

doi:10.15199/48.2017.04.03

## Geometria uzwojeń i wyznaczanie parametrów pasożytniczych dławika o zredukowanej pojemności

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia analityczny sposób wyznaczania pojemności pasożytniczej uzwojeń dławika wysokoczęstotliwościowego o nowej konstrukcji, umożliwiającej 10 - krotną redukcję tej pojemności w porównaniu z rozwiązaniami stosowanymi dotychczas. Dla zaproponowanej metody, w sposób szczegółowy zaprezentowano rozkład uzwojeń w oknie rdzenia i na podstawie uzyskanej geometrii przyjętego modelu elementu magnetycznego przedstawiono opis analityczny oraz wyznaczono pojemność uzwojenia. Dokonano porównania uzyskanych wyników obliczeń z wynikami pomiarów przeprowadzonych dla dławika o indukcyjności  $L = 1,2\text{mH}/8\text{A}$ , przewidzianego do pracy w przekształtniku DC/DC podwyższającym napięcie.

**Abstract.** This paper presents an analytical method for determining parasitic capacitance of winding in high-frequency inductor, which allows 10 times reduction of this capacitance compared to traditional solutions. For the proposed method, winding distribution has been presented in detail and based on its geometry the analytical description has been presented and winding capacitance has been calculated. A comparison of the analytical results obtained from calculations with the results of measurements performed for the inductor with parameters  $L = 1,2\text{mH} / 8\text{A}$  dedicated for DC/DC boost converter has been done. (**Winding geometry and determination of parasitic parameters for inductor with reduced capacitance**).

**Słowa kluczowe:** pojemność pasożytnicza uzwojeń, wysokoczęstotliwościowe elementy magnetyczne, geometria uzwojeń.

**Keywords:** parasitic capacitance of windings, high frequency magnetic components, geometry of windings.

### Wstęp

Wraz z coraz powszechniejszym stosowaniem w przekształtnikach energoelektronicznych elementów półprzewodnikowych mocy, wykonanych z materiałów takich jak węglik krzemu (SiC, ang. *Silicon Carbide*) czy azotek galu (GaN, ang. *Gallium Nitride*) warunki pracy elementów magnetycznych uległy znacznej zmianie. Z jednej strony, dzięki bardzo dobrym właściwościom dynamicznym tych przyrządów (krótkie czasy załączania i wyłączania, niewielkie wartości strat energii łączeniowych) możliwe jest znaczne podwyższenie częstotliwości przełączeń  $f_s$ , co w konsekwencji prowadzi do redukcji parametrów (indukcyjności, wymiarów oraz masy) elementów magnetycznych. Jednak bardzo krótkie czasy procesów łączeniowych powodują występowanie stromości napięć na poziomie kilkudziesięciu kilowoltów na mikrosekundę, uwydatniając znaczenie parametrów pasożytniczych obwodu przekształtnika [1], w tym pojemności pasożytniczych występujących w elementach magnetycznych [2]. Analiza tych zjawisk w elementach typu SiC JFET oraz SiC BJT pracujących przy częstotliwości przełączeń rzędu 100 kHz w układzie przekształtnika podwyższającego napięcie (boost) wykazała istotny wpływ pojemności pasożytniczej uzwojenia dławika m.in. na straty mocy w układzie, a zastosowanie nowej konstrukcji uzwojeń, pozwalającej 10-krotnie ograniczyć pojemność wypadkową, przyczyniło się m.in. do wzrostu sprawności energetycznej oraz redukcji poziomu przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych [3], [4]. Stąd też w procesie projektowania elementów magnetycznych współpracujących z szybkoprzełączającymi elementami półprzewodnikowymi, oprócz określenia dotychczasowych charakterystycznych wielkości należy również uwzględnić analityczne wyznaczenie pojemności pasożytniczej uzwojenia.

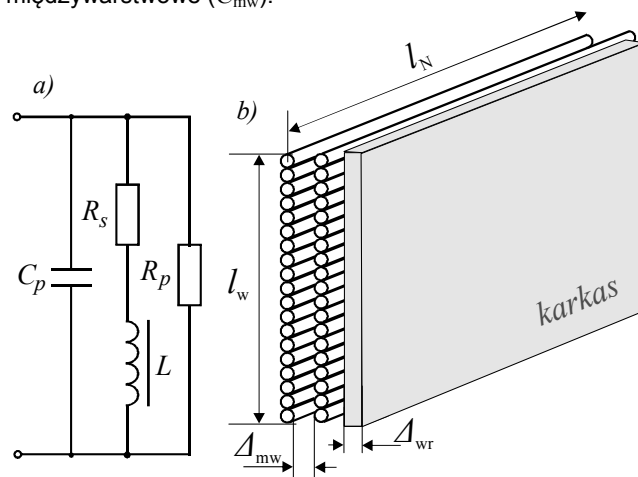
W niniejszej pracy przedstawiono sposób analitycznego wyznaczania pojemności pasożytniczej dwuwarstwowego uzwojenia dławika w odniesieniu do nowej metody realizacji uzwojenia pozwalającej na znaczną redukcję tej pojemności w stosunku do rozwiązań klasycznych. Dokonano zestawienia wyników obliczeń przeprowadzonych dla dławika o indukcyjności  $L=1,2\text{mH}/8\text{A}$  porównując je z

wynikami pomiarów wykonanych na modelu eksperymentalnym.

### Pojemności w uzwojeniu klasycznym

Dokładne wyznaczenie wartości pojemności dla dławików wykonywanych metodami klasycznymi jest możliwe m.in. poprzez dokonanie analizy rozkładu pola elektrycznego korzystając przy tym z zależności analitycznych [5], [6] lub metod numerycznych [7]. Metody te należą do najdokładniejszych, jednak wymagają precyzyjnego modelu uzwojeń oraz cechują się dużym stopniem skomplikowania procedury obliczeniowej. Jedną z prostszych metod oszacowania tej pojemności polega na analizie rozkładu przestrzennego wykonanego uzwojenia.

W uproszczonym, zastępczym modelu uzwojenia dławika (rys.1a) można wyróżnić trzy równoległe połączone gałęzie zawierające: indukcyjność  $L$  połączoną szeregowo z rezystancją przewodu nawojowego  $R_s$ , rezystancję odpowiadającą stratom mocy w rdzeniu dławika  $R_p$  oraz zastępczą pojemność pasożytniczą uzwojenia  $C_p$ . Na pojemność wypadkową uzwojenia mają wpływ pojemności elementarne występujące między rdzeniem i pierwszą warstwą uzwojenia ( $C_{wr}$ ) oraz pojemności międzywarstwowe ( $C_{mw}$ ).



Rys.1. Uproszczony schemat zastępczy uzwojenia (a) oraz przykładowa prezentacja uzwojenia dwuwarstwowego dławika (b)

Biorąc pod uwagę wymiary geometryczne uzwojenia (rys. 1b) na podstawie zależności (1) i (2) można określić wartości tych pojemności:

$$(1) \quad C_{wr} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{l_{wr}}$$

$$(2) \quad C_{mw} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{l_{mw}}$$

gdzie:  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m - przenikalność elektryczna próżni;  $\varepsilon_r$  - względna przenikalność elektryczna przekładki między karkasem a pierwszą warstwą rdzenia lub między dwoma warstwami uzwojenia;  $A$  - pole powierzchni umyślonego kondensatora zastępczego, równe powierzchni warstwy uzwojenia ( $A = l_w l_N$ );  $l_{wr}$ ,  $l_{mw}$  - zastępcze długości dielektryka między karkasem a rdzeniem oraz między warstwami uzwojenia, które można oszacować przy zastosowaniu poniższych, uproszczonych wzorów [8]

$$(3) \quad l_{wr} = \Delta_{wr} + \frac{1,26d_0 - 1,15(d_0 - 2s)}{2}$$

$$(4) \quad l_{mw} = \Delta_{mr} + 1,26d_0 - 1,15(d_0 - 2s)$$

gdzie:  $\Delta_{wr}$ ,  $\Delta_{mr}$  - odległości między warstwą pierwszą uzwojenia i rdzeniem oraz między dwiema warstwami uzwojenia (rys. 1);  $d_0$ ,  $s$  - średnica oraz grubość ścianki (dielektryka) przewodu nawojowego.

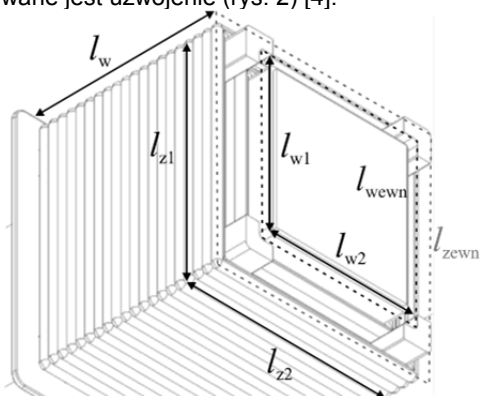
Dla uzwojenia dwuwarstwowego wypadkową pojemność pasywną dławika można wyrazić zależnością [9]

$$(5) \quad C_p = \frac{C_{wr} + 4C_{mw}}{12}$$

z której wynika, że pojemność międzywarstwowa ma znacznie większy wpływ na wartość pojemności wypadkowej niż pojemność  $C_{wr}$ .

### Rozkład geometryczny uzwojenia ulepszanego

Jak wynika ze wzoru (5) redukcja składowej wynikającej z elementarnych pojemności występujących między dwiema warstwami uzwojenia może znacznie wpływać na wypadkową pojemność uzwojenia. Proponowane rozwiązanie uzwojenia ulepszanego polega na zwiększeniu odstępów między warstwami uzwojenia ( $\Delta_{mw}$ ), przy jednoczesnym zmniejszeniu wartości przenikalności elektrycznej odstępów powietrznego między warstwami ( $\varepsilon_r \approx 1$ ). Uzyskuje się to stosując elementy dystansowe, umieszczone wzdłuż krawędzi kolumny rdzenia, na której wykonywane jest uzwojenie (rys. 2) [4].



Rys.2. Graficzna prezentacja metody wykonania dławika charakteryzującego się zredukowaną pojemnością pasywną uzwojeń

Analiza pojemności uzwojenia wykonanego w zaproponowany sposób powinna uwzględniać dwa obszary będące składnikami oraz mające wpływ na wartość pojemności międzywarstwowej:

$$(6) \quad C_{mw} = C_{op} + C_d$$

Zaletą pierwszego ( $C_{op}$ ) jest umieszczenie między okładzinami umyślonego kondensatora przestrzeni wypełnionej powietrzem ( $\varepsilon_r \approx 1$ ), natomiast drugi wynika z zastosowania materiału o możliwie jak najmniejszej wartości przenikalności, który wypełnia przestrzeń między jego umyślonymi okładzinami (elementy dystansowe). Należy przy tym zaznaczyć, że odległość między tymi okładzinami w obu przypadkach powinna mieć taką samą odległość równą  $\Delta_{mw}$ .

Na podstawie wymiarów geometrycznych uzwojenia wykonanego zaproponowaną metodą (rys. 2) uśredniona długość zwoju wyniesie

$$(7) \quad l_{N(sr)} = \frac{l_{wewn} + l_{zewn}}{2} = l_{w1} + l_{w2} + l_{z1} + l_{z2}$$

przy czym zakładając wykorzystanie rdzenia o regularnych wymiarach środkowej kolumny ( $l_{w1} = l_{w2}$ ,  $l_{z1} = l_{z2}$ ), na której ma być wykonane uzwojenie uśredniona długość zwoju będzie równa

$$(8) \quad l_{N(sr)} = 2 \cdot (l_{w1} + l_{z1})$$

Uwzględniając wcześniejszy podział na składowe pojemności międzywarstwowej (6) oraz wymiary zastosowanych elementów dystansowych uśredniona szerokość okładzin umyślonego kondensatora  $C_d$  podobnie jak w (7) może być określona przy użyciu

$$(9) \quad l_{d(sr)} = g \cdot \frac{l_{d\_wewn} + l_{d\_zewn}}{2}$$

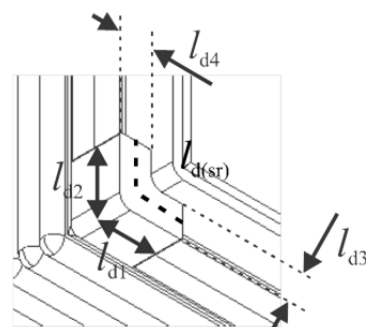
przy czym  $g$  oznacza liczbę zastosowanych elementów dystansowych, natomiast ich wewnętrzna oraz zewnętrzna szerokość może być wyznaczona przy uwzględnieniu wymiarów geometrycznych (rys. 3)

$$(10) \quad l_{d\_wewn} = l_{d1} - l_{d4} + l_{d2} - l_{d3}$$

$$(11) \quad l_{d\_zewn} = l_{d1} + l_{d2}$$

Po podstawieniu do (9) otrzymuje się

$$(12) \quad l_{d(sr)} = g \cdot \left[ l_{d1} + l_{d2} - \frac{1}{2} \cdot (l_{d3} + l_{d4}) \right]$$



Rys.3. Szczegółowe wymiary zastosowanych elementów dystansowych

Przy założeniu dokładnego wykonania w/w elementów o symetrycznych wymiarach ( $l_{d1}=l_{d2}$ ,  $l_{d3}=l_{d4}$ ) zależność (12) przyjmuje postać

$$(13) \quad l_{d(sr)} = g \cdot (2 \cdot l_{d1} - l_{d3})$$

Stąd, uśredniona szerokość okładzin umyślonego kondensatora  $C_{op}$  będzie różnicą pomiędzy średnią długością zwoju a średnią szerokością okładzin kondensatora  $C_d$

$$(14) \quad l_{op(sr)} = l_{N(sr)} - l_{d(sr)}$$

Na podstawie zależności określających średnie szerokości okładzin, przy znanej wysokości warstw uzwojenia ( $l_w$ ), można określić powierzchnie jakie będą wytworzone poprzez części uzwojenia objęte przestrzenią powietrzną

$$(15) \quad A_{op} = l_{op(sr)} \cdot l_w$$

oraz powierzchnie zajęte przez zastosowane elementy dystansowe

$$(16) \quad A_d = l_{d(sr)} \cdot l_w$$

Pojemność (2) międzywarstwowa uzwojenia wykonanego tak, że koniec drugiej warstwy będzie na początku pierwszej może być wyrażone zależnością

$$(17) \quad C_{mw} = \frac{\epsilon_0 \cdot (\epsilon_{op} \cdot A_{op} + \epsilon_d \cdot A_d)}{l_{mw}}$$

przy czym odległość między okładzinami umyślonych kondensatorów może być wyznaczona przy użyciu uproszczonej zależności (4) przy założeniu, że  $\Delta_{mw}=l_{d3}=l_{d4}$ .

### Obliczenia analityczne i badania eksperymentalne

W celu weryfikacji poprawności uzyskanych zależności analitycznych opisujących pojemności uzwojeń uzyskane wyniki obliczeń porównano z rezultatami pomiarów eksperymentalnych pojemności pasożytniczej. Wykorzystano dwa dławiki, których uzwojenia zostały zrealizowane metodą klasyczną oraz ulepszoną.

#### A) Modele laboratoryjne dławików

Oba elementy magnetyczne charakteryzowała identyczna wartość indukcyjności ( $L = 1,2$  mH), liczby zwojów ( $N = 40$ ) oraz warstw ( $W = 2$ ). Do budowy w/w elementów magnetycznych zastosowano rdzeń typu UI93/104/30 wykonany z ferrytu typu N87 o efektywnym polu przekroju poprzecznego  $A_g=840$  mm<sup>2</sup>. Materiałem nawojowym w obu przypadkach była lica o polu przekroju  $S_{Cu} = 0,94$  mm<sup>2</sup>, złożona ze 120 żył o średnicy 0,1mm każda. Podstawowe różnice w rozpatrywanych elementach magnetycznych polegały na zastosowaniu odmiennych parametrów konstrukcyjnych zamieszczonych w tabeli 1 dla dławika o uzwojeniu wykonanym klasycznie oraz w tabeli 2 dla dławika charakteryzującego się uzwojeniem ulepszonym. W pierwszym przypadku jako izolator między uzwojeniem pierwszym i drugim zastosowano kaptonową taśmę izolacyjną, której grubość w przybliżeniu wynosiła 0,2mm, natomiast uzwojenie dławika ulepszonyego złożone było ze specjalnie przygotowanych dystansowych elementów narożnych, których dokładne wymiary podano w tabeli 2.

Tabela 1. Parametry konstrukcyjne dławika o uzwojeniu wykonanym klasycznie

Parametr	jedn.	wartość
<b>Uzwojenie</b>		
wewn. wymiar kolumny rdzenia $l_{w1}$	mm	32
wewn. wymiar kolumny rdzenia $l_{w2}$		34
zewn. wymiar uzwojenia $l_{z1}$		36
zewn. wymiar uzwojenia $l_{z2}$		38
wysokość uzwojenia $l_w$		40
<b>Elementy dystansowe</b>		
Grubość taśmy izolacyjnej (kapton)	mm	0,2

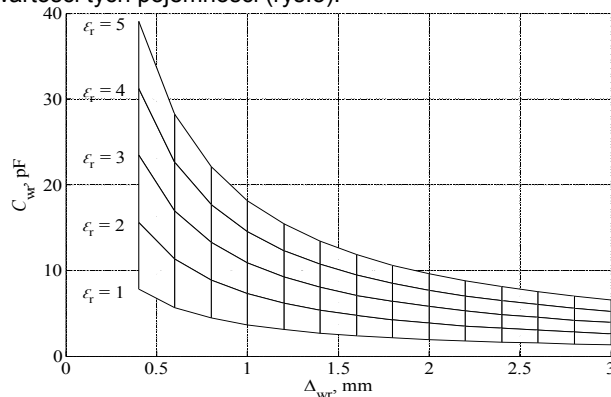
Tabela 2. Parametry konstrukcyjne dławika o uzwojeniu ulepszonym

Parametr	jedn.	wartość
<b>Uzwojenie</b>		
wewn. wymiar kolumny rdzenia $l_{w1}$	mm	32
wewn. wymiar kolumny rdzenia $l_{w2}$		34
zewn. wymiar uzwojenia $l_{z1}$		42
zewn. wymiar uzwojenia $l_{z2}$		44
wysokość uzwojenia $l_w$		40
<b>Elementy dystansowe</b>		
liczba elementów dystansowych $g$	-	4
wzgl. przenikalność elektryczna el. dyst. $\epsilon_d$	-	3
wzgl. przenikalność elektryczna powietrza $\epsilon_{op}$	-	1,00054
zewn. wymiar el. dystansowego $l_{d1} = l_{d2}$	mm	5
szer. elementu dystansowego $l_{d3} = l_{d4}$		3

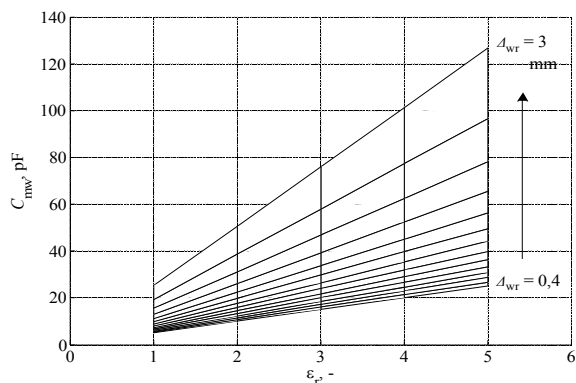
#### B) Obliczenia analityczne

Na podstawie zamieszczonych w tabelach dokładnych wymiarów konstrukcyjnych oraz przy użyciu zależności (1) - (5) sporządzono wykresy ilustrujące wpływ takich parametrów jak odległość między rdzeniem a pierwszą warstwą uzwojenia lub odległość międzywarstwami uzwojeń oraz na wartość przenikalności dielektrycznej na pojemności  $C_{wr}$  (rys.4) oraz  $C_{mw}$  (rys. 5). Uwzględniono przy tym wpływ poszczególnych składowych na wartość wypadkowej pojemności pasożytniczej  $C_p$  ( $C_{wr}/12$ ;  $C_{mw}/3$ ) opisaną zależnością (5).

Z otrzymanych charakterystyk wynika, że dobór materiału oraz odległość występująca między warstwami okładzin umyślonego kondensatora utworzonego przez warstwy uzwojenia ma istotny wpływ na wartość odpowiednich składowych pojemności uzwojenia. Wraz ze wzrostem odległości  $\Delta_{wr}$  oraz  $\Delta_{mw}$  zarówno w przypadku pojemności między rdzeniem a pierwszą warstwą uzwojenia oraz pojemności występującej między warstwami wartości te maleją wykładniczo (rys.4), podczas gdy wzrost przenikalności dielektrycznej prowadzi do liniowego wzrostu wartości tych pojemności (rys.5).

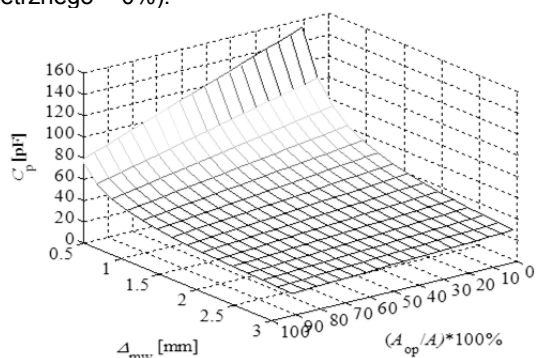


Rys.4. Wykres zmian pojemności występującej między rdzeniem a pierwszą warstwą uzwojenia w funkcji zmian odległości ( $\Delta_{wr}$ ) wyznaczona przy różnych wartościach przenikalności dielektrycznej materiału karkasu



Rys.5. Wykres zmian pojemności między warstwami uzwojeń w funkcji zmian przenikalności dielektrycznej ( $\epsilon_r$ ) wyznaczona przy różnych wartościach odległości między warstwami uzwojenia ( $\Delta_{mw}$ )

Korzystając z pozostałych danych umieszczonych w tabeli 2 precyzujących wymiary zastosowanych elementów dystansowych oraz z zależności (6) - (17) sporządzono charakterystykę wypadkowej pojemności w funkcji zmian odległości między pierwszą i drugą warstwą uzwojenia ( $\Delta_{mw}$ ) i procentowej zawartości odstępu powietrznego między tymi warstwami (rys.6). Uzyskane wyniki wskazują na dużą skuteczność zaproponowanej metody realizacji dławika o ulepszonym uzwojeniu - dla dławika o podanych parametrach w wyniku zastosowania teoretycznego odstępu powietrznego wynoszącego 90%, przy tej samej wartości odstępu uzyskano 2-krotną redukcję pojemności wypadkowej uzwojenia w nawiązaniu do przypadku dławika wykonanego klasycznie (procentowa zawartość odstępu powietrznego = 0%).

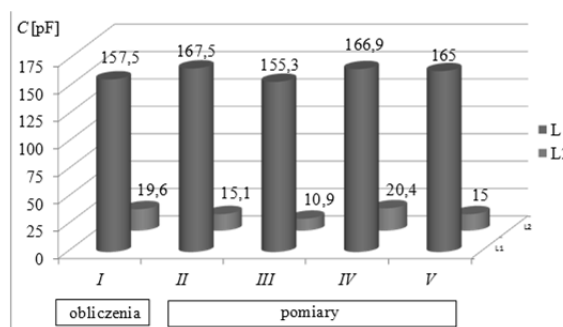


Rys.6. Wykres zmian wypadkowej pojemności uzwojenia dwuwarstwowego w funkcji zmian odległości między warstwami uzwojenia ( $\Delta_{mw}$ ) oraz procentowej zawartości odstępu powietrznego ( $(A_{op}/A) \cdot 100\%$ ) sporządzony przy  $\epsilon_d=3$

Stosując podane wcześniej zależności, zgodnie z opisaną metodą analityczną dokonano obliczenia pojemności obu dławików. Jako wynik, otrzymano wartości pojemności 19,6 pF dla dławika wykonanego zaproponowaną metodą i 157,5 pF w przypadku dławika o uzwojeniu wykonanych w sposób klasyczny.

### C) Pomiary pojemności pasożytniczej uzwojenia

Aby zweryfikować uzyskane rezultaty obliczeń analitycznych, porównano je z pomiarami pojemności pasożytniczej wykonanymi czterema odmiennymi sposobami (II - wobulacja częstotliwości sygnału testowego; III - wzbudzenie rezonansu tłumionego; IV - pomiar ładunku elektrycznego (na podstawie prądu dławika przy napięciu prostokątnym); V - zastosowanie analizatora impedancji) opisanymi w sposób bardziej szczegółowy w pracy [4]. Uzyskane wartości, wynikające z zastosowania tych metod zostały przedstawione na rysunku 7. Wykazują one daleko idącą zbieżność między sobą jak i w konfrontacji z wynikami przeprowadzonych obliczeń (I).



Rys.7. Zestawienie wyników obliczeń analitycznych (I) oraz rezultatów prób pomiarowych (II + V) wykonanych na dławiku o uzwojeniu klasycznym ( $L_1$ ) oraz ulepszonym ( $L_2$ )

## Podsumowanie

W artykule zaprezentowano analizę geometrii uzwojenia klasycznego oraz ulepszanego. Przedstawiono analityczny sposób wyznaczania pojemności pasożytniczych obu typów uzwojeń, po czym zastosowano otrzymane zależności w celu wyznaczenia pojemności wypadkowych, które następnie porównano z rezultatami przeprowadzonych pomiarów eksperymentalnych. W drodze konfrontacji wyników stwierdzono dużą zbieżność uzyskanych wartości, co świadczy o tym, że przedstawiona metoda analityczna cechuje się dużą dokładnością.

*Niniejsza praca jest współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, projekt „Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej” realizowany przez Centrum Studiów Zaawansowanych oraz z działalności statutowej Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej.*

**Autorzy:** dr inż. Mariusz Zdanowski, prof. dr hab. inż. Roman Barlik, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: mariusz.zdanowski@ee.pw.edu.pl, roman.barlik@ee.pw.edu.pl

## LITERATURA

- [1] Josifović I., Popović-Gerber J., Ferreira J.A., "Improving SiC JFET Switching Behavior Under Influence of Circuit Parasitics" *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 8, pp. 3843-3854, Aug. 2012
- [2] Zdanowski M., Rąbkowski J., Kostov K., Nee H.P., "The Role of the Parasitic Capacitance of the Inductor in Boost Converters with Normally-On SiC JFETs" in *7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, Harbin, 2012, pp. 1842 - 1847
- [3] Zdanowski M., Kostov K., Rąbkowski J., Barlik R., "Design and Evaluation of Reduced Self-Capacitance Inductor in DC/DC Converters with Fast-Switching SiC Transistors", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no 5, pp. 2492-2499, May 2014
- [4] Zdanowski M., "Wielogłęziowy wysokoczęstotliwościowy przekształtnik DC/D z łącznikami z SiC i elementami magnetycznymi o zredukowanej pojemności pasożytniczej", Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Warszawa 2015
- [5] Massarini, M.K. Kazimierzczuk, "Self-Capacitance of Inductors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 4, pp. 671-676, July 1997
- [6] L. Dalessandro, F. Silveira Cavalcante, J.W. Kolar, "Self-Capacitance of High-Voltage Transformers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 5, pp. 2081-2092, Sep. 2007
- [7] Q. Yu, T.W. Holmes, "A study on stray capacitance modeling of inductors by using the finite element method," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, no. 1, pp. 88-93, Feb. 2001
- [8] E. C. Snelling, "Soft Ferrites – Properties and Applications", CRC, 1969
- [9] S. Weber, M. Schinkel, S. Guttowski, W. John, H. Reichl, "Calculating Parasitics Capacitance of Three-Phase Common-Mode Chokes", PCIM, Nuremberg, 2005