Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

Analityczny opis nieliniowej pojemności wysokonapięciowych łączników energoelektronicznych przy wyznaczaniu strat energii

Streszczenie. W pracy przedstawiono sposób analitycznego wyznaczania pojemności wysokonapięciowych tranzystorów MOSFET i diod Schottky'ego SiC, stosowanych w przekształtnikach wysokiej częstotliwości. Silna nieliniowość oraz trudności w pomiarach sprawiają, że zwykle wykorzystywane są wartości zastępcze tych pojemności, nieprowadzące do poprawnych obliczeń mocy strat łączeniowych. Zaproponowany sposób charakteryzowania pojemności prowadzi do uściślenia wyników, co zostało zweryfikowane w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych.

Abstract. The paper presents specific problems of analytic approach to determining capacitances of high-voltage MOSFET and Schottky diodes. Strong non-linearity of these capacitances leads to real problems in design calculations for high frequency converters because inadequate value of capacitance is taken into account. The proposed method of based on the approximation of data curves using an analytic function offers a significant improvement of calculation results. This has been verified with simulations and laboratory measurement test. (Analytical description of nonlinear capacitance of high-voltage power switches in estimating switching losses).

Słowa kluczowe: pojemności pasożytnicze łączników, łączeniowe straty mocy, tranzystory MOSFET, diody Schottky'ego SiC Keywords: nonlinear capacitance, MOSFET parasitic capacitances, switching losses, SiC Schottky diodes.

doi:10.12915/pe.2014.11.22

Wstęp

podzespołach Wyznaczanie strat mocy w przekształtnika, pracującego bardzo wysoka z częstotliwością przełączeń 100kHz)[1] jest (f_s) > zagadnieniem niełatwym. Szczególnie trudne jest prawidłowe oszacowanie łączeniowych strat energii w półprzewodnikowych. przyrządach W przypadku wysokonapięciowych tranzystorów MOSFET, energia tracona podczas przełączania jest ściśle związana z istnieniem w ich strukturze znacznych pojemności, które są silnie nieliniowe i zależne od napięcia dren-źródło [2]. Wysokonapięciowe diody Schottky'ego, mają bardzo małą pojemność dyfuzyjną (dlatego w zasadzie nie występuje w nich ładunek wsteczny Q_{rr}) ale cechują je znaczne pojemności złączowe, również zależne od napięcia. Na rvsunku 1 umieszczono schematy zastępcze tvch elementów, użyteczne przy opisie stanów dynamicznych.



Rys.1. Pojemności tranzystora MOSFET (a) i diody Schottky'ego (b) oraz schemat zastępczy łącznika w stanach dynamicznych (c)



Rys.2. Charakterystyki pojemności C_{oss} tranzystora typu CoolMOS i C_i diody Schottky'ego SiC

Zjawisko gromadzenia i oddawania znacznych ilości energii w pojemnościach powoduje, że klasyczne sposoby wyznaczania strat energii przy przełączaniu jak np. pomiary oscyloskopowe (test dwupulsowy) nie dają poprawnych wyników. Również przy eksperymentalnych pomiarach tych pojemności napotyka się na trudności, gdyż w dostępnych analizatorach impedancji stosowane są niskie napięcia [3]. Na rysunku 2 umieszczono przykładowe charakterystyki pojemności, określone na podstawie danych katalogowych dla typowych łączników wysokonapięciowych.

Łączeniowe straty energii

W przypadku łączników, o znacznych pojemnościach pasożytniczych, pracujących w układzie gałęzi (rys.3), energia E_{sw} , tracona w procesie przełączania, może być wyznaczona na podstawie bilansu energii w układzie

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

gdzie: E_{pocc} , E_{kon} – to odpowiednio energia zgromadzona w pojemnościach układu przed komutacją oraz po komutacji, E_{DC} – energia dostarczona ze źródła w czasie komutacji, E_{sw} – energia tracona w procesie przełączania.



Rys.3. Schemat zastępczy gałęzi dwułącznikowej z ilustracją procesu komutacji między łącznikami S1 i S2: a) przed komutacją, b) w trakcie komutacji, c) po komutacji

Do wyznaczenia energii E_c , zgromadzonej w nieliniowej pojemności $C_1 = C_2 = C$, można wykorzystać wzór

(2)
$$E_C = \int_0^{U_{DC}} uC(u) du$$

gdzie: U_{DC} – oznacza napięcie źródła zasilającego układ, C(u) – nieliniowa funkcja opisująca zależność pojemności

od napięcia, *u* – wartość chwilowa napięcia na kondensatorze.

Źródło U_{DC} , które w procesie przełączania dostarcza ładunek Q_{DC} , przekazuje do układu energię, która może być wyznaczona z definicji

(3)
$$E_{DC} = \int_{t_a}^{t_k} u dt$$

przy czym wartość chwilowa napięcia u jest stała i wynosi U_{DC} , a wartość chwilowa prądu i jest związana z ładunkiem Q_{DC} zależnością

(4)
$$Q_{DC} = Q_C = \int_t^t i dt$$

Biorąc pod uwagę (3) i (4) otrzymuje się

(5)
$$E_{DC} = \int_{t_p}^{t_k} uidt = U_{DC} \int_{t_p}^{t_k} idt = U_{DC} Q_{DC}$$

gdzie: t_{p, t_k} – oznacza czas rozpoczęcia i zakończenia procesu komutacji w gałęzi.

Wartość Q_{DC} , jest równa ładunkowi, który jest potrzebny do naładowania pojemności nieliniowej C(u)

(6)
$$Q_{DC} = \int_{0}^{U_{DC}} C(u) du$$

Do dokładnego wyznaczenia energii E_{sw} należałoby jeszcze uwzględnić w bilansie pozostałe pojemności pasożytnicze układu, jednak największe znaczenie mają pojemności łączników, dlatego ostatecznie dla układu z rysunku 3 możemy zapisać

(7)
$$E_{sw} = E_{poc} + E_{DC} - E_{kon} = E_{C1} + E_{DC} - E_{C2} = \int_{0}^{U_{DC}} u_1 C_1(u) du + U_{DC} Q_{DC} - \int_{0}^{U_{DC}} u_2 C_2(u) du$$

gdzie u_1, C_1 – oznacza napięcie i pojemność łącznika S1, u_2, C_2 – oznacza napięcie i pojemność łącznika S2.

Wynika stąd, że w celu wyznaczenia łączeniowych strat energii w układzie należy poprawnie wyznaczyć wartości ładunku Q_{DC} oraz energii E_{C1} i E_{C2} , zgromadzonych w nieliniowych pojemnościach łączników.

Wyznaczanie ładunku w nieliniowej pojemności pasożytniczej przy nieznanej funkcji C(u)

W przypadkach, w których producent umieścił w karcie katalogowej charakterystykę energii zmagazynowanej w pojemności łącznika $E_C(u)$, do wyznaczenia energii E_{sw} wystarczy określenie ładunku Q_{DC} , gdyż wartość energii E_C można odczytać z katalogu.

Zgodnie ze wzorem (6), ładunek potrzebny do naładowania pojemności nieliniowej można wyznaczyć z powierzchni pola pod wykresem charakterystyki C(u). Wybierając kilka punktów z charakterystyki katalogowej pojemności, które pozwolą ją w miarę dokładnie aproksymować, oraz wykorzystując oprogramowanie komputerowe z możliwością analizy funkcji matematycznych (*Matlab*, *Graph* itp.) możliwe jest wyznaczenie ładunku Q_C dla dowolnej wartości napięcia (rys.4).



Rys.4. Wyznaczanie ładunku nieliniowej pojemności tranzystora MOSFET w programie *Graph*, na podstawie dyskretnych wartości charakterystyki katalogowej C(u)

Niestety w większości przypadków producent nie podaje w katalogu informacji na temat energii $E_C(u)$, której wyznaczenie, zgodnie z (2) wymaga określenia postaci analitycznej funkcji C(u).

Wyznaczanie ładunku i energii w nieliniowej pojemności pasożytniczej przy znanej funkcji C(u)

W literaturze [2] najczęściej postać analityczną funkcji C(u) określa się równaniem (8), które wynika ze wzoru określającego pojemność idealnego złącza pn, tzn.

(8)
$$C(u) = C(U_{kat}) \cdot \sqrt{\frac{U_{kat}}{u}}$$

gdzie: $C(U_{kat})$ – pojemność zdefiniowana w katalogu dla napięcia o wartości U_{kat} .

Wykorzystanie wzoru (8) do aproksymacji silnie nieliniowych charakterystyk pojemności tranzystorów MOSFET powoduje, że otrzymane wyniki ładunku i energii są obarczone dużym błędem.



Rys.5. Wyniki aproksymacji katalogowej charakterystyki pojemności wyjściowej tranzystora CoolMOS funkcjami o różnej postaci analitycznej (wg zależności (8) i (9))

Do określenia dokładniejszej postaci analitycznej, konieczne jest użycie bardziej złożonej funkcji matematycznej. W tym celu ponownie można wykorzystać odpowiednie oprogramowanie komputerowe, które na podstawie dyskretnych punktów z charakterystyki katalogowej, wyznacza tzw. linię trendu, opartą na wybranej rodzinie funkcji matematycznych. W większości przypadków konieczne jest wykonywanie tych operacji w kilu etapach, dzieląc charakterystykę katalogową na przedziały i wyznaczając linie trendu osobno dla każdego z nich. W ten sposób można uzyskać bardzo dokładne wyniki, czego przykładem jest rysunek 5. Dla charakterystyki pojemności $C_{oss}(u)$ tranzystora CoolMOS z rysunku 2, wysoką dokładność uzyskano stosując wzór

(9)
$$C_{oss}(u) = 124 \cdot 0,948 \cdot exp(u) + 11 \text{ [pF]}$$

Nieco łatwiej znaleźć analityczną postać pojemności złączowej diody Schottky'ego, której kształt jest bardziej zbliżony do pojemności idealnego złącza pn, dzięki czemu dobrą dokładność uzyskuje się wykorzystując zależność (8). Pojemność C_j diody Schottky'ego przedstawionej na rysunku 2, dobrze opisuje wzór

(10)
$$C_j(u) = 130 \cdot \sqrt{\frac{100}{u}} + 0.05 \cdot u \text{ [pF]}$$

Znając postaci analityczne (9) i (10), opisujące pojemności pasożytnicze łączników, możliwe jest określenie wartości ładunku i energii gromadzonych w tych pojemnościach dla dowolnego napięcia.

W celu weryfikacji wyników otrzymanych na podstawie wzorów analitycznych, na rysunku 6 umieszczono wykresy energii $E_{oss}(u)$ zgromadzonej w pojemności C_{oss} tranzystora IPW60R070C6, podawanej w katalogu [5] i otrzymanej w wyniku obliczeń dla aproksymacji funkcją uproszczoną (8) i funkcją (9), wyprowadzoną zgodnie z powyższym opisem. Potwierdzają one bardzo dokładne odwzorowanie charakterystyki katalogowej po zastosowaniu funkcji (9) i jednocześnie pokazują różnice ро zastosowaniu nieprawidłowej aproksymacji pojemności wyjściowej tranzystora z zastosowaniem zależności (8).



Rys.6. Porównanie wykresów energii $E_{\rm oss}$ uzyskanej analitycznie (dla pojemności opisanej wzorem (8) i (9)) i podawanej w katalogu tranzystora CoolMOS IPW60R070C6

Na podstawie zależności analitycznych opisujących pojemność łącznika, wygodnie jest wyznaczyć charakterystyki pojemności zastępczej związanej z ładunkiem C_Q (11) oraz pojemności zastępczej związanej z energią zmagazynowaną C_E (12), dzięki którym do wyznaczania strat energii E_{sw} (7), można zastosować wzory uproszczone, dla stałych (liniowych) wartości pojemności (13)[4]. Charakterystyki takie umieszczono na rysunku 7, dla tranzystora CoolMOS i rysunku 8, dla diody Schottky'ego z węglika krzemu.

(11)
$$C_Q(U) = \frac{Q(U)}{U}$$

gdzie: Q(U) – ładunek gromadzony w pojemności nieliniowej dla danej wartości napięcia U.

(12)
$$C_E(U) = \frac{2E_C(U)}{U^2}$$

gdzie: $E_C(U)$ – energia zmagazynowana w nieliniowej pojemności dla danej wartości napięcia U.

(13)
$$E_{sw} = \frac{C_{EI}U_{DC}^2}{2} + C_{Q2}U_{DC}^2 - \frac{C_{E2}U_{DC}^2}{2}$$

gdzie: C_{EI} , C_{E2} – zastępcze pojemności związane z energią zmagazynowaną łącznika S1 i S2, dla napięcia U_{DC} , C_{Q2} – zastępcza pojemność związana z ładunkiem łącznika S2 dla napięcia U_{DC} .



Rys.7. Charakterystyki zastępczej pojemności dla tranzystora typu CoolMOS (IPW60R070C6)



Rys.8. Charakterystyki zastępczej pojemności dla diody typu Schottky z węglika krzemu (C3D20060D)

Badania symulacyjne

Dla porównania, zastępczą pojemność C_Q wyznaczono w badaniach symulacyjnych wykonanych w programie *Pspice*. Do badań przyjęto bardzo dokładne modele łączników, które zostały pobrane ze stron producentów (Infineon [7] i CREE [8]). Badania symulacyjne były przeprowadzane w układzie nieobciążonej gałęzi dwutranzystorowej (rys.9a) oraz gałęzi z tranzystorem i diodą SiC (rys.9b), zasilanej ze źródła napięcia stałego.



Rys.9. Schemat układu do wyznaczania zastępczej pojemności tranzystora MOSFET (a) i diody SiC (b) w programie *Pspice*

Badania symulacyjne polegały na pomiarze ładunku dostarczanego ze źródła napięcia podczas komutacji w gałęzi. Zgodnie z wzorem (6) ładunek ten wynika z wartości pojemności tranzystora wyłączanego przy danym napięciu U_{DC} . Wykonując testy przy napięciach zmieniających się od zera do 600V wyznaczono pojemność zastępczą odpowiadającą ładunkowi dostarczonemu do tranzystora oraz

energię zmagazynowaną w pojemności tranzystora, wykorzystując pomiar energii tranzystora przed i po wyłączeniu.

Wyniki symulacji przedstawiono w formie wykresu pojemności zastępczej C_Q dla tranzystora (rys.10) i ładunku Q_i dla diody SiC (rys.11).



Rys.10. Porównanie charakterystyk zastępczej pojemności C_Q tranzystora MOSFET, wyznaczonych z danych katalogowych, obliczeń analitycznych i z badań symulacyjnych



Rys.11. Porównanie charakterystyk zastępczej pojemności C_Q diody Schottky'ego wyznaczonych z danych katalogowych, obliczeń analitycznych i z badań symulacyjnych

Weryfikacja wyników analitycznych

Dla tranzystora MOSFET wykonano dodatkowo badania na stanowisku eksperymentalnym. Do wyznaczenia zastępczej pojemności C_Q wykorzystano układ pomiarowy z rysunku 12a. W czasie przełączenia w gałęzi mierzono wartość prądu i na tej podstawie wyznaczano ładunek potrzebny do naładowania pojemności wyjściowej tranzystora przy danym napięciu. Jak wynika z oscylogramu (rys.12b) impulsy prądu w stanie dynamicznym są stosunkowo duże i bardzo szybkie (ok.30ns), dlatego do pomiaru należy wykorzystać sondę prądową o możliwie dużym paśmie przenoszenia.



Rys.12. Schemat układu (a) i oscylogram prezentujący sposób pomiaru ładunku wyjściowego tranzystora na stanowisku eksperymentalnym (b)

Na podstawie tych pomiarów wyznaczono zastępczą pojemność C_Q wynikającą z wartości zmierzonego ładunku i napięcia zasilającego (11). Otrzymane wyniki zostały porównane z wynikami obliczeń (rys.13). Widoczne niewielkie różnice przy małych wartości napięcia U_{DC} mogą być spowodowane niedokładnością użytej do pomiarów prądu sondy z cewką Rogowskiego (CWT).





Wnioski

W pracy przedstawiono analityczny opis strat energii łączników wysokonapięciowych (tranzystorów MOSFET i Schottky'ego diod SiC) o znacznych wartościach Zaproponowane pojemności złaczowej. rozwiazanie umożliwia dokładne określenie wartości ładunku i energii pojemności. zgromadzonej Zastosowanie w tei aproksymacji charakterystyk C(u) za pomocą złożonej funkcji matematycznej, pozwala obliczyć parametry ładunku energii, przy zachowaniu dużej dokładności. Na przykładzie tranzystora MOSFET oraz diody Schottky'ego z węglika krzemu zweryfikowano opis analityczny w badaniach symulacyjnych w programie Pspice, przy użyciu wiarygodnych modeli łączników ze stron producentów. Dodatkowo w przypadku tranzystora wykonano pomiary na stanowisku laboratoryjnym, które potwierdziły dokładność uzyskanych wyników (rys.14).



Rys.14. Porównanie wyników obliczeń ładunku i strat energii (z wykorzystaniem wzorów analitycznych (8) i (9)) z wynikami pomiarów eksperymentalnych tranzystora MOSFET dla 300V

LITERATURA

- Rąbkowski J., Peftitsis D., Nee H.-P., "Parallel-Operation of Discrete SiC BJTs in a 6-kW/250-kHz DC/DC Boost Converter," *IEEE Trans. on Power Electron.*, 29 (2014), n. 5, 2482-2491
- [2] Kolar J. W. i inni, "Extreme efficiency power electronics," in Proc. of the 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, (2012), 1-22
- [3] Kakitani H., Takeda R., "Selecting the Best Power device for Power electronics circuit design through gate charge characterization," *Bodo's Power Systems*, (2014) n. 5, 55-59
- [4] Krismer F., "Modeling and Optimization of Bidirectional Dual Active Bridge DC–DC Converter Topologies," *ETH Zurich, PHD Thesis*, 2011.
- [5] Infineon, Nota katalogowa tranzystora MOSFET CoolMOS IPW60R070C6, rev. 2.1, (2010)
- [6] CREE, Nota katalogowa diody Schottky'ego z węglika krzemu C3D20060D, (2010)

Autorzy: mgr inż. Piotr Grzejszczak, dr inż. Mieczysław Nowak, prof. dr hab. Roman Barlik, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa e-mail<u>piotr.grzejszczak@ee.pw.edu.pl</u>