

Michał HARASIMCZUK\*

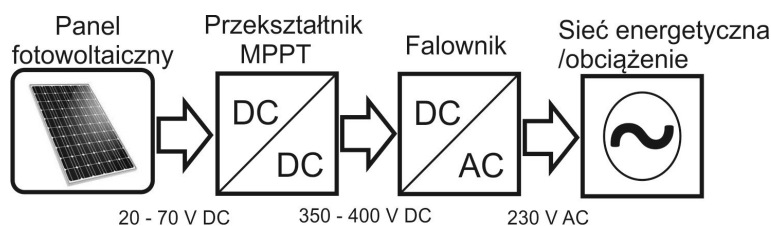
## PRZEKSZTAŁNIK PODWYŻSZAJĄCY NAPIĘCIE Z DŁAWIKIEM SPRĘŻONYM DO ZASTOSOWAŃ W FOTOWOLTAICE

W artykule przedstawiono przekształtnik podwyższający napięcie z dławikiem sprzężonym do zastosowań w systemach fotowoltaicznych. Dławik sprzężony oraz szeregowo umieszczony z nim kondensator umożliwia uzyskanie wysokiego współczynnika wzmocnienia napięciowego. W przekształtniku wykorzystano pasywny obwód tłumiący przepięcia spowodowane zmianami prądu w indukcyjności rozproszenia. Umożliwiło to uzyskanie znacznie mniejszego napięcia pracy tranzystora mocy, pozytywnie wpływając na sprawność całego układu. W artykule został opisany sposób działania przekształtnika. Przeprowadzono badania symulacyjne w programie PSpice potwierdzające prawidłowe działanie układu.

SŁOWA KLUCZOWE: ogniwa fotowoltaiczne, dławik sprzężony, przekształtnik podwyższający napięcie

### 1. WSTĘP

Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony schemat konwersji energii elektrycznej pochodzącej z modułu fotowoltaicznego.



Rys. 1. Uproszczony schemat konwersji energii fotowoltaicznej

Panel fotowoltaiczny można traktować jako źródło napięciowe o wydajności prądowej uzależnionej od nasłonecznienia. Zazwyczaj napięcie wyjściowe modułu nie przekracza 70 VDC. Zadaniem przekształtnika DC/DC jest wzmocnienie

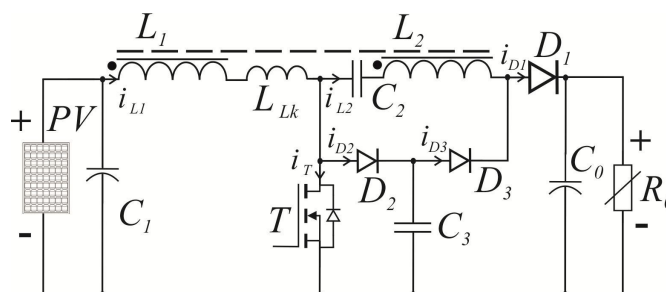
\* Politechnika Białostocka.

nie napięcia wyjściowego modułu fotowoltaicznego do napięcia 350 – 400 VDC. Jest to napięcie wejściowe falownika, który ma za zadanie przekształcić napięcie stałe na napięcie przemiennie o parametrach sieci energetycznej. Dlatego wymagane jest aby przekształtnik DC/DC charakteryzował się wysokim współczynnikiem wzmocnienia napięciowego [1, 4]. Ponadto przekształtnik ten realizuje algorytm MPPT zapewniający pracę ogniwa fotowoltaicznego w maksymalnym punkcie mocy.

## 2. ZASADA DZIAŁANIA PRZEKSZTAŁNIKA

### 2.1. Schemat przekształtnika

Konwencjonalny przekształtnik podwyższający napięcie charakteryzuje się niską sprawnością przy wysokim współczynniku wzmocnienia napięciowego [5]. Większe wzmocnienie można uzyskać m.in. poprzez wykorzystanie dławika sprzężonego. W podstawowym przekształtniku podwyższającym napięcie z dławikiem sprzężonym na skutek zmian prądu w indukcyjności rozproszenia tranzystor mocy jest narażony na pracę przy wysokim napięciu i duże straty w momencie jego przełączania [2, 3]. Straty te można zmniejszyć stosując dodatkowy obwód tłumiący przepięcia spowodowane indukcyjnością rozproszenia [6, 7]. Schemat jednego z takich przekształtników przedstawiono na rys. 2 [8].



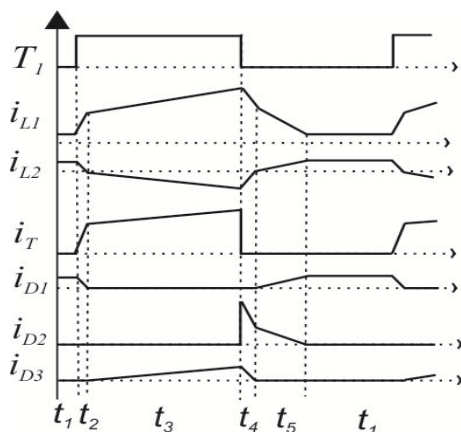
Rys. 2. Schemat wysokosprawnego przekształtnika podwyższającego napięcie z dławikiem sprzężonym

Dławiki  $L_1 - L_2$  tworzą dławik sprzężony. Indukcyjność  $L_{Lk}$  reprezentuje indukcyjność rozproszenia dławika sprzężonego. Kondensator  $C_1$  zmniejsza tętnienia prądu wyjściowego panelu fotowoltaicznego, umożliwiając realizację algorytmu MPPT. Tranzystor  $T$  jest sterowany techniką modulacji impulsu. Współczynnik wzmocnienia napięciowego reguluje zmiana wypełnienia sygnału sterującego tranzystorem. Dioda  $D_2$  i kondensator  $C_3$  zapewniają tłumienie przepięć związanych ze zmianami prądu indukcyjności rozproszenia  $L_{Lk}$ , które mają miejsce w momencie wyłączenia tranzystora  $T$ . Dioda  $D_3$  przekazuje

energię zgromadzoną w kondensatorze  $C_3$  do dławika sprzężonego oraz kondensatora  $C_2$  w momencie załączenia tranzystora T. Kondensator  $C_2$  umożliwia uzyskanie większego współczynnika wzmocnienia napięciowego oraz zapobiega zwarceniu zacisków dławika  $L_2$  w momencie załączenia tranzystora T. Dioda  $D_1$  pośredniczy w przekazywaniu energii zgromadzonej w dławiku sprzężonym do obciążenia (równoległe połączenie rezystora  $R_0$  oraz kondensatora  $C_0$ ).

## 2.2. Zasada działania przekształtnika

Na rysunku 3 zostały przedstawione wybrane przebiegi napięć i prądów przekształtnika.



Rys. 3. Przebiegi wybranych napięć i prądów przekształtnika

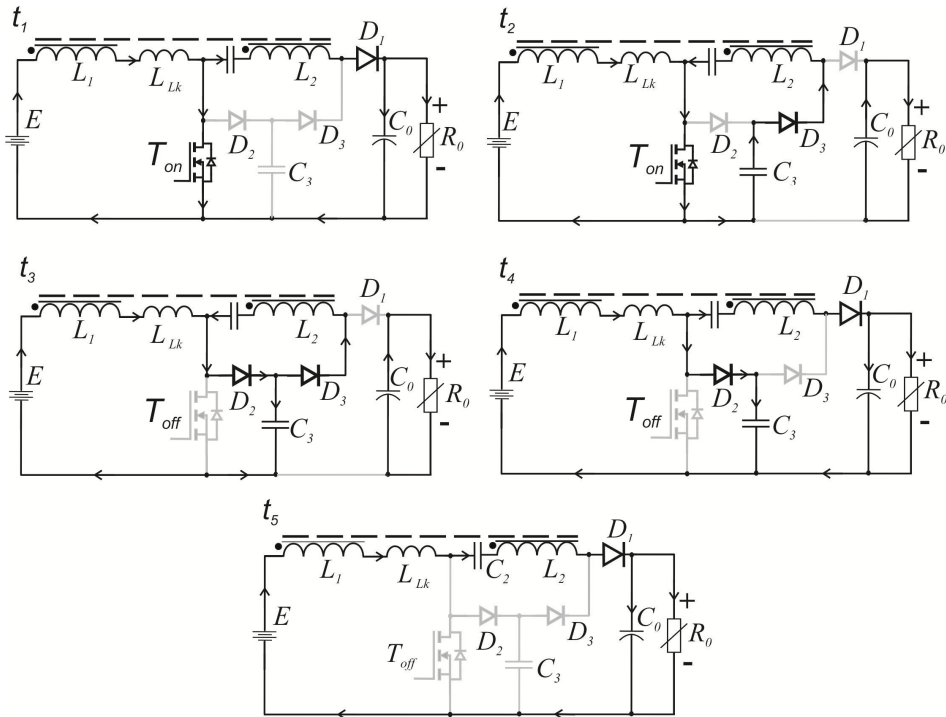
W przeprowadzonej analizie zostały pominięte spadki napięcia na diodach i tranzystorze. Założono, że energia zgromadzona w dławiku sprzężonym oraz spadki napięcia na kondensatorach  $C_0 - C_3$  w jednym okresie pracy przekształtnika są stałe. Równoległe połączenie panelu fotowoltaicznego oraz kondensatora  $C_1$  zastąpiono idealnym źródłem napięciowym. Pracę przekształtnika możemy podzielić na pięć charakterystycznych etapów przedstawionych na rys. 4.

### a) Przedział $t_1$

Na początku przedziału  $t_1$  prąd płynie przez źródło napięciowe E, dławik  $L_1$ , kondensator  $C_2$ , dławik  $L_2$ , diodę  $D_1$  oraz równoległe połączenie kondensatora  $C_0$  i rezystora  $R_0$ . Energia zgromadzona w dławiku sprzężonym jest przekazywana do obciążenia. Następuje włączenie tranzystora T. Prąd dławika  $L_1$  oraz tranzystora T rośnie a dławika  $L_2$  maleje do zera. Energię zgromadzoną w dławiku sprzężonym na początku przedziału  $t_1$  można opisać zależnością (1):

$$E_L = \frac{1}{2} L_1 I_D^2 + \frac{1}{2} L_2 I_D^2 = const. \quad (1)$$

gdzie:  $E_L$  – energia zgromadzona w dławiku sprzężonym,  $L_1$  – indukcyjność dławika  $L_1$ ,  $L_2$  – indukcyjność dławika  $L_2$ ,  $I_D$  – prąd diody  $D_1$  na początku przedziału  $t_1$ .



Rys. 4. Etapy pracy przekształtnika

Na końcu przedziału  $t_1$  prąd płynie przez źródło napięciowe  $E$ , dławik  $L_1$  oraz tranzystor  $T$ . Energię zgromadzoną w dławiku sprzężonym można opisać zależnością (2):

$$E_L = \frac{1}{2} L_1 I_T^2 \quad (2)$$

$$N = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \Rightarrow L_2 = N^2 L_1 \quad (3)$$

gdzie:  $N$  – przekładnia dławika sprzężonego,  $I_T$  – prąd dławika  $L_1$  i tranzystora  $T$  na końcu przedziału  $t_1$ .

Na podstawie zależności (1) – (3) można wyznaczyć prąd dławika  $L_1$  i tranzystora  $T$  w czasie  $t_2$  (wzór (4)).

$$\frac{1}{2}(I_T - I_D)^2 L_1 = \frac{1}{2} N^2 L_1 I_D^2 \Rightarrow I_T = I_D(N + 1) \quad (4)$$

Przedział  $t_1$  można wyznaczyć zgodnie z zależnościami (5) – (6):

$$u_{Lk1}(t_1) = \frac{EN + U_0 - u_{C2}}{N} \quad (5)$$

$$t_1 = \frac{(I_T - I_D)L_{Lk}}{u_{Lk1}(t_1)} \quad (6)$$

$$u_{L1}(t_1) = E - u_{Lk1}(t_1) = \frac{u_{C2} - U_0}{N} \quad (7)$$

gdzie:  $u_{L1}$  – spadek napięcia na dławiku  $L_1$ ,  $u_{Lk1}$  – spadek napięcia na indukcyjności rozproszenia dławika przeniesionej na stronę pierwotną,  $L_{Lk1}$  – indukcyjność rozproszenia dławika sprzężonego przeniesiona na stronę pierwotną,  $E$  – napięcie źródła napięciowego  $E$ ,  $u_{C2}$  – spadek napięcia na kondensatorze  $C_2$ .

b) Przedział  $t_2$

Na początku przedziału  $t_2$  energia ze źródła napięciowego  $E$  oraz kondensatora  $C_3$  przekazywana jest do dławika sprzężonego. Diody  $D_1$  i  $D_2$  są spolaryzowane w kierunku zaporowym, dioda  $D_3$  w kierunku przewodzenia. Tranzystor  $T$  pozostaje załączony. Przedział  $t_2$  jest różnicą pomiędzy czasem załączenia tranzystora  $T$  a przedziałem  $t_1$  (wzór (8)). Spadek napięcia na indukcyjności rozproszenia można obliczyć wykorzystując drugie prawo Kirchhoffa zgodnie z zależnościami (9). Prąd wejściowy ( $i_{L1}$ ) na końcu przedziału  $t_2$  został przedstawiony w postaci wzoru (10), natomiast prąd diody  $D_3$  w postaci wzoru (11):

$$t_2 = T_{on} - t_1 \quad (8)$$

$$u_{Lk1}(t_2) = \frac{EN - u_{C2} + u_{C3}}{N} \quad (9)$$

$$i_{L1}^+ = I_T + \frac{u_{Lk1}(t_2)t_2}{L_{Lk1}} \quad (10)$$

$$i_{D3}^+ = -i_{L2}^+ = \frac{u_{Lk1}(t_2)t_2}{NL_{k1}} \quad (11)$$

$$u_{L1}(t_2) = \frac{u_{C2} - u_{C3}}{N} \quad (12)$$

gdzie:  $T_{on}$  – czas załączenia tranzystora  $T$ ,  $i_{L1}^+$  – prąd dławika  $L_1$  na końcu przedziału  $t_2$ ,  $i_{D3}^+$  – prąd diody  $D_3$  na końcu przedziału  $t_2$ ,  $i_{L2}$  – prąd dławika  $L_2$ .

c) Przedział  $t_3$

Na początku przedziału  $t_3$  następuje wyłączenie tranzystora  $T$ . Dioda  $D_2$  zostaje spolaryzowana w kierunku przewodzenia. Energia zgromadzona w indukcyjności rozproszenia  $L_{Lk}$  przekazywana jest do kondensatora  $C_3$ . W przedziale

$t_3$  prąd diody  $D_3$ , dławika  $L_2$ , oraz kondensatora  $C_2$  maleje do zera. Wybrane zależności opisujące działanie przekształtnika w tym przedziale zostały przedstawione w postaci wzorów (13) – (15).

$$u_{L1}(t_3) = \frac{u_{C2}}{N} \quad (13)$$

$$u_{Lk}(t_3) = \frac{NE - Nu_{C3} - u_{C2}}{N} \quad (14)$$

$$t_3 = \frac{-NL_{Lk1}i_{L2}^+}{u_{Lk}(t_3)} = \frac{NL_{Lk1}^+}{NE + Nu_{C3} - u_{C2}} \quad (15)$$

d) Przedział  $t_4$

Na początku przedziału  $t_4$  dioda  $D_3$  jest spolaryzowana w kierunku zaporowym. Prąd dławika  $L_2$  i kondensatora  $C_2$  zmienia swój kierunek, dioda  $D_1$  zostaje spolaryzowana w kierunku przewodzenia. Energia zgromadzona w dławiku sprzężonym jest przekazywana do obciążenia. Prąd diody  $D_1$  rośnie a diody  $D_2$  maleje. Wybrane zależności opisujące działanie przekształtnika w przedziale  $t_4 - t_5$  zostały przedstawione w postaci wzorów (16) – (18):

$$u_{L1}(t_4) = \frac{U_0 - u_{C2} - u_{C3}}{N} \quad (16)$$

$$u_{L1}(t_4) = \frac{U_0 + EN - u_{C3}N - u_{C2} - u_{C3}}{N} \quad (17)$$

$$t_4 = \frac{L_{Lk1}I_T N^2}{(N+1)(u_{C3}N + u_{C2} + u_{C3} - U_0 - EN)} \quad (18)$$

e) Przedział  $t_5$

Na początku przedziału  $t_5$  dioda  $D_2$  zostaje spolaryzowana w kierunku zaporowym. Energia z dławika sprzężonego jest przekazywana do obciążenia stanowiącego równoległe połączenie kondensatora  $C_0$  i rezystora  $R_0$ . Przedział  $t_5$  kończy się wraz z załączeniem tranzystora T. Wybrane zależności opisujące działanie przekształtnika w przedziale  $t_5$  zostały przedstawione w postaci wzorów (19) – (22):

$$u_{L1}(t_5) = u_{C3} - E \quad (19)$$

$$u_{C2} = U_0 - E - u_{L1}(t_5)(N+1) \quad (20)$$

$$u_{C3} = \frac{U_0 - u_{C2} + EN}{N+1} \quad (21)$$

$$t_5 = T_{off} - t_3 - t_4 \quad (22)$$

gdzie:  $T_{off}$  – czas wyłączenia tranzystora T.

### 2.3. Wyznaczenie charakterystyki regulacyjnej przekształtnika

W celu wyznaczenia charakterystyki regulacyjnej analizowanego przekształtnika należy wyznaczyć współczynnik wzmocnienia napięciowego w funkcji wypełnienia sygnału sterującego tranzystorem T. Napięcie wyjściowe można porównując moc na wejściu i na wyjściu przekształtnika oraz uśredniając spadek napięcia na dławiku  $L_1$ . Przy założeniu że napięcie wejściowe i wyjściowe jest stałe w jednym okresie pracy przekształtnika moc wyjściową i wejściową można wyznaczyć obliczając średni prąd wejściowy i średni prąd diody  $D_1$  zgodnie z zależnością (23).

$$\eta I_{we} E = U_0 I_{obc} \Rightarrow K_u = \frac{U_0}{E} = \eta \frac{I_{we}}{I_{obc}} \quad (23)$$

gdzie:  $I_{we}$  – średni prąd wejściowy,  $I_{obc}$  – średni prąd diody  $D_1$ ,  $K_u$  – współczynnik wzmocnienia napięciowego,  $\eta$  – sprawność przekształtnika.

Na podstawie przebiegów przedstawionych na rysunku 2 średni prąd wejściowy i średni prąd wyjściowy można opisać wzorami (24) i (25). Średni spadek napięcia na indukcyjności  $L_1$  w jednym okresie pracy przekształtnika jest równy zero zgodnie z zależnością (26):

$$I_{we} = \left( \left( \frac{I_T}{N} + \frac{NI_T}{N+1} \right) \frac{(t_1 + t_4)}{2} + \left( I_T + \frac{u_{Lk1}(t_2)t_2}{2L_{Lk1}} \right) (t_2 + t_3) + \frac{I_T}{N} t_5 \right) \frac{1}{T_s} \quad (24)$$

$$I_{wy} = \left( \frac{I_T (t_1 + t_4)}{2N} + \frac{I_T}{2} t_5 \right) \frac{1}{T_s} \quad (25)$$

$$u_{L1}(t_1)t_1 + u_{L1}(t_2)t_2 + u_{L1}(t_3)t_3 + u_{L1}(t_4)t_4 + u_{L1}(t_5)t_5 = 0 \quad (26)$$

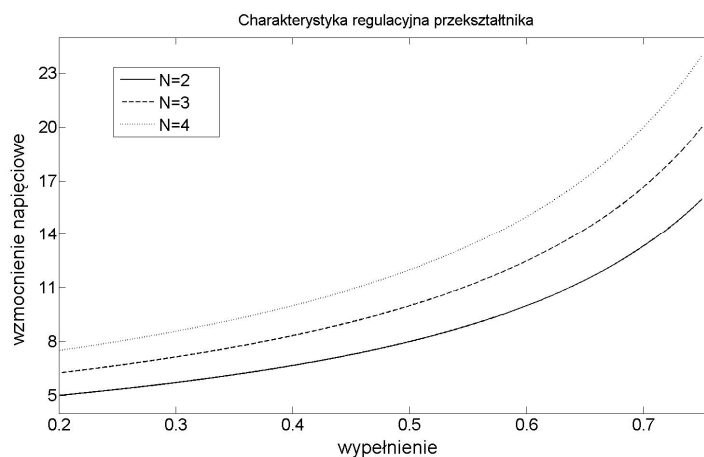
Na podstawie zależności (1) – (26) można wyznaczyć charakterystykę regulacyjną przekształtnika. Charakterystyka jest uzależniona od przekładni dławika sprzężonego oraz wypełnienia sygnału sterującego tranzystorem T i została opisana wzorami (27) – (28):

$$K_u \approx \frac{2 + N}{1 - D} \quad (27)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (28)$$

gdzie:  $D$  – wypełnienie sygnału sterującego tranzystorem T,  $K_u$  – współczynnik wzmocnienia napięciowego.

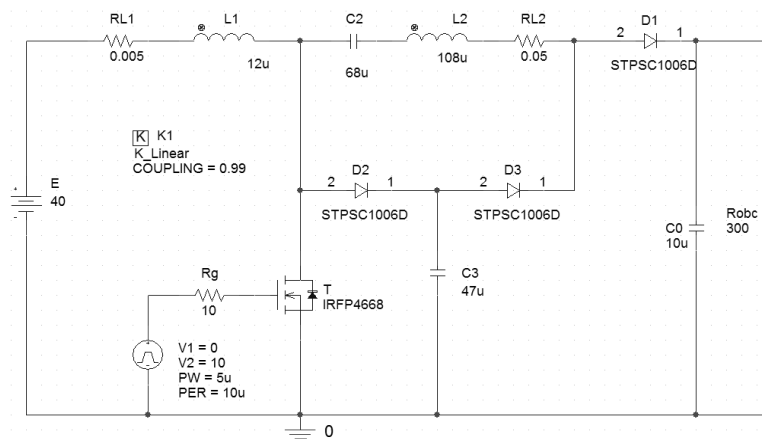
Na rysunku 5 została przedstawiona charakterystyka regulacyjna przekształtnika dla trzech różnych przekładni dławika sprzężonego. Zwiększenie przekładni dławika oraz wypełnienia sygnału sterującego tranzystorem T skutkuje zwiększeniem współczynnika wzmocnienia napięciowego.



Rys. 5. Charakterystyka regulacyjna przekształtnika dla trzech różnych przekładni dławika sprzężonego

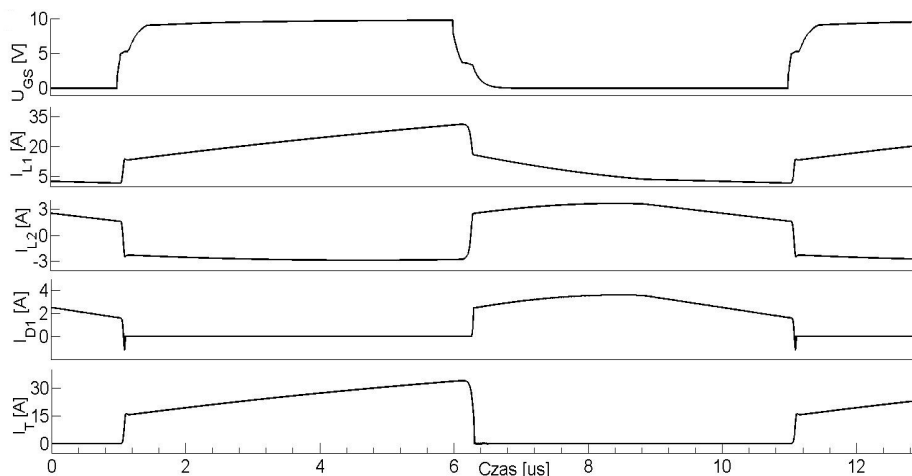
### 3. BADANIA SYMULACYJNE PRZEKSZTAŁNIKA

Na potrzeby badań symulacyjnych zaprojektowano model przekształtnika o napięciu wejściowym 40 V, napięciu wyjściowym 400 V i częstotliwości przełączania tranzystora równej 50 kHz. Użyto modeli diod z węgla krzemowego STPSC1006 ( $U_F = 1,4$  V,  $U_{RRM} = 600$  V) oraz modelu tranzystora IRFP4668PBF ( $R_{DSon} = 2$  m $\Omega$ ,  $U_{DSS} = 200$  V). Badania zostały przeprowadzone w programie PSpice. Na rysunku 6 przedstawiono schemat symulacyjny badanego przekształtnika.



Rys. 6. Schemat symulacyjny przekształtnika





Rys. 7. Przebiegi wybranych napięć i prądów analizowanego przełącznika

Przeprowadzone badania potwierdzają charakterystykę regulacyjną przełącznika. Dla przekładni dławika sprzężonego  $L_1 - L_2$  równej 3 i wypełnienia sygnału sterującego tranzystorem T równego 0,5 uzyskano dziesięciokrotnie wzmacnienie napięciowe. Na rysunku 7 przedstawiono uzyskane w wyniku badań symulacyjnych przebiegi wybranych napięć i prądów analizowanego przełącznika. Uzyskane przebiegi napięć i prądów są zgodne z teoretycznymi (rysunek 3).

*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy MB/WE/3/2015 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.*

## LITERATURA

- [1] Dawidziuk J., Review and comparison of high efficiency high power boost DC/DC converters for photovoltaic applications, Bull. Pol. Ac.: Tech. 59 (2011), n. 4, pp. 499 – 506.
- [2] Gu B., Dominic J., Chen B., Zhang L., Lai J. –S., Hybrid transformer ZVS/ZCS DC converter with optimized magnetics and improved power devices utilization for photovoltaic module applications, IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, pp. 2127–2136, Apr. 2015.
- [3] Spiazzi G., Mattavelli P., Costabeber A., High step-up ratio flyback converter with active clamp and voltage multiplier, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 26, No. 11, pp. 3205–3214, Nov. 2011.
- [4] Tomaszuk A., Krupa A., : Step-up DC/DC converters for photovoltaic applications – theory and performance, Przegląd Elektrotechniczny, (2013), nr 9, pp. 51–57.

- [5] Tomaszuk A., Krupa A., High efficiency high step-up DC/DC converters – a review, *Bull. Pol. Ac.: Tech.* 59 (2011), No. 4, pp. 475 – 483.
- [6] Wu T.-F., Lai Y.-S., Hung J.-C., Chen Y.-M., Boost converter with coupled inductors and buck-boost type of active clamp, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, No. 1, pp. 154–162, Jan. 2008.
- [7] Zhao Q., Lee F. C., High performance coupled-inductor DC-DC converters, in *Proc. IEEE APEC'03*, 2003, pp. 109–113.
- [8] Wai R.-J., Duan R.-Yong., High Step-Up Converter With Coupled-Inductor, *IEEE Transactions on Power Electronics* , 2005, 20, No. 5, pp 1025 – 1035.

### **HIGH STEP – UP CONVERTER WITH COUPLED INDUCTOR**

This paper present high step-up converter with coupled inductor for photovoltaics systems. High voltage gain has been achieved by coupled inductor and series capacitor. In converter has been used passive regenerative snubber for absorbing energy from leakage inductance. Additional serial capacitor allows for a higher coefficient voltage gain. This capacitor also reduce a transistor voltage stress. The control is done by pulse width modulation. In this paper theoretic analysis of converter has been presented. In article has been presented simulation studies confirmed properly theoretical analysis of converter.

*(Received: 06. 02. 2017, revised: 27. 02. 2017)*