

Piotr LEGUTKO

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI, NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO I ROBOTYKI
ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

Niskostratny drajwer tranzystora MOSFET mocy

Mgr inż. Piotr LEGUTKO

Urodzony 12.05.1986 r. w Jaworznie (woj. śląskie). Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej z 2011 r. Od 2012 r. jest doktorantem w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Zainteresowania naukowe to tranzystorowe falowniki wysokiej częstotliwości, modelowanie i symulacja komputerowa przekształtników energo-elektronicznych oraz mikroprocesorowe i cyfrowe układy sterowania.



e-mail: Piotr.Legutko@polsl.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono nową konstrukcję dyskretnego drajwera dedykowanego do zastosowań z wysokoczęstotliwościowymi tranzystorami MOSFET mocy. Przedstawiono przebiegi czasowe oraz charakterystyki strat mocy zarówno drajwerów scalonych, jak i nowego dyskretnego układu. Opracowany dyskretny układ drajwera charakteryzuje się niskimi stratami mocy i krótszymi czasami przełączeń przy częstotliwości 30 MHz. Koszt opracowania nowego drajwera jest kilkakrotnie niższy niż koszt zakupu drajwera scalonego.

Słowa kluczowe: drajwer, straty mocy, czasy przełączeń, tranzystor MOSFET.

Low Loss Power MOSFET Driver**Abstract**

This paper presents a systematic approach to the design of high performance gate drive circuits for high speed switching applications. Two integrated drivers DEIC420, DEIC515 and additionally one discrete driver UCC27526 have been designed in the project. The UCC27526 driver was built with low-power discrete circuits connected in parallel by means of appropriate buffers reinforcement signal generator. Figure 1 shows the transistor gate circuit connected to the driver circuit. Figures 2 and 3 present the circuit driver UCC27526. Additionally, in this paper there are presented the characteristics of the driver input power (Fig. 4) for three operating states: a) no load; b) capacitance load 3 nF; c) loading with MOSFET gate. The output voltage waveforms for the DEIC420 and 8xUCC27526 drivers for three operating states are shown in Figures 5 and 6. The new MOSFET Drivers have been verified by use in the universal laboratory in the Department of Power Electronics, Electrical Drives and Robotics of Silesian University of Technology.

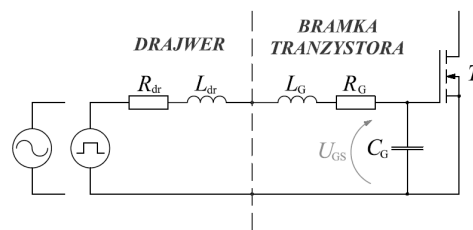
Keywords: driver, analysis, power losses, MOSFET Transistor.

1. Wprowadzenie

W wysokoczęstotliwościowym przetwarzaniu energii elektrycznej, jakie odbywa się w wysokosprawnych falownikach rezonansowych, przełączanie tranzystora MOSFET z odpowiednio dużą częstotliwością i wydajnością staje się poważnym wyzwaniem dla konstruktorów tego typu układów. Aby możliwie efektywnie przeładowywać pojemność bramki tranzystora mocy należy odpowiednio dobrać drajwer sterujący jego pracą [1]. Idealny drajwer powinien umożliwiać przełączanie tranzystora z możliwie najkrótszymi czasami i możliwie najmniejszymi stratami mocy [2]. Na rynku dostępnych jest bardzo wiele układów umożliwiających pracę tranzystora z takimi właśnie parametrami. Układy te posiadają jednak szereg istotnych wad, co dodatkowo utrudnia odpowiedni dobór drajwera do konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego.

Jak powszechnie wiadomo, tranzystor mocy MOSFET jest jednokierunkowym zaworem energoelektronicznym sterowanym za pomocą napięcia bramki [1, 2, 4, 5]. Przyłożone do bramki tranzystora napięcie sterujące powoduje przeładowanie wewnętrznej pojemności C_G (rys. 1). Aby tranzystor mocy MOSFET mógł

pracować w zakresie wysokich częstotliwości (powyżej 20 MHz) należy pojemność bramki C_G przeładowywać z czasami rzędu nanosekund. Takie szybkie przeładowywanie tej pojemności wiąże się z potrzebą przyłożenia do tranzystora dużego napięcia bramki U_G i zapewnienia przepływu prądu drenu i_D , co w konsekwencji będzie wiązało się z dużymi stratami mocy w samym tranzystorze [3]. Ładunek bramki tranzystora MOSFET mocy wynosi typowo $20 \div 100$ nC, a czasy przełączeń wynoszą typowo $4 \div 10$ ns.



Rys. 1. Schemat zastępczy obwodu bramkowego drajwer-tranzystor
Fig. 1. Transistor gate circuit connected to the driver circuit

Dodatkowo jak wynika z rysunku 1, sam układ drajwera znacznie komplikuje proces przeładowywania wewnętrznej pojemności tranzystora MOSFET wprowadzając do obwodu bramkowego dodatkową indukcyjność doprowadzeń L_{dr} . Straty mocy powstałe w obwodzie bramkowym rosną wraz ze wzrostem częstotliwości i są przyczyną wzrostu temperatury złącza tranzystora [5, 6, 7, 8]. Dodatkowo wraz ze wzrostem częstotliwości pracy drajwera, czyli wzrostem częstotliwości sygnału sterującego tranzystora, zniekształceniu ulega przebieg napięcia bramkowego U_{GS} . Zniekształcenie to może objawiać się zmniejszeniem amplitudy sygnału oraz zwiększeniem bądź zmniejszeniem współczynnika wypełnienia (czasu przewodzenia łącznika). W celu kompensacji malejącej amplitudy napięcia wraz ze wzrostem częstotliwości należy podnieść napięcia zasilania samego drajwera, co w efekcie będzie skutkowało jeszcze większymi stratami w samym drajwerze. Dostępne na rynku scalone drajwery pracują z częstotliwościami sięgającymi kilkudziesięciu megaherców i stratami mocy sięgającymi kilkudziesięciu watów.

Podsumowując, aby utrzymać wysoką sprawność całego układu falownika rezonansowego trzeba rozwiązać powyższe problemy w taki sposób, aby moc pobierana przez dedykowany układ drajwera była niewielka w stosunku do mocy całego układu falownika. W ramach projektu zdecydowano się na opracowanie i skonstruowanie własnego, dyskretnego drajwera, dedykowanego do zastosowań wysokoczęstotliwościowych. Układ ten powinien charakteryzować się możliwie niskimi stratami mocy i niskimi czasami przełączeń na poziomie kilku nanosekund przy częstotliwości pracy 30 MHz. Ponadto opracowanie takiego drajwera pozwoli lepiej zapoznać się z problemami związanymi ze sterowaniem wysokoczęstotliwościowych tranzystorów MOSFET mocy.

2. Opis projektu

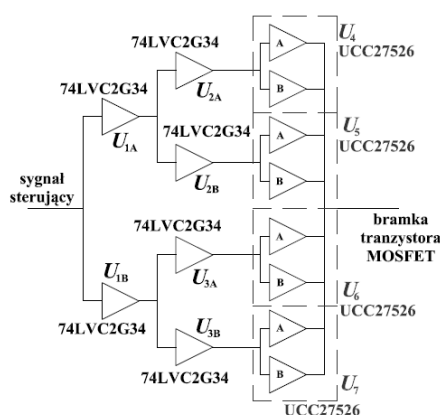
Podczas prac wykonanych w ramach projektu zaprojektowano i wykonano dyskretny drajwer o oznaczeniu 8xUCC27526, oraz porównano jego właściwości z dwoma znanymi scalonymi drajwerami (DEIC420 i DEIC515) dostępnymi na rynku, dedykowanymi do zastosowań wysokoczęstotliwościowych. Wszystkie układy scalone, które posłużyły do wykonania prototypu drajwera, zostały wyselekcjonowane na podstawie starannego przeglądu dostępnych na rynku układów stosowanych do sterowania tranzystorów MOSFET mniejszej mocy. Zaproponowane rozwiązanie

drajwera zostało wykonane w postaci obwodu drukowanego na specjalnej płytce drukowanej o podłożu aluminiowym. W celu umożliwienia efektywnego odprowadzenia ciepła wydzielanego przez poszczególne układy, każdy z drajwerów został przykręcony bezpośrednio do radiatora. Płytkę drukowaną o grubości 1,5 mm składa się z warstwy aluminium, na które nałożono cienką warstwę izolatora ceramicznego i miedzi o łącznej grubości 17 μm .

Głównym zadaniem drajwerów było przeładowywanie z częstotliwością 30 MHz bramki tranzystora mocy MOSFET o oznaczeniu DE275-501N16A firmy IXYS (napięcie dren źródło 500 V, prąd drenu 16 A, obudowa DE275, ładunek bramki 50 nC). W dalszej części artykułu scharakteryzowano zaproponowany układ drajwera 8xUCC27526 oraz przedstawiono charakterystyki strat mocy dla trzech stanów pracy poszczególnych drajwerów.

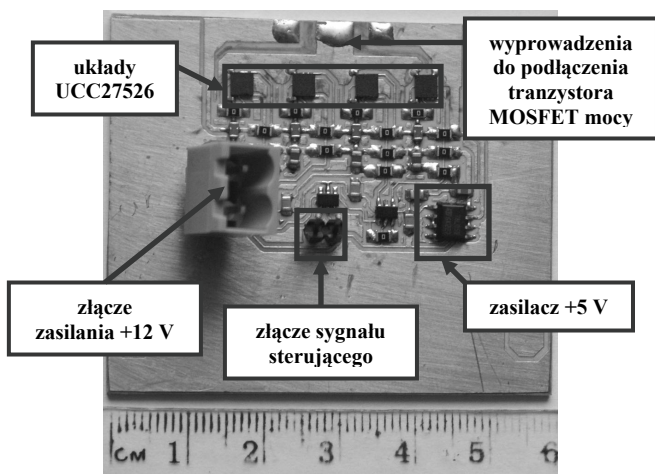
3. Drajwer 8xUCC27526

Układ dyskretnego drajwera został skonstruowany z wykorzystaniem czterech układów scalonych o oznaczeniu UCC27526, charakteryzujących się maksymalną wydajnością prądową na poziomie 5 A przy napięciu zasilania z przedziału od 4,5 V do 18 V [11].



Rys. 2. Schemat ideowy drajwera 8xUCC27526
Fig. 2. Schematic diagram of driver 8xUCC27526

Jak podaje producent [11], każdy z układów UCC27526 zawiera w swej obudowie dwa szybkie drajwery, których czasy przełączeń są mniejsze niż 6 ns. Podsumowując, w konstrukcji drajwera o oznaczeniu 8xUCC27526 wykorzystano cztery układy scalone firmy Texas Instruments zawierające po dwa wewnętrzne drajwery tranzystorów MOSFET – łącznie osiem drajwerów połączonych równolegle zgodnie ze schematem ideowym przedstawionym na rysunku 2.



Rys. 3. Rzeczywisty wygląd drajwera 8xUCC27526
Fig. 3. Driver 8xUCC27526

Składa się on z ośmiu drajwerów UCC27526 (U_4 , U_5 , U_6 , U_7) oraz dodatkowych wzmacniaczy sygnału sterującego (U_1 , U_2 , U_3). Stosowanie dodatkowych wzmacniaczy jest konieczne ze względu na dopuszczalną obciążalność generatora przebiegu sterującego. Pojedynczy układ UCC27526 zamknięty jest w obudowie o oznaczeniu WSON-8, której wymiary wynoszą 3,15x3,15 mm [11]. Obudowa ta pozwala dość efektywnie odprowadzać ciepło z układu scalonego. Wygląd rzeczywisty drajwera 8xUCC27526 przedstawiono na rysunku 3. Wyróżniono na nim poszczególne elementy składowe nowego drajwera dedykowanego do zastosowań wysokoczęstotliwościowych.

W dalszej części artykułu przedstawiono przebiegi czasowe, zarejestrowane na wyjściu drajwera dla trzech stanów pracy układu: biegu jałowego, obciążenia bezindukcyjnym kondensatorem mikowym o wartości 3 nF i obciążenia bramką tranzystora mocy MOSFET o oznaczeniu DE275-501N16A. Dodatkowo zamieszczono zdjęcie drajwera z kamery termowizyjnej pokazujące rozkład promieniowania cieplnego wydzielanego podczas pracy.

4. Wyniki badań laboratoryjnych

Przebadano laboratoryjnie i porównano następujące wysokoczęstotliwościowe drajwery tranzystorów MOSFET:

- zakupione scalone: DEIC420 oraz DEIC515;
- skonstruowany dyskretny drajwer 8xUCC27526.

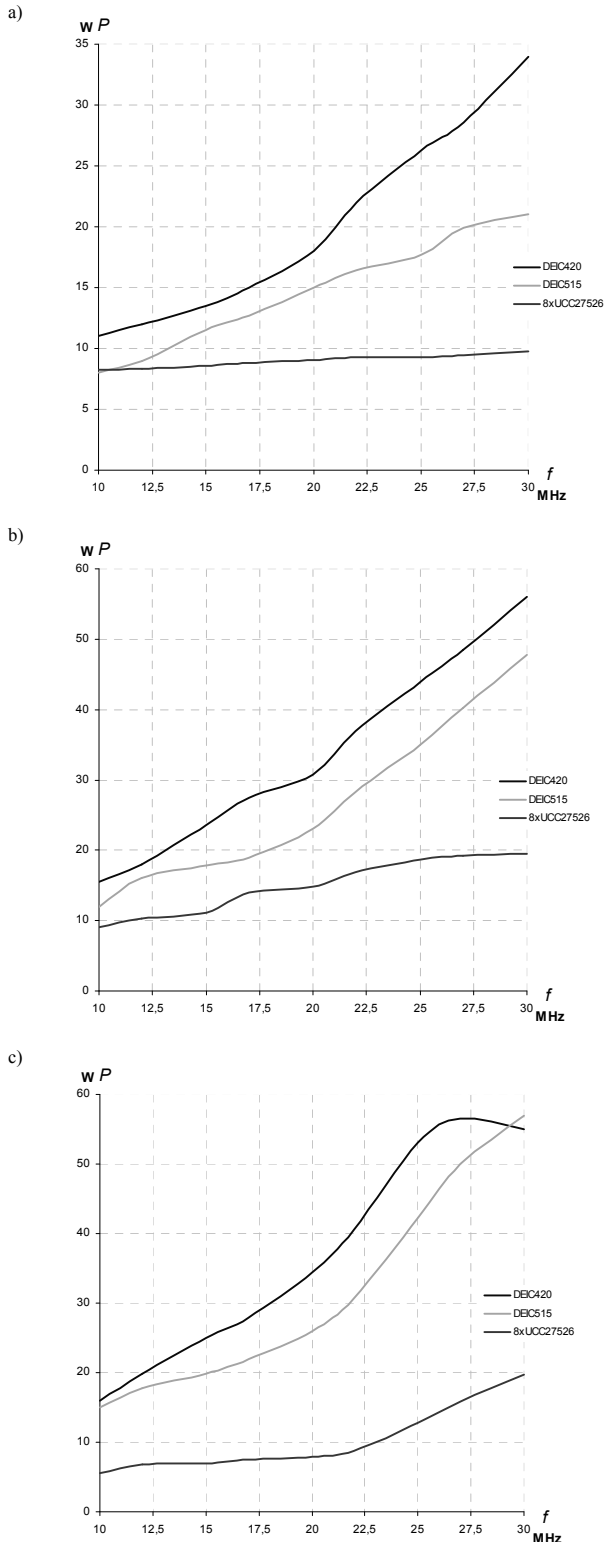
Pomiarów dokonano dla napięcia zasilania drajwerów $U_{zab} = 12\text{ V}$, częstotliwości pracy była zadawana z zewnętrznego układu sterowania w przedziale od 10 MHz do 30 MHz.

Wykreślono charakterystyki mocy czynnej pobieranej z zasilacza przez drajwer dla: biegu jałowego – rysunek 4a, obciążenia bezindukcyjnym kondensatorem mikowym 3 nF – rysunek 4b oraz obciążenia bramką tranzystora DE275-501N16A – rysunek 4c.

Z charakterystyk przedstawionych na rysunku 4 można odczytać wartość mocy czynnej pobieranej przez scalone drajwery tranzystorów MOSFET dla częstotliwości pracy 30 MHz. Dla biegu jałowego drajwer scalony DEIC420 pobiera około 34 W, a drajwer DEIC515 - 21 W. W przypadku obciążenia scalonych drajwerów bramką tranzystora MOSFET o oznaczeniu DE275-501N16A pobierają one moc czynną wynoszącą ponad 55 W. Opracowany w ramach projektu dyskretny drajwer charakteryzuje się ponad 3-krotnie mniejszym poborem mocy w stosunku do drajwera DEIC420 i ponad 2-krotnie mniejszym poborem mocy w stosunku do drajwera DEIC515 (dla biegu jałowego). Zaproponowane dyskretnie rozwiązanie wyróżnia się również 3-krotnie mniejszym poborem mocy przy obciążeniu bramką tranzystora DE275-501N16A w stosunku do pozostałych dwóch scalonych drajwerów. Różnica w mocy pobieranej przez drajwery przy obciążeniu bezindukcyjnym kondensatorem 3 nF, a bramką tranzystora MOSFET o oznaczeniu DE275-501N16A, wynika z rzeczywistych parametrów obwodu bramkowego samego tranzystora, takich jak np. indukcyjności doprowadzeń, rezystancja bramki tranzystora.

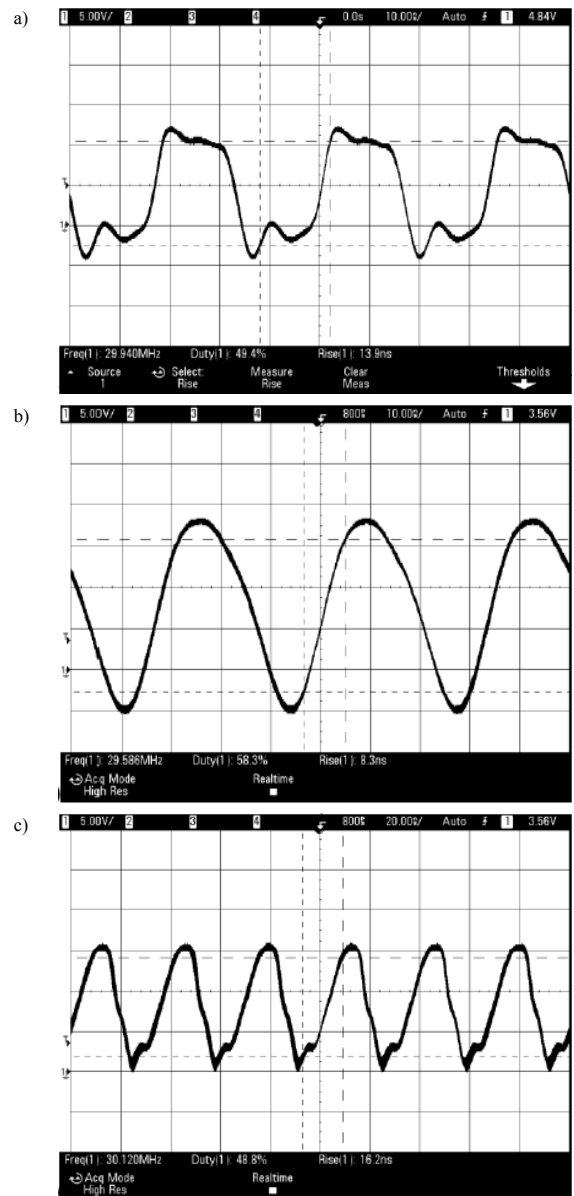
Przebiegi czasowe napięcia wyjściowego drajwera DEIC420 przedstawiono na rysunku 5. Po obciążeniu go kondensatorem 3 nF (rys.5b), jego napięcie wyjściowe jest quasi-sinusoidalne co świadczy o tym, że częstotliwość przełączeń jest zbliżona do częstotliwości rezonansowej obwodu utworzonego przez obwód wyjściowy drajwera oraz dołączony kondensator 3 nF. Napięcie wyjściowe drajwera w przypadku obciążenia go bramką tranzystora MOSFET mocy (rys. 5c) różni się od przypadku obciążenia go bezindukcyjnym kondensatorem 3 nF. Fakt ten jest spowodowany wprowadzeniem do obwodu wyjściowego drajwera dodatkowej indukcyjności bramki tranzystora DE275-501N16A, która wynosi około 5 nH. Należy podkreślić, że mierzone napięcie przedstawione na rysunku 5c, nie jest napięciem występującym na wewnętrznej pojemności bramki tranzystora MOSFET. Napięcie przedstawione na rysunku 5c jest pomniejszone o spadki napięć na indukcyjności doprowadzeń ($L_{dr} - L_G$) i rezystancji bramki R_G tranzystora. Czasy przełączeń drajwera scalonego DEIC420 były mierzone w przedziale od 10 % do 90 % wartości maksymalnej sy-

gnału wyjściowego drajwera dla biegu jałowego i częstotliwości 30 MHz. Czas narastania dla drajwera scalonego DEIC420 wyniósł 2,95 ns, a czas opadania 3,05 ns. Niższe wartości czasów przełączeń zarejestrowano dla drajwera DEIC515, wyniosły one odpowiednio 2,2 ns i 2,9 ns.



Rys. 4. Charakterystyki mocy pobieranej przez drajwery: a) dla biegu jałowego; b) przy obciążeniu kondensatorem 3 nF; c) przy obciążeniu bramką tranzystora MOSFET

Fig. 4. Driver input power for: a) no load; b) capacitance load 3 nF; c) loading with MOSFET gate



Rys. 5. Przebiegi napięcia wyjściowego drajwera DEIC420 (5 V/div; 30 MHz): a) dla biegu jałowego; b) przy obciążeniu kondensatorem 3 nF; c) przy obciążeniu bramką tranzystora MOSFET

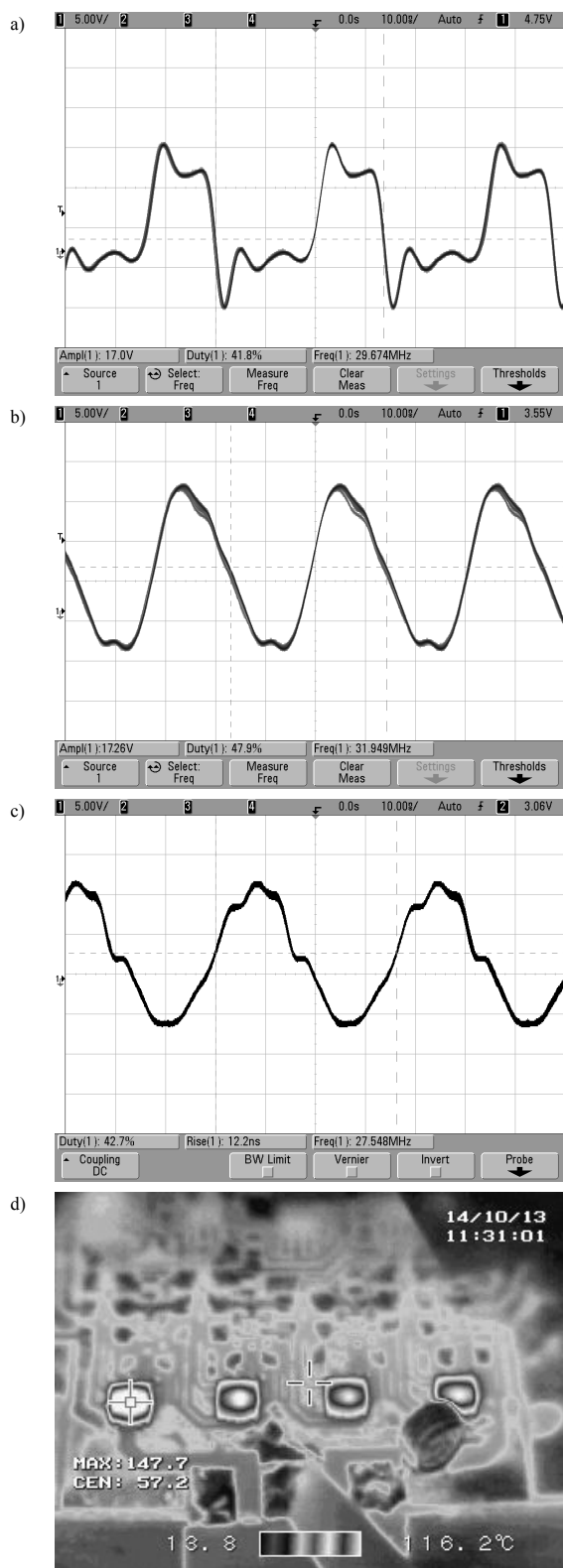
Fig. 5. Output voltage waveforms of DEIC420 driver (5 V/div; 30 MHz) for: a) no load; b) capacitance load; c) loading with MOSFET gate

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi czasowe dla opracowanego dyskretnego drajwera o oznaczeniu 8xUCC27526. Drajwer ten charakteryzuje się poborem mocy na poziomie 9,8 W – dla biegu jałowego oraz 19,6 W – dla obciążenia bramką tranzystora MOSFET (częstotliwość pracy 30 MHz). Czasy przełączeń wynoszą: 2 ns – dla zbocza narastającego i 2,4 ns dla zbocza opadającego. Pomiary czasów przełączeń przeprowadzono w identyczny sposób jak dla drajwerów scalonych.

Jak wynika z rysunku 6b przebieg napięcia wyjściowego drajwera 8xUCC27526 przy obciążeniu go bezindukcyjnym kondensatorem mikowym o wartości 3 nF jest quasi-sinusoidalny.

Na rysunku 6d przedstawiono zdjęcie termowizyjne drajwera wykonane podczas pracy z częstotliwością 30 MHz przy obciążeniu wyjścia drajwera bramką tranzystora mocy MOSFET o oznaczeniu DE275-501N16A. Maksymalna temperatura pracy układów scalonych UCC27526, jak podaje producent, powinna wynosić 140°C [11]. Temperatura jednego z układów scalonych (rys.6d – skrajny lewy układ) jest wyższa o 7°C co może w przypadku pracy długotrwałej skutkować zniszczeniem układu. Fakt nadmiernego wzrostu temperatury w tym pojedynczym układzie, był spowodowany złym przytwierdzeniem go do płytki obwodu drukowanego, co w konse-

kwencji skutkowało złym odprowadzaniem ciepła z obudowy WSON-8. Aby uniknąć zniszczenia układów scalonych UCC27526 w czasie długotrwałej pracy drajwera i poprawić jakość chłodzenia układów postanowiono umieścić na obudowach układów scalonych radiator wytłaczany o wymiarach 19×6 mm.



Rys. 6. Przebiegi napięcia wyjściowego drajwera 8xUCC27526 (5 V/div; 30 MHz): a) dla biegu jałowego; b) przy obciążeniu kondensatorem 3 nF; c) przy obciążeniu bramką tranzystora MOSFET; d) zdjęcie z kamery termowizyjnej

Fig. 6. Output voltage waveforms of 8xUCC27526 driver (5 V/div; 30 MHz) for: a) no load; b) capacitance load 3 nF; c) loading with MOSFET gate; d) thermovision image

5. Podsumowanie

W czasie badań laboratoryjnych dotyczących wysokoczęstotliwościowych drajwerów tranzystorów MOSFET mocy przebadano trzy twardo przełączane układy: dwa scalone drajwery o oznaczeniach DEIC420 i DEIC515 oraz dyskretny układ własnej konstrukcji o oznaczeniu 8xUCC27526. Porównanie właściwości poszczególnych układów wykazało, że zaproponowana konstrukcja dyskretnego drajwera, dedykowanego do wysokoczęstotliwościowych zastosowań np. w falownikach rezonansowych klasy E, posiada lepsze parametry niż drajwery scalone dostępne obecnie w sprzedaży.

Dyskretny drajwer 8xUCC27526 charakteryzuje się wielokrotnie mniejszym poborem mocy, przy podobnych przebiegach napięcia wyjściowego. Drajwer 8xUCC27526 pobiera o około 25 W mniejsza moc, niż drajwer scalony DEIC420 (dla biegu jałowego), oraz o około 35 W mniejsza moc dla obciążenia bramką tranzystora MOSFET mocy o oznaczeniu DE275-501N16A. Ten dyskretny drajwer charakteryzuje się również dość ostrym zboczem sygnału wyjściowego. Dla biegu jałowego czasy narastania i opadania zbocza napięcia wyjściowego wyniosły odpowiednio 2 ns i 2,4 ns.

Podsumowując, możliwe jest opracowanie układu wysokoczęstotliwościowego drajwera, dedykowanego do tranzystorów MOSFET mocy, przy użyciu dostępnych układów scalonych mniejszej mocy. Parametry opracowanego układu znacznie przewyższają parametry scalonych drajwerów dostępnych w sprzedaży. Koszty opracowania i skonstruowania dyskretnego drajwera są o około 3-krotnie mniejsze, niż koszty zakupu drajwerów scalonych. Zaproponowana konstrukcja dyskretnego drajwera o oznaczeniu 8xUCC27526 będzie w najbliższym czasie dalej rozwijana. Zostanie ona poddana optymalizacji i miniaturyzacji tzn. zostaną zmniejszone wszystkie indukcyjności doprowadzeń oraz pojemności między ścieżkami w obwodzie PCB. Dodatkowo finalna wersja układu dyskretnego drajwera zostanie w najbliższym czasie przebadana laboratoryjnie na rzeczywistym układzie rezonansowego falownika klasy E 27 MHz/500 W.

6. Literatura

- [1] Barkhordarian V.: Power MOSFET Basic, International Rectifier, Dokumentacja techniczna.
- [2] Balogh L.: Design and Application Guide For High Speed MOSFET Gate Driver Circuit, International Rectifier, Dokumentacja techniczna.
- [3] Scoggins P.: A Guide to Designing Gate-Drive Transformers, Power Electronics Technology, January 2007, pp.32-36.
- [4] Bliss J.: The MOSFET Turn-Off Device – A New Circuit Building Block, Motorola Semiconductors, Engineering Bulletin, EB142, 1990.
- [5] Kaczmarczyk Z.: Poprawa właściwości energetycznych falowników klasy E przez maksymalizację wykorzystania tranzystora, Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.
- [6] Kasprzak M.: Falownik klasy DE 8 MHz/300 W z rezonansowym sterownikiem klasy D o sinusoidalnym kształcie napięcia bramkowego, Przegląd Elektrotechniczny, 89 (2013), nr. 2a, str. 28-33.
- [7] Kasprzak M.: Falownik klasy DE 13,56 MHz/500 W z drajwerem typu flyback, Przegląd Elektrotechniczny, 86 (2010), nr. 2, str. 243-246.
- [8] Leitermann O.: Radio Frequency dc-dc Converters: Device Characterization, Topology Evaluation, and Design, Massachusetts Institute of Technology, February 2008.
- [9] Dokumentacja techniczna drajwera DEIC420 dostępna pod adresem: <http://ixapps.ixys.com/DataSheet/deic420.pdf>
- [10] Dokumentacja techniczna drajwera DEIC515 dostępna pod adresem: <http://ixapps.ixys.com/DataSheet/deic515.pdf>
- [11] Dokumentacja techniczna układu scalonego UCC27526 dostępna pod adresem: <http://www.ti.com/product/ucc27526>

otrzymano / received: 20.10.2013

przyjęto do druku / accepted: 03.02.2014

artykuł recenzowany / revised paper