

## Falownik klasy E (30 MHz, 300 W) z niskostratnym drajwerem hybrydowym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono realizację, analizę właściwości i badania eksperymentalne nowego typu niskostratnego drajwera hybrydowego dedykowanego dla tranzystorów MOSFET mocy serii DE pracujących w falowniku klasy E (30 MHz, 300 W). Nowa konstrukcja drajwera została wykonana w postaci obwodu drukowanego na płytce PCB o podłożu aluminiowym (ang. thermal clad) z wykorzystaniem dostępnych dyskretnych elementów małej mocy. Część połączeń została wykonana za pomocą tzw. bondingu kulkowego, drutem miedzianym o średnicy 75  $\mu\text{m}$ , co znacząco wpłynęło na zmniejszenie gabarytów obwodu PCB. W ramach pracy drajwer hybrydowy został przebadany pod kątem strat mocy, czasów przełączeń i propagacji, a otrzymane wyniki badań zestawiono z badaniami przeprowadzonymi dla drajwerów scalonych dostępnych w sprzedaży. Nowo opracowana konstrukcja drajwera charakteryzuje się stratami mocy wynoszącymi 18 W, maksymalną częstotliwością pracy 30 MHz, czasami przełączeń ok. 1 ns oraz niskim kosztem wykonania.

**Abstract.** This paper presents performance, property analysis, and experimental research of a new low-losses Hybrid Driver for DE-Series MOSFET power transistors. The new driver can operating in (30MHz, 300W) high-frequency class E inverter. The new hybrid driver design has been developed as a PCB circuit on a thermal clad technology with the use of discrete low power components. In the project tested three integrated drivers IXYS Corporation and additionally two discrete drivers and one hybrid driver have been designed. Additionally, in this paper presents characteristic power input by the drivers (fig.5) 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.6) and pictures of the thermal camera. At the end presents the measurements of parasitic parameters (inductances  $L_{DR}$ , capacities  $C_{OUT}$  and resistances  $R_{DR}$ ), switching and propagation times for all drivers. (**The Class E Inverter (30 MHz, 300 W) with Low-Losses and Fast Switching Hybrid Driver for DE Series MOSFET Transistors**).

**Słowa kluczowe:** falownik klasy E, niskostratny drajwer, tranzystor MOSFET, straty mocy, drajwer hybrydowy, cienkie połączenia drutowe, technologia platerowania.

**Keywords:** class E Inverter, low-losses driver, resonant inverter, MOSFET Transistor, power losses, thermal clad, hybrid driver, wire-bonding, ball-bonding.

### Wstęp

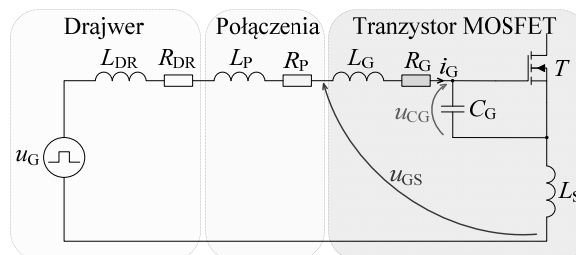
Problematyka niniejszego artykułu związana jest z wybranymi zagadnieniami energoelektroniki i elektroniki przemysłowej. W szczególności dotyczy sterowników bramkowych (ang. *Gate Driver*) – drajwerów tranzystorów MOSFET, dedykowanych do zastosowań w wysokosprawnych falownikach rezonansowych. Falowniki tego typu są stosowane do przekształcania energii elektrycznej przy częstotliwościach z zakresu od kilku kiloherców (kHz) do kilkudziesięciu megaherców (MHz) [1], [2], [3], [4].

Aby zapewnić wysoką sprawność falownika, tranzystor wymaga stabilnego punktu pracy i optymalnego przełączania związanego z warunkami (ZVS, ZVC). Wraz ze wzrostem częstotliwości przełączeń tranzystora MOSFET narastają problemy związane m. in. z utrzymaniem optymalnego przełączania, pełnym i odpowiednio szybkim przeładowaniem wewnętrznej pojemności bramki oraz stratami mocy występującymi podczas przełączeń. W celu zminimalizowania wpływu częstotliwości na proces przełączania tranzystora MOSFET stosuje się dedykowane i wyspecjalizowane układy nazywane potocznie drajwerami (ang. *Driver*) lub sterownikami bramkowymi [1], [2], [3]. Układy te zapewniają możliwie efektywne przełączanie bramki tranzystora (zmniejszenie strat) z określoną (zadaną) częstotliwością i wypełnieniem zależnym od wymaganego punktu pracy tranzystora MOSFET. Draywery powinny zapewniać również możliwie krótkie czasy przełączeń.

Obecnie na rynku dostępnych jest wiele gotowych drajwerów scalonych z szerokiego zakresu częstotliwości. Draywery małej mocy, dedykowane do zastosowań z częstotliwościami sięgającymi kilkudziesięciu kiloherców (kHz), charakteryzują się co prawda krótkimi czasami przełączeń i czasami propagacji, ale nie nadają się do zastosowań powyżej kilkunastu MHz. Powodem tego jest zwykle zbyt mała wartość szczytowego prądu wyjściowego i dopuszczalnej mocy strat. Draywery scalone dedykowane

do częstotliwości powyżej kilkunastu MHz charakteryzują się znacznie wyższą wartością dopuszczalnej mocy strat (nawet kilkudziesięciu watów), a ich czasy przełączeń mieszczą się w przedziale od kilku do kilkunastu nanosekund.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat zastępczy podobwodu drajwer-tranzystor MOSFET służący do wyjaśnienia zjawisk występujących przy przełączaniu bramki zaworu energoelektronicznego.



Rys. 1. Schemat zastępczy podobwodu 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  $I_G$ , a straty mocy w bramce tranzystora jak i samym draywerze mogą być oszacowane na podstawie zależności (1) i (2). Można zauważyć, że 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 draywerze.

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

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

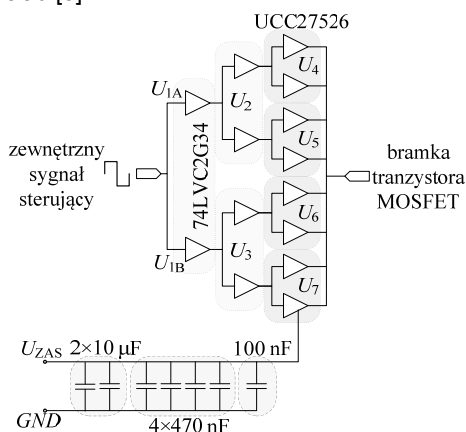
gdzie:  $I_{G(RMS)}$  – wartość skuteczna prądu bramki tranzystora,  $R_G$  – rezystancja bramki tranzystora,  $U_{GS}$  – napięcie bramka-źródło,  $f$  – częstotliwość przełączeń,  $Q_G$  – ładunek bramki tranzystora,  $R_{DR}$  – rezystancja wyjściowa drajwera.

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 przeladowania wewnętrznej pojemności bramki  $C_G$  jest konieczność minimalizacji indukcyjności doprowadzeń tranzystora, która wpływa na ograniczenie prądu przeladującego.

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. Nowa konstrukcja drajwera powinna charakteryzować się krótkimi czasami przełączeń – na poziomie pojedynczych nanosekund, małymi stratami mocy – na poziomie kilkunastu watów. W ramach pracy zarejestrowano przebiegi czasowe napięcia wyjściowego drajwera, wykreślono charakterystyki mocy czynnej pobieranej z zasilania, analizie poddano czasy przełączeń i propagacji sygnału wyjściowego, zbadano rozkład temperatury na płytce drajwera oraz wyznaczono parametry pasożytnicze ( $L_{DR}$ ,  $C_{OUT}$ ,  $R_G$ ) poszczególnych układów.

### Hybrydowy drajwer 8xUCC27526hybrid

W ramach badań zaprojektowano i wykonano niskostratny hybrydowy drajwer (twardo-przełączalny), który zostały następnie porównany z trzema znanymi scalonymi drajwerami firmy IXYS [8] dostępnymi na rynku oraz dwoma dyskretnymi drajwerami opracowanymi przez autora niniejszego artykułu w ramach dotychczasowych badań [1], [2], [3]. Łącznie przebadano sześć układów drajwerów. Wszystkie układy scalone, które posłużyły do wykonania prototypu nowego hybrydowego drajwera zostały wyselekcjonowane na podstawie starannego przeglądu dostępnych na rynku układów stosowanych do sterowania tranzystorów MOSFET małej mocy. Nowo opracowany drajwer został wykonany w postaci jednowarstwowego obwodu drukowanego w technologii platerowania ang. thermal clad [5].

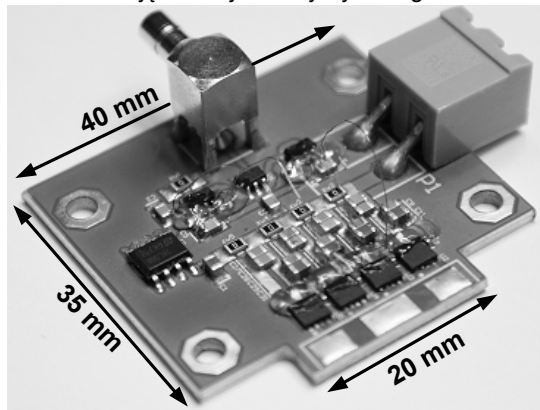


Rys.2. Schemat ideowy drajwera hybrydowego

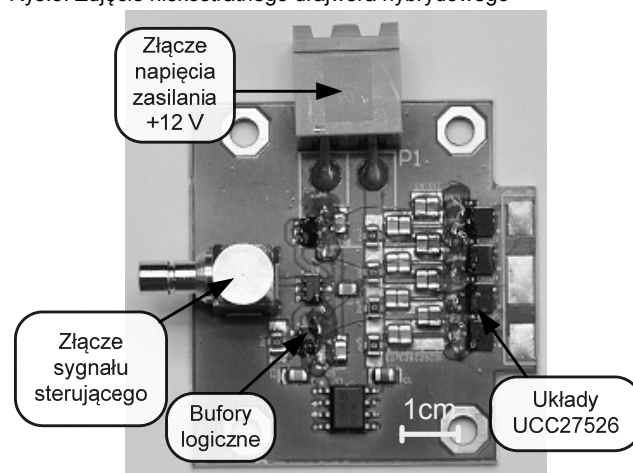
Płytkę o grubości 1,5 mm zawiera w swej strukturze podkład aluminiowy przylegający do radiatora, izolator ceramiczny 100 µm oraz roboczą warstwę miedzi o grubości 35 µm [5]. Takie rozwiązanie konstrukcyjne pozwala na efektywne odprowadzenie ciepła wydzielonego przez poszczególne układy scalone [5]. Dodatkowo, część połączeń na płytce PCB - sygnały sterujące układami małej mocy, została wykonana w powszechnie stosowanej technice bondingu kulkowego (ang. Ball-Bonding) [6].

Średnica roboczego drutu wykonanego z miedzi wynosiła 75 µm, a jego wytrzymałość prądowa była rzędu 2 A.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat ideowy drajwera hybrydowego 8xUCC27526hybrid. W celu zminimalizowania indukcyjności pasożytniczych w torze zasilania drajwera, a tym samym uzyskania większej stromości napięcia wyjściowego drajwera hybrydowego, pod każdym z czterech układów UCC27526 [9] umieszczono siedem kondensatorów o pojemnościach od 470 nF do 10 µF połączonych równolegle (2x10 µF, 4x470 nF, 1x100 nF), stanowiących baterię kondensatorów o łącznej pojemności 21,98 µF. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono zdjęcia drajwera hybrydowego.



Rys.3. Zdjęcie niskostratnego drajwera hybrydowego



Rys.4. Zdjęcie drajwera hybrydowego z opisem podzespołów

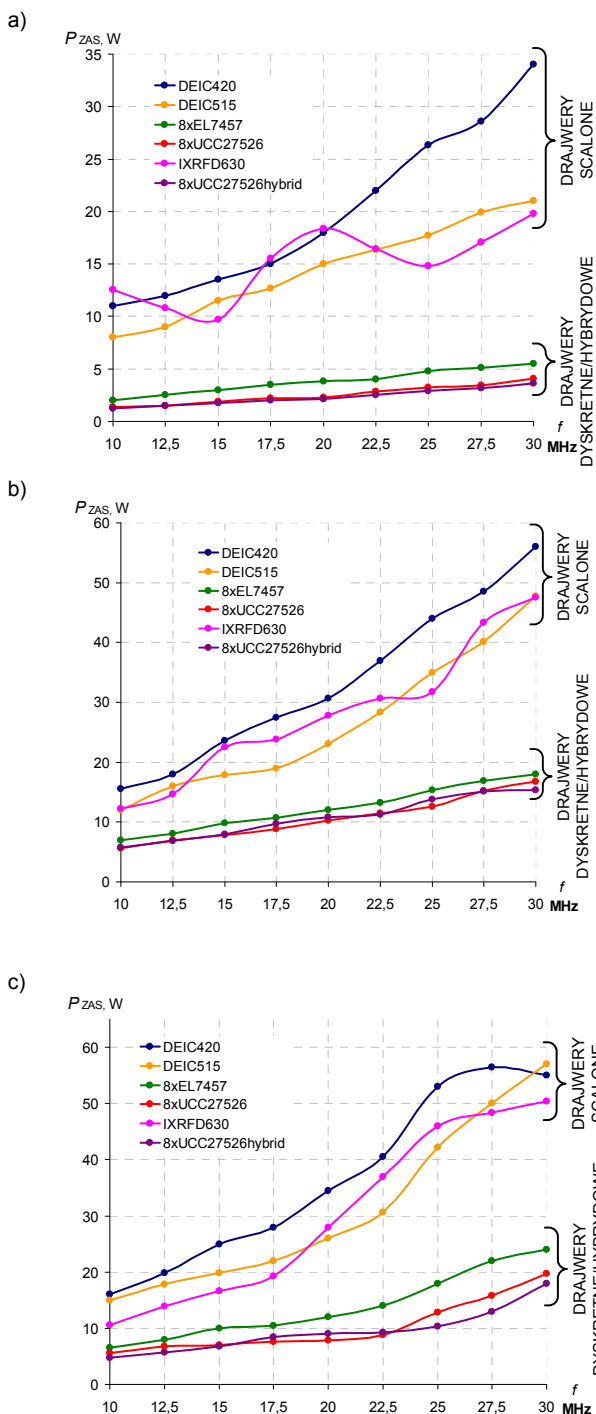
Wymiary jak i kształt płytki PCB drajwera hybrydowego o oznaczeniu 8xUCC27526hybrid, zostały dostosowane do dedykowanej obudowy do zalewania elektroniki o oznaczeniu HM-1596B103. Obudowa ta została w całości wykonana z materiału ABS [11] i jest powszechnie stosowana w elektronice, gdyż charakteryzuje się dobrymi właściwościami izolacyjnymi oraz odpowiednio dużą twardością. Wykonany w ten sposób drajwer hybrydowy, w kolejnym etapie prac został pokryty warstwą kleju strukturalnego o nazwie Loctite i oznaczeniu SI5145. Do dodatkowych zalet kleju Loctite zaliczyć można fakt, iż nie powoduje on korozji, przeznaczony jest do pracy w temperaturze do +180°C, posiada twardość wg. Shore'a wynoszącą 45. Jego współczynnik rozszerzalności cieplnej wynosi  $2,8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , a współczynnik przewodności cieplnej jest równy 0,2 W/mK.

Drajwer hybrydowy zasilony był z napięcia równego +12 V, sygnał sterujący był podawany przez odpowiednie złącze z zewnętrznego generatora przebiegu prostokątnego o częstotliwości 30 MHz i wypełnieniu 50 %. Opis pozostałych porównywanych konstrukcji drajwerów

scalonych, jak i dyskretnych znaleźć można w m. in. w literaturze [1], [2], [3], [8].

### Badania laboratoryjne drajwerów

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 [4], [10]. W ramach pracy przebadano następujące układy drajwerów twardo-przełączalnych: scalone (DEIC420, DEIC515, IXRFD630), dyskretnie (8xEL7457, 8xUCC27526) i hybrydowe (8xUCC27526hybrid).



Rys.5. Charakterystyki strat mocy drajwerów dla trzech stanów pracy: a) bieg jałowy, b) obciążenie bezindukcyjną pojemnością 3 nF, c) obciążenie bramką tranzystora DE275-501N16A

Badania laboratoryjne drajwerów dotyczyły: analizy strat mocy układów, przebiegów czasowych napięć wyjściowych, czasów przełączeń i propagacji, analizy temperaturowej i podstawowych parametrów pasożytniczych.

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

Na rysunku 6 zamieszczono oscylogramy napięcia wyjściowego drajwera hybrydowego 8xUCC27526hybrid (rys.6a-c) dla trzech stanów pracy oraz zdjęcie z kamery termowizyjnej przedstawiające rozkład temperatury na płycie PCB drajwera (rys.6d) dla pracy pod obciążeniem bramką tranzystora MOSFET serii DE. Przebiegi czasowe napięcia wyjściowego dla pozostałych badanych drajwerów znaleźć można m. in. w literaturze [1], [2], [3].

Analizując rysunek 6a można zauważyć, że hybrydowy układ drajwera podczas pracy na biegu jałowym z częstotliwością 30 MHz charakteryzuje się korzystnym kształtem prostokątnego napięcia wyjściowego, którego wartość maksymalna wynosi 15 V, a wypełnienie ok. 41%. Tak wysoka wartość napięcia wyjściowego pozwala sterować bramką tranzystora MOSFET np. serii DE275-501N16A. W przypadku obciążenia wyjścia drajwera hybrydowego kondensatorem  $C_G = 3 \text{ nF}$  (rys.6b) następuje znaczne odkształcenie napięcia wyjściowego, a wartość maksymalna spada do około 12 V. Na rysunku 6c przedstawiono oscylogram napięcia wyjściowego drajwera obciążonego bramką tranzystora. Wartość maksymalna napięcia w tym przypadku wynosi około 15 V. Kształt napięcia wyjściowego jest quasi-sinusoidalny. Analizując zdjęcie z kamery termowizyjnej (rys.6d) można zauważyć, że najwyższa temperatura panuje na obudowach układów scalonych UCC27526, wynosi ona ok. 128°C. Maksymalna dopuszczalna temperatura pracy układów scalonych UCC27526 [9], wynosi 140°C, zatem zaprojektowany drajwer hybrydowy może pracować długotrwale np. w układzie falownika klasy E.

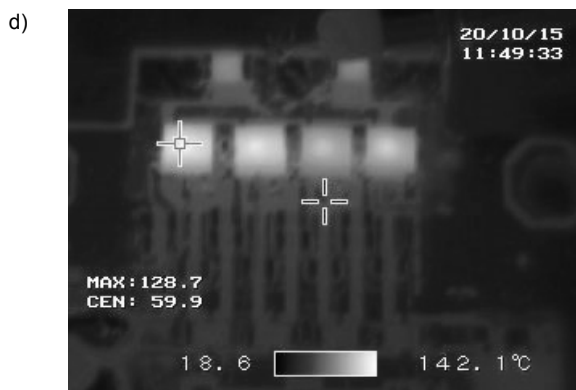
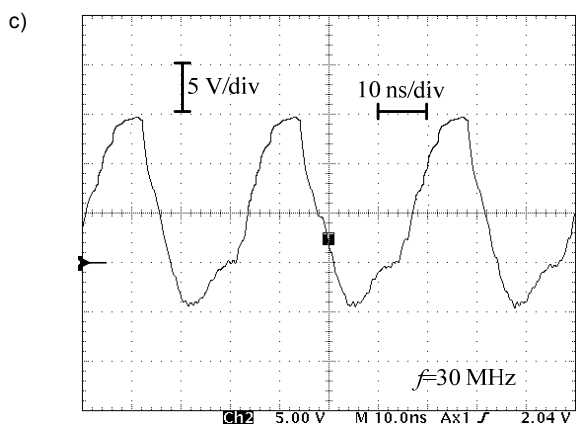
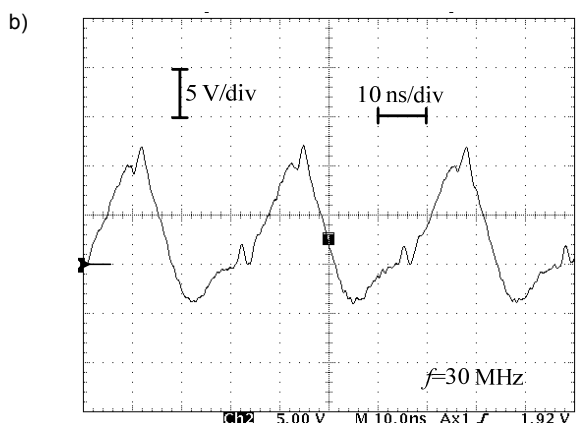
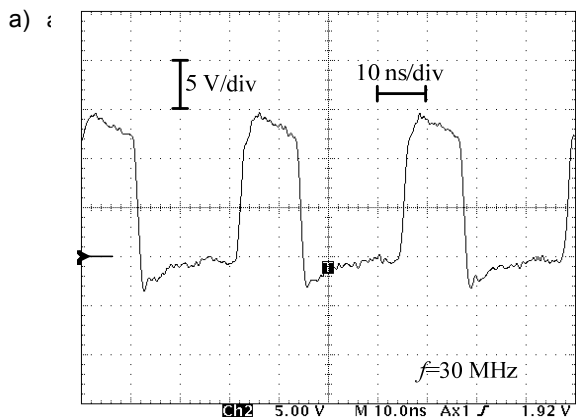
W ramach badań analizie poddano również czasy przełączeń poszczególnych układów (tabela 1) zarówno dla zbocza narastającego (L-H) jak i opadającego (H-L). Pomiar stromości sygnałów wyjściowych wszystkich drajwerów był wykonywany dla pracy na biegu jałowym, w przedziale od 10% do 90% wartości maksymalnej sygnału wyjściowego przy częstotliwości pracy wynoszącej 30 MHz.

Tabela 1. Zestawienie czasów przełączeń

Typ drajwera	Oznaczenie	Stromość zbocza	
		$t_{f(L-H)}$	$t_{f(H-L)}$
Scalony	DEIC420	4 ns	4 ns
Scalony	DEIC515	2 ns	3 ns
Scalony	IXRFD630	2 ns	12 ns
Dyskretny	8xEL7457	2 ns	3 ns
Dyskretny	8xUCC27526	2 ns	1 ns
Hybrydowy	8xUCC27526hybrid	1 ns	1 ns

Dodatkowo wykonano również pomiar czasów propagacji (tabela 2) sygnałów wyjściowych poszczególnych układów względem zadanego sygnału wejściowego. Zewnętrzny, wejściowy 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.6. Przebiegi czasowe napięcia wyjściowego drajwera hybrydowego 8xUCC27526hybrid (30 MHz) dla: a) biegu jałowego; b) obciążenia kondensatorem 3 nF; c) po podłączeniu bramki tranzystora; d) zdjęcie termowizyjne

Tabela 2. Zestawienie czasów propagacji

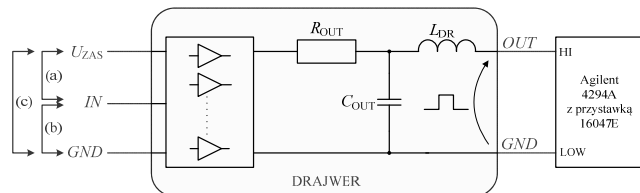
Typ drajwera	Oznaczenie	Czasy propagacji	
		$t_{p(L-H)}$	$t_{p(H-L)}$
Scalony	DEIC420	3 ns	1 ns
Scalony	DEIC515	8 ns	9 ns
Scalony	IXRFD630	8 ns	3 ns
Dyskretny	8xEL7457	13 ns	15 ns
Dyskretny	8xUCC27526	15 ns	12 ns
Hybrydowy	8xUCC27526hybrid	14 ns	12 ns

Dodatkowo dla każdego drajwera wyznaczono trzy podstawowe parametry pasozytnicze (tabela 3) takie jak: rezystancję wyjściową  $R_G$ , indukcyjności doprowadzeń  $L_{DR}$  oraz wyjściowe pojemności międzyelektrodowe  $C_{OUT}$  (rys.7). Każdy z wymienionych parametrów został wyznaczony za pomocą 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*) [4], [7].

Wszystkie pomiary wyjściowych parametrów pasozytniczych 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.

Tabela 3. Zestawienie parametrów pasozytniczych drajwerów

Oznaczenie drajwera	Parametry pasozytnicze		
	$R_G$ mΩ	$L_{DR}$ nH	$C_{OUT}$ pF
DEIC420	469	4	1260
DEIC515	5900	7	127
IXRFD630	1240	6	562
8xEL7457	272	2	384
8xUCC27526	135	3	595
8xUCC27526hybrid	106	1	287

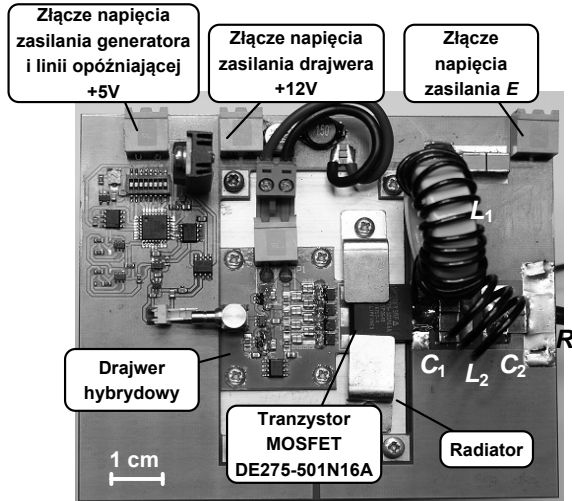


Rys.7. Uproszczony schemat pomiarowy parametrów pasozytniczych drajwerów

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. Przyjęta w artykule metoda pomiaru jest prostsza, jednakże uzyskane w ten sposób wyniki powinny być traktowane jako szacunkowe, gdyż spowodowane jest to 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/hybrydowe. Na wyniki ma również wpływ długość i grubość warstwy miedzi odpowiednich wyprowadzeń drajwerów dyskretny/hybrydowych.

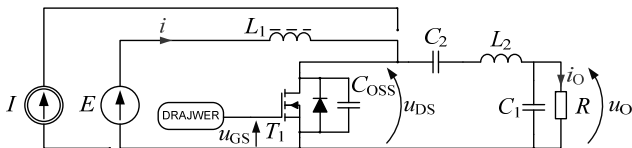
### Badania laboratoryjne falownika klasy E (30MHz, 300W)

Na rysunku 8 przedstawiono zdjęcie laboratoryjnego falownika klasy E (30 MHz, 300 W), w którym tranzystor MOSFET mocy serii DE o oznaczeniu DE275-501N16A sterowany był za pomocą drajwera hybrydowego. Jak wykazano w poprzednim punkcie, drajwer ten charakteryzował się najlepszymi parametrami energetycznymi i dynamicznymi w stosunku do pozostałych badanych układów.



Rys.8. Laboratoryjny układ falownika klasy E (30 MHz, 300 W)

Laboratoryjny falownik klasy E (rys.8) jest układem o topologii podstawowej, którego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 9.



Rys.9. Schemat laboratoryjnego falownika klasy E

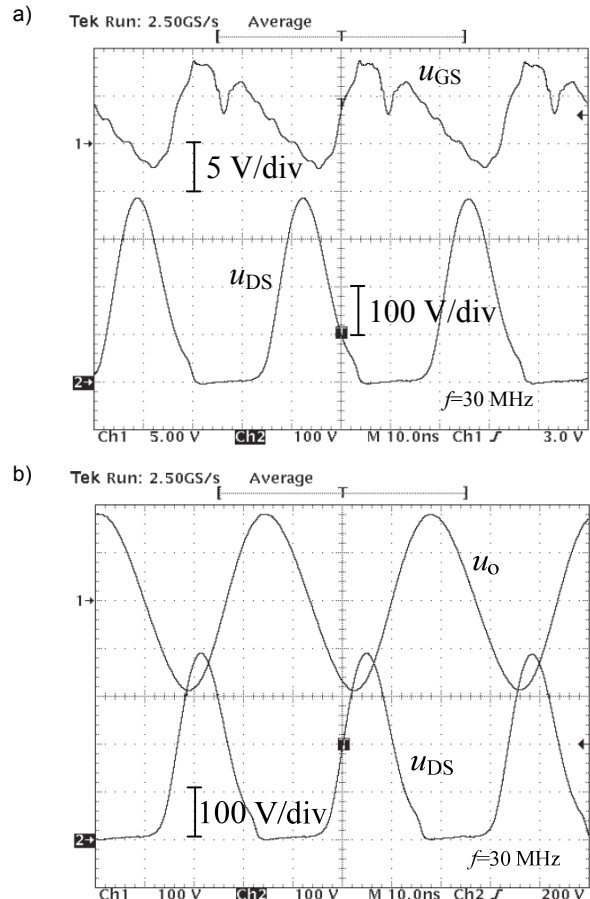
W tabeli 4 zestawiono parametry falownika klasy E zmierzone za pomocą precyzyjnego analizatora impedancji Agilent 4294A przy częstotliwości pracy układu wynoszącej 30 MHz i komutacji optymalnej.

Tabela 4. Zestawienie parametrów falownika klasy E dla pracy optymalnej

Parametr	Wartość	Uwagi
$L_1$	4,98 $\mu$ H	Indukcyjność dławika $L_1$
$R_{P1}$	0,05 $\Omega$	Rezystancja pasożytnicza $L_1$
$L_2$	171 nH	Indukcyjność cewki $L_2$
$R_{P2}$	0,21 $\Omega$	Rezystancja pasożytnicza $L_2$
$C_1$	5,05 nF	Pojemność kondensatora $C_1$
$C_2$	314 pF	Pojemność kondensatora $C_2$
$R_{P2}$	0,02 $\Omega$	Rezystancja pasożytnicza $C_2$
$R$	52,4 $\Omega$	Rezystancja odbiornika $R$
$L_R$	11,1 nH	Indukcyjność pasożytnicza $R$

Na rysunku 10 przedstawiono oscylogramy napięcia wyjściowego drajwera hybrydowego i tranzystora MOSFET dla częstotliwości pracy falownika klasy E wynoszącej 30 MHz. Do rejestracji przebiegów z rysunku 10 zastosowano oscyloskop Tektronix TDS620B. Pomiary były wykonywane dla pracy optymalnej falownika przy napięciu zasilania wynoszącym około 100 V i częstotliwości pracy układu wynoszącej 30 MHz. Za pomocą multimetrów cyfrowych (Sanwa PC5000) wykonywany był pośredni pomiar mocy wejściowej falownika. Pomiar mocy zasilania  $P_{ZAS}$  drajwera realizowano identycznie. Pomiar mocy

wyjściowej  $P_{WY}$  był wykonywany za pomocą dedykowanego watomierza Bird 4421 z głowicą typu 4027A25M.



Rys.10. Przebiegi napięć falownika klasy E dla pracy optymalnej: a) napięcie bramka-źródło  $u_{GS}$  i napięcie tranzystora  $u_{DS}$ , b) napięcie wyjściowe  $u_O$  i napięcie tranzystora  $u_{DS}$

Ponadto, w tabeli 5 zestawiono zmierzone parametry badanego falownika klasy E. Pomiary były wykonywane podczas pracy optymalnej falownika, w stanie ustalonym, za pomocą wymienionej wcześniej aparatury pomiarowej. Częstotliwość pracy falownika wynosiła 30 MHz, wypełnienie sygnału sterującego wynosiło ok. 50%, temperatura otoczenia 22°C. Temperatura radiatora wynosiła ok. 35°C, chłodzenie wymuszonym przepływem powietrza.

Tabela 5. Zestawienie zmierzonych parametrów falownika klasy E

Parametr	Wartość	Uwagi
$E$	101,3 V	Napięcie zasilania
$I$	2,98 A	Średni prąd zasilania
$U_{DSm}$	385 V	Wartość maksymalna napięcia $u_{DS}$
$P_{WE}$	301,8 W	Moc wejściowa – wzór (1)
$P_{WY}$	256 W	Moc wyjściowa
$P_{DR}$	18,4 W	Moc zasilania drajwera
$\eta_D$	84,9%	Sprawność drenowa – wzór (2)
$\eta$	79,9%	Sprawność całkowita – wzór (3)

Poniżej przedstawiono odpowiednie zależności pozwalające wyznaczyć parametry układu falownika zestawione w tabeli 5.

$$(3) \quad P_{WE} = E \cdot I$$

$$(4) \quad \eta_D = \frac{P_{WY}}{P_{WE}} \cdot 100\%$$

$$(5) \quad \eta = \frac{P_{WY}}{P_{WE} + P_{DR}} \cdot 100\%$$

Analizując dane zestawione w tabeli 5 można zauważyć, że drajwer hybrydowy 8xUCC27526hybrid pracujący w falowniku klasy E pobiera moc zasilania  $P_{ZAS}=18,4$  W. Wartość tej mocy jest o 0,5 W większa niż wyznaczona wcześniej w czasie badań drajwera obciążonego tylko bramką tranzystora MOSFET serii DE (rys.5c). Moc zasilania podczas pracy z częstotliwością 30 MHz i obciążeniem bramką tranzystora DE275-501N16A wyniosła wówczas 17,9 W. Niewielki wzrost mocy jest uzasadniony wzrostem całkowitego ładunku bramki  $Q_G$  (efekt Millera) podczas przełączania tranzystora MOSFET falownika. Wzrost ładunku  $Q_G$  jest niewielki, ponieważ tranzystor przełącza się w warunkach komutacji maksymalnie miękkiej.

Wartość mocy zasilania drajwera hybrydowego ma wpływ na sprawność całkowitą falownika obliczaną zgodnie z zależnością (5). Sprawność całkowita  $\eta$  falownika klasy E, w którym tranzystor MOSFET serii DE275-501N16A przełączany był za pomocą drajwera 8xUCC27526hybrid wyniosła 79,9%, a sprawność drenowa  $\eta_D$  obliczana zgodnie z zależnością (4) i uwzględniająca jedynie moce wyjściową i wejściową wyniosła 84,9%. Można przypuszczać, że zastosowanie innego typu drajwera np. scalonego DEIC420, do sterowania tranzystorem tego falownika pogorszyłoby wartości otrzymanych sprawności, gdyż scalony drajwer DEIC420 charakteryzuje się stratami mocy na poziomie 55 W (rys.5).

## Podsumowanie

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 sześć układów: trzy scalone drajwery dostępne w sprzedaży (DEIC420, DEIC515 i IXRFD630), dwa dyskretne układy (4xEL7457, 8xUCC27526) i jedną konstrukcję hybrydową (8xUCC27526hybrid). Wszystkie drajwery przebadano laboratoryjnie pod kątem strat mocy, przebiegów czasowych napięć wyjściowych, czasów przełączeń i propagacji, wyjściowych parametrów pasożytniczych oraz rozkładu temperatury.

Z charakterystyk przedstawionych na rysunku 4 można odczytać wartość mocy czynnej pobieranej przez scalone drajwery tranzystorów MOSFET dla częstotliwości pracy sięgającej 30 MHz. Można zauważyć, że skonstruowane przez autora niniejszego artykułu drajwery dyskretne/hybrydowe charakteryzują się znacznie mniejszym poborem mocy. Najlepszym z pośród badanych układów okazał się drajwer hybrydowy 8xUCC27526hybrid pobierający moc na poziomie 17,9 W (rys. 5c) dla obciążenia bramką tranzystora MOSFET serii DE i częstotliwości 30 MHz.

Analizując czasy przełączeń przedstawione w tabeli 1 można zauważyć, że nowo opracowane konstrukcje dyskretne/hybrydowe 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 zboczy na poziomie 4 ns. Hybrydowy, twardo-przełączalny drajwer o oznaczeniu 8xUCC27526hybrid pobierający moc czynną na biegu jałowym równą 4 W charakteryzuje się bardzo ostrym zboczem sygnału wyjściowego na poziomie 1 ns (dla 30 MHz).

Czasy propagacji zestawione w tabeli 2 przedstawiają w głównej mierze różnicę technologiczną w wykonaniu poszczególnych układów drajwerów. Różnica pomiędzy scalonymi a dyskretnymi układami wynika głównie z technologii wykonania poszczególnych układów. Scalone drajwery są układami dużej i bardzo dużej skali integracji, wytworzone w technologii nanostrukturalnej i grubowarstwowej [8]. Dyskretne rozwiązania zostały skonstruowane z równolegle połączonych elementów małej mocy, w technologii thermal clad [5] jako płytki PCB o podłożu aluminiowym [1], [2], [3].

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 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 469 m $\Omega$  (DEIC420) do 5,9  $\Omega$  (DEIC515), oraz dużymi wartościami pojemności wyjściowej  $C_{OUT}$  wynoszącymi odpowiednio 1260 pF i 127 pF. Tak duże wartości tych parametrów pasożytniczych odpowiadają za większy pobór prądu przez te drajwery scalone, i w konsekwencji za duże straty mocy (rys.5). 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).

Ponadto zaprojektowany drajwer hybrydowy został pozytywnie zweryfikowany na w układzie laboratoryjnego falownika klasy E (rys.8 i rys.9). Całkowita sprawność laboratoryjnego układu falownika klasy E wyniosła 79,9%. Moc zasilania drajwera hybrydowego wyniosła 18,4 W.

**Autorzy:** dr 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*, PE Nr 5/2014, R.90, ISSN 0033-2097 str. 229-235
- [2] Legutko P.: Niskostratny drajwer tranzystora MOSFET mocy, *Pomiary Automatyka Kontrolna*, PAK 2014 Nr 3/2014 VOL.60, ISSN 0032-4140, INDEKS 36958, str.188-191
- [3] Legutko P.: Nowe niskostratne drajwery tranzystorów MOSFET mocy, *Prace Naukowe Politechniki Śląskiej*, Seria ELEKTRYKA 2013 R.59 zeszyt 2-3 str.66-77
- [4] Jurczak W.: Analiza właściwości falownika klasy E przy maksymalnych częstotliwościach przełączania tranzystorów mocy MOSFET, *Rozprawa doktorska*
- [5] Opis technologii thermal clad dostępny pod adresem: <http://www.bergquistcompany.com>
- [6] Opis technologii bondingu kulkowego dostępny pod adresem: <http://www.tpt-wirebonder.com>
- [7] Dane techniczne analizatora impedancji firmy Agilent dostępny pod adresem: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5968-3808E.pdf>
- [8] Dokumentacja techniczna drajwerów firmy IXYS dostępna pod adresem: <http://ixapps.ixys.com>
- [9] Dokumentacja techniczna układu UCC27526 dostępna pod adresem: <http://www.ti.com>
- [10] Dokumentacja techniczna tranzystora MOSFET DE275-501N16A dostępna pod adresem: <http://www.ixys.com>
- [11] Dokumentacja techniczna materiału ABS dostępna pod adresem: <http://www.absmaterials.com>