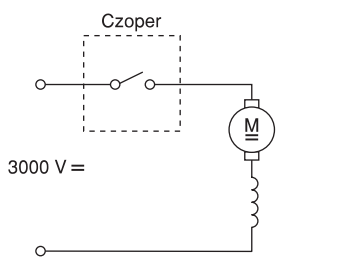


# Wielopoziomowy układ czopera wysokiego napięcia ze sterowaniem DSP

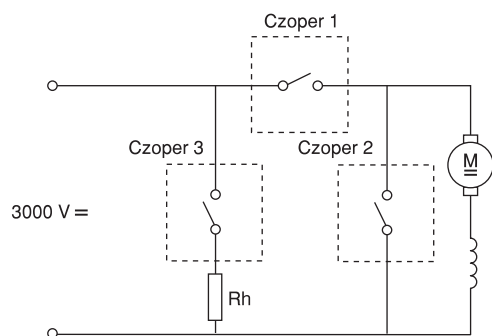
**Napędy DC ze stałoprądowymi przerywaczami prądu (czoperami), wykorzystującymi tranzystory IGBT, charakteryzują się obecnie parametrami techniczno-ekonomicznymi, pozwalającymi na stosowanie ich w napędach trakcyjnych zamiast dotychczasowych układów rozruchu oporowego.**

Na rysunku 1 przedstawiono jednotranzystorowy dwupoziomowy układ, umożliwiający rozruch impulsowy silników trakcyjnych. Układ przedstawiony na rysunku 2 umożliwia dodatkowo impulsowe hamowanie odzyskowe lub hamowanie dynamiczne – wytracanie energii w rezystorze  $R_h$ .

Przy realizacji takich układów napędowych niezbędne jest zastosowanie tranzystorów kluczujących o napięciu blokowa-



Rys. 1. Podstawowy układ przerywacza z jednokierunkowym prądem wyjściowym



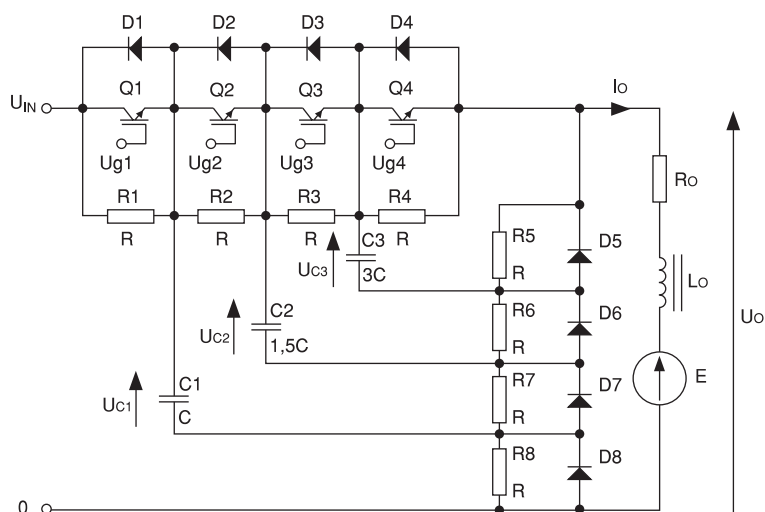
Rys. 2. Układ przerywacza z dwukierunkowym prądem wyjściowym

nia powyżej maksymalnego napięcia, jakie może wystąpić w sieci trakcyjnej. W przypadku sieci zasilających 600 V =, jak i 1500 V =, możliwa jest realizacja układu z głównym elementem wykonawczym w postaci pojedynczego tranzystora IGBT (odpowiednio 1700 V lub 3300 V). Przy realizacji układu zasilanego napięciem 3000 V jest konieczne stosowanie elementu o napięciu blokowania powyżej 6,5 kV. Tranzystory IGBT o takim napięciu blokowania znajdują się ciągle na etapie prób, a po podjęciu produkcji ich cena będzie najprawdopodobniej wysoka. Wiadomo również, że napięcie blokowania tranzystorów IGBT 6,5 kV silnie zależy od temperatury, co znacznie zmniejsza zakres ich zastosowań. Jednocześnie słabe właściwości dynamiczne (duże czasy przełączania) tego elementu, których konsekwencją jest mała częstotliwość pracy, powodują konieczność zastosowania filtrów wyjściowych (dławik i kondensatory) o stosunkowo dużych gabarytach. Inną istotną wadą takiego rozwiązania jest duża stromość narastania napięcia na tranzystorze, co może powodować zakłócenia w pracy wewnętrznych układów sterowania jak i układów na zewnątrz urządzenia.

Poprawnie zaprojektowany i wykonany układ z szeregowo połączonymi tranzystorami, jest aktualnie bardziej atrakcyjny ze względów ekonomicznych. Stosując odpowiednie struktury układowe oraz algorytmy sterowania szeregowo połączonymi tranzystorami, uzyskujemy – poza wyrównaniem napięć na elementach – znacznie korzystniejszy kształt napięcia wyjściowego, wpływający dodatkowo na obniżenie kosztu całego układu napędowego. Wieloletnie doświadczenia z zastosowaniem tranzystorów IGBT o napięciu 1700 V i 3300 V pozwalają obecnie na budowę układów wielopoziomowych o dużej trwałości i niezawodności.

## Zasada działania czopera wielopoziomowego

W artykule [1] została przedstawiona struktura wielopoziomowego przerywacza prądu stałego. Na rysunku 3 przedstawiono schemat pięciopoziomowego przerywacza prądu o takiej strukturze.



Rys. 3. Pięciopoziomowy przekształtnik DC/DC z jednokierunkowym prądem wyjściowym

Przekształtnik tworzą tranzystory  $Q1-Q4$ , diody  $D5-D8$ , kondensatory  $C1, C2, C3$  oraz rezystory  $R1-R8$ . Rezystory mają równe wartości a ich zadaniem jest wstępne naładowanie pojemności do napięć  $u_{C1}, u_{C2}, u_{C3}$  o założonych wartościach. Wartości te decydują o poziomach napięć wyjściowych układu.

Układ zbudowany z  $n$  tranzystorów ( $n+1$  poziomowy) o przedstawionej strukturze, zawiera  $n-1$  kondensatorów. Napięcia na tych kondensatorach powinny spełniać zależność:

$$u_{C_{i+1}} = \frac{n-1-i}{n} U_{IN} \quad i \in (0, n-2) \quad (1)$$

Wartości pojemności powinny być takie, aby przy ich szeregowym połączeniu względne zmiany napięcia były jednakowe:

$$\frac{C_{i+2}}{C_{i+1}} = \frac{u_{C_{i+1}}}{u_{C_{i+2}}} \quad (2)$$

Po podstawieniu (1) do (2) można otrzymać:

$$\frac{C_{i+2}}{C_{i+1}} = \frac{n-1-i}{n-2-i} \quad (3)$$

Napięcia kondensatorów poziomujących powinny w czasie pracy utrzymywać następujące wartości:  $u_{C1} = 0,75U_{IN}$ ,  $u_{C2} = 0,5U_{IN}$ ,  $u_{C3} = 0,25U_{IN}$ . Przy takich wartościach napięcia na każdym wyłączonym tranzystorze w omawianym układzie nie przekracza  $1/4 U_{IN}$  (w ogólnym przypadku wartość napięcia blokowanego wynosi  $U_{IN}/n$ ).

Przy założeniu ciągłego prądu wyjściowego  $i_o$  napięcie wyjściowe przerywacza może przyjąć następujące poziomy:  $0$  – poziom **0**; wszystkie tranzystory zablokowane,  $0,25U_{IN}$  – poziom **1**; załączony dowolny jeden tranzystor,  $0,5U_{IN}$  – poziom **2**; załączone dowolne dwa tranzystory,  $0,75U_{IN}$  – poziom **3**; załączone dowolne trzy tranzystory,  $U_{IN}$  – poziom **4**; załączone dowolne cztery tranzystory.

### Algorytm sterowania czopera

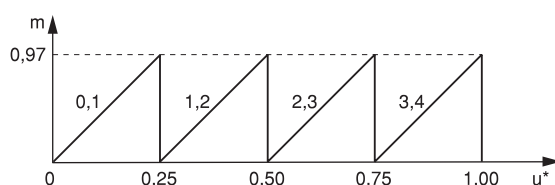
Układ sterowania przerywacza powinien zapewniać:

- zerowe wartości średnie prądów kondensatorów w każdym cyklu pracy,
- minimalną wartość skuteczną prądów kondensatorów poziomujących.

Przyjęto, że sygnał  $u_{gi}$  sterujący  $i$ -tym tranzystorem wynosi 1 dla tranzystora wysterowanego, natomiast 0 – dla tranzystora zablokowanego. Dla układu jest możliwe 16 stanów sterowania  $u_g$ , które przedstawia tablica 1. Sekwencje stanów wysterowania tranzystorów przy wyborze żądanych poziomów napięcia wyjściowego powinny być takie, aby wartość średnia prądów kondensatorów w ustalonym cyklu pracy była równa zero. Realizacji układu spełniającego taki warunek można dokonać w oparciu o pięć czterobitowych rejestrów przesuwających z recykulacją. Wynika to z faktu, iż kolejne stany dla takich samych poziomów mogą być reprezentowane przez słowa czterobitowe przesunięte w prawo z recykulacją. Z analizy pracy układu przy odpowiednio dobranych sekwencjach stanów wysterowania wy-

nika, że jeśli poziomy napięcia wyjściowego zmieniają się według algorytmu **0,1,0,1,0...** lub **3,4,3,4,3...**, wówczas częstotliwości prądów kondensatorów są 4-krotnie mniejsze od częstotliwości tego napięcia. W pozostałych przypadkach częstotliwości prądów  $i_{C1}, i_{C2}, i_{C3}$  są dwukrotnie mniejsze od częstotliwości napięcia wyjściowego.

Jeśli dolny i górny poziom oraz współczynnik wypełnienia ( $m$ ) napięcia wyjściowego zależy od sygnału zadającego  $u^*$  według krzywej przedstawionej na rysunku 4, wówczas charakterystyka sterowania przekształtnika  $U_o = U_o(u^*)$  jest liniowa ( $U_o$  jest wartością średnią napięcia wyjściowego).



Rys. 4. Współczynnik wypełnienia i przyjmowane poziomy napięcia wyjściowego w funkcji sygnału sterującego

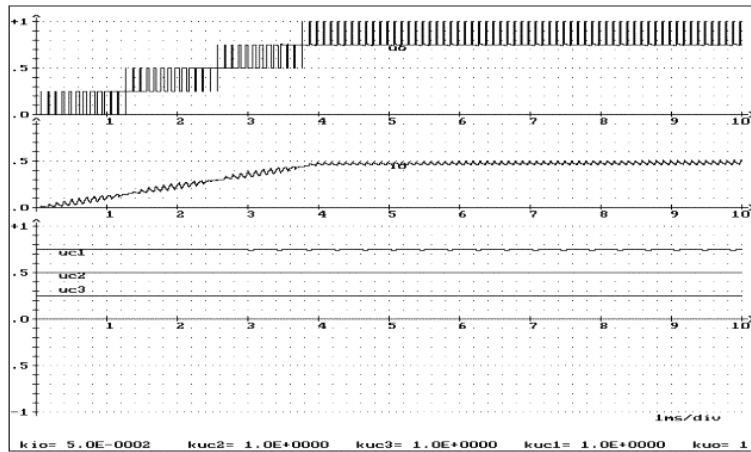
Z rysunku 4 wynika, że dla spełnionego warunku  $0 \leq u^* < 1/4$  napięcie wyjściowe  $u_o$  przyjmuje poziomy **0** lub **1**, dla  $1/4 \leq u^* < 1/2$  napięcie wyjściowe  $u_o$  przyjmuje poziomy **1** lub **2**, dla  $1/2 \leq u^* < 3/4$  napięcie wyjściowe  $u_o$  przyjmuje poziomy **2** lub **3**, dla  $3/4 \leq u^* < 1$  napięcie wyjściowe  $u_o$  przyjmuje poziomy **3** lub **4**.

W omawianym układzie wielopoziomowym napięcie prostokątne na indukcyjności ma amplitudę czterokrotnie (w ogólnym przypadku  $n$ ) mniejszą, co pozwala na poprawę jakości formowanego prądu.

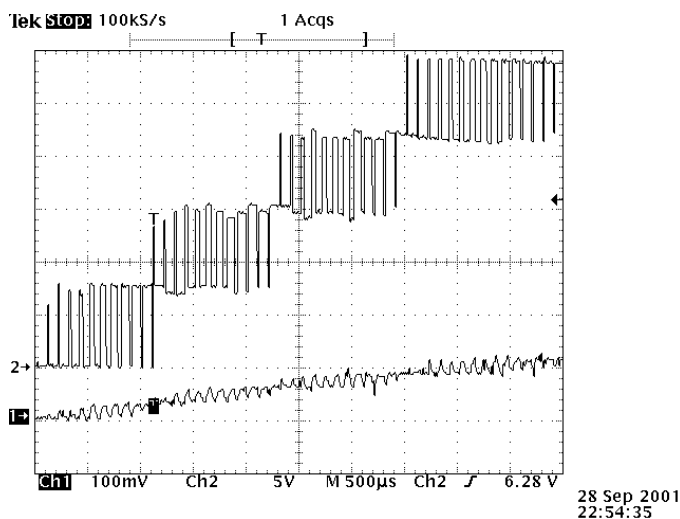
Badania symulacyjne wykazały, że układ wymaga jednokowych czasów załączania i wyłączania tranzystorów oraz

Tablica 1

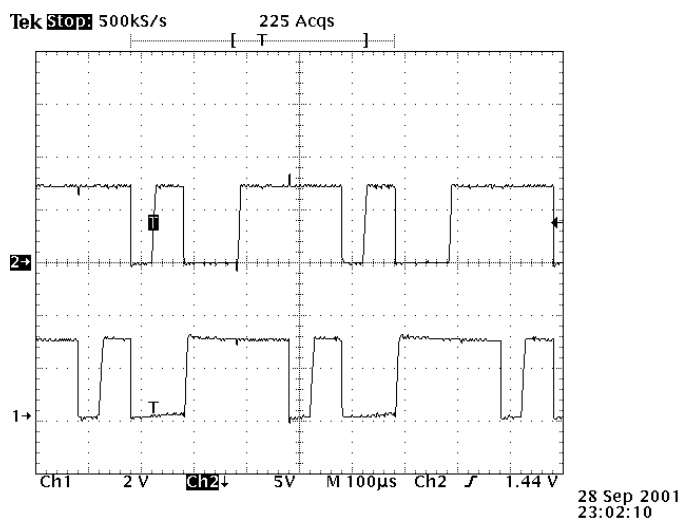
Stan	$u_{g1}$	$u_{g2}$	$u_{g3}$	$u_{g4}$
<b>0</b>	0	0	0	0
<b>1</b>	1	0	0	0
<b>2</b>	0	1	0	0
<b>3</b>	1	1	0	0
<b>4</b>	0	0	1	0
<b>5</b>	1	0	1	0
<b>6</b>	0	1	1	0
<b>7</b>	1	1	1	0
<b>8</b>	0	0	0	1
<b>9</b>	1	0	0	1
<b>A</b>	0	1	0	1
<b>B</b>	1	1	0	1
<b>C</b>	0	0	1	1
<b>D</b>	1	0	1	1
<b>E</b>	0	1	1	1
<b>F</b>	1	1	1	1



Rys. 5. Przebieg napięcia wyjściowego  $u_o$  (3 kV/dz.), prądu wyjściowego  $i_o$  (20 A/dz) i napięć na kondensatorach poziomujących  $u_{C1}$ ,  $u_{C2}$ ,  $u_{C3}$  (3 kV/dz) w układzie z liniowym zadawaniem napięcia i ograniczeniem prądu



Rys. 6. Napięcie wyjściowe  $u_o$  (górny przebieg) i prąd wyjściowy  $i_o$  (dolny przebieg)



Rys. 7. Napięcie kolektor-emiter na tranzystorach  $Q2$  (górny przebieg) i  $Q1$  (dolny przebieg)

jednakowych opóźnień w sterownikach tranzystorów. W przeciwnym razie napięcia kondensatorów poziomujących odbiegają od wartości zadanych. Dlatego przetwornica wymaga układów korygujących te napięcia.

Korekcja napięć  $u_{C1}$ ,  $u_{C2}$ ,  $u_{C3}$  na kondensatorach  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  może następować tylko wtedy jeśli napięcie wyjściowe przyjmuje poziom **1**, **2** lub **3**. Dla poziomów **0** i **4** napięcia na kondensatorach zmieniają się jedynie pod wpływem rezystorów dołączonych równolegle do tranzystorów i diod. Zmiany te są w kierunku wartości zadanych, ale ze względu na ograniczoną moc rezystorów są niewielkie. W przypadkach, kiedy zadanym poziomem jest poziom **1**, włączany jest taki tranzystor, aby korygować napięcie, które wykazuje maksymalny uchyb względny.

Jeśli np. napięcie  $u_{C1}$  wykazuje maksymalny dodatni uchyb względny, wówczas włączany jest tranzystor  $Q2$ , jeśli ten uchyb miałby znak ujemny, włączany byłby tranzystor  $Q1$ . Dla poziomu **2** włączana jest taka wybrana para sąsiednich tranzystorów, aby również kompensować napięcie na kondensatorze, na którym to napięcie wykazuje maksymalny uchyb względny. Podobnie dla poziomu **3** włączane są odpowiednie trzy tranzystory, aby kompensować napięcie o maksymalnym uchybie względnym. Jeśli moduły uchybów są poniżej wartości granicznych, tranzystory są włączane według sekwencji opisanej na początku, przy czym podczas każdej korekcji napięć na bieżąco wpisany jest aktualny stan sterowania do odpowiednich rejestrów.

### Badania symulacyjne i eksperymentalne czopera wielopoziomowego

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych analizowanego przerywacza prądu stałego, pracującego z opisanym układem sterowania. Parametry układu:

- częstotliwość pracy modulatora (częstotliwość taktująca)  $f_{VCO} = 10$  kHz,
- napięcie zasilające  $U_{IN} = 3$  kV,
- kondensator poziomujący  $C1 = 26,7$  F,
- $\delta_{\max} = 0,03$ ,
- rezystory wyrównawcze  $R1 \div R8 = 402$  k $\Omega$ ,
- $L_0 = 13$  mH,
- $R_0 = 250$   $\Omega$ ,
- $E = 0$  V,
- nastawy regulatora prądu:
  - czas zdwojenia  $T = 2$  ms,
  - stała proporcjonalna  $K = 2,5$ .

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono oscylogramy przebiegów napięć (500 V/dz) i prądów (1 A/dz), wykonanych z wykorzystaniem modelu pięciopozi-

mowego przerywacza. Model został wykonany w firmie MEDCOM Sp. z o.o. według projektu opracowanego w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej w ramach tematu badawczego *Przetwornice DC/DC z wielopoziomowymi przerywaczami prądu stałego*, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

### Wnioski

Szczególną cechą przekształtników DC/DC z kondensatorami poziomującymi jest to, że wartości napięć występujących na elementach sterowanych są mniejsze od wartości całkowitego napięcia zasilania. Napięcie wyjściowe takiego przekształtnika może przyjmować w ogólnym przypadku  $n+1$  poziomów ( $n$  oznacza liczbę tranzystorów). Układy wielopoziomowe znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie zastosowanie przekształtnika konwencjonalnego napotyka na barierę ograniczonej wartości napięć blokowania lub częstotliwości pracy elementów sterowanych. W porównaniu z układami zasilanymi ze źródeł wysokonapięciowych, w których stosuje się wysokonapięciowe pojedyncze lub połączone szeregowo elementy półprzewodnikowe, w układach z przetwarzaniem wielopoziomowym jest możliwe uniknięcie dużych stromości napięcia  $du/dt$ . Stromość napięcia jest parametrem krytycznym dla niektórych rodzajów elementów półprzewodnikowych, a ponadto duże wartości  $du/dt$  są źródłem zakłóceń. Układy wielopoziomowe pozwalają na zmniejszenie składowej zmiennej w przebiegu wyjściowym napię-

cia, co z kolei pozwala na zmniejszenie wielkości dławików wygładzających prąd. W przypadku pracy z obciążeniem w postaci silnika prądu stałego poprawa jakości napięcia i prądu zasilającego ma istotny wpływ na zmniejszenie strat w maszynie.

Możliwość zasilania przetwornic tego typu wysokim napięciem rzędu kilku kV umożliwia ich stosowanie w urządzeniach korzystających z napięć trakcyjnych.

□□

*Praca finansowana w ramach grantu KBN 8 T10A 041 17.*

### Literatura:

- [1] Meynard T. A., Foch H.: *Multi-Level Conversion: High Voltage Choppers and Voltage-Source Inverters*.
- [2] Miguel F., Escalante G., Vanner J.-C.: *Direct Approach for Balancing the Capacitor Voltages of a 5-Level Flying Capacitor Converter*. EPE '99, Lausanne.

Autorzy  
dr inż. Tadeusz Płatek  
mgr inż. Marek Niewiadomski  
Politechnika Warszawska,  
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

mgr inż. Paweł Cichomski  
MEDCOM Sp. z o.o.



MEDCOM Sp. z o.o. 02-315 Warszawa, ul. Barska 28/30  
tel. (22) 668 69 84, (22) 668 69 84, fax (22) 668 99 29  
e-mail: [info@medcom.com.pl](mailto:info@medcom.com.pl) □ [www.medcom.com.pl](http://www.medcom.com.pl)