

Waldemar KEMPSKI

PROCESY KOMUTACYJNE FALOWNIKÓW PRĄDOWYCH

Streszczenie. Przedstawiono wyznaczona analitycznie przebiegi komutacyjne falowników prądowych o komutacji fazowej i międzyfazowej. Wykazano, że mimo różnej konfiguracji układów przebiegi komutacyjne w obydwu typach falowników są wyrażone takimi samymi zależnościami.

1. Wstęp

W zautomatyzowanym kopalnianym napędzie elektrycznym aktualnym problemem jest opracowanie układu napędowego przeznaczonego do pracy ze sterowaną prędkością obrotową i dostosowanego do pracy w atmosferze wybuchowej. Trudności konstrukcyjne w realizacji ognioszczelnego silnika prądu stałego powodują wzrost zainteresowania układami do częstotliwościowego sterowania prędkości obrotowej silników prądu zmiennego. Silniki te napędzają większość maszyn urabiających i transportowych w górnictwie.

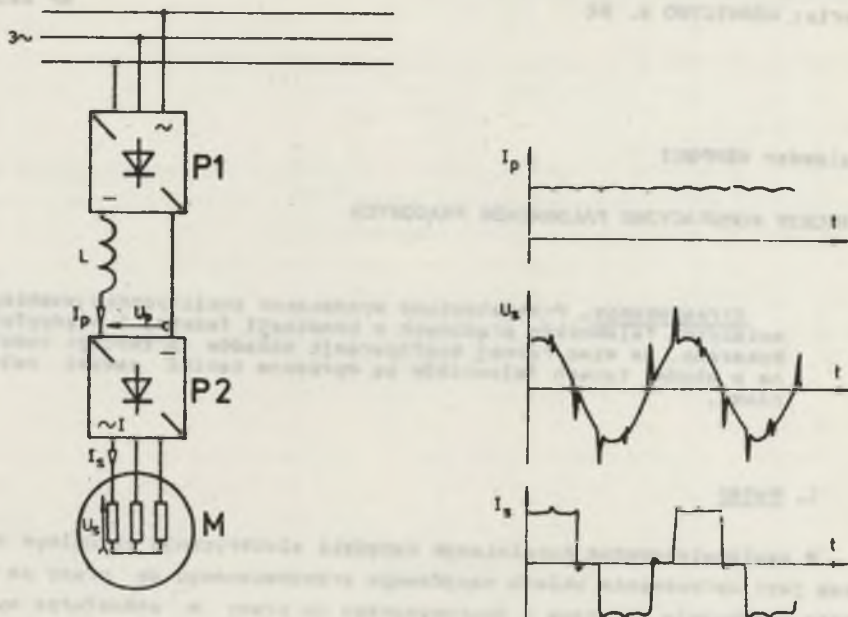
Źródłem zasilania silników sterowanych częstotliwościowo są przemienniki częstotliwości. Przetwarzają one częstotliwość sieci przemysłowej na częstotliwość nastawianą w szerokich granicach oraz umożliwiają zmianę innych parametrów energii elektrycznej jak napięcie lub prąd.

Na rys. 1.1 przedstawiono schemat blokowy części energetycznej oraz charakterystyczne przebiegi elektryczne przemiennika częstotliwości z wymuszonym prądem w obwodzie pośredniczącym. Przemiennik składa się z prostownika P1, obwodu pośredniczącego z dławikiem o znacznej indukcyjności L oraz falownika prądowego P2.

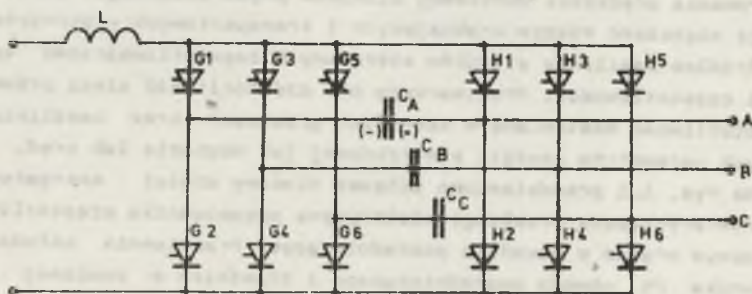
Napięcie wyjściowe przemiennika jest praktycznie sinusoidą z nałożonymi przepięciami powstałymi w procesie komutacji. Przepięcia te są podstawowym ograniczeniem możliwości i zastosowań układu. Mają wpływ na pracę zasilanego silnika, decydują o klasach napięciowych przyrządów półprzewodnikowych przemiennika i o mocy granicznej napędu.

Przebiegi komutacyjne są uzależnione od konfiguracji części energetycznej falownika. Obecnie znane są dwa układy trójfazowych falowników prądowych.

W układzie przedstawionym na rys. 1.2 komutacja jest realizowana przy użyciu dwóch tyrystorów komutacyjnych oraz kondensatora komutacyjnego, oddzielnie dla każdej fazy. Jest to układ o komutacji fazowej. W układzie z rys. 1.3 w komutacji biorą udział tyrystory główne i kondensatory komu-



Rys. 1.1. Schemat blokowy i charakterystyczne przebiegi elektryczne prze- miennika częstotliwości z falownikiem prądowym

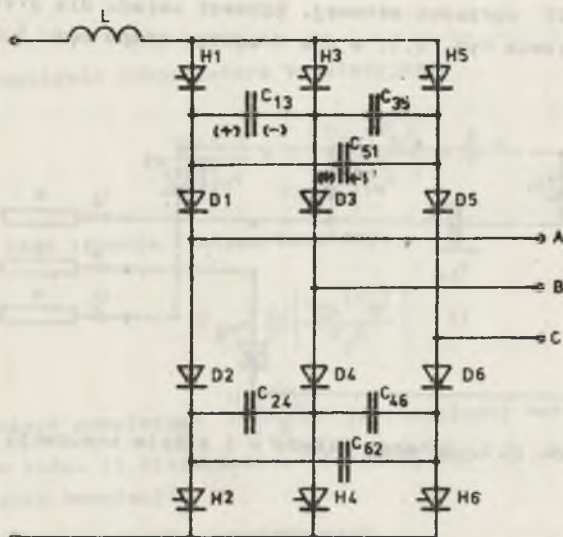


Rys. 1.2. Schemat falownika prądowego o komutacji fazowej

tacyjne włączone między fazy. Komutacja jest realizowana przez następstwo faz i ma charakter międzyfazowy.

W literaturze znane są opisy procesów komutacyjnych trójfazowych falowników prądowych o komutacji fazowej [1], [2] i o komutacji międzyfazowej [3], [4], [5]. Różne założenia wyjściowe i różna metodyka obliczeń utrudniają ich porównanie.

Artykuł jest próbą ujednoczonego opisu procesu komutacyjnego falownika prądowego o komutacji fazowej i międzyfazowej.



Rys. 1.3. Schemat falownika prądowego o komutacji międzyfazowej

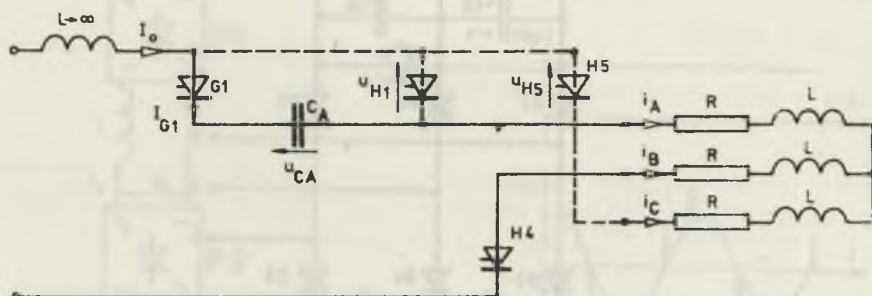
2. Proces komutacyjny falownika o komutacji fazowej

Jeżeli w stanie ustalonym przewodzą np. tyrystory H1 i H4 (rys.1.2), to w następnym kroku powinny przewodzić tyrystory H4 i H5, H5 i H2 itd. Przełożenie prądu z przewodzącego tyrystora H1 na następny - H5 wymaga podania impulsu wyzwalającego na tyrystor komutacyjny G1. Wyzwolenie tyrystora G1 powoduje przyłożenie do tyrystora H1 kondensatora komutacyjnego C_A naładowanego jak na rysunku i przejście tyrystora H1 w stan zaporowy. Prąd wymuszony przez dławik obwodu pośredniczącego płynie teraz przez tyrystor G1 i przeładowuje kondensator C_A . Napięcie tyrystora H5 spolaryzowanego początkowo zaporowo zwiększa się wraz z napięciem kondensatora. W chwili, gdy napięcie tyrystora H5 przechodząc z polaryzacji zaporowej w stan blokowania osiąga zero, powstają warunki do wyzwolenia H5. Praktycznie impuls wyzwalający H5 podaje się równocześnie z impulsem wyzwalającym G1, zapewniając odpowiednio długi czas trwania tego impulsu.

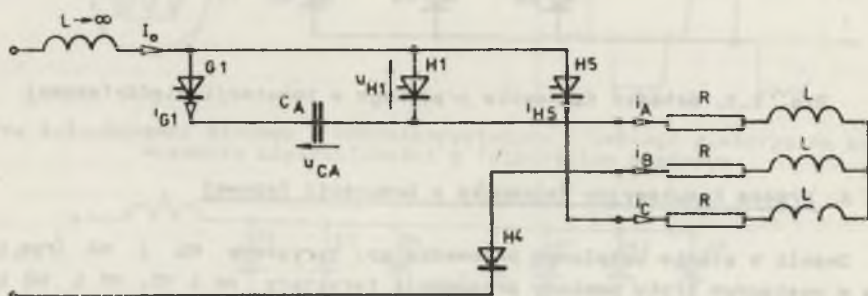
Po wyzwoleniu H5 prąd płynący przez niego zwiększa się kosztem prądu tyrystora G1. Proces komutacji kończy się w chwili, gdy prąd tyrystora G1 zmaleje do zera i tyrystor przejdzie w stan zaporowy.

W procesie komutacji można wyróżnić dwa etapy. Pierwszy etap rozpoczyna się od podania impulsu wyzwalającego na tyrystor G1 i kończy się w chwili osiągnięcia wartości zerowej przez napięcie tyrystora H5. W tej samej chwili rozpoczyna się drugi etap, który trwa do osiągnięcia przez

prąd tyrystora G1 wartości zerowej. Schemat układu dla pierwszego etapu komutacji przedstawia rys. 2.1, a dla drugiego etapu rys. 2.2.



Rys. 2.1. Schemat układu w I etapie komutacji



Rys. 2.2. Schemat układu w II etapie komutacji

Ze względu na różną konfigurację układu w jednym i drugim etapie przebiegu komutacyjnego można wyznaczać oddzielnie dla każdego etapu.

Przebiegi komutacyjne rozpatrywanego falownika zostały wyznaczone analitycznie w opracowaniu [7]. Przyjmując, że

$$C_A = C_B = C_C = \frac{1}{2} C,$$

oraz zakładając, że

- prąd wymuszający jest stały i nie zmienia swojej wartości w czasie procesu komutacyjnego,
 - przyrządy półprzewodnikowe są zaworami idealnymi,
 - kondensatory komutacyjne są idealne,
 - falownik jest obciążony połączonym w gwiazdę odbiornikiem trójfazowym o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym.
- Wtedy przebiegi komutacyjne.

W I etapie komutacji

- względne napięcie kondensatora komutacyjnego

$$\frac{u_{CA}(\vartheta^*)}{I_o R} = - \left| \frac{u_{CA}(\vartheta_b^*)}{I_o R} \right| + \frac{2}{d} \vartheta^* \quad (2.1)$$

- względny czas trwania I etapu komutacji

$$\vartheta_b^* = \frac{d}{2} \left(\left| \frac{u_{CA}(\vartheta_b^*)}{I_o R} \right| - 1 \right) \quad (2.2)$$

W równaniach powyższych $\frac{u_{CA}(\vartheta_b^*)}{I_o R}$ jest względną wartością napięcia kondensatora w końcu II etapu komutacji (dalej wzór (2.7)).

W II etapie komutacji

- względny prąd tyrystora komutacyjnego

$$\frac{i_{G1}(\vartheta^*)}{I_o} = \left(\frac{d}{\sqrt{4-d^2}} \sin \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \vartheta^* + \cos \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \vartheta^* \right) \exp\left(-\frac{d}{2} \vartheta^*\right) \quad (2.3)$$

- względny prąd tyrystora głównego

$$\frac{i_{H5}(\vartheta^*)}{I_o} = 1 - \frac{i_{G1}(\vartheta^*)}{I_o} \quad (2.4)$$

- względne napięcie kondensatora komutacyjnego

$$\frac{u_{CA}(\vartheta^*)}{I_o R} = 1 - 2 \left(\frac{d^2-2}{d\sqrt{4-d^2}} \sin \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \vartheta^* + \cos \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \vartheta^* \right) \exp\left(-\frac{d}{2} \vartheta^*\right) \quad (2.5)$$

- względny czas trwania II etapu komutacji

$$\vartheta_b = \frac{2}{\sqrt{4-d^2}} \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{d}{\sqrt{4-d^2}} \right) \quad (2.6)$$

- względna wartość końcowa napięcia kondensatora komutacyjnego

$$\frac{u_{CA}(\vartheta_b^*)}{I_o R} = 1 + \frac{2}{d} \exp\left(-\frac{d}{\sqrt{4-d^2}} \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{d}{\sqrt{4-d^2}} \right)\right) \quad (2.7)$$

- względny czas zaporowej polaryzacji tyrystora głównego

$$2 \left(\frac{d^2 - 2}{d\sqrt{4-d^2}} \sin \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \nu_c + \cos \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \nu_c \right) \exp\left(-\frac{d}{2} \nu_c\right) = 1 \quad (2.8)$$

- względny czas dysponowany na wyłączenie tyrystora głównego

$$\nu_d = \nu_a + \nu_c \quad (2.9)$$

- względne napięcie fazowe odbiornika

$$\sqrt{\frac{u_{RL}(\nu)}{I_o R}} = 1 - \left(\frac{d^2 - 2}{d\sqrt{4-d^2}} \sin \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \nu + \cos \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \nu \right) \exp\left(-\frac{d}{2} \nu\right) \quad (2.10)$$

Wyznaczone zależności są względnymi parametrycznymi funkcjami zmiennej bezwymiarowej czasu $\nu = \frac{t}{\sqrt{LC}}$ przy czym parametrem jest stała bezwymiarowa $d = R\sqrt{\frac{C}{L}}$ będąca miarą tłumienia obwodu. Wartości ν_a , ν_b , ν_c , ν_d oraz $u_{CA}(\nu_b)$ są zależne wyłącznie od parametru d .

Umożliwia to wyznaczenia wartości względnych każdego z wyznaczonych przebiegów i może stanowić podstawę do ilościowego określenia zjawisk zachodzących w procesie komutacji.

3. Proces komutacyjny falownika o komutacji międzyfazowej

Jeżeli w falowniku o komutacji międzyfazowej (rys. 1.3) przewodzą np. tyrystory H1 i H4, to w następnym kroku powinny przewodzić H4 i H5. Przełożenie prądu z tyrystora H1 na H5 będzie, podobnie jak w rozdz. 2, przedmiotem dalszej analizy.

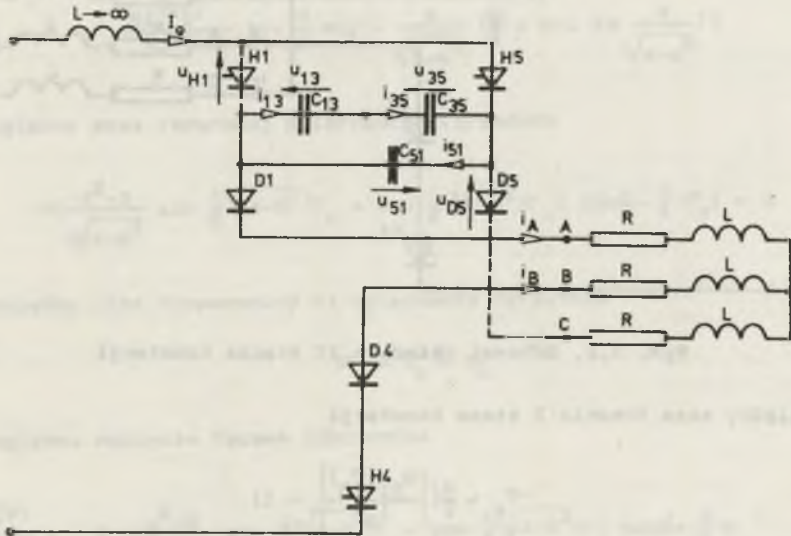
Niech zgodnie z rys. 1.3 tyrystory H1 i H4 oraz diody D1 i D4 przewodzą, kondensatory C_{13} oraz C_{51} są naładowane z polaryzacją zaznaczoną na rysunku, tyrystor H5 jest w stanie blokowania, a dioda D5 jest w stanie zaporowym.

W wyniku wyzwolenia tyrystora H5 tyrystor H1 pod wpływem napięć kondensatorów C_{13} i C_{51} przechodzi w stan zaporowy. Prąd I_o płynie teraz przez tyrystor H5, kondensatory komutacyjne i diodę D1. Dioda D5 jest nadal spolaryzowana zaporowo.

Prąd I_o , płynąc przez kondensatory komutacyjne, przełamuje je do napięcia o polaryzacji przeciwnej, zmniejszając napięcia na C_{13} i C_{51} . W chwili, w której napięcie kondensatora C_{51} malejąc osiągnie wartość $I_o R$, napięcie zaporowe na diodzie D5 osiąga wartość zerową i dioda D5 wchodzi w stan przewodzenia.

W tym momencie kończy się pierwszy etap komutacji i jednocześnie rozpoczyna się drugi. W drugim etapie zwiększa się prąd płynący przez diodę D5, zaś prąd diody D1 zmniejsza się. Drugi etap kończy się w chwili, w której prąd diody D1 zmniejszy się do zera i D1 przejdzie w stan zaparowy.

Schemat układu dla pierwszego etapu komutacji przedstawia rys. 3.1, a dla drugiego etapu rys. 3.2.



Rys. 3.1. Schemat układu w I etapie komutacji

Posługując się tymi schematami, wyznaczono w pracy [7] przebiegi komutacyjne dla założeń identycznych jak w przypadku komutacji fazowej. Przyjmując, że w przypadku falownika o komutacji międzyfazowej

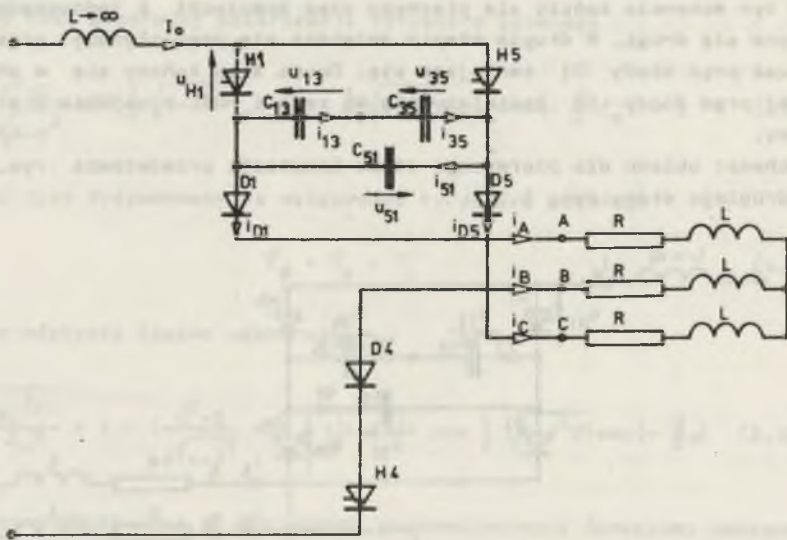
$$C_{13} = C_{35} = C_{51} = \frac{1}{3} C,$$

otrzymano przebiegi.

W I etapie komutacji

- względne napięcie kondensatora komutacyjnego

$$\frac{u_{51}(v)}{I_0 R} = - \left| \frac{u_{51}(v_b)}{I_0 R} \right| + \frac{2}{3} v \tag{3.1}$$



Rys. 3.2. Schemat układu w II etapie komutacji

- względny czas trwania I etapu komutacji

$$\psi_a = \frac{d}{2} \left(\left| \frac{u_{51}(\psi_b)}{I_o R} \right| - 1 \right) \quad (3.2)$$

W drugim etapie komutacji

- względny prąd diody D1

$$\frac{i_{D1}(\psi)}{I_o} = \left(\frac{d}{\sqrt{4-d^2}} \sin \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \psi + \cos \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \psi \right) \exp \left(-\frac{d}{2} \psi \right) \quad (3.3)$$

- względny prąd diody D5

$$\frac{i_{D5}(\psi)}{I_o} = 1 - \frac{i_{D1}(\psi)}{I_o} \quad (3.4)$$

- względne napięcie kondensatora komutacyjnego

$$\frac{u_{51}(\psi)}{I_o R} = 1 - 2 \left(\frac{d^2-2}{d\sqrt{4-d^2}} \sin \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \psi + \cos \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} \psi \right) \exp \left(-\frac{d}{2} \psi \right) \quad (3.5)$$

- względny czas trwania II etapu komutacji

$$v_b = \frac{2}{\sqrt{4-d^2}} \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{d}{\sqrt{4-d^2}} \right) \quad (3.6)$$

- względna wartość końcowa napięcia kondensatora komutacyjnego

$$\frac{u_{51}^{(v_b)}}{I_{OK}} = 1 + \frac{2}{d} \exp\left(-\frac{d}{\sqrt{4-d^2}} \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{d}{\sqrt{4-d^2}} \right)\right) \quad (3.7)$$

- względny czas zaporowej polaryzacji tyrystora

$$2 \left(\frac{d^2-2}{d\sqrt{4-d^2}} \sin \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} v_c + \cos \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} v_c \right) \exp\left(-\frac{d}{2} v_c\right) = 1 \quad (3.8)$$

- względny czas dysponowany na wyłączenie tyrystora

$$v_d = v_a + v_c \quad (3.9)$$

- względne napięcie fazowe odbiornika

$$\frac{u_{RL}^{(v)}}{I_{OK}} = 1 - \left(\frac{d^2-2}{d\sqrt{4-d^2}} \sin \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} v + \cos \frac{1}{2} \sqrt{4-d^2} v \right) \exp\left(-\frac{d}{2} v\right) \quad (3.10)$$

4. Porównanie przebiegów komutacyjnych falowników

Dla porównania procesów komutacyjnych falowników o obydwu typach komutacji zestawiono ze sobą zależności opisujące poszczególne przebiegi komutacyjne (tablica 1).

Z analizy zestawionych zależności wynika, że dla obydwu falowników przebiegu czasowe i charakterystyczne wielkości procesu komutacyjnego są opisane takimi samymi zależnościami.

Identyczność zależności opisujących proces komutacyjny obydwu falowników pozwala na obliczenie tych zależności według jednego programu i ich przedstawienie graficzne.

Wyznaczone w ten sposób podstawowe przebiegi komutacyjne falowników o obydwu typach komutacji zawiera praca [7]. Przy ich pomocy można dla konkretnych danych wyjściowych wyznaczyć interesujące wartości przebiegów komutacyjnych falowników prądowych o komutacji fazowej i międzyfazowej.

Tablica 1

Zestawienie przebiegów komutacyjnych falowników
o komutacji fazowej (F) i międzyfazowej (M)

Przebieg	Typ falownika	Numer wzoru	Oznaczenie	Oznaczenie zastępcze
Czas trwania I etapu komutacji	F	2.2	γ_a^I	γ_a^I
	M	3.2	γ_a^I	
Czas trwania II etapu komutacji	F	2.6	γ_b^I	γ_b^I
	M	3.6	γ_b^I	
Czas zaporowej polaryzacji tyrystora w II etapie komutacji	F	2.8	γ_c^I	γ_c^I
	M	3.8	γ_c^I	
Czas dysponowany na wyłączenie tyrystora	F	2.9	γ_d^I	γ_d^I
	M	3.9	γ_d^I	
Napięcie kondensatora komutacyjnego w I etapie komutacji	F	2.1	$\frac{u_{CA}(\gamma_a^I)}{I_{OR}}$	$\frac{u_{CI}(\gamma^I)}{I_{OR}}$
	M	3.1	$\frac{u_{51}(\gamma_a^I)}{I_{OR}}$	
Wartość początkowa i końcowa napięcia kondensatora komutacyjnego	F	2.7	$\frac{U_{CA}(\gamma_b^I)}{I_{OR}}$	$\frac{U_C(\gamma_b^I)}{I_{OR}}$
	M	3.7	$\frac{U_{51}(\gamma_b^I)}{I_{OR}}$	
Napięcie kondensatora komutacyjnego w II etapie komutacji	F	2.5	$\frac{u_{CA}(\gamma^I)}{I_{OR}}$	$\frac{u_{CII}(\gamma^I)}{I_{OR}}$
	M	3.5	$\frac{u_{51}(\gamma^I)}{I_{OR}}$	
Napięcie fazowe odbiornika w II etapie komutacji	F	2.10	$\frac{u_{RL}(\gamma^I)}{I_{OR}}$	$\frac{u_{RL}(\gamma^I)}{I_{OR}}$
	M	3.10	$\frac{u_{RL}(\gamma^I)}{I_{OR}}$	

cd. tablicy 1

Przebieg	Typ falownika	Num. wzoru	Oznaczenie	Oznaczenie zastępcze
Prąd zaworu wychodzącego ze stanu przewodzenia	F	2.3	$\frac{i_{G1}(\vartheta^*)}{I_0}$	$\frac{i_1(\vartheta^*)}{I_0}$
	M	3.3	$\frac{i_{D1}(\vartheta^*)}{I_0}$	
Prąd zaworu wchodzącego w stan przewodzenia	F	2.4	$\frac{i_{H5}(\vartheta^*)}{I_0}$	$\frac{i_5(\vartheta^*)}{I_0}$
	M	3.4	$\frac{i_{D5}(\vartheta^*)}{I_0}$	

Pozwala to na daleko idące ujednoczenie metody projektowania i doboru elementów części energetycznej falowników prądowych oraz pozwala na przeprowadzenie analizy porównawczej obydwu falowników.

LITERATURA

- [1] Backhaus G., Möltgen G.: Kommutierung beim sechspulsigen selbstgeführten Wechselrichter für Betrieb mit eingepprägtem Gleichstrom. ETZ A 1969, nr 14.
- [2] Kleinrath H.: Der Kommutierungsvorgang beim Asynchronmotor mit Speisung über Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis. Archiv für Elektrotechnik 1974, nr 1.
- [3] Kazuno H.: Commutation of a Three-Phase Thyristor Bridge with Commutation Capacitors and Series Diodes. Electrical Engineering in Japan, 1970, nr 5.
- [4] Phillips K.P.: Current - Source Converter for AC Motor Drives. IEEE Transactions on Industry Applications, 1972, nr 6.
- [5] Schröder D.: Selbstgeführter Stromrichter mit Phasenfolgelöschung und eingepprägtem Strom. ETZ A, 1975, nr 11.
- [6] Farrer W., Miskin J.D.: Quasi-sine-wave fully regenerative inverter. Proceedings IEE, 1973, nr 9.
- [7] Analiza procesów komutacyjnych falownika prądowego o dwóch typach komutacji (grupowej i międzyfazowej). Praca naukowo-badawcza Instytutu Elektryfikacji i Automatykacji Górnicztwa, Gliwice 1977. Nie publikowana.

КОММУТИРОВОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ ТОКОВЫХ ИНВЕРТОРОВ

Резюме

Указаны аналитически определённые коммутировочные пробоги токовых инверторов с фазной и межфазной коммутацией. Показывается, что не смотря на разную конфигурацию схемы, коммутировочные пробоги в обоих типах инверторов выражаются таким же зависимостям.

COMUTATION PROCESSES FOR CURRENT INVERTERS

Summary

Analytically determined commutation courses for current inverters with phase and inter - phase commutations have been shown. Despite course configuration changes in both inverter types the courses are being expressed by identic dependencies.