

## Wysokoczęstotliwościowe, dyskretne drajwery małej mocy dedykowane do tranzystorów MOSFET serii DE

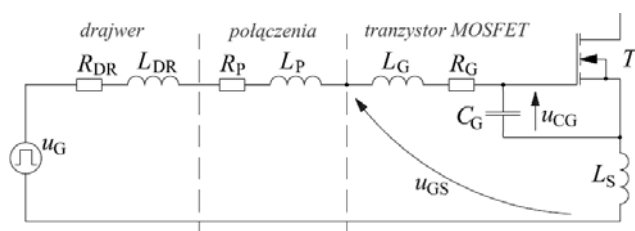
**Streszczenie.** W artykule przedstawiono realizację, analizę właściwości i badania eksperymentalne wysokoczęstotliwościowych drajwerów tranzystorów MOSFET mocy stosowanych w falownikach rezonansowych np. klasy E i DE o częstotliwości pracy sięgającej 30 MHz. Nowo opracowane konstrukcje porównano z dostępnymi drajwerami scalonymi firmy IXYS pod kątem strat mocy, czasów przełączeń i propagacji. Dodatkowo, w ramach pracy wyznaczono parametry pasozytnicze  $R_G$ ,  $L_{DR}$  i  $C_{OUT}$  wszystkich analizowanych układów drajwerów, oraz przeprowadzono analizę temperaturową przy użyciu kamery termowizyjnej.

**Abstract.** This paper presents a systematic approach to design high performance discrete gate driver circuits for high speed switching applications. In the project tested three integrated drivers IXYS Corporation and additionally eight discrete drivers have been designed. Additionally, in this paper presents characteristic power input by the drivers (fig.4) for three operating states: at idle, at capacitance load 3 nF and at gate MOSFET 501N16A load. Also in this paper presents voltage waveforms (fig.5) and pictures of the thermal camera. At the end presents the measurements of parasitic parameters (inductances  $L_{DR}$ , capacitances  $C_{OUT}$  and resistances  $R_{DR}$ ) for all drivers. (*The Low-Losses and Fast Switching Hybrid Drivers for DE Series MOSFET Transistors*).

**Słowa kluczowe:** wysokoczęstotliwościowe drajwery, falownik rezonansowy, tranzystor MOSFET, straty mocy, parametry pasozytnicze.  
**Keywords:** high frequency drivers, resonant inverter, power losses, MOSFET transistor, parasitic parameters, thermal clad.

### Wstęp

W wysokosprawnym przetwarzaniu energii elektrycznej, jakie odbywa się w falownikach rezonansowych pracujących z częstotliwościami sięgającymi 30 MHz niezwykle ważne jest efektywne przełączanie tranzystora MOSFET. Tak wysoka częstotliwość kluczowania zaworu wiąże się z zastosowaniem dedykowanego układu sterownika tranzystora w postaci scalonego drajwera (ang. ic driver). Tego typu dedykowane układy sterowania nazywane potocznie drajwerami lub sterownikami (ang. driver), charakteryzują się znacznymi czasami przełączeń na poziomie 4 ns i dużymi stratami mocy czynnej pobieranej ze źródła zasilania na poziomie 60 W – przy częstotliwości pracy wynoszącej 30 MHz [1,2]. Tak wysoka częstotliwość pracy tych układów powoduje, że przeważająca większość dostępnych w sprzedaży drajwerów scalonych nie jest zdolna efektywnie przeładować wewnętrzną pojemność CG bramki tranzystora MOSFET mocy. Na rysunku 1 przedstawiono schemat zastępczy podobodu drajwer-tranzystor służący do wyjaśnienia zjawisk występujących przy przełączaniu bramki zaworu energoelektronicznego.



Rys. 1. Schemat zastępczy podobodu drajwer-tranzystor

W pracy [3] wykazano, iż wraz ze wzrostem częstotliwości przełączeń zmianie ulega sposób przeładowywania pojemności bramkowej  $C_G$  tranzystora  $T$ . Dla niskich częstotliwości pracy układu falownika (< 10 MHz), przeładowanie wewnętrznej pojemności bramkowej ma charakter impulsowy [3], wraz ze wzrostem częstotliwości rośnie wartość skuteczna prądu bramki tranzystora  $I_G$ . Jeżeli częstotliwość przełączeń zaworu będzie bliska, lub równa częstotliwości rezonansowej podobodu drajwer-tranzystor, to przełączenia tranzystora będą odbywały się płynnie ze względu na znaczne wartości

prądu bramki  $I_G$ . Główną wadą tego rozwiązania są duże straty mocy w bramce tranzystora i samym drajwerze, które mogą zostać wyznaczone odpowiednio z zależności (1) i (2). Dodatkowo, w pracy [3] wykazano, iż dwukrotny wzrost częstotliwości przełączeń z 10 MHz do 20 MHz skutkuje 3-krotnym wzrostem strat mocy zarówno w bramce tranzystora MOSFET mocy jak i samym drajwerze.

$$(1) \quad P_T = I_{G(RMS)}^2 \cdot R_G \approx U_{GS} \cdot f \cdot Q_G$$

$$(2) \quad P_{DR} = I_{G(RMS)}^2 \cdot R_{DR}$$

Gdzie:  $I_{G(RMS)}$  – wartość skuteczna prądu bramki tranzystora,  $R_G$  – rezystancja bramki tranzystora,  $U_{GS}$  – napięcie bramka-źródło,  $f$  – częstotliwość przełączeń,  $Q_G$  – ładunek bramki tranzystora,  $R_{DR}$  – rezystancja wyjściowa drajwera.

Tak duży pobór mocy czynnej przez drajwery związany jest w głównej mierze z ładunkiem bramki  $Q_G$ , wynoszącym typowo od 20 nC do 100 nC. Dodatkowym aspektem efektywnego przeładowywania wewnętrznej pojemności bramki  $C_G$  jest konieczność minimalizacji indukcyjności doprowadzeń ( $L_{DR}$ ,  $L_P$ ,  $L_G$ ) pomiędzy drajwerem a bramką tranzystora, która wpływa na ograniczenie prądu przeładowującego. Przedstawione na rysunku 1 pasozytnicze indukcyjności bramki  $L_G$  i źródła  $L_S$  zależne są od długości i konfiguracji wewnętrznych doprowadzeń tranzystora oraz od typu jego obudowy [1, 3]. Przykładowo dla tranzystora serii DE o oznaczeniu 501N16A indukcyjności te wynoszą:  $L_G = 1$  nH,  $L_D = 1$  nH,  $L_S = 0,5$  nH, [10, 11, 17]. Wartości te mogą być oszacowane z dużym przybliżeniem na podstawie zależności [10, 11]:

$$(3) \quad L \approx 7 \div 10 \text{ nH/cm}.$$

Ze względu na wymienione wady drajwerów scalonych postanowiono w ramach pracy opracować własną dyskretną konstrukcję drajwera, która byłaby w stanie możliwie efektywnie i niezawodnie przełączać bramkę tranzystora MOSFET mocy. Nowa konstrukcja dyskretnego drajwera powinna charakteryzować się krótkimi czasami przełączeń – na poziomie pojedynczych nanosekund, małymi stratami mocy – na poziomie kilkunastu watów. Dodatkowo w ramach pracy zarejestrowano przebiegi czasowe napięcia wyjściowego drajwera dla trzech stanów pracy, wykreślono charakterystyki mocy czynnej pobieranej

przez układ drajwera dla trzech stanów pracy, analizie poddano czasy propagacji sygnału wyjściowego dla biegu jałowego układu, zbadano rozkład temperatury na płycie PCB nowego dyskretnego drajwera oraz wyznaczono parametry pasożytnicze ( $L_{DR}$ ,  $C_{OUT}$ ,  $R_G$ ) poszczególnych układów.

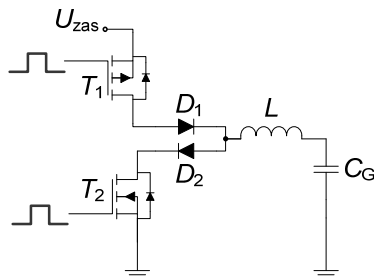
### Opis prac

W ramach badań zaprojektowano i wykonano osiem dyskretnych układów drajwerów (dwa miękko-przełączalne i sześć twardo-przełączalnych), które zostały następnie porównane z trzema znanymi scalonymi drajwerami dostępnymi na rynku. Łącznie przebadano jedenaście układów drajwerów. Wszystkie układy scalone, które posłużyły do wykonania prototypów nowych dyskretnych drajwerów zostały wyselekcjonowane na podstawie starannego przeglądu dostępnych na rynku układów stosowanych do sterowania tranzystorów MOSFET małej mocy. Każdy z nowo opracowanych drajwerów został wykonany w postaci jednowarstwowego obwodu drukowanego w technologii ang. thermal clad. Płytki o grubości 1,5 mm zawiera w swej strukturze podkład aluminiowy przylegający do radiatora, izolator ceramiczny oraz roboczą warstwę miedzi o grubości 17  $\mu\text{m}$  [12]. Takie rozwiązanie konstrukcyjne pozwala na efektywne odprowadzenie ciepła wydzielonego przez poszczególne układy scalone [12].

Głównym zadaniem badanych układów drajwerów było przeładowywanie z częstotliwością 30 MHz bramki tranzystora MOSFET mocy o oznaczeniu DE275-501N16A firmy IXYS ( $U_{DS} = 500 \text{ V}$ ,  $I_{Dmax} = 16 \text{ A}$ ,  $Q_G = 50 \text{ nC}$ ). Więcej informacji na temat tego tranzystora znaleźć można w literaturze [11, 17]. Badania laboratoryjne dotyczyły: analizy strat mocy układów, przebiegów czasowych napięć wyjściowych, czasów przełączeń, czasów propagacji, analizy temperaturowej i wyznaczenia parametrów pasożytniczych.

### Międko-przełączalny drajwer 4xFDG6332

Ten dyskretny drajwer należy do rodziny tzw. miękko-przełączalnych układów często w literaturze opisywanych jako tzw. drajwery rezonansowe [3, 4]. Schemat ideowy drajwera 4xFDG6332 przedstawiono na rysunku 2.

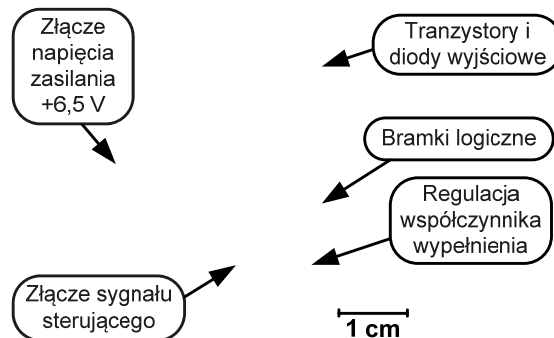


Rys.2. Schemat ideowy drajwera rezonansowego

Zasada działania tego typu drajwera polega na wykorzystywaniu drgań rezonansowych pomiędzy pojemnością bramki tranzystora  $C_G$  a indukcyjnością dodatkowej cewki  $L$ . Zasada działania tego typu drajwera została szczegółowo omówiona m. in. w pracy [3]. Ze względu na wysoką częstotliwość pracy drajwera cewkę  $L$  mogą stanowić jedynie niewielkie, pasożytnicze indukcyjności np. indukcyjności doprowadzeń występujące pomiędzy bramką tranzystora a drajwerem.

Drajwer 4xFDG6332 został skonstruowany w oparciu o cztery tranzystory FDG6332 zamknięte po dwie sztuki w jednej obudowie o oznaczeniu SC70-6 (wymiary 2 mm  $\times$  1,5 mm) [16]. Z uwagi na niską obciążalność

prądową postanowiono na potrzeby niniejszej konstrukcji z każdej obudowy wykorzystać tylko jeden tranzystor MOSFET o parametrach:  $R_{DS(on)} = 300 \text{ m}\Omega$ ,  $U_{ZAS} = 20 \text{ V}$ ,  $I_{Dmax} = 2,1 \text{ A}$  [16]. Drajwer 4xFDG6332 zasilany był z obniżonego napięcia równego +6,5 V (pozostałe drajwery twardo-przełączalne dyskretnie i scalone z +12 V). Sygnał sterujący był podawany przez odpowiednie złącze z zewnętrznego generatora przebiegu prostokątnego o częstotliwości 30 MHz i wypełnieniu 50 %. Ten miękko-przełączalny drajwer został tak zaprojektowany, aby umożliwić płynną regulację wypełnienia i wzmocnienia sygnału napięcia wyjściowego.



Rys.3. Rzeczywisty wygląd drajwera rezonansowego

Opis pozostałych konstrukcji dyskretnych drajwerów można znaleźć m. in. w literaturze [1, 2, 3].

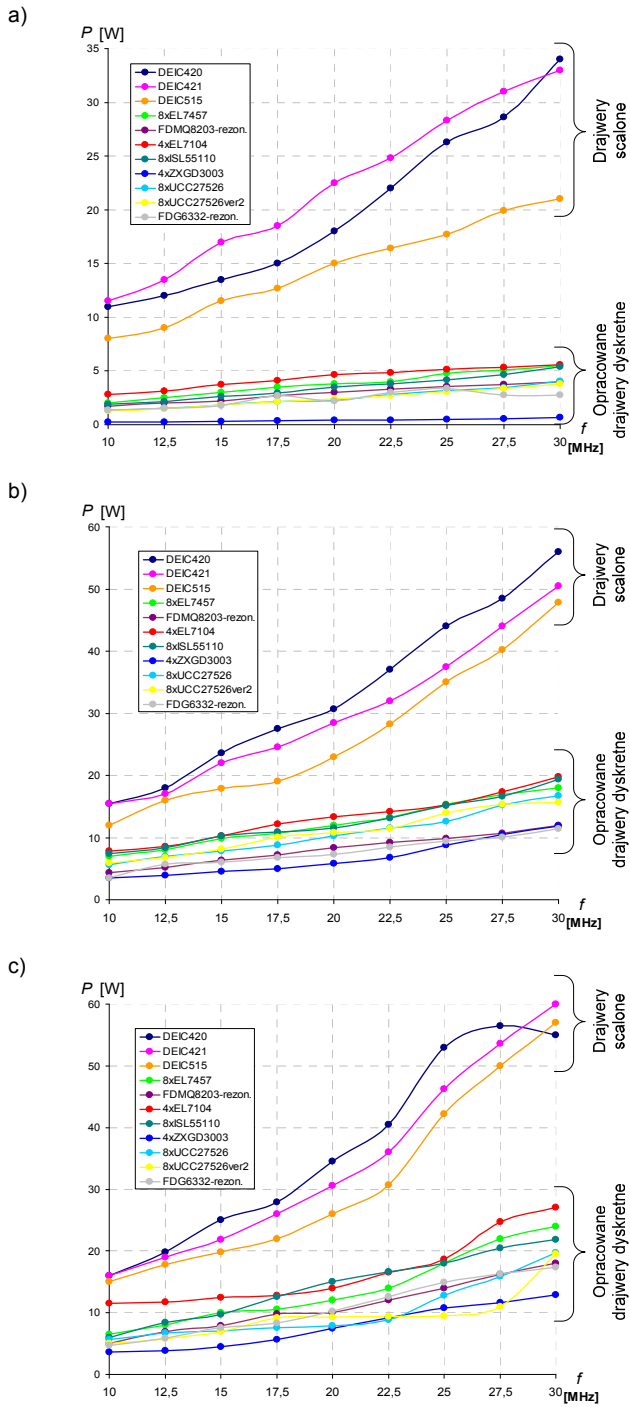
### Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne były wykonywane przy napięciu zasilania drajwerów  $U_{zas} = 12 \text{ V}$  (drajwery rezonansowe zasilano napięciem  $U_{zas} = 6,5 \text{ V}$ ). Częstotliwość pracy w przedziale od 10 MHz do 30 MHz była zadawana z zewnętrznego generatora, wykreślono charakterystyki mocy czynnej (rys.4) pobieranej z zasilania przez drajwer dla: biegu jałowego – rysunek 4a, obciążenia bezindukcyjnym kondensatorem mikowym o pojemności 3 nF – rysunek 4b oraz bramką tranzystora MOSFET mocy o oznaczeniu DE275-501N16A – rysunek 4c.

Na rysunku 5 zamieszczono oscylogramy napięcia wyjściowego drajwera 4xFDG6332 (rys.5a-c) dla trzech stanów pracy oraz zdjęcie z kamery termowizyjnej przedstawiające rozkład temperatury na płycie PCB drajwera (rys.5d) dla pracy pod obciążeniem bramką rzeczywistego tranzystora MOSFET. Przebiegi czasowe napięcia wyjściowego dla pozostałych badanych drajwerów znaleźć można m. in. w literaturze [1, 2, 3].

W ramach badań analizie poddano również czasy przełączeń poszczególnych układów (tabela 1) zarówno dla zbocza narastającego (L-H) jak i opadającego (H-L). Pomiar stromości sygnałów wyjściowych wszystkich drajwerów był wykonywany dla pracy na biegu jałowym, w przedziale od 10 % do 90 % wartości maksymalnej sygnału wyjściowego przy częstotliwości pracy wynoszącej 30 MHz. Dodatkowo wykonano również pomiar czasów propagacji (tabela 2) sygnałów wyjściowych poszczególnych układów względem danego sygnału wejściowego. Zewnętrzny, wyjściowy sygnał sterujący (odniesienia) był zadawany z zewnętrznego układu generatora, częstotliwość pracy układów wynosiła 30 MHz, wypełnienie  $D = 50 \%$ . Czasy propagacji sygnałów wyjściowych drajwerów były badane dla pracy na biegu jałowym.

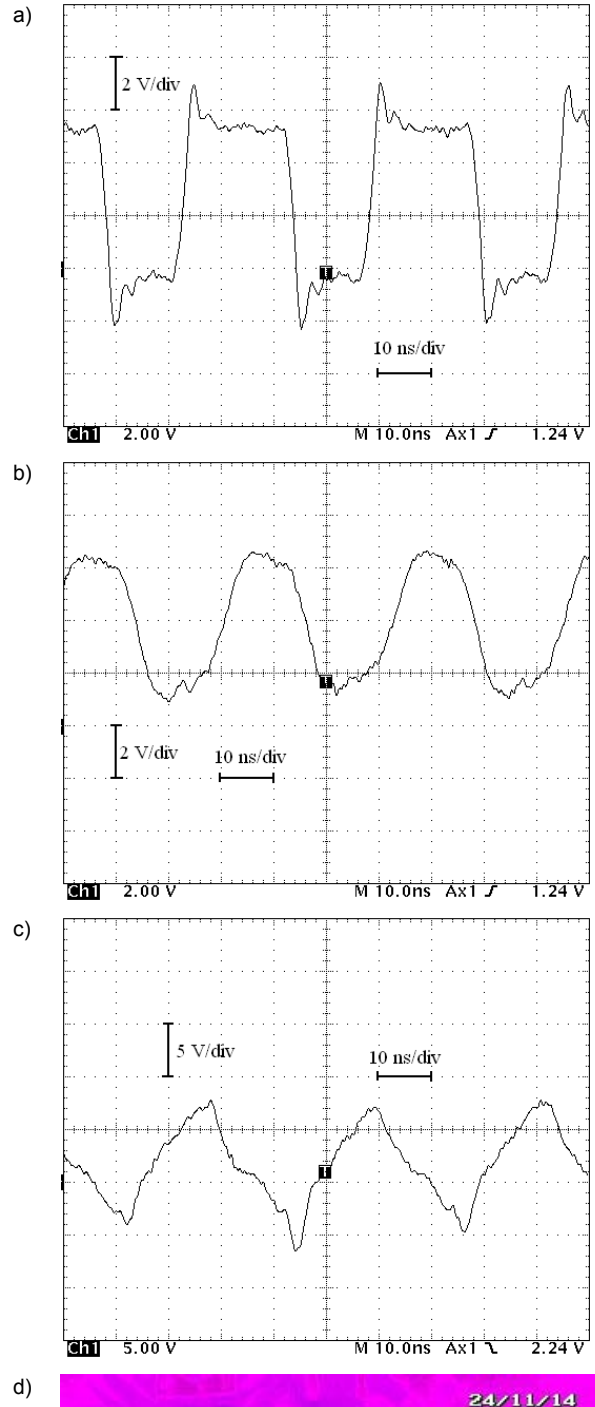
Należy zaznaczyć, iż przyjęta metoda pomiaru zarówno czasów przełączeń jak i czasów propagacji jest zgodna z pomiarami podawanymi przez poszczególnych producentów scalonych drajwerów w ich notach katalogowych.



Rys.4. Charakterystyki strat mocy drajwerów dla trzech stanów pracy: a) bieg jałowy, b) obciążenie bezindukcyjną pojemnością 3 nF, c) obciążenie bramką tranzystora DE275-501N16A

Tabela 1. Zestawienie czasów przełączeń

Typ drajwera	Rodzaj drajwera	Oznaczenie	Stromość zbocza	
			$t_{r(L-H)}$	$t_{f(H-L)}$
Scalony	Twardo-prz.	DEIC420	3,6 ns	3,7 ns
Scalony	Twardo-prz.	DEIC421	3,4 ns	5,4 ns
Scalony	Twardo-prz.	DEIC515	2,2 ns	2,9 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	4xEL7104	2,1 ns	2,5 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	4xZGD3003	1,3 ns	1,4 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	8xEL7457	1,8 ns	2,5 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	8xUCC27526	1,6 ns	1,2 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	8xUCC27526*	1,4 ns	1,1 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	8xSL55110	3,5 ns	4,9 ns
Dyskretny	Miękko-prz.	4xFDMQ8203	2,3 ns	2,3 ns
Dyskretny	Miękko-prz.	4xFDG6332	2,7 ns	1,6 ns



Rys.5. Przebiegi czasowe napięcia wyjściowego drajwera rezonansowego 4xFDG6332 (30 MHz) dla: a) biegu jałowego; b) obciążenia kondensatorem 3 nF; c) po podłączeniu bramki tranzystora; d) zdjęcie termowizyjne

Tabela 2. Zestawienie czasów propagacji

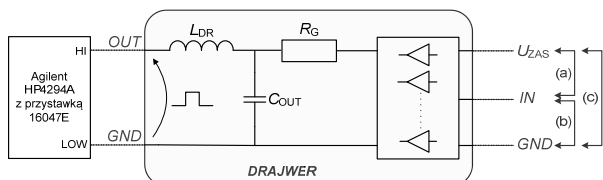
Typ drajwera	Rodzaj drajwera	Oznaczenie	Stromość zbocza	
			$t_{p(L-H)}$	$t_{p(H-L)}$
Scalony	Twardo-prz.	DEIC420	3,1 ns	1,1 ns
Scalony	Twardo-prz.	DEIC421	6,0 ns	9,8 ns
Scalony	Twardo-prz.	DEIC515	8,0 ns	8,9 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	4xEL7104	14,2 ns	16,1 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	4xZXGD3003	4,2 ns	3,3 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	8xEL7457	12,6 ns	14,6 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	8xUCC27526	15,0 ns	12,3 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	8xUCC27526*	14,6 ns	11,4 ns
Dyskretny	Twardo-prz.	8xISL55110	13,8 ns	15,2 ns
Dyskretny	Miękko-prz.	4xFDMQ8203	13,2 ns	10,6 ns
Dyskretny	Miękko-prz.	4xFDG6332	5,6 ns	10,6 ns

Dodatkowo dla każdego drajwera wyznaczono trzy podstawowe parametry pasożytnicze (tabela 3) takie jak: rezystancję wyjściową  $R_G$ , indukcyjności doprowadzeń  $L_{DR}$  oraz wyjściowe pojemności międzyelektrodowe  $C_{OUT}$  (rys.6). Każdy z wymienionych parametrów został wyznaczony za pomocą precyzyjnego analizatora impedancji Agilent 4294A z przystawką Agilent 16047E. Zestaw ten umożliwia pomiar impedancji dwójników w szerokim zakresie wartości przy częstotliwości od 40 Hz do 110 MHz. Uzyskuje się to dzięki zastosowanej w analizatorze metodzie pomiaru impedancji, bazującej na tzw. metodzie mostka samoczynnie równoważonego (ang. *Auto Balancing Bridge*) [11, 13].

Tabela 3. Zestawienie parametrów pasożytniczych drajwerów

Oznaczenie drajwera	Parametry pasożytnicze		
	$R_G$ mΩ	$L_{DR}$ nH	$C_{OUT}$ pF
DEIC420	468,9	3,73	1260
DEIC421	184,9	4,46	1820
DEIC515	5900	7,39	127,2
4xEL7104	137,5	2,43	390,8
4xZXGD3003	983,2	3,62	280,9
8xEL7457	272,3	1,52	383,5
8xUCC27526	135,2	2,57	595,1
8xUCC27526*	121,4	1,61	357,1
8xISL5510	1585	4,56	343,8
4xFDMQ8203	111,2	1,77	458,2
4xFDG6332	255,3	2,82	368,6

Wszystkie pomiary wyjściowych parametrów pasożytniczych były wykonywane przy sinusoidalnym napięciu pomiarowym wynoszącym  $U = 100$  mV i częstotliwości 30 MHz. Temperatura otoczenia była zbliżona do 25°C. Rezystancja  $R_G$  zmierzona została na wyjściu drajwerów przy napięciu zasilania wynoszącym 12 V (dla drajwerów rezonansowych 6,5 V).



Rys.6. Uproszczony schemat pomiarowy parametrów pasożytniczych drajwerów

Przyjęta metoda pomiaru tej rezystancji wyjściowej nie jest zgodna z metodą stosowaną przez producentów poszczególnych drajwerów scalonych podawaną w notach katalogowych. Metoda katalogowa polega na obliczeniu rezystancji wyjściowej jako stosunku napięcia wyjściowego do prądu wyjściowego [14, 15, 16]. Przyjęta w artykule metoda pomiaru jest prostsza, jednakże uzyskane w ten sposób wyniki powinny być traktowane jako wartości szacunkowe. Spowodowane to jest pomiarem tej

rezystancji podczas przewodzenia małej wartości prądu drenu wyjściowego stopnia wzmacniającego wchodzącego w skład struktury wewnętrznej zarówno drajwerów scalonych jak i drajwerów małej mocy tworzących układy dyskretny. Na wyniki ma również wpływ długość i grubość warstwy miedzi odpowiednich wyprowadzeń drajwerów dyskretnych.

### Omówienie wyników badań

W artykule przedstawiono realizację, analizę właściwości i badania eksperymentalne wysokoczęstotliwościowych drajwerów tranzystorów MOSFET mocy stosowanych w falownikach rezonansowych o częstotliwości pracy 30 MHz. W ramach pracy przebadano łącznie 11 układów: trzy scalone drajwery dostępne w sprzedaży (DEIC420, DEIC421 i DEIC515), sześć dyskretnych twardo-przełączalnych konstrukcji (4xEL7457, 4xEL7104, 4xZXGD3003, 8xUCC27526, 8xUCC27526\* i 8xISL55110) i dwie konstrukcje rezonansowe (4xFDG6332 i 4xFDMQ8203). Wszystkie drajwery przebadano laboratoryjnie pod kątem strat mocy, przebiegów czasowych napięć wyjściowych, czasów przełączeń i propagacji. Dodatkowo, w ramach pracy wyznaczono parametry pasożytnicze każdego z analizowanych układów oraz wykonano analizę temperaturową przy użyciu kamery termowizyjnej.

Z charakterystyk przedstawionych na rysunku 4 można odczytać wartość mocy czynnej pobieranej przez scalone drajwery tranzystorów MOSFET dla częstotliwości pracy sięgającej 30 MHz. Dla biegu jałowego drajwery scalone DEIC420 i DEIC421 pobierają około 34 W, a drajwer DEIC515 pobiera 21 W. W przypadku obciążenia tych samych scalonych drajwerów bramką tranzystora DE275-501N16A pobierają one moc czynną wynoszącą ponad 55 W. Opracowane w ramach projektu dyskretny drajwery charakteryzują się ponad 6-krotnie mniejszym poborem mocy dla biegu jałowego. Zaproponowane dyskretny rozwiązania wyróżniają się również 3-krotnie mniejszym poborem mocy dla obciążenia bezindukcyjnym kondensatorem o pojemności 3 nF. Różnica w mocy pobieranej przez drajwery przy obciążeniu bezindukcyjnym kondensatorem mikowym, a bramką tranzystora MOSFET o oznaczeniu DE275-501N16A wynika z rzeczywistych parametrów obwodu bramkowego samego tranzystora, takich jak np. indukcyjności doprowadzeń, rezystancja bramki.

Analizując przebiegi czasowe napięcia wyjściowego (rys.5a-c) zarówno drajwera miękko-przełączalnego o oznaczeniu 4xFDG6332 jak i pozostałych scalonych i dyskretnych układów opisanych m. in. w literaturze [1, 2, 3, 15, 16], można zauważyć, iż charakteryzują się on zbliżonym kształtem napięcia wyjściowego, co pozwala na efektywne i niezawodne przełączanie bramki tranzystora MOSFET mocy. Wyjątek stanowi tutaj układ o oznaczeniu 4xZXGD3003 opisany w literaturze [1], którego wartości maksymalne napięcia wyjściowego dla biegu jałowego i obciążenia bramką tranzystora MOSFET serii DE wyniosły 7 V i 6 V. Zbyt niska wartość tego napięcia nie pozwala skutecznie i efektywnie przeładowywać wewnętrznej pojemności bramki tranzystora serii 501N16A. Ze względu na bardzo małe straty mocy i zbyt niskie napięcia wyjściowe, drajwer ten może być stosowany do sterowania tranzystorów mniejszej mocy.

Analizując pracę drajwera rezonansowego 4xFDG6332 dla biegu jałowego można zauważyć, że napięcie wyjściowe zawiera się w zakresie od -3 V do 10 V (rys.5a). Po obciążeniu wyjścia drajwera rezonansowego bezindukcyjnym kondensatorem mikowym o pojemności 3 nF, charakteryzuje się on sinusoidalnym kształtem tego

napięcia (o amplitudzie równej napięciu zasilania 6,5 V) podniesionym o składową stałą wynoszącą 2 V (rys.5b). Analizując ostatni tryb pracy podobodu drajwer-tranzystor (rys.5c) można zauważyć, że kształt napięcia wyjściowego drajwera jest dość niekorzystny. Wpływ na to mają rzeczywiste parametry bramki tranzystora serii DE275-501N16A. Napięcie sterujące zawiera się w przedziale od -3 V do 6 V.

Analizując rozkład temperatury na płytce PCB drajwera FDG6332 wykonanej w technologii thermal clad (rys.5d) można zauważyć, że największa temperatura występuje na wyjściowym stopniu wzmacniającym złożonym z czterech tranzystorów zgodnie ze schematem ideowym drajwera rezonansowego (rys.2). Maksymalna temperatura pracy wynosi w tym przypadku 122,5°C.

Analizując czasy przełączeń przedstawione w tabeli 1 można zauważyć, że nowo opracowane konstrukcje dyskretnych drajwerów charakteryzują się o około 50 % lepszą stromością sygnału wyjściowego. Przykładowo, scalony drajwer DEIC420 pobierający moc czynną na biegu jałowym równą 34 W charakteryzuje się stromością zbocza narastającego (*L-H*) na poziomie 3,6 ns i zbocza opadającego (*H-L*) na poziomie 3,7 ns. Dyskretny twardoprzełączalny drajwer o oznaczeniu 8xUCC27526\* pobierający moc czynną na biegu jałowym równą 4 W charakteryzuje się bardzo ostrym zboczem sygnału wyjściowego na poziomie 1,5 ns (dla 30 MHz).

Czasy propagacji zestawione w tabeli 2 przedstawiają w głównej mierze różnicę technologiczną w wykonaniu poszczególnych układów drajwerów. Scalone drajwery dostępne na rynku charakteryzują się czasami propagacji wynoszącymi około 3 ns - DEIC420. Opracowane dyskretnie rozwiązania mają czasy propagacji wynoszące kilkanaście nanosekund np. 8xUCC27526\* ok. 14 ns. Różnica pomiędzy scalonymi a dyskretnymi układami wynika w głównej mierze z technologii wykonania poszczególnych układów. Scalone drajwery są układami dużej i bardzo dużej skali integracji, wytworzone w technologii nanostrukturalnej i grubowarstwowej [14, 15]. Dyskretnie rozwiązania zostały skonstruowane z równoległe połączonych elementów małej mocy, w technologii thermal clad [12] jako płytki PCB o podłożu aluminiowym [1, 2, 3].

W tabeli 3 zestawiono pomiary parametrów pasożytniczych uzyskane za pomocą precyzyjnego analizatora impedancji. Porównując dane katalogowe producentów poszczególnych podzespołów drajwerów dyskretnych, można zauważyć, iż w pewnym stopniu (tylko rezystancja wyjściowa  $R_G$ ) odzwierciedlają one stan rzeczywisty parametrów pasożytniczych. Poszczególne producenci zarówno drajwerów scalonych, jak i dyskretnych układów małej mocy nie podają w specyfikacji technicznej pozostałych dwóch parametrów ( $C_{OUT}$  i  $L_{DR}$ ), które z punktu widzenia zastosowania tych układów w aplikacjach wysokoczęstotliwościowych są bardzo istotne. Dodatkowo, analizując wyniki pomiarów parametrów pasożytniczych (tabela 3), można zauważyć, iż nowe konstrukcje drajwerów dyskretnych nie odbiegają znacząco pod względem pasożytniczej indukcyjności wyjściowej  $L_{DR}$  – wszystkie nowe konstrukcje charakteryzują się zbliżonymi wartościami tego parametru. W przypadku drajwerów dyskretnych o oznaczeniach 4xEL7457, 8xUCC27526\* oraz 4xFDMQ8203 wartość indukcyjności wyjściowej  $L_{DR}$  jest bardzo mała, rzędu około 2 nH. Drajwery scalone charakteryzują się dużymi wartościami rezystancji wyjściowej  $R_G$  na poziomie od 185 mΩ (DEIC421) do 5,9 Ω (DEIC515), oraz dużymi wartościami pojemności wyjściowej  $C_{OUT}$  wynoszącymi odpowiednio 1260 pF, 1820 pF i 127 pF. Tak duże wartości tych dwóch parametrów pasożytniczych odpowiadają za większy pobór prądu przez te drajwery scalone, a w dalszej

konsekwencji za duże straty mocy (rys.4). Wszystkie zmierzone parametry pasożytnicze odpowiadają również za kształt i stromość napięcia wyjściowego drajwerów. Można zauważyć, że drajwery charakteryzujące się małymi wartościami rezystancji wyjściowej  $R_G$  oraz indukcyjności  $L_{DR}$  (tabela 3) dodatkowo charakteryzują się dużą stromością napięcia wyjściowego (tabela 1).

## Podsumowanie

Podsumowując, możliwe jest skonstruowanie wysokoczęstotliwościowego drajwera dedykowanego do zastosowań w falownikach np. klasy E lub DE złożonego z elementów małej mocy charakteryzującego się lepszymi parametrami niż drajwery scalone dostępne na rynku. Koszt opracowania nowych konstrukcji jest o połowę mniejszy niż koszt zakupu drajwerów scalonych dostępnych w sprzedaży.

**Autorzy:** mgr inż. Piotr Legutko, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Piotr.Legutko@polsl.pl

## LITERATURA

- [1] Legutko P.: Wysokoczęstotliwościowe drajwery tranzystorów MOSFET mocy, Przegląd Elektrotechniczny, 90 (2014), nr 5, 229-235
- [2] Legutko P.: drajwer tranzystora MOSFET mocy, Pomiary Automatyka Kontrolna, PAK, 60 (2014), nr 3, 188-191
- [3] Legutko P.: Nowe niskostratne drajwery tranzystorów MOSFET mocy, Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria ELEKTRYKA, 59 (2013), nr 2-3, 66-77
- [4] Balogh L.: Design and Application Guide For High Speed MOSFET Gate Driver Circuit, International Rectifier, Dokumentacja techniczna
- [5] Ridley R.: Gate Drive Design Tips, Power Systems Design Europe, December 2006, 14-18
- [6] Zhang Z., Eberle W., Liu Y.: A 1-MHz High-Efficiency 12 V Buck Voltage Regulator with a New Current-Source Gate Driver, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23 (2008), n.6, 2817-2827
- [7] Scoggins P.: A Guide to Designing Gate-Drive Transformers, Power Electronics Technology, January 2007, 32-36
- [8] Crebier J., Rouger N.: Loss Free Gate Driver Unipolar Power Supply for High Side Power Transistors, *IEEE Transactions of Power Electronics*, 23 (2008), n.3, 1565-1573
- [9] Tang T., Burkhart C.: Hybrid MOSFET/Driver for Ultra-Fast Switching, IEEE International Power Modulator Conference, 5/27/2008-5/31/2008, Las Vegas, 2008
- [10] Kaczmarczyk Z.: Poprawa właściwości energetycznych falowników klasy E przez maksymalizację wykorzystania tranzystora, Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007
- [11] Jurczak W.: Analiza właściwości falownika klasy E przy maksymalnych częstotliwościach przełączania tranzystorów mocy MOSFET, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, 2010
- [12] Opis technologii thermal clad dostępny pod adresem: <http://www.bergquistcompany.com>
- [13] Dane techniczne analizatora impedancji firmy Agilent dostępne pod adresem: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5968-3808E.pdf>
- [14] Dokumentacja techniczna drajwera DEIC420 dostępna pod adresem: <http://ixapps.ixys.com/DataSheet/deic420.pdf>
- [15] Dokumentacja techniczna drajwera DEIC515 dostępna pod adresem: <http://ixapps.ixys.com/DataSheet/deic515.pdf>
- [16] Dokumentacja techniczna tranzystora FDG6332 dostępna pod adresem: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FD/FDG6332C.pdf>
- [17] Dokumentacja techniczna tranzystora MOSFET DE275-501N16A dostępna pod adresem: <http://www.farnell.com/datasheets/66938.pdf>