

doi:10.15199/48.2017.01.66

## Generowanie impulsów sterujących w bezprzebiegowej metodzie sterowania regulatora napięcia przemiennego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z problematyką sterowania impulsowego regulatora napięcia przemiennego metodą PWM. Przedstawiono ideę bezprzebiegowego sterowania tranzystorów. Zaprezentowano strukturę logiczną układu generowania impulsów sterujących na podstawie modelu programu Matlab-Simulink. Omówiono sposób implementacji w układzie logiki programowalnej MACH4A5-128. Przedstawiono praktyczne rozwiązania detektorów znaków napięć i prądów zilustrowane przebiegami pomiarowymi w układzie rzeczywistym. Zaprezentowano wyniki weryfikacji działania układu w warunkach laboratoryjnych.

**Abstract.** The article presents selected issues related to the problems of impulse control AC voltage PWM regulator. The method of controlling transistors aimed to eliminating commutation overvoltages is presented. The logical structure of the control pulses generating circuit based on the model of Matlab-Simulink is presented. The way of implementation to programmable control logic MACH device is discussed. Practical solutions of direction detectors for voltage and current illustrated by waveforms measurement in a real system are described. The results of the laboratory verification research are presented. **Generation of control signals for non-overvoltage control method of AC voltage regulator**

**Słowa kluczowe:** regulator napięcia przemiennego, modulacja szerokości impulsów, układy zasilania, sterowanie impulsowe  
**Keywords:** AC-AC PWM voltage controller, power system, switching surges

### Wstęp

Prezentowany sposób generowania impulsów sterujących tranzystory w impulsowym regulatorze napięcia przemiennego jest jednym z etapów prac dotyczących projektowania energoelektronicznych układów zasilania odbiorników plazmowych. Konceptje struktury energoelektronicznego układu zasilania, model układu, model odbiornika plazmowego oraz sposób sterowania prezentowano w pracach [1, 2, 3, 4, 5, 8]. W niniejszym artykule skoncentrowano się na praktycznym rozwiązaniu układu generowania impulsów sterujących.

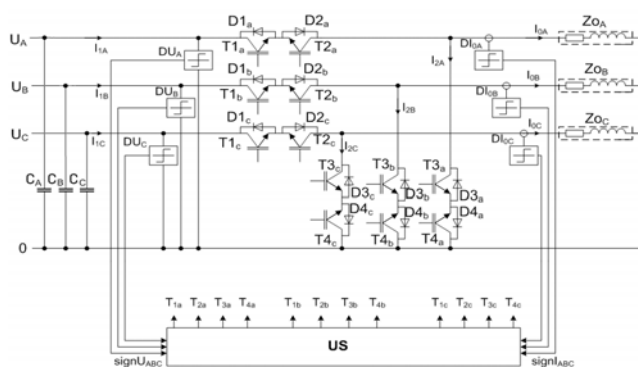
Na podstawie wyników prac przedstawionych w [2] wybrano koncepcję pozwalającą rozdzielić funkcję sterowania tranzystorami od nadrzędnych funkcji regulacji prądu lub mocy odbiornika plazmowego. Istotą koncepcji jest generowanie impulsów sterujących poza układem mikroprocesora poprzez implementację tej funkcji w układzie logiki programowalnej. Takie rozwiązanie jest możliwe dzięki wyeliminowaniu konieczności kontrolowania czasów martwych podczas przełączania tranzystorów [3, 4]. Źródłem sygnału PWM może być dowolny zewnętrzny generator: zarówno mikroprocesor jak i układ zadajnika analogowego. W rozwiązaniu prezentowanym w [6] sterownik mikroprocesorowy pełni tylko funkcje regulatora prądu lub mocy i może być zastąpiony przez dowolny inny układ regulacji.

### Trójfazowy regulator napięcia przemiennego z przewodem zerowym

Na rysunku 1 przedstawiono schemat trójfazowego regulatora napięcia przemiennego z przewodem zerowym wraz z układem sterującym przełączaniem tranzystorów.

Trójfazowy przekształtnik z przewodem zerowym można rozpatrywać jako połączenie trzech niezależnych regulatorów jednofazowych.

Sterowanie prądem wyjściowym przekształtnika realizowane jest na zasadzie modulacji szerokości impulsów. Taki układ połączeń pozwala na kontrolę przepływu prądu w obu kierunkach w każdej z gałęzi przekształtnika oraz umożliwia bezprzebiegowe przełączenie tranzystorów [3, 4].



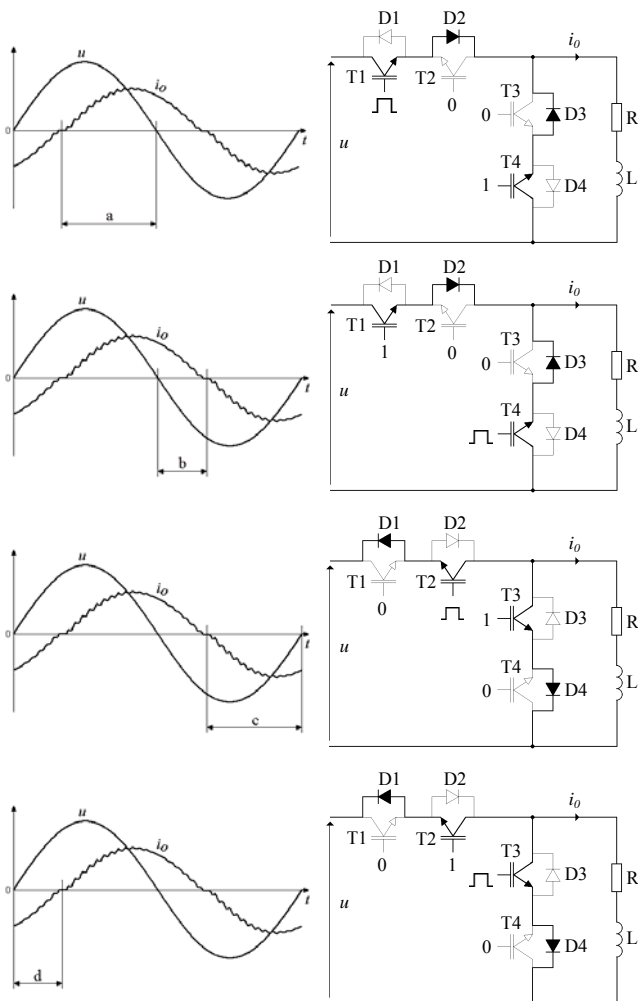
Rys.1. Trójfazowy regulator napięcia przemiennego z układem sterującym: *US* – układ sterujący, *DU* – układy detekcji znaków napięć zasilających, *DI* – układy detekcji znaków prądów obciążenia, *signU* – sygnały znaków napięć zasilających, *signI* – sygnały znaków prądów obciążenia, *T* – sygnały sterujące tranzystory

Na rysunku 2 przedstawiono grafy ilustrujące ideę bezprzebiegowej metody sterowania tranzystorów [2] dla jednej fazy przekształtnika. Symbolem 1 oznaczono załączenie tranzystora, symbolem 0 wyłączenie, a symbolem  $\square$  sterowanie sygnałem PWM.

### Układ generowania impulsów sterujących

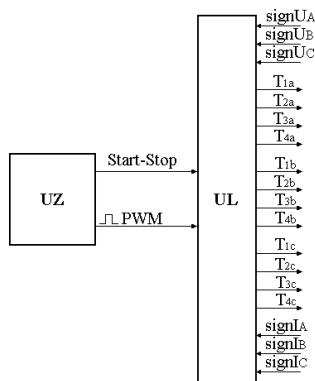
Przekształtnik przedstawiony na rysunku 1 wymaga 12 sygnałów sterujących tranzystorami, po 4 dla każdej fazy. Sygnały te generowane są na podstawie 6 sygnałów detekcji znaków napięć zasilających i znaków prądów obciążenia dla każdej z faz.

Zaproponowana metoda bezprzebiegowego sterowania tranzystorów pozwala na realizację prostego systemu sterującego. Dzięki odpowiedniej strukturze logicznej umieszczonej w układzie programowalnym w połączeniu z przedstawioną metodą sterowania generowanie impulsów sterujących dla wszystkich tranzystorów może być zrealizowane z jednego generatora sygnału PWM.



Rys.2. Ilustracja bezprzewięciowej metody sterowania dla jednej fazy przekształtnika:  $u$  – napięcie zasilania,  $i_o$  – prąd obciążenia: a)  $u > 0, i_o > 0$ , b)  $u < 0, i_o > 0$ , c)  $u > 0, i_o < 0$ , d)  $u < 0, i_o < 0$

Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy układu generowania impulsów sterujących tranzystory.

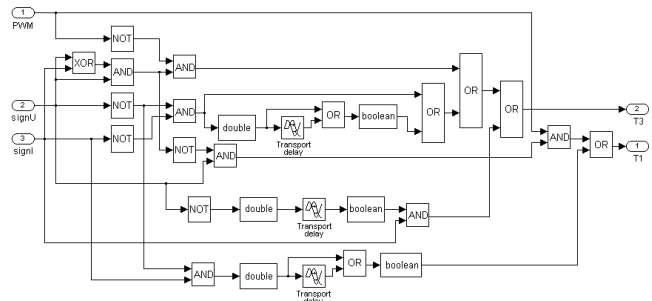


Rys.3. Schemat układu generowania impulsów sterujących tranzystory:  $UZ$  – układ zadawania stanu pracy,  $UL$  – układ logiczny,  $T$  – sygnały sterujące tranzystorami,  $signU$  – sygnały znaku napięcia zasilania,  $signI$  – sygnały kierunku przepływu prądu obciążenia

Wypełnienie impulsów zadawane jest z układu zadawania  $UZ$  na podstawie dowolnego kryterium, w otwartym lub zamkniętym układzie regulacji.

Układ  $UZ$  przesyła do układu logicznego  $UL$  sygnały sterujące  $START/STOP$  oraz sygnał  $PWM$  sterujący częstotliwością i wypełnieniem kluczowania tranzystorów.

Rolą układu logicznego  $UL$  jest wypracowanie impulsów sterujących tranzystory na podstawie znaków prądu i napięcia w każdej z faz zgodnie z zadaniem wypełnienia sygnału  $PWM$ . Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy struktury logicznej sterowania tranzystorów  $T1$  i  $T3$  dla jednej z faz dla programu Matlab-Simulink. W podobny sposób zamodelowano strukturę logiczną układu sterowania dla tranzystorów  $T2$  i  $T4$ .



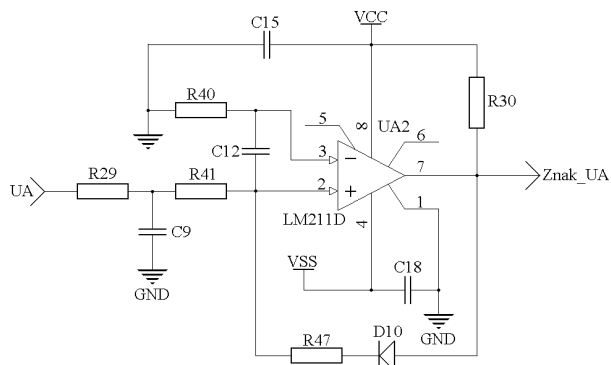
Rys.4. Model symulacyjny struktury logicznej sterowania tranzystorów  $T1$  i  $T3$  dla jednej z faz przekształtnika

Elementy Transport Delay zapewniają niezbędne opóźnienie wynikające z metody sterowania. Pozwalają także uwzględnić opóźnienia występujące w rzeczywistych układach detekcji znaków napięć i prądów. Wyniki badań wpływu chwil detekcji znaków napięć i prądów w stosunku do rzeczywistych zmian kierunku sygnałów pomiarowych przedstawiono w pracy [7].

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że konieczne jest wprowadzenie do zaproponowanej metody sterowania opóźnienia przełączenia sygnałów sterujących tranzystorami po otrzymaniu przez układ sterowania informacji o wykryciu zmiany znaku prądu lub napięcia, przy czym zmiana znaku prądu obciążenia skutkuje opóźnieniem przełączeń tranzystorów ( $T1, T2$ ) gałęzi podłużnej, a zmiana znaku napięcia opóźnieniem przełączeń tranzystorów ( $T3, T4$ ) gałęzi poprzecznej.

### Detekcja znaków prądu i napięcia

Generowanie impulsów sterujących tranzystory w zaproponowanej metodzie sterowania wymaga detekcji znaku napięcia zasilania i znaku prądu obciążenia. Detekcja znaku napięcia zasilania, ze względu na dużą wartość amplitudy w stosunku do wartości napięć sygnałów logicznych oraz ciągłość przebiegu, nie stwarza problemów. Na rysunku 5 przedstawiono układ detekcji znaku napięcia zasilania. Sygnał  $UA$  pochodzi z przekładnika napięciowego, sygnał  $Znak\_UA$  jest sygnałem detekcji znaku napięcia zasilania.

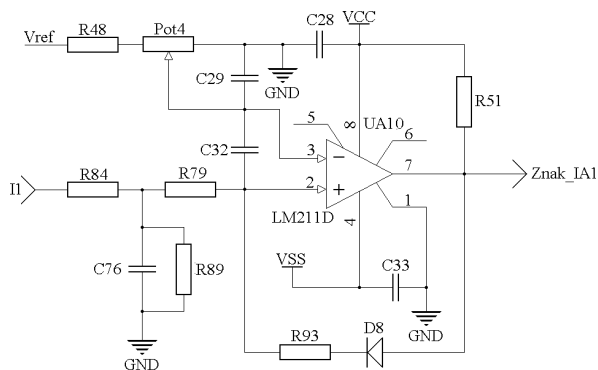


Rys.5. Schemat detektora znaku napięcia zasilania

W układzie rzeczywistym bardziej skomplikowana jest detekcja znaku prądu obciążenia. Wartość prądu

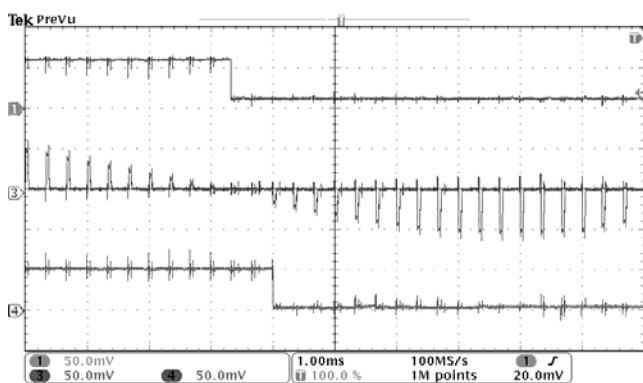
obciążenia zależna jest od parametrów obciążenia i wypełnienia impulsów sterujących tranzystory.

Układ detekcji znaku prądu obciążenia powinien być dopasowany do największej wartości prądu jaki może płynąć w układzie, a jednocześnie umożliwiać detekcję znaku prądów o niewielkich wartościach. W najbardziej niekorzystnym przypadku prąd obciążenia może mieć charakter impulsowy. Na rysunku 6 przedstawiono schemat układu detekcji znaku prądu obciążenia.



Rys.6. Schemat detektora znaku prądu obciążenia

Przebieg prądu obciążenia, poprzez przetwornik LEM LA100P podawany jest na wejście I1. Sygnałem znaku prądu jest sygnał Znak\_IA1. Próg detekcji ustalany jest za pomocą potencjometru Pot4. Detektor zawiera układ filtrujący zapewniający utrzymanie na wyjściu sygnału ciągłego przy impulsowych charakterze sygnału wejściowego. Przy małych wartościach prądu obciążenia napięcie filtru może być mniejsze niż ustawiony poziom komparacji, a zatem sygnał detekcji znaku może zaniknąć zanim prąd zmieni kierunek przepływu. Z tego powodu zastosowano dwa detektory znaku prądu – jeden wykrywający dodatni, a drugi ujemny prąd obciążenia. Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi pomiarowe w układzie detekcji znaku prądu obciążenia przy impulsowym prądzie obciążenia.



Rys.7. Detekcja znaku prądu obciążenia: 1 – sygnał detektora znaku dodatniego, 3 – sygnał wejściowy, 4 – sygnał detektora znaku ujemnego

Dla przykładu przedstawionego na rysunku 7 wykrycie sygnału detektora znaku dodatniego powoduje zapamiętanie informacji o dodatnim kierunku prądu obciążenia aż do zmiany sygnału z wyjścia detektora znaku ujemnego. Takie działanie wprowadza opóźnienie detekcji znaku prądu w stosunku do rzeczywistej zmiany kierunku przepływu prądu obciążenia.

Wyniki analiz zamieszczone w pracy [7] wskazują, że opóźnienie przełączeń tranzystorów powinno być dobrane w taki sposób, aby uwzględnić możliwe niedokładności układów detekcji pod kątem wyprzedzenia sygnału detekcji

względem rzeczywistej zmiany znaku wielkości mierzonych, a jednocześnie nie powinny być zbyt duże, gdyż skutkuje to zniekształceniem prądu obciążenia.

Zastosowanie dwóch detektorów znaków prądu pozwala na prawidłową pracę układu w całym zakresie prądów obciążenia.

### Realizacja praktyczna układu generowania impulsów sterujących

Zaproponowaną metodę sterowania wraz z przedstawioną strukturą generowania impulsów sterujących zastosowano w trójfazowym regulatorze napięcia przemiennego do zasilania plazmotronu plazmy nietermicznej. Układem zadającym stan pracy przekształtnika UZ jest mikrokontroler Hitachi H8/300H, a układ logiczny generowania impulsów UL zrealizowano w oparciu o programowalny układ ISP MACH4A5-128, do którego wprowadzono strukturę logiczną przełączania tranzystorów na podstawie sygnałów otrzymywanych z mikrokontrolera oraz sygnałów detekcji aktualnych znaków napięć fazowych w punkcie zasilania i znaków prądów w obciążeniu.

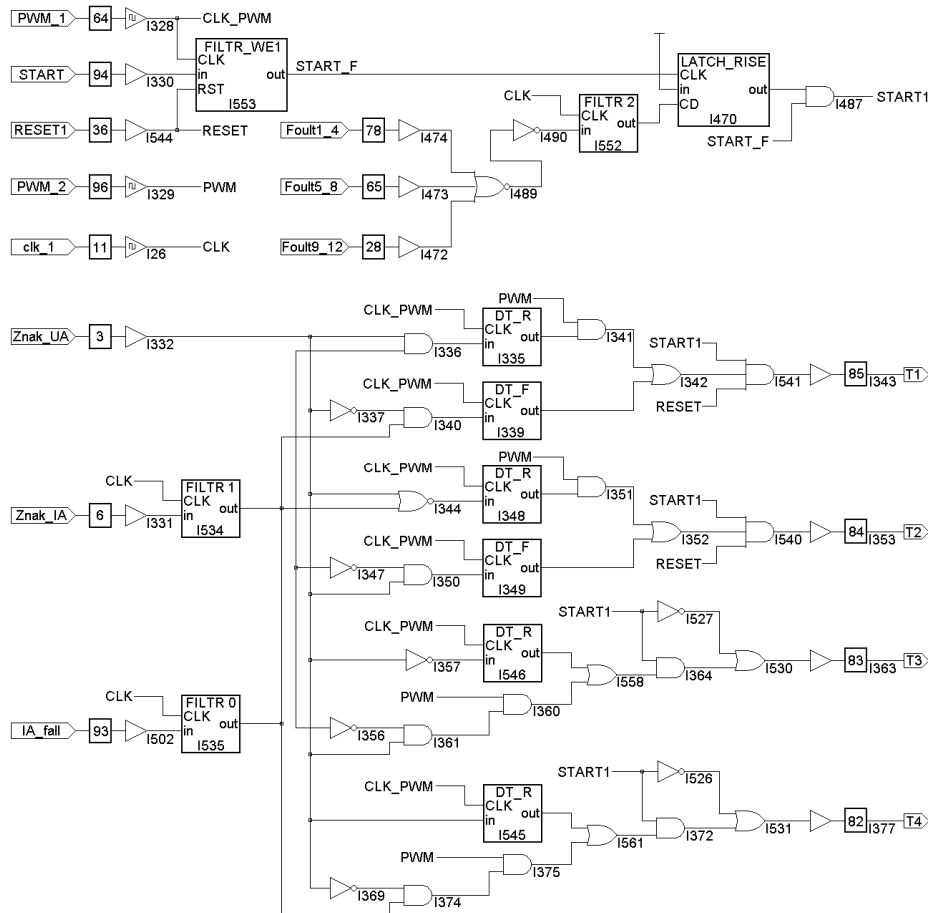
Na rysunku 8 przedstawiono strukturę logiczną sterowania tranzystorami jednej fazy przekształtnika.

W strukturze logicznej układu zawarto bloki kontroli i blokad aktywowane w przypadku wykrycia sygnałów błędów z drajwerów tranzystorów oraz bloki wyzwalania tranzystorów.

Sygnał „Znak\_UA” (wejście 3) jest sygnałem z detektora znaku napięcia zasilania. Sygnał „Znak\_IA” (wejście 8) jest sygnałem z detektora znaku prądu dodatniego (stan logiczny 1 dla prądu dodatniego przy przejściu z ujemnego na dodatni). Sygnał „IA\_fall” (wejście 93) jest sygnałem z detektora znaku prądu ujemnego (stan logiczny 1 dla prądu dodatniego przy przejściu z dodatniego na ujemny). Układy I534 oraz I535 wprowadzają opóźnienie w sygnałach znaków prądów w celu zabezpieczenia przed zbyt wczesnym wykryciem zmiany znaku napięcia spowodowaną niedokładnością układów detekcji, a układy I335, I339, I349, I349, I545, I546 wprowadzają dodatkowe opóźnienie zmiany logiki sterowania tranzystorami po zmianie znaku prądu obciążenia, zgodnie z zaproponowaną metodą sterowania.

Sterowanie tranzystora T1 odbywa się dwoma torami. Przy dodatnich znakach napięcia (sygnał Znak\_UA=1) i prądu (sygnał Znak\_IA=1) aktywny jest układ I335, a tranzystor T1 zostaje impulsowany z wypełnieniem i częstotliwością określaną sygnałem PWM układu I341 (zanegowany sygnał Ster\_PWM1 z wejścia 96 podawany do układu z mikroprocesora). Przy ujemnym znaku napięcia (sygnał Znak\_UA=0) i dodatnim prądzie (sygnał IA\_fall=1) aktywny staje się układ I339 co wymusza załączenie na stałe tranzystora T1. Przy dodatnim napięciu (sygnał Znak\_UA=1) i ujemnym prądzie obciążenia (sygnał Znak\_IA=0) lub przy ujemnym napięciu (sygnał Znak\_U=0) i ujemnym prądzie obciążenia (sygnał IA\_fall=0) blokowane są oba tory i tranzystor T1 zostaje wyłączony.

Sterowanie tranzystora T2 przebiega następująco. Przy ujemnych znakach napięcia (sygnał Znak\_UA=0) i prądu (sygnał IA\_fall=0) aktywny jest układ I348, a tranzystor T2 zostaje impulsowany z wypełnieniem i częstotliwością określaną sygnałem PWM układu I351 (zanegowany sygnał Ster\_PWM1 z wejścia 96 podawany do układu z mikroprocesora). Przy dodatnim znaku napięcia (sygnał Znak\_UA=1) i ujemnym prądzie (sygnał Znak\_IA=0) aktywny staje się układ I349 co wymusza załączenie na stałe tranzystora T2.



Rys.8. Implementacja logiki sterowania tranzystorów fazy A przekształtnika w układzie MACH4A5-128

Przy dodatnim napięciu (sygnał Znak\_UA=1) lub dodatnim prądzie obciążenia (sygnał IA\_fall=1) oraz przy ujemnym napięciu (sygnał Znak\_UA=0) i dodatnim prądzie obciążenia (sygnał Znak\_IA=1) blokowane są oba tory i tranzystor T2 zostaje wyłączony.

Po zaniku sygnału START (wejście 94) tranzystory T1 i T2 zostają wyłączone poprzez I541 i I540.

Dla tranzystora T3, przy dodatnim napięciu (sygnał Znak\_UA=1) i ujemnym prądzie (Znak\_IA=0) aktywny jest układ I381, a tranzystor T3 zostaje impulsowany z wypełnieniem i częstotliwością określaną sygnałem PWM układu I380 (zanegowany sygnał Ster\_PWM1 z wejścia 96 podawany do układu z mikroprocesora).

Przy ujemnym znaku napięcia (sygnał Znak\_UA=0) aktywny staje się układ I349 co wymusza załączenie na stałe tranzystora T3. Przy dodatnim znaku napięcia (sygnał Znak\_UA=1) i dodatnim prądzie (Znak\_IA=1) blokowane są oba tory i tranzystor T3 zostaje wyłączony.

Sterowanie tranzystora T4 odbywa się następująco. Przy ujemnym napięciu (sygnał Znak\_UA=0) i dodatnim prądzie (IA\_Fall =1) aktywny jest układ I374 a tranzystor T4 zostaje impulsowany z wypełnieniem i częstotliwością określaną sygnałem PWM układu I375 (zanegowany sygnał Ster\_PWM1 z wejścia 96 podawany do układu z mikroprocesora).

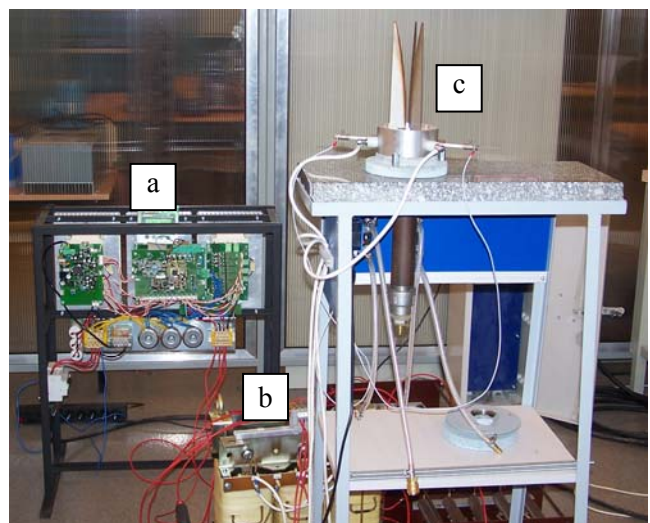
Przy dodatnim znaku napięcia (sygnał Znak\_UA=1) aktywny staje się układ I545 co wymusza załączenie na stałe tranzystora T4. Przy ujemnym znaku napięcia (sygnał Znak\_UA=0) i ujemnym prądzie (IA\_fall=0) blokowane są oba tory i tranzystor T4 zostaje wyłączony.

Po zaniku sygnału START (wejście 94) tranzystory T3 i T4 zostają załączone poprzez I523-I530 oraz I526-I531.

Dla pozostałych faz generowanie impulsów sterujących tranzystory realizowane jest analogicznie, na podstawie sygnałów znaków prądów i napięć właściwych faz.

### Weryfikacja laboratoryjna

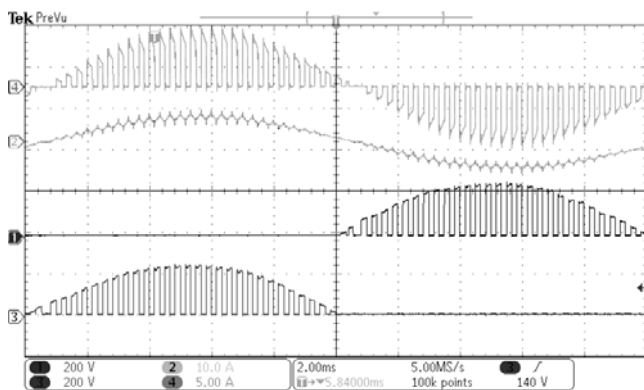
Na rysunku 9 przedstawiono stanowisko badawcze. Jako klucze elektroniczne wykorzystano tranzystory IGBT typu SKM 300 GB. Tranzystory nie zostały wyposażone w układy zabezpieczeń przeciwprzepięciowych.



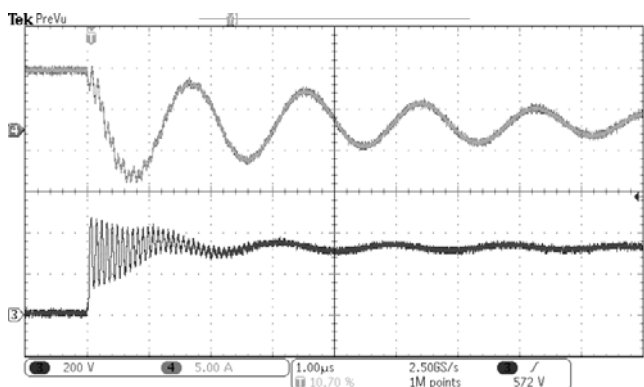
Rys.9. Stanowisko badawcze: a) trójfazowy regulator napięcia przemiennego, b) transformator dopasowujący, c) plazmotron

Weryfikację pracy układu przeprowadzono przy obciążeniu przekształtnika odbiornikiem typu RL oraz plazmotronem plazmy nietermicznej. Obciążając układ plazmotronem plazmy nietermicznej jako gaz plazmo twórczy stosowano argon, azot i powietrze. W trakcie badań zmieniane były zarówno parametry obciążenia, jak i wypełnienie impulsów sterujących tranzystory.

Na rysunkach 10-11 przedstawiono przykładowe przebiegi pomiarowe uzyskane w układzie laboratoryjnym dla obciążenia typu RL.



Rys.10. Przebiegi pomiarowe dla częstotliwości impulsowania 3 kHz i wypełnieniu impulsów 50 % i czasie opóźnienia 1 ms przy obciążeniu typu RL: 1 – napięcie tranzystora T3, 2 – prąd obciążenia, 3 – napięcie tranzystora T4, 4 – prąd gałęzi poprzecznej



Rys.11. Przebiegi pomiarowe podczas procesu wyłączenia tranzystora T4: 3 – napięcie tranzystora, 4 – prąd gałęzi poprzecznej

Na uwagę zasługują przebiegi napięcia tranzystora i prądu w gałęzi poprzecznej (rys.11) w chwili wyłączenia tranzystora. Przebiegi te obrazują złożoność procesu przełączania, w którym udział biorą dwa podobowody o różnych częstotliwościach drgań własnych. Oscylacje o niższej częstotliwości (ok. 500 kHz) to efekt rezonansów w obwodzie głównym, na który składają się indukcyjność sieci, odbiornika i pojemności filtra wejściowego ( $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$  z rys.1). Oscylacje o wyższej częstotliwości (ok. 12 MHz) to efekt rezonansów w obwodzie, na który składają się indukcyjności połączeń tranzystorów oraz pojemności wyjściowe tranzystora i diody.

Przeprowadzone badania potwierdzają prawidłową pracę przekształtnika dla przedstawionej struktury generowania impulsów sterujących tranzystory oraz układów detekcji znaków napięć i prądów, niezależnie od kształtu oraz przesunięcia fazowego prądu obciążenia.

## Wnioski

Zadaniem sterowania impulsowego w regulatorach napięcia przemiennego jest regulacja wartości podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego poprzez zmianę wypełnienia impulsów sterujących o częstotliwości znacznie większej od częstotliwości napięcia zasilającego. Współczynnik wypełnienia impulsu pełni funkcję wielkości sterującej.

Rozdzielenie funkcji sterowania tranzystorów od nadrzędnych funkcji regulacji upraszcza układ sterowania.

Źródłem sygnału PWM może być dowolny układ zewnętrzny pracujący w otwartym lub zamkniętym układzie regulacji.

Zastosowanie w każdej fazie dwóch detektorów znaków prądu pozwala na prawidłową pracę układu niezależnie od kształtu prądu obciążenia.

Weryfikacja laboratoryjna w układzie rzeczywistym wykazała poprawną pracę przy obciążeniu typu RL oraz przy zasilaniu plazmotronu plazmy nietermicznej, przy różnych prędkościach przepływu gazu plazmotwórczego.

**Autorzy:** dr inż. Andrzej Kandyba, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, ul. Górnych Wałów 25., 44-100 Gliwice, e-mail: akandyba@grupasilesiasimp.pl

dr inż. Marian Hyla, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: marian.hyla@polsl.pl

prof. dr hab. inż. Igor Kurytnik, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Oświęcimiu, ul. Kolbego 8, 32-600 Oświęcim, e-mail: ikurytnik@outlook.com

## LITERATURA

- [1] Fedyczak Z.: Impulsowe układy transformujące napięcia przemiennego, *Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskiego*, Zielona Góra 2003
- [2] Hyla M., Kandyba A.: Bezprzepięciowe sterowanie impulsowe regulatora napięcia przemiennego. *Prace Naukowe PSI, Seria Elektryka*, 2012 r., 58 z. 1, s.57-62
- [3] Hyla M., Kandyba A.: Sposób bezprzepięciowego impulsowego sterowania tranzystorami w trójfazowym regulatorze napięcia przemiennego bez przewodu zerowego, Patent nr 219 766, opubl. 31.07.2015
- [4] Hyla M., Kandyba A.: Sposób bezprzepięciowego impulsowego sterowania tranzystorami w jednofazowym i trójfazowym regulatorze napięcia przemiennego z przewodem zerowym, Patent nr 220 094, opubl. 31.08.2015
- [5] Kandyba A., Hyla M.: Energoelektroniczny regulator napięcia przemiennego o sterowaniu impulsowym do współpracy z odbiornikiem łukowym. *Przegląd Elektrotechniczny* NR 11/2011 s. 52-55
- [6] Kandyba A.: Synteza układu regulacji prądu lub mocy łuku dla generatora plazmy nietermicznej zasilanego z trójfazowego przekształtnika AC/AC. *Przegląd Elektrotechniczny* NR 6/2013 s. 186-189
- [7] Kandyba A., Hyla M., Kurytnik I.: Control of transistors in AC voltage PWM controller with elimination of commutation overvoltages, *IEEE International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering CPEE*, pp.62-67, Lviv, Ukraine, 2-5 Sept. 2015
- [8] Strzelecki R., Fedyczak Z., Kasperek R.: Design and tests of a three-phase PWM AC power controller with two transistorized switches. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1/499 - 504, Warsaw, Poland, 14-17 June 1996