

ZYGMUNT KUCZEWSKI, ZBIGNIEW MANTORSKI, ROMAN NOWICKI

Instytut Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektryki

## ANALIZA PRACY PRZECIWRÓWNOLEGŁEGO TRÓJFAZOWEGO TYRYSTOROWEGO UKŁADU DO STEROWANIA NAPIĘCIA PRĄDNICY PRĄDU STAŁEGO

**Streszczenie.** W artykule opisano zbudowany w Instytucie Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki układ do sterowania napięcia prądnicy prądu stałego w oparciu o przeciwrównoległy 3-fazowy przekształtnik tyristorowy z przewodem zerowym. Na podstawie analizy pracy układu oraz przeprowadzonych na nim pomiarów zostały sformułowane wnioski uikatwiające zaprojektowanie i zestrojenie zbudowanego układu.

### 1. Wstęp

Z wielu względów, a szczególnie ze względu na brak krajowych rozwiązań napędowych układów prostowniczych, szczególnie dużych mocy, wprowadzenie układów tyristorowych do polskiego przemysłu odbywa się w porównaniu do innych krajów bardzo powoli. Wysoki koszt importowanych układów napędowych powoduje, że rozwiązania bezpośrednim zasilaniem silnika prądu stałego z przekształtnika tyristorowego nie zawsze należą w naszych warunkach do najlepszych i najekonomiczniejszych. Przykładowo można podać, że koszt tyristorowej maszyny wyciągowej (udźwig 137 kN, wysokość podnoszenia 238 m) w wykonaniu szwedzkiej firmy ASEA, wraz z kosztem budynków i montażu wynosi 36,2 miliona złotych obiegowych, podczas gdy koszt krajowego układu Leonarda dla tej samej maszyny wyniósłby odpowiednio 19,7 miliona złotych. Jednocześnie zysk wynikający z mniejszego zużycia energii elektrycznej w układzie tyristorowym wynosi tylko 600 tysięcy złotych rocznie [1].

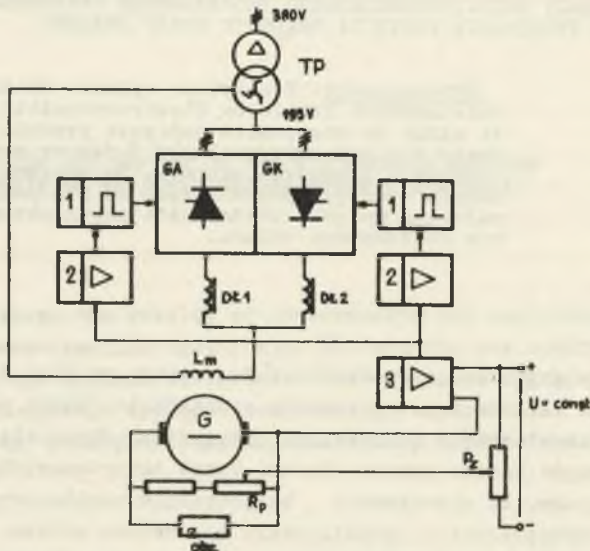
Niekorzystnie z ekonomicznego punktu widzenia przedstawia się sprawa zastępowania wirujących przetwornic w istniejących układach Leonarda przez przekształtniki tyristorowe. W zasadzie modernizacja układów dużej mocy w obecnych warunkach powinna raczej polegać nie na zastępowaniu układów Leonarda układami tyristorowymi, a tylko na zastępowaniu wzbudnic elektromaszynowych wzbudnicami tyristorowymi.

W celu określenia własności wzbudnicy tyristorowej nadającej się do pracy w układzie Leonarda zbudowano w Instytucie Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki Politechniki Śląskiej przeciwrównoległy,

trójfazowy, tyrystorowy układ modelowy do sterowania napięcia prądnicy prądu stałego. W przedstawionych niżej rozważaniach podano pewne wyniki otrzymane na podstawie badań przeprowadzonych na układzie modelowym.

## 2. Opis układu modelowego

Modelowy układ tyrystorowego sterowania napięcia wyjściowego prądnicy prądu stałego z możliwością dokonywania szybkiej zmiany biegunowości jego siły elektromotorycznej przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat przeciwrównoległego układu tyrystorowego do regulacji napięcia prądu stałego

TP - transformator prostownikowy; GA, GK - grupa anodowa i katodowa w przekształtniku tyrystorowym; DL1, DL2 - dławiki wyrównawcze;  $L_m$  - uzwojenie wzbudzenia;  $R_p$  - dzielnik napięcia,  $P_z$  - potencjometr zadający; 1 - układ wyzwalania bramkowego (sterownik); 2 - wzmacniacz mocy; 3 - regulator napięcia

W układzie rolę wzbudnicy spełnia nawrotny przekształtnik tyrystorowy. Zmianę napięcia wyjściowego prądnicy uzyskuje się poprzez zmianę prądu wzbudzenia. Przekształtnik tyrystorowy pracuje w zamkniętym układzie regulacji automatycznej z torem ujemnego napięciowego sprzężenia zwrotnego. Układ składa się: z transformatora prostowniczego (TP), nawrotnego przekształtnika tyrystorowego (GA, GK), dławików prądów wyrównawczych (DL1, DL2), prądnicy prądu stałego (G) oraz układów sterowania i automatycznej regulacji. W układzie modelowym obiektem regulacji jest prądnica prądu stałego typu PBBa64a, o danych znamionowych:  $P_n = 11 \text{ kW}$ ,  $U_n = 115 \text{ V}$ ,  $I_n = 96 \text{ A}$ ,  $i_{mn} = 2 \text{ A}$ ,  $T_m = 0,277 \text{ s}$ ,  $L_m = 11 \text{ H}$ .

Przekształtnik zasilany jest z dwuuzwojeniowego, trójfazowego transformatora prostowniczego (TP) o mocy 0,8 kVA, pracującego w układzie połączeń Dz. Możliwość pracy nawrotnej przekształtnika uzyskano poprzez zastosowanie układu trójfazowego przeciwrownoległego z przewodem zerowym, ze sterowaniem zależnym z prądami wyrównawczymi. W konstrukcji użyto tyrystory produkcji radzieckiej typu T50-10 A, nieselekcjonowane. Dwa dławiki prądów wyrównawczych nienasycające się, każdy o indukcyjności  $L_w = 1,06$  H ograniczają wartość skuteczną prądu wyrównawczego do wielkości nie większej niż 10% znamionowego prądu obciążenia.

Spełnienie warunku sterowania zależnego [2]:

$$\alpha_A + \alpha_K = 180 + \xi \quad (1)$$

gdzie

- $\alpha_A$  - kąt opóźnienia wysterowania grupy anodowej przekształtnika,
- $\alpha_K$  - kąt opóźnienia wysterowania grupy katodowej przekształtnika,
- $\xi$  - kąt zapasu,

oraz uzyskanie żądanych parametrów statycznych i dynamicznych zapewnia układ automatycznej regulacji.

Napięcie wyjściowe prądnicy jest podawane na dzielnik napięcia. Sygnał z dzielnika ( $R_p$ ) po porównaniu z sygnałem zadany przy pomocy potencjometru zadającego ( $P_z$ ) jest podawany na wejście regulatora napięcia (3) o strukturze typu P lub PI. Za regulatorem następuje rozdział sygnału na dwa kanały sterowania, przy czym wytwarzane są dwa sygnały  $U_I$  i  $U_{II}$ , podawane poprzez wzmacniacze (2) do układów wyzwalania impulsów bramkowych (1)

Sygnały te są związane ze sobą następującymi zależnościami wynikającymi z warunku (1) oraz z własności sterownika:

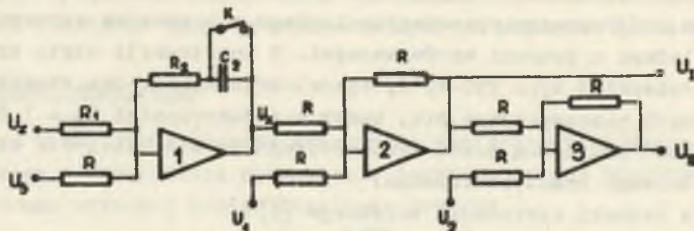
$$U_I + U_{II} = \text{const} \quad (2)$$

$$U_I + U_{II} > 0 \quad (3)$$

$$\max |U_I, U_{II}| < U_{\max} \quad (4)$$

gdzie  $U_{\max}$  - maksymalne napięcie sygnału podawanego do układu wyzwalania bramkowego, odpowiadające najmniejszemu dopuszczalnemu kątowi opóźnienia włączenia danej grupy tyrystorów GA lub GK.

Zasada działania regulatora jest pokazana na rys. 2.



Rys. 2. Schemat regulatora napięcia

$U_z$  - napięcie zadające;  $U_s$  - napięcia sprzężenia zwrotnego;  $U_1, U_2$  - napięcia warunków początkowych;  $U_I, U_{II}$  - napięcia wyjściowe regulatora; 1, 2, 3 - wzmacniacze operacyjne; K - przełącznik typu regulacji P, I

Wzmacniacz operacyjny 1 pracuje w układzie regulatora typu P lub PI w zależności od pozycji klucza K, przy czym spełnione są zależności:

$$\frac{U_x}{U_s - U_z} = -k_r \left(1 + \frac{1}{pT_z}\right) \quad \text{dla typu PI} \quad (5)$$

$$\frac{U_x}{U_s - U_z} = -k_r \quad \text{dla typu P} \quad (6)$$

Człon ten spełnia również rolę elementu ograniczającego poprzez wykorzystanie nasycenia wzmacniacza.

Członny zawierające wzmacniacze 2 i 3 pracują jako inwertory o współczynniku wzmocnienia równym jedności i realizują zależności:

$$U_I = U_1 - U_x \quad (7)$$

$$U_{II} = U_2 - U_I.$$

Poprzez odpowiedni dobór wartości napięć zadających warunki początkowe  $U_1$  i  $U_2$  uzyskuje się żądany zakres regulacji napięć wyjściowych regulatora  $U_I$  i  $U_{II}$ .

Cały elektroniczny układ regulacji i sterowania zrealizowano w oparciu o podzespoły i elementy półprzewodnikowe produkcji krajowej, za wyjątkiem wzmacniaczy operacyjnych regulatora, które zbudowano na bazie elementów scalonych typu 709.

### 3. Strojenie układu

Zapewnienie bezpiecznej pracy tyrystorów pracujących w zakresie pracy falowniczej jest możliwe tylko przy kątach wyprzedzenia włączenia  $\beta$  większych od pewnej wartości  $\beta_{\min}$ , której nie wolno zmniejszyć, gdyż grozi to awarią układu (przejście falownika do pracy prostowniczej). Wartość kąta  $\beta_{\min}$  powinna być większa od sumy następujących kątów.

$$\beta_{\min} > \gamma + \delta + \psi = \xi \quad (8)$$

gdzie

$\gamma$  - kąt komutacji falownika

$\delta$  - kąt wyłączenia tyrystora, określaný jako  $\delta = \omega t_w$  ( $t_w$  - czas wyłączenia tyrystora)

$\psi$  - kąt zapasu uwzględniający maksymalne rozstrojenie układu, a uwarunkowany dokładnością pomiaru kąta  $\beta$ .

Kąt komutacji falowania  $\gamma$  można wyznaczyć z zależności:

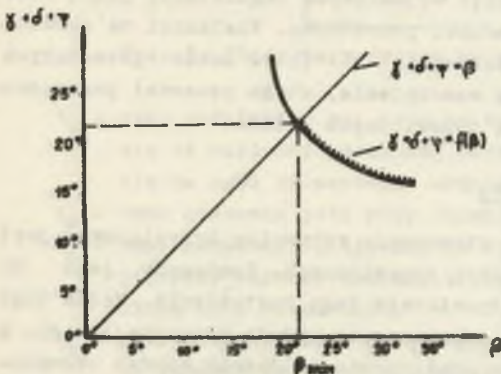
$$\cos(\beta - \gamma) = \cos\beta + I_B \frac{X_T}{\sqrt{2} U_{2f} \sin \frac{\beta}{m}} \quad (9)$$

gdzie

$X_T$  - reaktancja rozproszenia transformatora (TP)

$I_B$  - średnia wartość prądu tyrystora

$U_{2f}$  - wartość skuteczna napięcia fazowego zasilającego przekształtnik

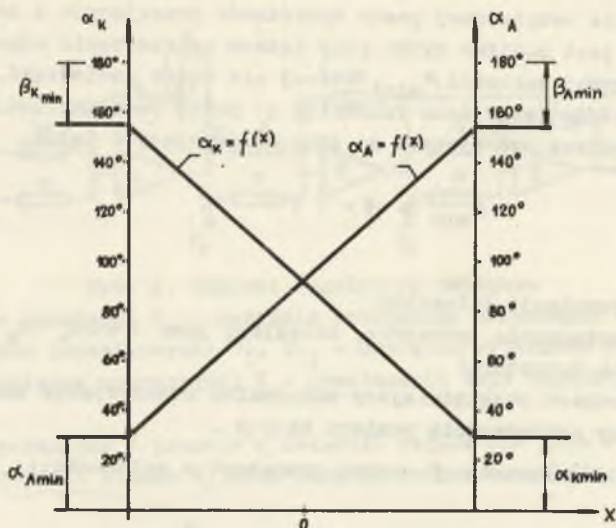


Rys. 3. Określanie minimalnego kąta wyprzedzenia włączenia  $\beta_{\min}$

W analizowanym układzie przyjęto wartości  $\delta = 1^{\circ}09'$ ,  $\psi = 8^{\circ}$ , a następnie na podstawie zależności (9) wyznaczono wykreślnie minimalny kąt wyprzedzenia włączenia  $\beta_{\min}$  (rys. 3) W układzie płyną stale prądy wyrównawcze. Aby ograniczyć ich wartość, przyjmuje się kąt wysterowania zerowego  $\alpha_0$  (średnie wartości napięć równe zero) nieco większy od  $90^{\circ}$ . W efekcie zostaje ograniczony zakres zmienności kąta sterowania. Minimalny kąt opóźnienia włączenia wyrzysie wówczas:

$$\alpha_{\min} = 2 \alpha_0 + \beta_{\min} - 180^{\circ} \quad (10)$$

i będzie większy od  $\beta_{\min}$ .



Rys. 4. Charakterystyka statyczna toru regulacji w zależności od sygnału zadającego  $X$  ( $U_I$  lub  $U_{II}$ )

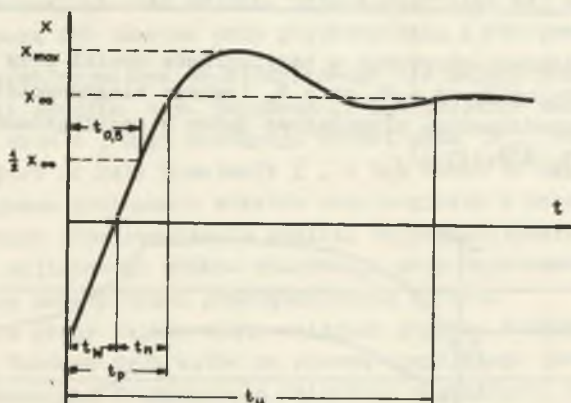
Na rysunku 4 przedstawiono charakterystykę statyczną toru regulacji badanego układu dla następujących nastaw:  $\alpha_{\min} = 29^\circ$ ,  $\beta_{\min} = 25^\circ$ ,  $\alpha_0 = 92^\circ$ . Punkt przecięcia się charakterystyk odpowiada stanowi układu, w którym napięcie prądnicy jest równe zero. Znajomość tej charakterystyki jest konieczna do określenia wielkości napięć wyjściowych regulatora, jak również wielkości napięć zadających warunki początkowe. Wielkości te określa się na podstawie charakterystyki sterowania  $\alpha = f(X)$ . Dobór pozostałych parametrów regulatora (współczynnik wzmocnienia, stała czasowa) przeprowadza się na podstawie charakterystyk dynamicznych układu.

#### 4. Charakterystyki dynamiczne układu

Jednym z głównych zadań i celów stosowania wzbudnicy tyrystorowej jest zapewnienie układowi dobrych własności dynamicznych. Konieczny jest do tego właściwy dobór regulatora i odpowiednie jego nastawienie. Można tego dokonać na podstawie transmitancji operatorowej układu korzystając np. z reguł Ziglera-Nickolasa. Obliczenia analityczne są jednak bardzo skomplikowane, a w przypadku zastosowania zbyt dużych uproszczeń niekoniecznie dałyby optymalne rozwiązanie. Należy przy tym pamiętać, że współczynnik wzmocnienia prądnicy  $k_g$ , zdefiniowany jest stosunek przyrostu siły elektromotorycznej prądnicy do przyrostu jej prądu wzbudzenia  $i_m$  rośnie, gdy prąd  $i_m$  maleje do zera, co może prowadzić do niestabilności układu w tym ważnym dla napędów nawrotnych punkcie. Nastawy regulatorów dokonane eksperymentalnie mogą skutkiem tego odbiegać od nastaw wyznaczonych analitycznie i dających przebiegi optymalne w punkcie pracy znamionowej.

Dobór i nastawa regulatora w badanym układzie modelowym zostały dokonane doświadczalnie, na podstawie pomiarów oscylograficznych napięcia mierzonego na zaciskach prądnicy  $U_g$  przy skokowej (w przybliżeniu) zmianie napięcia zadającego  $U_z$ . Przebiegi napięcia prądnicy (wielkość regulowana)  $U_g$ , napięcia na uzwojeniu wzbudzenia  $U_m$ , prądu wzbudzenia  $i_m$  i napięcia zadającego  $U_z$  (zadanego potencjometrem  $P_z$ ) pomierzono przy pomocy wielkanałowego oscylografu pętlicowego o małej bezwładności pętlic. W badanym układzie stosowano dwa typy regulatorów: regulator proporcjonalny (typu P) i regulator proporcjonalno-całkujący (typu PI),

Badania przeprowadzono dla różnych nastaw regulatorów, a następnie porównano własności dynamiczne układu na podstawie następujących wskaźników charakterystycznych (rys. 5):



Rys. 5. Charakterystyczne wskaźniki przebiegu przejściowego

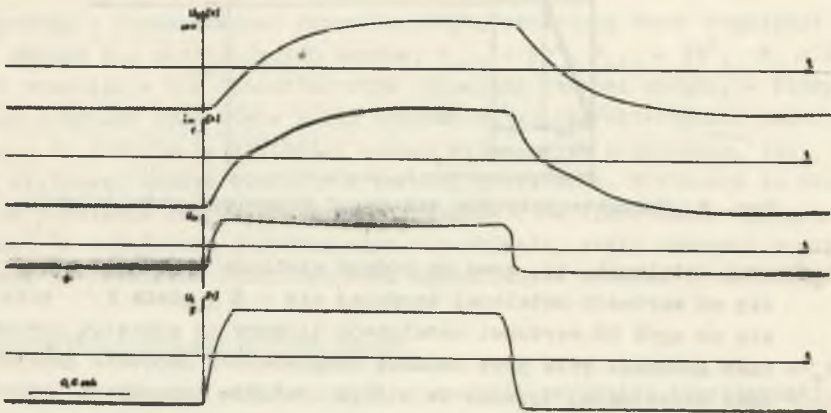
- $t_u$  - czas ustalania, tj. czas po którym wielkość wyjściowa nie różni się od wartości ustalonej bardziej niż o  $\delta$ , gdzie  $\delta$  przyjmuje się na ogół 5% wartości ustalonej; liczony od początku nawrotu,
- $t_w$  - czas gaszenia pola przy zmianie biegunowości napięcia generatora,
- $t_n$  - czas narastania, tj. czas po którym zostanie osiągnięta po raz pierwszy wartość zadana; liczony od chwili w której wartość wyjściowa była równa zero,
- $t_p$  - czas osiągnięcia w przebiegu oscylacyjnym po raz pierwszy wartości zadanej ( $t_p = t_w + t_n$ ); liczony od początku nawrotu
- $t_{0.5}$  - czas połowkowy, po upływie którego wielkość wyjściowa po raz pierwszy osiągnie połowę swej wartości ustalonej

$$\delta - \text{wartość przeregulowania} \quad \delta = \frac{X_{\max} - X_{\infty}}{X_{\infty}} \quad 100$$

Tabela 1

Typ regulatora	Nastawa		$t_u$	$t_n$	$t_w$	$t_p$	$t_{0,5}$	$\sigma$
	$k_R$	$T_Z$ [s]	s	s	s	s	s	%
P	1,02	-	0,55	0,35	0,2	-	0,33	0
	2,04	-	0,6	0,43	0,17	-	0,32	0
	3,04	-	0,78	0,56	0,22	-	0,43	0
PI	1,02	0,047	1,38	0,48	0,36	0,84	0,48	6
	1,02	0,147	0,98	0,68	0,19	-	0,5	0
	1,02	0,247	0,88	0,52	0,36	-	0,46	0
	1,02	0,347	0,9	0,58	0,32	-	0,5	0

W tabeli 1 zebrano odczytane z oscylogramów wyniki przy skokowej zmianie napięcia zadającego od  $-U_Z$  do  $+U_Z$  (zmiana biegunowości generatora), a na rysunku 6 przedstawiono przykładowo jeden z oscylogramów (regulator PI,  $k_R = 1,02$ ,  $T_Z = 0,147$  s).



Rys. 6. Oscylogram napięcia generatora ( $U_g$ ), prądu i napięcia wzbudzenia ( $i_m$ ,  $U_m$ ), przy skokowej zmianie napięcia zadawania od  $-U_Z$  do  $+U_Z$ , dla układu z regulatorem typu PI ( $k_R = 1,02$ ,  $t_{T_Z} = 0,147$  s)

Zastosowanie w układzie regulatora typu P daje w stanie ustalonym pewien błąd regulacji, zależny od współczynnika wzmocnienia regulatora  $k_R$ . Niewielki uchyb statyczny praktycznie nie mający większego znaczenia daje układ tylko przy współczynniku wzmocnienia  $k_R = 3,04$ . Dlatego też tylko ten przypadek można objąć porównaniem z regulatorem typu PI (dla regulacji typu PI błąd regulacji w stanie ustalonym jest równy zero).



Najlepsze wskaźniki regulacji posiada dla regulacji typu PI nastawa ze stałą czasowo całkowania równą 0,247 s. Można stąd wnioskować, że nastawa regulatora  $T_z \approx T_m$  będzie dawała przebiegi zbliżone najbardziej do optymalnych ( $t_u = \text{minimum}$ ).

Porównując te dwa najlepsze przypadki z regulatorem typu P i typu PI widać, że regulator P daje krótszy czas gaszenia pola  $t_w$ , ale dłuższy czas narastania  $t_n$ , niż regulator PI. Zmiana nastawy regulatora P powoduje zmianę statycznego współczynnika wzmocnienia, natomiast zmiana nastaw  $T_z$  w regulatorze PI za pomocą pojemności zachowuje  $k_T = \text{const}$ , czyli statyczny współczynnik wzmocnienia układu pozostaje stały. Regulator typu PI jest zatem prostszy w obsłudze i eksploatacji.

## 5. Wnioski

Przeprowadzona analiza oraz badania układu pozwoliły na sformułowanie wniosków, które mogą być pomocne przy projektowaniu i strojeniu układu:

- Przy doborze transformatora prostownikowego nie należy przyjmować zbyt dużego napięcia zwarcia  $u_z\%$ . Zwiększanie  $u_z\%$  powoduje zwężenie zakresu sterowania kąta  $\alpha$ , gdyż następuje wzrost kąta  $\beta_{\min}$  oraz  $\alpha_{\min}$ . Kąt  $\beta_{\min}$  zależny jest od kąta komutacji  $\psi$ , a tym samym od napięcia zwarcia  $u_z\%$ . Wzajemne powiązanie efektów regulacyjnych z parametrami transformatora wymaga przeprowadzenia analizy dającej optymalne rozwiązanie tzn. uzyskanie najlepszego efektu sterowania przy zachowaniu  $u_z\%$  umożliwiającego pracę zabezpieczeń przetężeniowych układu.
- Znaczną poprawę pracy układu można osiągnąć poprzez dokładną nastawę  $\alpha_{\min}$  i  $\beta_{\min}$ . Nastawa tych kątów za pomocą oscyloskopu jest mało dokładna w porównaniu z dokładnością działania regulatora. Dokładny pomiar kąta  $\alpha$  pozwala uzyskać znacznie lepsze parametry układu: zwężenie strefy martwej sterowania, wynikającej z konieczności nastawy kąta  $\alpha_0$  większego od  $90^\circ$  o kąt wynikający z niedokładności nastaw  $\alpha_{\min}$  i  $\beta_{\min}$  oraz powiększenie zakresu regulacji poprzez zmniejszenie kąta  $\psi$  będącego rezerwą na maksymalne rozstrojenie układu.
- Oscylogramy przebiegów dynamicznych wykazują, że parametry dynamiczne badanego układu dla regulacji typu P i typu PI są zbliżone. Parametrem decydującym o wyborze typu regulatora będzie błąd regulacji. Ze względu na charakter układu wymagana jest dokładna regulacja także przy obniżeniu napięcia generatora do zera, a tym samym ważny jest problem likwidacji remanentu magnetycznego. Regulator typu P daje zawsze pewien uchyb statyczny i dlatego nie można przy jego pomocy uzyskać całkowitej likwidacji remanentu. Zastosowanie regulatora PI rozwiązuje ten problem. Przeprowadzona analiza wykazuje, że dla danego układu odpowiedni będzie regulator typu PI.

## LITERATURA

1. Analiza celowości stosowania przekształtnika tyrystorowego dla maszyny wyciągowej szybu Chrobry. Opracowanie Instytutu Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki, Gliwice 1972.
2. Szałowski Cz. - Statyczne i dynamiczne prądy wyrównawcze w nawrotnych przekształtnikach tyrystorowych - Budow. okrętowe Nr 7-8, 1966.
3. Luciński J. Układy tyrystorowe WNT, Warszawa 1972.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ВСТРЕЧНОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ТИРИСТОРНОЙ СИСТЕМЫ  
ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## Р е з ю м е

В статье описана система с трёхфазным встречнопараллельным тиристорным преобразователем для регулирования напряжения генератора постоянного тока. Эта система была сконструирована в Институте Основных Проблем Электротехники и Энергоэлектроники.

На основе анализа работы и лабораторных исследований даны указания по проектированию и настройке системы.

THE ANALYSIS OF THE WORK OF THE THREE-PHASE REVERSING  
THYRISTOR SYSTEM FOR VOLTAGE CONTROL OF THE D.C. GENERATOR

## S u m m a r y

The system controlling d.c. generator voltage based on three-phase reversing converter is presented in the paper. The system was set up in the "Institut of Foundations of Electrotechnics and Energoelectronics". The analysis and laboratory tests of the work resulted in conclusions useful in designing and constructing of the system. The conclusions are given in the paper.