

Krzysztof KRYKOWSKI

ZASTOSOWANIE W CYKLOKONWERTORZE UJEMNEGO NAPIĘCIOWEGO SPRZĘŻENIA ZWROTNEGO

Streszczenie: Zastosowanie w cyklokonwerterze blokady prądów wyrównawczych powoduje pojawienie się w napięciu wyjściowym cyklokonwertera dodatkowej składowej zaburzającej nazwanej napięciem niejednoznaczności. Napięcie niejednoznaczności można wyeliminować stosując ujemne napięciowe sprzężenie zwrotne z regulatorem całkującym o nastawach dobranych zgodnie z rezultatami przeprowadzonej analizy.

1. Praca cyklokonwertera nie objętego sprzężeniami zwrotnymi

Cyklokonwerter zwany również tyrystorowym przemiennikiem o przetwarzaniu bezpośrednim, można traktować jako rewersyjny przekształtnik prądu stałego sterowany napięciem przemiennym o częstotliwości niższej od częstotliwości sieci zasilającej [2, 7, 8, 9, 10, 12, 15]. Napięcie wyjściowe cyklokonwertera jest napięciem odkształconym, a jego kształt zależy od układu połączeń obwodu głównego i obranego sposobu sterowania.

Gdy częstotliwość napięcia zasilającego oznaczmy przez f_1 , a częstotliwość napięcia sterującego nazwiemy podstawową częstotliwością cyklokonwertera i oznaczmy przez f_2 , to napięcie wyjściowe będzie można przedstawić jako sumę szeregów trygonometrycznych o częstotliwości podstawowej:

$$f_{p,q} = q f_1 \pm p f_2,$$

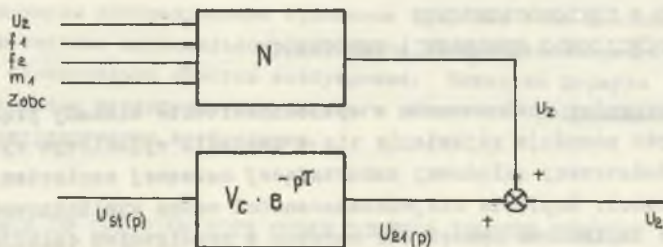
gdzie p oraz q są liczbami całkowitymi.

Z punktu widzenia własności dynamicznych cyklokonwerter (rewersyjny przekształtnik prądu stałego) stanowi obiekt nieliniowy z opóźnieniem, którego średni czas martwy jest równy połowie średniego czasu trwania pulsu napięcia zasilającego [8, 11].

Zgodnie z pracami [5, 16] element nieliniowy można przedstawić jako sumę elementu liniowego i nieliniowego. Pozwala to sprawdzić schemat blokowy cyklokonwertera do postaci przedstawionej na rys. 1. Transmitancję części liniowej ujmuje zależność:

$$K_o(p) = \frac{U_{21}(p)}{U_{st}(p)} = V_o e^{-p\tau},$$

gdzie V_c oznacza wzmacnienie części liniowej, zaś $\tau = \frac{1}{2f_1 m_1}$ czas martwy. Sygnałem wejściowym dla części liniowej jest napięcie sterujące, a wyjściowym składowa przemienna napięcia wyjściowego o częstotliwości f_2 .



Rys. 1. Wyodrębnienie liniowej i nieliniowej części w cyklokonwertorze

Blok nieliniowy N generuje napięcie zaburzające u_z będące różnicą między wartością sinusoidalnej składowej u_{z1} proporcjonalnej do napięcia sterującego, a rzeczywistym napięciem u_z . Napięcie zaburzające u_z zależy od parametrów napięcia zasilającego i sterującego, parametrów konstrukcyjnych przekształtnika i parametrów obciążenia. Składowe napięcia zaburzającego można podzielić na składowe powstałe w wyniku:

- 1) dyskretnego działania cyklokonwertora,
- 2) nieliniowego charakteru rewersyjnego przekształtnika prądu stałego,
- 3) działania układu blokady prądów wyrównawczych,
- 4) nieidealnych parametrów obwodu zasilania, sterowania i występujących w przekształtniku elementów.

Ze względu na częstotliwości, składowe napięcia zaburzające można podzielić na składowe o częstotliwościach:

- a) wyższych od podstawowej częstotliwości cyklokonwertora równej f_2 , spowodowane głównie dyskretnym działaniem przekształtnika.
- b) niższych od podstawowej częstotliwości cyklokonwertora spowodowane głównie działaniem układu blokady prądów wyrównawczych,
- c) o częstotliwości podstawowej cyklokonwertora f_2 .

Odbiorniki zasilane z cyklokonwertora mają zazwyczaj charakter rezystancyjno-indukcyjny, a szczególnie często stosowanym odbiornikiem jest silnik asynchroniczny. Odbiorniki takie posiadają charakter filtra dolnoprzepustowego [1, 2, 4, 6, 7, 9, 12, 15] i są bardzo wrażliwe na składowe zaburzenia napięcia o częstotliwościach niskich, natomiast składowe zaburzające o częstotliwościach wysokich są w nich przynajmniej częściowo odfiltrowywane. Napięcie wyjściowe cyklokonwertora powinno się więc charakteryzować stałą amplitudą podstawowej składowej przemienną, brakiem składowych o częstotliwościach niższych od podstawowej oraz mo-

żliwie niską zawartością składowych o częstotliwościach wyższych od podstawowej.

2. Odształcenie napięcia wyjściowego spowodowane działaniem układu blokady prądów wyrównawczych

W cyklokonwerterach pracujących z prądami wyrównawczymi oba składowe przekształtniki prądu stałego dodatni i ujemny pracują równocześnie, zawory przewodzą w sposób ciągły, a przejmowanie obciążenia przez odpowiednie grupy zaworów następuje płynnie, natomiast w cyklokonwerterach bez prądów wyrównawczych składowe przekształtniki nie mogą przewodzić równocześnie, przejmowanie obciążenia przez poszczególne grupy zaworów następuje w sposób dyskretny, a zawory mogą przewodzić zarówno w sposób ciągły jak i przerywany. Nieciągłe przewodzenie prądu przez zawory przekształtnika powoduje pojawienie się na jego zaciskach wyjściowych napięcia średniego o wartości większej niż w przypadku przewodzenia ciągłego, natomiast dyskretnie działanie układu blokady prądów wyrównawczych powoduje pojawienie się składowej niejednoznaczności napięcia wyjściowego.

W przekształtniku sterowanym średnie napięcie wyprostowane U_d zależy od wartości U_{do} średniego napięcia wyprostowanego jakie wystąpi dla przekształtnika niesterowanego oraz kąta opóźnienia wyzwolenia zaworów α i wynosi:

w przypadku ciągłego przewodzenia zaworów

$$U_d = U_{do} \cos \alpha ,$$

przy obciążeniu rezystancyjnym dla $\alpha > \alpha_{gr} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$

$$U_{dR} = U_{do} \frac{1 - \sin(\alpha - \frac{\pi}{m})}{2 \sin \frac{\pi}{m}} ,$$

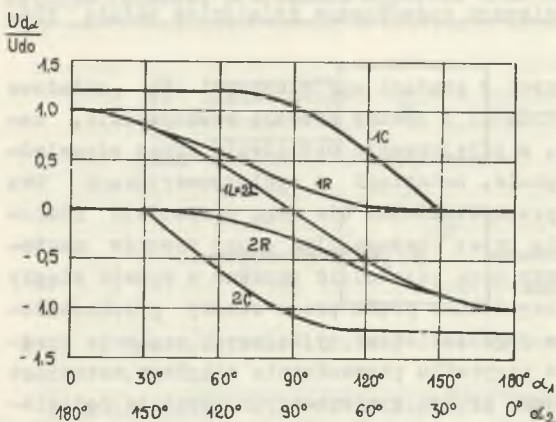
przy obciążeniu pojemnościowym dla kąta opóźnienia $\alpha \leq \frac{\pi}{m}$

$$U_d = U_{do} \frac{\frac{\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}} ,$$

natomiast dla kąta opóźnienia $\alpha \geq \frac{\pi}{m}$

$$U_d = U_{do} \frac{\pi}{m} \frac{\cos(\alpha - \frac{\pi}{m})}{\sin \frac{\pi}{m}} .$$

Na rys. 2 przedstawiono względne średnie wartości napięcia wyprostowanego 3-pulsowego przekształtnika w funkcji kąta opóźnienia wyzwolenia α dla

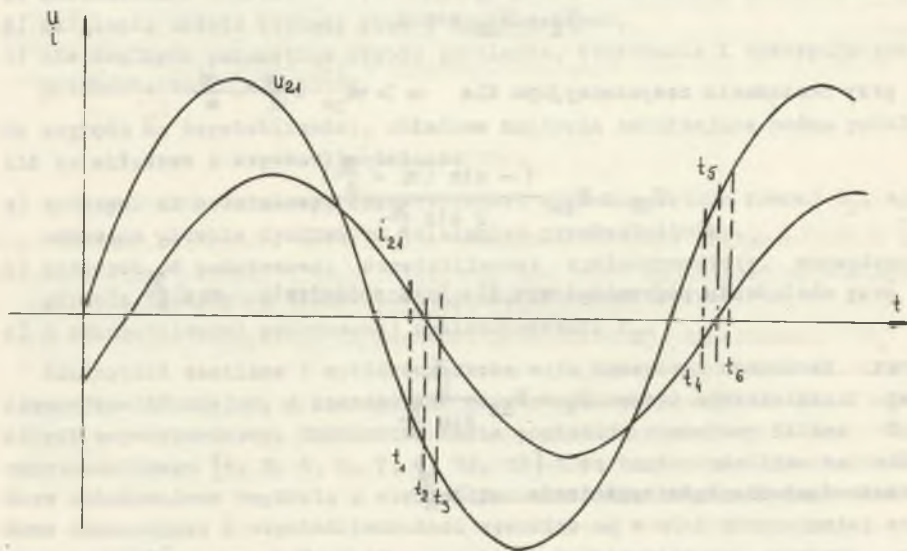


Rys. 2. Względna średnia wartość dodatniej (1) i ujemnej (2) grupy zaworów przekształtnika 3-pulsowego

L - obciążenie prądem ciągłym, R - obciążenie rezystancją, C - obciążenie pojemnością

grup zaworów (przekształtników składowych) dodatniej α_1 i ujemnej α_2 . Krzywe oznaczone cyfrą 1 odpowiadają wysterowaniu grup dodatnich, a krzywe oznaczone cyfrą 2 ujemnych. Wskaźniki L, R, C oznaczają obciążenie prądem ciągłym, rezystancją i pojemnością.

W rzeczywistym cyklokonwerterze występują pewne przesunięcia fazowe między użytymi składowymi napięciami i prądu wyjściowego (rys. 3). Z rys. 3 wynika, że w chwili t_1 powinna przewodzić grupa dodatnia falowniczo, w chwili t_2 powinien wystąpić moment pracy bez-



Rys. 3. Wyidealizowane przebiegi napięcia i prądu wyjściowego cyklokonwertera

prądowej, a w chwili t_3 powinna przewodzić grupa ujemna prostowniczo, Podobnie przy przejmowaniu obciążenia przez przekształtnik dodatni w chwili t_4 powinna przewodzić grupa ujemna falowniczo, w chwili t_6 dodatnia prostowniczo, zaś w chwili t_5 powinien następować moment pracy bezprądowej.

Przekształtnik tyrystorowy jest urządzeniem o działaniu dyskretnym. Raz załączony tyrystor przewodzi tak długo aż płynący przez niego prąd spadnie do zera. Jeśli ostatni pracujący tyrystor grupy dodatniej jest załączony w chwili t_1 , to w zależności od usytuowania punktu t_1 względem t_2 oraz wielkości i charakteru obciążenia oprócz idealnego przypadku, gdy prąd anodowy tyrystora w chwili t_2 spada do zera, zaś średnie napięcie grupy dodatniej jest równe średniemu napięciu wyprostowanemu przy przewodzeniu ciągłym (krzywa 1L na rys. 3) mogą wystąpić mniej korzystne przypadki pracy gdy:

- tyrystor załączony w chwili t_1 przewodzi dłużej niż do t_2 ,
- średnie napięcie wyprostowane w okresie pracy tego tyrystora jest różne (większe) od tego, które wystąpi przy przewodzeniu ciągłym (krzywa 1L rys. 2).

Wystąpienie omówionych zjawisk jest równoznaczne z pojawieniem się w chwili przekazywania obciążenia przez przekształtnik dodatni przekształtnikowi ujemnemu dodatniego pulsu napięcia, o wartości średniej nie większej od różnicy pomiędzy największą możliwą średnią wartością napięcia wyprostowanego (krzywa 1C rys. 2) a średnią wartością napięcia wyprostowanego przy przewodzeniu ciągłym. Analogicznie mogą się pojawić ujemne pulsy napięcia przy przejmowaniu obciążenia przez przekształtnik dodatni. W ogólnym przypadku pulsy dodatnie i ujemne są różne i tworzą w napięciu wyjściowym cyklokonwertora składową nazwaną w pracy [7] składową niejednoznaczności napięcia wyjściowego cyklokonwertora lub w skrócie napięciem niejednoznaczności. Napięcie niejednoznaczności jest napięciem przemennym, które oprócz składowej o częstotliwości równej podstawowej częstotliwości cyklokonwertora zawiera składowe o częstotliwościach niższych, a może również zawierać składową stałą.

W pracy [7] określono zakres wielkości napięcia niejednoznaczności cyklokonwertora przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym. Poszerzmy to na obciążenie R, L, C. Różnicę pomiędzy wartością napięcia U_d dla przepływu ciągłego i przerywanego można ocenić w oparciu o rys. 2. Największa różnica wystąpi w przypadku pojemnościowego obciążenia cyklokonwertora i wyniesie:

$$\Delta U_d = U_{do} \frac{\frac{\pi}{m} \cos(\alpha - \frac{\pi}{m})}{\sin \frac{\pi}{m}} - U_{do} \cos \alpha .$$

Dla układów wielofazowych nie popełni się dużego błędu przyjmując, że dla

dużych wartości $m \sin \frac{\pi}{m} \approx \frac{\pi}{m}$

Uzyskamy wtedy:

$$\Delta U_d = -U_{do} 2 \sin \frac{\pi}{2m} \sin(\alpha - \frac{\pi}{2m}) .$$

Maksimum tego wyrażenia wystąpi gdy $\sin(\alpha - \frac{\pi}{2m}) = -1$ i wyniesie:

$$\Delta U_{dmax} = 2U_{do} \sin \frac{\pi}{2m} \approx \frac{\pi}{m} U_{do} . \quad (1)$$

Widać więc, że w cyklokonwertorze bez prądów wyrównawczych, gdy grupa dodatnia zaworów kończy pracę i następuje przejście obciążenia przez grupę ujemną w napięciu wyjściowym może się pojawić "puls" napięcia dodatniego U_b spowodowany niejednoznacznością działania układu blokady prądów wyrównawczych. Wartość średnia napięcia tego pulsu spełnia zależność:

$$0 \leq U_b \leq \frac{\pi}{m} U_{do} .$$

Analogicznie przy przejmowaniu obciążenia przez dodatnią grupę zaworów może się pojawić ujemny puls napięcia o wartości U_b spełniającej warunek:

$$-\frac{\pi}{m} U_{do} \leq -U_b \leq 0 .$$

Przyjmując, że średni czas trwania omówionych pulsów napięcia niejednoznaczności jest nie większy od średniego czasu przewodzenia zaworu $t_p = \frac{T_1}{m}$ można wykazać, że średnia wartość napięcia pulsu mierzona za pół okresu napięcia wyjściowego spełnia nierówności:

$$U_{bd} \leq \frac{\frac{T_1}{m}}{\frac{T_2}{2}} U_b$$

oraz

$$U_{bd} \leq \frac{T_2}{T_1} \frac{2\pi}{m^2} U_{do} . \quad (2)$$

Stosunek wartości średniej wspomnianego pulsu napięcia niejednoznaczności U_{bd} mierzonej za jeden półokres napięcia wyjściowego do wartości średniej użytecznej składowej mierzonej za jeden półokres napięcia wyjściowego wynosi:

$$\frac{U_{bd}}{U_{2d}} = \frac{U_{bd}}{\frac{2}{\pi} U_{2m}} = \frac{\pi}{2} \frac{U_{bd}}{U_{2m}}.$$

Wykorzystując nierówność (2) oraz przyjmując, że maksymalna wartość użytecznej składowej napięcia wyjściowego cyklokonwertora $U_{21m} = U_{do} \cos \alpha_{\min}$ uzyskamy:

$$\frac{U_{bd}}{U_{2d}} \leq \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{\pi}{m} \right)^2 \frac{1}{\cos \alpha_{\min}}.$$

Pozwala to sformułować pewne uogólnienia.

1. Gdy obwód główny cyklokonwertora pracuje w układzie o dużej liczbie pulsów, minimalny kąt opóźnienia wyzwolenia zaworów przekształtnika jest bliski zeru, względna częstotliwość napięcia wyjściowego przebiega niewielkie wartości, a składowa niejednoznaczności jest pomijalnie mała w porównaniu z innymi składowymi napięcia wyjściowego cyklokonwertora.
2. W przypadku, gdy wymienione warunki nie są spełnione składowa niejednoznaczności w napięciu wyjściowym cyklokonwertora może przyjmować znaczne wartości utrudniające, a nawet uniemożliwiające współpracę cyklokonwertora z niektórymi typami odbiorników. W tym przypadku należy w cyklokonwertorze stosować dodatkowe układy eliminujące składową niejednoznaczności napięcia wyjściowego.

Szczególnie niekorzystną właściwością składowej niejednoznaczności napięcia wyjściowego jest to, że jej częstotliwość może być znacznie niższa od podstawowej częstotliwości cyklokonwertora.

3. Zastosowanie w cyklokonwertorze ujemnego napięciowego sprzężenia zwrotnego

Podstawową metodą eliminacji zaburzeń jest stosowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego. W przypadku cyklokonwertora wielkością wyjściową jest składowa napięcia (prądu) o częstotliwości równej podstawowej częstotliwości cyklokonwertora, a zaburzeniami są:

- a) wpływ nieliniowości cyklokonwertora,
- b) składowa niejednoznaczności napięcia wyjściowego lub wywołana nią składowa niejednoznaczności prądu,
- c) inne składowe odkształcone napięcia (prądu) wyjściowego.

Prawidłowo dobrany układ sprzężenia zwrotnego powinien:

- 1) zapewnić stabilizację amplitudy podstawowej składowej napięcia (prądu) wyjściowego cyklokonwertora,

- 2) ograniczyć składową niejednoznaczności napięcia (prądu) tak, by nie wpływała niekorzystnie na pracę odbiornika,
- 3) nie powodować zwiększania się w napięciu (prądzie) wyjściowym innych niekorzystnych składowych,
- 4) być stabilny.

W zależności od tego, którą z wielkości wyjściowych chcemy stabilizować można wyróżnić układy ze sprzężeniem zwrotnym napięciowym lub prądowym. W przeprowadzonych rozważaniach ograniczymy się jedynie do sprzężenia napięciowego.

Do analizy zastosowano metodę wykresów stałej amplitudy M (wykresy Halla) [3, 5, 7, 13, 14] oraz przedstawiony na rys. 1 schemat blokowy cyklokonwertora. Charakterystyka modułowa układu zamkniętego będzie stała, gdy charakterystyka amplitudowo-fazowa otwartej pętli sprzężenia zwrotnego w stosowanym zakresie częstotliwości pokryje się z prostą odpowiadającą wzmożeniu $M = 1$. Łatwo wykazać, że regulator całkujący pozwoli uzyskać taki kształt charakterystyki amplitudowo-fazowej otwartej pętli sprzężenia zwrotnego.

Przedstawmy regulator całkujący jako dwa szeregowo połączone bloki całkujący o czasie całkowania T_1 oraz proporcjonalny o wzmożeniu V_1 . Transmityncja operatorowa regulatora

$$K_1(p) = \frac{V_1}{p T_1},$$

a transmitancja widmowa

$$K_1(j\omega) = \frac{V_1}{j\omega T_1}.$$

Transmityncję otwartej pętli sprzężenia zwrotnego uzyskamy mnożąc transmityncje cyklokonwertora i regulatora:

$$K_0(p) = \frac{V_1 V_2}{p T_1} e^{-p\tau},$$

$$K_0(j\omega) = -\frac{V_1 V_2}{\omega T_1} \left[\sin \omega\tau - j \cos \omega\tau \right].$$

Z rysunku 4 przedstawiającego charakterystyki amplitudowo-fazowe cyklokonwertora, regulatora i otwartej pętli sprzężenia zwrotnego widać, że charakterystyka amplitudowo-fazowa otwartej pętli sprzężenia zwrotnego przy częstotliwościach dążących do zera podąża do asymptoty będącej równoległą

do osi urojonej. Równanie tej prostej można znaleźć jako:

$$\begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} \operatorname{Re} \{ K_o(j\omega) \} &= \lim - \frac{V_1 V_c}{\omega T_1} \sin \omega \tau = - \frac{V_1 V_c \tau}{T_1} \\ &= - \frac{V_1 V_c}{2m T_1 f_1} . \end{aligned}$$

Pokryje się ona z prostą odpowiadającą $M = 1$, gdy:

$$\begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} \operatorname{Re} \{ K_o(j\omega) \} &= \\ &= - \frac{V_1 V_c}{2 \cdot m \cdot T_1 \cdot f_1} = - \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Rozwiązując to równanie uzyskamy zależności wiążące parametry nastaw regulatora

$$\frac{T_1}{V_1} = 2 V_c \tau = \frac{V_c}{m f_1} . \quad (4)$$

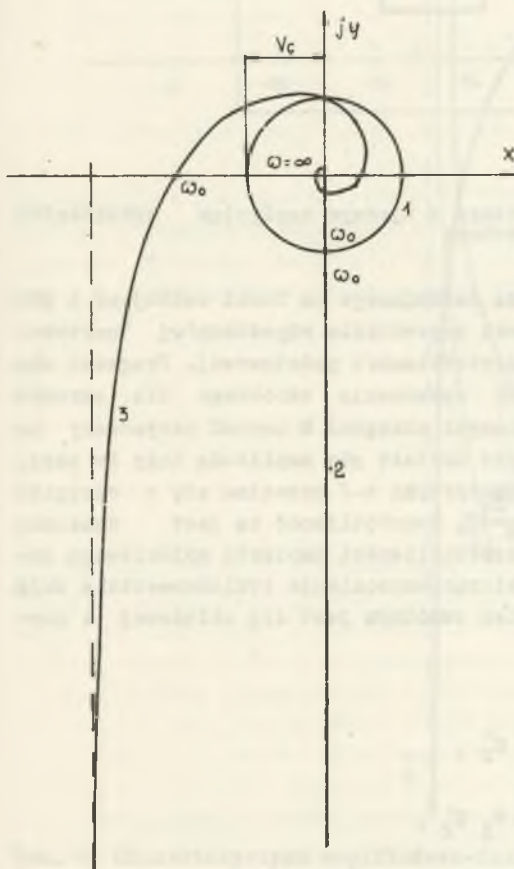
Dla tak dobranych nastaw regulatora charakterystyka a-f otwartej pętli sprzężenia zwrotnego przetnie oś rzeczywistą przy pulsacji

$$\omega_0 = \frac{f_1}{2} \frac{1}{\tau} ,$$

w punkcie o współrzędnej rzeczywistej

$$\operatorname{Re} \{ K_o(j\omega) \} = - \frac{1}{2} .$$

Zazwyczaj wymaga się, by napięcie wyjściowe było większe od napięcia sterującego (wzorcowego), należy więc

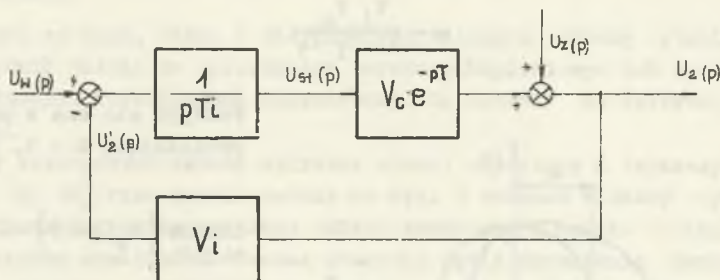


Rys. 4. Charakterystyki amplitudowo-fazowe

- 1) Cyklokonwertora $K_c(j\omega) = V_c e^{-j\omega\tau}$
- 2) Regulatora całkującego $K_1(j\omega) = \frac{V_1}{j\omega T_1}$
- 3) Otwartej pętli sprzężenia zwrotnego

$$K_o(j\omega) = \frac{V_1 \cdot V_c}{\omega T_1} \cdot e^{-j(\omega\tau + \frac{\pi}{2})}$$

w torze sygnału pomiędzy napięciem wyjściowym U'_2 , a napięciem U_2 podawanym na węzeł sumacyjny umieścić element proporcjonalny, który zapewni odpowiednią amplitudę podstawowej składowej napięcia wyjściowego cyklokonwertora. Schemat blokowy takiego układu przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Schemat blokowy cyklokonwertora z ujemnym napięciem sprzężeniem zwrotnym

Na rysunku widać rozbięcie regulatora całkującego na bloki całkujący i proporcjonalny. Celem tego drugiego jest zapewnienie odpowiedniej wartości składowej napięcia wyjściowego o częstotliwości podstawowej. Fragment charakterystyki a-f otwartej pętli sprzężenia zwrotnego dla warunku $\operatorname{Re} \{ K_o(j\omega) \} = -\frac{1}{\pi}$ wraz z naniesionymi okręgami M został narysowany na rys. 6. w takiej skali, by widać było kształt gdy amplituda dąży do zera. Z rysunku można odczytać, że charakterystyka a-f przecina się z okręgiem $M = 0,9$ przy częstotliwości $f_2 \approx \frac{m+1}{4}$. Częstotliwość ta jest znacznie wyższa od normalnie występujących częstotliwości napięcia wyjściowego cyklokonwertora, a więc praktycznie biorąc wzmacnienie cyklokonwertora objętego ujemnym napięciowym sprzężeniem zwrotnym jest dla składowej o częstotliwości podstawowej stałe.

Z warunku $M = 1$ wynika kolejno

$$U_w = U'_2,$$

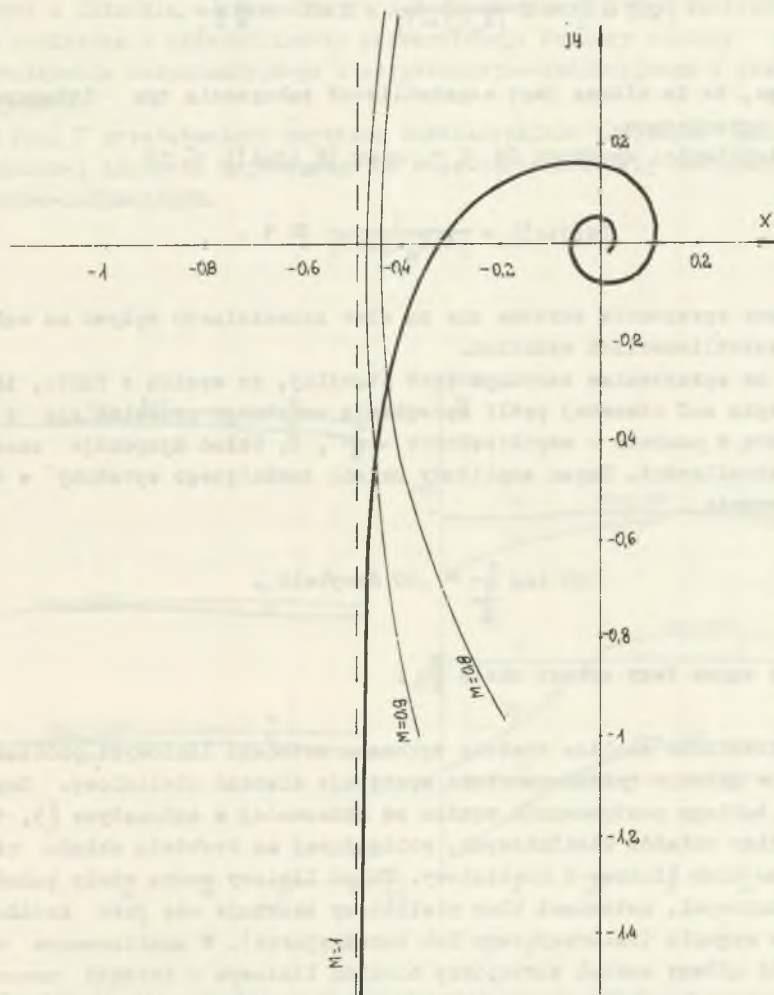
$$U'_2 = V_1 U'_2,$$

$$U_2 = \frac{1}{V_1} U_w, \quad (5)$$

gdzie U_w oznacza wartość skuteczną napięcia wzorcowego.

Przy ocenie składowej zaburzającej w napięciu wyjściowym cyklokonwertora objętego ujemnym napięciowym sprzężeniem zwrotnym wygodnie jest posłużyć się wskaźnikiem regulacji $q(j\omega)$, który podaje ile razy jest wię-

kszy uchyb w układzie objętym sprzężeniem zwrotnym niż w układzie otwartym [3, 5, 7].



Rys. 6. Charakterystyka amplitudowo-fazowa otwartej pętli sprzężenia zwrotnego dla warunku $\operatorname{Re} \{K_o(j\omega)\} = -\frac{1}{\pi}$

Dla badanego układu można napisać:

$$|q(j\omega)| = \frac{1}{|1+K_o(j\omega)|} = M \frac{1}{|K_o(j\omega)|}.$$

Dla częstotliwości niskich gdy $M \approx 1$ (składowa podstawowa i składowa niejednoznaczności) zachodzi:

$$|q(j\omega)| = M \frac{1}{|K_0(j\omega)|} = 2\omega\tau = \frac{2}{m} \frac{f}{f_1}. \quad (6)$$

Widać więc, że im niższa jest częstotliwość zaburzenia tym intensywniej jest ono ograniczane.

Dla częstotliwości wysokich ($M < 1$, oraz $|K_0(j\omega)| < 1$)

$$|q(j\omega)| = \frac{1}{|1+K_0(j\omega)|} \approx 1. \quad (7)$$

Zastosowane sprzężenie zwrotne nie ma więc zauważalnego wpływu na zaburzenia o częstotliwościach wysokich.

Układ ze sprzężeniem zwrotnym jest stabilny, co wynika z faktu, iż charakterystyka a-f otwartej pętli sprzężenia zwrotnego przecina się z osią rzeczywistą w punkcie o współrzędnych $-\frac{1}{T}$, 0. Układ dysponuje znacznym zapasem stabilności. Zapas amplitudy układu zamkniętego wyrażony w decybelach wynosi:

$$20 \log \frac{1}{\frac{1}{T}} \approx 10 \text{ decybeli}.$$

natomiast zapas fazy wynosi około $\frac{\pi}{2}$.

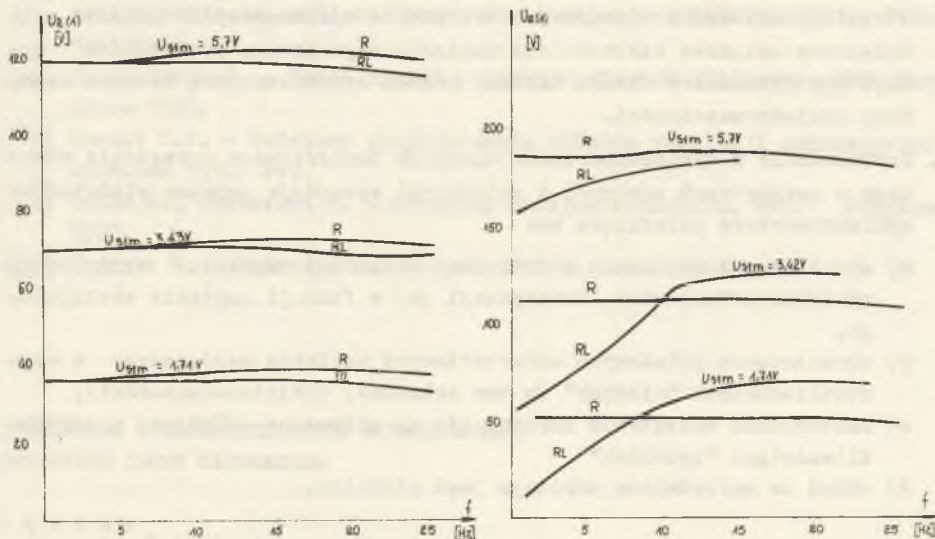
Przeprowadzona analiza została wykonana metodami liniowymi, podczas gdy w obwodzie głównym cyklokonwertora występuje element nieliniowy. Dopuszczalność takiego postępowania wynika ze stosowanej w automatyce [5, 16] metody analizy układów nieliniowych, polegającej na rozbiciu układu nieliniowego na blok liniowy i nieliniowy. Układ liniowy można wtedy badać metodami liniowymi, natomiast blok nieliniowy traktuje się jako źródło dodatkowego sygnału (zaburzającego lub korekcyjnego). W analizowanym układzie obwód główny został zastąpiony blokiem liniowym o średnim wzmacnieniu V_0 , zaś blok nieliniowy N stanowi źródło sygnałów zaburzających (rys. 1). Sygnał wyjściowy obwodu głównego składa się teraz z dwóch składowych: liniowej proporcjonalnej do sygnału sterującego oraz nieliniowej wchodzącej w skład sygnału zaburzającego. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że identyczne rezultaty można by otrzymać stosując do analizy metodę pierwszej harmonicznej.

4. Badania laboratoryjne

Przeprowadzone rozważania teoretyczne zostały poparte badaniami labo-

ratoryjnymi na zaprojektowanym przez autora i wykonanym w Instytucie Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki Politechniki Śląskiej modelu laboratoryjnym cyklokonwertera. Opracowany cyklokonwerter pracował w układzie o przewodzeniu jednokierunkowym i był zasilany 3-fazowym napięciem o częstotliwości przemysłowej. Pomiary zostały wykonane dla obciążenia rezystancyjnego i rezystancyjno-indukcyjnego z przewagą indukcyjności.

Na rys. 7 przedstawiono uzyskaną doświadczalnie zależność podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego od częstotliwości przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym.



Rys. 7. Zależność wartości skutecznej podstawowej składowej napięcia wyjściowego cyklokonwertera od częstotliwości, przy różnych napięciach sterujących

a) cyklokonwerter objęty ujemnym napięciowym sprzężeniem zwrotnym, b) cyklokonwerter pracujący w układzie otwartym

Pomiary zostały wykonane przy stałej amplitudzie napięcia zasilającego dla różnych wartości amplitudy napięcia sterującego. Autor badał również wpływ wartości napięcia zasilającego na podstawową harmoniczną napięcia wyjściowego. Jeśli idzie o składową niejednoznaczności napięcia wyjściowego to dla cyklokonwertera objętego ujemnym napięciowym sprzężeniem

zwrotnym w badanym zakresie częstotliwości nie stwierdzono jej obecności. Natomiast dla cyklokonwertora pracującego bez sprzężeń zwrotnych składowa niejednoznaczności pojawiała się w napięciu wyjściowym. Wartość jej była zawsze mniejsza od teoretycznie obliczonej maksymalnej możliwej wartości – tym niemniej dla obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego, powodowała nierównomierne obciążenie grup tyrystorów, a w pewnych przypadkach mogła powodować niestabilną pracę cyklokonwertora. Występowało to szczególnie wyraźnie przy częstotliwościach wyższych od 12 Hz.

5. Podsumowanie

Rezultaty przeprowadzonych rozważań można ująć w kilku punktach:

1. Cyklokonwertor nie objęty sprzężeniem zwrotnym stanowi człon nieliniowy, a jego napięcie wyjściowe zawiera cały szereg składowych wynikłych z modulacji napięcia zasilającego napięciem sterującym.
2. W cyklokonwertorach pracujących bez prądów wyrównawczych pojawia się dodatkowa składowa zaburzeniowa napięcia wyjściowego spowodowana dyskretnym działaniem układu blokady prądów wyrównawczych, nazwana składową niejednoznaczności.
3. Zastosowanie w cyklokonwertorze ujemnego napięciowego sprzężenia zwrotnego o parametrach zgodnych z zaleconymi spowoduje poprawę właściwości cyklokonwertora polegającą na:
 - a) stabilizacji amplitudy podstawowej składowej napięcia wyjściowego cyklokonwertora oraz linearyzacji jej w funkcji napięcia sterującego,
 - b) ograniczeniu składowych zaburzeniowych napięcia wyjściowego o częstotliwościach "niskich" (w tym składowej niejednoznaczności),
 - c) zastosowane sprzężenie zwrotne nie ma wpływu na składowe o częstotliwościach "wysokich"
 - d) układ ze sprzężeniem zwrotnym jest stabilny.

LITERATURA

- [1] Chamudchanow – Czastotnyje riegulirowanie. Taszkient 1966.
- [2] Firago B.I., Gotowski B.S., Liss Z.A. – Tiristornyje cikłokonwierty "Nauka i technika" Mińsk 1973.
- [3] Findeisen W. – Technika regulacji automatycznej, PWN W-wa 1965.
- [4] Głazenko T.A., Gonczarienko R.B. – Połuprowodnikowyje priobrazowatieli czastoty w elektropriwodach. Energia 1969.
- [5] Gille J.C., Decaulne P., Pelagrin M. – Serwomechanizmy, PWT W-wa 1961.
- [6] Krykowski K. – Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego

- sterowanego częstotliwościowo. Zeszyty Naukowe Pol. Sl. Nr 174. Elektryka zeszyt 27. Gliwice 1970 r.
- [7] Krykowski K. - Analiza pracy cyklokonwertora z ujemnym napięciowym sprzężeniem zwrotnym przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym. Gliwice 1974. Praca doktorska.
- [8] Lappe R.E. - Thyristor - Stromrichter fur Antriebsregulungen VEB Berlin 1970.
- [9] Oszczepkow O.N., Rowiński P.A. - Rabota asinchronnogo dwigatiela pri pitanii ot tiristornogo prieobrazowatiela czastoty s nieposredstwiennoj swiaziu, IZD, Nauka, Moskwa-Leningrad 1966.
- [10] Pelly B.R. - Thyristor phase controlled converters and cycloconverters. Copyright 1971, by John Willey, New York London Sydney Toronto.
- [11] Praca zbiorowa - Projektowanie przekształtników tyrystorowych WNT Warszawa 1974.
- [12] Siwiński J. - Bezpośredni tyrystorowy przemiennik częstotliwości w zastosowaniu do zasilania samotoków hutniczych, Gliwice 1971. Praca doktorska.
- [13] Szparkowski Z. - Zarys teorii regulacji układów liniowych. WNT Warszawa 1960.
- [14] Savant C.J. - Podstawy projektowania układów regulacji automatycznej Warszawa 1960. PWT.
- [15] Tunia H., Winierski B. - Podstawy energoelektroniki, WNT. Warszawa 1975.
- [16] Węgrzyn S. - Podstawy automatyki, PWN Warszawa 1963.

ПРИМЕНЕНИЕ В ЦИКЛОКОНВЕРТОРЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБОРОТНОЙ СВЯЗИ НАПЯЖЕНИЯ

Резюме

Применение в циклоконверторе блокады уравнивающих токов вызывает появление в выходном напряжении циклоконвертора добавочной составной возмущающей названной напряжением неоднозначности. Напряжение неоднозначности можно исключить, применяя отрицательную обратную связь напряжения и интегрирующий регулятор с настройкой подобранных согласно результатам проведенного анализа.

SOME ASPECTS OF NEGATIVE VOLTAGE FEED BACK IN CYCLOCONVERTER

Summary:

Application of circulating current blocking in a cycloconverter induces an appearance of additional distortion called inadequacy voltage. Inadequacy voltage can be eliminated by the application of a feed back control with an integral regulator, the adjustment of which is made according to the results of earlier carried out analysis.

Ważniejsze oznaczenia

f_1, f_2	- częstotliwość napięcia zasilającego i wyjściowego cyklokonwertora
$K_o(p), K_o(j\omega)$	- transmitancje operatorowe i widmowe cyklokonwertora, regulatora całkującego i otwartej pętli sprzężenia zwrotnego
$K_1(p), K_1(j\omega)$	
$K_o(p), K_o(j\omega)$	
q	- wskaźnik regulacji
T_i	- czas całkowania
u, U, U_m	- napięcie, wartość chwilowa, skuteczna, maksymalna
u_{st}, u_w, u_2, u_2	- napięcie sterujące, wzorcowe, wyjściowe, wyjściowe wprowadzone do poziomu napięcia sterującego
V_c, V_i	- wzmacnienie cyklokonwertora i regulatora
α	- kąt opóźnienia wyzwolenia tyrystora
τ	- czas martwy