

## Poprawny pomiar prądu nieciągłego w przekształtniku DC/DC typu BOOST

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę dotyczącą problemu pomiaru nieciągłego prądu w pojedynczym i podwójnym przekształtniku typu BOOST sterowanym mikroprocesorowo. Podczas pracy z nieciągłymi prądami dławików mierzona wartość prądu wejściowego przekształtnika różni się względem rzeczywistej wartości średniej tego prądu. W artykule przedstawiono analizę przyczyn powstawania tej różnicy i zaproponowano wprowadzenie współczynnika korygującego wartość tego prądu w oparciu o mierzone wartości napięcia wejściowego i wyjściowego oraz wartość wypełnienia. Analizę zweryfikowano za pomocą badań laboratoryjnych.

**Abstract.** The paper shows the issue of the input current measurement in single stage and two-stage boost converter with the microcontroller based modulation. During the discontinuous conduction mode the measured value of the input current differs from the real average value of this current. In the paper the origin of such difference is theoretically explained with introduction of correcting coefficient which is based only on the input and the output voltages and actual duty cycle. The theoretical analysis is verified by experimental results. (**Correct input current measurement of DC/DC boost converter operating in discontinuous conduction mode**).

**Słowa kluczowe:** przekształtnik dc/dc typu boost, pomiar prądu, przekształtniki solarne dc/dc.

**Keywords:** dc/dc boost converter, current measurement, solar dc/dc converters.

### Wstęp

Przekształtnik DC/DC podwyższający napięcie typu BOOST jest powszechnie stosowany od wielu lat zarówno w odbiornikach domowych i instalacjach przemysłowych [1], [2] (rys. 1.a). W ostatnich latach nastąpił wzrost zainteresowania tego typu przekształtnikiem w związku z rozwojem układów przeznaczonych do współpracy ze źródłami OZE jak i wykorzystaniem tego typu przekształtnika w aktywnych układach korekcji współczynnika mocy PFC (*Power Factor Correction*) [3]. W przekształtnikach współpracujących ze źródłami OZE wyznaczenie poprawnej wartości średniej prądu jest krytyczne ze względu na potrzebę wyznaczania mocy źródła jak i ze względu na stosowanie algorytmu poszukiwania punktu maksymalnej mocy ogniwa MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), który bazuje na pomiarach napięcia i prądu na wejściu przekształtnika.

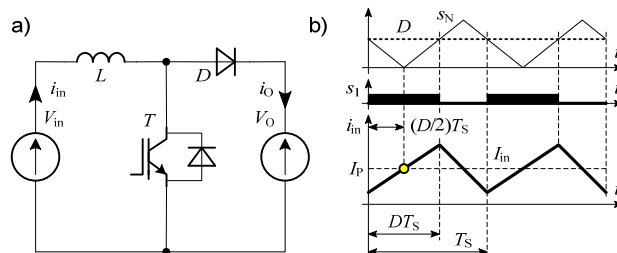
W przypadku stosowania mikroprocesorowych układów sterowania pomiar prądu wejściowego  $i_{in}$ , który także jest prądem dławika  $L$ , odbywa się w ściśle określonej chwili  $t_j$ , w połowie czasu trwania załączenia tranzystora  $T$  (rys. 1.b). W układach energoelektronicznych jest to związane z ograniczaniem wpływu przebiegów komutacyjnych w przekształtniku na wykonywane pomiary. Jedynie w przypadku gdy prąd dławika  $i_L$  jest ciągły, to zmierzony prąd dławika  $I_p$  równy jest wartości średniej tego prądu  $I_{in}$ . Inaczej jest gdy prąd dławika jest nieciągły. Wtedy zmierzony prąd dławika  $I_p$  jest większy od wartości średniej  $I_{in}$ . Powstałe różnice można korygować na podstawie pomiarów napięcia wejściowego  $V_{in}$  i wyjściowego  $V_o$ , wypełnienia sygnału sterującego  $D$  i zmierzonej wartości prądu wejściowego. W przypadku, gdy przekształtnik pracuje w różnych warunkach, np. gdy współpracuje ze źródłami OZE, to często pracuje on z prądem nieciągłym i brak stosowania korekcji pomiaru prądu może prowadzić do niepoprawnego działania algorytmu MPPT [4].

Korzystne właściwości w wielu zastosowaniach uzyskuje się także dzięki przekształtnikowi typu BOOST o topologii podwójnej [5]. W takiej konfiguracji występują dwa przekształtniki typu BOOST równolegle połączone zarówno po stronie wejściowej i wyjściowej. Różnicą w ich pracy jest to, że tranzystory przełączane są z przesunięciem fazowym wynoszącym 180 stopni. Jak pokazuje analiza działania tego przekształtnika przy nieciągłych prądach dławików, również w nim będą występować różnice między zmierzoną wartością prądu wejściowego  $I_p$  i jego wartością średnią  $I_{in}$ .

Głównym celem tego artykułu jest analiza zagadnienia związanego z występowaniem różnicy pomiędzy zmierzoną wartością prądu wejściowego  $i_{in}$ , równą  $I_p$ , i jego wartością średnią  $I_{in}$  dla pojedynczego i podwójnego przekształtnika typu BOOST oraz wyznaczenie zależności umożliwiających korekcję zmierzonej wartości prądu [6].

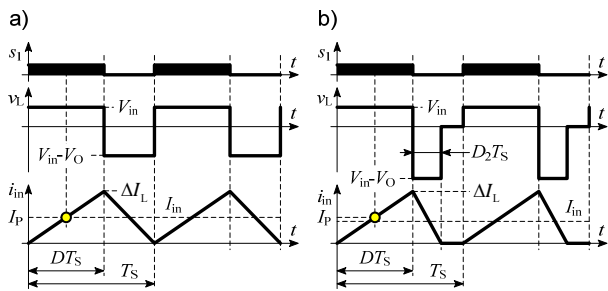
### Pomiar prądu wejściowego przekształtnika typu BOOST

Schemat przekształtnika DC/DC typu BOOST przedstawiony został na rysunku 1. Przy zastosowaniu układu sterowania przekształtnika BOOST, opartego na sterowaniu mikroprocesorowym, pomiar prądu wejściowego  $i_{in}$ , równego prądowi dławika  $L$ , jest zsynchronizowany z sygnałem  $s_1$  sterującym tranzystorem  $T$  (rys. 1b). Sygnał  $s_1$  wytwarzany jest przez porównanie sygnału wypełnienia  $D$  z sygnałem nośnym  $s_N$ . Pomiar prądu wejściowego  $I_p$  wykonywany jest w chwili, gdy sygnał nośny  $s_N = 0$ , tj. w połowie czasu trwania impulsu sterującego  $s_1$ , w czasie  $t = \frac{1}{2}DT_s$ . W przypadku, gdy prąd dławika jest ciągły lub znajduje się na granicy przewodzenia ciągłego, prąd zmierzony  $I_p$  jest równy wartości średniej (za okres  $T_s$ ) tętniącego prądu wejściowego  $I_{in}$ .



Rys.1. Pojedynczy przekształtnik BOOST: a) schemat, b) przebiegi sygnałów sterownika i prądu wejściowego z zaznaczoną wartością zmierzoną  $I_p$  dla ciągłego prądu dławika

W przypadku, gdy prąd  $i_{in}$  jest nieciągły (rys. 2.b), jego wartość średnia  $I_{in}$  różni się od wartości zmierzonej  $I_p$ . Występowanie tych różnic stanowi problem, gdy mierzony prąd jest wykorzystywany w procesie regulacji, np. jest stabilizowany na poziomie zadanym w algorytmie MPPT stosowanym powszechnie w przekształtnikach współpracujących ze źródłami OZE.



Rys.2. Przebiegi napięcia i prądu dławika przekształtnika typu BOOST dla a) pracy granicy ciągłości prądu dławika i b) przy nieciągłym prądzie dławika

### Współczynnik korekcyjny dla pomiaru prądu

Wartość mierzona prądu wejściowego  $I_p$ , przy nieciągłym prądzie dławika, równa jest połowie wartości maksymalnej tego prądu  $\Delta I_L$ , którą określa się jako

$$(1) \quad I_p = \frac{1}{2} \Delta I_L = \frac{V_{in} D T_S}{2L}$$

Prąd zmierzony  $I_p$  jest różny od rzeczywistej wartości średniej  $I_{in}$ . Aby wyznaczyć poprawną wartość średnią prądu  $I_{in}$  na podstawie wartości zmierzonej  $I_p$ , wprowadza się zależny od warunków pracy współczynnik korekcyjny  $k$  zgodnie ze wzorem (2).

$$(2) \quad I_{in} = k I_p$$

Rzeczywistą wartość średnią  $I_{in}$  określa się za pomocą wzoru (3):

$$(3) \quad I_{in} = \frac{1}{2} \Delta I_L (D + D_2)$$

gdzie współczynnik  $D_2$  jest związany z czasem opadania prądu dławika  $i_L$  i w bezstratnym przekształtniku typu BOOST można opisać go zależnością

$$(4) \quad D_2 = D \frac{V_{in}}{V_O - V_{in}}$$

Na podstawie równań (2), (3) i (4) można określić wzór opisujący współczynnik korygujący pomiar prądu  $k$  (5).

$$(5) \quad k = \frac{I_{in}}{I_p} = (D + D_2) = D \left( 1 + \frac{V_{in}}{V_O - V_{in}} \right) = D \frac{V_O}{V_O - V_{in}}$$

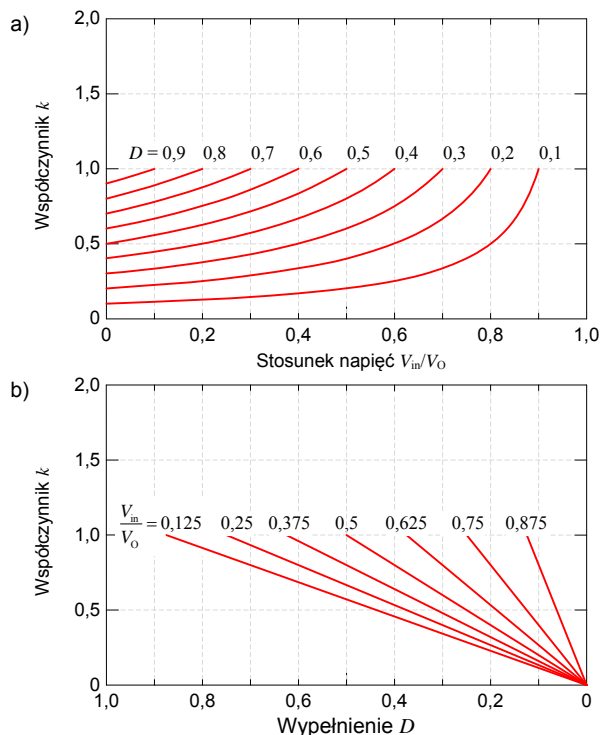
Jak można zauważyć współczynnik  $k$  jest jedynie funkcją napięć  $V_{in}$  i  $V_O$  oraz wypełnienia  $D$  i nie zależy od okresu przełączania  $T_S$  i indukcyjności dławika  $L$ . Oznacza to, że współczynnik korygujący  $k$  można wyznaczyć bazując na pomiarach napięć  $V_{in}$ ,  $V_O$  i zadanym wypełnieniu  $D$  (6).

$$(6) \quad I_{in} = D \frac{V_O}{V_O - V_{in}} I_p$$

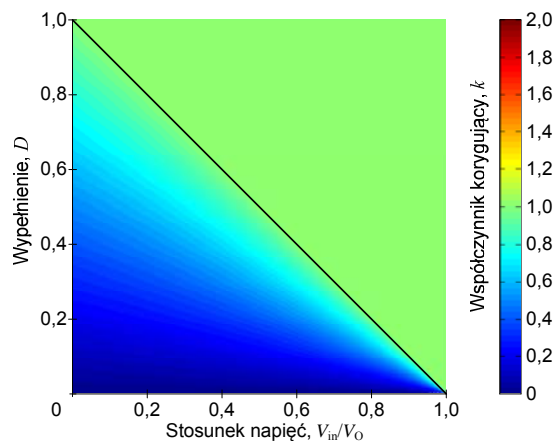
W celu zilustrowania zmienności współczynnika korygującego  $k$ , na rysunku 3 przedstawiono jego charakterystyki w funkcji stosunku napięć  $V_{in}/V_O$  (rys. 3.a) i wypełnienia  $D$  (rys.3.b). Jak można zauważyć, współczynnik  $k$  zawsze jest mniejszy od 1. Przedstawione charakterystyki można również zilustrować za pomocą charakterystyk będących funkcjami dwóch zmiennych ( $V_{in}/V_O$ ,  $D$ ), co zrobiono na rysunku 4, gdzie dodatkowo przedstawiono granicę ciągłości prądu dławika określoną za pomocą (7). W celu wyznaczenia tej zależności przyrównano wyrażenie (4) do wartości  $1-D$ . W obszarze

pracy przy ciągłym prądzie dławika współczynnik korygujący  $k = 1$ .

$$(7) \quad \frac{V_{in}}{V_O} = 1 - D$$



Rys.3. Charakterystyki współczynnika korygującego  $k$  dla przekształtnika pojedynczego typu BOOST: a) w funkcji stosunku  $V_{in}/V_O$  i b) wypełnienia  $D$



Rys.4. Charakterystyki współczynnika korygującego  $k$  w funkcji stosunku  $V_{in}/V_O$  i wypełnienia  $D$

### Nieciągłe przewodzenie przekształtnika typu BOOST

Z przedstawionej w poprzednim rozdziale analizy wynika, że współczynnik korygujący pomiar prądu jest różny od 1 tylko w obszarze przewodzenia nieciągłego. Z przedstawionych charakterystyk nie można jednak odczytać wartości średnich prądu wejściowego  $I_{in}$  lub wyjściowego  $I_O$ , których wartości graniczne określa się za pomocą wzorów (8) i (9) w funkcji wypełnienia  $D$ . Wzory te zostały otrzymane przy założeniu, że napięcie wyjściowe  $V_O$  jest stabilizowane na stałej wartości i obowiązują  $V_{in}/V_O = (1-D)$  oraz  $I_O = I_{in} V_{in}/V_O$ .

$$(8) \quad I_{ingr} = \frac{V_{in} T_S}{2L} D = \frac{V_O T_S}{2L} D(1-D)$$

$$(9) \quad I_{Ogr} = \frac{V_{in} T_S}{2L} D(1-D) = \frac{V_O T_S}{2L} D(1-D)^2.$$

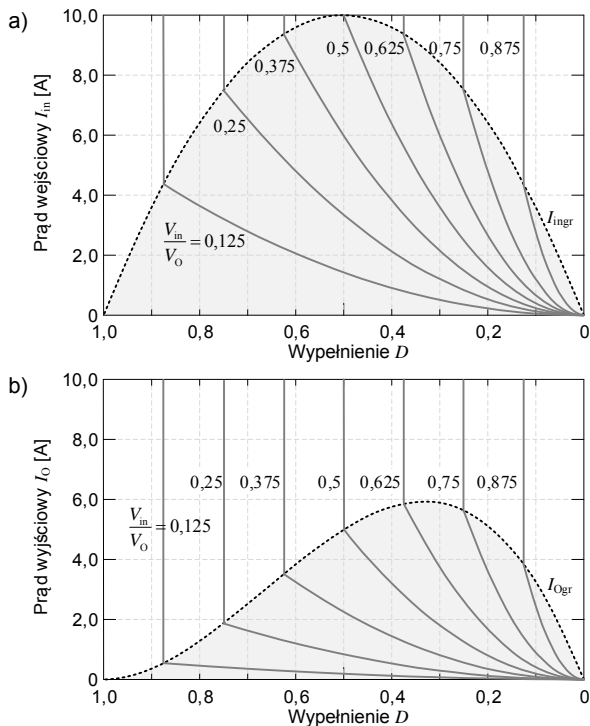
Dla pracy przy nieciągnym przewodzeniu prąd wejściowy  $I_{in}$  określony jest za pomocą wzoru (10), a prąd wyjściowy  $I_O$  jako (11). Charakterystyki te przedstawiono na rysunku 5, gdzie założono parametry przekształtnika jak w tabeli 1.

$$(10) \quad I_{in} = \frac{V_O T_S}{2L} D^2 \frac{V_{in}}{V_O} \frac{1}{1 - \frac{V_{in}}{V_O}}.$$

$$(11) \quad I_O = \frac{V_O T_S}{2L} D^2 \left( \frac{V_{in}}{V_O} \right)^2 \frac{1}{1 - \frac{V_{in}}{V_O}}.$$

Tabela 1. Parametry przykładowego przekształtnika BOOST

Symbol	Nazwa parametru	Wartość
$V_O$	Napięcie wyjściowe	400 V
$L$	Indukcyjność	500 $\mu$ H
$f$	Częstotliwość przełączania	10 kHz
$T_S$	Okres przełączania $T_S = 1/f$	100 $\mu$ s



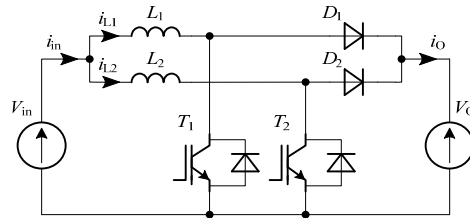
Rys.5. Charakterystyki prądu wejściowego i wyjściowego w funkcji wypełnienia  $D$  sparametryzowane względem stosunku  $V_{in}/V_O$

### Podwójny przekształtnik typu BOOST

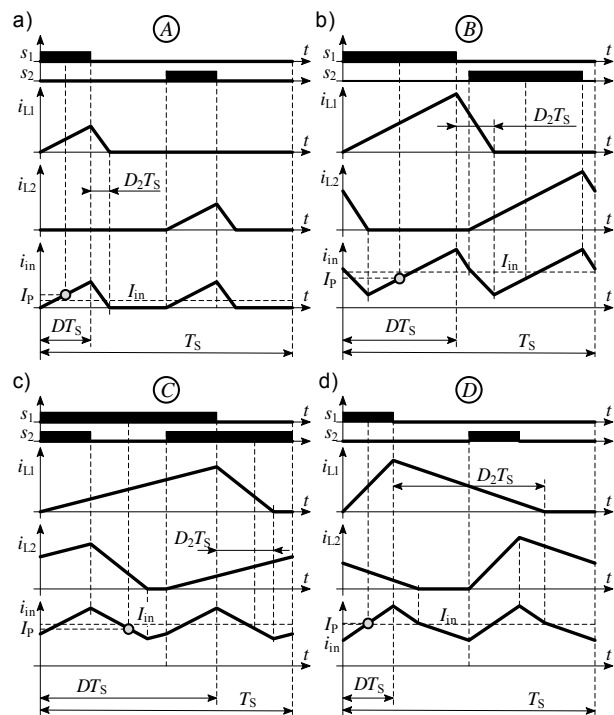
W układach ze źródłami odnawialnymi stosuje się wielokrotne przekształtniki typu BOOST, których zarówno wejścia jak i wyjścia łączy się równolegle. Są to tzw. przekształtniki interleaved, w których, w sygnałach sterujących tranzystorami o takim samym wypełnieniu  $D$ , wprowadza się przesunięcie fazowe równe  $360^\circ/n$  gdzie  $n$  jest liczbą określającą liczbę przekształtników składowych. Dzięki odpowiedniej budowie i stosowaniu takich sygnałów sterujących możliwe jest zbudowanie przekształtnika o większej mocy znamionowej cechującego się mniejszymi tętnieniami prądów wejściowego i wyjściowego. Wynika to ze zwielokrotnienia częstotliwości tętnień prądu wejściowego i wyjściowego. W niniejszym rozdziale

pokazano, że podobnie jak dla pojedynczego przekształtnika typu BOOST, w przekształtniku podwójnym występuje różnica pomiędzy zmierzonym prądem wejściowym, a jego rzeczywistą wartością średnią.

Na rysunku 6 przedstawiono schemat przekształtnika podwójnego typu BOOST. Składa się on z dwóch przekształtników typu BOOST, w których tranzystory sterowane są sygnałami o tym samym wypełnieniu lecz przesunięciu fazowym równym  $180^\circ$ . Przebiegi objaśniające działanie tego przekształtnika zostały przedstawione na rysunku 7.



Rys.6. Schemat podwójnego przekształtnika typu BOOST



Rys.7. Przebiegi prądów dławików  $L_1$  i  $L_2$  oraz prądu wejściowego  $i_{in}$  gdy: a)  $D+D_2 < 0,5$ , b)  $0,5 < D+D_2 < 0,5+D/2$ , c)  $0,5+D/2 < D+D_2 < 0,5+D$  i d)  $D+D_2 > 0,5+D$ . We wszystkich przypadkach  $D+D_2 < 1$

Dla przewodzenia nieciągnego w podwójnym przekształtniku typu BOOST można zauważyć, że wartość prądu  $I_p$  jest różna od rzeczywistej wartości średniej tego prądu  $I_{in}$  podobnie jak w przypadku pojedynczego przekształtnika. Dla nieciągnego przewodzenia w podwójnym przekształtniku typu BOOST można wyróżnić cztery przedziały  $P_1-P_4$ , które są zależne od sumy współczynników  $D+D_2$  i są one określone następującymi warunkami.

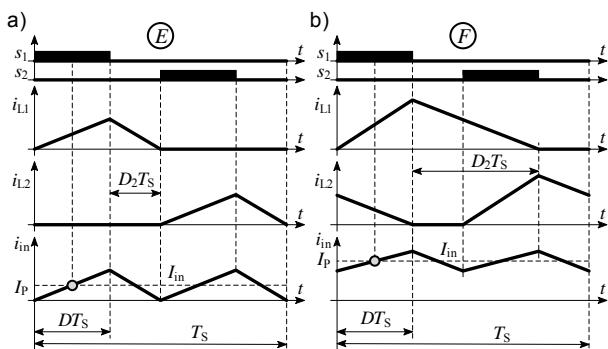
$$(14) \quad \begin{aligned} P_1 &= \{D + D_2 < 0,5\} \\ P_2 &= \{D + D_2 \geq 0,5\} \wedge \left\{ D + D_2 < 0,5 + \frac{D}{2} \right\} \\ P_3 &= \left\{ D + D_2 \geq 0,5 + \frac{D}{2} \right\} \wedge \left( \left\{ D + D_2 < 0,5 + D \right\} \vee \left\{ D + D_2 < 1 \right\} \right) \\ P_4 &= \{D + D_2 \geq 0,5 + D\} \wedge \{D + D_2 < 1\} \end{aligned}$$

Na rysunku 7 zaznaczono przebiegi prądów  $i_{L1}$  i  $i_{L2}$  oraz ich sumę, czyli prąd wejściowy  $i_{in}$ . W przypadku pracy w przedziale  $P_1$  (rys. 7.a - punkt A na rys. 9), podobnie jak dla pojedynczego przekształtnika typu BOOST pracującego przy nieciągłym prądzie, prąd  $i_{in}$  jest nieciągły. Wartość prądu mierzonego jest większa od rzeczywistej wartości średniej  $I_p > I_{in}$ , czyli w przedziale  $P_1$   $k < 1$ .

W przedziałach  $P_2$ – $P_4$  prąd  $i_{in}$  jest ciągły pomimo tego, że prądy  $i_{L1}$  i  $i_{L2}$  są nieciągłe. W przedziale  $P_2$  (rys. 7.b - punkt B na rys. 9) pomiar prądu  $I_p$  odbywa się wtedy, gdy w prądzie wejściowym występuje tylko prąd jednego przekształtnika, co skutkuje tym, że  $I_p < I_{in}$ , czyli  $k > 1$ .

W przedziale  $P_3$  (rys. 7.c - punkt C na rys. 9) mierzony prąd wejściowy  $I_p$  jest sumą prądów obu przekształtników, przy czym  $I_p < I_{in}$ , a zatem współczynnik  $k > 1$ . W przedziale  $P_4$  (rys. 7.d - punkt D na rys. 9) przewodzenie pojedynczego przekształtnika trwa dłużej niż czas trwania załączenia tranzystora przekształtnika drugiego co powoduje, że wartość mierzona prądu  $I_p > I_{in}$  i współczynnik korygujący pomiar prądu  $k < 1$ .

Wartość prądu mierzonego  $I_p$  jest równa rzeczywistej wartości średniej prądu wejściowego  $I_{in}$ , w przypadkach gdy  $(D+D_2 = 0,5)$ ,  $(D+D_2 = 0,5+D)$  i dla  $(D+D_2 = 1)$ , wtedy też współczynnik korygujący  $k = 1$ . Przebiegi prądów dla  $(D+D_2 = 0,5)$ ,  $(D+D_2 = 0,5+D)$  przedstawiono na rys. 8.



Rys.8. Przykładowe przebiegi prądów  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  i prądu wejściowego  $i_{in}$  dla pracy gdy: a)  $D+D_2 = 0,5$  i b)  $D+D_2 = 0,5+D$

Na rysunku 9 na płaszczyźnie  $(V_{in}/V_0, D)$  zaznaczono punkty pracy A-F, dla których przebiegi prądów zilustrowano na rysunkach 7 i 8. Dodatkowo zaznaczono przedziały  $P_1$ – $P_4$  z charakterystykami granicznymi, które na płaszczyźnie  $(V_{in}/V_0, D)$  określono za pomocą wzorów (15)–(18), do wyznaczenia których wykorzystano zależność (4).

$$(15) \quad D + D_2 = 0,5 \Rightarrow D = 0,5(1 - V_{in}/V_0)$$

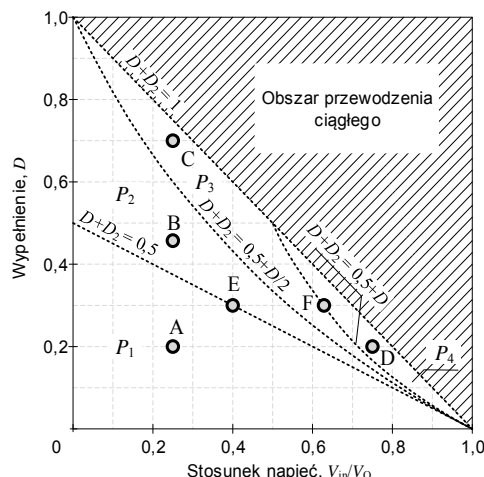
$$(16) \quad D + D_2 = 0,5 + \frac{D}{2} \Rightarrow D = \frac{(1 - V_{in}/V_0)}{(1 + V_{in}/V_0)}$$

$$(17) \quad D + D_2 = 0,5 + D \Rightarrow D = \frac{1}{2(V_{in}/V_0)} - \frac{1}{2}$$

$$(18) \quad D + D_2 = 1 \Rightarrow D = 1 - V_{in}/V_0$$

Jak zauważono wcześniej współczynnik korygujący  $k$ , opisywany jako stosunek prądów  $I_{in}/I_p$  w przedziale  $P_1$  jest  $k < 1$ , a w przedziale  $P_2$  jest  $k > 1$ . W obu przedziałach mierzony prąd  $I_p$  jest prądem pojedynczego przekształtnika, ponieważ prąd drugiego przekształtnika w chwili pomiaru ( $t = DT_s/2$ ) równy jest zero. Współczynnik  $k$  opisany zatem będzie wzorem (19).

$$(19) \quad \text{dla } (P_1 \text{ lub } P_2) \quad k = \frac{I_{in}}{I_p} = 2(D + D_2) = 2D \frac{V_0}{V_0 - V_{in}}$$



Rys.9. Obszary zmienności współczynnika korygującego pomiar prądu  $k$  na płaszczyźnie stosunku  $V_{in}/V_0$  i wypełnienia  $D$

Liczba 2 we wzorze (19) wynika z tego, że rzeczywista wartość średnia prądu wejściowego jest dwukrotnie większa od średnich prądów dławików przekształtników składowych.

W przedziałach  $P_3$  i  $P_4$  wartość mierzona prądu wejściowego  $I_p$  równa jest sumie prądów obu przekształtników  $I_p = i_{L1}(DT_s/2) + i_{L2}(DT_s/2)$ , przy czym w czasie pomiaru ( $t = DT_s/2$ ) prąd  $i_{L1}$  narasta, ponieważ napięcie dławika jest dodatnie i równe  $V_{in}$ , a prąd  $i_{L2}$  opada, ponieważ napięcie dławika  $L_2$  jest w tym czasie ujemne i wynosi  $V_{in} - V_0$ . Współczynnik  $k$  w przedziałach  $P_3$  i  $P_4$  określa się wzorem (20), do wyznaczenia którego skorzystano z zależności  $i_{L2}(DT_s/2) = i_{L1}(DT_s/2 + 0,5T_s)$ . Charakterystyki zmian współczynnika  $k$  jako funkcje  $V_{in}/V_0$  i  $D$  pokazano na rysunkach 10 i 11.

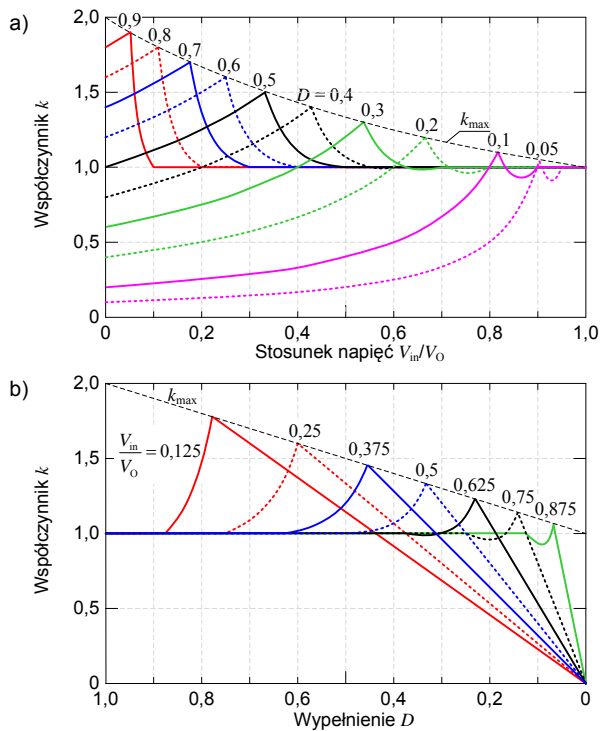
dla  $(P_3 \text{ lub } P_4)$

$$(20) \quad k = \frac{2 \frac{1}{2} \Delta I_L (D + D_2)}{\frac{1}{2} \Delta I_L + \Delta I_L + \frac{V_{in} - V_0}{L} T_s \left(0,5 + \frac{D}{2} - D\right)} = \frac{V_{in} D^2 V_0}{\left[V_{in} (D + 0,5) + V_0 (0,5D - 0,5)\right] (V_0 - V_{in})}$$

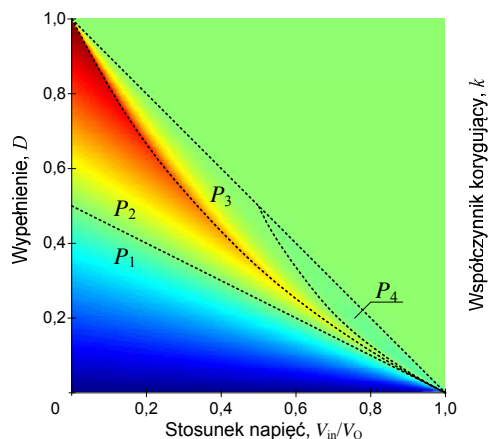
Na podstawie charakterystyk z rysunków 10 i 11 widać, że wartość współczynnika korygującego pomiar prądu może przyjmować wartości od 0 do maksymalnie 2. Przy czym maksymalna wartość współczynnika  $k = k_{max}$  występuje dla warunku  $D+D_2 = 0,5+D/2$  i określona jest wzorem (21).

$$(21) \quad k_{max} = 2 \frac{1}{1 + \frac{V_{in}}{V_0}} = 1 + D$$

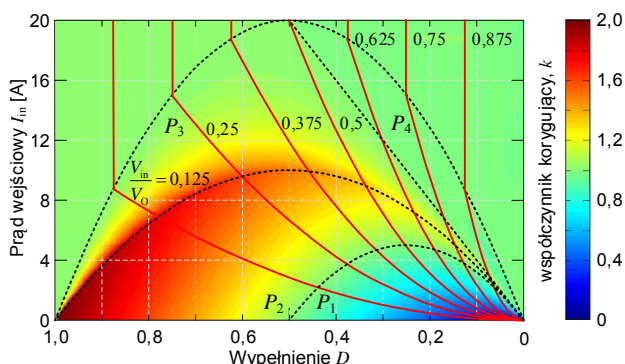
W celu wyznaczenia rzeczywistej wartości średniej prądu wejściowego  $I_{in}$  dla podwójnego przekształtnika BOOST, zmierzoną wartość prądu  $I_p$  przemnaża się przez współczynnik  $k$ , wyznaczone na podstawie (19) lub (20).



Rys.10. Współczynnik korygujący pomiar prądu  $k$  w funkcji a) stosunku napięć  $V_{in}/V_0$  i b) wypełnienia  $D$



Rys.11. Wykres ilustrujący wartość współczynnika korygującego  $k$  na płaszczyźnie  $(V_{in}/V_0, D)$  dla podwójnego przekształtnika BOOST



Rys.12. Wykres ilustrujący wartość współczynnika korygującego  $k$  na płaszczyźnie  $(I_{in}, D)$  dla podwójnego przekształtnika BOOST o parametrach  $V_0 = 400$  V,  $f = 10$  kHz,  $L = 500$   $\mu$ H

Na rysunku 12 przedstawiono na płaszczyźnie wypełnienie-prąd wejściowy współczynnik korygujący  $k$  dla podwójnego przekształtnika typu BOOST o parametrach

takich jak w tabeli 1. Na podstawie rysunku 12 widać jaką ma mieć wartość współczynnik korygujący dla określonego prądu wejściowego i wypełnienia. Można zwrócić uwagę, że na tym rysunku prąd graniczny ma dwukrotnie większą wartość względem wartości przedstawionych na rysunku 5.a. Wynika to stąd, że analiza dotyczy przekształtnika podwójnego, a na rysunku 5 przedstawiono wyniki dla pojedynczego przekształtnika BOOST.

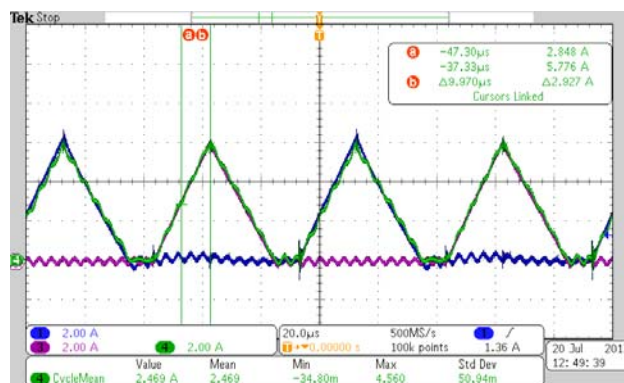
### Badania eksperymentalne

Weryfikację laboratoryjną przeprowadzono dla podwójnego przekształtnika typu BOOST (rys. 6), pracującego z częstotliwością przełączeń 10 kHz i wyposażonego w dławiki o indukcyjności 560  $\mu$ H. W trakcie badań eksperymentalnych wartość napięcia wyjściowego nie była stała lecz zmieniała się, tak aby możliwe było osiągnięcie wszystkich przedziałów pracy przekształtnika. Ograniczenie to było spowodowane ograniczaniem mocy wydzielanej na rezystorze obciążającym. Do badań wykorzystano regulowany zasilacz napięcia stałego i oscyloskop cyfrowy Tektronix. Odbiornikiem był rezystor o regulowanej rezystancji.

Na rysunkach 13-16 przedstawiono przebiegi czasowe prądów  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  oraz  $i_{in}$  dla pracy przekształtnika w różnych przedziałach. Pomiar prądu wejściowego  $I_p$  wykonano oscyloskopem, za pomocą kursora „a”, a wartość średnią prądu  $I_{in}$  zmierzono za cały okres przebiegu  $i_{in}$ . Pomiar napięć  $V_{in}$  i  $V_0$  wykonano za pomocą multimetrów i ich wyniki zamieszczono w tabeli 2 wraz z odpowiednią wartością wypełnienia  $D$ , które było wielkością zadawaną. Dla takich danych wyznaczono współczynnik  $k$  zgodnie z (19) lub (20), wyniki zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów i obliczeń prądu wejściowego  $I_{in}$

Przedział	$V_{in}$ [V]	$V_0$ [V]	$D$	$I_p$ [A]	$k$	$kI_p$ [A]	$I_{in}$ [A]
$P_1$	176,8	322,5	0,2	2,85	0,885	2,52	2,47
$P_2$	89,5	249,5	0,4	2,99	1,247	3,73	3,58
$P_3$	66,6	166,7	0,5	3,81	1,112	4,24	4,31
$P_4$	140,9	181,7	0,2	4,02	0,967	3,89	3,85

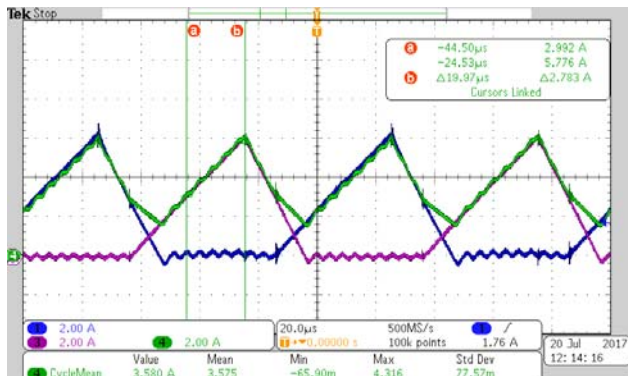


Rys.13. Przebiegi prądów dławików oraz prądu wejściowego podczas pracy w przedziale  $P_1$  (Ch1 -  $i_{L1}$ , Ch2 -  $i_{L2}$ , Ch4 -  $i_{in}$ )

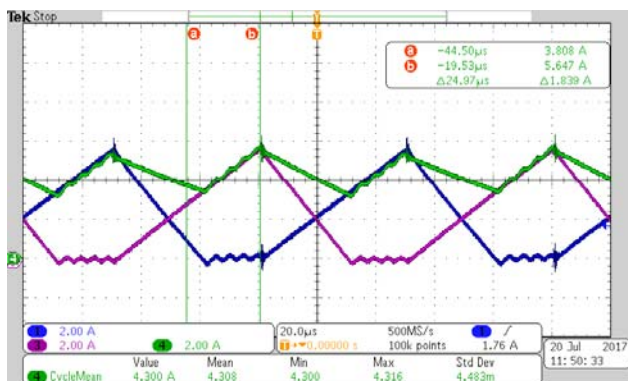
Porównując przedstawione w tabeli 2 wartości prądu mierzonego  $I_{in}$  z wartością obliczoną na podstawie  $k$  oraz  $I_p$  można zauważyć dobrą ich zgodność (błąd wynosi od 1,0% do 4,2%). W przypadku pracy z niższymi wartościami napięcia wejściowego różnice są większe (ok. 4%), co wynika z pominięcia w rozważaniach spadku napięcia na tranzystorach, który w tych warunkach ma większe znaczenie. Korekta wartości napięcia wejściowego uwzględniająca spadek napięcia na tranzystorze IGBT



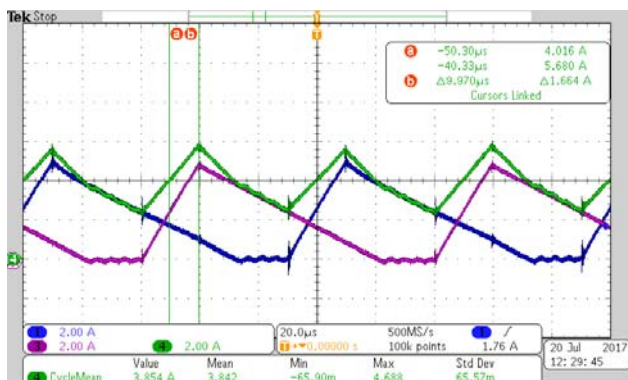
wynoszący 2 V daje wynik bardziej zbliżony do oczekiwanego. Odpowiednia analiza uwzględniająca rzeczywiste parametry przekształtnika tj. spadki napięć na tranzystorach i diodach oraz rezystancji szeregowej dławika nie została w tym artykule przedstawiona i będzie przedmiotem dalszych badań.



Rys. 14. Przebiegi prądów dławików oraz prądu wejściowego podczas pracy w przedziale  $P_2$  (Ch1 -  $i_{L1}$ , Ch2 -  $i_{L2}$ , Ch4 -  $i_{in}$ )



Rys.15. Przebiegi prądów dławików oraz prądu wejściowego podczas pracy w przedziale  $P_3$  (Ch1 -  $i_{L1}$ , Ch2 -  $i_{L2}$ , Ch4 -  $i_{in}$ )



Rys.16. Przebiegi prądów dławików oraz prądu wejściowego podczas pracy w przedziale  $P_4$  (Ch1 -  $i_{L1}$ , Ch2 -  $i_{L2}$ , Ch4 -  $i_{in}$ )

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę dotyczącą zagadnienia pomiaru nieciągłego prądu wejściowego w pojedynczym i podwójnym przekształtniku typu BOOST sterowanym mikroprocesorowo. Prąd wejściowy przekształtnika jest mierzony w jednej chwili okresu przełączania i na bazie tego pomiaru z uwzględnieniem współczynnika korygującego, odtwarzana jest jego wartość średnia. Dla nieciągłego prądu dławika mierzona wartość prądu wejściowego różni się względem rzeczywistej wartości średniej tego prądu stąd jest konieczność wprowadzenia współczynnika korygującego. W artykule podano wzory matematyczne opisujące ten współczynnik w zależności od warunków pracy przekształtnika. Ważnym wnioskiem jaki zaobserwowano jest to, że współczynnik korygujący nie zależy od częstotliwości przełączania tranzystorów oraz indukcyjności dławików, a zależy od stosunku napięcia wejściowego do wyjściowego i wypełnienia. W artykule przedstawiono szereg charakterystyk ilustrujących współczynnik korygujący, a także zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych potwierdzających poprawność przyjętych założeń i otrzymanych wzorów na współczynnik korygujący.

**Autorzy:** dr inż. Marcin Zygmantowski, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: [Marcin.Zygmantowski@polsl.pl](mailto:Marcin.Zygmantowski@polsl.pl); dr inż. Michał Jeleń, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: [Michal.Jelen@polsl.pl](mailto:Michal.Jelen@polsl.pl); Jarosław Michalak, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: [Jaroslaw.Michalak@polsl.pl](mailto:Jaroslaw.Michalak@polsl.pl)

## LITERATURA

- [1] Kasper M., Bortis D., Kolar J.W., Classification and Comparative Evaluation of PV Panel-Integrated DC-DC Converter Concepts, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.29 (2014), n.5, 2511-2526
- [2] Walker G.R., Sernia P.C., Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.19, (2004) n.4, 1130-1139
- [3] Singh B., Singh B.N., Chandra A., Al-Haddad K., Pandey A., Kothari D.P., A review of single-phase improved power quality AC-DC converters, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, (2003) n.5, 962-981
- [4] Finamor G.A., Solano D.L.S, Ortmann M.S., Ruseler A., Munaretto L., Da Silva D., Coelho R.F., Heldwein M.L., Solar Photovoltaic Static Conversion System Applied to a Smart Microgrid, *IEEE 8th International Symposium on Power Electron. for Distributed Generation Systems* (2017), 1-6
- [5] Ramos-Paja C., Petrone G., Spagnuolo G., DCM operation of interleaved DC/DC converters for PV applications, *Proc. 15th IEEE PEMC* (2012), 1-6
- [6] Wu Ding, Calderon-Lopez G., Forsyth A.J., Discontinuous conduction/current mode analysis of dual interleaved buck and boost converters with interphase transformer, *IET Power Electron.*, vol 9, (2016), n.1, 31-41