

MARIUSZ KLYTTA

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i EnergoelektronikiANALIZA PROCESÓW KOMUTACYJNYCH W TYRYSTOROWYCH FALOWNIKACH
NIEZALEŻNYCH DLA CZĘSTOTLIWOSCIOWEGO STEROWANIA SILNIKAMI
ASYNCHRONICZNYMI

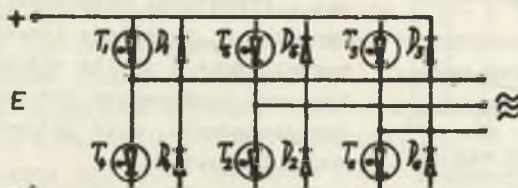
Streszczenie. Praca dotyczy zjawisk komutacyjnych w tyrystorowych falownikach niezależnych dla zasilania silników asynchronicznych. Zaproponowano analizę i dobór najkorzystniejszych struktur obwodów komutacyjnych na bazie rozpatrzenia układów wyłączania. Podano szereg realizacji wyżej wymienionych falowników opartych o wybrane układy wyłączania.

1. Wstęp

Częstotliwościowe sterowanie prędkością obrotową silnika asynchronicznego jest metodą szczególnie efektywną. Istotną częścią tyrystorowych przemienników częstotliwości mogących służyć do jego realizacji jest falownik. Rozważania z zakresu wymagań napędu, a także sposobów regulacji napięcia, skłaniają do wyboru niezależnych falowników napięcia z modulacją szerokościowo-impulsową napięcia [5], [6]. Mogą one być zasilane napięciem stałym o nieregulowanej wartości. Funkcje regulacji zarówno częstotliwości, jak i napięcia wyjściowego spełnia falownik. Problem komutacji należy do najtrudniejszych, a realizacje niezależnych falowników różnią się głównie sposobem urzeczywistnienia komutacji.

Zjawiska komutacyjne mają decydujący wpływ na energetyczne i eksploatacyjne wskaźniki falownika. Określają możliwości spełnienia wymagań napędu. Zależą od nich: roboczy przedział częstotliwości, przeciążalność i sprawność falownika, a także dopuszczalne prądy i napięcia na zaworach.

Rys. 1 przedstawia tyrystorowy niezależny falownik napięcia. Kompensacja mocy biernej obciążenia jest uzyskiwana drogą wymiany energii między fazami poprzez mostek diodowy prądów zwrotnych. Kondensatory komutacyjne



Rys. 1. Niezależny falownik napięcia

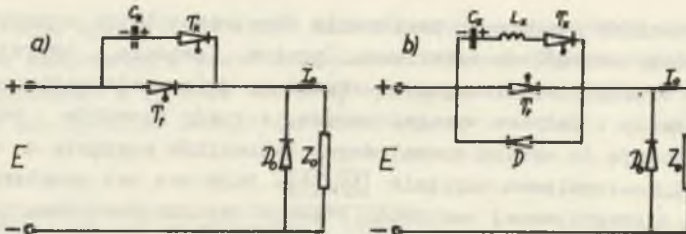
służą jedynie do komutacji tyrystorów [6]. Krótki czas komutacji, nie przekraczający w przeciętnych układach $200 \mu s$ (przy czasie wyłączenia tyrystora poniżej $100 \mu s$) oraz możliwość wyłączenia zaworu w dowolnym momencie niezależnie od stanu innych, zbliża je własnościami do zaworów pełni sterowalnych [4], [5]. Wykorzystana zasada komutacji impulsowej sprawia, że procesy robocze i komutacji są od siebie w znacznej mierze niezależne. Najbardziej właściwym podejściem dla potrzeb analizy zjawisk komutacyjnych i oceny możliwych rozwiązań, wydaje się prześledzenie procesu wyłączenia tyrystora roboczego jako najistotniejszego etapu komutacji.

Podane wyżej własności niezależnych falowników napięcia wskazują na możliwość oparcia się o analizę układów wyłączenia tyrystorów.

2. Analiza porównawcza układów wyłączenia

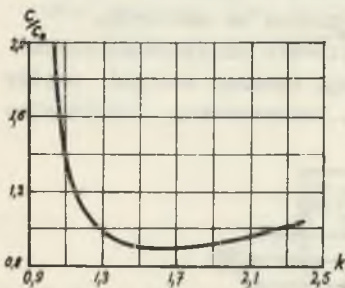
Przyjmijmy następujące założenia upraszczające:

- elementy układów idealne i bezstratne
- obwody drgające bez tłumienia
- prąd obciążenia pozostaje w czasie komutacji niezmienny.



Rys. 2. Przykładowe realizacje układów wyłączenia

Ostatnie założenie jest uzasadnione krótkim czasem trwania komutacji oraz dużą indukcyjnością obciążenia (faza silnika, obciążenie typu RL). Dla przejrzystości pominięto na rysunkach układy sterowania i zabezpieczeń.



Rys. 3. Zależność względnej wartości pojemności komutacyjnej od współczynnika kształtu dla układu z rys. 2b.

Nie uwidoczniiono układów, przy pomocy których wytworzone zostało na kondensatorze przed komutacją napięcie początkowe potrzebnej wartości i znaku. Nie mają one bezpośredniego wpływu na proces. W układzie wyłączenia o strukturze przedstawionej na rys. 2a tyrystor T_R przestaje przewodzić praktycznie bezzwłocznie z chwilą włączenia tyrystora T_K . Ponieważ kondensator przeładowywany byłby prądem obciążenia, więc potrzebna wartość pojemności C_K byłaby:

$$C_0 = \frac{T_0 t_{wyk}}{U(0)} \quad (1)$$

Wady takiego układu dyskwalifikują go dla bezpośredniego stosowania w falownikach.

Wady te można wyeliminować wprowadzeniem dławika komutacyjnego oraz diody bocznikującej wstecznie tyrystor roboczy (Rys. 2b). Dławik L_k ogranicza szybkość narastania prądu w gałęzi tyrystora T_k , istnienie diody D zabezpiecza czas przeładowania kondensatora C_k mało zależny od obciążenia oraz łagodzi warunki pracy tyrystora T_r .

Prąd i_k ma postać:

$$i_k = \frac{U(0)}{\phi_0} \sin \omega_0 t \quad (2)$$

W chwili $t_w = \frac{1}{\omega_0} \arcsin \frac{1}{k}$ prąd i_k osiąga wartość prądu obciążenia. Czas wyłączenia tyrystora T_r :

$$t_{wy\ddot{z}} < t_d = \frac{1}{\omega_0} 2 \arctg \sqrt{k^2 - 1}, \quad (3)$$

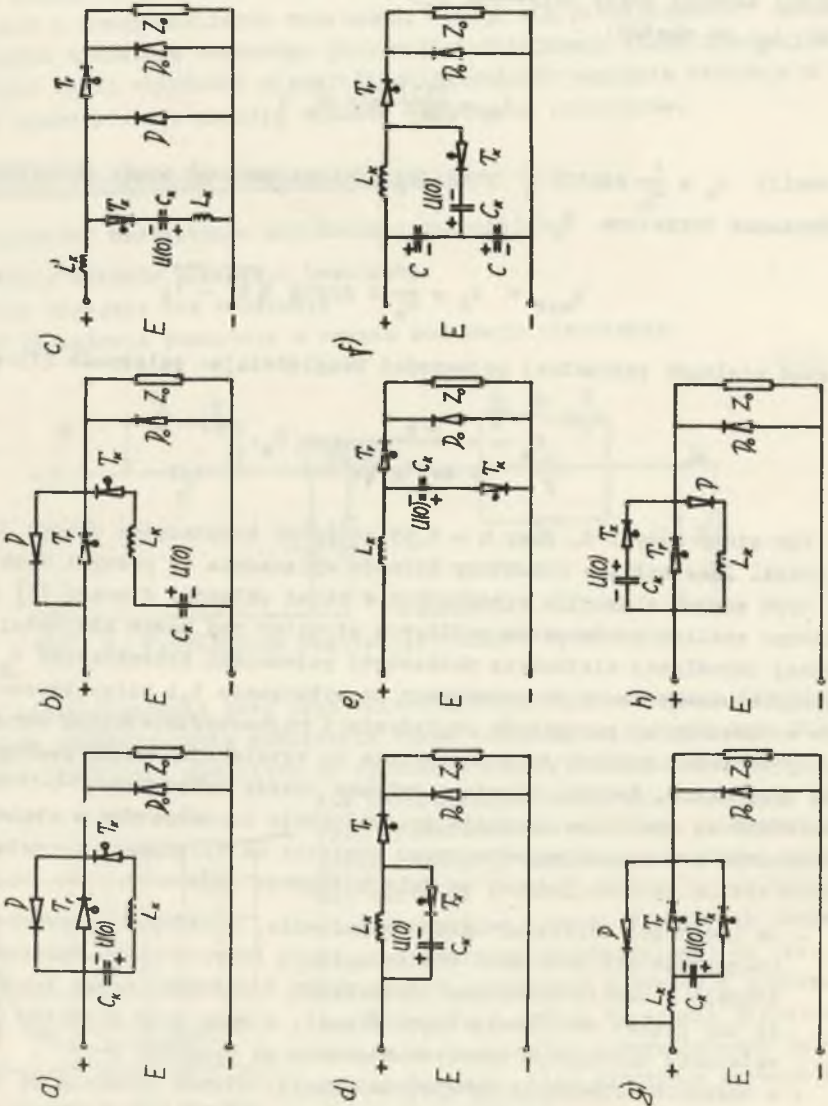
a stąd wielkość potrzebnej pojemności uwzględniając zależność (1) wynosi

$$C_k = \frac{k}{2 \arctg \sqrt{k^2 - 1}} C_0. \quad (4)$$

Jak widać z rys. 3, przy $k = 1,55$ zdolność komutacyjna układu jest największa. Inne możliwe struktury układów wyłączania są pewnymi kombinacjami tych samych elementów wchodzących w skład układów. W pracy [3] przeprowadzono analizę porównawczą możliwych struktur pod kątem zdolności komutacyjnej określonej wielkością potrzebnej pojemności kondensatora $C_k = f(k)$ zabezpieczonego czasu dysponowanego na wyłączenie t_d ; niezależności warunków wyłączania od parametrów obciążenia i najkorzystniejszych warunków pracy tyrystorów. Analiza ta doprowadziła do wyselekcjonowania szeregu układów wyłączania. Na rys. 4 podano wybrane układy wyłączania.

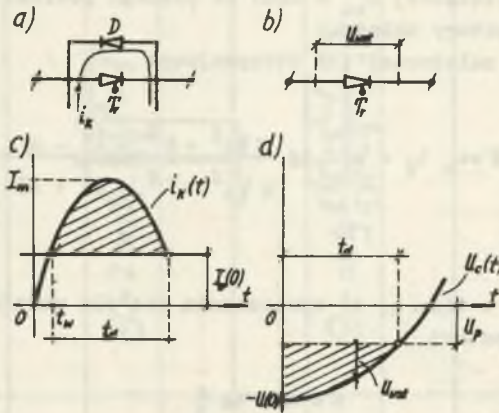
Wszystkie są oparte na zasadzie przeładowania kondensatora w obwodzie rezonansowym z utrzymaniem wstecznego napięcia na wyłączanym tyrystorze. Celowym wydaje się ich podział na dwie kategorie [8]:

- Do pierwszej zaliczymy układy wyłączania, w których tyrystor roboczy bocznikuje się wstecznie włączoną diodą (rys. 4 a-c), Wyłączenie następuje w czasie przepływu przez diodę D nadwyżki prądu komutacyjnego nad prądem obciążenia (rys. 5 a,c), a więc przy niedużym napięciu wstecznym określonym spadkiem napięcia na diodzie.
- w układach wyłączania drugiej kategorii, dławik komutacyjny znajduje się w gałęzi tyrystora roboczego (rys. 4 d-g) lub w gałęzi z diodą D (rys. 4 h). Tyrystor T_r jest wyłączany w warunkach znacznego napięcia wstecznego (rys. 5 b,d).



Rys. 4. Wybrane układy wyłączania:

a do c - I kategorii (1 grupy) d do f oraz g i h - II kategorii (2 i 3 grupy)



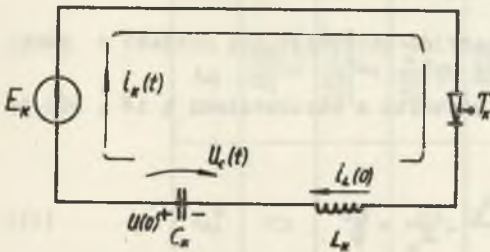
Rys. 5. Wykresy czasowe napięcia i prądu kondensatora C_k podczas procesu wyłączenia

Dla obu można odnieść schemat obliczeniowy z rys. 6. Wielkość $U(0)$ i $i_L(0)$ charakteryzują wartości początkowe w analizowanych układach. Dla układów 1 kategorii prąd $i_L(0)$ równy jest zeru, zaś dla drugiej kategorii układów wyłączenia prąd ten jest równy wartości prądu obciążenia $I_o(0)$ przed procesem komutacji.

Na podstawie schematu obliczeniowego mamy dla układów 2 kategorii

$$L_k C_k \frac{d^2 U_c(t)}{dt^2} + U_c(t) = E_k, \quad (5)$$

gdzie E_k - napięcie źródła prądu stałego, wchodzące do obwodu przeładowania kondensatora C_k .



Rys. 6. Wspólny schemat obliczeniowy układów wyłączenia

Rozwiązanie równania z uwzględnieniem warunków początkowych i po wprowadzeniu oznaczeń

$$\xi = \frac{U(0) + E_k}{E}; \quad q = \frac{\Phi_o I_o}{E} \quad (6)$$

ma postać

$$U_c(t) = -E \sqrt{q^2 + \xi^2} \cos(\omega_o t + \arctg \frac{q}{\xi}) + E_k. \quad (7)$$

Czas dysponowany na wyłączenie jest określany rozładowaniem kondensatora C_k od wartości początkowej $U_{C_0} = U(0)$ do pewnego poziomu U_p (rys. 5 d) wynikającego ze struktury układu.

Stąd na podstawie zależności (7) otrzymujemy:

$$\theta = \omega_0 t_d = \arctg \frac{\xi \sqrt{q^2 + \xi^2 - A^2} - A q}{q \sqrt{q^2 + \xi^2 - A^2} + A \xi} \quad (8)$$

gdzie $A = \frac{E_k - U_p}{E}$

Charakterystyki $\theta = f(\xi, q, A)$ upraszczają się dla układów z rys. 4 g, h wobec $A = 0$ do postaci

$$\theta = \arctg \frac{\xi}{q} \quad (9)$$

Analogicznie dla układów 1 kategorii wychodząc z równania prądu

$$i_k(t) = \frac{\xi E}{\phi_0} \sin \omega_0 t$$

otrzymujemy

$$\theta = 2 \arctg \sqrt{\left(\frac{\xi}{q}\right)^2 - 1}. \quad (10)$$

W układach 2 kategorii procesy komutacyjne zaczynają się niejako w punkcie odpowiadającym chwili t_w (rys. 5 c).

Rzutuje to na związek współczynnika kształtu z wielkościami q i ξ . Dla układów 1 kategorii

$$k = \frac{U(0) + E_k}{\phi_0} \cdot \frac{1}{I_0} = \frac{\xi}{q} \quad (11)$$

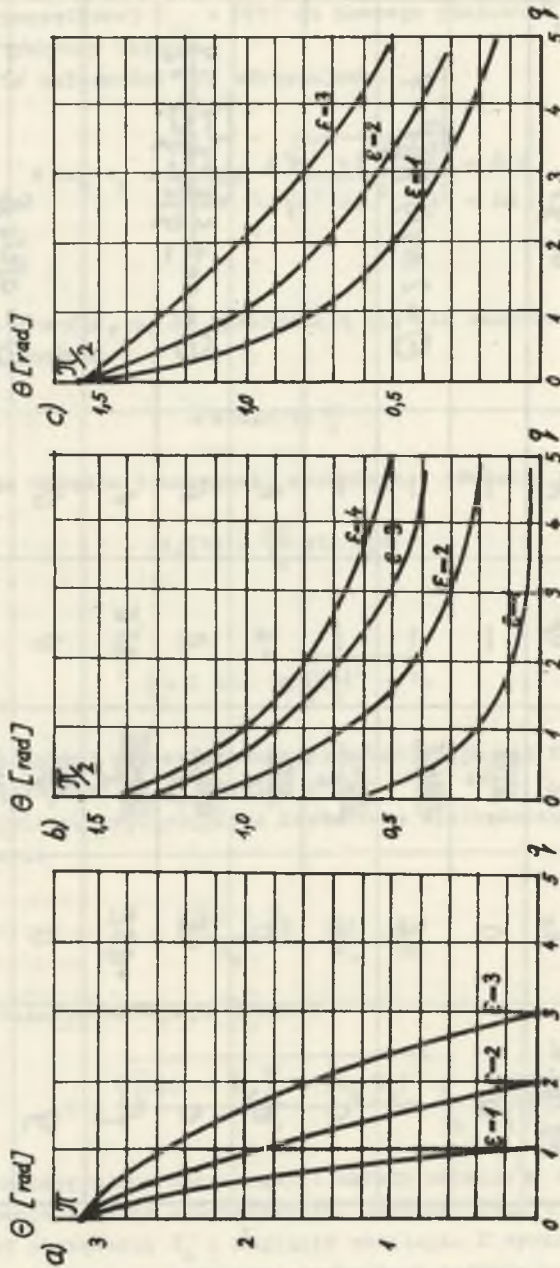
natomiast dla układów kategorii drugiej

$$k = \frac{\sqrt{[U(0) + E_k]^2 + (\phi_0 T_0)^2}}{\phi_0} \frac{1}{I_0} = \sqrt{\left(\frac{\xi}{q}\right)^2 + 1} \quad (12)$$

Wielkości charakteryzujące poszczególne układy zebrano w tabelicy 1, zaś rys. 7 przedstawia rodziny charakterystyk komutacyjnych trzech wyróżnionych grup. Prąd obciążenia I_0 i napięcie zasilania E wyrażone przez współczynnik obciążenia q są zewnętrznymi czynnikami zaburzającymi wpływającymi na kąt θ . Współczynnik ξ ma sens sumarycznej SEM działającej w obwodzie komutacyjnym odniesionej do napięcia zasilania.

Tablica I

Mg rys. 4.	E_x	ϵ	U_p	A	$\theta(q)$
a	0	$\frac{U(0)}{E}$	-	-	
b	-E	$\frac{U(0)-E}{E}$	-	-	$\theta = 2 \arctg \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{q}\right)^2 - 1}$
c	+E	$\frac{U(0)+E}{E}$	-	-	
d	0	$\frac{U(0)}{E}$	-E	1	
e	+E	$\frac{U(0)+E}{E}$	0	1	$\theta = \arctg \frac{\epsilon \sqrt{\epsilon^2 + q^2 - 1} - q}{q \sqrt{\epsilon^2 + q^2 - 1} + \epsilon}$
f	+0,5E	$\frac{U(0)+0,5E}{E}$	-0,5E	1	
g	0	$\frac{U(0)}{E}$	0	0	
h	0	$\frac{U(0)}{E}$	0	0	$\theta = \arctg \frac{\epsilon}{q}$



Rys. 7. Charakterystyki komutacyjne trzech wyróżnionych grup układów wyłączenia z rys. 4

Układy o większej zdolności komutacyjnej zapewniają przy identycznych wartościach napięcia początkowego $U(0)$ większą wartość kąta θ , a w jednakowych stanach pracy wymagają mniejszej pojemności kondensatora C_k .

Ze wzrostem napięcia $U(0)$ (zwiększenie ξ) charakterystyki $\theta(q)$ stają się bardziej sztywne i zdolność komutacyjna podwyższa się. Na płaszczyźnie fazowej (rys. 8) w osiach $U_c(t) + E_k + i_k(t)$ przedstawiono pracę pojemności komutacyjnej zaczynając od momentu włączenia tyrystora T_k , dla trzech układów (rys. 4 a, e, g) z których każdy odpowiada innej rodzinie charakterystyk komutacyjnych. Skale na osiach obrano tak, aby trajektorie fazowe stanowiły wycinki okręgów.

Dla układu z rys. 4 g trajektoria zaczyna się w pktcie 3. Odcinek 0-3 określa pełny zapas energii oscylacyjnej, przy czym odcinek 1-3 charakteryzuje prąd początkowy dławika $i_L(0) = I_0$, a odcinek 0-1 napięcie $U(0)$ kondensatora. Proces wyłączenia musi zakończyć się przed rozładowaniem kondensatora, a więc w czasie określonym kątem θ' .

W układzie z rys. 4 a proces komutacyjny rozpoczyna się w pkt. 2 określonym napięciem początkowym $U(0)$ na kondensatorze. Po wyparciu prądu z gałęzi tyrystora T_r , w chwili 3 zaczyna się jego wyłączenie.

W chwili 5 napięcie na tyrystorze T_r staje się dodatnie. Tak więc:

$$\theta'' = \omega_0 t_d'' = 2\theta' \quad (13)$$

Dla układu z rys. 4 e procesy zaczynają się w pktcie 3. Tyrystor T_r przestaje przewodzić praktycznie bezzwłocznie. W odróżnieniu od obu poprzednich układów w obwód przeładowania kondensatora

wchodzi tu napięcie zasilania E . Niech odcinek 1-6 na płaszczyźnie fazowej określa wartość napięcia początkowego $U(0)$, a odcinek 0-6 wartość napięcia E . Kąt dysponowany na wyłączenie to θ'' . Zauważmy, że

$$\lim_{I_0 \rightarrow 0} \theta' = \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

oraz

$$\lim_{I_0 \rightarrow 0} \theta'' = \pi \quad (\text{por. z rys. 7 a, c})$$

Jak wiadomo czasy wyłączenia w warunkach małych (np. rzędu 2-3 V) napięć wstecznych, co ma miejsce w układach wyłączenia 1 kategorii, są w przybliżeniu 2-krotnie większe od katalogowych. Tak więc przy jednakowych param-

trach obwodu, grupy układów reprezentowane przez układy wyłączania a i g z rys. 4, z pktu widzenia zdolności komutacyjnej, są w przypadkach komutowania niewielkich prądów obciążenia równoważne. Z wzrostem I_0 efektywniejsza okazuje się grupa do której zaliczyliśmy układ g z rys. 4.

Porównanie odpowiednich charakterystyk komutacyjnych potwierdza podane wnioski. Charakterystyki z rys. 7 c wykazują największą sztywność.

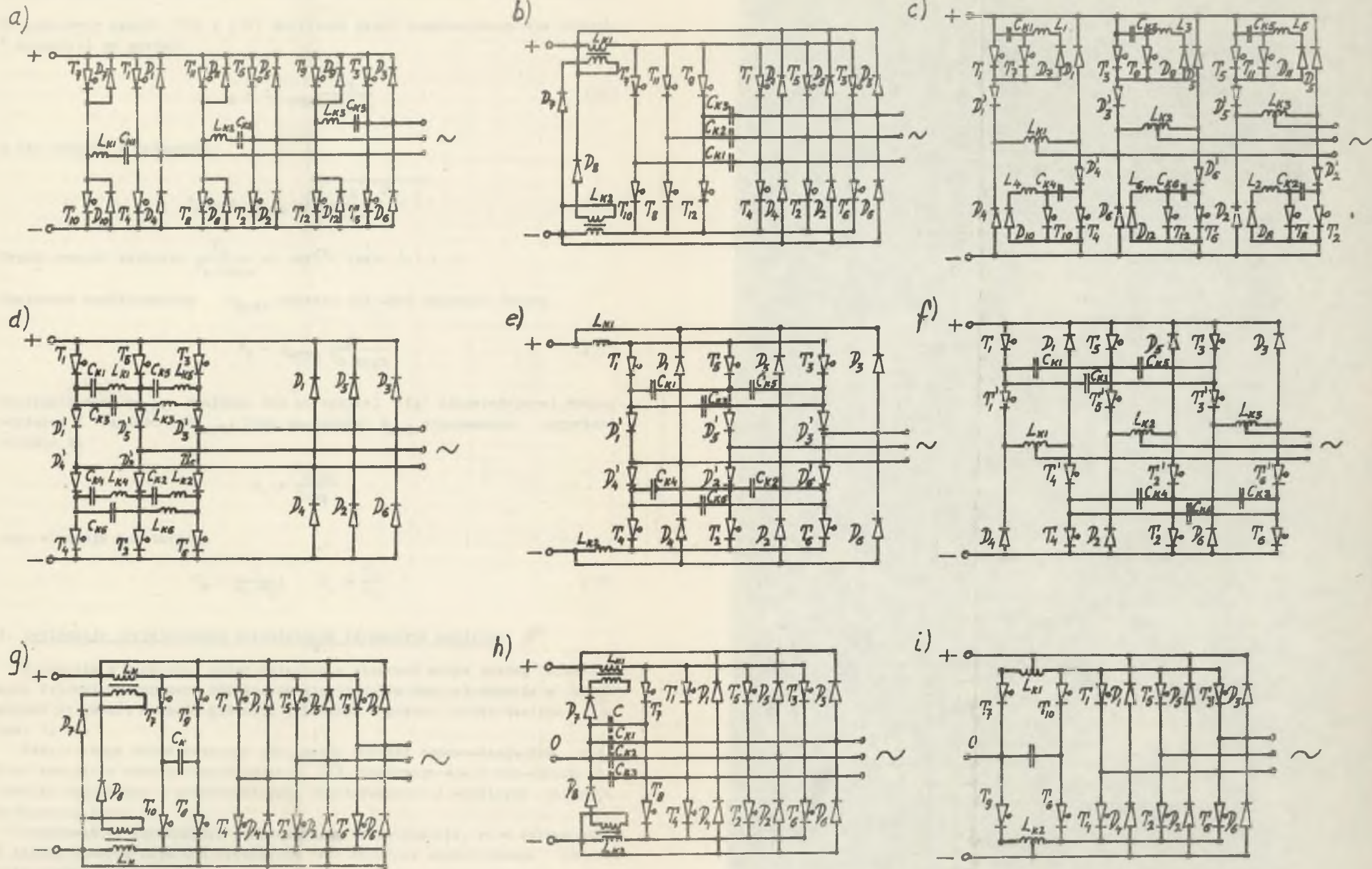
Trzeci z rozpatrywanych układów (rys. 4 e) zapewnia najmniejszy kąt wyłączania θ'' . Cechuje go znaczny wzrost napięcia kondensatora w końcu procesu przełączania. Celowym jest stosowanie tego układu w falownikach o niskich napięciach zasilania (np. 100–200 V). Układy tej grupy (rys. 4 d-f) odpowiadające rodzinie charakterystyk z rys. 7 b, z powodu rozłączności obwodu komutacji i obwodu prądu obciążenia, pozwalają na szeroki zakres regulacji częstotliwości napięcia wyjściowego falownika. Jednakże wobec małej wartości kąta θ , dużej stromości i wartości napięcia wstecznego na tyrystorze roboczym układy te mogą stwarzać trudne warunki pracy dla zaworów. Duże napięcie wsteczne i związany z tym wzrost strat komutacyjnych cechuje wszystkie układy wyłączania 2 kategorii. Układy 1 kategorii stawiają tyrystorom mniejsze wymagania zapewniając około dwukrotnie większy kąt θ .

3. Obliczenia elementów komutacyjnych

Korzystając z charakterystyk komutacyjnych można zaproponować porządek obliczeń układów wyłączania. Danymi wyjściowymi do obliczeń elementów są: napięcie zasilania falownika E, a także wartość przedkomutacyjnych prądów I_0 . Są one bezpośrednio związane z parametrami wyjściowymi układu (prądy i napięcia faz silnika).

Wybór napięcia początkowego $U(0)$ powinien uwzględniać warunek nieprzekraczania dopuszczalnych napięć maksymalnych na zaworach układu. Wartość $U(0)$ zależy od napięcia zasilania E i struktury układu (w szczególności od postaci obwodów odprowadzania nadmiaru energii). W zależności od konkretnych warunków napięcie początkowe kondensatora może być rzędu $0,5 \div 2 E$. Obliczenia elementów komutacyjnych powinny być przeprowadzane dla najtrudniejszego stanu pracy układu. Można go określić z pomocą charakterystyk komutacyjnych. Następnie stawia się zadanie określenia współczynnika q_{kryt} dla tego stanu. W wypadku odbiorów wymagających podwyższonych częstotliwości napięcia zasilania (np. silnik asynchroniczny wysokoobrotowy) dla zabezpieczenia minimalnego czasu komutacji wybierać należy najmniejszy możliwy współczynnik q_{kryt} .

Dla wyboru q_{kryt} stosować można kilka kryteriów: np. kryterium minimum koniecznej dla komutacji energii kondensatora C_k , minimum energii traconej w układzie wyłączania itp. Prowadzi to w ogólności do innych niż $k=1,55$ (rys. 3) wartości optymalnych (przy znajomości $U(0)$, a więc i δ , dobór współczynnika q jest wobec zależności (11) i (12) równoważny określeniu współczynnika kształtu).



Rys. 9. Niezależne falowniki o indywidualnej (a - c), międzyfazowej (d - f) i wspólnej komutacji (g - i) oparte na układach wyłączenia z rys. 4

Na podstawie wzorów (11) i (12) amplituda prądu komutacyjnego dla układów 1 kategorii ma postać:

$$I_m = I_o \text{ kryt} \frac{\varepsilon}{q_{\text{kryt}}} \quad (15)$$

a dla układów 2 kategorii

$$I_m = I_o \text{ kryt} \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{q_{\text{kryt}}}\right)^2 + 1} \quad (16)$$

Współczynniki kształtu $\frac{I_m}{I_o \text{ kryt}}$ są zwykle rzędu 1,1 ÷ 2.

Znajomość współczynnika q_{kryt} pozwala obliczyć oporność falową

$$\phi_o = q_{\text{kryt}} \frac{E}{I_o \text{ kryt}} \quad (17)$$

Następnie dla q_{kryt} znajduje się na krzywej $\theta(q)$ odpowiadającej znanej wartości ε wartość θ_{kryt} . Przy znajomości $t_{\text{wył}}$ stosowanego tyrystora określa to

$$\omega_o = \frac{\theta_{\text{kryt}}}{t_{\text{wył}}}$$

oraz elementy komutacyjne

$$C_k = \frac{1}{\omega_o \cdot \phi_o}; \quad L_k = \frac{\phi_o}{\omega_o} \quad (18)$$

4. Realizacje tyrystorowych niezależnych falowników napięcia

W oparciu o konkretny układ wyłączania zbudować można szereg niezależnych falowników napięcia różniących się sposobem jego wbudowania w niezmienną strukturę obwodów głównych falownika o postaci przedstawionej na rys. 1.

Różnice mogą także dotyczyć realizacji obwodów odprowadzających nadmiar energii z obwodów komutacyjnych [6]. Otrzymuje się w ten sposób falowniki niezależne o indywidualnych, międzyfazowych i wspólnych układach wyłączania (rys. 9).

Kondensatory komutacyjne są oddzielone od obciążenia, co w falownikach o międzyfazowych układach wyłączania jest wyraźnie zaakcentowane istnieniem zaworów odcinających.

Tyrystory $T_1 \div T_6$ są tyrystorami roboczymi, $T_7 \div T_{12}$ pomocniczymi. Gałęzie komutacyjne $L_k - C_k$ są włączane za pomocą tyrystorów pomocniczych w obwody tyrystorów roboczych.

W falownikach z rys. 9 d-f rolę tyrystora pomocniczego spełnia tyrystor roboczy sąsiedniej wchodzącej do pracy fazy. Diody $D_1 - D_6$ spełniają rolę "diod bocznikujących" druga z diod danej fazy jest "diodą zerową" (diody D i D_0 z rys. 4).

Przykłady falowników dobrano tak, aby stanowiły realizacje wyselekcjonowanych uprzednio układów wyłączania z rys. 4. Jak łatwo dostrzec na etapie wyłączania któregoś z tyrystorów roboczych tworzą się w falownikach obwody o strukturach identycznych z analizowanymi układami wyłączania [3] Ograniczmy się do przyporządkowania układom wyłączania z rys. 4 przykładowych realizacji z rys. 9.

Układ wyłączania rys. 4 a:

- falownik o komutacji indywidualnej rys. 9 a
- falownik o komutacji międzyfazowej rys. 9 d

Układ wyłączania rys. 4 g

- falownik o komutacji indywidualnej rys. 9 b
- falownik o komutacji międzyfazowej rys. 9 e

Układ wyłączania rys. 4 h

- falownik o komutacji indywidualnej rys. 9 c
- falownik o komutacji międzyfazowej rys. 9 f

Układ wyłączania rys. 4 e

- falownik o komutacji wspólnej rys. 9 g

5. Wnioski

Znaczna niezależność komutacji i procesów roboczych, a także krótki czas procesu komutacji w tyrystorowych falownikach z impulsową komutacją, daje możliwość uzyskania szeregu informacji o procesach komutacyjnych poprzez analizę własności wyizolowanego układu wyłączania.

Analiza układów wyłączania różnymi metodami wskazuje że:

- każda ze struktur posiada swoją specyfikę określającą w dużym stopniu obszar zastosowań wykorzystującego ją falownika,
- istnieje możliwość znalezienia dostatecznie ogólnego kryterium podziału układów wyłączania na kategorie różniące się stwarzanymi przez nie warunkami wyłączania i zaproponowania wspólnej metodyki obliczeń,
- istniejąca obecnie znaczna liczba niezależnych falowników napięcia oparta jest na wykorzystaniu stosunkowo niewielkiej ilości struktur układów wyłączania różniąc się sposobem ich wbudowania.

Przy rozpatrywaniu procesów komutacyjnych w konkretnym falowniku można uzyskać kompletne informacje poprzez uwzględnienie także pozostałych etapów procesu komutacji i rezygnację z przyjętych założeń upraszczających [3], [5].

Oznaczenia przyjęte w pracy:

- E - napięcie zasilania
- T_r, T_k - tyrystory - roboczy i pomocniczy (komutacyjny)
- L_k, C_k - indukcyjność i pojemność komutacyjna
- ϕ_o, ω_o - oporność falowa gałęzi komutacyjnej $\phi_o = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}$ i jej często-
tliwość kątowna własna $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}}$
- D, D_o - diody - bocznikująca tyrystor roboczy i zerowa
- t_w, t_{wy}, t_d - czas wypierania prądu z gałęzi tyrystora roboczego, czas wy-
łączenia oraz czas dysponowany na wyłączenie
- I_o, i_k - prądy - obciążenia i komutacyjny (prąd kondensatora C_k)
- I_m, k - maksymalna wartość prądu i_k oraz współczynnik kształtu $k = \frac{I_m}{I_o}$
- $U(0), U_{co}$ - wartość początkowa napięcia kondensatora C_k (przed komuta-
cją) oraz w chwili przyłożenia do tyrystora T_r napięcia
wstecznego.

LITERATURA

1. Gentry F.E. Tyrystory - półprzewodnikowe prostowniki sterowane - WNT Warszawa 1969.
2. Gogolewski Z., Kuczewski Z. - Napęd elektryczny, WNT Warszawa 1971.
3. Klytta M. - Komutacja w przemienniku częstotliwości z pośredniczącym obwodem prądu stałego do zasilania silnika asynchronicznego klatkowego Pracy dyplomowa - Gliwice 1972.
4. Luciński J. - Układy tyrystorowe - WNT Warszawa 1972.
5. Sandler A. Gusiackij Ju. Tiristornyje inwertory s szirotno impulsnoj modulaciej - Energija Moskwa 1968.
6. Sitnik N. - Avtonomyje inwertory na tiristorach s otdzielennymi ot na-gruzki kondensatorami - Energija Moskwa 1968.
7. Tunia H. Winiarski B. - Układy elektroniczne w automatyce napędowej - WNT Warszawa 1969.
8. Zabrodin Ju.S. Kommutacionnyje charakteristiki uzłow prinuditelnoj kom-mutacji tiristorov - Elektrotechnika 1971, nr 9.

АНАЛИЗ КОММУТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТИРИСТОРНЫХ ИНВЕРТОРАХ
НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩИХ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Р е з ю м е

Работа касается коммутационных явлений в тиристорных инверторах напряжения, предназначенных для питания асинхронных двигателей. Проведен анализ и выбор наиболее выгодных структур коммутационных цепей на базе анализа устройств выключения.

Дан ряд реализаций вышеупомянутых инверторов на основе выбранных устройств выключения.

THE ANALYSIS OF THE COMMUTATION PROCESS IN THE THYRISTOR INVERTERS
WITH FORCED COMMUTATION, CONTROLLING ASYNCHRONOUS MOTORS

S u m m a r y

The paper concerns commutation effects of thyristor inverters, with forced commutation, controlling asynchronous motors. The analysis and choice of the best arrangement of the commutation circuit is suggested on basis of examination of switching off systems. A number of realizations of mentioned above inverters based on selected switching off systems is given.