

Jan MUĆKO¹

SZEREGOWY FALOWNIK REZONANSOWY - METODY STEROWANIA A MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA ŁĄCZNIKÓW MIĘKKO PRZEŁĄCZAJĄCYCH

Przedmiotem rozważań są takie strategie sterowania szeregowym falownikiem rezonansowym (z szeregowym obciążeniem), które umożliwią pracę łączników w pełni sterowanych z miękką komutacją. Przeanalizowano metody sterowania: częstotliwościową (FM), modulacji szerokości impulsów PWM oraz metody równoczesnego sterowania PWM i FM. Przedstawiono przebiegi prądów i napięć oraz wybrane charakterystyki pozwalające porównać własności układu przy różnych metodach sterowania.

1 WSTĘP

Przedmiotem rozważań w tym artykule są takie strategie sterowania szeregowym falownikiem rezonansowym (z szeregowym obciążeniem), które umożliwią pracę tranzystorów z miękką komutacją (załączanie przy zerowym napięciu - ZVS lub wyłączanie przy zerowym prądzie - ZCS). Komutacja taka zapewnia radykalną redukcję strat komutacyjnych, zmniejszenie stromości napięć lub prądów a więc zmniejszenie zaburzeń radioelektrycznych oraz umożliwia zwiększenie częstotliwości przełączeń tranzystorów.

Przeanalizowane zostały metody sterowania [1...6] szeregowego falownika rezonansowego: częstotliwościowa (FM), modulacji szerokości impulsów PWM oraz metody równoczesnego sterowania PWM i FM (PWM-FM). Metody sterowania poprzez zmianę napięcia zasilającego (AM) i poprzez modulację gęstości impulsów (PDM) mogą być zastosowane niezależnie od wyżej wymienionych metod. W dalszych rozważaniach przyjęto, że napięcie zasilające jest stałe a modulacja PDM nie występuje. Założono, że między stanem załączenia tranzystorów T1 i T2 (T3 i T4) występują czasy martwe dużo mniejsze od czasu trwania okresu i na rysunku 1 są one niezauważalne.

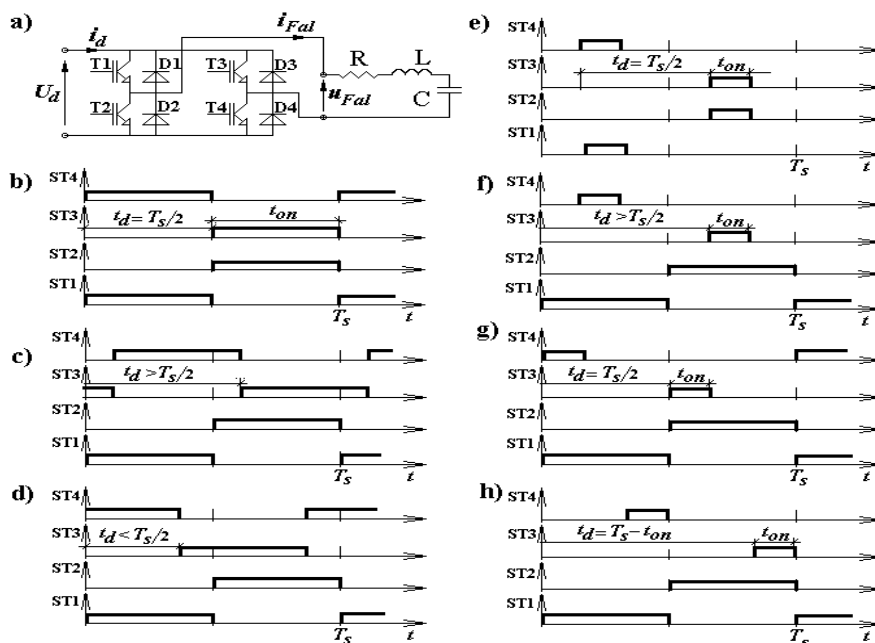
Na rysunku 1 przedstawiono schemat ideowy obwodu głównego falownika oraz przebiegi sygnałów sterujących tranzystorami. Na rys.1b przedstawiono sygnały sterujące o wypełnieniu t_{on}/T_s równym 50%. Między sygnałami sterującymi tranzystory T1 i T2 a T3 i T4 występuje stałe przesunięcie fazowe równe π ($t_d=T_s/2$). Regulacja mocy traconej w rezystorze R odbywa się poprzez zmianę częstotliwości f_s przełączania łączników.

¹ Akademia Techniczno-Rolnicza, Instytut Elektrotechniki, 85-796 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7, tel.(052) 3408557, e-mail: mucko@atr.bydgoszcz.pl

Na rys. 1c, d przedstawiono sygnały sterujące o wypełnieniu 50%. Regulacja mocy odbywa się poprzez zmianę przesunięcia fazowego między sygnałami sterującymi T1 i T2 a T3 i T4. Częstotliwość przełączania łączników może być stała lub zmienna.

Na rys. 1e przedstawiono sygnały sterujące o wypełnieniu mniejszym niż 50%. Między sygnałami sterującymi tranzystory T1 i T2 a T3 i T4 występuje stałe przesunięcie fazowe równe π . Regulacja mocy odbywa się poprzez zmianę współczynnika wypełnienia. Położenie sygnałów sterujących jest centralne w każdym półokresie. Założono, że układ pracuje ze stałą częstotliwością.

Rys. 1f, g, h przedstawia sygnały sterujące tranzystory T1 i T2 o wypełnieniu 50%. Regulacja mocy odbywa się przez zmianę współczynnika wypełnienia sygnałów sterujących tranzystory T3 i T4. Częstotliwość regulowana jest przy tym w taki sposób, by tranzystory T1 i T2 wyłączały i załączały przy prądzie równym (bliskim) zeru. Na rys. 1g, h przedstawiono szczególne przypadki, w których: 1) $t_d = T_s/2$, 2) $t_d = T_s - t_{on}$.



Rys.

1. Schemat ideowy oraz sygnały sterowania tranzystorami w szeregowym falowniku rezonansowym przy różnych sposobach sterowania

Przeprowadzono symulacje i przeanalizowano pracę układu o następujących danych: $U_d=300V$, $C=1\mu F$, $L=63.39\mu H$, $Z_f=\sqrt{L/C}=7.96$, $f_r=1/(2\pi\sqrt{LC})=20kHz$ oraz różnych wartościach rezystancji obciążenia, takich ze: $Z_f/R = 0.5, 1, 2$.

Założono idealne łączniki - straty mocy czynnej w przekształtniku pominięto. W celu porównania własności układu przy różnych sposobach sterowania przedstawiono przebiegi prądów i napięć oraz charakterystyki względnych wartości: maksymalnego prądu

tranzystora I_{\max}/I^* , mocy obciążenia $P/P^* = I_d/I^*$, prądu w chwili załączenia lub wyłączenia tranzystora I_{kom}/I^* oraz maksymalnego prądu tranzystora w stosunku do prądu średniego na wejściu falownika I_{\max}/I_d w funkcji zmiennej sterującej. Charakterystyki te pozwalają znaleźć miejsca maksymalnego obciążenia tranzystora, maksymalnej mocy dostarczonej do obciążenia oraz minimalnego obciążenia tranzystora w stosunku do mocy obciążenia. Pozwalają także określić w jakich zakresach zmiennej sterującej poszczególne łączniki mogą pracować jako łączniki ZVS lub ZCS. Jako wartości odniesienia przyjęto: $I^* = U_d/Z_f = 37.7\text{A}$, $P^* = U_d^2/Z_f = 11.30\text{kW}$.

2 RODZAJE KOMUTACJI

W układzie wyróżnić można następujące rodzaje komutacji:

T→D (tranzystor - dioda odwrotnie-równoległa), komutacja ta przebiega praktycznie bezstratnie, spełnione są warunki by tranzystor pracował jako łącznik ZCS; **D→T** (dioda odwrotnie-równoległa - tranzystor), komutacja ta przebiega praktycznie bezstratnie, spełnione są warunki by tranzystor pracował jako łącznik ZVS; **T ↓ D** (tranzystor - szeregowo włączona dioda), podczas tej komutacji występują straty, nie możliwa jest praca jako łącznik ZCS, jeśli tranzystor pracuje jako łącznik ZVS to dołączony równolegle z nimi kondensator tworzy bezstratny układ odciażający; **D ↓**

T (dioda - szeregowo włączony tranzystor), podczas tej komutacji występują straty, z uwagi na prąd wsteczny diody w tranzystorze występuje krótkotrwałe przeteżenie, nie możliwa jest praca łącznika jako ZVS; **T ↑ T** (tranzystor - szeregowo włączony tranzystor), w zależności od położenia czasu martwego między przewodzeniem jednego i drugiego tranzystora w stosunku do chwili przejścia przez zero fali prądu obciążenia mogą zajść następujące przypadki: a) tranzystor wyłącza przed a kolejny tranzystor załącza po przejściu przez zero fali prądu obciążenia, nie możliwa jest praca tranzystorów jako łączników ZVS ani jako ZCS (tab.1, lp.5), b) komutacja rozpoczyna się i kończy przed momentem przejścia przez zero fali prądu obciążenia, możliwa jest praca tranzystorów jako łączników ZVS (tab.1, lp.6), c) komutacja rozpoczyna się i kończy po przejściu przez zero fali prądu obciążenia, możliwa jest praca tranzystorów jako łączników ZCS (tab.1, lp.7), **D ↓ D** (dioda - szeregowo włączona dioda), komutacja ta przebiega praktycznie bezstratnie, brak informacji o pracy tranzystorów (mogą pracować jako ZVS lub ZCS), **T → I_o=0** (tranzystor - zanik prądu w obwodzie obciążenia) możliwa jest praca

Tabela 1. Możliwość pracy łączników jako miękko przełączających w zależności od rodzaju komutacji

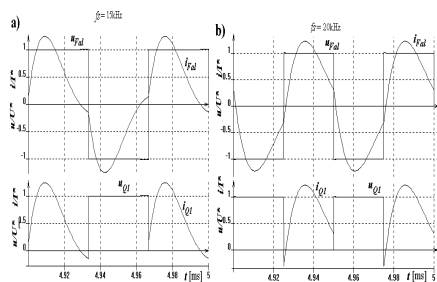
Lp.	Typ komutacji	Możliwość pracy	
		ZVS	ZCS
1	T→D		+
2	D→T	+	
3	T ↓ D		-
4	D ↓ T	-	
5	↔	T ↓ D, D ↓ D, D ↓ T	-
6	↔	T ↓ D, D→T	+
7	↔	T→D, D ↓ T	-
8	D ↓ D		
9	T→I _o =0		+
10	I _o =0 → T	-	
11	D → I _o =0		
12	I _o =0 → D		

tranzystora jako łącznika ZCS; $I_o=0 \rightarrow T$ (brak prądu w obwodzie obciążenia - tranzystor) nie możliwa jest praca tranzystora jako łącznika ZVS; $D \rightarrow I_o=0$ (dioda - zanik prądu obciążenia) brak informacji o pracy tranzystorów; $I_o=0 \rightarrow D$ (brak prądu obciążenia - dioda) brak informacji o pracy tranzystorów.

Powyżej opisane procesy komutacyjne zestawiono w tabeli 1. Oznaczono przy tym: spełnienie "+" lub nie spełnienie warunków "-" do pracy jako łącznik ZCS albo ZVS. O tym czy w danym przekształtniku można zastosować łączniki miękko przełączające decydują poniższe warunki:

- 1) warunkiem koniecznym aby dany łącznik w przekształtniku mógł pracować jako ZVS (ZCS) jest zajęcie w czasie okresu pracy przynajmniej jednej komutacji oznaczonej w tabeli 1 symbolem "+" dla danego typu łącznika,
- 2) dany łącznik w przekształtniku nie może pracować jako ZVS (ZCS) jeśli zachodzi przynajmniej jedna komutacja spełniająca warunek oznaczony w tabeli symbolem "-" dla danego typu łącznika,
- 3) komutacje nie oznaczone w tabeli symbolem "+" ani "-" mogą zachodzić zarówno przy pracy łączników jako ZVS lub ZCS.

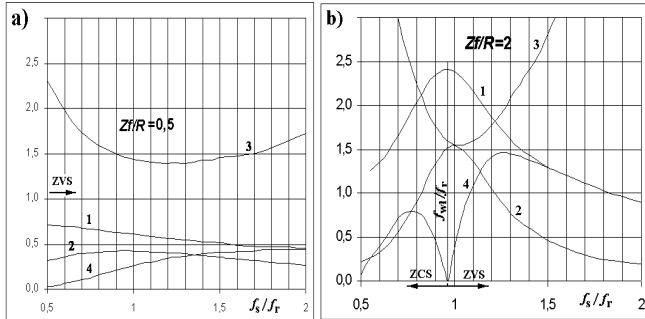
3 WPLYW METOD STEROWANIA FALOWNIKIEM NA CHARAKTERYSTYKI I PROCESY KOMUTACYJNE



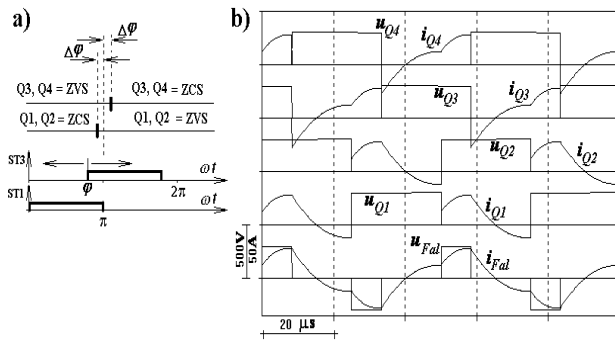
Rys.2. Przebiegi napięć i prądów w falowniku przy różnych częstotliwościach przełączeń tranzystorów: a) $f_s < f_{wl}$, b) $f_s > f_{wl}$.

pracować ani jako ZVS ani jako ZCS (tab.1 lp.5, tab.2. lp.3). Zazwyczaj tranzystory przełączają krótko przed lub za przejściem przez zero fali prądu i w takiej sytuacji przy analizie procesów komutacyjnych należy rozpatrywać przypadek $f_s < f_{wl}$ lub $f_s > f_{wl}$. Dla częstotliwości $f_s > f_{wl}$, zachodzi komutacja $D \rightarrow T$ a następnie $T \uparrow D$. Możliwa jest praca tranzystorów jako łączników ZVS. Przy włączeniu kondensatorów równolegle z tranzystorami (jako układów odciążających) procesy komutacyjne zachodzą praktycznie bezstratnie. Na rysunku 3 przedstawione zostały charakterystyki względnych wartości: maksymalnego prądu tranzystora, prądu komutowanego oraz mocy.

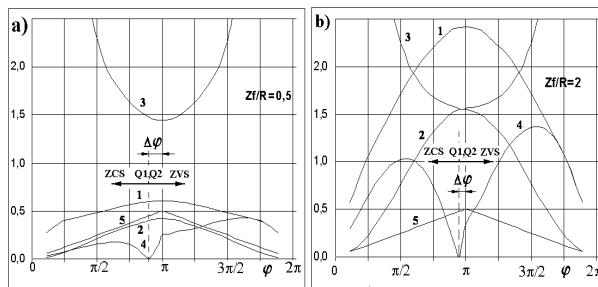
Sygnaly sterowania przy regulacji częstotliwościowej pokazano na rys. 1b. Na rys. 2 przedstawiono natomiast przebiegi napięcia i prądu łącznika Q1 (T1 + D1) dla $Z_f/R=1$, przy różnych częstotliwościach f_s przełączeń. Dla częstotliwości $f_s < f_{wl}$, zachodzi komutacja $T \rightarrow D$ a następnie $D \uparrow T$. Możliwa jest praca tranzystorów jako łączników ZCS. Sytuacja w której $f_s = f_{wl}$ jest niekorzystna. Czasy martwe powodują, że jeden z tranzystorów wyłącza przed a drugi załącza po przejściu przez zero fali prądu obciążenia. Łączniki nie mogą



Rys. 3. Wartości względnych prądów i mocy w funkcji względnej częstotliwości przełączania f_s/f_r przy: a) $Z_f/R=0,5$; b) $Z_f/R=2$; 1 - I_{max}/I^* , 2 - P/P^* , 3 - I_{max}/I_d , 4 - I_{kom}/I^*



Rys. 4. Praca łączników jako ZVS lub ZCS w zależności od przesunięcia fazowego φ a) oraz przebiegi napięć i prądów falownika b)



Rys. 5. Względne prądy i moce w funkcji przesunięcia fazowego φ przy $f_s=f_r$: a) $Z_f/R=0,5$, b) $Z_f/R=2$; 1 - I_{max}/I^* , 2 - P/P^* , 3 - I_{max}/I_d , 4 - I_{kom}/I^* , 5 - D

oraz $D=(T_s-t_d)/T_s$ dla $T_s/2 < t_d < T_s$. Charakterystyki układu w funkcji przesunięcia fazowego ilustruje rys. 5.

Regulacja mocy poprzez zmianę przesunięcia fazowego (Phase Shifted PWM) odbywać się może przy stałej lub zmiennej częstotliwości przełączania. Przesunięcie fazowe $\varphi=2\pi f_s t_d$ sygnału sterującego ST3 (ST4) w stosunku do sygnału ST1 (ST2) może przyjmować wartości z przedziału $0...2\pi$ (rys. 1c,d).

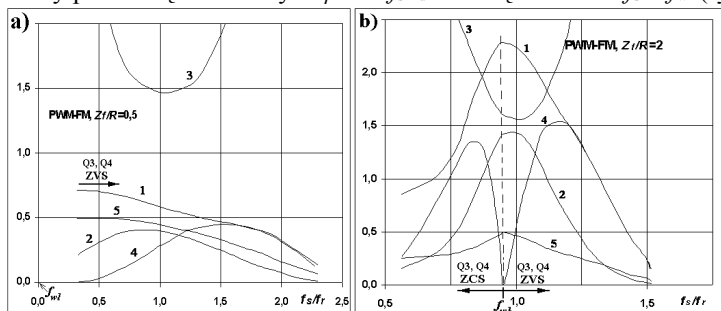
Rys. 4a ilustruje, który z łączników może pracować jako ZVS a który jako ZCS w zależności od wartości przesunięcia fazowego φ . Jeśli $|\pi-\varphi| < \Delta\varphi$ to wszystkie łączniki mogą pracować jako ZVS. Wartość $\Delta\varphi$ zależy od dobroci obwodu RLC i maleje ze wzrostem dobroci. Dla dużych dobroci wartość $\Delta\varphi$ jest pomijalna. Na rys. 4b przedstawiono przebiegi napięć i prądów łączników oraz napięcia i prądu wyjściowego falownika dla $Z_f/R=1$, $f_s/f_r=1$ przy wartości przesunięcia fazowego $\varphi=2\pi f_s t_d < \pi-\Delta\varphi$ (rys. 1d). Przebieg napięcia wyjściowego jest przebiegiem modulowanym (PWM) a współczynnik wypełnienia równy jest $D=t_d/T_s$ dla $0 < t_d < T_s/2$

Charakterystyczną cechą tego układu jest to, że pracując ze stałą częstotliwością przełączania tranzystorów zapewnia ich pracę z miękką komutacją i umożliwia regulację mocy wyjściowej w szerokim zakresie.

Przy regulacji poprzez zmianę przesunięcia fazowego przy zmiennej częstotliwości przełączania sygnały sterujące tranzystory T1 i T2 są synchronizowane z falą prądu obwodu RLC . Przypadek idealnej synchronizacji nie jest korzystny (tabela 1, lp.5, 6, 7). Przy opóźnieniu w wyłączaniu tranzystorów T1 i T2 (w stosunku do fali prądu) mogą one pracować jako łączniki ZCS. Przy przyspieszonym wyłączaniu tranzystory te mogą pracować jako łączniki ZVS i (prawie) ZCS jednocześnie. Jest to optymalny przypadek z punktu widzenia minimalizacji strat komutacyjnych w rozpatrywanych tranzystorach.

Tranzystory T3 i T4 przełączane są z tą samą częstotliwością co tranzystory T1 i T2. Każdy z nich wysterowany jest przez pół okresu pracy falownika. Regulacja mocy odbywa się poprzez zmianę przesunięcia fazowego sygnałów sterowania tranzystorów T3 i T4 w stosunku do sygnałów sterowania T1 i T2 (rys. 1c,d). Przebieg napięcia wyjściowego jest przebiegiem modulowanym (PWM-FM) a współczynnik wypełnienia równy jest $D=t_d/T_s$ dla $0 < t_d < T_s/2$ oraz $D=(T_s - t_d)/T_s$ dla $T_s/2 < t_d < T_s$. Przy przesunięciu fazowym równym π falownik pracuje z częstotliwością drgań własnych obwodu RLC .

Przy przesunięciu fazowym $\varphi = 2\pi f_s t_d < \pi$ częstotliwość $f_s > f_{wl}$ (rys. 6a,c) a łączniki



Rys. 7. Wartości względnych prądów i mocy w funkcji częstotliwości względnej f_s/f_r przy sterowaniu PWM-FM: a) $Z_f/R=0,5$; b) $Z_f/R=2$; 1 - I_{max}/I^* , 2 - P/P^* , 3 - I_{max}/I_d , 4 - I_{kom}/I^* , 5 - D

Q3 i Q4 (T3+D3, T4+D4) mogą pracować jako łączniki ZVS. Komutacje zachodzą zgodnie z sekwencją: D3→T3, T3↓D4, D4→T4, T4↓D3.

Przy przesunięciu fazowym $\varphi > \pi$ częstotliwość $f_s < f_{wl}$ (rys. 6a,b) a łączniki Q3 i Q4 mogą pracować jako łączniki ZCS. Komutacje zachodzą zgodnie z sekwencją: T3→D3, D3↓T4, T4→D4, D4↓T3.

Na rysunku 7 przedstawiono wykresy wartości względnych prądów i mocy oraz współczynnika wypełnienia w funkcji częstotliwości względnej.

Charakterystyczną cechą tego układu jest to, że regulując moc wyjściową w szerokim zakresie zapewnia pracę tranzystorów z miękką komutacją, przy czym dwa z tranzystorów mogą pracować w optymalnych warunkach z punktu widzenia minimalizacji strat komutacyjnych (ZVS i "prawie ZCS").

Przy regulacji mocy poprzez modulację szerokości impulsów (zgodnie z rys. 1e) łączniki nie mogą pracować z miękką komutacją (zachodzą komutacje $T \uparrow D$ i $D \uparrow T$).

Przy regulacji poprzez modulację szerokości impulsów oraz modulację częstotliwości (rys. 1f,g,h) możliwa jest praca dwóch tranzystorów jako łączników ZCS albo ZVS i "prawie ZCS". Natomiast pozostałe dwa tranzystory mogą pracować z komutacją miękką ZVS tylko gdy $t_d=T_s/2$ (rys 1.g) lub ZCS tylko gdy $t_d=T_s/2$ (rys.1.h). Przebiegi czasowe i charakterystyki są identyczne jak w przypadku przedstawionym na rys.6b, 6c oraz 7.

4 WNIOSKI

W artykule przedstawiono takie strategie sterowania szeregowym falownikiem rezonansowym (z szeregowym obciążeniem), które umożliwią pracę łączników w pełni sterowanych miękką komutacją. Scharakteryzowano rodzaje komutacji i określono warunki jakie muszą być spełnione, aby w danym przekształtniku można było zastosować łączniki międko przełączające.

Określono w jakich zakresach zmiennej sterującej (częstotliwości, przesunięcia fazowego lub współczynnika wypełnienia) poszczególne łączniki mogą pracować jako łączniki ZVS lub ZCS. Określono sposoby sterowania falownikiem umożliwiające regulację mocy przy pracy:

- dwóch tranzystorów z komutacją miękką w warunkach optymalnych z punktu widzenia minimalizacji strat komutacyjnych (ZVS i jednocześnie "prawie ZCS"),
- dwóch pozostałych tranzystorów z komutacją miękką ZVS albo ZCS.

Porównano własności układu przy różnych sposobach sterowania:

- przedstawiono przebiegi czasowe prądów i napięć oraz charakterystyki względnych wartości: maksymalnego prądu tranzystora I_{max}/I^* , mocy obciążenia $P/P^* = I_d/I^*$, prądu w chwili załączenia lub wyłączenia tranzystora I_{kom}/I^* oraz maksymalnego prądu tranzystora w stosunku do prądu średniego na wejściu falownika I_{max}/I_d w funkcji zmiennej sterującej,
- określono warunki maksymalnego obciążenia tranzystora, maksymalnej mocy dostarczonej do obciążenia oraz minimalnego obciążenia tranzystora w stosunku do mocy obciążenia.

5.LITERATURA

1. Cheron Y, Foch H., Mopty Y; *Ein Mittelfrequenz - Konverter mit Asymmetrischen Thyristoren und Leistungstransistoren*, THOMSON-CSF Handbuch II - Transistoren in der Leistungselektronik, 1987, str.363 - 376.
2. Citko T. Tunia H., Winiarski B.: *Układy rezonansowe w energoelektronice*, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, 2001r.
3. Matysik J.: *Metody sterowania integracyjnego tranzystorowych falowników napięcia klasy D z szeregowym obwodem rezonansowym*, Prace Naukowe-Elektryka z. 114, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2001r.

4. Mućko J.: *Konwertery rezonansowe o miękkiej komutacji*, Przegląd Elektrotechniczny 4/95, str. 97-102
5. Mućko J.: *Łączniki miękko przełączające w układach przekształtnikowych*, Elektronizacja nr 12/2003, Wydawnictwo SIGMA -NOT, Warszawa, str. 19-23
6. Mućko J.: *Aktywator folii z falownikiem rezonansowym - właściwości, metody i układy sterowania*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 11/2005, str. 42-49

SERIES RESONANT INVERTER - POSSIBILITIES OF SOFT SWITCHING IN DEPENDENCES OF CONTROL METHODS

Objects of considerations are such strategies of control of series resonant inverter, which will make possible soft switching. Analysed methods of control were: modulation FM, PWM and PWM-FM. Transient voltages, currents and selected characteristics were analysed.