

# Analityczny opis nieliniowej pojemności wysokonapięciowych łączników energoelektronicznych przy wyznaczaniu strat energii

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono sposób analitycznego wyznaczania pojemności wysokonapięciowych tranzystorów MOSFET i diody 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.

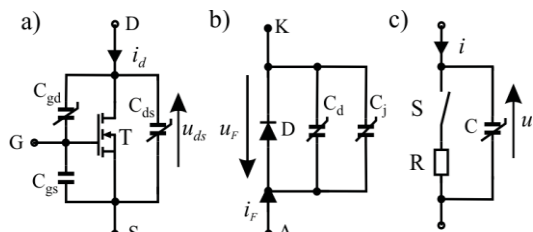
**Abstract.** The paper presents specific problems of analytic approach to determining capacitances of high-voltage MOSFET and Schottky diodes. Strong non-linearity of these capacitances leads to real problems in design calculations for high frequency converters because inadequate value of capacitance 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.

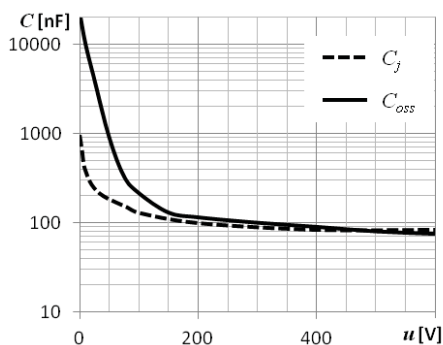
doi:10.12915/pe.2014.11.22

## Wstęp

Wyznaczanie strat mocy w podzespołach przekształtnika, pracującego z bardzo wysoką częstotliwością przełączeń ( $f_s > 100\text{kHz}$ ) [1] jest zagadnieniem niełatwym. Szczególnie trudne jest prawidłowe oszacowanie łączeniowych strat energii w przyrządach półprzewodnikowych. 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 złączone, również zależne od napięcia. Na rysunku 1 umieszczono schematy zastępcze tych 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  $C_j$  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

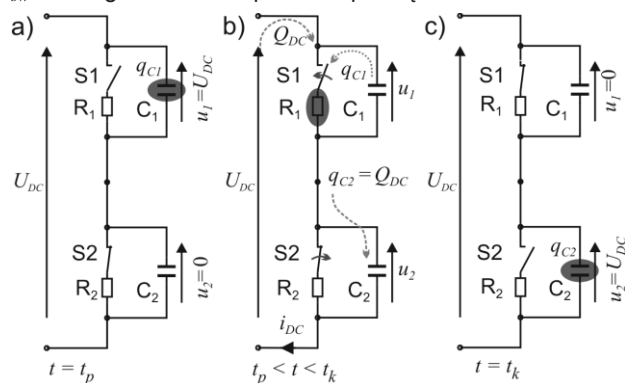
oscylskopowe (test dwupulsowy) nie dają poprawnych wyników. Również przy eksperymentalnych pomiarach tych pojemności napotyka się na trudności, gdyż w dostępnych analizatorach impedancji stosowane są niskie napięcia [3]. Na rysunku 2 umieszczono przykładowe charakterystyki pojemności, określone na podstawie 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

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

gdzie:  $E_{pocz}$ ,  $E_{kon}$  – 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

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

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

$$(3) \quad E_{DC} = \int_{t_p}^{t_k} u i dt$$

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

$$(4) \quad Q_{DC} = Q_C = \int_{t_p}^{t_k} i dt$$

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

$$(5) \quad E_{DC} = \int_{t_p}^{t_k} u i dt = U_{DC} \int_{t_p}^{t_k} i dt = U_{DC} Q_{DC}$$

gdzie:  $t_p$ ,  $t_k$  – oznaczają czas rozpoczęcia i zakończenia procesu komutacji w gałęzi.

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

$$(6) \quad Q_{DC} = \int_0^{U_{DC}} C(u) du$$

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

$$(7) \quad \begin{aligned} E_{sw} &= E_{poc} + E_{DC} - E_{kon} = E_{C1} + E_{DC} - E_{C2} = \\ &= \int_0^{U_{DC}} u_1 C_1(u) du + U_{DC} Q_{DC} - \int_0^{U_{DC}} u_2 C_2(u) du \end{aligned}$$

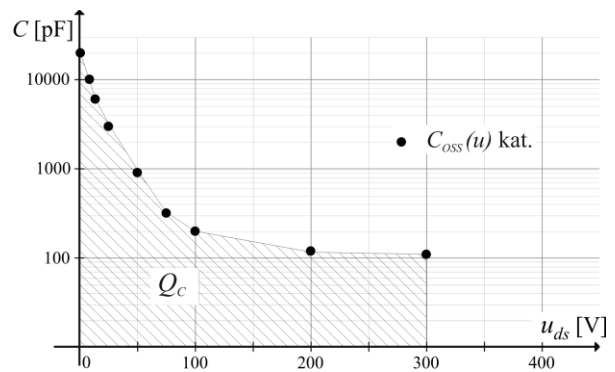
gdzie  $u_1, C_1$  – oznacza napięcie i pojemność łącznika S1,  $u_2, C_2$  – oznacza napięcie i pojemność łącznika S2.

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 pasytywnej przy nieznannej 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  $C(u)$ .

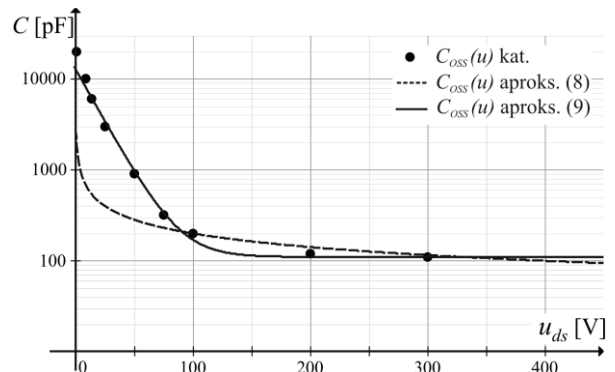
### Wyznaczanie ładunku i energii w nieliniowej pojemności pasytywnej przy znanej funkcji $C(u)$

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

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

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 obciążone dużym błędem.



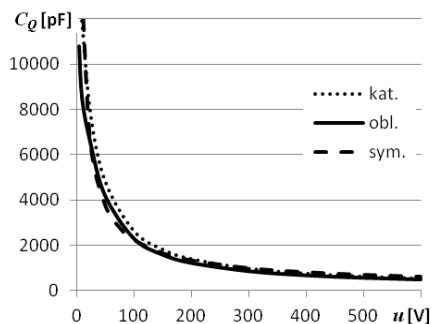
Rys.5. Wyniki aproksymacji katalogowej charakterystyki pojemności wyjściowej tranzystora CoolMOS funkcjami o różnej postaci analitycznej (wg zależności (8) i (9))

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 kilku 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.

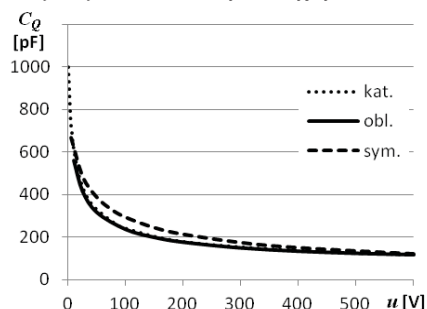


energię zmagazynowaną w pojemności tranzystora, wykorzystując pomiar energii tranzystora przed i po wyłączeniu.

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



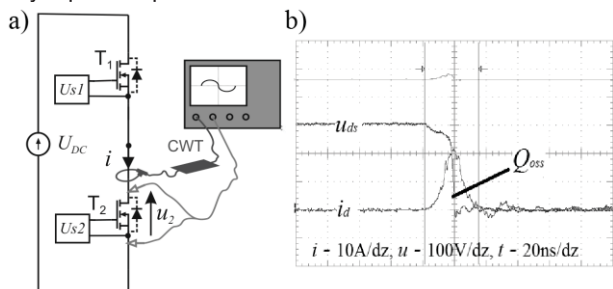
Rys.10. Porównanie charakterystyk zastępczej pojemności  $C_Q$  tranzystora MOSFET, wyznaczonych z danych katalogowych, obliczeń analitycznych i z badań symulacyjnych



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

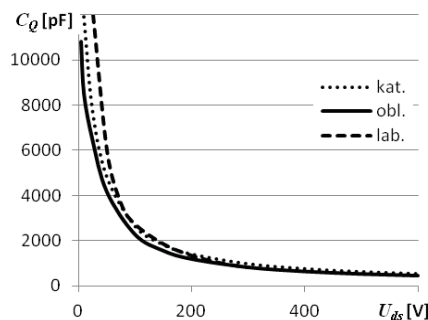
### Weryfikacja wyników analitycznych

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)

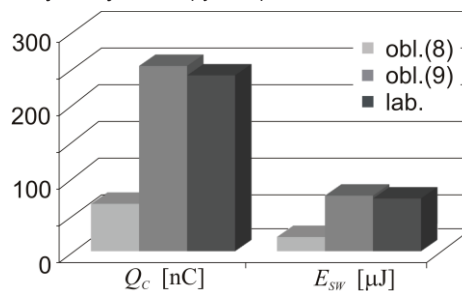
Na podstawie tych pomiarów wyznaczono zastępczą pojemność  $C_Q$  wynikającą z wartości zmierzonego ładunku i napięcia zasilającego (11). Otrzymane wyniki zostały porównane z wynikami obliczeń (rys.13). Widoczne niewielkie różnice przy małych wartościach napięcia  $U_{DS}$  mogą być spowodowane niedokładnością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



Rys.13. Porównanie charakterystyk zastępczej pojemności  $C_Q$  tranzystora, otrzymanych na podstawie danych katalogowych, obliczeń analitycznych i badań eksperymentalnych

### Wnioski

W pracy przedstawiono analityczny opis strat energii łączników wysokonapięciowych (tranzystorów MOSFET i diod Schottky'ego SiC) o znacznych wartościach pojemności złączonej. Zaproponowane rozwiązanie umożliwia dokładne określenie wartości ładunku i energii zgromadzonej w tej pojemności. Zastosowanie aproksymacji charakterystyk  $C(u)$  za pomocą złożonej funkcji matematycznej, pozwala obliczyć parametry ładunku i energii, przy zachowaniu dużej dokładności. Na przykładzie tranzystora MOSFET oraz diody Schottky'ego z węgla krzemowego 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

- [1] Rąbkowski J., Pefititsis 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 węgla krzemowego 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: [piotr.grzejszczak@ee.pw.edu.pl](mailto:piotr.grzejszczak@ee.pw.edu.pl)