

## Implementacja układu sterowania transformatora hybrydowego

**Streszczenie.** Przedmiotem artykułu jest implementacja układu sterowania trójfazowym transformatorem hybrydowym (TH) o topologii ze sterownikiem matrycowym (SM) w układzie czteroprzewodowym. W artykule przedstawiono opis działania TH i układu sterowania. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych zweryfikowanych badaniami eksperymentalnymi układu sterowania TH

**Abstract.** This paper deals with the implementation of a control circuit of the three-phase hybrid transformer (HT) with matrix chopper in four-wire circuit. This paper presents an operational description proposed HT and control circuit. Simulation test results are verified with an experimental test results. *(Implementation of control circuit of the hybrid transformer).*

**Słowa kluczowe:** przekształtnik prądu przemiennego, transformator hybrydowy, sterownik matrycowy, detektor wartości szczytowej.

**Keywords:** AC/AC converter, hybrid transformer, matrix chopper, peak detector.

### Wstęp

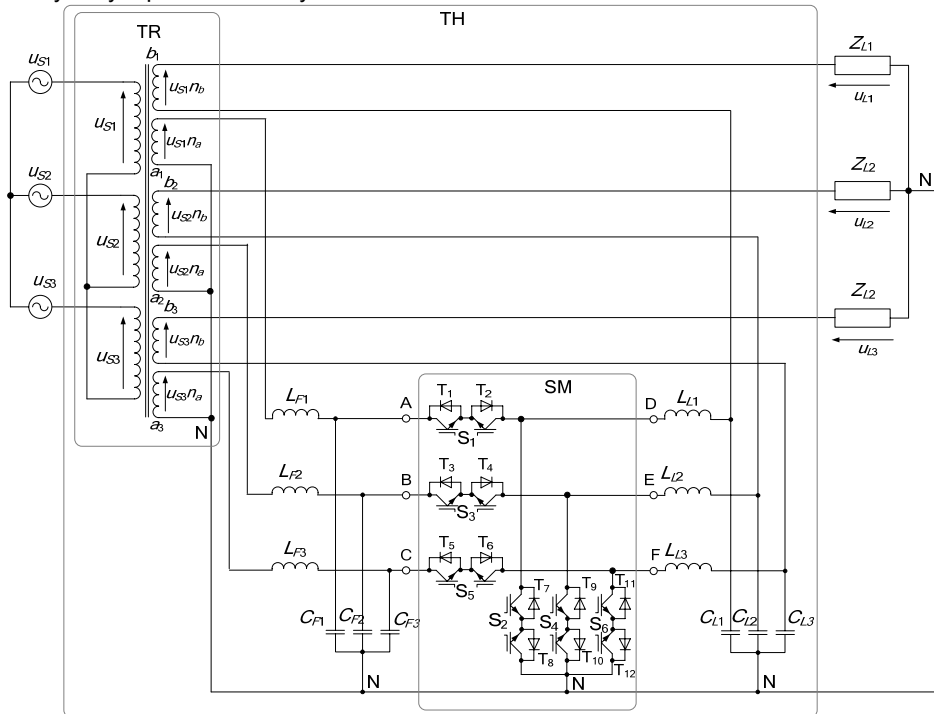
W wyniku stanów dynamicznych występujących w systemie elektroenergetycznym, powstają u odbiorcy niekorzystne efekty w postaci niepożądanych parametrów zasilania [1], [2]. Niekorzystne warunki zasilania powodowane zapadami, spadkami napięcia i przepięciami, mają negatywny wpływ na zasilane urządzenia elektryczne, mogący spowodować ich wadliwą pracę lub trwałe uszkodzenia [4], [5]. Taki stan rzeczy wskazuje na potrzebę sterowania napięcia przemiennego (regulację, stabilizację) w systemie elektroenergetycznym. Impulsowe układy transformowania napięć przemiennych z zastosowaniem techniki modulacji szerokości impulsu (PWM) (stabilizatory napięcia, regulatory, kompensatory zapadów napięcia i przepięć), pozwalają na realizację szybkich zmian napięcia wyjściowego, dobrą dynamikę, a tym samym złagodzenie efektów niekorzystnych warunków zasilania [6]–[9].

Układy sterowania napięcia przemiennego bazujące na topologiach transformatorów hybrydowych (TH) obok spełniania funkcji sterowania napięcia, realizują separację galwaniczną pomiędzy źródłem zasilania a obciążeniem, rozszerzając tym samym właściwości konwencjonalnego transformatora elektromagnetycznego o zdolność do realizacji szybkich zmian napięcia wyjściowego w szerokim zakresie [11]–[15].

Układy TH wymagają zastosowania odpowiedniego układu sterowania zapewniającego szybkiego wykrycia zapadu napięcia lub przepięcia i odpowiedniego zareagowania na zaistniałą sytuację. W artykule przedstawiono implementację układu sterowania trójfazowego transformatora hybrydowego ze sterownikiem matrycowym (TH z SM) w układzie czteroprzewodowym, bazującego na detektorze wartości szczytowej napięcia [16]. Przedstawiono opis działania proponowanego rozwiązania, zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych trójfazowego TH z opisanym układem sterowania.

### Opis prezentowanego układu

Schemat trójfazowego transformatora hybrydowego ze sterownikiem matrycowym pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ideowy trójfazowego TH z SM w układzie czteroprzewodowym

Sprężenie elektryczne realizowane jest przez trójfazowy transformator elektromagnetyczny (TR) z dwoma wydzielnymi uzwojeniami wtórnymi w każdej fazie. Sterownik matrycowy SM, realizujący sprzężenie elektryczne zasilany jest przez wejściowy filtr dolnoprzepustowy  $L_F C_F$  z uzwojeń  $a$  ( $a_1, a_2, a_3$ ) TR połączonych w gwiazdę. Uzwojenia  $b$  ( $b_1, b_2, b_3$ ) TR przyłączone są do obciążenia i przez dolnoprzepustowy filtr  $L_L C_L$  do odpowiednich zacisków wyjściowych SM. Model matematyczny oraz głębsza analiza właściwości i implementacja trójfazowego TH z SM zostały opisane w pracach [10] i [12].

Uproszczony schemat blokowy układu sterowania transformatora hybrydowego pokazano na rysunku 2.

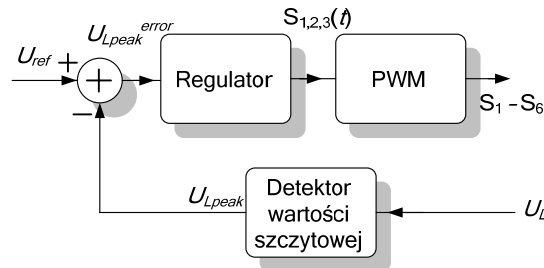
Podstawowymi blokami układu sterowania są, pracujący w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego, detektor wartości szczytowej napięcia obciążenia  $U_L$  [16], regulator oraz układ formowania impulsów PWM sterujących dwukierunkowymi łącznikami SM ( $S_1 - S_6$ ). Bezpośrednio od wartości współczynnika wypełnienia impulsu  $D$  zależy napięcie wyjściowe  $U_L$  (1) transformatora hybrydowego [10] i [12].

$$(1) \quad U_L \cong p_a U_S D + p_b U_S$$

Detektor wartości szczytowej realizuje funkcję opisaną równaniem (2).

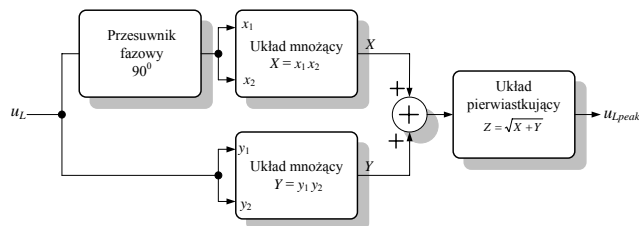
**VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**

$$(2) \quad u_{L,peak} = \sqrt{(U_L \sin(\omega t))^2 + (U_L \cos(\omega t))^2}.$$



Rys. 2. Podstawowy schemat blokowy układu sterowania transformatora hybrydowego

Schemat blokowy detektora wartości szczytowej opisanego równaniem (1) pokazano na rysunku 3.

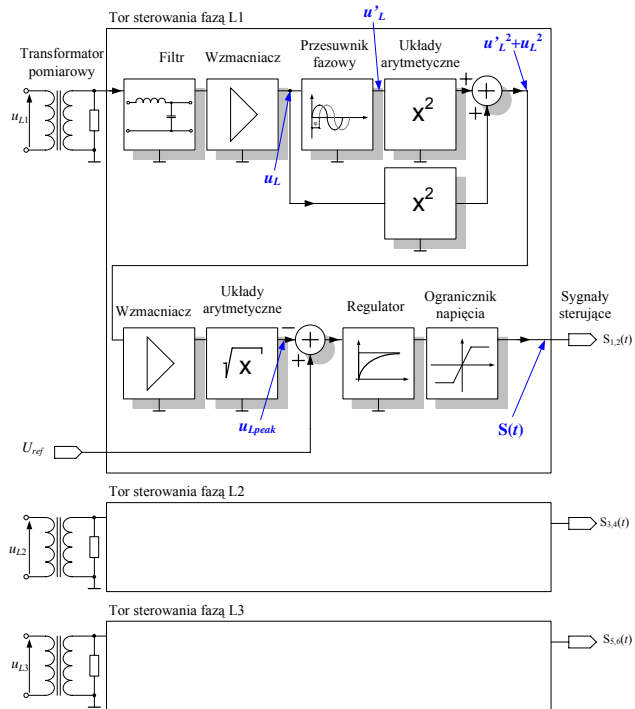


Rys. 3. Schemat blokowy detektora wartości szczytowej napięcia

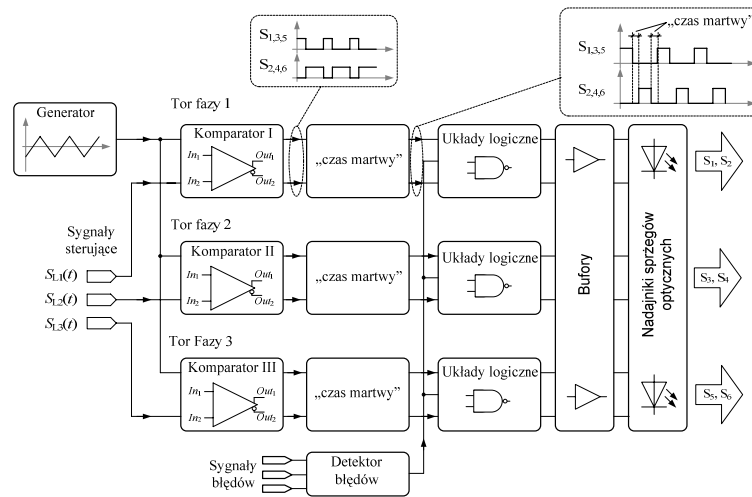
Detektor wartości szczytowej przeznaczony jest dla sinusoidalnych przebiegów czasowych. W pierwszym kroku sygnał o przebiegu sinusoidalnym dzielony jest na dwa tory, gdzie w jednym przesuwany jest o  $\pi/2$  względem drugiego. Następnie obydwa sygnały za pomocą układów mnożących, podnoszone są do kwadratu. W ostatnim kroku następuje sumowanie sygnałów obydwóch torów i pierwiastkowanie (rys. 3). Na wyjściu detektora wartości szczytowej otrzymywany jest sygnał oznaczany jako  $u_{L,peak}$ . Bardziej szczegółowy schemat blokowy układu sterowania trójfazowego transformatora hybrydowego pokazano na rysunku 4. Tor sterowania fazą L2 i L3 jest identyczny jak tor sterowania fazą L1. Wzmacniacze sygnału występujące w strukturze układu sterowania dopasowują poziomy sygnałów na wejściu i wyjściu poszczególnych stopni układu sterowania.

Na wyjściu układu sterowania zastosowano ogranicznik napięcia sterującego (rys. 4). Pełni on funkcję zabezpieczającą przed niepożądanym poziomem sygnału sterującego.

Układ sterowania połączony jest z układem formowania impulsów PWM pokazanym na rysunku 5.



Rys. 4. Schemat blokowy układu sterowania TH pokazanego na rysunku 1, bazującego na detektorze wartości szczytowej



Rys. 5. Schemat blokowy układu formowania impulsów sterujących

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Jest to klasyczny modulator PWM, w którym sygnały sterujące porównywane są z przebiegiem piłkowształtnym. W celu uniknięcia zwarć międzyfazowych podczas przełączania łączników SM zastosowano strategię komutacji z tzw. „czasem martwym”. Zastosowanie trzech niezależnych torów (rys. 5) umożliwia sterowanie napięcia wyjściowego niezależnie w każdej fazie. Przebiegi czasowe napięć w układzie sterowania oraz sygnałów sterujących energoelektronicznymi łącznikami ( $S_1 - S_6$ ) w obwodzie głównym TH pokazano w następnym rozdziale.

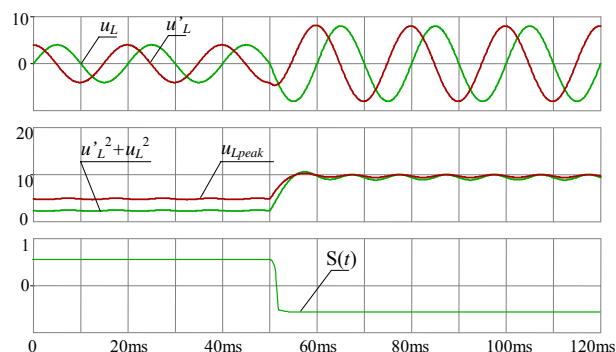
### **Wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych**

Badania eksperymentalne układu sterowania trójfazowym TH z SM zostały przeprowadzone dla obwodu o parametrach przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry obwodu głównego TH

Parametr	Symbol	Wartość
Napięcie zasilania	$U_s$	3x50 V / 50 Hz
Przekładnie TR	$p_a, p_b$	4/3, 2/3
Indukcyjność filtru wej./wyj.	$L_{FS}, L_{FL}$	1 mH
Pojemność filtru wej./wyj.	$C_{FS}, C_{FL}$	10 $\mu$ F
Rezystancja obciążenia	$R_L$	60 $\Omega$
Częstotliwość przełączania	$f_s$	5 kHz
„czas martwy”	$t_m$	0,8 $\mu$ s
Tranzystory IGBT	$T_1-T_6$	IRG4PH50 KD

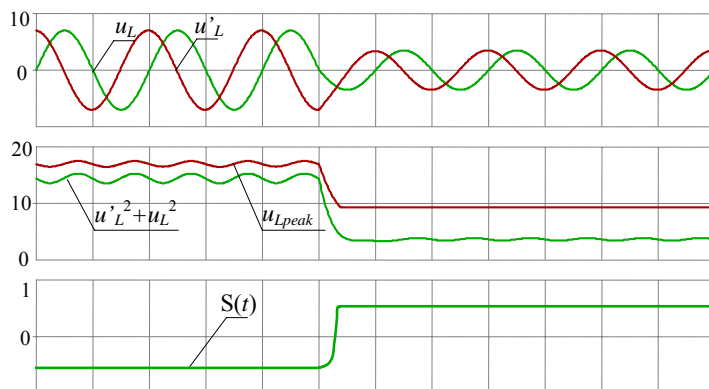
Symulacyjne przebiegi czasowe napięć w układzie sterowania pokazanego na rysunku 4, obrazujące działanie, podczas 50% skokowego zwiększenia i zmniejszenia wartości amplitudy napięcia  $U_L$  pokazano odpowiednio na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Symulacyjne przebiegi czasowe napięć w układzie sterowania z rysunku 4 podczas 50% przepięcia

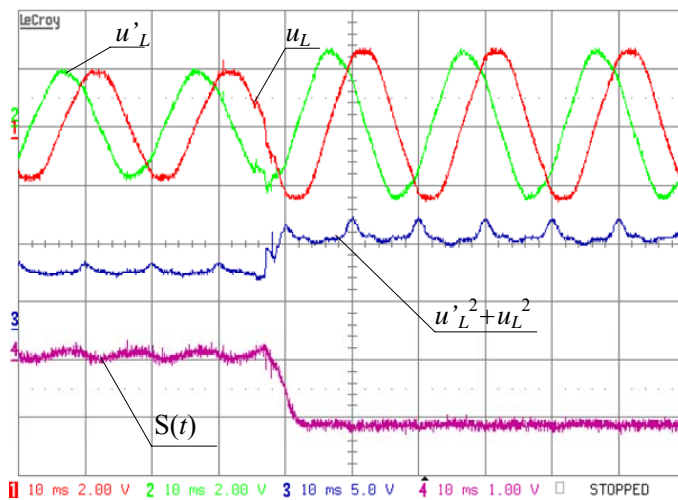
W czasie wystąpienia przepięcia (rys. 6) sygnał sterujący  $S(t)$  zmienia swoją wartość na większą. Od wartości sygnału sterującego  $S(t)$  zależy współczynnik wypełnienia impulsu (rys. 5), a tym samym wartość sterowanego napięcia wyjściowego SM i całego układu TH z SM (1). W momencie zapadu napięcia (rys. 7), sygnał sterujący

zwiększa swoją wartość, co powoduje wzrost wartości współczynnika wypełnienia impulsu  $D$  i jednocześnie wzrost napięcia wyjściowego  $U_L(1)$ .



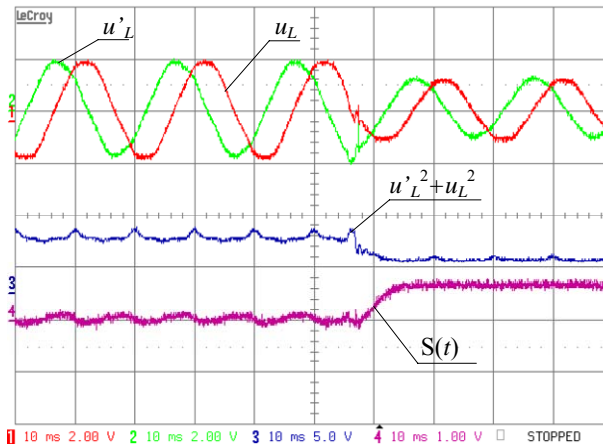
Rys. 7. Symulacyjne przebiegi czasowe napięć w układzie sterowania z rysunku 4 podczas 50% zapadu napięcia

Eksperymentalne przebiegi czasowe zarejestrowane w układzie sterowania trójfazowego TH z SM (rys. 4), podczas skokowego zwiększenia i zmniejszenia amplitudy napięcia  $U_L$  pokazano na rysunkach 8 i 9.



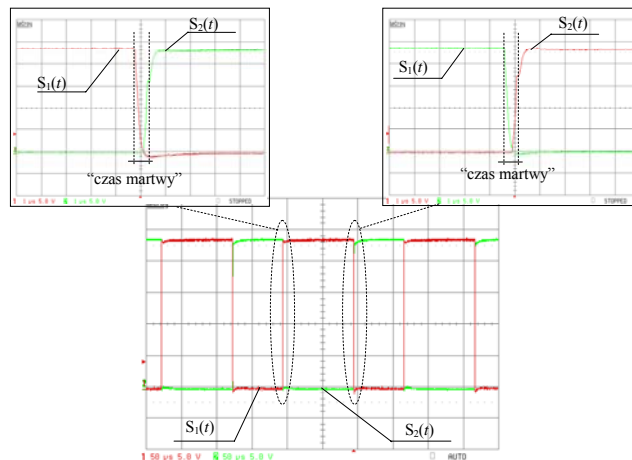
Rys. 8. Eksperymentalne przebiegi czasowe napięć w układzie sterowania z rysunku 4 podczas przepięcia

**VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**



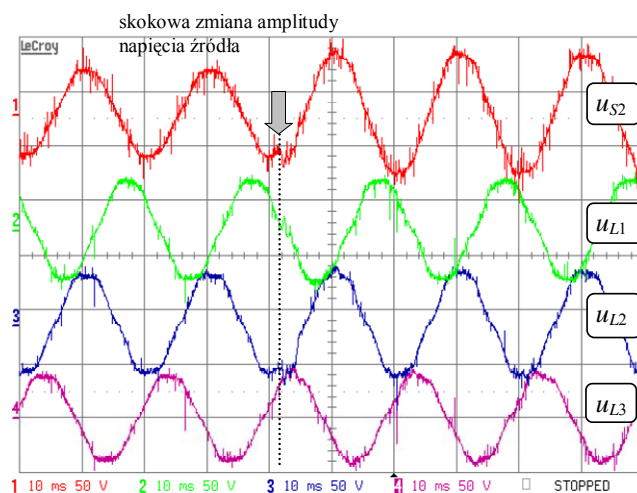
Rys. 9. Eksperymentalne przebiegi czasowe napięć w układzie sterowania z rysunku 4 podczas zapadu napięcia

Eksperymentalne przebiegi czasowe sygnałów sterujących parą łączników  $S_1$  i  $S_2$  jednej fazy sterownika matrycowego SM, pokazano na rysunku 10

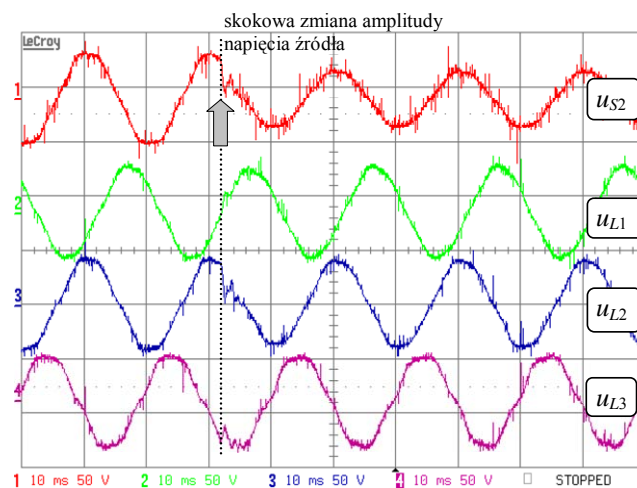


Rys. 10. Eksperymentalne przebiegi czasowe sygnałów sterujących łącznikami energoelektronicznymi sterownika matrycowego.

„Czas martwy” pokazany na rysunku 10, pomiędzy wyłączeniem łącznika źródła  $S_1$ , a włączeniem łącznika obciążenia  $S_2$  jest konieczny w celu uniknięcia zwarć międzyfazowych w układzie TH. Eksperymentalne przebiegi czasowe napięcia zasilania i napięć wyjściowych podczas przepięcia i zapadu napięcia w jednej z faz zasilających TH z SM (faza L2) pokazano odpowiednio na rysunkach 11 i 12.



Rys.11. Eksperymentalne przebiegi czasowe napięć w układzie TH z rysunku 1 podczas przeięcia w fazie L2



Rys.12. Eksperymentalne przebiegi czasowe napięć w układzie TH z rysunku 1 podczas zapadu napięcia W fazie L2

Skokowe zmiany amplitudy napięcia zasilania w fazie L2 wynosiły 40%. Zarówno przeięcie (rys. 11) jak i zapad napięcia (rys. 12) w jednej z faz zasilających TH, nie powodują zmian amplitudy napięć obciążenia  $U_{L1,2,3}$ , a stan przejściowy nie trwa dłużej niż 10 ms.

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono implementację układu sterowania trójfazowego transformatora hybrydowego ze sterownikiem matrycowym (TH z SM) w układzie czteroprzewodowym. Zastosowana strategia sterowania bazuje na modulacji szerokości impulsu z „czasem martwym”, a w torze sprzężenia zwrotnego zastosowano detektor



## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

wartości szczytowej [16]. Opisany TH z zaimplementowanym układem sterowania umożliwia kompensację szybkich zmian amplitudy napięcia zasilającego. Czas od wystąpienia zapadu napięcia lub przepięcia po stronie zasilania TH, po którym napięcie wyjściowe osiąga wartość nominalną, nie przekracza połowy okresu napięcia zasilania (10ms). Ponadto czteroprzewodowa topologia TH z SM umożliwia symetryzację napięć wyjściowych w warunkach wystąpienia asymetrii po stronie źródła. Pozwala to na stabilizację napięcia wyjściowego w każdej fazie niezależnie.

Dalsze prace będą dotyczyły implementacji trójfazowego sterownika matrycowo-reaktancyjnego typu buck-boost, w układzie TH. Pozwoli to na zwiększenie zakresu sterowania napięcia wyjściowego i umożliwi kompensację głębszych zapadów napięcia źródła.

### LITERATURA

- [1] Conrad L., Little K., Grigg C.: Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips, *IEEE Trans. on Ind. Applic.*, vol. 27 No.1., 167-172 Jan. / Febr. 1991.
- [2] D. Jang, G. Choe: "Step-up/down ac voltage regulator using transformer with tap changer and PWM ac chopper," *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 45 No. 6 pp. 905 - 911 December 1998.
- Milanović J., Hiskansen I.: Effect of load dynamics on power system damping, *IEEE Trans. on Power System* Vol. 10 No. 2, pp. 1022 -1028, May 1995
- [3] A. Falce, G. Matas, Y. Da Silva: "Voltage sag analysis and solution for an industrial plant with embedded induction motors," in *Proc. 2004 Ind. Applications Conference 2004*, vol. 4 pp.2573 – 2578 Oct.
- [4] Djokic Z., Desment J., Vanalme G., Milanovic J., Stockman K.: Sensitivity of personal computer to voltage sags and short interruptions, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, No.1, pp. 375 – 383, Jan. 2005.
- [5] Falce A., Matas G., Da Silva Y.: Voltage sag analysis and solution for an industrial plant with embedded induction motors, in *Proc. 2004 Ind. Applications Conference 2004*, vol. 4 pp.2573–2578, Oct
- [6] Montero-Hernandez O., Enjeti P.: Application of a boost ac-ac converter to compensate for voltage sags in electric power distribution system," in *Proc. 2000 IEEE 31TH Power Eng. Society Trans. and Distrib. Conf.* pp. 470 – 475.
- [7] Oliviera J., Freitas L., Viera Jr J.: A serial regulator using soft switching PWM ac/ac full bridge converter, in *Proc. 1999 IEEE 30TH Power Engineering Society Transmission and Distribution Conf.* pp.193–198.
- [8] Lee D., Habetler T., Harley R., Rostron J., Keister T.: A voltage sag supporter utilizing a PWM-switched autotransformer. *IEEE Power Elect. Spec. Conference, PESC'04, Aachen, 2004* pp. 4244 – 4250.
- [9] E. Aeloiza, P. Enjeti, L. Moran, I. Pite: Next generation distribution transformer: to address power quality for critical loads. *PESC'03 IEEE* vol. 3 pp.1266 – 1271 June 2003
- [10] Fedyczak Z., Kaniewski J.: Modelling and Analysis of Three-Phase Hybrid Transformer Using Matrix Converter", in *Proc. CPE 2007, Gdansk 2007, Poand*
- [11] Fedyczak Z., J. Kaniewski: Jednofazowy transformator hybrydowy o topologii z dwubiegunowym sterownikiem matrycowo-reaktancyjnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 07-08.2006, pp: 80-85.
- [12] Kaniewski J., Fedyczak Z, Łukiewski M., Implementacja transformatora hybrydowego ze sterownikiem matrycowym, in *Proc. SENE 2009, Łódź 2009*
- [13] J. Kaniewski: "Jednofazowy transformator hybrydowy ze sterownikiem matrycowym" *Wiadomości Elektrotechniczne* 03.2006, pp: 46-48
- [14] Kaniewski J, Fedyczak Z., "Modelling and analysis of three-phase hybrid transformer using matrix-reactance chopper", *Przegląd Elektrotechniczny*, 2009, nr 2, s. 100-105

[15] Fedyczak Z., Kaniewski J., Klytta M., *Single-Phase Hybrid Transformer Using Matrix-Reactance Hopper with Ćuk Topology*, CD on EPE 07, 02-05 September, Denmark, Aalborg 2007

[16] Chu H. Y., Jou H. L., C Huang. L.: Transient response of a peak voltage detector for sinusoidal signals, IEEE Trans. on Ind. Electronics, vol. 39, No. 1 February 1992

**Autorzy:** mgr inż. Jacek Kaniewski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, E-mail: [J.Kaniewski@jee.uz.zgora.pl](mailto:J.Kaniewski@jee.uz.zgora.pl).