

Michał HARASIMCZUK*

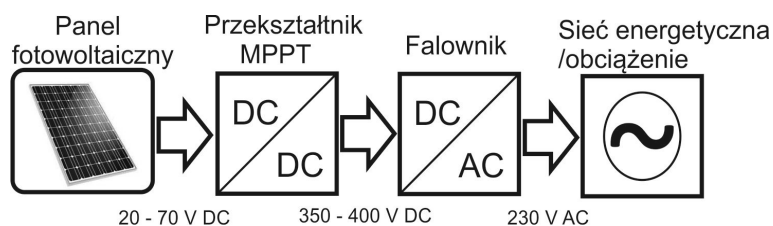
PRZEKSZTAŁNIK PODWYŻSZAJĄCY NAPIĘCIE Z DŁAWIKIEM SPRĘŻONYM DO ZASTOSOWAŃ W FOTOWOLTAICE

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 wzmocnie-

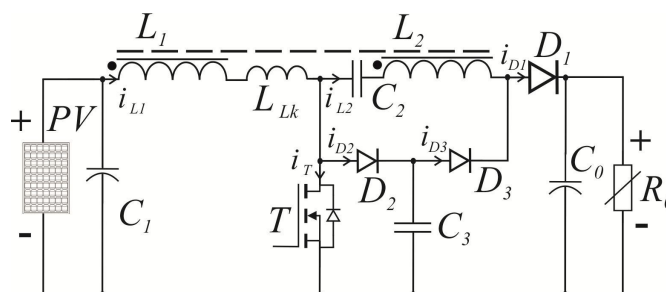
* Politechnika Białostocka.

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].



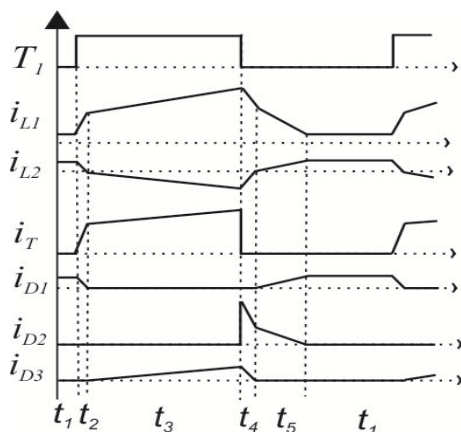
Rys. 2. Schemat wysokosprawnego przekształtnika podwyższającego napięcie z dławikiem sprzężonym

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 przeeksztaltnika

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



Rys. 3. Przebiegi wybranych napięć i prądów przeeksztaltnika

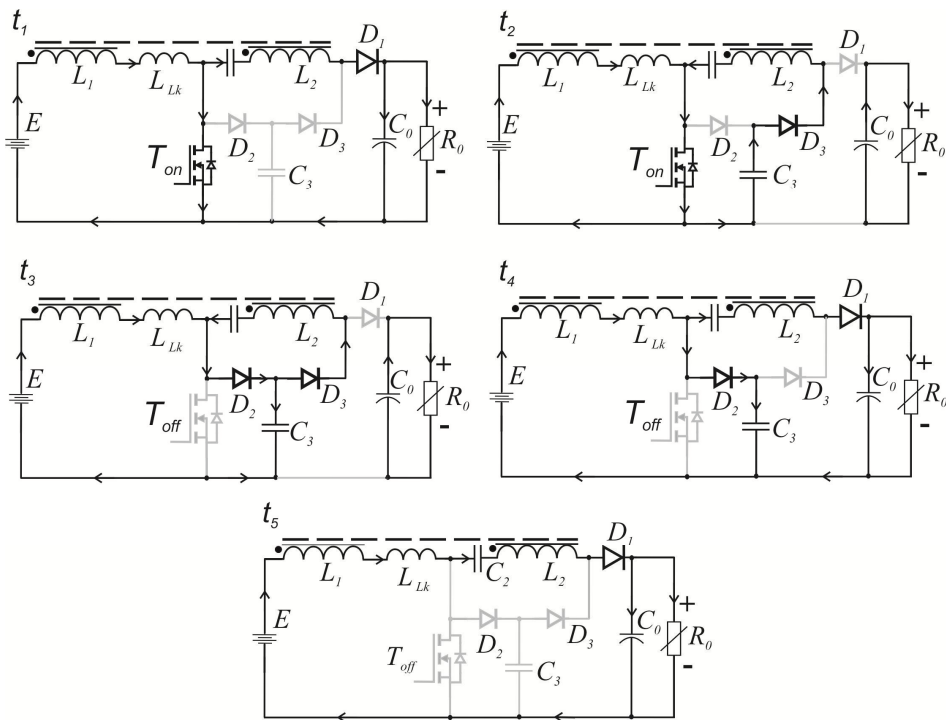
W przeprowadzonej analizie zostały pominięte spadki napięcia na diodach i tranzystorze. Założono, że energia zgromadzona w dławiku sprzężonym oraz spadki napięcia na kondensatorach $C_0 - C_3$ w jednym okresie pracy przeeksztaltnika są stałe. Równoległe połączenie panelu fotowoltaicznego oraz kondensatora C_1 zastąpiono idealnym źródłem napięciowym. Pracę przeeksztaltnika 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, η – 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):

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

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

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

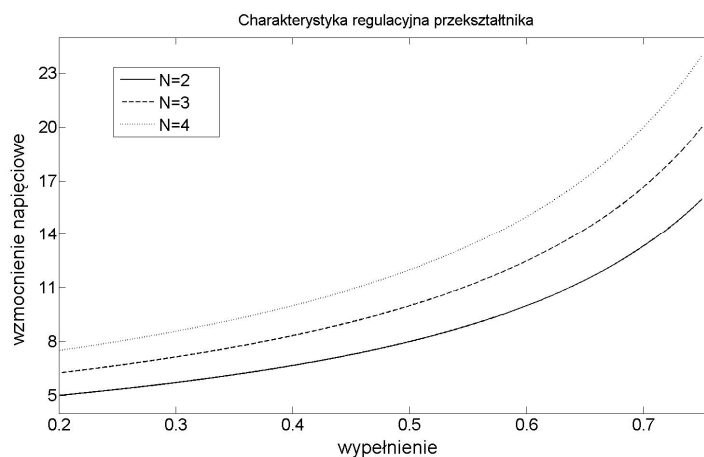
Na podstawie zależności (1) – (26) można wyznaczyć charakterystykę regulacyjną przekształtnika. Charakterystyka jest uzależniona od przekładni dławika sprzężonego oraz wypełnienia sygnału sterującego tranzystorem T i została opisana wzorami (27) – (28):

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

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

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

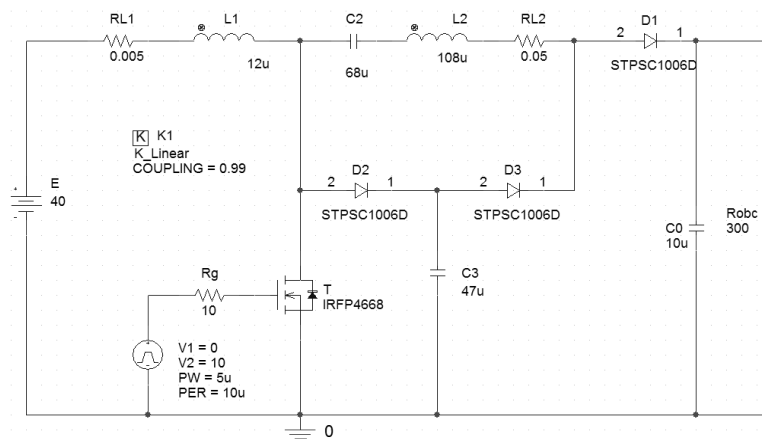
Na rysunku 5 została przedstawiona charakterystyka regulacyjna przekształtnika dla trzech różnych przekładni dławika sprzężonego. Zwiększenie przekładni dławika oraz wypełnienia sygnału sterującego tranzystorem T skutkuje zwiększeniem współczynnika wzmocnienia napięciowego.



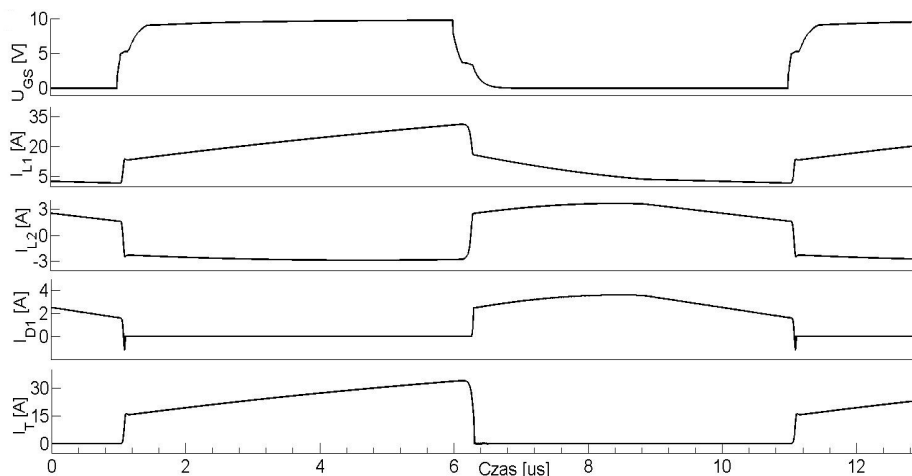
Rys. 5. Charakterystyka regulacyjna przekształtnika dla trzech różnych przekładni dławika sprzężonego

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 Ω , $U_{DSS} = 200$ 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 przekształtnika

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