

doi:10.15199/48.2025.02.21

## Analiza strat przekształtnika napięcia z tranzystorami SiC MOSFET

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono analizę strat przełączeniowych w przekształtnikach energoelektronicznych z tranzystorami SiC MOSFET. Omówiono wpływ częstotliwości przełączania na generowanie ciepła oraz metody ograniczania strat, takie jak stosowanie gasików, optymalizacja sterowników bramkowych i wykorzystanie zaawansowanych technologii materiałowych (SiC, GaN). Badania teoretyczne i praktyczne wskazują na korzyści z wykorzystania symulacji komputerowych w projektowaniu przekształtników.

**Abstract:** The paper presents an analysis of switching losses in power electronic converters with SiC MOSFET transistors. The influence of switching frequency on heat generation and methods of reducing losses, such as the application of snubbers, gate driver optimization and the use of advanced material technologies (SiC, GaN) are discussed. Theoretical and practical studies indicate the benefits of using computer simulations in the design of power inverters. (**Loss analysis of a voltage inverter with SiC MOSFET transistors**)

**Słowa kluczowe:** model symulacyjny, przekształtnik, straty mocy, tranzystor SiC MOSFET

**Keywords:** simulation model, power converter, power losses, SiC MOSFET transistor

### Wstęp

Niniejszy artykuł naukowy koncentruje się na analizie modelu symulacyjnego oraz rzeczywistego strat przełączeniowych w bloku mocy przekształtnika energoelektronicznego skonstruowanego z wykorzystaniem dyskretnych komponentów w technologii węgla krzemu (SiC). W przekształtnikach tego typu jednym z głównych źródeł strat jest generowanie ciepła wynikające z oporu wewnętrznego elementów takich jak tranzystory, diody i cewki [1], [3], [4], [5], [6]. Dodatkowe straty mogą wynikać z dielektrycznych właściwości kondensatorów, zjawisk magnetycznych w cewkach oraz z efektów działania transformatorów. Szczególna uwaga została poświęcona stratom w tranzystorach mocy, które są kluczowymi komponentami w omawianym bloku mocy. Przekształtniki stosowane przemysłowo zazwyczaj pracują z częstotliwościami przełączania nieprzekraczającymi kilkunastu kiloherców, co jest wynikiem balansu między redukcją strat, a limitami technologicznymi poszczególnych elementów składowych, takich jak tranzystory mocy czy sterowniki odpowiedzialne za ich obsługę.

Zwiększenie częstotliwości pracy kluczy tranzystorowych powoduje zwiększenie strat przełączeniowych, które są odprowadzane w postaci ciepła przez radiator. Z kolei praca przy zbyt niskiej częstotliwości przełączania kluczy tranzystorowych (kilka kiloherców) wpływa na komfort obsługi układu elektromechanicznego ze względu na charakterystyczny dźwięk, który jest związany z pracą przekształtnika. Dodatkowo niska częstotliwość pracy wpływa negatywnie na kształt prądów fazowych, które są bardziej odkształcone oraz na generowanie zakłóceń elektromagnetycznych.

W praktyce, ze względu na ograniczenia sterowników, częstotliwość pracy tranzystorów jest ograniczona do 20 kHz. Istnieją różne sposoby zmniejszania strat w przekształtnikach energoelektronicznych. Jednym ze sposobów jest wykorzystanie bardziej efektywnych elementów półprzewodnikowych. Rozwiązanie to postanowiono zawrzeć w niniejszej pracy.

Straty w tranzystorach oraz można podzielić na:

- straty występujące podczas przewodzenia tranzystora,
- straty występujące podczas przełączania się tranzystora ze stanu przewodzenia (lub nieprzewodzenia) do stanu nieprzewodzenia (lub przewodzenia),

- straty blokowania,
- straty przewodzenia diody zawartej w strukturze tranzystora.

Straty związane z przewodzeniem tranzystora występują, gdy tranzystor jest w stanie włączonym i przepływa przez niego prąd. Straty te wynikają z rezystancji kanału tranzystora  $R_{DS\_ON}$ , co powoduje rozpraszanie mocy i generowanie ciepła, które zazwyczaj wypromieniowuje przez radiator, do którego przymocowany jest tranzystor. Brak odpowiedniego radiatora prowadzi do szybkiego uszkodzenia tranzystora, gdyż nie jest on w stanie odprowadzić ciepła wygenerowanego przy przepływie dużych prądów.

Straty związane z przełączaniem się tranzystora zwane stratami przełączeniowymi występują, gdy tranzystor przełącza się ze stanu wyłączonego (nieprzewodzącego) do stanu włączonego (przewodzącego) lub odwrotnie. Straty przełączeniowe są przyczyną różnych negatywnych efektów w tranzystorach mocy. Powodują rozpraszanie energii w postaci ciepła, co zmniejsza ogólną wydajność obwodu. Ta nieefektywność może doprowadzić do sytuacji, w której obwód zużywa więcej energii i generuje więcej ciepła, co skutkuje zmniejszoną niezawodnością systemu i zwiększonymi wymaganiami dotyczącymi chłodzenia. Straty przełączeniowe mogą prowadzić do wzrostu temperatury tranzystora i otaczających go komponentów, co może skrócić żywotność obwodu i zwiększyć ryzyko awarii bloku mocy przekształtnika. Straty przełączeniowe mogą generować szumy o wysokiej częstotliwości, które zakłócają pracę innych elementów elektronicznych oraz obwodów w systemie. Takie zakłócenia mogą prowadzić do awarii lub obniżenia wydajności, co wpływa na niezawodność systemu energoelektronicznego. Aby zminimalizować skutki strat przełączeniowych, projektanci muszą wprowadzać dodatkowe komponenty lub stosować zaawansowane strategie sterowania, co zwiększa koszty i złożoność układu. Kluczowe znaczenie mają również czasy włączenia i wyłączenia tranzystora, które powinny być możliwie najkrótsze, aby ograniczyć straty przełączeniowe. Częstotliwość przełączania tranzystora również wpływa na straty przełączeniowe. Im większa częstotliwość przełączania tranzystora tym większe straty. Wyższe częstotliwości wymagają szybszych czasów przełączania, co powoduje zwiększone straty powstałe z powodu rozpraszania energii podczas każdego przełączenia. To z kolei prowadzi do konieczności bardziej efektywnego

chłodzenia oraz wdrożenia zaawansowanych technik ograniczających zakłócenia elektromagnetyczne. Charakterystyka obciążenia obwodu, taka jak pojemność i indukcyjność wyjściowa, może mieć wpływ na straty przełączeniowe w tranzystorze. Pojemność może magazynować energię podczas procesu przełączania, co może prowadzić do większych strat, podczas gdy indukcyjność może wytwarzać skoki napięcia, które nie tylko wpływają na straty, ale mogą również uszkodzić tranzystor mocy. Wewnętrzne właściwości tranzystora, takie jak jego pojemność, rezystancja bramki i napięcie znamionowe, mogą również wpływać na straty przełączeniowe. Wyższe pojemności lub rezystancja bramki mogą zwiększać straty przełączeniowe, podczas gdy niższe napięcie znamionowe może ograniczać maksymalną częstotliwość roboczą tranzystora. Niewłaściwie zaprojektowany obwód z tranzystorem mocy może również mieć negatywny wpływ na straty przełączeniowe poprzez zwiększenie np.: pojemności pasożytniczych [2]. Złe zaprojektowany układ chłodzenia może wpłynąć na straty przełączeniowe, gdyż rosną one wraz ze wzrostem temperatury [10].

Istnieje kilka sposobów, które pozwalają na ograniczenie strat przełączeniowych. Jedną z nich jest stosowanie dedykowanych gasek składających się z elementów pasywnych (diody, rezystor i kondensator) dołączonych do drenu i źródła tranzystora. Wartości rezystancji i pojemności elementów pasywnych muszą być obliczone dla danej częstotliwości pracy tranzystora mocy. Gaseki pomagają w tłumieniu szpilek napięcia, które pojawiają się w obwodach zawierających indukcyjność. Dodatkowo optymalizacja sterownika bramkowego również wpływa na straty przełączeniowe. Szybkie włączanie i wyłączanie tranzystora mocy zmniejsza straty przełączeniowe. Często sterowniki bramkowe podczas wyłączenia tranzystora podają na jego bramkę ujemne napięcie  $V_{GS}$  (standardowo -5 V). Stosowanie zaawansowanych technologicznie typów tranzystorów z węglikiem krzemu (SiC) lub azotkiem galu (GaN) zamiast tradycyjnych tranzystorów na bazie krzemu, może skutkować niższymi stratami przełączeniowymi ze względu na ich lepsze właściwości materiałowe. Prawidłowe zaprojektowanie obwodów mocy od obwodów sterujących oraz stosowanie możliwie jak najkrótszych ścieżek zapewnia zminimalizowanie strat przełączeniowych. Zastosowanie zaawansowanych technik sterowania może zoptymalizować zachowanie przełączania i zmniejszyć straty w obwodach opartych na tranzystorach mocy. Wykonanie właściwej konstrukcji radiatora i zastosowanie np.: wymuszonego chłodzenia poprzez wentylatory pomaga utrzymać niższe temperatury złączy w tranzystorach, zmniejszając wpływ strat przełączeniowych. Straty mocy w jakimkolwiek półprzewodniku są spowodowane kombinacją strat przełączania, strat przewodzenia, strat blokowania, strat przewodzenia diody i strat w sterowniku tranzystora. Zazwyczaj w obliczeniach większość strat jest zaniedbywana. Straty podczas przełączania są brane pod uwagę w przypadku, gdy klucz tranzystorowy wymaga specjalistycznego sterownika, który jest niezbędny do przeładowania dużych pojemności bramkowych klucza, podczas gdy straty przewodzenia występują podczas przewodzenia przełącznika.

### Budowa modeli symulacyjnych

Modele symulacyjne powstały na podstawie modeli matematycznych. Elementem obciążającym blok mocy falownika napięcia jest bezszczotkowy silnik prądu stałego zasilany poprzez falownik, który umożliwia wykorzystanie w pełni właściwości układu elektromechanicznego. Model

bezczotkowego silnika prądu stałego składa się z części elektrycznej oraz części mechanicznej. Dodatkowo w skład układu napędowego wchodzi model symulacyjny falownika napięcia. Część elektryczną oraz mechaniczną bezszczotkowego silnika prądu stałego opisują następujące równania [11]:

$$(1) \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3L_s} (2u_{ab} + u_{bc} - 3R_s i_a + \lambda p \omega_m (-2\Phi'_a + \Phi'_b + \Phi'_c))$$

$$(2) \frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3L_s} (-u_{ab} + u_{bc} - 3R_s i_a + \lambda p \omega_m (\Phi'_a - 2\Phi'_b + \Phi'_c))$$

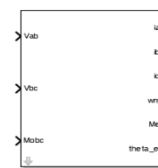
$$(3) \frac{di_c}{dt} = -\left(\frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt}\right)$$

$$(4) M_e = p\lambda(\Phi'_a i_a + \Phi'_b i_b + \Phi'_c i_c)$$

$$(5) \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_{obc} - B \cdot \omega_m)$$

$$(6) P_{Cat.} = P_{Przd} + P_{Przew} + P_{Wyt} \cong P_{Przd} + P_{Przew}$$

gdzie:  $i_a, i_b, i_c$  - prądy fazowe silnika;  $u_{ab}, u_{bc}$  - napięcia międzyfazowe zasilające silnik;  $L_s$  - indukcyjność uzwojeń stojana;  $R_s$  - rezystancja uzwojeń stojana;  $\lambda$  - amplituda strumienia magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych wirnika;  $p$  - liczba par biegunów;  $M_e$  - moment elektromagnetyczny rozwijany przez silnik;  $\Phi'_a, \Phi'_b, \Phi'_c$  - są to funkcje położenia kąтового wirnika  $\Theta_m$  określające kształt sił przeciwelektromotorycznych indukowanych w pasmach uzwojeń fazowych silnika.

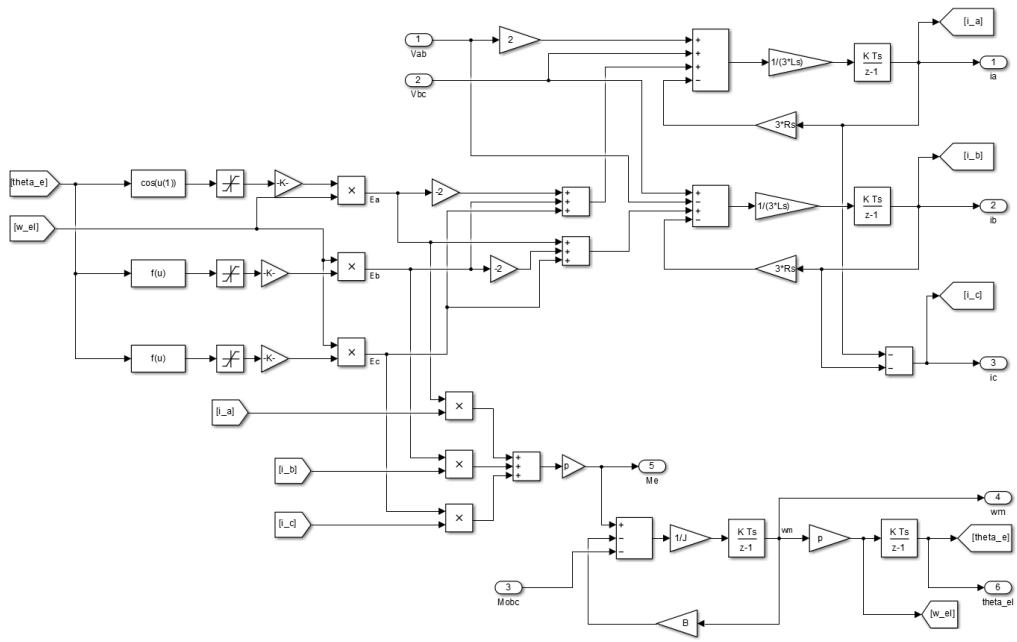


Rys. 1. Model symulacyjny silnika BLDC

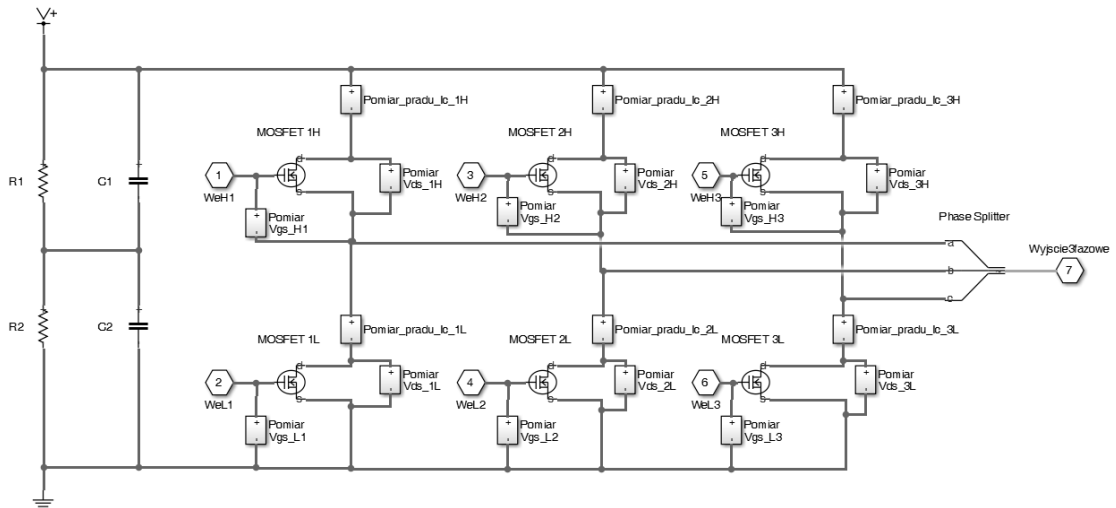
### Badania

Badania przedstawione w artykule obejmują dwuetapowe podejście do analizy strat przełączeniowych w przekształtniku energoelektronicznym. Pierwszy etap badań wykorzystuje symulację komputerową, za pomocą której modelowane są zachowania przekształtnika i analizowane są straty. Symulacje te realizowane są przy użyciu programu Matlab SIMULINK, który pozwala na precyzyjne odwzorowanie dynamiki bloku mocy. Model symulacyjny zawiera sześć tranzystorów rozmieszczonych w trzech gałęziach, gdzie każda gałąź składa się z dwóch tranzystorów. Kluczowe jest tutaj mierzenie spadku napięcia na tranzystorze ( $V_{DS}$ ) oraz prądu ( $I_D$ ) płynącego przez tranzystor, przy czym pomiary te muszą być synchronizowane z sygnałami sterującymi, aby zapewnić dokładność wyników.

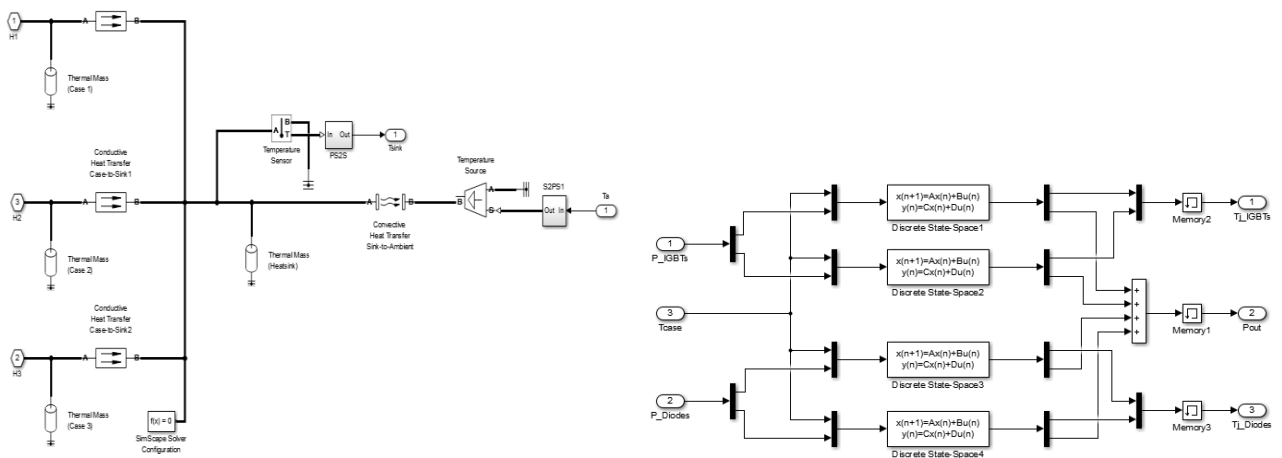
W rzeczywistym przekształtniku pomiar strat wykonano z wykorzystaniem oscyloskopu, który został zsynchronizowany z sygnałem sterującym badanego tranzystora. Wykorzystano pomiar prądu  $I_D$  oraz spadek napięcia  $V_{DS}$  na badanym tranzystorze. Przekształtnik wykorzystuje hallotrony do sterowania pracą bezszczotkowego silnika prądu stałego. Częstotliwość pracy przekształtnika ze względu na ograniczenia sterowników przełączających klucze tranzystorowe ustawiono na wartość 20 kHz.



Rys. 2. Model symulacyjny silnika BLDC utworzony z wykorzystaniem zależności (1) - (4)



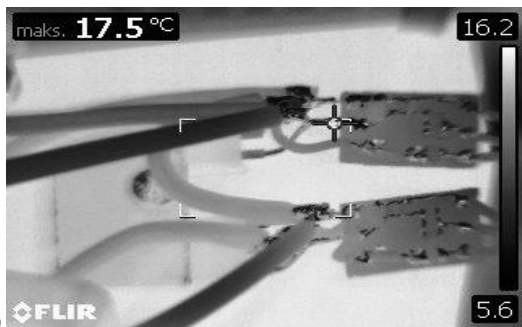
Rys. 3. Model symulacyjny bloku mocy z tranzystorami MOSFET



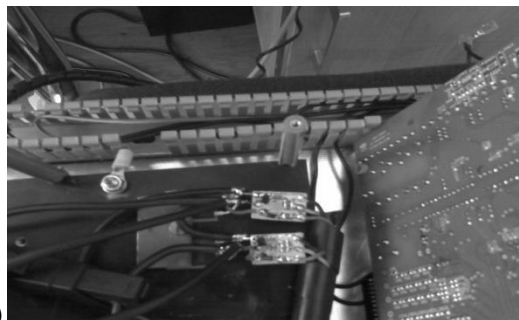
Rys. 4. Model radiatora połączonego z kluczami tranzystorowymi (a), model termiczny klucza tranzystorowego (b)

Tabela 1. Parametry tranzystorów SiC MOSFET [7]

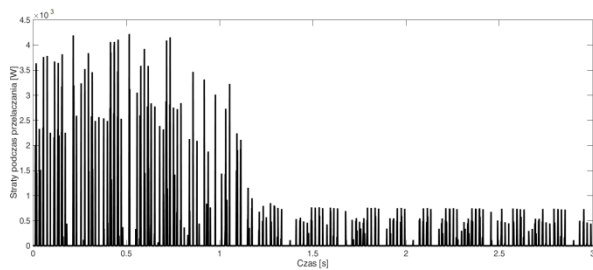
Typ	G3R40MT12D
Napięcie $V_{DS}$	1200 V
Prąd $I_D$	45 A
Rezystancja $R_{DS\_ON}$	45 m $\Omega$
Napięcie $V_{GS}$ (rekomendowane)	Od -5 V do 15V
Napięcie progowe $V_{GS}$	2,7 V
Pojemność wejściowa $C_{ISS}$	2897 pF
Pojemność wyjściowa $C_{OSS}$	88 pF



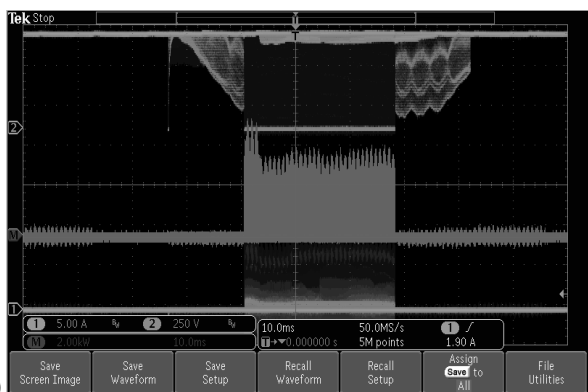
a)



b)



c)



d)

Rys. 5. Temperatura tranzystorów SiC MOSFET pracujących w przekształtniku, który zasila silnik BLDC (a), zdjęcie tranzystorów SiC MOSFET (b), wynik symulacji komputerowej (c), zrzut z oscyloskopu przedstawiający iloczyn napięcia  $V_{DS}$  oraz prądu  $I_D$  (d)

## Podsumowanie i wnioski

Wykorzystanie symulacji komputerowych w energoelektronice umożliwia poprawne zaprojektowanie bloków składających się na kompletny przekształtnik energoelektroniczny. Dzięki symulacji komputerowej możliwe jest projektowanie elementów chłodzących, dobranie przekrojów przewodów oraz odpowiednie zaprojektowanie układów zabezpieczających przekształtnik.

Część praktyczna została zrealizowana z wykorzystaniem zmiennoprzecinkowego procesora sygnałowego z serii TMS320 firmy Texas Instruments. Wykorzystany procesor odpowiada za generowanie czasów włączenia tranzystorów mocy oraz za generowanie czasów martwych podczas których tranzystor górny i dolny danej gałęzi są wyłączone. Płyta mocy zawiera wszystkie niezbędne zabezpieczenia, które chronią tranzystory mocy przed zbyt dużym prądem fazowym oraz przepięciami.

Porównując część symulacyjną z częścią praktyczną można oszacować błąd z jakim zostały odtworzone sygnały w części symulacyjnej. Należy uwzględnić również błąd pomiarowy typu A związany z klasą przyrządów pomiarowych podczas wymienionego porównania.

W pracy wykorzystano kamerę termowizyjną firmy FLIR, dzięki której możliwe było przedstawienie rozplywu temperatury na radiatorze.

Porównując rysunek 5c, na którym przedstawiono wynik symulacji komputerowej przedstawiający straty podczas przełączania tranzystora z rysunkiem 5d można stwierdzić, iż wartości maksymalne amplitudy oscylują w granicach 4 kW podczas pracy. Symulacja komputerowa w dobrym stopniu odtwarza straty przełączeniowe. Zakłada się, iż przyjęte założenia upraszczające model matematyczny, na którego podstawie zbudowany został model symulacyjny wpłynęły na dokładność wyników symulacji.

**Autorzy:** dr inż. Marcján Nowak, dr inż. Adrian Barasiński Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: marcján.nowak@pcz.pl, adrian.barasinski@pcz.pl.

## LITERATURA

- [1] Bose Bimal K. *Modern Power Electronics and AC Drives*, 2002.
- [2] Grzejszczak P., Barlik R., *Analityczny opis łączeniowych strat energii w wysokonapięciowych tranzystorach MOSFET pracujących w mostku*, Przegląd elektrotechniczny, 09/2015.
- [3] Kaczmarczyk Z., *Metoda projektowania wysokoczęstotliwościowych falowników klasy E*, Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, 2014 R. 60 z. 4, s. 53-66, 2014,
- [4] Kaczmarczyk Z., Zellner M., Frania K., *Straty mocy i rezystancja zastępcza związane z przeładowywaniem nieliniowej pojemności wyjściowej tranzystora MOSFET*, Przegląd elektrotechniczny, 03/2018.
- [5] Kaczmarczyk Z., *Model i metoda projektowania wysokoczęstotliwościowego falownika klasy EF*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 90 NR 6/2014.
- [6] Suetsugu T., Kazimierczuk M., *Comparison of Class-E Amplifier With Nonlinear and Linear Shunt Capacitance*, IEEE Transactions On Circuits And Systems, VOL. 50, NO. 8, August 2003.
- [7] Nota katalogowa tranzystora SiC MOSFET G3R40MT12D: <https://www.farnell.com/datasheets/3189236.pdf>
- [8] 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.
- [9] Zbiór informacji - dokumentacja programu Matlab Simulink - Silnik BLDC