

doi:10.15199/48.2015.09.12

Analityczny opis łączeniowych strat energii w wysokonapięciowych tranzystorach MOSFET pracujących w mostku

Streszczenie. W pracy przedstawiono analityczny opis łączeniowych strat energii w łącznikach z wysokonapięciowymi tranzystorami MOSFET, pracującymi w topologii mostkowej. Analizie poddano straty energii przy załączaniu twardym i miękkim, a także przy załączaniu małego prądu obciążenia i przy pracy bez obciążenia. W opisie uwzględniono wpływ pasożytniczych pojemności złączowych i zewnętrznych pojemności elementów półprzewodnikowych a także pasożytniczą pojemność odbiornika. Do wyprowadzenia zależności określających straty energii w łącznikach z tranzystorami MOSFET, wykorzystano zasadę zachowania ładunku i energii. Otrzymane zależności matematyczne wykorzystują wielkości dostępne w katalogach lub do określenia których wystarczą proste testy eksperymentalne.

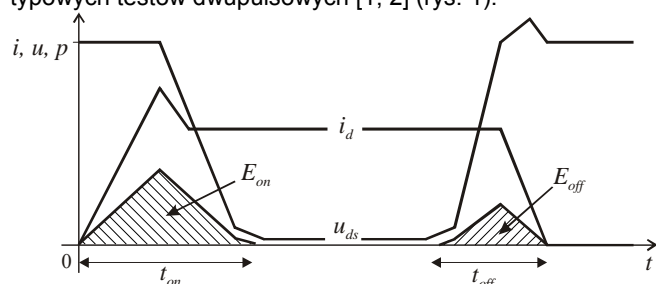
Abstract. This paper presents an analytical description of the switching energy losses in high voltage MOSFETs used in the H-bridge converters. The energy losses in hard- and soft- switching and under both with light load and without load were analyzed. In the analytical model the parasitic junction capacitance, external capacitance of the semiconductors, and equivalent parasitic capacitance of the load were taken in the account. By obeying conservation of energy and conservation of electric charge laws during the analytical investigations the equations describing the energy losses are derived. The mathematical formulas that are provided by this research can be used for determining the switching losses generated in the semiconductor devices using parameters from manufacturers catalogues. (*Analytical description of the switching losses in high voltage MOSFET H – bridge*).

Słowa kluczowe: MOSFET, straty energii, twarde załączanie, pojemności pasożytnicze.

Keywords: high-voltage MOSFET, switching losses, hard-switching, parasitic capacitance.

Wprowadzenie

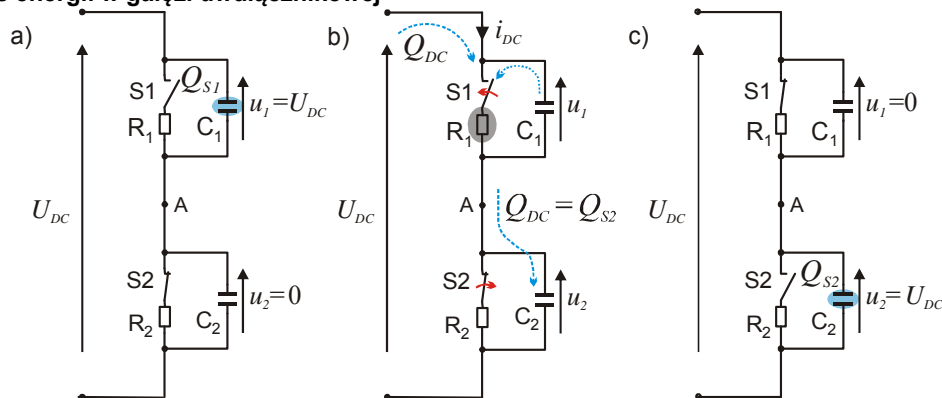
Spotykany w literaturze sposób opisu łączeniowych strat energii w tranzystorach mocy polega na analizie przebiegów wartości chwilowych napięcia i prądu łącznika w stanach dynamicznych, rejestrowanych podczas typowych testów dwupulsowych [1, 2] (rys. 1).



Rys. 1. Uproszczone przebiegi napięcia, prądu i mocy chwilowej tranzystora MOSFET z zaznaczeniem energii wydzielanej podczas załączania i wyłączenia zgodnie z klasycznym opisem strat prezentowanym w literaturze

Przebiegi napięcia i prądu w stanach dynamicznych w wysokonapięciowych tranzystorach MOSFET, charakteryzujących się dużymi pojemnościami pasożytniczymi, mają silnie oscylacyjny charakter. W związku z tym, nie można w sposób precyzyjny na ich podstawie wyznaczyć energii rozpraszanej w strukturze półprzewodnikowej, a tym bardziej określić części dotyczącej strat załączania i wyłączenia tranzystora [3]. Wiarygodny opis zmian energii w stanach dynamicznych łączników może być dokonany z zastosowaniem zasady zachowania ładunku i energii w obwodzie zawierającym pasożytnicze elementy inercyjne łącznika i pozostałych podzespołów przekształtnika [4]. Ze względu na parametry rozpatrywanej klasy tranzystorów MOSFET (wysokie napięcie i stosunkowo niewielkie prądy: 600-1200 V / 10-20 A), w przedstawionym opisie analitycznym nie uwzględniono wpływu pasożytniczych indukcyjności połączeń, gdyż energia w nich gromadzona jest pomijalnie mała ($< 1 \mu\text{J}$).

Analityczny opis energii w gałęzi dwułącznikowej



Rys. 2. Schematy zastępcze gałęzi dwułącznikowej przedstawiające rozmieszczenie i przepływ ładunku przed komutacją (a), w trakcie komutacji (b) i po komutacji (c); R_1 , R_2 – rezystancje kanałów tranzystorów

Analizie poddano typowy obwód jaki występuje w przekształtnikach mostkowych, półmostkowych i bezpośrednich sterownikach napięcia stałego, zawierający gałąź złożoną z dwóch tranzystorów MOSFET i diod zwrrotnych, podłączoną do źródła napięcia stałego (rys. 2). Do wyznaczenia energii traconej podczas przełączania tranzystora z zastosowaniem zasady zachowania energii, należy określić wartości energii zmagazynowanej w pojemnościach układu przed (E_{pocz}) i po komutacji (E_{kon}), oraz energię dostarczoną do układu (E_{DC}). Bilans energii dla układu z rysunku 2 może być opisany następującą zależnością [5]:

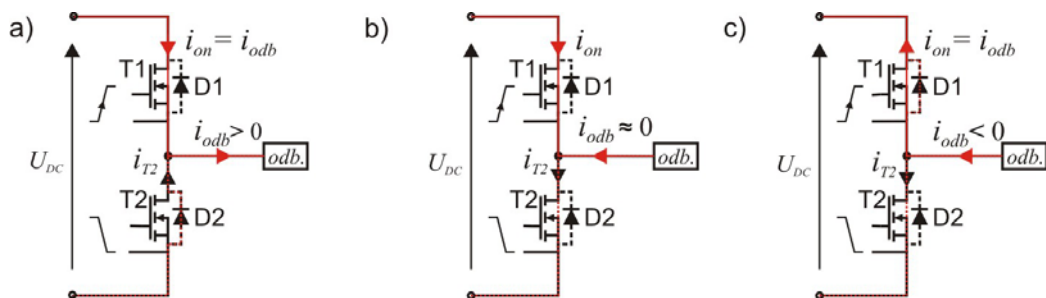
$$(1) E_{pocz} + E_{DC} = E_{kon} + E_{sw}$$

przy czym: E_{sw} – energia tracona w łączniku w wyniku procesów komutacyjnych.

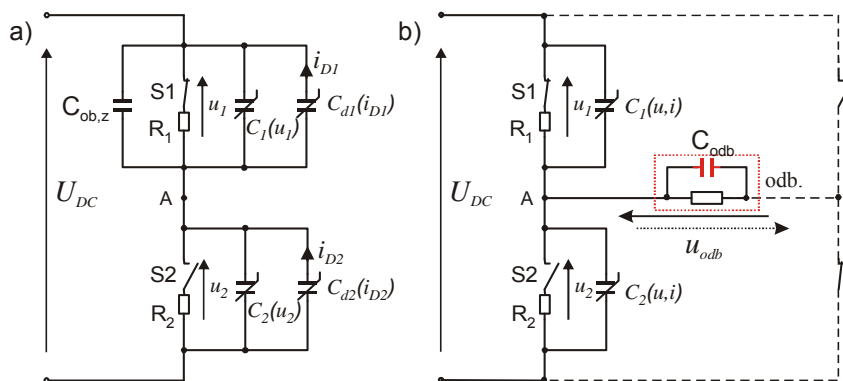
Wykorzystując ogólne zależności na energię w nieliniowej pojemności oraz na energię dostarczoną ze źródła o stałym napięciu U_{DC} , otrzymuje się:

$$(2) E_{sw} = \int_0^{U_{DC}} u_1 C_1(u) du + U_{DC} Q_{S2} - \int_0^{U_{DC}} u_2 C_2(u) du$$

gdzie: C_1, C_2 – zastępcze pojemności tranzystorów w łącznikach, Q_{S2} – ładunek zgromadzony w łączniku S_2 .



Rys. 3. Załączanie górnego tranzystora MOSFET w gałęzi dwułącznikowej: a) twarde załączenie prądu odbiornika; b) załączenie prądu o małej wartości; c) miękkie załączenie prądu odbiornika



Rys. 4. Gałąź z dwoma łącznikami złożonymi z tranzystorów MOSFET i diod zwrrotnych: a) schemat zastępczy gałęzi z uwzględnieniem pojemności pasozytnicznych łączników (twarde załączenie w łączniku S1); b) uproszczony schemat zastępczy układu mostkowego z pasozytniczą pojemnością odbiornika

Twarde załączanie tranzystorów MOSFET

W przypadku gałęzi dwułącznikowej współpracującej z elementem indukcyjnym (dławik, transformator) bezpośrednio przed twardym załączeniem tranzystora MOSFET przewodzi dioda zwrrotna łącznika komplementarnego. W schemacie zastępczym łącznika (rys. 4a) musi być zatem uwzględniona nieliniowa pojemność dyfuzyjna C_d , występująca w modelu dynamicznym diody typu PiN [6]. Pojemność ta wynika z właściwości złącza PN, polegającej na gromadzeniu ładunku przejściowego (wstecznego) Q_{rr} . Kompletny model gałęzi dwułącznikowej przyjęty do analizy twardego załączania tranzystora MOSFET w łączniku S1 przedstawiono na rysunku 4, przy czym na rysunku 4b dodatkowo uwzględniono pasozytniczą pojemność

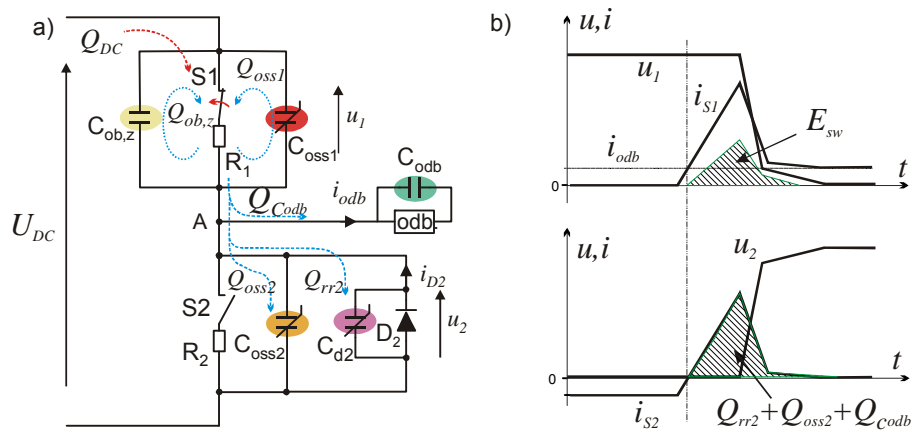
odbiornika indukcyjnego C_{odb} (np. pojemność międzyzwojową transformatorów, dławików itp. [7]).

Pojemności łączników S1 i S2 można przedstawić w postaci sum odpowiednio trzech i dwóch składników

$$(3) C_1(u, i) = C_{ob,z} + C_{oss1}(u) + C_{d1}(i),$$

$$(4) C_2(u, i) = C_{oss2}(u) + C_{d2}(i)$$

gdzie: $C_{ob,z}$ – pojemność pasozytnicza obudów tranzystorów MOSFET; C_{oss1} i C_{oss2} – nieliniowe pojemności wyjściowe tranzystorów MOSFET; C_d – nieliniowa pojemność dyfuzyjna diody, zależna od prądu diody.



Rys. 5. Twarde załączanie górnego tranzystora MOSFET: a) rozptył ładunku w gałęzi; b) przebiegi napięć i prądów w obydwu łącznikach podczas komutacji

Na rysunku 5 przedstawiono rozptył ładunku w gałęzi podczas załączania tranzystora górnego. Energia początkowa układu jest równa sumie energii zmagazynowanej w pojemnościach nieprzewodzącego łącznika S1, na którym występuje napięcie bliskie napięciu źródła zasilania U_{DC} , oraz energii w zastępczej pojemności odbiornika (E_{Codb}) tak, że

$$(5) E_{pocz} = E_{oss1} + E_{ob,z} + E_{Codb}$$

Po przełączeniu energia jest zmagazynowana w łączniku S2 oraz w pojemności odbiornika

$$(6) E_{kon} = E_{oss2} + E_{Codb}$$

Pojemność dyfuzyjna występuje tylko podczas przewodzenia diody zwrotnej łącznika, tzn. gdy napięcie na nim jest bliskie zero. Można zatem przyjąć, że energia zgromadzona w tej pojemności jest pomijalnie mała i nie musi być uwzględniana w równaniach (5) i (6).

Ładunek przepływający przez kanał górnego tranzystora wynosi

$$(7) Q_{S1} = Q_{ob,z} + Q_{oss1} + Q_{DC}$$

Energia dostarczona ze źródła w czasie komutacji jest związana z ładunkiem wynikającym z przeładowania pojemności łącznika dolnego (wyłączanego), w tym pojemności dyfuzyjnej diody D_2 oraz pojemności pasozytniczej odbiornika

$$(8) Q_{DC} = Q_{oss2} + Q_{rr2} + Q_{Codb}$$

Energia dostarczona ze źródła U_{DC} do układu może być wyrażona wzorem

$$(9) E_{DC} = Q_{DC} U_{DC} = (Q_{oss2} + Q_{rr2} + Q_{Codb}) U_{DC}$$

W topologii mostkowej napięcie na odbiorniku zmienia się od $-U_{DC}$ do $+U_{DC}$, a więc

$$(10) Q_{Codb} = \int_{-U_{DC}}^{+U_{DC}} C_{odb} du = 2C_{odb} U_{DC}$$

Wykorzystując zasadę zachowania energii, na podstawie wzoru (1), energię traconą przy przełączaniu można wyrazić zależnością

$$(11) E_{sw} = E_{oss1} + E_{ob,z} + (Q_{oss2} + Q_{rr2} + Q_{Codb}) U_{DC} - E_{oss2}$$

Przy założeniu identycznych parametrów zastosowanych łączników ($Q_{oss1} = Q_{oss2}$) oraz pomijając energię związaną z pojemnością obwodów (przy typowych przekładkach ceramicznych między łącznikami a radiatorem, pojemność $C_{ob,z}$ ma wartość rzędu kilkunastu pikofaradów tak, że energia $E_{ob,z}$ jest bardzo mała, zależność (11) upraszcza się do postaci

$$(12) E_{sw} = (Q_{oss2} + Q_{rr2} + Q_{Codb}) U_{DC} = E_{DC}$$

Z zależności (12) wynika, że energia tracona w procesie komutacji, w której prąd płynący dotychczas przez diodę jednego łącznika zaczyna płynąć przez kanał tranzystora łącznika komplementarnego (twarde załączanie tranzystora), zależy od ładunków gromadzonych w pasozytniczych pojemnościach tranzystora MOSFET i diody zwrotnej, które są odpowiednio funkcjami napięcia i prądu w gałęzi, a także pasozytniczej pojemności odbiornika. Sposób wyznaczenia tych wielkości, z wykorzystaniem danych katalogowych opisano w pracy [5].

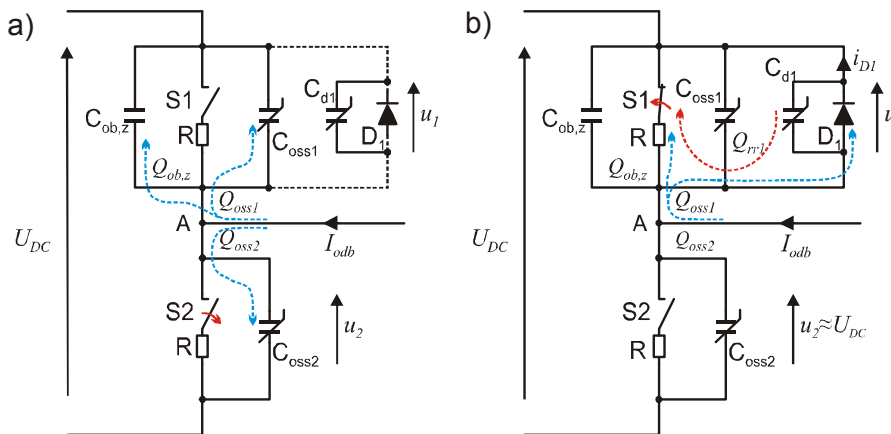
W zależności od typu tranzystora MOSFET, wartości napięcia zasilającego oraz rodzaju odbiornika, jeden ze składników wzoru (12) może dominować. W układach zasilanych napięciem powyżej 300 V, przy małych prądach załączania, decydującymi parametrami są ładunek i pojemność wyjściowa tranzystora, przy czym ze względu na jej nieliniowość nie jest ważna wartość tej pojemności $C_{oss}(U_{DC})$, ale charakter jej zmian, czyli przebieg funkcji $C_{oss} = f(u)$ wg charakterystyk katalogowych. Dużą rolę pełni również sposób wykonania odbiornika indukcyjnego (np. płaskie przewody uzwojeń i zastosowanie rdzenia planarnego znacznie zwiększają pasozytniczą pojemność uzwojeń, a tym samym ładunek Q_{Codb}). W przekształtniku, w którym występują duże wartości prądu załączanego, decydujące znaczenie ma ładunek wsteczny diody zwrotnej Q_{rr} . W takich przypadkach bardzo ważne jest zwrócenie uwagi na właściwości dynamiczne diod strukturalnych tranzystorów MOSFET lub nawet zastosowanie innej topologii łącznika, np. z diodami zwrotnymi Schottky'ego, których ładunek wsteczny jest pomijalny.

Miękkie załączanie tranzystorów MOSFET

Drugi typ komutacji występujący w gałęzi dwułącznikowej dotyczy procesu miękkiego załączania tranzystora, podczas którego straty energii mają bardzo małą wartość. Przypadek ten odpowiada załączeniu tranzystora przy niewielkim (bliskim zero) napięciu na łączniku, równym spadkowi napięcia na przewodzącej diodzie zwrotnej tego łącznika. Na rysunku 6 zilustrowano

proces, podczas którego ujemny prąd odbiornika (płynący od odbiornika do gałęzi tranzystorowej), płynący początkowo przez przez kanał tranzystora w łączniku S2 zostaje skierowany do łącznika S1, w którym w stan przewodzenia przechodzi najpierw dioda D1 a następnie tranzystor tak, że jego załączenie odbywa się przy napięciu bliskim zeru. Spełniony jest wówczas warunek

$$(13) |I_{odb}| \geq \frac{Q_{S1} + Q_{S2} + Q_{Codb}}{t_{dead}}$$



Rys. 6. Rozpływ ładunku w procesie miękkiego załączania łącznika S1: a) w chwili otwarcia łącznika S2; b) w chwili zamknięcia łącznika S1

Prąd odbiornika, spełniający warunek (13), jest w stanie przeładować pojemności pasozytnicze gałęzi oraz odbiornika w czasie nie dłuższym niż czas martwy, czyli przed chwilą załączenia tranzystora w łączniku S1. Napięcie na tym łączniku jest w chwili załączenia bardzo małe, co oznacza, że straty energii mają pomijalną wartość.

Załączanie tranzystorów przy niewielkim prądzie

Szczególnym przypadkiem w odniesieniu do procesu komutacji w gałęzi z tranzystorami MOSFET jest praca bez obciążenia (rys. 2) oraz przełączanie ujemnego prądu odbiornika o bardzo małej wartości (rys. 3b). W takich warunkach występują zwiększone straty energii związane z załączaniem tranzystora przy niezerowej wartości napięcia na łączniku, przy czym wartość traconej energii jest zawsze mniejsza od strat energii przy twardym załączeniu (w komutacji nie uczestniczy dioda zwrotna, a więc ładunek wsteczny jest równy zero). Analiza pracy tranzystorów MOSFET w tych przypadkach jest więc analogiczna jak w odniesieniu do procesu twardego załączania.

Przy pracy gałęzi bez prądu obciążenia, energia początkowa i końcowa zgromadzona w elementach układu jest określona zależnościami (5) i (6), natomiast energia dostarczona ze źródła (9) jest pomniejszona o składnik związany z ładunkiem wstecznym diody. Przy założeniach identycznych jak w przypadku zależności (12), energia tracona w procesie przełączania wyraża się wzorem

$$(14) E_{sw} = E_{DC} = (Q_{oss2} + Q_{Codb}) U_{DC}$$

W przypadku załączania ujemnego prądu o niewielkiej wartości, niespełniającej warunku (13), energia przed i po komutacji jest określona wzorami (5) i (6), natomiast ładunek dostarczany ze źródła U_{DC} jest pomniejszony o wartość wynikającą z ładunku odprowadzonego przez prąd odbiornika w czasie martwym. Stąd energia tracona w wyniku przełączania jest określona wzorem

gdzie I_{odb} – wartość prądu odbiornika w czasie trwania procesu komutacji, która ze względu na bardzo krótki czas martwy (< 200 ns) jest wartością stałą, $Q_{S1} = Q_{oss1} + Q_{ob,z}$ – całkowity ładunek zgromadzony w wyłączonym łączniku S1, $Q_{S2} = Q_{oss2}$ – całkowity ładunek potrzebny do naładowania pojemności łącznika S2, t_{dead} – czas martwy w gałęzi.

$$(15) E_{sw} = E_{DC} = (Q_{oss2} + Q_{rr2} + Q_{Codb} - I_{odb} t_{dead}) U_{DC}$$

Należy podkreślić, że przedstawiony opis dotyczy procesów łączeniowych w pojedynczej gałęzi układu o topologii mostkowej, w której napięcie na odbiorniku zmienia się o wartość $2U_{DC}$. W bezpośrednich sterownikach napięcia stałego napięcie na odbiorniku zmienia się od 0 do U_{DC} tak, że ładunek zgromadzony w pasozytniczej pojemności Q_{Codb} , określony równaniem (10), ma wartość dwukrotnie mniejszą.

Wnioski

W pracy przedstawiono opis matematyczny łączeniowych strat energii w wysokonapięciowych tranzystorach MOSFET, o znacznych pojemnościach pasozytniczych, będących przyczyną oscylacji przebiegów napięć i prądów łączników, co uniemożliwia dokładne określenie tych strat z wykorzystaniem opisu klasycznego. Analizie poddano łączniki pracujące w jednej gałęzi mostka dla różnych stanów dynamicznych: twardego i miękkiego załączania tranzystora oraz przy małym obciążeniu i przy braku obciążenia. Przedstawione zależności zostały wyznaczone z wykorzystaniem zasady zachowania ładunku i energii w układzie, co eliminuje niedoskonałości podejścia klasycznego. Uwzględnione w opisie pasozytnicze parametry obwodu są szczególnie istotne w układach wysokiej częstotliwości, w których straty łączeniowe stają się dominujące tak, że precyzyjne określenie ich wartości jest zadaniem kluczowym. Dokładność wyników uzyskanych na podstawie przedstawionego opisu jest uzależniona od dokładności wyznaczenia ładunku i energii gromadzonej w pojemnościach łączników, będących funkcjami silnie nieliniowymi, a także od dokładności określenia pozostałych pasozytniczych pojemności obwodu (w tym dość znacznych pojemności elementów magnetycznych).

Badania współfinansowane ze środków przeznaczonych na działalność statutową i rozwój młodych pracowników nauki Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej.

LITERATURA

- [1] Baliga B.J., *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*, Springer, New York, USA, 2008
- [2] Lutz J., Schlagenotto H., Scheuermann U., De Doncker R., *Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reliability*, Springer, Berlin, 2011
- [3] Xiong Y., Sun S., Jia H., Shea P., Shen Z.J., *New Physical Insights on Power MOSFET Switching Losses*, *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 24 Iss 2, 525-531, 2009
- [4] Kolar J.W. i inni, *Extreme efficiency power electronics*, *Proc. 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, Norymberga, 1-22, 2012
- [5] Grzejszczak P., Nowak M., Barlik R., *Analityczny opis nieliniowej pojemności wysokonapięciowych łączników energoelektronicznych przy wyznaczaniu strat energii*, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 90, no. 11, 74-77, 2014
- [6] Janke W., Łuczak S., *Elementy półprzewodnikowe*, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012
- [7] Massarini A., Kaźmierczuk M.P., *Self-capacitance of inductors*, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 4, 671 -676, 1997

Autorzy: dr inż. Piotr Grzejszczak, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, prof. dr hab. inż. Roman Barlik, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, E-mail: roman.barlik@ee.pw.edu.pl.