w przemyśle. Biorąc jednak pod uwagę zalety tych układów celowe byłoby podjęcie prac związanych z zastosowaniem ich do zasilania etalowniczych pieców łukowych małych i średnich mocy.

#### 3.2. Układy tyrystorowe

Analizując możliwości zastosowania układów tyrystorowych do zasilania odbiorników łukowych, należy zwrócić uwagę na konieczność spełnienia warunków stabilnego płonięcia łuku. Wynika stąd, że mogą tu być stosowane tylko takie układy, w których przy niewystsrowanych tyrystorach pomiędzy elektrodami płynie pewien minimaluy ciągły prąd zapewniający nieprzerwane płonięcie łuku. W grupie zasilaczy tyrystorowych można wyróżnić dwa kierunki konstrukcji tych urządzeń. Pierwszy z nich polega na wykorzystaniu tyrystorowego mostka po wtórnej stronie transformatora zasilającego. Drugi oparty jest na zastosowaniu tyrystorowych sterowników napięcia przemiennego włączonych po pierwotnej stronie transformatora zasilającego.

Poniżej przedstawiono przegląd układów tyrystorowych stosowanych i możliwych do zastosowania do zasilania odbiorników łukowych. Układy opisane w punktach 3.2.5, 3.2.7, 3.2.8 zostały opracowane i przebadane przez autora.

## 3.2.1. Układ z mostkiem tyrystorowym po wtórnej stronie transformatora

Sohemat ideowy układu przedstawiono na rys. 18. W tym układzie transformator zasila mostek sześciotyrystorowy VI - V6. Ponieważ łuk elektryowny jest odbiornikiem o obarakterze czysto sezystancyjnym w obwodzie prą-





du stalego włączony jest dławik L o dużej indukcyjności w celu zapewnienia ciągłości minimalnego prądu łuku. W praktyce mogą być stosowane różne modyfikacje tego podstawowego układu, takie jak: zastosowanie mostka niesymetrycznego złożonego z trzech tyrystorów i trzech diod, zastosowanie dodatkowego tyrystora V7 poszerzającego zakres regulacji prądu lub dla małych mocy zastosowanie rezystancji wstępnego obciążenia R, co pozwala zmniejszyć indukcyjmość dławika L.

## 3.2.2. Układ z mostkiem tyrystorowym i dodatkowym źródłem napięcia

Sohemat ideowy układu przedstawiono na rys. 19. W układzie tym w oelu zmniejszenia dodatkowej indukowjności w obwodzie łuku oraz poprawy pracy w zakresie małych prądów zastosowano pomocnicze źródło napięcia stałego w postaci mostka prostowniczego niesterowanego. W zależności od wymagań odbiornika w układzie tym można zastosować tylko dławiki L1 z regulowaną szczeliną w celu odpowiedniego ukształtowania obarakterystyki zewnętrznej przy niewysterowanych tyrystorach lub też tylko dławik L w celu wygładaenia prądu łuku.



Rya. 19. Układ z mostkiem tyrystorowym i dodatkowym źródłem napięcia

# 3.2.3. Układ z moatkami tyrystorowymi i transformatorem pomocniczym

Schemat ideowy układu przedstawiono na rys. 20. Układ ten zbudowany jest w oparciu o dwa transformatory. Tri jest to transformator główny trójuzwojeniowy, którego każde uzwojenie zasila osobny mostek tyrystorowy. Mostki tyrystorowe pracują równolegie. Poprzez odpowiedni dobór grupy połączeń tego transformatora można uzyskać efekt prostowania 12-pulsowego. Tr2 jest to transformator pomocniczy o mocy dobranej ze względu na minimalny prąd łuku. Reaktanoja rozproszenia tego transformatora powinna być duża, aby zapewnić ailnie opadającą oharakterystykę zewnętrzną. Można to również osiągnąć przez włączenie dodatkowych dławików  $L_i$ . Dławik L potrzebny jest w takim układzie tylko w przypadku wymagania bardzo wygładzonego przebiegu prądu łuku.



# Rys. 20. Układ z mostkami tyrystorowymi i transformatorem pomocniczym

## 3.2.4. Układ ze sterownikiem tyrystorowym po pierwotnej stronie transformatora

Schemat ideowy układu przedstawiono na rys. 21. W tym układzie napięcie zasilania transformatora Tr zmieniane jest przez tyrystorowe sterowniki napięcia przemiennego składające się z dwóch tyrystorów połączonych przeciwrównolegie. Transformator może zasilać odbiornik prądu przemienne-



Rys. 21. Układ ze sterownikiem tyrystorowym po pierwotnej stronie transformatora

go lub po zastosowaniu prostownika D1 - D6 odbiornik prądu stałego. W obwodzie wrądu stałego znajduje się dławik L, który zmniejsza strefę prądów przerywanych i ogranicza pulsację prądu. Zmniejszenie indukcyjności tego dławika lub jego całkowite wyeliminowanie można osiągnąć przez zastosowanie wielouzwojeniowego transformatora Tr i odpowiednie łączenie prostowników po jego stronie wtórnej. Można też zastosować w tym celu wielostopniowy sterownik tyrystorowy pokazany na rys. 22.



- 27 -

Rys. 22. Układ z wielostopniowym sterownikiem po pierwotnej stronie transformatora

#### 3.2.5. Układ ze eterownikiem tyrystorowym i dławikami po pierwotnej stronie transformatora

Schemat ideowy układu przedstawiono na rys. 23. W tym układzie dławiki L włączone zostały po pierwotnej stronie transformatora równolegie z tyrystorowymi sterownikami napięcis. Dławiki te zapewniają przepływ mini-



Rys. 23. Układ ze aterownikiem tyrystorowym i dławikami po pierwotnej stronie transformatora

malnego ciągłego prądu łuku przy niewysterowanych tyrystorach oraz odpowiednio keztałtują charakterystykę zewnętrzną. Parametry dławików powinny być tak dobrane aby zapewnić przepływ minimalnego dla danego procesu technologicznego prądu łuku I<sub>2</sub> min. Regulację prądu od I<sub>2</sub> do I<sub>2</sub> uzyskuje się przez zmianę kąta wysterowania tyrystorów. Aby ograniczyć wielkość pulsacji prądu łuku można zastosować w każdej fazie sterownik wielostopniowy pokazany na rys. 24. Liczba stopni takiego sterownika zależna jest od zakresu regulowanego prądu i dopuszczalnej wielkości pulsów prądu łuku.



Rys. 24. Wielostopniowy sterownik z dławikiem

#### 3.2.6. Układ ze sterownikiem tyrystorowym po pierwotnej stronie transformatora zasilającego i transformatorem pomocniczym

Schemat ideowy układu przedstawiono na rys. 25. W porównaniu do układu opisanego w punkcie 3.2.4 wprowadzono tutaj transformator pomocniczy Tr2 o takiej samej przekładni jak transformator zasilający Tr1 i o dużej reaktancji rozproszenia, aby uzyskać silnie opadającą charakterystykę zewnętrzną. Można to również uzyskać poprzez włączenie dodatkowych dławików po pierwotnej lub wtórnej stronie tego transformatora. Moc transformatora Tr2 powinna być dobrana ze względu na wartość minimalnego ciągłego prądu łuku. Zwiększenie prądu łuku uzyskuje się przez odpowiednie wysterowanie tyrystorów V1 - Vó po pierwotnej stronie transformatora Tr1.





#### 3.2.7. Układ z transformatorami regulacyjnymi [60]

Schemat ideowy układu przedstawiono na rys. 26. W układzie tym szeregowo z uzwojeniami transformatora zasilającego Tr włączone są trzy jednofazowe transformatory regulacyjne Tr1 - Tr3. Tyrystorowe regulatory napięcia przemiennego włączone są po stronie wtórnej tych transformatorów. Zastosowanie transformatorów regulacyjnych umożliwia zasilanie układu z sieci wysokiego napięcia i zapewnia galwaniozne oddzielenie obwodów sterowania i regulacji od obwodów siłowych. Odpowiedni dobór przekładni tych transformatorów pozwala stosować tyrystory o dowolnej klasie napięciowej, a odpowiedni dobór indukcyjności głównej (magnesowania) zapewnia przepływ ciągłego minimalnego prądu łuku przy niewysterowanych tyrystorach. Zwiększenie prądu łuku uzyskuje się przez zmianę kąta wysterowania tyrystorów V1 - V6.



Rys. 26. Układ z transformatorami regulacyjnymi

3.2.8. Układ ze sterownikiem tyrystorowo-magnetycznym [35], [37]

Schemat ideowy układu przedstawiono na rys. 27. W tym układzie po stronie pierwotnej transformatora zasilającego Tr włączone są sterowniki tyrystorowo-magnetyczne napięcia przemiennego składające się z transformato-



Rys. 27. Układ ze sterownikiem tyrystorowo-magnetycznym

ra jednofazowego, którego strona wtórna zwarta jest przez jeden tyrystor. Kąt wysterowania tyrystora zmienia się od O do N. Przekładnia transformatorów Tr1 - Tr3 zależy od wartości napięcia zasilania układu i klasy napięciowej stosowanych tyrystorów. Parametry uzwojeń zapewniają przepływ wymaganego minimalnego prądu łuku. Zwiększanie tego prądu uzyskuje się przez zmianę kąta wysterowania tyrystorów. Zasadę działania sterownika tyrystorowo-magnetycznego ilustruje rys. 28, przy ozym założono, że rdzeń posiada idealną charakterystykę magnesowania (rys. 28b), pominięto reaktancję rozproszenia i rezystancję uzwojeń oraz przyjęto, że obciążenie ma





obarakter ozysto rezystanoyjny. Okres pracy sterownika podzielono na dwa półokresy: półokres sterowania, w którym wartość indukcji w rdzeniu B<sub>a</sub> jest ustalona przez włączenie tyrystora impulsem bramkowym. Prąd płynie wtedy w uzwojeniu roboczym (i) i sterującym (i<sub>a</sub>). Półokres nasycenia, w którym rdzeń przemagnesowywany jest od indukcji B<sub>a</sub> do indukcji nasycenia B<sub>n</sub>. Od obwili nasycenia się rdzenia prąd płynie tylko w uzwojeniu roboczym. Przy zasilaniu napięciem krytycznym U<sub>m</sub> =  $\omega z_r SB_n$  (S - przekrój rdzenia) na początku półokresu sterowania dla t = 0 indukcja w rdzeniu jest równa B<sub>n</sub>, a zatem w przedziale  $0 \le \omega t \le \omega_z$  zmienia się od wartości B<sub>n</sub> według zależności:

$$B = B_n + \frac{U_m}{\omega z_r^s} \int_{0}^{\infty} (-\sin \omega t) d(\omega t) = B_n \cos \omega, \qquad (3.3)$$

gdzie:  $\alpha_{-}$  bieżący kąt liczony od początku półokresu sterowania. Od ohwili wysterowania tyrystora dla  $\omega t = \alpha_{z}$  do końca półokresu sterowania w układzie płynie prąd i ograniczony rezystancją obciążenia. Indukcja w rdzeniu ma w tym czasie wartość stałą równą  $B_{z} = B_{n} \cos \alpha_{z}$ . W czasie półokresu nasycenia w przedziałe  $0 \le \omega t \le \alpha_{n}$  indukcja w rdzeniu opisana jest zależnością:

$$B = B_{s} + \frac{U_{s}}{\omega z_{s}} \int_{0}^{\infty} (\sin\omega t) d(\omega t) = B_{s} + B_{n}(1 - \cos\alpha), \qquad (3.4)$$

gdzie:

6 - bieżący kąt liczony od początku półokresu nasycenia.

$$B = B_{1}(1 - \cos \alpha + \cos \alpha_{2}).$$
 (3.5)

Z zależneści (3.5) można obliczyć kąt  $\infty_{\rm p}$ , przy którym rdzeń wohodzi w nasycenie. Od obwili nasycenia się rdzenia do końca tego półokresu indukcja pozostaje stała i równa B<sub>d</sub>, a w obwodzie roboczym płynie prąd i ograniozony tylko rezystanoją obciążenia. Przebiegi napięć i prądów ilustrujące powyższe rozważania przedstawiono na rys. 28c. Wynika stąd wniosek, że układ tyrystorowo-magnetyczny, pomimo że posiada o połowę mniej tyrystorów pracuje podobnie jak układ opisany w pkt. 3.2.7. Oczywiście choąc określić dokładnie właściwości i charakterystyki obu układów, mależy przeprowadzić analizę pracy tych regulatorów w oparciu o model jak najbardziej zbliżony do rzeczywistego. Zagadnienia te są bliżej omówione w następnym rozdziale pracy.

#### 3.3. Kryteria wyboru układu zasilania odbiornika żukowsgo

W poprzednim podrozdziale omówiono osiem podstawowych układów tyrystorowych, które mogą być zastosowane do zasilania odbiorników łukowych. W oparciu o te podstawowe układy mogą być projektowane układy bardziej rozbudowane, np.: stosując transformatory wielouzwojeniowe, łącząc układy szeregowo lub równolegie, stosując regulatory wielostopniowe. W celu wybrania najkorzystniejszej wersji układu zasilania należy rozważyć wymagania jakie stawia nam odbiornik łukowy i proces technologiczny oraz ekreślić wpływ parametrów zasilacza na pracę odbiornika. Porównując ogólnie możliwe do zastosowania układy należy brać pod uwagę nestępujące wymagania i warunki:

- moo odbiornika i możliwą do realizacji praktycznej moc układu zasilania,
- napięcie zasilania dla większych mocy co najmniej 6 kV,
- możliwość budowy zasilacza na napięcie wyjściowe niskie (< 1000 V) jak i wysokie (> 3000 V),
- rodzaj prądu zasilania odbiornika (- lub~), dopuszczalna wielkość pulsów prądu,
- zachowanie ciągłości przepływu prądu w całym zakresie regulacji,
- możliwość łatwego nastawiania prądu w sposób płynny w całym zakresie regulacji, w niektórych przypadkach zakres ten wynesi  $(0, 1 - 1)I_N$ ,
- zdolność do pracy w układzie automatysznego sterowania i regulacji,
- duża dokładność regulacji prądu łuku (często  $\leq$  1%) oraz ograniczenie przeregulowań prądu w stanach przejściowych (np. w przypadku palników plazmowych do 1,1  $I_N$ ),
- duży współczynnik sprawności > 0,85,
- przystosowania do sposobu zajarzenia łuku w odbiorniku (np. w przypadku palników plazmowych za pomocą wysokonapięciowego układu wielkiej częstotliwości),
- możliwość wykonania w oparciu o podzespoły produkowane w kraju (najlepiej seryjnie).

Z wymagań tych wynika, że omówione w punkcie 3.2 układy tyrystorowe mogą być zastosowane do zasilania odbiorników łukowych, dlatego też ostateczny wybór koncepcji układu zasilania zależy głównie od mocy odbiornika, parametrów sieci zasilającej, kosztów inwestycyjnych i możliwości wykonania układu. Przy wyborze zasilaczy z mostkiem tyrystorowym po wtórnej stronie transformatora należy mieć na uwadze ich następujące wady:

- mała uniwersalność, nadają się one tylko do zasilania odbiorników łukowych prądu stałego na napięcia nie większe niż 700 V.
- duże wymiary i masa koniecznego dławika wygładzającego lub ewentualnie konieczność stosowania pomocniczego źródła napiecia.
- konieczność łączenia równoległego tyrystorów w mostku lub mostków tyrystorowych w przypadku większych mocy,
- pogorszenie współczynnika sprawności spowodowane obecnością dławika w obwodzie wielkoprądowym i obecnością dławików wyrównawczych przy równoległym łączeniu tyrystorów.

Dlatego też, takie układy znajdują zastosowanie głównie do zasilania odbiorników łukowych prądu stałego mniejszych mocy, np. spawarek. Do wyjątków należy zastosowanie takich układów do zasilania odbiorników dużej mocy, nawet w przypadku wymagania niewielkiego zakresu regulacji prądu [52]. Najkorzystniejsze właściwości posiadają układy zasilania z tyrystorowymi sterownikami napięcia przemiennego po pierwotnej stronie transformatora - 33 -

glównego. Jedyną ich wada jest konieczność stosowania transformatora pośredniczącego przy zasilaniu z sieci wysokiego papiecia, ze względu na fakt że w obwili obecnej sterowniki takie mogą być praktycznie budowane na napięcia do 700 V. Do podobnych wniosków prowadzi też analiza literatury związanej z zastosowaniem układów tyrystorowych do zasilania łuku elektryoznego. Produkowane są seryjnie zasilacze dużej mocy z tyrystorowymi sterownikami napiecia przemiennego, z tym że w celu poprawy ich właściwości eksploatacyjnych stosowane są w tych rozwiązaniach transformatory ozterolub pięciouzwojeniowe [2], [21]. Przy wyborze koncepcji układu zasilania na szozególną uwagę zasługują rozwiązania opisane w pkt. 3.2.5 i 3.2.7. Zdapiem autora rozwiązanie 3.2.5 najlepiej nadaje sie do zasilania urządzeń malej i średniej mocy z sieci niskiego napiecia, natomiast rozwiazanie 3.2.7 do zasilania urządzeń dużej mocy z sieci wysokiego napiecia o dowolnej wartości. V tym układzie tyrystorowe sterowniki napięcia przemiennego włączone są po pierwotnej stronie transformatora zasilającego w sposób pośredni za pomocą jednofazowych transformatorów regulacy inych. Odpowiedni dobór indukoy jności głównej tych transformatorów zapewnia przepływ minimalnego ciągłego pradu łuku, a odpowiedni dobór przekładni papieciowej umożliwia zastosowanie tyrystorów o dowolnej klasie napieciowej, bez wzgledu na wielkość napięcia sieci zasilającej. Rozwiązanie takie spełnia wszystkie wymagania jakie stawia odbiornik Łukowy, zapewnia możliwość zasilania urządzeń w łuku prądu przemiennego, a po zastosowaniu prostownika także urządzeń z łukiem prądu stałego. W porównaniu z innymi układami odznaoza sie wieksza piezawodnością pracy, może pracować poprawnie nawet po uszkodzeniu jednego tyrystora w każdej fazie jako układ tyrystorowo-magnetyozny (rys. 26).

The second for the set of the second set of the set of the birth of the second second second set of the second second second set of the second second second second set of the second s second sec

## 4. ANALIZA UKLADÓW ZASILANIA ODBIORNIKÓW ŁUKOWYCH Z TYRYSTOROWYMI STEROWNIKAMI NAPIĘCIA PRZEMIENNEGO

Rozważania zamieszozone w poprzednich rozdziałach pozwalają wyciągnąć wniosek, że do zasilania odbiorników łukowych średnich i dużych mocy, w których wymagany jest szeroki zakres regulacji prądu najlepiej nadają się zasilacze ze sterowaniem napięcia przemiennego po pierwotnej stronie transformatora zasilającego. Do tego celu mogą służyć układy dwóch połączonych przeciwrównolegie tyrystorów z dławikiem, układy dwóch połączonych przeciwlegie tyrystorów po wtórnej stronie transformatorów regulacyjnych lub układy tyrystorowo-magnetyczne. Analiza pracy i charakterystyki układów z dwoma tyrystorami połączonymi przeciwrównolegie przedetawiona jest obszernie w dostępnej literaturze [5], [15], [25], [36], [70], [71], [72].

#### 4.1. Układy dwóch połączonych przeciwrównolegie tyrystorów z dławikiem

Sohemat ideowy przedstawiono na rys. 29. Przy analizie pominięto komutacyjne spadki napięcia w tyrystorach; założono, że impedanoje dławika  $Z_d$ i obciążenia Z są stałe oraz że tyrystory są kluozami idealnymi. Przy niewysterowanych tyrystorach ( $\alpha_g = 180^\circ$ ) prąd w obwodzie zależy od wartości impedancji dławika i obciążenia

$$i(t) = I_{2} ein(\omega t - \varphi_{2}), \qquad (4.1)$$

gdsie:

$$I_{2m} = \frac{U_m}{\sqrt{(R + R_d)^2 + \omega^2 (L + L_d)^2}}$$
$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{\omega (L + L_d)}{R + R_d}$$

Przy tyrystorach całkowicie wysterowanych ( $\alpha_{\pm} = 0$ ) prąd jest największy i zależy jedynie od wartości impedancji obciążenia

$$i(t) = I_{1} sin(\omega t - \Psi_{1}),$$
 (4.2)



Impedancję dławika dobiera się tak, aby przy niewysterowanych tyrystorach płynął minimalny prąd wymagany przez proces technologiczny, czyli aby iloraz wartości skutecznych powyższych prądów miał wartość  $D = \frac{I_2}{I_1}$ . Jeśli w chwili  $t_z$ , której odpowiada kąt  $z_z = \omega t_z$  nastąpi wysterowanie tyrystora, to w przedziale  $\alpha_z \le \omega t \le \omega_z + 1$  (1- kąt przewodzenia tyrystora), prąd w obwodzie i(t) = i'(t) jest opisany równaniem:

$$U_{m}sinct = L \frac{d1'(t)}{dt} + R i'(t)$$
 (4.3)

stąd po rozwiązaniu otrzymujemy:

$$\mathbf{i}'(\mathbf{t}) = \mathbf{I}_{1m} \sin(\omega \mathbf{t} - \hat{\gamma}_1) + \left[\mathbf{i}'(\mathbf{0}) - \mathbf{I}_{1m} \sin(\omega_{\mathbf{z}} - \hat{\gamma}_1)\right] \mathbf{e}^{-\frac{\omega \mathbf{t} - \gamma_{\mathbf{z}}}{\mathbf{t} \mathbf{g} - \hat{\gamma}_1}}$$
(4.4)

gdzie:

$$i'(0) = i''(t_{n}).$$

Jednocześnie dla obwodu dławika i przewodzącego tyrystora obowiązuje równanie:

$$L_{d} \frac{di_{d}(t)}{dt} + R_{d} i_{d}(t) = 0, \qquad (4.5)$$

z którego obliczono prąd dławika:

ia(t)

$$= \mathbf{i}'(\mathbf{0}) \mathbf{e}^{\mathbf{t}} = \mathbf{i}'(\mathbf{0}) \mathbf{e}^{\mathbf{t}} \mathbf{t} \mathbf{e}^{\mathbf{t}} \mathbf{e}^{\mathbf$$

ACTIVATION AND ADDRESS OF

- 35 -

gdzie:

Prad plynacy przez tyrystor:

$$i_{T}(t) = i'(t) - i_{d}(t).$$
 (4.7)

the state of the state of the

Gdy osiągnie on wartość mniejszą od prądu podtrzymania, tzn. bliską zeru, nastąpi wyżączenie tyrystora w obwili t. Wartość kąta przewodzenia % można wyznaczyć przyrównując wyrażenie (4.7) do zera i podstawiając  $\omega t = \alpha_{z} + \lambda$ . Otrzymuje się wtedy:

- 36 -

$$\mathbf{I}_{1m} \sin(\alpha_{m} + \lambda - \varphi_{1}) + \left[\mathbf{i}'(0) - \mathbf{I}_{1m} \sin(\alpha_{m} - \varphi_{1})\right] = \frac{\lambda}{\mathbf{t}_{g} \varphi_{1}} - \mathbf{i}'(0) = \frac{\lambda}{\mathbf{t}_{g} \varphi_{d}} = 0 \quad (4.8)$$

W przedziałe drugim, gdy tyrystor nie przewodzi:  $\alpha_{\underline{u}} + \lambda \leq \omega t \leq \omega_{\underline{u}} + \mathcal{X}$  w obwodzie płynie prąd i(t) = i "(t), który można obliczyć z równania:

$$m^{sinwt} = (L + L_d) \frac{di^{*}(t)}{dt} + (R + R_d) i^{*}(t)$$
 (4.9)

wt-ac\_-2

po rozwiązaniu równania (4.9) otrzymuje się:

$$i''(t) = I_{2m} sin(\omega t - \varphi_2) + [i''(0) - I_{2m} sin(\omega_2 + \psi - \varphi_2)] e^{-\frac{2}{tg}\varphi_2},$$
 (4.10)

gdzie:

$$i''(0) = i'(t_{u}).$$

Przykładowe przebiegi prądów i napięć w układzie przedstawiono na rys. 30, a obarakterystyki sterowania  $\frac{I}{I_{c}} = f(\alpha_{m})$  dla D = 0,1 na rys. 31.

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{c}_{g}^{*\lambda} & \mathbf{c}_{g}^{*\lambda} \\ 1 & \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{i}^{*2}(t) d(\omega t) + \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{i}^{**2}(t) d(\omega t) \end{bmatrix}$$
(4.11)

Praktyozne wykorzystanie powyższych zależności do analizy przebiegów czasowych prądów ż projektowania jest bardzo trudne, nawet przy użyciu do tego celu maszyny cyfrowej. Zależności te znacznie upraszczają się po założeniu, że dławik jest idealny  $R_{d}^{i} = 0$  oraz że obciążenie jest czysto rezystancyjne L = 0. Założenia takie nie będą wnosiły dużego błędu przy analizie obwodów z odbiornikiem łukowym. Prąd w obwodzie jest teraz określony zależnością;









- 38 -

Rys. 31. Charakterystyki sterowania dla D = 0,1

gdzie:

$$I_{1_{B}} = \frac{U_{B}}{R}, \quad I_{2_{B}} = \frac{U_{B}}{\sqrt{R^{2} + (\omega L_{d})^{2}}}$$
$$i_{d}(t) = i(0) = i(t_{B}) = i(t_{W})$$
$$i_{T}(t) = I_{1_{B}} \sin \omega t - i(0), \quad (4.13)$$

Vartość kąta przewodzenia wyznaczyć można teraz prosto ze wsoru (4.13) podstawiając  $\omega t = \alpha_g + \lambda$  i przyrównując prąd  $i_T(t)$  do zera. Otrzymuje się stąd:

$$\lambda = \arcsin \frac{\mathbf{1}(0)}{\mathbf{I}_{10}} - \alpha_2. \qquad (4.14)$$

Kąt 💡 można wyznaczyć na podstawie zależności:

$$D = \frac{I_{2m}}{I_{1m}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L_d)^2}}$$

Stad:

$$\Psi_2 = \operatorname{arotg} \sqrt{\frac{1}{D^2} - 1}$$
 (4.15)

Największą wartość kąta wysterowania  $\propto_{max}$ , przy której można jeszcze zażączyć tyrystor określa kąt, przy którym następuje przecięcie przebiegów prądu I<sub>1m</sub>sin wt oraz I<sub>2m</sub>sin(wt -  $\varphi_2$ ). Wartość tego kąta określa zależność:

- 39 -

$$\alpha_{\text{max}} = \frac{D \sin \tau_2}{D \cos \varphi_2 - 1}.$$
 (4.16)

Przebiegi napięć i prądów po przyjęciu założeń upraszczających przedstawia rys. 32, a charakterystyki sterowania dla D = 0,1 i D = 0,3 przedstawia rys. 33.



Rys. 32. Przebiegi prądów i napięć w układzie przy założeniu idealnego dławika i obciążenia rezystancyjnego

the shirt astrony moments to announce of an average statement of the statements of



- 40 -



# 4.2. Układy dwóch połączonych przeciwrównolegie tyrystorów powtórnej stronie transformatora regulacyjnego

Sohemat ideowy układu przedstawiono na rys. 34. Przy analizie założono, że tyrystory są kluozami idealnymi, pominięto komutacyjne spadki napięcia na tyrystorach oraz pominięto indukcyjność rozproszenia i rezystancję uzwojenia wtórnego transformatora Tr.



chemat ideowy układu Rys. 35. Sohemat zastępozy układu okresu przewodzenia tyrystora

Dla okresu przewodzenia tyrystora w przedziale:  $\alpha_z \leq \omega t \leq \alpha_z + \lambda$  schemat zastępczy układu zamieszczono na rys. 35, gdzie oznaczono:

i(t) = i'(t)	- prąd płynący przez obciążenie w okresie przewodzenia ty-
	rystora,
zr	- liczba zwojów uzwojenia pierwotnego,
za	- liczba zwojów uzwojenia wtórnego,
$L = L_{r1} + L_{0}$	- suma indukcyjności w obwodzie obciążenia i indukcyjności
	rozproszenia strony pierwotnej,
$R = R_1 + R_0$	- suma rezystancji obciążenia i rezystancji uzwojenia pier-
	wotnego,
L	- indukcyjność główna uzwojenia pierwotnego,
La	- indukoyjność główna uzwojenia wtórnego,
$M = \sqrt{L_1 L_2}$	- indukcyjność wzajemna przy sałożeniu k = 1,

- prąd płynący przez uzwojenie wtórne.

W tym przedziałe pracy układ opisany jest równaniami:

$$Ri'(t) + (L_{1} + L) \frac{di'(t)}{dt} - M \frac{di_{T}(t)}{dt} = U_{m} \sin \omega t$$

$$L_{s} \frac{di_{T}(t)}{dt} - M \frac{di'(t)}{dt} = 0$$
(4.17)

po rozwiązaniu tego układu równań otrzymuje się wyrażenia opisujące czasowe przebiegi prądów i'(t) i i\_(t) w postaci:

$$\mathbf{i}'(\mathbf{t}) = \mathbf{I}_{1m} \sin(\omega \mathbf{t} - \varphi_1) + \left[\mathbf{i}'(\mathbf{0}) - \mathbf{I}_{1m} \sin(\omega_m - \varphi_1)\right] = \frac{\omega \mathbf{t} - \omega_m}{\mathbf{t}_m^2 \varphi_1}$$
(4.18)  
$$\mathbf{I}_T(\mathbf{t}) = \frac{M}{L_m} \left\{ \mathbf{I}_{1m} \sin(\omega \mathbf{t} - \varphi_1) + \left[\mathbf{i}'(\mathbf{0}) - \mathbf{I}_{1m} \sin(\omega_m - \varphi_1)\right] = \frac{\omega \mathbf{t} - \omega_m}{\mathbf{t}_m \varphi_1} - \mathbf{i}'(\mathbf{0}) \right\}$$
(4.19)

gdzie:

dla

i<sub>T</sub>(t)

$$I_{1=} = \frac{U_{m}}{\sqrt{R^{2} + (\omega L)^{2}}}$$

$$\varphi_{1} = \operatorname{arotg} \frac{\omega L}{R},$$

$$i'(0) = i''(t_{m}).$$

Gdy  $i_{T}(t)$  osiąga wartość zero tyrystor przechodzi w stan zaporowy. Wartość kąta przewodzenia  $\lambda$  można wyznaczyć ze wzoru (4.19) po wstawieniu  $\omega t = \alpha_{x} + \lambda$  i przyrównaniu do zera. Otrzymuje się wtedy wyrażenie:

- 41 -

$$I_{1m} \sin(\alpha_{z} + \lambda - \varphi_{1}) + \left[i'(0) - I_{1m} \sin(\alpha_{z} - \varphi_{1})\right] = \frac{\lambda}{t_{g}\varphi_{1}} - i'(0) = 0. \quad (4.20)$$

Dla przedziału  $z_z + \lambda < \omega t + z_z + \Im$  po wyłączeniu tyrystora, schemat zastępczy układu przedstawiono na rys. 36. Przez obciążenie płynie teraz prąd i(t) = i'(t). Układ opisany jest równaniem:

$$L + L_1 \frac{di''(t)}{dt} + R''(t) = U_m \sin \omega t \qquad (4.21)$$

po jego rozwiązaniu otrzymuje się wyrażenie dla prądu i"(t) w postaci;

$$\mathbf{i}^{\prime\prime}(\mathbf{t}) = \mathbf{I}_{2\mathbf{m}} \mathbf{sin}(\omega \mathbf{t} - \boldsymbol{\varphi}_{2}) + \left[\mathbf{i}^{\prime\prime}(\mathbf{0}) - \mathbf{I}_{2\mathbf{m}} \mathbf{sin}(\boldsymbol{\varphi}_{2} + \boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\varphi}_{2})\right] = \frac{\omega \mathbf{t} - \boldsymbol{\varphi}_{2} - \boldsymbol{\lambda}}{\mathbf{t}_{3} \boldsymbol{\varphi}_{2}}, \quad (4.22)$$





Przebiegi napięć i prądów w układzie przedstawiono na rys. 37. Jak wykazały badania pominięcie rezystancji i indukowjności rozproszenia strony wtórnej transformatora Tr znacznie upraszoza analizę matematyczną nie wnosząc przy tym większych błędów. Rzeczywisty prąd płynący przez obciążenie jest nieco mniejszy od obliczonego, nieznaczne różnice występują też między obliczonym i rzeczywistym kątem przewodzenia tyrystorów . Z przeprowadzonej analizy wynika, że układ ten ma właściwości i charakterystyki zbliżone do układu z dławikiem (pkt. 4.1). Jednak w układzie tym amplituda prądu płynącego przez tyrystory  $i_T(t)$  zależy od przekładni napięciowej zastosowanych transformatorów regulacyjnych. Jest to szczególnie istotne przy zasilaniu z sieci wysokiego napięcia.

and \$2.51 strings worked were divided attentions of a sole angeorem, himsole bats presentants & works required as prove 18.157 pr. wetertarts where a st. 5. 5 presentants to have. Strapped; sty start verstants;



Rys. 37. Przebiegi napięć i prądów w układzie

# 4.3. Uklady tyrystorowo-magnetyczne

Sohemat ideowy przedstawiono na rys. 38. W pracy [61] przedstawiono dokładny model matematyczny tyrystorowo-magnetycznego sterownika napięcia. Wyprowadzene w oparciu o ten model równania opisujące przebiegi prądów i charakterystyki mają bardzo złożoną postać i analiza ich jest utrudniona nawet przy zastosowaniu do tego celu maszyny cyfrowej. W pracy tej przedstawiono też wyniki obliczeń dla czterech różnych wariantów przyjętych założeń upraszczających. Porównanie tych wyników obliczeń z przebiegami i charakterystykami w układzie rzeczywistym pozwala stwierdzić, że analizę

- 43 -

Przez uzwojenie robocze płynie w tym okresie prąd i(t) = i'(t). Dla tego okresu można mapisać równania identyczne jak (4.17) i po ich rozwiązaniu



uzyskać wyrażenia na prąd i'(t),  $i_T(t)$  w postaci (4.18) i (4.19). Przyrównując wyrażenie (4.19) do zera i podstawiając  $\omega t = \alpha$  możne obliczyć wartość kąta, przy którym następuje wyłączenie tyrystora  $(\alpha_w = \alpha_+ \%)$ . Począwszy od tej chwili (t<sub>w</sub>) aż do chwili ponownego załączenia tyrystora dla  $\omega t = 2\Re + \chi_g$ prąd płynie tylko przez uzwojenie robocze, a indukcyjność L<sub>1</sub> zmienia się w zależności od zmiany  $\mu$ 

Rys. 40. Sohemat zastępozy układu po wyłączeniu tyrystora

według przyjętej obarakterystyki magnesowania. Dla tego okresu pracy schemat zastępczy układu przedstawiono na rys. 40, przy czym

$$L_{1}(\mu) = \begin{cases} L_{1} & dla - H_{1} \leq H \leq H_{1} \\ 0 & dla & H > H_{1} & 1 & H \leq - H_{1} \end{cases}$$

V oparciu o ten achemat možna napisać równanie wažne dla  $\alpha_{\omega} \leq \omega t \leq 2^{24} + \omega_{\omega} t$ 

$$U_{m} \operatorname{sinwt} = \left[ L + L_{1}(\mu) \right] \frac{di^{\prime\prime}(t)}{dt} + \operatorname{Ri}^{\prime\prime\prime}(t),$$

którego rozwiązanie ma postać:

$$\mathbf{i}^{\prime}(\mathbf{t}) = \mathbf{I}_{\mathbf{m}}(\mu) \mathbf{sin} \left[ \omega \mathbf{t} - \varphi(\mu) \right] + \left[ \mathbf{i}^{\prime}(\mathbf{0}) - \mathbf{I}_{\mathbf{m}}(\mu) \mathbf{sin}(\omega_{\mathbf{w}} - \varphi(\mu) \right] = \begin{pmatrix} \omega \mathbf{t} - \omega_{\mathbf{w}} \\ \mathbf{t}_{\mathbf{m}}(\mu) \end{pmatrix}$$
(4.23)

gdsie:

$$\mathbf{I}_{\mathbf{a}}(\mu) = \begin{cases} \mathbf{I}_{\mathbf{2}\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_{\mathbf{a}}}{\sqrt{\mathbf{R}^{2} + \omega^{2}(\mathbf{L} + \mathbf{L}_{1})^{2}}} & \text{dla} - \mathbf{H}_{1} \leq \mathbf{H} \leq \mathbf{H}_{1} \\ \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_{\mathbf{a}}}{\sqrt{\mathbf{R}^{2} + (\omega\mathbf{L})^{2}}} & \text{dla} \mathbf{H} > \mathbf{H}_{1} \quad \mathbf{i} \quad \mathbf{H} \leq - \mathbf{H}_{1} \\ \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_{\mathbf{a}}}{\sqrt{\mathbf{R}^{2} + (\omega\mathbf{L})^{2}}} & \text{dla} \mathbf{H} > \mathbf{H}_{1} \quad \mathbf{i} \quad \mathbf{H} \leq - \mathbf{H}_{1} \\ \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_{\mathbf{a}}}{\sqrt{\mathbf{R}^{2} + (\omega\mathbf{L})^{2}}} & \text{dla} \mathbf{H} = \mathbf{H}_{1} \quad \mathbf{I} \quad \mathbf{H} \leq - \mathbf{H}_{1} \\ \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_{\mathbf{a}}}{\mathbf{I}_{\mathbf{a}}} & \text{dla} - \mathbf{H}_{1} \leq \mathbf{H} \leq \mathbf{H}_{1} \\ \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_{\mathbf{a}}}{\mathbf{I}_{\mathbf{a}}} & \text{dla} \mathbf{H} = \mathbf{H}_{1} \quad \mathbf{I} \quad \mathbf{H} \leq - \mathbf{H}_{1} \\ \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \quad \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \quad \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \\ \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \quad \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \quad \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \\ \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \quad \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \quad \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \quad \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \\ \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \quad \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \quad \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \\ \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} = \mathbf{I}_{1\mathbf{a}} \quad \mathbf{$$





Rys. 38. Schemat ideowy układu

Rys. 39. Charakterystyka zagnesowania rdzenie

pracy takich układów z wystarczającą dokładnością można prowadzić przyjmując następujące założenia:

- charakterystyka magnesowania rdzenia transformatora Tr aproksymowana jest dwuodcinkowo w sposób pokazany na rys. 39, pomija się zjawisko histerezy i prądów wirowych,
- pomija się indukowjność rozproszenia i rezystanoję strony wtórnej transformatora Tr,
- układ zasilany jest napięciem  $u(t) = U_{m} \sin \omega t, \frac{U_{m}}{\pi_{m} S\omega} \leq B_{1}.$

Dla okresu przewodzenia tyrystora:  $\alpha_g \leq \omega t \leq \alpha_g + \lambda$  sohemat zastępozy ukladu jest identyczny z układem z rys. 35.

Przyjęto następujące oznaczenia:

 $L_1 = \frac{\mu_1 z_r^2 s}{1}$ - indukcyjność uzwojenia roboczego.  $L_{\mu} = \frac{\mu_1}{2} \frac{\pi_1}{2} \frac{\pi_2}{2} S$ - indukovjność uzwojenia sterującego, - liczba zwojów uzwojenia roboozego. ×., - liczba zwojów uzwojenia sterującego, 2, S.1 - odpowiednio przekrój i długość średniej drogi magnetycznej rdzenia.  $l_{1}^{\mu} = \frac{n_{1}}{n_{1}}$ - przenikalność magnetyczna rdzenia dla -  $H_1 \leq H \leq H_1$ , H = VLL - indukovjność wzajemna przy sałożeniu k = 1,  $L = L_0 + L_{r1}$ - suma indukovjności w obwodzie obciążenia i indukovjności rozproszenia uzwojenia roboczego, R = R + R - suma rezystancji obciążenia i uzwojenia roboczego, i'(o) - prąd płynący przez uzwojenie robocze w chwili wysterovania tyrystora.

V oparciu o wzór (4.23) można obliczyć przebiegi prądu i''(t) w poszczególnych przedziałach zmian kąta od skot s 20 +  $\omega_{\pi}$ .

- 46 -

Dia przedziału & Sat Sat.:

$$=\frac{\omega t - \infty_{w}}{t_{g} \varphi_{2}}$$

$$i_{1}^{\prime \prime}(t) = I_{2m} \sin(\omega t - \varphi_{2}) + \left[i^{\prime}(\omega_{w}) - I_{2m} \sin(\omega_{w} - \varphi_{2})\right] e \qquad (4.24)$$

Przy czym  $\alpha_{\pm 1}$  jest kątem, przy którym prąd i "(t) osiąga wartość –  $\frac{H_1 I}{r_r}$ i rdzeń nasyca się, co powoduje skokową zmianę indukcyjności uzwojenia roboczego z wartości L, do zera. Wartość kąta  $\alpha_{\pm 1}$  można obliczyć ze wzoru (4.24) po podstawieniu i "(t) = –  $\frac{H_1 I}{r_r}$  i «t =  $\epsilon_{\pm 1}$ . Po osiągnięciu przez indukcję wartości B (dla  $\omega t = \alpha_{\pm 1}$ ) prąd w uzwojeniu roboczym w przedziale  $\epsilon_{\pm 1} \le \alpha t \le \alpha_{\pm 1}$  zmienia się według zależności:

$$i_{2}^{\sigma}(t) = I_{1m} \sin(\omega t - \varphi_{1}) + \left[ -\frac{H_{1}I}{2_{r}} - I_{1m} \sin(\omega_{z1} - \varphi_{1}) \right] = (4.25)$$

gdzie  $\alpha_{W1}$  jest kątem, przy którym rdzeń wyobodzi z nasycenia.Począwszy od ohwili t<sub>W1</sub> dla której  $\omega_{W1} = \alpha_{W1}$ , przenikalność magnetyczna rdzenia ma ponownie wartość  $\mu_1$ , a indukcyjność uzwojenia roboczego wartość  $L_1$ . W przedziale  $\alpha_{W1} \leqslant \omega t \leqslant 2St + \omega_{W1}$  prąd jest opisany równaniem:

$$i_{3}^{\prime\prime}(t) = I_{2m} \sin(\omega t - \varphi_{2}) + \left[ -\frac{H_{1}I}{z_{r}} - I_{2m} \sin(\omega t_{w1} - \varphi_{2}) \right] = -\frac{\omega t - \omega_{w1}}{t_{g}\varphi_{2}}$$
(4.26)

Przy kącie  $\omega t = 2\Re + \alpha_z$  następuje ponowne załączenie tyrystora. Prąd i'(0), który płynie w uzwojeniu roboczym w ohwili załączenia tyrystora można obliczyć ze wzoru (4.26) po podstawieniu  $\omega t = 2\Re + \varkappa_z$ . Analiza pracy sterownika tyrystorowo-magnetycznego w oparciu o przedstawione zależności jest dosyć trudna. Wymaga obliczenia funkcji  $\alpha_z = f(\alpha_z), \alpha_z = f(\alpha_z), \alpha_$  Gdzie: I - skuteczna wartość prądu i(t) opiaanego zależnościami:

$$\mathbf{i}(\mathbf{t}) = \begin{cases} \mathbf{i}'(\mathbf{t}) & d\mathbf{l}\mathbf{a} \quad \omega \mathbf{t} \epsilon (\alpha_{\mathbf{z}}, \alpha_{\mathbf{z}} + \lambda) \\ \mathbf{i}''(\mathbf{t}) & d\mathbf{l}\mathbf{a} \quad \omega \mathbf{t} \epsilon (\alpha_{\mathbf{z}} + \lambda, \alpha_{\mathbf{z}1}) \\ \mathbf{i}''(\mathbf{t}) & d\mathbf{l}\mathbf{a} \quad \omega \mathbf{t} \epsilon (\alpha_{\mathbf{z}1}, \alpha_{\mathbf{w}1}) \\ \mathbf{i}''(\mathbf{t}) & d\mathbf{l}\mathbf{a} \quad \omega \mathbf{t} \epsilon (\alpha_{\mathbf{w}1}, 2\pi + \alpha_{\mathbf{z}}) \end{cases}$$
(4.27)

 $I_{p}$  - skuteczna wartość prądu i(t) dla  $\alpha_{z} = \alpha_{zkr^{*}}$ 

Przykładowo na rys. 41,42,43,44,45,46 przedstawiono niektóre wyniki obliozeń.





#### 4.4. Uniwersalny model analogowy układu zasilania odbiorników łukowych z tyrystorowymi sterownikami napięcia przemiennego

Analiza teoretyczna omówionych powyżej układów jest bardzo złożona, a uzyskane tą drogą zależności ze względu na swoją skomplikowaną postać nie są przydatne w praktyce inżynierskiej do projektowania i obliczeń. Przyjmowanie silnych założeń upraszczających pozwala wprawdzie uprościć obliczenia, ale uzyskane wyniki obarczone są dużym błędem. Analiza pracy tych układów, a także ich racjonalne projektowanie mogą być z dobrym skutkiem prowadzone w oparciu o metode symulacji na modelu analogowym [57], [63], Proponowane do zasilania odbiorników łukowych układy ze sterowaniem po stronie napięcia przemiennego przedstawiono na rys. 23, 26, 27. Jak wynika z rozwa\_ań przeprowadzonych w punkcie 4.1. 4.2, 4.3 stosowane w tych układach sterowniki napiecia: z dławikiem, z transformatorem regulacyjnym i tyrystorowo-magnetyczne posiadają bardzo zbliżone właściwości i charakterystyki. Dlatego też możliwe jest opracowanie uniwersalnego modelu analogowego tych układów dokładnie symulującego przebiegi chwilowe wszystkich interesujących projektanta wielkości. Przyjęto przy tym jedynie takie založenia upraszozające, które nie mają wpływu na ilościową i jakościową istote zachodzących zjawisk:

- transformator glówny Tr reprezentowany jest przez impedancję zwarcia R\_ i X\_,
- pominieto rezystanoje dlawika.
- rezystanoję zwarcia transformatora regulacyjnego R, włączono po jego stronie pierwotnej.
- wszystkie parametry sprowadzono na stronę wtórną transformatora główne-RO.
- modele analogowe diod i tyrystorów przyjęto jako rezystancje zmienne bedące funkcją sterowania bramkowego, prądów i napięć, Rezystancja zaworu w stanie przewodzenia wynosi 12.10<sup>-3</sup> $\Omega$ , w stanie zaporowym 2.10<sup>3</sup> $\Omega$ .



układu tyrystorowo-magnetycznego, c achemat zredukowany

Zgodnie z przyjetymi założeniami schematy zastępoze jednej fazy można przedstawić tak jak na rys. 47a dla układu z dławikami i na rys. 47b dla ukladów z transformatorami regulaoyjnymi i układów tyrystorowomagnetyoznych.

Obydwa schematy można zredukować do identycznego schematu równoważnego przedstawionego na Rys. 47. Schematy zastępcze jednej fazy rys. 470. na którym oznaczono: a - dla układu z dławikiem, b - dla układu z transformatorem regulacyjnym i

- dla układu z dławikami:

$$R_{d} = R_{g}, L_{d} = L_{g}, L_{m} = L_{d},$$

- dla układu z transformatorami regulacyjnymi i układu tyrystorowo-magnetycznego

$$R_{g} = R_{z} + R_{t}, \quad L_{g} = \frac{L_{1} L_{r2}}{L_{1} + L_{r2}} + L_{r1} + L_{z}, \quad L_{m} = L_{1} - \frac{L_{1} L_{r2}}{L_{1} + L_{r2}}.$$

Pelpy zredukowany schemat zastępczy przedstawiono na rys. 48. Jest on podstawa do opracowania modelu obwodów głównych, Zastosowano do tego celu teorie grafów. Graf obwodów głównych przedstawiono na rys. 49. Przyjmując oznaczenia galęzi głównych i galęzi dopełnień grafu jak na rys. 49 można napisné następujące równania w postaci ogólnej:

Równania pradów:

$$I_{1} = -I_{15} - I_{16}$$

$$I_{2} = I_{15}$$

$$I_{3} = I_{16}$$

$$I_{4} = -I_{12} - I_{15} - I_{16}$$

$$I_{10} = I_{16} + I_{19}$$

$$I_{5} = I_{15} - I_{13}$$

$$I_{11} = I_{17} + I_{18} + I_{19}$$

$$I_{6} = I_{16} - I_{14}$$

$$(4.28)$$

Równania napięć:

U,

U,

υ.

U,

U.

U,

U,

$$U_{12} = U_{4}$$

$$U_{13} = U_{5}$$

$$U_{14} = U_{6}$$

$$U_{15} = -U_{1} + U_{2} + U_{4} - U_{5} + U_{7} + U_{8} - U_{9}$$

$$U_{16} = -U_{1} + U_{3} + U_{4} - U_{6} + U_{7} + U_{8} - U_{10}$$

$$U_{17} = -U_{8} - U_{11}$$

$$U_{18} = -U_{9} - U_{11}$$

$$U_{19} = -U_{10} - U_{11}$$

W oparciu o rys. 48 1 49 oraz równania (4.28) i (4.29) napisano równar a maszynowe w postaci ogólnej:

 $U_1 = U_1$ napięcia zasilające z modelu generatora trójfazowego U2 = U. U2 = U.

- 51 -



- 52 -

Rys. 48. Pelny gredukowany schemat gastepogy



Rys. 49. Graf obwodów głównych

 $U_4 = Z_4 I_4$   $U_5 = Z_5 I_5$   $U_6 = Z_6 I_6$   $U_8 = Z_8 I_8$   $U_9 = Z_9 I_9$  $U_{10} = Z_{10} I_{10}$ 

Spadki napięć i prądy liczone przez modele diod i tyrystorów  $\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{17} = \mathbf{G}_{17} \mathbf{U}_{17} \\ \mathbf{I}_{18} = \mathbf{G}_{18} \mathbf{U}_{18} \\ \mathbf{I}_{19} = \mathbf{G}_{19} \mathbf{U}_{19} \end{bmatrix}$  Spadki napięć i prądy liozone przez modele diod i tyrystorów  $\mathbf{U}_7 = z \frac{\mathbf{S}_{\pm} \mathbf{S}_{\pm}}{\mathbf{S}_{\pm}} \mathbf{L}_6 \mathbf{I}_7 + \frac{\mathbf{S}_{\pm}}{\mathbf{S}_{\pm}} \mathbf{R}_6 \mathbf{I}_7 \\ \mathbf{U}_{11} = z \frac{\mathbf{S}_{\pm} \mathbf{S}_{\pm}}{\mathbf{S}_{\pm}} \mathbf{L} \mathbf{I}_{11} + \mathbf{N}_{\mathbb{V}} \mathbf{I}_{11} \\ \mathbf{I}_{12} = \frac{1}{2} + \frac{\mathbf{S}_{\pm}}{\mathbf{S}_{\pm} \mathbf{S}_{\pm}} + \frac{1}{\mathbf{L}_{m}} \mathbf{U}_{12}, \quad \mathbf{I}_{13} = \frac{1}{2} + \frac{\mathbf{S}_{\pm}}{\mathbf{S}_{\pm} \mathbf{S}_{\pm}} + \frac{1}{\mathbf{L}_{m}} \mathbf{U}_{13} \quad (4.30) \\ \mathbf{I}_{14} = \frac{1}{2} + \frac{\mathbf{S}_{\pm}}{\mathbf{S}_{\pm} \mathbf{S}_{\pm}} + \frac{1}{\mathbf{L}_{m}} \mathbf{U}_{15} - \frac{\mathbf{R}_{\pm}}{\mathbf{S}_{\pm}} + \frac{1}{\mathbf{L}_{m}} \mathbf{U}_{13} \\ \mathbf{I}_{15} = \frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{S}_{\pm}}{\mathbf{S}_{\pm} \mathbf{S}_{\pm}} + \frac{1}{\mathbf{L}_{6}} \mathbf{U}_{15} - \frac{\mathbf{R}_{5}}{\mathbf{S}_{\pm}} + \frac{1}{\mathbf{L}_{6}} \mathbf{I}_{15} \right) \\ \mathbf{I}_{16} = \frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{S}_{\pm}}{\mathbf{S}_{\pm} \mathbf{S}_{\pm}} + \frac{1}{\mathbf{L}_{6}} \mathbf{U}_{16} - \frac{\mathbf{R}_{5}}{\mathbf{S}_{\pm}} + \frac{1}{\mathbf{L}_{6}} \mathbf{I}_{16} \right)$ 

Zastosowano następujące modele zaworów:

 tyrystor jako model R, tzn. wykonujący operacje U = RI. Schemat modelu tyrystora pokazano na rys. 50. W pełnym modelu analogowym układu (rys. 51) pary tyrystorów odwzosowane są na wzmacniaczach 42, 29, 27;



Rys. 50. Model tyrystora typu R, k<sub>T</sub>,k<sub>H</sub> - komparatory prądu i mapięcia



hys. 51. Schemat blokowy uniwersalnego modelu ana ogowego

- dioda typu R wykonująca operacje U = R I. Model jej jest podobny do modelu tyrystora z rys. 50, z tym, że pozbawiony jest sieci logicznej. Na schemacie z rys. 51 zrealizowane są one na wzmachiaczach 3,14,24;
- dioda typu G wykonująca operację I = G U. Na schemacie z rys. 51 ich modele zrealizowane są na wzmacniaczach 4, 9, 11.

Na podstawie równań (4.30) opracowano schemat blokowy modelu analogowego, który pokazano na rys. 51. Na schemacie tym nastawy potenojometrów obliozono dla układu rzeczywistego o mocy 410 VA, naniesione oznaczenia napięć i prądów odnoszą się do schematu zredukowanego (rys. 48) i grafu obwodów głównych (rys. 49).

Model ten pozwala na pomiary:

- oharakterystyk statycznych zewnętrznych  $U_d = f(i_d)$  dla  $\propto = const. - na$ pięcia wyprostowanego w zależności od prądu obciążenia przy stałej war $tości kąta wysterowania tyrystorów <math>\ll$  i oharakterystyk sterowania  $U_d =$  $= f(\alpha)$  dla  $R_o = const - napięcia wyprostowanego w zależności od kąta$ przy stałej wartości rezystanoji obciążenia. Charakterystyki te przedstawione są na rys. 52 i 53:



Rys. 52. Charakterystyki zewnętrzne  $U_{d} = f(i_{A}) \text{ przy } \ll = \text{ const}$  Rys. 53. Charakterystyki sterowania  $U_d = f^{\dagger} e^{-1}$  przy  $P_d = const$ 

- wartości obwilowych wszystkich interesujących projektanta wielkości, jak:  $i_r$  - prąd fazy r,  $i_{rT}$  - prąd tyrystorów fazy r,  $i_{rm}$  - prąd dławika fazy r,  $u_{rT}$  - napięcie tyrystorów fazy r,  $i_{D4}$  - prąd diody D4.  $u_{D4}$  - napięcie diody D4,  $i_2$  - prąd łuku,  $u_2$  - napięcie łuku itp. Przykładowo na rys. 54 przedstawiono przebiegi tych wielkości dla  $\alpha = 77^\circ$ ;
- w stanach nieustalonych wszystkich wymienionych powyżej wielkości zarówno przy zaburzeniach sy nału sterującego prace tyrystorów jak również przy zmianie charakterystyki odbiornika (np. zmiana długości luku).

Obszerns wyniki badań takich układów na przedstawionym modelu analogowym zamieszozono w przozoh: [55], [57], [62].

- 56 -



Rys. 54. Przebiegi mierzonych wielkości dla ct= 77°

the second production in the second product of the second second

5. SYNTEZA UKLADÓW REGULACJI PRADU ŁUKU

Tyrystorowe masilaoze pracujące w układnie otwartym za względu na swoje stosunkowo sztywne obarakterystyki zewnętrzne (rys. 52) nie basdzo nadają się do zasilania odbiorników żukowych. Aby zapewnić poprawną pracę w osżym zakresie i speżnienie żądanych wymagań przeksztażtniki tyrystorowe muszą być wyposażone w slektroniozne układy regulacji, których zadaniem jest odpowiednie uksztażtowanie obarakterystyki zewnętrznej, rozzerzenie zakresu regulacji prądu, zwiększenie dokładności regulacji prądu, poprawa dynamiki i ograniozenie przeregulowań prądu w stanach przejściowych. Dlatego też bardzo ważnym zagadnieniem jest wybór odpowiedniej struktury układu regulacji i obliczenie optymalnych nastaw regulatorów w wależności od parametrów odbiornika żukowego i układu zasilania. Mogą być tutaj stosowane następujące struktury układów regulacji prądu żuku: układy z jednym regulatorem typu PI lub PID, układy z regulatorem prądu i regulatorem napięcia typu PD lub PID, układy inwariantne i układy adaptacyjne.

## 5.1. <u>Model matematyczny układu zasilania i regulacji prądu odbiornika żu-</u> kowego

Vszystkie tyrystorowe układy zasilania żuku elektrycznego można sprowadzić do jednego schematu zastępczego przedstawionego na rys. 55. W obwodzie zasilania żuku znajduje się indukcyjność zastępcza L równa sumie



Rys. 55. Uproszczony schemat tyrystorowego układu zasilania odbiornika żukowego

indukovjności włączonych w obwód łuku i indukovjności układu zasilania sprowadzonych na stronę wtórną transformatora oraz rezystanoja zastępoza R równa rezystancji obwode łuku i układu zasilania. Elektromagnetyczna stałą ozasowa obwolu reboczego  $T_2 = \frac{L}{R}$  jest znacznie większa od tzw. termicznej stałej czasowej łuku  $\theta$ . Zwiększenie indukcyjności w obwodzie roboczym powoduje wzrost stałej ozasowej obwodu oraz wygładzenia prądu łuku, co z kolel pozwala zmniejszyc stałą czasową w obwodzie pomiaru prądu łuku. W oparciu o schemat z rys. 55 i równania opisujące obwód łuku można narysować pełny schemat blokowy układu zasilania odbiornika łukowego, który przedstawiono na rys. 56.



Rys. 56. Schemat blokowy układu regulacji prądu łuku

Transmitanoja układu regulacji określona jest funkcją  $G_r(s)$ . Odbiornik lukowy opisany jest transmitanoją obwodu luku w postaci:

$$G_{2}(a) = \frac{1}{R(1 + aT_{2})}$$
 (5.1)

oraz nieliniową charakterystyką mapięciowo-prądową przedstawioną na rys. 57. Z charakterystyki tej można obliczyć rezystanoję dynamiczną łuku K =  $\frac{dU}{dT}$ , która jest zależna od wielu ozynników, głównie jednak od wartości prądu łuku i długości łuku K =  $f(T_1, t_1)$ . Jak wynika z rys. 57 dynamiczny współczynnik wzmocnienia łuku zmienia się nieliniowo w szerokich granicach od wartości ujemnych dla małych prądów do wartości dodatnich dla dużych prądów. Transmitanoja przekształtnika tyrystorowego posiada ogólną postać:

$$G_{t}(s) = K_{t}(U_{s})e^{-st}o,$$
 (5.2)

They be described a function of the statement of the stat



- 59 -

Rys. 57. Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa odbiornika łukowego

gdzie:

K<sub>t</sub>(U<sub>s</sub>) - wzmoonienie przekształtnika będące funkcją napięcia sterującego U<sub>s</sub>,

 rzeczywiste opóźnienie wnoszone przez przekształtnik, zależne od układu zastosowanego przekształtnika.

Wielkość regulowana I, zmierzona jest przez układ pomiaru prądu o transmitanoji:

$$G_{f}(s) = \frac{K_{f}}{1 + sT_{f}}$$
(5.3)

Przedstawiona na rys. 56 struktura rzeczywistego układu zasilania i regulacji posiada elementy nieliniowe i o zmiennych w czasie parametrach. Charakterystyka prądowo-napięciowa odbiornika łukowego jest silnie nieliniowa, zmienia swoje położenie pod wpływem zakłóceń, a jej nachylenie zależy od punktu pracy. Indukcyjności w obwodzie łuku zależne są także od wartości prądu. Przekształtnik tyrystorowy wnosi do układu rzeczywiste zmienne opóźnienie czasowe t<sub>o</sub> (gdzie t<sub>o</sub>  $\in [0, \frac{2\pi i}{m_{el}}], m - liczba pulsów$ przekształtnika), a jego współczynnik wzmocnienia zależy od nachyleniacharakterystyki sterowania przekształtnika. Jak stąd wynika przedstawionymodel matematyczny jest nieliniowy i niestacjonarny, dlatego też problemanalizy i syntezy jest tutaj zagadnieniem złożonym. Aby uprościć analizęi uzyskać zależności przydatne w praktyce inżynierskiej wprowadzono następujące założenia:

- indukcyjność L = const,

- transmitanoję przekształtnika tyrystorowego uproszozono do elementu 1nercyjnego pierwszego rzędu:

- 60 -

$$G_{t}(s) = \frac{X_{t}}{1 + sT_{0}},$$
 (5.4)

gdzie:

 $K_t$  - éredni współczynnik wzmocnienia przekształtnika, T<sub>o</sub> - éredni czas opóźnienia równy <u>H</u>

- oharakterystyka prądowo-napięciowa odbiornika żukowego jest linearyzowana przedziałami. W każdym przedziałe charakterystyka ta jest wtedy okre-

Slona jako odpinek prostej o nachyleniu  $\frac{\Delta \Psi_2}{\Delta T_3} = K_2$ .

Analizę układu można więc prowadzić dla małych odchyleń od stanu ustalonego (określonego parametrami  $U_{2u}$  i  $I_{2u}$ ).

$$u_2 = I_2 - I_{2u}, \quad u_2 = U_2 - U_{2u}$$

gdzie i<sub>2</sub> i u<sub>2</sub> są wartościami odchyleń napięcia i prądu żuku od stanu ustalonego mieszozącymi się w przedziale linearyzacji. Transmitancję <sub>od-</sub> biornika można więc przedztawić w postaci:

$$G_{\underline{z}}(\underline{s}) = \frac{I_{\underline{z}}(\underline{s})}{U_{\underline{d}}(\underline{s})} + \frac{\frac{1}{R(1+eT_{\underline{z}})}}{1 + \frac{1}{R(1+eT_{\underline{z}})}K_{\underline{z}}} = \frac{1}{R(1+\beta+eT_{\underline{z}})}, \quad (5.5)$$

gdzie  $\dot{p} = \frac{1}{R}$  określa nachylenie obarakterystyki żuku w analizowanym przedziałe linearyzacji.

W oparciu o powyższe założenia dla załych odobyleń dla stanu ustalonego schemat blokowy układu za postąć przedstawioną na rys. 58.



Rys. 58. Schemat blokowy układu dla małych odchyleń od stanu ustalonego

#### 5.2. Układy z regulatorem prądu typu PI i PID

Najprosteną strukturę układu regulacji prądu łuku uzyskujemy stosując jeden regulator prądu typu PI o transmitanoji:

$$G_{r}(s) = K_{r}(1 + \frac{1}{sT_{o}})$$
 (5.6)

lub typu PID o transmitanoji:

$$G_{r}(s) = K_{r}(1 \wedge \frac{1}{sT_{o}} + sT_{W})$$
(5.7)

(5.9)

Analizę stabilności układu przeprowadzono dla przypadku bardziej złożonego z regulatorem typu PID. W oparciu o rys. 58 można obliczyć transmitancję operatorową zamkniętego układu regulacji. Jest ona opisana równaniem:

$$G(s) = \frac{T_{2}(s)}{U_{2}(s)} = \frac{\frac{1}{K_{f}}(1 + sT_{o} + s^{2}T_{o}T_{w})(1 + sT_{f})}{\frac{4}{K_{o}} \frac{T_{o}}{T_{2}T_{f}T_{o}} + s^{3}\frac{T_{o}}{K_{o}} \left[(1+\beta)T_{o}T_{f} + (T_{o}+T_{f})T_{2}\right] + s^{2}\frac{T_{o}}{K_{o}}}$$
(5.8)

$$\overline{\left[(1+\beta)(T_{0} + T_{f}) + T_{2} + K_{0}T_{M}\right]} + * \frac{T_{0}}{K_{0}}(1+\beta+K_{0}) +$$

gdzie:

$$K_0 = \frac{K_r K_r K_r}{R}$$
 - wemocnienie w układzie otwartym.

Określając warunki stabilności układu z kryterium Hurwitza dla równania (5.8) otrzymujemy:

$$\begin{array}{l} \cdot 1 + \beta + K_{0} > 0 \\ \cdot (1 + \beta)(T_{0} + T_{f}) + T_{1} + K_{0}T_{W} > 0 \\ \cdot (1 + \beta)T_{0}T_{f} + (T_{0} + T_{f})T_{1} > 0 \\ \cdot \left[ (1 + \beta)T_{0}T_{f} + (T_{0} + T_{f})T_{1} \right] \left[ (1 + \beta)(T_{0} + T_{f}) + T_{1} + K_{0}T_{W} \right] - \\ - (1 + \beta + K_{0})T_{1}T_{f}T_{0} > 0 \\ \cdot \frac{T_{0}}{K_{0}} (1 + \beta + K_{0}) \left[ (1 + \beta)(T_{0} + T_{f}) + T_{1} + K_{0}T_{W} \right] \left[ (1 + \beta)T_{0}T_{f} + (T_{0} + T_{f})T_{1} \right] - \\ - \frac{T_{0}}{K_{0}} T_{1}T_{f}T_{0} (1 + \beta + K_{0})^{2} - \left[ (1 + \beta)T_{0}T_{f} + (T_{0} + T_{f})T_{1} \right]^{2} > 0 \end{array}$$

Warunek 1 określa minimalne żądania dla wzmoonienia regulatora

suggestern manipulations when a

$$K_{r} > - (1 + \beta) \frac{R}{K_{t} K_{f}}.$$
 (5.10)

Varunek 2 i 3 określają minimalne wymagania w odniesieniu do wartości stałej czasowej filtru w układzie pomiaru prądu:

$$T_{f} > -\frac{T_{1} + K_{o} T_{w}}{1 + \beta} - T_{o}$$

$$T_{f} > -\frac{1}{\frac{1 + b}{T_{2}} + \frac{1}{T_{o}}}$$
(5.11)

Jeżeli stała czasowa filtru  $T_f$  jest narzucona, to warunki (5.11) określają wymagania odnośnie wartości stałej czasowej obwodu roboczego  $T_j$ . W warunkach 4 i 5 tkwią warunki poprzednie oraz zalecenia dotyczące stałej ozasowej regulatora  $T_o$ . Z warunków (5.9) można określić wartość stałej czesowej filtru tak, aby dla danego  $\beta$  zapewnić stabilność układu regulacji. Otrzymane zależności upraszozają się jeżeli zamiast regulatora typu PID zastosujemy regulator typu PI (tzn.  $T_w = 0$ ). Porównując jednak wyniki rozważań z obydwoma typami regulatorów można stwierdzić, że zastosowanie regulatora typu PID zamiast PI pozwala zwiększyć zakres regulacji prądu łuku w stronę małych wartości prądu przez odpowiedni dobór stałej czasowej  $T_w$ .

Aby zapewnić możliwie krótki ozas trwania przebiegów przejściowych i nie pozwolić na niedopuszczalne osoylacje prądu łuku przy szerokim zakresie regulacji i minimalnej indukcyjności zastępozej w obwodzie łuku, należy nastawy regulatora dobrać w oparciu o kryterium optymalizujące. Dla układu podanego na rys. 58 wygodne jest zastosowanie kryteriów Kesslera [25],[26], [71]. Transmitancja otwartego układu regulacji określona jest zależnością

$$G_{o}(s) = \frac{U_{I}(s)}{U_{s}(s)} = \frac{K_{L}K_{f}}{R(1+\beta)} \cdot \frac{1}{(1+s\frac{T_{L}}{1+\beta})(1+sT_{o})(1+sT_{f})}$$
(5.12)

Oznaczając  $T_{c}+T_{f} = T_{\delta}$  (mała stała czasowa) z kryterium modułu Kesslera dla transmitancji (5.12) otrzymuje się optymalne mastawy dla przypadku  $\frac{T_{\frac{1}{2}}}{1+\beta} \approx T_{\delta}$ :

$$K_{r} = \frac{R(1+\beta)}{2K_{t}} \left[ \frac{T_{2}}{(1+\beta)T_{\delta}} + \frac{(1+\beta)T_{\delta}}{T_{2}} \right]$$

$$T_{c} = \frac{T_{2}}{1+\beta} + \frac{T_{\delta}}{1 + \frac{T_{2}}{(1+\beta)T_{\delta}}}$$
(5.13)
$$T_{c} = \frac{T_{2}}{1+\beta} \times \frac{T_{\delta}}{T_{\delta}}$$
(5.13)
$$K_{r} = \frac{R}{2K_{t}} \frac{T_{2}}{K_{r}} - T_{\delta}$$

$$K_{r} = \frac{R}{2K_{t}} \frac{T_{2}}{K_{r}} - T_{\delta}$$

- 63

Przebieg odpowiedzi na skok wymuszenia dla tak określonych nastaw regulatora posiada przeregulowania rzędu 4%, ozas narastania wynosi 4,7 T<sub>5</sub>, a czas regulacji z dokładnością 2% wynosi 8,4 T. Natomiast odpowiedź układu na skokową zmianę wielkości zakłócających jest w przypadku takiej optymalizacji niekorzystna, gdyż czas doregulowania wynosi 3 T<sub>0</sub>.



Rys. 59. Wykres do wyznaczania współczynników korekcyjnych do obliczania nastaw regulatora PI z kryterium symetrii

Optymalizację odpowiedzi układu na skokowe zmiany wielkości zakłócającej uzyskuje się dobierając nastawy regulatora PI z kryterium symetrii Kesslera. Jeśli dla transmitancji (5.12) spełniony jest warunek  $\frac{T_L}{1+p} > T_c$  nastawy regulatora PI wynoszą:

$$f_r = k_1 \frac{R T_1}{2K_t K_t T_c}, \quad T_o = k_2 4T_c.$$
 (5.15)

Wapółozynniki  $k_1$ i  $k_2$  zależą od stosunku dużej stałej czasowej do mażej, co przedstawia wykres na rys. 59.

Tego rodzaju optymalizacji towarzyszy duże przeregulowanie (rzędu 40%) przy skokowej zmianie wartości zadanej, które może być jednak ograniozone przez zastosowanie filtra na wejściu wielkeści wymuszającej. Stała czasowa tego filtra powinna wynosić: T = 1,2 T<sub>d</sub>.

Odpowiedź na skokową znianę zakłócenia w przypadku takiej optymalizacji jest bardzo korzystna. Czas regulacji jest teras kilkakrotnie mniejszy w porównaniu z nastawą według kryterium modułu. Jeżeli w transmitancji układu otwartego (5.12) stałe ozasowe  $\frac{T_2}{1+5}$  i T<sub>f</sub> są tego samego rzędu, ale wieżokrotnie większe od T<sub>o</sub>, najlepiej zastosować regulator typu PID o transmitancji (5.7). Nastawy tego regulatora można dobrać z kryterium modmłu Kesslera:

$$K_{T} = \frac{R(1 + \beta)}{2K_{t} K_{T} T_{0}} \left[ T_{T} + \frac{T_{2}}{1 + \beta} \right]$$

$$T_{0} = \frac{T_{2}}{1 + \beta} + T_{T} \qquad (5.16)$$

$$T_{W} = \frac{T_{2}}{T_{T}} + 1 + \beta$$

Analizując powyższe zależności, z których obliczamy nastawy regulatorów można wyciągnąć wniosek, że stosowanie układów regulacji z jednym regulatorem prądu typu PI lub PID nie pozwala na uzyskanie optymalnych przebiegów w całym wymaganym zakresie zmian prądu żuku. We wzorach na nastawy optymalne występuje współczynnik  $\beta$ , który jest stały w każdym przedziale linearyzacji charakterystyki żuku, ale zmienia się od wartości ujemnych do dodatnich przy zmianach prądu żuku od I<sub>żmin</sub> do I<sub>żmax</sub>.

Dlatego też układ zoptymalizowany dla jednego punktu pracy nie zapewnia optymalnych przebiegów we wszystkich innych punktach pracy. Aby zwiększyć zakres pracy odbiornika żukowego przy optymalnych warunkach należy zastosować bardziej złożone struktury układu regulacji.

#### 5.3. Układy z regulatorem prądu i napięcia łuku

Sohemat blokowy układu regulacji z dodatkowym regulatorem napięcia przedstawiono na rys. 60, gdzie oznaczono:

G\_i(s) - transmitancja regulatora prądu typu PI,

G<sub>un</sub>(s) - transmitanoja regulatora napięcia,

G<sub>t</sub>(s) - transmitancja przekształtnika tyrystorowego (5.4),

 $G_{2}(s)$  - transmitanoja obwodu žuku (5.1),  $G_{r}(s)$  - transmitanoja ukžadu pomiaru prądu (5.3).



Rys. 60. Sohemat blokowy układu z regulatorem prądu i napięcia żuku

Założono bezinercyjne sprzężenie zwrotne od napięcia żuku przez układ pomiaru napięcia o wspóżczynniku wzmosnienia  $k_u$ . W oparciu o rys. 60 można napisać równanie dla prądu I<sub>2</sub>:

$$I_{\underline{2}}(s) = \left\{ \left[ (U_{g} - I_{\underline{2}} E_{\underline{f}}(s)) G_{\underline{r}\underline{1}}(s) + k_{\underline{u}} U_{\underline{2}} \right] | G_{\underline{r}\underline{n}}(s) G_{\underline{t}}(s) - U_{\underline{2}} \right\} | G_{\underline{2}}(s)$$
(5.17)

Przekształcając równanie (5.17) otrzymamo:

$$I_{\underline{1}}(s) = \frac{G_{\underline{r}\underline{1}}(s)G_{\underline{r}\underline{D}}(s)G_{\underline{1}}(s)G_{\underline{1}}(s)G_{\underline{1}}(s)}{1 + G_{\underline{r}\underline{1}}(s)G_{\underline{r}\underline{U}}(s)G_{\underline{1}}(s)G_{\underline{1}}(s)G_{\underline{1}}(s)G_{\underline{1}}(s)} U_{\underline{3}}(s) + \frac{\left[k_{\underline{U}}G_{\underline{r}\underline{U}}(s)G_{\underline{1}}(s)G_{\underline{$$

Z równania (5.18) wynika, że prąd żuku nie zależy od napięcia żuku jeśli spełnione jest równanie:

$$k_{u}G_{rn}(s)G_{t}(s) - 1 = 0$$
 (5.19)

Spełnienie tego równania jest zależne od struktury i nastaw regulatora napięcia G<sub>rB</sub>(s). Obliozenia wykazują, że równanie (5.19) spełnia jedynie regulator napięcia typu PD o transmitancji G<sub>rB</sub>(s) = K<sub>rB</sub>(1+sT<sub>wB</sub>) o nastawach: T<sub>wB</sub> = T<sub>o</sub> i K<sub>rB</sub> =  $\frac{1}{k_{\rm u}K_{\rm t}}$ .

Przy tak dobranych nastawach regulatora napięcia typu PD następuje skompensowanie nieliniowej charakterystyki odbiornika żukowego i w oparciu o wzór (5.18) strzymujemy transmitanoję układu zamkniętego w postaci liniowej:

- 64 -

$$(s) = \frac{I_{1}(s)}{U_{2}(s)} = \frac{G_{ri}(s)G_{rb}(s)G_{t}(s)G_{t}(s)}{1 + G_{ri}(s)G_{rb}(s)G_{t}(s)G_{t}(s)G_{t}(s)G_{t}(s)}$$
(5.20)

Tej transmitancji odpowiada schemat blokowy układu przedstawiony na rys. 61. W oparciu o ten schemat nastawy regulatora prądu G<sub>ri</sub>(s) można dobrać np. z kryterium Kesslera.



Rys. 61. Schemat blokowy układu z kompensacją nieliniowości charakterystyki odbiornika Łukowego

Transmitanoja otwartego układu regulacji ma postać:

$$G_{o}(s) = \frac{U_{I}(s)}{U_{n}(s)} = \frac{K_{s}K_{s}K_{s}n}{R(1+sT_{s})(1+sT_{r})}$$
(5.21)

W przypadku  $T_{2} < 4T_{r}$  należy dobrać regulator prądu o nastawach:

$$K_{ri} = \frac{RT_{2}}{2K_{t}K_{r}K_{rn}T_{f}}, \quad T_{oi} = T_{2}$$

W przypadku T, > 4T, nastawy regulatora można obliczyć następująco:

$$K_{ri} = \frac{RT_{i}}{2K_{t}K_{r}K_{r}T_{r}}, \qquad T_{oi} = 4T_{f}.$$

Oceniając analizowane w tym punkcie rozwiązanie układu regulacji należy zwrócić uwagę, że w rzeczywistym układzie przekształtnik tyrystorowy wnosi rzeczywiste zmienne opóźnienie, konieczne też jest zastosowanie filtru o pewnej stałej ozasowej w torze pomiaru napięcia. Diatego też w układzie rzeczywistym nie uzyskuje się pełnej kompensacji nieliniowości charakterystyki żuku, a określone powyżej nastawy regulatorów nie zapewniają jeszcze optymalnych warunków pracy w całym zakresie regulacji.

#### 5.4. Uklady inwariantne

Teoria układów inwariantnych zajmuje się zagadnieniem wyboru takiej struktury, która kompensowalaby wpływ zakłócenia na wielkość regulowaną a także możliwościa jej realizacji. Jest ona szczególnie przydatna w przypadkach kiedy zewnetrzne zakłócenia są przypadkowe i nie można ich matematyoznie opisać [33]. Wybierając strukturę inwariantnego układu regulaoji prądu luku jako zaklócenie kompensowane przyjęto napięcie luku U., które jest dostępne pomiarowo bezpośrednio na zaciskach urządzenia łukowego. Jest to rozwiązanie najbardziej uniwersalne, ponieważ wszystkie zakłócenia w procesie palenia się łuku, takie jak: zmiana długości łuku, efekty asrodynamiczne, zmiany ciśnienia, zmiany prędkości przepływu gazu osłaniającego i inne odzwierciedlają się natychmiast w zmianie wartości napięcia luku. Układ inwariantny względem wybranego sygnału zakłócającego nie posiada cech inwariantności względem innych sygnałów, a jeśli nie posiada pętli sprzężenia zwrotnego głównego to względem sygnału zadającego zachowuje się jak układ otwarty. Dlatego też dla poprawienia własności dynamicznych względem sygnale zadającego niezbędne jest wprowadzenie dodatkowego sprzężenia zwrotnego i odpowiednio dobranego regulatora, np. według kryterium Kesslers. W proponowanym inwariantnym układzie regulacji prądu łuku przedstawionym na rys. 62 zastosowano regulator prądu G\_(s) typu PID o transmitanoji (5.7).



Rys. 62. Schemat blokowy inwariantnego układu regulacji prądu luku

Sygnał zakłócający wprowadmono na wejście regulatora prądu poprzez ozłon kompensacyjny H(s).

- 67 -



- 69 -





Rys. 64. Porównanie przebiegów prądu łuku przy skokowych zmianach długości łuku

- 68 -

W oparciu o rys. 62 można napisać następujące równanie dla prądu łuku:

$$I_{\underline{1}}(s) = \frac{U_{\underline{n}}(s)G_{\underline{r}}(s)G_{\underline{1}}(s)G_{\underline{1}}(s) - [1-H(s)G_{\underline{r}}(s)G_{\underline{1}}(s)] U_{\underline{1}}(s)G_{\underline{1}}(s)}{1 + G_{\underline{r}}(s)G_{\underline{r}}(s)G_{\underline{1}}(s)G_{\underline{1}}(s)}$$
(5.22)

Wynika stąd, że aby prąd łuku był niezależny od sygnału zakłócającego, tzn. od napięcia łuku U<sub>2</sub>(s), musi być spełnione równanie:

$$1 - H(a)G_{r}(a)G_{t}(a) = 0$$
 (5.23)

Transmitancję ozłonu kompensującego H(s) określa więc zależność:

$$H(s) = \frac{1}{G_{r}(s)G_{t}(s)}$$
 (5.24)

Zakładając uproszczoną transmitancję G<sub>t</sub>(s) jako wyrażenie (5.4) i transmitancję regulatora prądu PID jako (5.7) otrzymano:

$$I(s) = \frac{1}{Z_{T} Z_{2}} \cdot \frac{sT_{0}(1 + sT_{0})}{s^{2}T_{0}T_{W} + sT_{0} + 1}.$$
 (5.25)

Otrzymana tranamitanoja H(s) spełnia warunek dostateczny Pietrowa kryterium fizycznej realizacji układu, jeśli równanie charakterystyczne tej tranamitanoji posiada pierwiastki rzeczywiste,tzn.  $\triangle \ge 0$ .

Dla tego równania  $\triangle = T_o(T_c - 4T_w)$ . Stąd wynika warunek konieczny na wartość stałej czasowej wyprzedzenia T\_regulatora prądu PID.

$$T_{W} \leqslant \frac{1}{4} T_{c}.$$
 (5.26)

Przyjmując  $T_w = \frac{1}{4} T_o$  otrzymujemy transmitancję H(a) w postaci:

$$H(s) = \frac{1}{K_{r}K_{t}} \cdot \frac{s^{2} + \frac{T_{o}}{T_{o}} + s \frac{L}{T_{c}}}{s^{2} + s \frac{L}{T_{o}} + \frac{L}{T_{c}^{2}}}$$
(5.27)

Sposób fizycznej realizacji błoku, którego transmitanoja określona jest wyrażeniem (5.27) pokazano na rys. 63.

Parametry bloku H(s) zależne są tylko od parametrów regulatora prądu i przekształtnika tyrystorowego. W układzie rzeczywistym parametry regulatora są zoptymalizowane i ustawione jeko stałe, natomiast rzeczywisty przekształtnik tyrystorowy nie jest elementem inercyjnym pierwszego rzędu jak przyjęto w powyższych rozważaniach, ale elementem ze zmiennym opóźnieniem. Należy więc spodziewać się w układzie rzeczywistym niepelnej kompensacji

zakłócenia. Będzie to więc układ quasiinwariantny. Aby pozwolić sobie na jakościową ocenę takiego układu regulacji oraz porównać go z poprzednio omówionymi przeprowadzono badania modelowe wykorzystując jo tego celu uniwersalny model analogowy zasilaczs opisany w pkt. 4,4, którego maszynowy schemat blokowy przedstawiono na rys. 51. Blok H(s) zamodelowano w operciu o rys. 63. Optymalne nastawy regulatora PID dobrano według zależności podanych w punkcie 5.2. Sposób modelowania, obliczenia i obszerne wyniki badań przedstawiono w pracy [63] . Na rys. 64 pokazano przebiegi pozwalające porównać dynamikę układu z regulatorem prądu PID i z regulatorem inwariaatnym PID + H przy tych samych skokowych zmianach długości łuku. Przeprowadzone badania wykazały, że układ z dodatkowym sprzężeniem kompensacyjnym, choć jest układem prawie inwariantnym, posiada wyraźnie lepsze właściwości w porównaniu do klasycznego układu regulacji z regulatorem PI lub FID. Wykazuje on mniejszą czułość na zakłócenia jakim są zmiany napięcia łuku, przeregulowania w układzie inwariantnym są zawsze mniejsze, a czas regulacji znacznie krótszy. Jest to szczególnie widoczne przy malych wartościach prądu łuku,

- 70 -

#### 5.5. Uklady adaptacyjne

Adaptacyjne układy regulacji obarakteryzują się samoczynną korekcją nastaw regulatorów w taki sposób, aby przy zmianie parametrów obiektu regulacji dynamika całego układu pozostawała bez zmian. W układach zasilania odbiorników łukowych parametry procesu sterowsnego ulegają zmianie w zależności od punktu pracy i występujących zakłóceń. Wyprowadzone w punkcie 5.2 zależności na optymalne nastawy regulatorów wskazują, że  $K_{\rm r} = f(\beta)$ i  $T_{\rm c} = f(\beta)$ , dlatego też w urządzeniach, w których wymagane są identyczne właściwości dynamiczne w całym zakresie zmian prądu i przy różnych zskłóceniach powinny być stosowane adaptacyjne układy regulacji. W praktyce mogą być stosowane dwa sposoby regulacji adaptacyjnej [1],[23], [24]:

- przełączalne regulatory prądu typu PI,

- układy adaptacyjne z modelami.

W układach z przełączalnym regulatorem prądu typu PI konieczny jest bezpośredni pomiar zmiennych parametrów procesu sterowanego, na podstawie których blok decyzji zmienia nastawę regulatora. W układach zasilania odbiorników żukowych pomiar niektórych parametrów procesu sterowanego jest niemożliwy. Poza tym skomplikowana i nieliniowa współmależność tych parametrów często uniemożliwia analityczne określenie funkcji, które musi spełniać blok decyzji. W sposób stosunkowo prosty zrealizować można taki układ, zakładając, ża przestrajakny jest tylko jaden parametr regulatora K<sub>r</sub> lub T<sub>o</sub>, uzależniając jego zmiany od jednej łatwo miarzalnej wielkości procesu sterowanego - prądu żuku I<sub>2</sub>. Uproszczony schemst blokowy takiego układu przedstawiono na rys. 65. Funkoję, którą powiniem spełniać blok decyzji:  $K_r = f(I_2)$  lub  $T_c = f(I_2)$  należy wyznaczyć w oparciu o znaną oharakterystykę napięciowo-prądową odbiornika łukowego. Wadą takiego sposobu regulacji jest fakt, że można go zoptymalizować tylko dla jednego ściśle określonego odbiornika łukowego i dla warunków pracy, przy których wyznaczono potrzebną charakterystykę napięciowo-prądową.







Rys. 66. Schemat sdaptacyjnego układu regulacji z modelem wzorcowym

W przypadkach, kiedy parametry procesu sterowanego ulegają zmisnom w szerokich granicach, a wymagania odnośnie jakości regulacji i własności dynamicznych są wysokie mogą być stosowane układy adsptecyjne z modelami:

- bezpośrednie z wykorzystaniem modelu wzorcowego, który dostaroza informacji potrzebnych w układzie sterowania (rys. 66),
- pośrednie, w których wykorzystuje się informacje z układu identyfikacji obiektu i modelu nadążającego o przestrajalnych parametrach (rys. 67).

- 71 -



Rys. 67. Schemat adaptacyjnego układu regulacji z modelem nadążającym

W układach zasilania odbiorników łukowych, szczególnie istotne są takie zalety tych struktur, jak:

- szybkość działania w wyniku wykorzystania szerokiej informacji w postaci modelu obiektu regulacji,
- prosta realizacja algorytmu adaptacji,
- możliwość identyfikacji obiektu i estymacji trudno mierzalnych wielkości.

## 5.5.1. Bezpośredni układ adaptacyjny z modelem wzorcowym

Dla wielowymiarowego układu adaptacyjnego z modelem można napisać następujące równania stanu: [23]

dla modelu wzorcowego

Tm = C xm

(5.28)

(5.29)

address of the second

dla procesu sterowanego

$$\frac{\dot{x}_{a}}{\dot{x}_{a}} = \underline{A_{a}}(t) \underline{x_{a}} + \underline{B_{a}}(t) \underline{U}$$
$$\underline{y_{a}} = \underline{C} \underline{x_{a}}$$

gdzie:

U

C

- x\_m, x\_s wektory stanu modelu i procesu sterowanego o wymisrach n x 1,
  - wektor wymuszeń,
- $\frac{y_m}{x}, \frac{y_s}{x}$  wektory odpowiedzi modelu i procesu sterowanego o wymiarach q x 1,
- $\underline{A}_{\underline{m}}, \underline{B}_{\underline{m}} \text{macierze procesu sterowanego o elementach zmiennych w ozasie i wymiarach n x n i n x p,$
- $\frac{A_{s}(t)}{S}, \frac{B_{s}(t)}{S} = \frac{1}{2} \frac{1$ 
  - macierz wyjścia o wymiarze q x n.

Wektor uchybu uogólnionego określony jest jako:

$$\underline{\mathbf{o}}_{\underline{\mathbf{n}}} = \underline{\mathbf{y}}_{\underline{\mathbf{m}}} - \underline{\mathbf{y}}_{\underline{\mathbf{n}}}.$$
 (5.30)

Pomleważ otlem edaptacji jest minimalizacja uchybu uogólnionego, więc wskuźnik jakuści można zdefiniować jako:

$$\min \mathbf{I} = \min_{\mathbf{A}_{\mathbf{B}} \mathbf{B}_{\mathbf{S}}} \left\| \underbrace{\mathbf{e}_{\mathbf{A}}}_{\mathbf{B}} \right\|$$
(5.31)

Jeżeli wektor przyrostu uchybu ucgólnionego zdefiniujemy jako

$$e_{\underline{a}}(t) = e_{\underline{a}}(t + \Delta t) - e_{\underline{a}}(t), \qquad (5.32)$$

edz el At jest odpowiednio małym przedziałem ozasu, w którym każda zmiana Ac.(t) spowodowana jest przestrojeniem parametrów w układzie

Wówszas jak: kryresium spełniające równanie (5.31) przyjmuje się wyrażenie:

 $\Delta \underline{\mathbf{e}}_{\underline{\mathbf{a}}}^{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) \underline{\mathbf{e}}_{\underline{\mathbf{a}}}(\mathbf{t}) \leq \mathbf{0}$  (5.33)

Zakładając, że wyjście procesu sterowanego i modelu wzorcowego jest jednowymiarowe oraz wybierając zmienne stanu  $x_m$  i  $x_s$ , tak aby macierz wyjściowa <u>C</u> była znormalizowana obliczony algorytm spełniający zależność (5.33) ma postać [23]:

gdzie:

$$a_{sij}(t)$$
,  $b_{skl}(t)$  - elementy macierzy  $\underline{A_s}$ ,  $\underline{B_s}$ ,  
 $\lambda_{ij}$ ,  $\lambda_{kl}$  - współczynniki wzmocnienia w torze adaptacji.

Przyjmując do dalszych rozważań schemat blokowy układu zasilania odbiorników łukowych z regulatorem prądu PI taki jak na rys. 58, pomijając dla uproszozenia opóźnienie wnoszone przez przeksztatlnik tyrystorowy i wybierając odpowiednic zmienne stanu, tak aby były dostępne w układzie rzeczywistym można uzyskać schemat zmiennych stanu przedstawiony na rys. 68.

- 74 -



Rys. 68. Sohemat zmiennych stanu obwodu regulacji prądu łuku

Stosując algorytm adaptacji (5.34) dla schematu przedstawionego na rys.68 otrzymujemy równania przestrajania nastaw regulatora prądu Łuku

$$\frac{d\mathbf{T}_{o}}{d\mathbf{t}} = \hat{\boldsymbol{\lambda}}_{1} \ \mathbf{e}_{a}(\mathbf{t})\mathbf{x}_{s1}(\mathbf{t})$$

$$(5.35)$$

$$\frac{dK_{x}}{d\mathbf{t}} = -\hat{\boldsymbol{\lambda}}_{2} \ \mathbf{e}_{a}(\mathbf{t})\mathbf{x}_{s2}(\mathbf{t})$$

$$\frac{dK_{x}}{d\mathbf{t}} = \hat{\boldsymbol{\lambda}}_{3} \ \mathbf{e}_{a}(\mathbf{t})\mathbf{u}_{g}(\mathbf{t})$$

$$\frac{dK_{x}}{d\mathbf{t}} = \hat{\boldsymbol{\lambda}}_{3} \ \mathbf{e}_{a}(\mathbf{t})\mathbf{u}_{g}(\mathbf{t})$$

$$(5.36)$$

Zastosowanie algorytmów (5,35) powodowałoby pracę obwodu adaptacji przy zmianach napięcia łuku nawet przy optymalnych nastawach regulatorów. Dlatego też w układzie rzeczywistym najlepiej będzie zastosować algorytmy adaptacji (5,36) lub w przypadku zastosowania algorytmów (5.35) wykorzystać zmienne stanu z modelu. Na rys. 69 przedstawiono schemat blokowy układu regulacji prądu łuku z zastosowaniem algorytmów adaptacji (5.36). Jako model wzorcowy może być wykorzystany układ przedstawiony na rys. 58 lub 68, przy ozym nastawy regulatora prądu w modelu powinny być dobrane optymalnie (pkt. 5.2) dla określonego  $\beta$ .



Rys. 69. Schemat blokowy bezpośredniego adaptacyjnego układu regulacji pradu łuku

V celu określenia właściwości dynamicznych omówionego układu regulacji zastosowano metodę symulacji na maszynie analogowej. Schemat połączeń symulatora analogowego modelującego analizowany układ adaptacyjny oraz wyniki pomiarów w stanach dynamicznych zamieszczono w pracy [63].

#### 5.5.2. Pośredni układ adaptacyjny z modelem nadążającym

V układzie tym do identyfikacji wykorzystywany jest model nadążający, tzw. model estymowany, który spełnia równanie różniczkowe podobne do równania procesu identyfikowanego, ale który jest realizowany bez stosowania idealnych osżonów różniczkujących i którego współczynniki są parametrami estymowanymi. Te parametry są następnie wykorzystywane do bieżącej kontroli nastaw adaptacyjnego regulatora prądu. Syntezę takiego układu regulacji można przeprowadzić w oparciu o metodę równania błędu ucgólnionego[24]. Dla układu jednowymiarowego równanie modelu estymowanego jest następujące:

$$\sum_{n=0}^{N} a_{n} s^{n} \left[ F_{i}(s)Y \right] = F_{i}(s)V + \sum_{m=0}^{M} b_{m} s^{m} \left[ F_{i}(s)V \right]$$
(5.37)

lub w postaci wektorowej:

$$\underline{\mathbf{C}}^{\mathrm{T}_{\mathbf{a}}} = \mathbf{v}, \qquad (5.38)$$

gdzie:

a<sub>n</sub>, b<sub>m</sub>

- nieznane współczynniki zmieniające się w ozasie,
- $Y = y_0 + Z_2$ ,  $V = u_0 + Z_1$ sygnely odpowiedzi i wymuszenia zakłócane odpowiednio przez  $Z_2$  i  $Z_1$  (w ogólnym przypadku stochastycznie),
  - transmitanoje filtrów inwariantnych pozwalające otrzymać pochodne rzędu 1 ≤ i ≤ n na wyjściu filtra (wprowadzone na wejście i wyjście procesu),

$$\underline{\mathbf{C}}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{\underline{i}}(s) \mathbf{Y}_{0} \dots s^{\underline{i}} \mathbf{F}_{\underline{i}}(s) \mathbf{Y}_{0}, s^{\underline{n}} \mathbf{F}_{\underline{i}}(s) \mathbf{Y}_{0}, s^{\underline{i}} \mathbf{F}_{\underline{i}}(s) \mathbf{V} \dots s^{\underline{i}} \mathbf{F}_{\underline{i}}(s) \mathbf{V} \end{bmatrix}$$

$$w = F_{+}(s) V$$

 $F_i(s) = \frac{L_i(s)}{H_i(s)}$ 

a - wektor parametrów estymowanych.

Funkcję blędu uogólnionego zdefiniowano jako

$$\mathbf{e}_{\mathbf{a}\mathbf{i}} = \underline{\mathbf{C}}_{\mathbf{i}}^{\mathbf{T}} \underline{\mathbf{a}} - \mathbf{w}_{\mathbf{i}}.$$
 (5.39)

Schemat blokowy rozważanego układu regulacji prądu łuku przedstawiono na rys. 58. Zachowanie niezmienności dynamiki tego układu względem zmieniającej się wartości współozynnika & wymaga w ogólnym przypadku przestrojenia wzmocnienia K<sub>r</sub> i stałej czasowej T<sub>o</sub> regulatora prądu typu PI. Proces rzeczywisty opisany jest równaniem:

$$\frac{di_{1}}{dt} \cdot \frac{T_{2}}{1+\beta} (1+\beta) + i_{1}R(1+\beta) = u_{d}$$
 (5.40)

które można zapisać jako:

R

$$\frac{di_{\lambda}}{dt}a_{o}a_{1} + i_{\lambda}a_{o} = u_{d}$$
 (5.41)

przyjmując:

$$a_0 = R(1+\beta); \quad a_1 = \frac{T_2}{1+\beta}.$$

Ponieważ równanie opisujące proces rzeczywisty jest pierwszego rzędu przyjęto transmitancje filtrów w postaci  $F_i(s) = \frac{1}{1+s}$  i wówczas równanie modelu estymowanego jest następujące:

 $\underline{\mathbf{C}}^{\mathrm{T}}\underline{\mathbf{a}} = \mathbf{w}$ 

gdzie:

$$\underline{C}^{T} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+s} & \mathbf{i}_{2}, & \frac{\mathbf{a}}{1+s} & \mathbf{i}_{2} \end{bmatrix}$$
(5.42)  
$$\underline{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{0}, & \mathbf{a}_{0} \mathbf{a}_{1} \end{bmatrix}$$
(5.42)  
$$\mathbf{w} = \frac{1}{1+s} & \mathbf{u}_{d}.$$

Na podstawie wzoru (5.39) i schematu blokowego równanie błędu uogólnionego można obliczyć jako:

$$\mathbf{e}_{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{u}_{\mathbf{d}}}{\mathbf{R}(1+\beta) \left(1 + \mathbf{s} \ \frac{\mathbf{T}_{\mathbf{z}}}{1+\beta}\right)} = \frac{\mathbf{a}_{\mathbf{o}} + \mathbf{s} \mathbf{a}_{\mathbf{o}} \mathbf{a}_{1}}{1+\mathbf{s}} - \frac{\mathbf{u}_{\mathbf{d}}}{1+\mathbf{s}}.$$
 (5.43)

Algorytm adaptaoji modelu estymowanego można znaleźć metodą gradientu w warunkach minimalizacji wyrażenia  $\int_{0}^{T} e_{B}^{2} dt$  [24].

Otrzymano stąd:

$$\frac{da}{dt} = \lambda_{2e_{a}} \frac{\partial e_{a}}{\partial a}$$
(5.44)

Ostatecznie algorytmy nastawy a<sub>o</sub> i a<sub>1</sub> w modelu estymowanym przyjmują poatać:

$$a_0 = \frac{1}{s} \lambda_1 \mathbf{1}_2 \mathbf{e}_1 \left( \frac{1}{1+s} + \frac{a_1 s}{1+s} \right)$$
 (5.45)

 $\mathbf{a}_1 = \frac{1}{s} \lambda_2 \mathbf{i}_2 \mathbf{e}_a(\frac{\mathbf{a}}{1+s}),$ 

gdzie:  $\lambda_1, \lambda_2,$  współczynniki wzmoonienia w torze adaptacji. W wyniku adaptacji otrzymujemy:

jeśli  $e_a \rightarrow 0$  to  $a_0 \rightarrow R(1+\beta)$  i  $a_1 \rightarrow \frac{T_1}{1+\beta}$ .

Estymowane wartości a<sub>o</sub> i a<sub>1</sub> wykorzystywane są następnie do realizacji adaptacyjnego regulatora PI prądu łuku optymalizowanego według przyjętego kryterium. Przykładowo jeśli regulator optymalizowany jest z kryterium modulu Kesslera (zależności 5.14) parametry regulatora określone są wyraženiami:

$$K_{r} = \frac{R_{o} + 1}{2 R_{t} K_{r} T_{0}}; \quad T_{o} = R_{1}$$
 (5.46)

Schemat blokowy pośredniego układu adaptacyjnego. is modelem estymowanym zbudowany w oparciu o wmory (5.43), (5.45), (5.46) preedstawiono na rys. 70.



Luger

.

Analiza metematyczna właściwości eksplostacyjno-ruchowych takich układów, a szczególnie ich współpracy z odbiornikiem jest jednak bardzo złożona. Uzyskane tą drogą zależności ze względu na swoją skomplikowaną postać nie są przydatne przy projektowaniu [61]. Bardzo dobre efekty daje tutaj zastosowanie metody symulacji analogowej. Umożliwie to poznanie charakterystyk statycznych i dynamicznych oraz bedanie wpływu różnych zakłóceń na te charakterystyki. Przedstawiony w pracy uniwersalny model analogowy układów zasilania z tyrystorowymi sterownikami napięcia po pierwotnej stronie transformatora pozwala jeszcze na stupie projektowania wyznaczyć przebiegi prądów i napięć w różnych stanach pracy.

Badapia takie sa podstawa do takiego doboru parametru układu i jego pod-Lespolów, aby zapewnić żądane właściwości i charakterystyki podczas realizac ji calego procesu technologicznego. Prezentowany model może współpracować z modelem układu regulacji, jest więc przydatny również do prawidłowego wyboru struktury układu regulacji prądu łuku i optymalizacji nastaw regulatorów. Zasilacze tyrystorowe muszą współpracować z elektronicznymi regulatorami pradu, których podstawowym zadaniem będzie odpowiednie ukaztałtowanie charakterystyki zewnętrznej, zapewnienie dużej dokładności regulacji prądu oraz jak najlepszych przebiegów prądu w stanach przejściowyoh zarówno przy zmianach wielkości wymuszającej jak i przy zakłóneniach od strony odbiornika. W pracy przedstawiono wszystkie możliwe do zestosowania struktury układów regulacji od najprostszych z regulatorem prądu typu PI do najbardziej złożonych z regulatorami adaptacyjnymi i z modelami. Przeprowadzona w rozdziale piątym synteza tych układów umożliwia optymalny dobór nastaw regulatora. Układy z jednym regulatorem prądu typu PI lub FID pozwalają na optymalizację ich nastaw tylko dla jednego punktu pracy. Każda zmiana punktu pracy powoduje zmiany parametrów obiektu regulacji i dlatego w celu zapewnienia tych samych optymalnych przebiegów należałoby zmienić odpowiednio nastawę regulatora. Przeprowadzone badania w ukłądzie laboratory.inym 63 wykazały, że nastawy regulatorów można z wystarczająou dokładnością określić z zależności wyprowadzonych w punkcie 5.2, w oparciu o uproszczony model matematyczny calego ukladu. Stwierdzono również, że zastosowanie bardziej złożonego regulatora typu PID poprawia właściwości układu jedynie w przypadku zakłóceń od strony łuku. Zwiększenie zakresu pracy w warunkach optymalnych można uzyskać przez zastosowanie dodatkowego sprzężenia napięciowego. Oczywiście pełne skompensowanie nieliniowej oharakterystyki luku w układzie rzeczywistym jest niemożliwe ze zglą du na konieczność zastosowania filtru w torze pomiaru napięcia oraz ze względu na rzeczywiste opóźnienie wnoszone przez przeksztaltnik tyrystorowy. Znacznie iepsze właściwości postade inwariantny układ regulacji. Pozwala ona na stabilną pracę przy mniejszych wartościach prądu, wyka uje mala ozulość na zaklógenia od strony luku. Przeregulowanie pod wpływem 26klócenia od strony luku jest zawsze mniejsze, a czas przeregulowanie jest kilkakrotnie mniejszy niż w innych układach regulacji. Najlepsze właściwości dynamiczne w szerokim zakresie zmian prądu Łuku zapewnieją układy

- 81 -

1245-

months Beneticine Contrological 2. (1) surround the state of the state of the

#### 6. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Projektowanie układów zasilania odbiorników łukowych wiąże się z analitycznym rozważeniem następujących zagadnień: wybór koncepcji obwodów silowych układu zasilania, określenie parametrów tego układu, obliczenie jego charakterystyk statycznych i dynamicznych, dobór elementów i podzespołów, wybór odpowiedniej struktury układu regulacji i optymalizacja nastaw regulatorów. Łuk elektryczny jest odbiornikiem o charakterystykach silnie nieliniowych i zależnych od wielu czynników, często stochastycznie zmieniających się w trakcie trwania procesu technologicznego, Dlatego też jednoznaczne wyznaczenie ustalonego punktu pracy układu zasilacz - odbiornik łukowy jest praktycznie niemożliwe zarówno na drodze analitycznej jak i pomiarowej. Podstawą wyjściową przy wyborze koncepcji układu zasilania i obliczaniu jego parametrów powinno być więc wyznaczenie technologicznego obszaru pracy urządzenia łukowego. Technologiczny obszar pracy określony jest funkojami ograniczeń wynikającymi z minimalnej i maksymalnej mocy urządzenia oraz granicznych charakterystyk napięciowo-prądowych w taki sposób, aby zapewnić pełną realizację prowadzonego procesu technologicznego przy minimalnych kosztach eksploatacyjnych. W rozdziale trzecim niniejszej pracy przedstawiono stosowane i możliwe do zastosowania nowoczesne uklady zasilania spełniejąco wymagania jakie stawia odbiornik łukowy.Ostateozna decyzje odnośnie koncepcji układu może być podjęta po analizie wpływu parametrów zasilacza na jakość wyładowania łukowego przy uwzględnieniu wymagań technologicznych oraz warunków z pkt. 3.3. Należy przy tym brać pod uwagę ograniczenia wynikające z konstrukcji i parametrów urządzenia łukowego, możliwości realizacji układu, warunków zasilania, kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Z rozważań tych można wyciągnąć wniosek. że układy zasilania z tyrystorowymi sterownikami napięcia przemiennego po pierwotnej stronie transformatora głównego najlepiej spełniają wszystkie wymagania i mogą być stosowane do zasilania szerokiej klasy chiektów średniej i dužej mocy.

Na szozególną uwagę zasługują tutaj rozwiązania oparte na sterownikach z dławikiem i transformatorem regulacyjnym oraz sterowniki tyrystorowo-magnetyczne. Takie rozwiązania nie są dotychozas stosowane, a zdaniem autora mogłyby one znaleźć szerokie zastosowanie w przemyśle. Przeprowadzone badania laboratoryjne i pomiary w układzie modelowym o mocy 55 kW w pełni potwierdzają ten wniosek. Wyniki tych badań zamieszczono w pracach [63], [64]. adaptacyjne. Omówione w punkcie 5.5 układy z modelami zapewniają stałe dopasowanie nastaw regulatora prądu do zmiennych parametrów obiektu regulacji, tak aby w każdym punkcie pracy uzyskać optymalne przebiegi.Wadą tych układów jest ich złożona budowa. Przeprowadzone badania wykazały jednak, że układy te zapewniają dobre właściwości nawet jeśli przestrajalny jest tylko jeden parametr, w szczególności wzmocnienie regulatora. Pozwala to nieco uprościć budowę takiego układu.

Podsumowując rozważania dotyczące układów regulacji można stwierdzić że:

- W przypadkach gdy urządzenie z odbiornikiem Łukowym pracuje w niewielkim zakresie zmian prądu lub gdy wymagania odnośnie dynamiki w stanach przejściowych nie są zbyt wysokie wystarczy zastosować układ regulacji z jednym regulatorem prądu typu PI lub PID,
- optymalną pracę urmądzenia w szerokim zakresie zmian prądu można uzyskać jedynie przez zastosowanie złożonych struktur układów regulacji: układów inwariantnych jeśli występują duże zakłócenia od strony łuku lub układów adaptacyjnych jeśli cykl pracy obarakteryzuje się dużą częstością stanów przejściowych będących wynikiem zmiany wielkości wymuszającej. Układ adaptacyjny pośredni z identyfikacją zmiennych parametrów obiektu będzie szczególnie przydatny do zastosowania w urządzeniach, gdzie ten sam zasilacz wykorzystywany jest do zasilania różnych odbiorników łukowych.

Zamieszczone w pracy rozważania są pierwszym krokiem w kierunku optymalizacji całego procesu technologicznego i wykorzystania do tego celu komputera. Zasilanie odbiorników łukowych z układów, które pozwalają sterować w szerokich granicach parametrami dostarczanej energii elektrycznej z dużą dokładnością stwarza nowe możliwości dla:

- podniesienia jakości wyrobów poprzez ścisłą realizację tylko takich punktów pracy, które wynikają z reżimu procesu technologicznego bez względu na zakłócenia,
- minimalizacji kosztów wyrobu poprzez minimalizację kosztów zużycia energii oraz wydłużenie czasu eksploatacji pomiędzy remontami.

is to be a provided when a second sec

- [2] EARDERSONNEL 0.1 Insponsable without adaptions to modelum. Assistance Electrostanonial m. 1, 1974.
- and a second of the second of the second of a second of the second of th
- [15] TALLMINGOVERT N., NEVAS H., VOJOLAS A., Grandsmone alesseentel pres-

#### LITERATURA

- [1] ALEKSANDROWSKIJ N.H.: Adaptiwnyje sistemy awtomaticzeskowo uprawienija złożnymi processami. Energia, Moskwa 1973.
- [2] BARDAHL N.: Stromversorgung für Lichtbogenanlagen. Simens Zeitachrift nr 41/1967.
- [3] BELINSKIJ S.M., KAGANSKIJ A.M., TEMKIN A.W.: Oborudowanie dla swarki nepławjaszczimsja elektrodam w srede inertnych gazów. Energia, Leningrad 1975.
- [4] BRATKOWA O.N.: Istoczniki pitania swarocznoj dugi. "Wysszaja szkoła" Moskwa 1982.
- BRUFMAN S.S., TROFIMOW N.A.: Tiristorny je pieriekluozatieli pieriemiennowo toka. Energia. Moskwa 1970.
- [6] CELIŃSKI Z.: Plazma, PWN, Warszawa 1980.
- [7] CHOLEWICKI T.: Elektrotechnika teoretyczna. WNT, Varezawa 1973.
- [8] CYPKIN J.Z., POPKOW J.S.: Tieoria nieliniejszych sistem. Nauka, Moskwa 1972.
- [9] DMOWSKI A.: Tyrystorowe regulatory napięć przemienowch. Zeszyty Naukowe Pol. Warszawskiej. Elektryka z. 52, 1979.
- [10] DOBAJ E.: Analiza elektrycznego obwodu spawalniczego przy tyrystorowym sterowaniu procesem spawania w atmosferze dwutlenku węgla. Praca doktorska. Gliwice 1982.
- [11] EROCHIN A.A.: Siłowoje wozdiejstwije dugi na rozpławliennyj mietałł. Awtomaticzeskaja swarka pr 7/1979.
- 12 ESIBJAN E.M.: Plazmienno dugowaja apparatura, Tiechnika, Kijew 1973.
- [13] ESIBJAN E.M.: Plazma arc equipment. Mir, Moskwa 1973.
- [14] FROHR F., ORTENBÜRGER F.: Wprowadzenie do elektronicznej techniki regulacji. WNT, Warszawa 1977.
- [15] GELMAN M.V., ŁOCHOW S.P.: Tiristornyje reguliatory pieriemiennowo napriazienija. Energia, Moskwa 1975.
- [16] GÓRECKI H.: Analiza i synteza układów regulacji z opóźnieniem. WNT, Warszawa 1971.
- [17] GUTTERMAN K.D. i inni: Awtomaticzeskoje regulirowanije elektriczeskich pieczej. MEI, Moskwa 1972.
- [18] GUTTERMAN K.D. i inni: Istoozniki pitanija dla plamiennych technologiozeskich ustanowok. Nauka, Moskwa 1973.
- [19] GIEBKUNOW A.: Issliedowanije awtomaticzieskoj sistiemy riegulirowanija toka tiristornych agriegatow dla pitanija wakumnodugowych pieozej. Elektrotiechn. promyszliennost Prieobrazowat. tiechn. pr 8, 1980.
- [20] IWANOW G.P., POŻARSKIJ Z.E., SERDIUK N.A.: Tiristornyje riegulatory toka swarocznych transformatorow. Awtomaticzeskaja Swarka, nr 11/73.
- [21] JAYSINGHANI N.: Geregelte Gleichstrom versorgung für Plasmantersuohungen, Braun Boweri Mitt. nr 3/1974.
- [22] KĄCKI E., WOŻNIAKOWSKI M.: Modelowanie analogowe i cyfrowe oraz cyfrowa symulacja maszyn analogowych. WNT, Warszawa 1979.

- [23] KAZIMIERKOWSKI M.: Bezpośredni układ adaptacyjny z modelem. Archiwum Elektrotechniki z. 1, 1974.
- [24] KAZIMIERKOVSKI M.: Pośredni układ adaptacyjny z modelem. Archiwum Elektrotechniki z. 2, 1974.
- [25] KAZIMIERKOWSKI M., NOWAK M., WÓJCIAK A.: Urządzenia elektroniki przemysłowej. WKŁ, Warszawa 1982.
- [26] KACZOREK T.: Teoria układów regulacji automatycznej. WNT, Warszawa, 1977.
- [27] KOBZEW A.W., OBRUSNIK W.P.: Tieorija processow diskrietno uprawlisjemych ferromagnitnych ustrojatw podmagnicziwajemych postajennych tokom. Elektromechanika nr 5/72.
- [28] KOCHENBURGER R.J.: Modelowanie układów dynamicznych przy użyciu maszyn matematycznych. WNT, Warszawa 1975.
- [29] KODOMCIEW B.B.: Kollejektiwnyje jewlenija w płazmie. Naukwa, Moskwa 1976.
- [30] KRÓLIKOWSKI Cz.: Analiza statycznej pracy palnika plazmowo-łukowego prądu stałego. Zesz. Nauk. Pol. Pozn. nr 22/67.
- [31] KRÓLIKOWSKI Cz.: Jedna z metod analitycznego ujmowania obarakterystyk napięciowo-prądowych żukowych palników plazmowych prądu stażego Rozprawy Elektrotechniczne z. 2/1972.
- [32] KRÓLIKOWSKI Cz. i inni: Urządzenia zasilające i zapłonowe do pieców plazmowych. Wyd. Uniwers. Warszawski. Chemia plazmy, 1978.
- 33 KUCHTIENKO A.: Probliema inwariantnosti w awtomatikie. Kijów 1963.
- [34] KUCZEWSKI Z., RODACKI T., GIERLOTKA K., GRZESIK B.: Urządzenia elektryczne do zasilania i starowania plazmotronów. Opracowanie nr -1\$5/RE-3/81, Gliwice 1981.
- [35] KUCZEWSKI Z., RODACKI T.: Układ tyrystorowo-magnetycznego sterowania napięcia. Patent PRL 78019.
- [36] KUCZEWSKI Z., RODACKI T., GIERLOTKA K.: Urządzenia elektryczne do zasilania i sterowania plazmotronów. Opracowanie nr NB-62/RE-3/82. Gliwice 1982.
- [37] NUCZEVSKI Z., RODACKI T.: Układ zasilania łuku elektrycznego prądu stałego. Zgłoszenie pażentowe nr P.222135.
- 38 LUCIŃSKI J.: Układy tyrystorowe. WNT. Warszawa 1972.
- [39] LESKOW G.U.: Elektriczeskaja swarocznaja duga Ma Sz GIZ, Moskwa 1970.
- [40] LÖBLEIN F., STRÖLE D.: Dynamik der Lichtbogenstromregalung. Siemens Zeitschrift nr 5/1969.
- [41] LEUSZIN A.V.: Duga gorenia. Metalurgia, Moskwa 1973.
- [42] LASTOWIECKI J.: Bezinercyjny wzmacniacz magnetyczny sterowany fazowo oraz jego zastożowanie w stałopędnych układach napędowych. Praca doktorska, Politechnika Warszawska 1972.
- [43] MARKOW N.A.: Elektriczeskije cepi i režimy dugowych elektropiecznych ustanowow, Energia, Moskwa 1975.
- [44] MISKHIN E., BRAUN L.: Adaptacyjne układy sterowania automatycznego. WNT. Warszawa 1965.
- [45] NIEVIEDZIAŁ R.: O pewn uwarunkowaniach w zasilaniu łukowych palników plazmowych prąde zemiennym. Zesz. Nauk. Pol. Pozn. s. Elektryka nr 20, 1979.
- [46] NIEWIEDZIAŁ R., POLOCZEK W.: Układy zasilania Łukowych palników plasmowych w energię elektryczną. Zesz. Nauk. Pol. Pozn. Elektryka nr 20, 1979.
- [47] OBRUŚNIK V.P.: Impulsno-uprawlajemy je ferromagnitny je ustrojstwa dlja prieobrazowatielnoj tischniki, Elektriczestwo nr 5/1975.

- [48] POŹNIAK T.: Sterowniki prądu przemiennego: tyrystomowo-magnetyczne i tyrystorowe. Przegląd Elektrotechniczny nr 1/76.
- [49] PELLY B.R.: Tyrystorowe przekształtniki i cyklokonwertory. WWT, Warsiewa 1976.
- [50] POLOCZEK W.: Określenie elektrycznych charakterysżyk eksploatacyjnych palnika plazmowego. Sprawozdanie nr N-3162 IMŻ, Gliwice
- [51] POLOCZEK V., ROBACKI T.: Analiza porównawoza układów przetworników zasilania łuku elektrycznego prądu stałego o mocy 1 MW. Ekspertyza nr 325/79. Zespół rzeczoznawoów SITPH.
- [52] REINHARD W., GRÜNBERG D.: "Die Stromversogung des ersten Gleichstrom--Lichtbogenofens. Elektrowarme nr 4/83.
- [53] ROZENBLAT M.A.: Magnitnyje elementy awtomatiki i wyczislitelnoj techniki. Nauka, Moskwa 1974.
- [54] RODACKI T., DUDA A.: Tyrystorowo-magnetyozuy regulator napięcia. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., s. Elektryka z. 75, 1981.
- [55] RODACKI T., GIERLOTKA K.: Układy regulacji tyrystorowych przetworników do zasilania żuku elektrycznego prądu stałego. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., a. Elektryka z. 75, 1981.
- [56] RODACKI T., DUDA A.: Statyozna i dynamiozna stabilność łuku elektrycznego. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Elektryka z. 75, 1981.
- [57] RODACKI T., GIERLOTKA K.: Model analogowy i badania tyrystorowego układu zasilania łuku elektrycznego. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s.Elektryka nr 84, 1983.
- [58] RODACKI T., PIECHA E.: Nowoozeane układy zasilania urządzeń łukowych i plazmowych. Zeczyty Naukowe Pol. Śl., Elektryka nr 84, 1983.
- [59] RODACKI T., PIECHA E.: Tyrystorowo-magnetyczny układ zasilania urządzeń łukowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Elektryka nr 84, 1983.
- [60] RODACKI T., i inni: Tyrystorowy układ zasilania łuku slektrycznego. Zgłoszenie patentowe nr P. 225777.
- [61] RODACKI T.: Tyrystorowo-magnetyczne regulatory napięcia i ich zestosowanie. Gliwice, marzec 1983. Opracowanie niepublikowane.
- [62] RODACKI T., GIERLOTKA K., GRZESIK B.: Badania symulacyjne na modelu analogowym i układ laboratoryjny tyrystorowego układu zasilania odbiornika łukowego. Materiały VI Krajowej Konferencji Naukowo-Technioznej. "Badania i zastosowanie niskotemperaturowe plazmy w przemyśle".
- [63] RODACKI T.: Układy regulacji przeznaczone do tyrystorowych zasilaczy odbiorników łukowych. Gliwice sierpień 1983. Oprecowanie niepublikowane.
- [64] RODACKI T.: Zastosowanie regulatorów tyrystorowo-magnetycznych w układach zasilania odbiorników Łukowych. Gliwice marzec 1983. Opracowsnie niepublikowane.
- [65] SALAGAN T., BOARNA C.A.: A survey of research on the dynamic behaviour of welding transformers Weld. World nr 3, 1970.
- [66] SISOSJAN G.A.: Elektriozeskaja duga w elektriozeskoj peczi. Metalurgia 1974.
- [67] SIESZCZUK B.M.: Ustrojstwo dija awtomaticzeskowo uprawlienija istocznikami sworocznowotoka. Elektrotiechnika nr 9/82.
- [68] SWIENCZANSKIJ A.D. i inni: Problemy elektrosnablenija moszoznych dogowych stalepławilnych pieczej i trebowanie k istocznikam pitanija. Wsjechnirnyj Elektrotechniczeskij Kongress Bohład 82, Sekoja 4b, Moskwa 1977.
- [69] SWIENCZANSKIJ A.D., SMIELIANSKIJ M.J.: Elektriczeskije promyszlennyje pieczi. Energia, Moskwa 1970.
- [70] TUNIA H., ŁASTOWIECKI J.: Elektryczne elementy automatyki. PWN, Warszawa 1976.

- [71] TUNIA H., WINIARSKI B.: Układy elektroniczne w automatyce napędowej. WNT, Warszawa 1975.
- [72] TUNIA H., WINIARSKI B.: Podstawy energoelektroniki. WNT, Warszawa. 1975.
- [73] TAJEW I.S.: Elektriczeskije apparaty. Energia, Moskwa 1977.
- [74] TRONCKIJ B.A.: Wlijanie parametrow elektriczeskoj cepi na powtornoje wzbudienie dugi pieriemiesznowo toka. Awtomaticzeskaja swarka nr 11/ 1975.
- [75] TOMCZYK L.: Wpływ wyższych harmonicznych prądu i napięcia na wskaźniki techniczno-ekonomiczne pieców łukowych. Praca doktorska IMŻ, Gliwice 1977.
- [76] WOŁKOW I.W.: Istoczniki elektropitanija so specjalnymi charaktieristikami. Naukowa Dumka, Kijów 1979.
- [77] ZARUDI M.E.: Kritierii suscestwowanija i ustojoiwosti stacjonarnych rezimow w induktiwoj cepi pieriemiennogo toka s dugoj.Eliektricestwo nr 4, 1977.
- [78] ZAKS M.I.: Swaroczny je wypriamitieli. Energoatomizdat, Leningrad 1983.

ANALIZA I SYNTEZA TYRYSTOROWYCH UKŁADÓW ZASILANIA I REGULACJI PRWNYCH ODBIORNIKÓW ŁUKOWYCH

# Streszozenie

Prace dotyczy analizy i optymalizacji tyrystorowych układów zasilania luku elektryoznego, odbiornika o silnie nieliniowych, niestacjonarnych charakterystykach przy uwzglednieniu wymagań narzuconych przez proces technologiczny. W pracy vozpatrzono najważniejsze związane z tym tematem zagadnienia: określenie wymagań jakie odbiornik łukowy stawia układowi zasilania, wybór najkorzystniejszego układu połączeń tyrystorowego układu zasilania, analityczne określenie właściwości i charakterystyk takiego układu, wybór struktury elektronicznego układu regulacji oraz syntezę układów regulacji. Przedstawiono wpływ parametrów odbiornika łukowego i ukladu zasilania na proces plonięcia luku oraz możliwości zastosowania różnych układów zasilania. Zestawiono szereg kryteriów, które należy uwzględniać przy wyborze najkorzystniejszej dla danego odbiornika koncepcji tyrystorovego układu zasilania. Uzasadniono wniosek, że do zasilania pewnej klasy odbiorników łukowych najlepiej nadają się zasilacze z tyrystorowymi ster rownikami napięcia przemiennego po pierwotnej stronie transformatora głównego. Opracowano uniwersalny model analogowy takich układów, który pozwala na analize ich właściwości, charakterystyk oraz współpracy z odbiornikami łukowymi.

Następnie omówiono różne możliwe do zastosowania struktury elektronicznych układów regulacji: z regulatorami prądu i napięcia łuku oraz bardziej złożone układy inwariantne i układy adaptacyjne. Określono zakres zastosowań tych układów.

Przeprowadzona w oparciu o opracowany model matematyczny synteza tych układów pozwoliła określić przydatne w praktyce inżynierskiej zależności umożliwiające wyznaczenie optymalnych parametrów zastosowanych struktur układów regulacji. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ТИРИСТОРНЫХ СИСТЕМ ПИТАНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ДУГОВЫХ ПРИЕМНИКОВ

# Резюме

Работа посвящена анализу и оптемизации тиристорных систем питания влектрической дуги приемника с сильно нелинейными нестационарными характеристиками с учетом требований, предъявляемых тахнологическим процессом. В работе рассматриваются важнейшее, связаниме с втой темой вопросы: определение требований, которые ставит дуговой приемник системе питания; выбор самой подходящей системы соединений тиристорной системы питания, аналитическое определение свойств и характеристик такой системы; выбор структуры электронной системы регулирования, а также синтез системы; выбор структуры электронной системы регулирования, а также синтез системы питания. Представлено влияние параметров дугового приемника и системы питания. Подано ряд иритериев, которые нужно анализировать при выборе наилучаей для данного приемника концепция тиристорной системы питания. Доказано, что для питания определенного класса дуговых приемников дучие всего подходят питатели с тиристорными командо-контроллерами переменного напряжения по первичной стороне гнавного траксформатора.

Разработано универсальную аналоговую модель таких систем, позволяющую анализировать их свойства, характеристики, а также совместную работу с дуговыми приемниками.

В дальнейнем рассматриваются разные возможные для использования структуры электронных систем регулирования: с регуляторами тока и напряжения дуги, а также более сложные инвариантные системы и самоприспосабливающиеся системы. Определена область применения этих систем.

Проведенный на основания разработанной математической модели синтез этих систем позволия определить пригодные для практической инженерной деятельности зависимости для получения оптимальных параметров использованных структур систем регулирования. AN ANALYSIS AND A SYNTHESIS OF THYRISTOR SUPPLY SYSTEMS AND CONTROL SYSTEMS OF CERTAIN ARC RECEIVERS

#### Summary

The monograph presents an analysis and an optimization of thyristor supply systems of electric arc receivers the receiver haring nonlinear and nonstationary characteristic. Our analysis takes into account reguirements imposed by the technological process. The monograph investigates the most important problems connected with this subject, i.e., the specyfication of requirements laid down by an are receiver for supply system, the choice of the most advantageans connections of a thyristor supply system, the analytic determination of properties and characteristics of such a system. the chaice of a structure of an electronic control system. The influence of the parameters of an aro receiver and of a supply system on the process of arc burning is presented. Some possibilites of maing different supply systems are discussed. Some criteria which should be analysed while choosing the most advantageous concept of a thyristor supply system for a given receiver aro given. The conclusion that feeders with thyristor alternating voltage controllers on the primary side of the main transformer are best suited for supplying a certain class of arc receivers is Hustified. An universal analog model of such systems has been worked out. The model enables an analysis of their properties, characteristics and cooperation with aro receivers. Next, different possible to use structures of electronic control systems are discussed; systems with controller of ourrent and of aro voltage, and more complicated invariant and adaptation systems. The range of their application has been determined. A synthesis of these systems carried out an the basis of the worked out mathematical model has enabled the determination of useful dependences for obtaining the optimum parameters of the used structures of control systems.

BIBLIOTEKA GLOWNA Politechniki Śląskiej 85 96

#### WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI SLĄSKIEJ NOZNA NABYC W NASTROUJACZNE PLACONE SCH.

44-100	Gliwice — Kalęgarnia nr 696, ul. Konstytucji 14 b
44-198	Oliwice - Spoldzielnia Studencia, už. Wrocławska 4 a
10-159	Katowice - Kalegaraia nr 015, ul. Zwirki i Wigury 33
	Kalowice - Kalegarnia ar 805, ul 3 Maja 12
41-900	Bytom - Kaişgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500	Chockiw - Kalegarnia nr 463, ul. Wolności 22
61-200	Dabrowa Gómicza - Kzięgarnia nr 681, ul. ZBoWiD-u 2
47-400	Racibórz - Kalegarola nr 140, ul. Odrzańska 1
44-200	Rybolk - Kalegarnia or 163, Rynek 1
M-200	Somowiec - Kriegarula nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800	Zabrze Kaiegurtia zr 230, ul. Wolności 288
00-901	Warwinws - Osrodek Rospowszechniania Wydawnistw Naukowych PAN Palac Kultury & Nauki

Wszysikie wydawnietwa naukuwe i dydaktyczne zenawiać można poprzez Składnicę Esięgarską w Warszawie, ul. Mszowiecka 9.