

doi:10.15199/48.2022.05.09

Symulacja termiczna sterownika bramkowego tranzystora MOSFET mocy pracującego z częstotliwością 30 MHz

Streszczenie. W artykule przedstawiono opis i sposób realizacji symulacji termicznej niskostratnego sterownika bramkowego małej mocy mogącego pracować z częstotliwością sięgającą 30 MHz. Symulacja komputerowa rozkładu temperatur na płytce PCB obwodu drajwera została przeprowadzona w celu określenia maksymalnej, dopuszczalnej temperatury pracy układu. Wyniki przeprowadzonej symulacji termicznej dla stanu ustalonego zostały zweryfikowane na stanowisku badawczym przy użyciu kamery termowizyjnej. W wyniku symulacji termicznej wykonanej w oprogramowaniu ANSYS otrzymano rozkład temperatury na płytce PCB wykonanej z materiału IMS (o podłożu aluminiowym), określono temperatury maksymalne dla układów małej mocy. W wyniku badań laboratoryjnych określono straty mocy w niskostratnym sterowniku bramkowym pracującym dla maksymalnej częstotliwości 30 MHz oraz zweryfikowano otrzymane wyniki symulacyjne.

Abstract. This paper presents a FEM simulation of low-losses MOSFET driver. This gate driver can run at 30MHz frequency and was made with eight low power MOSFET drivers UCC27256. The steady state thermal simulation was made in ANSYS software used a 3D driver model (figure 6,7) performed in Inventor Professional software. The 3D model of MOSFET driver reflects the properties of the real circuit (figure 5) including: PCB board was made IMS material, low power MOSFET drivers UCC27256 and all other items of driver. The steady state thermal simulation of low-losses driver 8xUCC27256 was carried out in order to determine the maximum permissible operating temperature of the circuit. Additionally, in this paper presents a temperature distribution of PCB board of MOSFET driver (figure 11), maximum temperature of PCB board (figure 12,13) and characteristic of power losses for MOSFET driver for frequency range from 10 MHz to 30 MHz (figure 10). The results of FEM thermal simulation were compared to real infrared photo (figure 17) which was made for a maximum operating frequency 30MHz. (**The steady state thermal simulation of gate MOSFET driver operating at 30 MHz**)

Słowa kluczowe: wysoka częstotliwość, niskostratny sterownik bramkowy, sterownik MOSFET, symulacja termiczna, metoda elementów skończonych, falownik rezonansowy, symulacja termiczna w stanie ustalonym.

Keywords: high frequency, FEM analysis, low-losses driver, MOSFET driver, thermal simulation, finite element method, resonance inverter, steady state thermal simulation.

Wprowadzenie

Symulacje komputerowe odgrywają coraz większą rolę w bardzo wielu gałęziach przemysłu i stały się nieodzownym elementem praktycznie każdego projektu inżynierskiego. Znalazły one powszechne zastosowanie m.in. przy modelowaniu i tworzeniu silników spalinowych, turbin, wymienników ciepła, rurociągów oraz elementów elektronicznych [1,2,3]. W wielu przypadkach, wykorzystuje się wyniki z analizy termicznej do obliczeń naprężeń cieplnych, czyli naprężeń wywołanych przepływem ciepła i rozszerzalnością cieplną.

Niniejszy artykuł przedstawia sposób wykonania analizy termicznej dla konstrukcji wysokoczęstotliwościowego sterownika bramkowego wykonanego w postaci obwodu PCB. Konstrukcja sterownika bramkowego oraz jego analiza elektryczna tzn. pomiary strat mocy, czasy przełączeń, sprawność itp. dla maksymalnej częstotliwości pracy (30 MHz) była już wcześniej opisana m.in. w pracy [4,5]. Na potrzeby niniejszego artykułu przytoczono jedynie podstawowe i niezbędne informacje na ten temat.

Do wykonania analizy termicznej ang. *Steady-State Thermal* obwodu drajwera postanowiono wykorzystać jeden z gotowych modułów do statycznej analizy cieplnej dostępny w oprogramowaniu ANSYS [2,3]. Wspomniana analiza cieplna umożliwia przeprowadzenie obliczeń w stanie ustalonym układu. W wyniku analizy uzyskuje się rozkład temperatury np. na płytce PCB, temperaturę minimalną i maksymalną układu oraz strumienie ciepła i obciążenia termiczne pojedynczego elementu, jak również całego analizowanego obiektu.

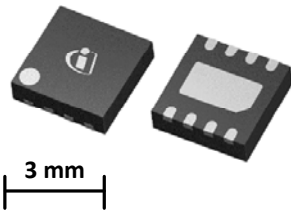
Do prawidłowego przeprowadzenia analizy termicznej należy uwzględnić zjawiska konwekcji, promieniowania cieplnego i przepływu ciepła na jednostkę powierzchni. Dodatkowo należy również uwzględnić wszystkie źródła ciepła oraz temperatury graniczne. Analiza termiczna ang. *Steady-State Thermal* może być analizą liniową przy zachowaniu stałych właściwościach materiału [2,3], lub

nieliniową o właściwościach materiału zależnych od temperatury [2,3]. Właściwości termiczne większości materiałów zmieniają się wraz z temperaturą, dlatego analiza termiczna zazwyczaj jest nieliniowa [2,3].

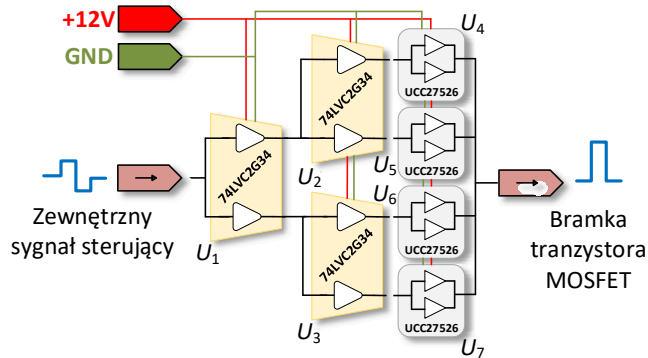
W kolejnych częściach niniejszego artykułu przedstawiony zostanie sposób wykonania analizy termicznej układu sterownika bramkowego w stanie ustalonym, parametry materiałowe oraz konstrukcja dyskretnego sterownika bramkowego oraz wyniki analizy cieplnej. W końcowej części artykułu zamieszczone zostaną wyniki porównania symulacji termicznej z oprogramowania ANSYS ze zdjęciem termowizyjnym zarejestrowanym w trakcie badań laboratoryjnych na rzeczywistym układzie.

Niskostratny sterownik bramkowy własnej konstrukcji

W tym rozdziale pokrótce omówiona zostanie konstrukcja sterownika bramkowego o oznaczeniu 8xUCC27256 złożonego z elementów małej mocy. Szczegółowa konstrukcja tego układu została przedstawiona m.in. w publikacji [4,5]. Drajwer ten, będący konstrukcją własną autora niniejszej publikacji, reprezentuje grupę układów twardo-przełączalnych i powstał na bazie czterech układów scalonych (UCC27256) firmy Texas Instruments. Każdy układ scalony zawiera po dwa szybkie sterowniki charakteryzujące się czasami przełączeń na poziomie ok. 6 ns i maksymalnym prądem wyjściowym ok. 5 A. Pojedynczy układ scalony zamknięty jest w obudowie WSON-8 o wymiarach 3,15×3,15 mm [6] która pozwala dość efektywnie odprowadzać ciepło z układu dzięki polu metalu (ang. *Thermal pad*) znajdującemu się na dolnej stronie obudowy (rys.1). Rezystancja cieplna między złączem a polem lutowniczym wynosi $R_{thJC}=9,5^{\circ}\text{C/W}$. Schemat ideowy konstrukcji niskostratnego sterownika bramkowego przedstawiono na rysunku 2.

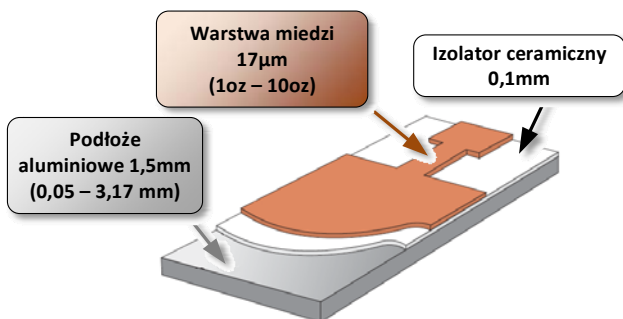


Rys.1. Rysunek poglądowy obudowy WSON-8 pojedynczego układu scalonego

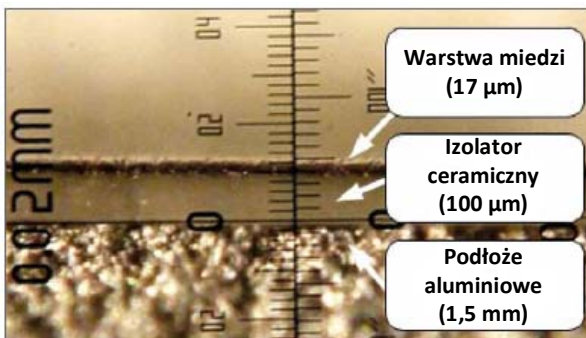


Rys.2. Schemat ideowy sterownika bramkowego 8xUCC27526

W budowie drajwera o oznaczeniu 8xUCC27526 zastosowano łącznie osiem sterowników połączonych równolegle ($U_4 - U_7$), zgodnie ze schematem ideowym z rysunku 2. Taki zabieg miał na celu zwiększenie wydajności prądowej całego układu. Zewnętrzny sygnał sterujący został wzmacniony za pomocą buforów logicznych o oznaczeniu 74LVC2G34 ($U_1 - U_3$). Ten sterownik bramkowy został wykonany na specjalnej płytce PCB z materiału IMS w technologii platerowania (ang. *Thermal clad*) [7,8] (rys.3 i 4).



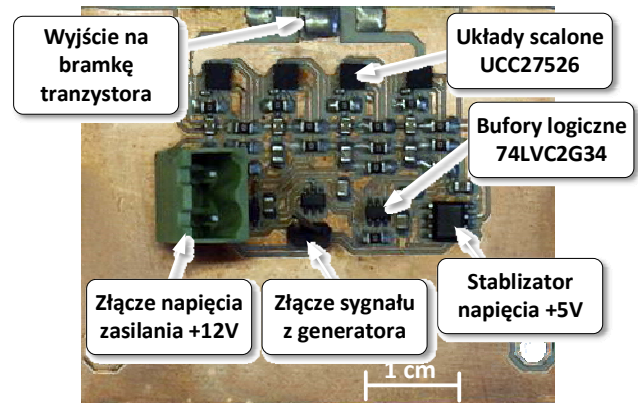
Rys.3. Struktura materiału IMS



Rys.4. Przekrój PCB w powiększeniu mikroskopowym $\times 50$

Płytkę PCB opisywanego drajwera miała wymiary 50x60 mm i została wykonana na frezarce numerycznej

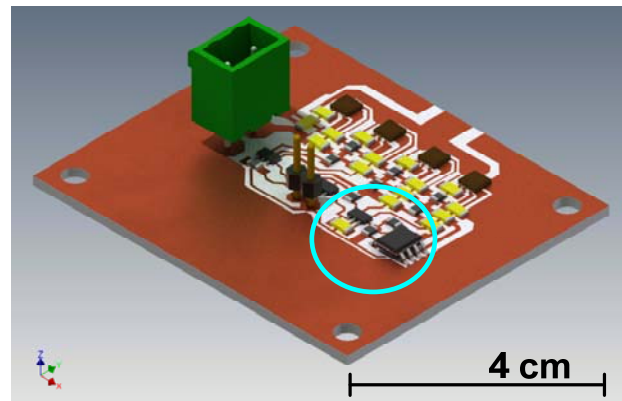
typu LPKF C40 firmy ProtoMat. Wycięcie drajwera zostało dopasowane do wyprowadzeń tranzystora MOSFET serii DE275-501N16A (rys. 5).



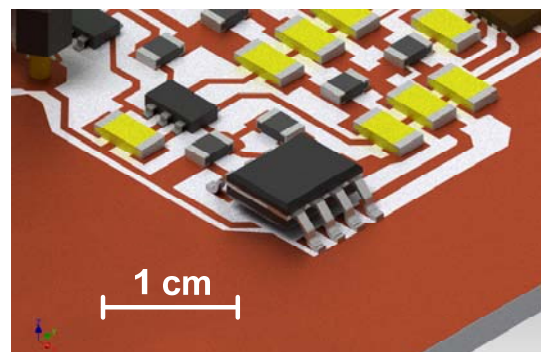
Rys.5. Zdjęcie sterownika bramkowego 8xUCC27526

Model 3D sterownika bramkowego

W tym akapicie niniejszego artykułu przedstawiono geometrię modelu komputerowego sterownika bramkowego wykonaną w oprogramowaniu Inventor Professional. Geometrię modelu utworzono w celu określenia rozkładu temperatur na płytce PCB podczas pracy drajwera z częstotliwością 30 MHz i przy obciążeniu bramką tranzystora MOSFET serii DE275-501N16A. Model 3D (rys.6) odzwierciedla w skali 1:1 wszystkie elementy elektroniczne użyte do wykonania prototypu dyskretnego drajwera 8xUCC27526 oraz obwód PCB wykonany w technologii platerowania (ang. *Thermal clad*) [4,5,7,8].



Rys.6. Geometria modelu komputerowego drajwera 8xUCC27526



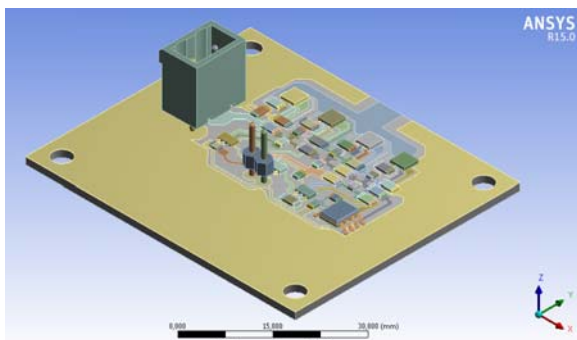
Rys.7. Powiększony fragment modelu komputerowego z rysunku X

Pełny model komputerowy przedstawiony na rysunku 6 zawiera 211 elementów, w skład których wchodzi m.in. trzy warstwy obwodu PCB z materiału IMS [7,8], ścieżki połączeń, elementy elektroniczne wraz z wyprowadzeniami

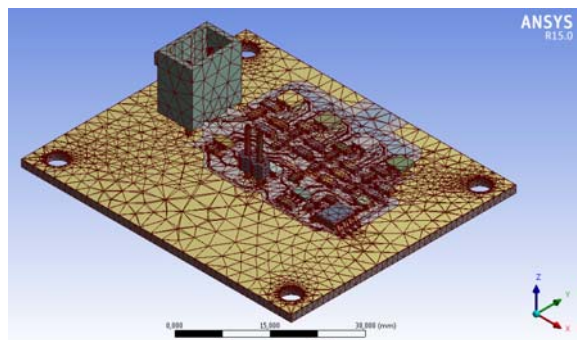
(padami) oraz złącza zasilania oraz sygnałowe. Objętości poszczególnych warstw obwodu PCB wyniosły: warstwy aluminium 4426 mm³, warstwy izolatora ceramicznego 295 mm³, warstwy miedzi 40 mm³. Należy zaznaczyć, że poszczególne objętości uwzględniają brak np. otworów mocujących, oraz usuniętą warstwę miedzi między ścieżkami. W tabeli 1 zestawione zostały podstawowe parametry materiałowe modelu komputerowego zaczerpnięte z bibliotek oprogramowania Inventor Professional, ANSYS oraz z literatury [2,3,9,10,11]. Wszystkie parametry materiałowe zebrane i zestawione w tabeli 1 obowiązują dla temperatury 25°C i wilgotności względnej 50%.

Tabela 1. Parametry materiałowe modelu sterownika bramkowego

MATERIAŁY	PARAMETRY			
	Przewodność cieplna właściwa	Współczynnik rozszerzalności cieplnej	Ciepło właściwe	Temperatura topnienia
	λ , W/mK	α , 1/K	C_p , J/kgK	T_T , K
Aluminium (Al)	200	$(22,5 \pm 24) \cdot 10^{-6}$	856 ± 900	867
Ceramika (Al ₂ O ₃)	$0,8 \pm 1,5$ (1,15)	$(8,1 \pm 8,4) \cdot 10^{-6}$	880	1973
Miedź (Cu)	370 ± 400 (397)	$16,5 \cdot 10^{-6}$	386	623
Srebro (Ag)	429	$18,7 \cdot 10^{-6}$	250	873
Złoto (Au)	318	$14,2 \cdot 10^{-6}$	128	1230
Nikiel (Ni)	90,7	$13,4 \cdot 10^{-6}$	440	1273
Cyna (Sn)	66,8	$22,0 \cdot 10^{-6}$	222	505
Molibden (Mo)	138	$4,8 \cdot 10^{-6}$	250	2273
Plastik (polipropylen)	18	1,8	1700	393 ± 468



Rys.8. Model dyskretnego sterownika bramkowego zaimportowany do programu ANSYS



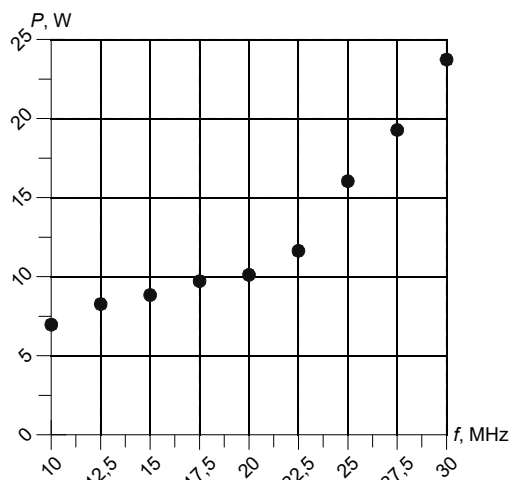
Rys.9. Geometria modelu z przykładową siatką obliczeń

Symulacja termiczna w stanie ustalonym

Na rysunku 8 przedstawiono geometrię modelu drajwera 8xUCC27526 do obliczeń cieplnych w programie ANSYS. Geometrię zaimportowano z oprogramowania Inventor Professional w celu wykonania symulacji termicznej w stanie ustalonym (ang. *Steady State Thermal*). Na rysunku 9 przedstawiono przykładową siatkę elementów skończonych wygenerowaną dla zaimportowanego modelu. Siatka ta składała się z 56 604 elementów skończonych o kształcie czworościanu (ang. *Tetrahedron*) oraz 86 058 węzłów.

Na potrzeby analizy termicznej modelu komputerowego drajwera przyjęto następującą metodę obliczeń:

- wszystkie elementy siatki zostały wygenerowane jako czworościany o jednostkowej długości boku w celu zwiększenia dokładności uzyskanych wyników;
- liczba elementów siatki wynosiła 12 110 226, liczba węzłów 17 477 264 – tak duża liczba elementów siatki wynika z małych wymiarów poszczególnych elementów elektronicznych, jak i niewielkich grubości poszczególnych warstw płytki IMS (rys.3 i 4);
- gęstość siatki została zróżnicowana w zależności od rodzaju elementu elektronicznego, jak i jego wymiarów np. dla układów UCC27526 rozmiar pojedynczego elementu siatki wynosił 0,05 mm;
- dla każdego z elementów składowych modelu określono jego parametry materiałowe zestawione w tabeli 1;
- określono wartości zastępczych źródeł ciepła na podstawie strat mocy drajwera (opis w dalszej części artykułu);
- uwzględniono konwekcję powietrza wynoszącą $5 \cdot 10^{-6}$ W/mm³K oraz temperaturę otoczenia wynoszącą 25°C.

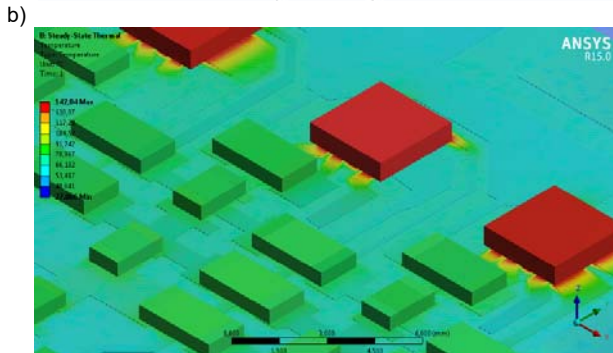
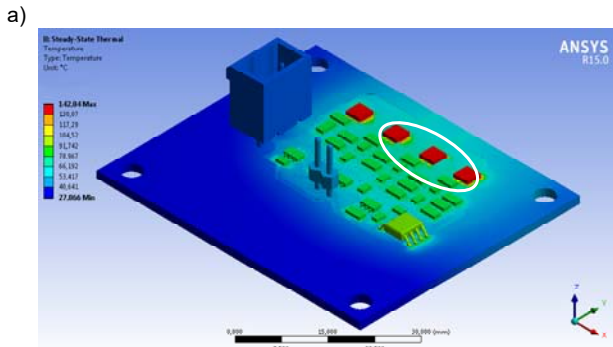


Rys.10. Charakterystyka strat mocy drajwera 8xUCC27526 wyznaczona na podstawie wcześniejszych badań [4,5]

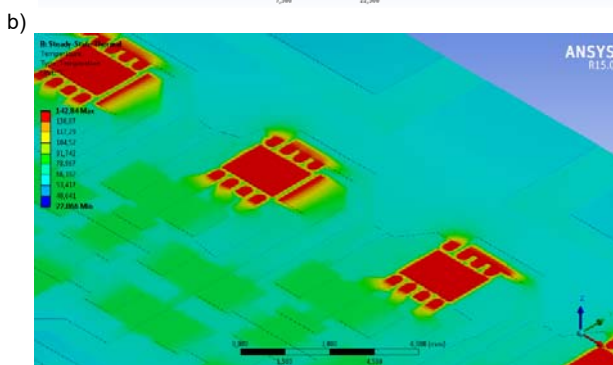
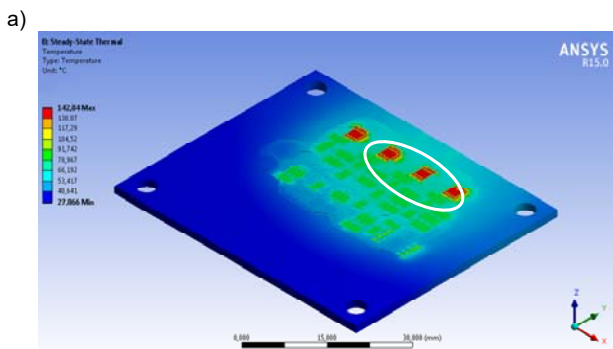
Głównym źródłem strat mocy na płytce PCB drajwera są cztery układy scalone o oznaczeniach UCC27526. Dla każdego z nich zostało określone zastępcze źródło ciepła (ang. *Internal Heat Generation*) o mocy określonej zależnością:

$$(1) \quad P_{HG} = \frac{P_{DR}}{V}$$

gdzie: P_{HG} – moc zastępczego źródła ciepła wyrażona w W/mm³, P_{DR} – moc pobierana przez pojedynczy układ UCC27526 wyrażona w watach (W) i określona na podstawie charakterystyki z rysunku 10, V – objętość układu UCC27526 wyrażona w mm³.



Rys.11. Rozkład temperatury obwodu drajwera 8xUCC27526: a) widok pełnego modelu, b) 5-krotne powiększenie fragmentu

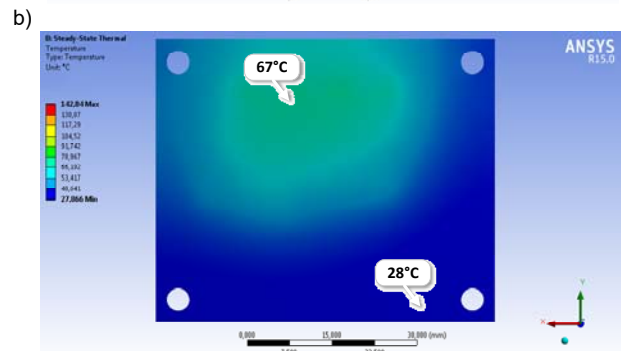
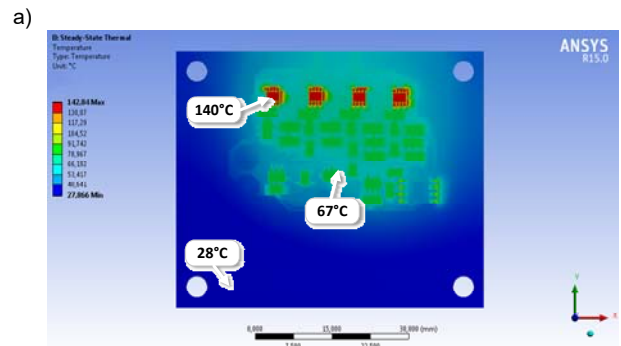


Rys.12. Rozkład temperatury obwodu drajwera 8xUCC27526: a) widok płytki PCB wykonanej z materiału IMS, b) 5-krotne powiększenie fragmentu

Odczytując z charakterystyki (rys.10) wartości strat mocy dla częstotliwości 30 MHz, czyli ok. 24 W i dzieląc tę wartość przez liczbę układów scalonych UCC27526 otrzymamy moc pobieraną P_{DR} przez pojedynczy drajwer na poziomie ok. 6 W. Objętość pojedynczego układu UCC27526 o wymiarach podanych w karcie katalogowej [6] wynosi $7,14 \text{ mm}^3$. Podstawiając powyższe dane do wzoru (1) otrzymamy wartość zastępczego źródła ciepła P_{HG} pojedynczego układu UCC27526 na poziomie ok. $0,83 \text{ W/mm}^3$.

Na rysunkach 11-13 przedstawiono wyniki analizy termicznej układu sterownika bramkowego 8xUCC27526 w stanie ustalonym. Z analizy rozkładu temperatury na płytce PCB wynika, że maksymalna temperatura modelu wynosi ok. 142°C , a minimalna temperatura zbliżona jest do temperatury otoczenia i wynosi ok. 28°C . Głównym źródłem strat ciepła w obwodzie PCB drajwera są scalone układy UCC27526 zaznaczone na rysunku 11 kolorem czerwonym odpowiadającym temperaturze ok. 140°C .

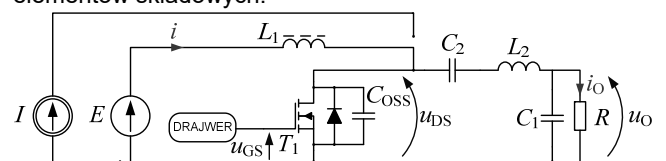
Należy zaznaczyć, że każdy z układów scalonych o wymiarach $3,15 \times 3,15 \times 0,72 \text{ mm}$, przekształca na ciepło moc czynną o wartości około 6 W. W dalszej części artykułu zaprezentowane zostanie porównanie wyników symulacji termicznej z rzeczywistym zdjęciem termowizyjnym drajwera 8xUCC27526.



Rys.13. Rozkład temperatury na płytce PCB wykonanej z materiału IMS: a) widok z góry, b) widok z dołu

Weryfikacja laboratoryjna otrzymanych wyników symulacji termicznej

W celu weryfikacji otrzymanych na drodze symulacji komputerowej wyników analizy termicznej sterownika bramkowego postanowiono wykorzystać laboratoryjny układ falownika klasy E (30 MHz, 300 W) przystosowany do testowania różnego rodzaju tranzystorów MOSFET mocy oraz ich dedykowanych drajwerów. Budowa, zasada działania oraz badania wysokoczęstotliwościowego falownika klasy E zostały szczegółowo opisane m. in. w innych pracach autora tej publikacji [12]. Na potrzeby niniejszej publikacji zamieszczono poniżej jedynie najistotniejsze informacje o układzie falownika. Na rysunku 14 zamieszczono schemat falownika rezonansowego, a w tabeli 2 zestawiono parametry i wartości poszczególnych elementów składowych.

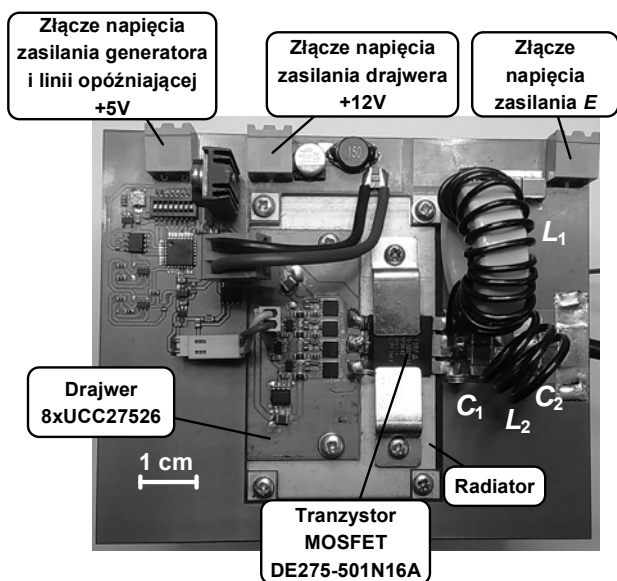


Rys.14. Schemat falownika rezonansowego klasy E (30 MHz, 300 W)

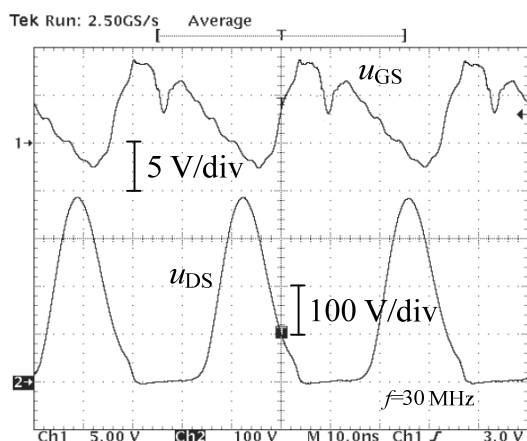
Tabela 2. Wartości elementów składowych falownika klasy E dla pracy optymalnej

PARAMETR	WARTOŚĆ	UWAGI
L_1	4,98uH	indukcyjność dławika L_1
R_{P1}	0,05 Ω	rezystancja pasożytnicza L_1 oraz połączeń
L_2	171 nH	indukcyjność cewki L_2 oraz połączeń
R_{P2}	0,21 Ω	rezystancja pasożytnicza L_2 oraz połączeń
C_1	5,05 nF	pojemność kondensatora C_1
C_2	314 pF	pojemność kondensatora C_2
R_{P2}	0,02 Ω	rezystancja pasożytnicza C_2
R	52,4 Ω	rezystancja odbiornika R
L_R	11,1 nH	indukcyjność pasożytnicza odbiornika R

Wartości poszczególnych elementów składowych (Tabela 2) falownika klasy E z rysunku 14 zostały wyznaczone za pomocą precyzyjnego analizatora impedancji Agilent 4294A [13,14] przy częstotliwości pracy 30 MHz.



Rys.15. Zdjęcie laboratoryjnego układu falownika klasy E (30 MHz, 300 W) z niskostratnym sterownikiem bramkowym własnej konstrukcji



Rys.16. Przebiegi czasowe napięć falownika klasy E dla pracy optymalnej

Dodatkowo, na rysunku 16 zamieszczono oscylogram napięcia wyjściowego drajwera u_{GS} i tranzystora u_{DS} dla pracy optymalnej falownika i częstotliwości wynoszącej 30 MHz. Do rejestracji przebiegów z rysunku 16 zastosowano oscyloskop Tektronix TDS620B [15]. Pomiary były wykonywane dla pracy optymalnej falownika przy

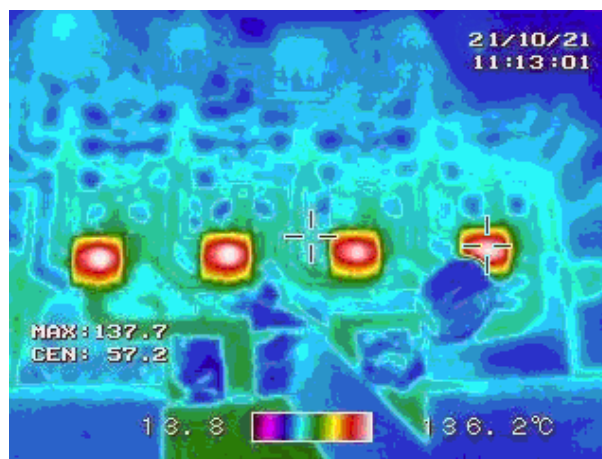
napięciu zasilania wynoszącym około 100 V i częstotliwości pracy układu wynoszącej 30 MHz.

W tabeli 3 zamieszczono zmierzone podstawowe parametry układu falownika klasy E. Pomiary były wykonywane w stanie ustalonym dla pracy optymalnej układu, częstotliwość pracy 30 MHz, temperatura otoczenia 25°C.

Na rysunku 17 zamieszczono zdjęcie termowizyjne sterownika bramkowego 8xUCC27526 współpracującego z tranzystorem DE275-501N16A w falowniku klasy E przy częstotliwości 30 MHz.

Tabela 3. Zestawienie podstawowych 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} tranzystora
P_{WE}	301,8 W	moc wejściowa
P_{WY}	256 W	moc wyjściowa
P_{DR}	22,3 W	straty mocy drajwera 8xUCC27526
η_D	84,9%	sprawność drenowa
η	78,9%	sprawność całkowita – uwzględniając straty drajwera



Rys.17. Zdjęcie termowizyjne układu drajwera 8xUCC27526 w trakcie pracy z częstotliwością 30 MHz i stratami mocy ok. 24 W

Analizując zdjęcie termowizyjne z rysunku 17 można zauważyć, że maksymalna temperatura została zarejestrowana na scalonych układach małej mocy i wynosiła ok. 137°C. Temperatura obwodu PCB wykonanego z materiału IMS wyniosła ok. 58°C.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono model komputerowy oraz wyniki symulacji termicznej dyskretnego sterownika bramkowego o oznaczeniu 8xUCC27526. Sterownik ten dedykowany jest do zastosowań z tranzystorami MOSFET mocy pracującymi przy częstotliwościach sięgających 30 MHz. Ten niskostratny drajwer był już wcześniej przedmiotem badań w których określono jego sprawność, straty mocy oraz czasy przełączeń [4,5]. W ramach niniejszego artykułu postanowiono przeprowadzić analizę numeryczną w programie ANSYS umożliwiającą określenie rozkładu temperatury na płytce PCB drajwera (wykonanej z materiału IMS) w stanie ustalonym i przy częstotliwości 30 MHz.

Jak wynika z przeprowadzonej symulacji cieplnej modelu 3D drajwera, płytka PCB wykonana z materiału IMS (rys.3 i 4) bardzo dobrze odprowadza ciepło. Jak podaje producent [7,8] rezystancja termiczna płytki wykonanej z

materiału IMS może wynosić od 0,3°C/W do 1,1°C/W, w zależności od grubości poszczególnych warstw obwodu. W wyniku symulacji termicznej uzyskano rozkład temperatury na płytce PCB (rys.11-13). Porównując zdjęcie termowizyjne (rys.17) z wynikami symulacji (rys.11) można zauważyć, że różnica temperatury między badaniem laboratoryjnym, a wynikami symulacji wynosi ok. 5°C.

Analizując rysunek 13 można zauważyć, że ciepło oddawane przez układy UCC27526 (górną warstwę płytki – rys.13a) przenika przez kolejne warstwy materiału IMS, powoli go nagrzewając, aż do ostatniej (dolnej) warstwy (rys.13b). Maksymalna temperatura na górnej warstwie obwodu PCB (warstwie miedzi) występuje pod padami układów scalonych UCC27526 i wynosi ok. 140°C. Na dolnej warstwie obwodu PCB (podłożu aluminiowym) temperatura jest znacznie niższa, wynosi ok. 67°C.

Wszelkie niedokładności w rozkładzie temperatury i różnice między uzyskanymi wynikami, a pomiarami przy użyciu termowizji mogą wynikać m. in. z:

- błędów modelowania – model matematyczny nie odzwierciedla dokładnie rzeczywistości, gdyż elementy wykonane w ramach modelu wykonane są z pewnym przybliżeniem;
- błędów wartości współczynników – przyjęte wartości współczynników równań różniczkowych cząstkowych i warunków brzegowych, czyli np. dane materiałowe obarczone są błędem (należy tutaj zaznaczyć, że oprogramowanie MES wprost nie rozwiązuje równań różniczkowych, a jedynie ich odpowiedniki w postaci algebraicznej–macierzowej);
- błędów zaokrągleń, czyli błędami wynikającymi z wielokrotnych przybliżeń (zaokrągleń) przetwarzanych wartości modelu.

Przyjęta metoda modelowania trójwymiarowego (3D) układów energoelektronicznych przedstawia nowe podejście do budowy złożonych modeli i z powodzeniem może znaleźć zastosowanie w analizie i modelowaniu innych tego typu układów.

Autor: dr inż. Piotr Legutko, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: piotr.legutko@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Kotowski R.: Podstawy modelowania i symulacji komputerowej, Wydawnictwo Polsko-Japońskiej Akademii Technik Komputerowych, ISBN: 978-83-953724-1-4, rok wydania 2019
- [2] Materiały informacyjne MESco sp. z o.o., www.mesco.com.pl
- [3] Metoda elementów skończonych (MES) oraz opis symulacji termicznej w stanie ustalonym (Steady State Thermal) dostępny pod adresem: www.ansys.com
- [4] Legutko P., Kasprzak M., Kierepka K.: Problematyka określania sprawności niskostratnych tranzystorów pracujących z częstotliwością 30 MHz, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 8/2018, ISSN: 0033-2097, str.120-124
- [5] Legutko P.: Wysokoczęstotliwościowe, dyskretne drajwery małej mocy dedykowane do tranzystorów MOSFET serii DE, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 4/2016, ISSN: 0033-2097, str.132-137
- [6] Dokumentacja techniczna układów scalonych UCC27526 dostępna pod adresem: www.ti.com
- [7] Referat konferencyjny zawierający opis materiału IMS - Co to jest IMS? Dostępny pod adresem: www.komel.katowice.pl
- [8] Thermal clad technology, www.bergquistcompany.com
- [9] Dobrzański L.: Leksykon materiałoznawstwa T. 1-8, Wydawnictwo Verlag Dashofer, ISBN 8391091414, Warszawa
- [10] Okoniewski S., Szczepański Z.: Technologia i materiałoznawstwo dla elektroników, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, ISBN: 978-83-020987-9-6, Warszawa 2008
- [11] Rymarski Z.: Materiałoznawstwo i konstrukcja urządzeń elektronicznych: projektowanie i produkcja urządzeń elektronicznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000
- [12] Legutko P.: Falownik klasy E (30MHz, 300W) z niskostratnym drajwerem hybrydowym, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 3/2018, ISSN: 0033-2097, str.69-75
- [13] Dokumentacja techniczna analizatora impedancji Agilent 4294A dostępna pod adresem: www.keysight.com
- [14] Agilent Technologies Co. Ltd. „The Impedance Measurement Handbook”, December 2003
- [15] Dokumentacja techniczna oscyloskopu cyfrowego Tektronix TDS640A dostępna pod adresem: www.tek.com