ELEKTRYKA 2015
Zeszyt 2 (234) Rok LXI

Arkadiusz DOMORACKI, Krzysztof BODZEK
Katedra Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki, Politechnika Śląska w Gliwicach

TERMICZNA ANALIZA MES OBWODÓW DRUKOWANYCH

Streszczenie. W artykule porównano dwie metody wykonania obwodów drukowanych: klasyczną, wykorzystująca laminat FR-4 oraz nową, z materiałem na podłożu metalowym (IMS), dedykowaną do obwodów silnoprądowych. Dodatkowo zaproponowano sposób modelowania obwodów za pomocą metody elementów skończonych (MES). Wykorzystany model termiczny dobrze opisuje obwód PCB. Różnice pomiędzy temperaturą obliczoną oraz mierzoną nie przekraczają 4%. Model termiczny umożliwia obliczenie rozkładu temperatury w obwodach PCB oraz pozwala na znaczne zwiększenie gęstości mocy obwodów PCB przez optymalizację rozmieszczenia elementów oraz użycie materiałów IMS

Słowa kluczowe: IMS, PCB, ANSYS, modelowanie komputerowe

THERMAL MES ANALYSIS OF PRINTED CIRCUIT BOARD

Summary. Two methods of construction of printed circuit boards are compared: standard one, using FR-4 laminate, and novel one with material on a metal substrate (IMS), dedicated to high-current circuits. The method of modeling of PCB circuits based on finite element method (FEM) is also proposed. The presented thermal model correctly represents PCB circuit. Difference between calculated and measured temperature is less than 4 %. Thermal model makes it possible to calculate temperature distribution in the PCB and enables significant increase in the power density of PCB by optimizing the arrangement of elements and use of IMS material.

Keywords: IMS, PCB, ANSYS, computer simulation

1. WSTĘP

W procesie projektowania układów i urządzeń elektronicznych/energoelektronicznych należy zwracać uwagę na wymóg minimalizacji gabarytów obwodów drukowanych. Wynika on z nadrzędnej tendencji do ograniczania kosztów. Minimalizacja obwodów skutkuje zwiększeniem ich objętościowej gęstości mocy. Klasyczna technologia wykonywania obwodów drukowanych bazuje na laminatach szklano-epoksydowych, a najczęściej

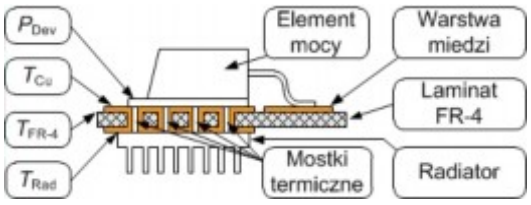
wykorzystywany jest laminat oznaczany FR-4. Jednym z istotnych ograniczeń klasycznej technologii jest bardzo duża rezystancja cieplna laminatu, która uniemożliwia jej stosowanie w środowiskach o wysokiej temperaturze otoczenia, np. w przemyśle motoryzacyjnym. Wymaga to zastosowania innych materiałów bazowych, np. materiałów o podłożu metalowym (ang. *Insulated Metal Substrate*, w skrócie IMS).

Minimalizacja, a co za tym idzie optymalizacja obwodów drukowanych wymaga innego podejścia do projektowania urządzeń. Konieczna jest wiedza nie tylko o średnich parametrach obwodu, ale również o parametrach krytycznych. Jednym z podstawowych parametrów jest oczywiście temperatura. Konieczność wyznaczenia punktów o maksymalnej temperaturze, które są istotne ze względu na pracę całego urządzenia, wymaga pomiarów (np. termowizyjnych) lub przeprowadzenia analizy MES (metoda elementów skończonych). Wyznaczenie rozkładu temperatury metodą MES jest znacznie szybsze i tańsze w porównaniu do wykonania prototypu urządzenia.

W artykule opisano sposób modelowania prostych układów elektronicznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Celem tej analizy było uzyskanie rozkładów temperatur w obwodach drukowanych, bazujących na różnych materiałach. Porównanie wyników uzyskanych na drodze analizy komputerowej oraz pomiarowo pozwoliło na ocenę przydatności opracowanych modeli komputerowych, a w dalszej perspektywie umożliwi modelowanie bardziej złożonych układów i urządzeń.

2. DLACZEGO IMS?

Większość współczesnych urządzeń elektronicznych bazuje na obwodach drukowanych wykonanych z laminatu FR-4. Poza niewątpliwymi zaletami materiału FR-4, który jest tani, odporny mechanicznie i cieplnie, jego przewodność cieplna właściwa jest niewielka ($\lambda = 0{,}26$ W/m·K). Utrudnia to skuteczne odprowadzenie ciepła z elementów SMD do radiatorów umieszczonych po drugiej stronie laminatu. Zwiększenie skuteczności odprowadzania ciepła uzyskuje się stosując mostki termiczne, nazywane również przelotkami termicznymi (rys. 1) [5].

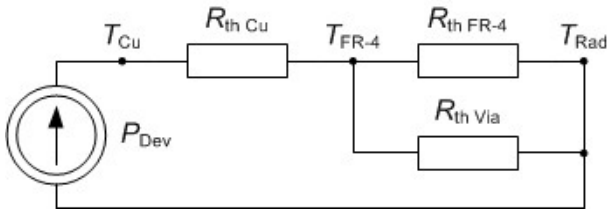


Rys. 1. Klasyczny obwód PCB z mostkami termicznymi
Fig. 1. Classical PCB with thermal vias

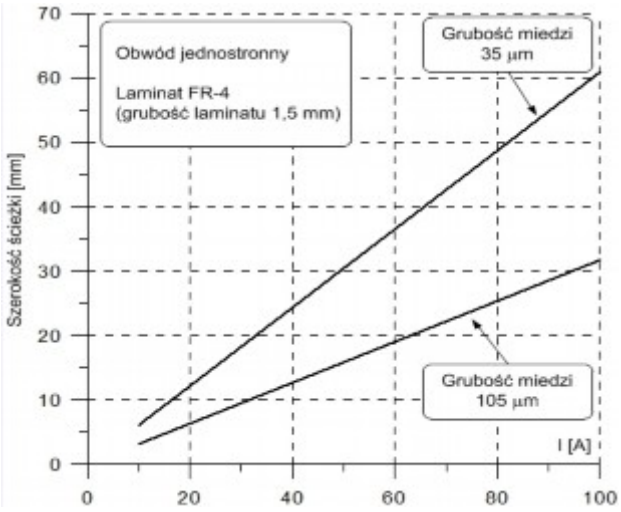
Dla układu z przelotkami termicznymi (dla termicznego stanu ustalonego) można wyznaczyć cieplny schemat zastępczy (rys. 2), gdzie źródłem ciepła są straty wydzielane przez element elektroniczny (P_{Dev}), a rezystancje cieplne przyjmują odpowiednie wartości:

- $R_{th\,Cu}$ = 0,088 K/W – rezystancja cieplna ścieżki miedzianej dla powierzchni 1 mm^2 i grubości miedzi 35 μm,
- $R_{th\,FR\text{-}4}$ = 5770 K/W – rezystancja cieplna laminatu dla 1 mm^2 i grubości 1,5 mm,
- $R_{th\,Via}$ = 1200 K/W – rezystancja cieplna pojedynczego mostka termicznego przy założeniu średnicy 0,5 mm, długości 1,5 mm, grubość ściany 30 μm i przyjmując przewodność cieplną właściwą na poziomie 40 W/m·K.

Zastępcza przewodność cieplna laminatu z rysunku 1 (przy założeniu wartości rezystancji termicznych jak powyżej) wynosi około 993 K/W [2] [3]. Rezystancję tę można obniżyć stosując większą liczbę mostków termicznych, jednak nadmierne ich zwiększanie powoduje zmniejszenie się wytrzymałości mechanicznej materiału, a także ogranicza całkowitą powierzchnię oddawania ciepła.



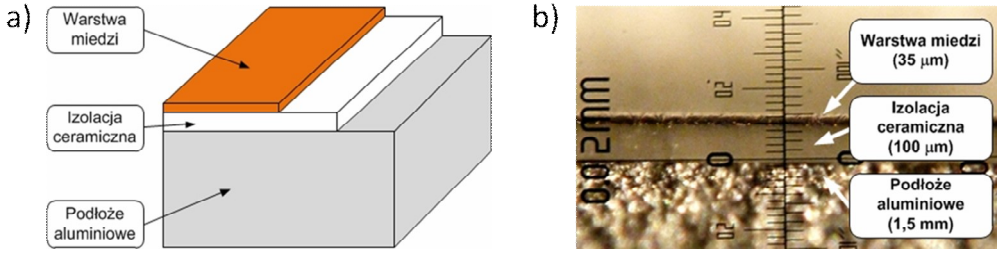
Rys. 2. Cieplny schemat zastępczy klasycznego obwodu PCB z mostkami termicznymi
Fig. 2. Thermal equivalent circuit diagram of classic PCB with thermal vias



Rys. 3. Obciążalności prądowe ścieżek obwodów PCB w technologii klasycznej (opracowano na podstawie [7])
Fig. 3. Current load capability of classic PCB (based on [7])

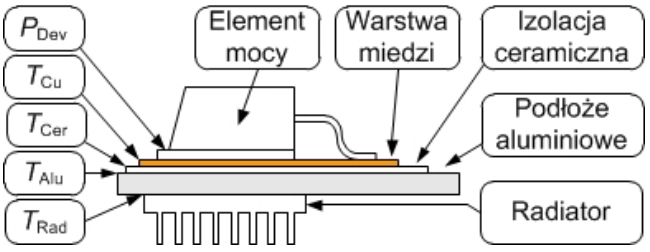
Kolejnym istotnym parametrem, charakteryzującym obwody PCB, jest obciążalność prądowa ścieżek. Zależy ona od przekroju poprzecznego miedzi oraz rezystancji termicznej obwodu. Możliwe jest zwiększenie obciążalności przez stosowanie miedzi o większej grubości, ale wiąże się to z tym koniecznością zwiększenia odległości pomiędzy ścieżkami i komponentami, co z kolei ogranicza możliwość stosowania elementów o małych rastrach wyprowadzeń. Zależność obciążalności prądowej ścieżek od ich szerokości i grubości przedstawiono na rysunku 3.

Przykładem nowoczesnego materiału obwodów drukowanych jest materiał typu IMS [1], [7], [8]. Składa się on z trzech warstw: podłoża (płyta ze stopu aluminium), izolacji elektrycznej (najczęściej ceramika) oraz miedzi. Podstawową strukturę materiału IMS pokazano na rys. 4a), natomiast zdjęcie przekroju zamieszczono na rys 4b).



Rys. 4. Materiał IMS: a) struktura; b) przekrój (fotografia własna – mikroskop o powiększeniu 50x)
Fig. 4. IMS material: a) structure; b) cross-section (author photo – microscope with 50x zoom)

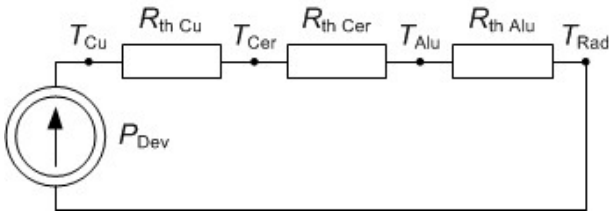
Warstwa miedzi wykorzystywana jest do wykonania mozaiki ścieżek [4], [6], [8], [7]. Cienką warstwą izolacyjną jest zazwyczaj ceramika, charakteryzująca się przewodnością cieplną w przedziale od 0,8 do 1,5 W/m·K dla grubości 75 do 300 μm. Pomimo niewielkiej grubości dopuszczalne napięcia pracy sięgają 2 kV_{DC}. Materiałem bazowym struktury IMS, zwanym podłożem, jest zazwyczaj płyta wykonana z aluminium, charakteryzująca się współczynnikiem przewodzenia ciepła na poziomie 200 W/m·K. Wobec tego samo podłoże stanowi radiator zarówno dla elementów elektronicznych, jak również dla mozaiki ścieżek.



Rys. 5. Obwód drukowany wykonany na bazie materiału IMS
Fig. 5. PCB prepared on the basis of IMS material

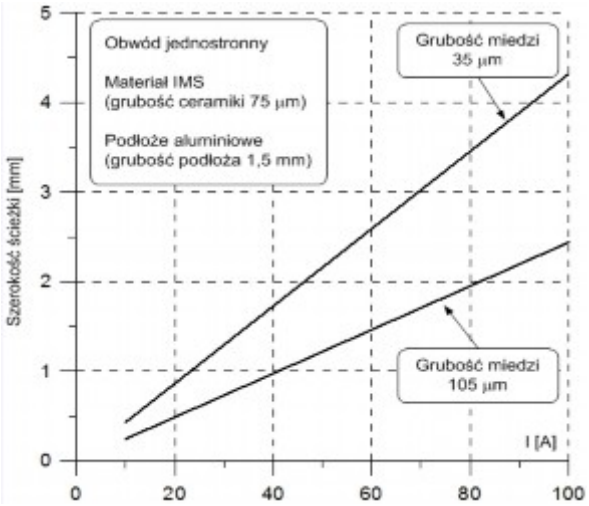
Dla obwodu drukowanego z materiału IMS przedstawionego na rysunku 5, przyjmując termiczny stan ustalony, można wyznaczyć cieplny schemat zastępczy (rys. 6), dla którego:

- $R_{\text{th Cu}}$ = 0,088 K/W – rezystancja cieplna ścieżki miedzianej dla powierzchni 1 mm^2 i grubości miedzi 35 μm,
- $R_{\text{th Cer}}$ = 87 K/W – rezystancja cieplna ceramiki dla 1 mm^2 i grubości 100 μm,
- $R_{\text{th Alu}}$ = 7,5 K/W – rezystancja cieplna aluminium dla 1 mm^2 i grubości 1,5 mm.



Rys. 6. Cieplny schemat zastępczy obwodu PCB wykonanego na bazie materiału IMS
Fig. 6. Thermal equivalent circuit diagram of PCB prepared on the basis of IMS material

Rezystancja zastępcza materiału IMS wynosi niespełna 95 K/W [2], [3]. Jest to wartość o rząd mniejsza od rezystancji cieplnej klasycznego obwodu PCB. Zwiększenie zdolności odprowadzania ciepła z obwodu drukowanego skutkuje również znaczącym wzrostem obciążalności prądowej mozaiki ścieżek (rys. 7), z zachowaniem dotychczasowego ich przekroju.



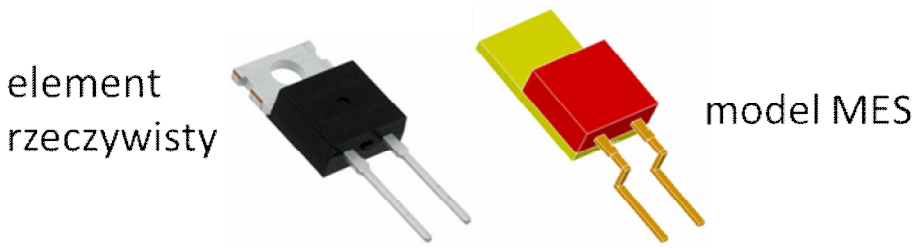
Rys. 7. Obciążalności prądowe ścieżek obwodu PCB wykonanego na bazie materiału IMS (opracowano na podstawie [7])
Fig. 7. Current load capability of IMS basis material PCB (based on [7])

Wykorzystując materiał IMS w miejsce klasycznego laminatu, możliwe jest zmniejszenie rezystancji cieplnej obwodu drukowanego o rząd. Pozwala to na znacznie lepsze odprowadzanie ciepła, co przekłada się na zwiększenie obciążalności ścieżek, a co za tym idzie projektowanie układów elektronicznych o mniejszych rozmiarach.

3. MODELOWANIE

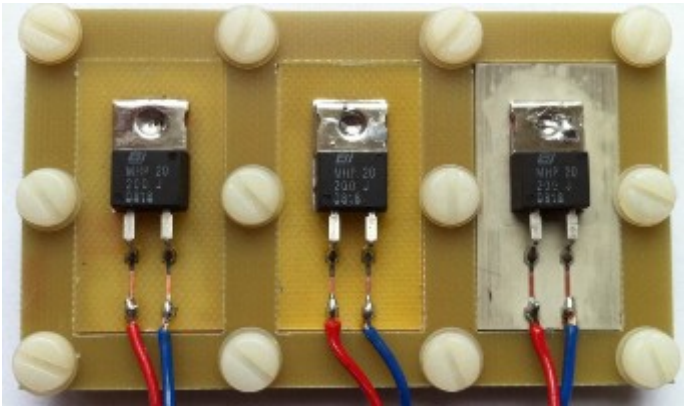
Analizując cieplny schemat zastępczy materiału IMS, można stwierdzić, że materiał ten (pod względem odprowadzania ciepła) jest znacznie lepszy od klasycznego obwodu PCB. Zaproponowana w punkcie 2 analiza uśredniona nie pozwala jednak obliczyć rozkładu temperatur w elementach elektronicznych czy w całym obwodzie drukowanym. Znajomość rozkładu temperatury jest potrzebna do wyznaczenia punktów, w których temperatura osiąga wartości maksymalne – często definiujące obciążenie całego obwodu elektronicznego. Do wyznaczenia rozkładu temperatury konieczne są pomiary, np. metodą termowizyjną lub analiza symulacyjna oparta na metodzie elementów skończonych (MES).

W pracy wykorzystano oprogramowanie ANSYS, pozwalające na wyznaczenie rozkładu temperatury za pomocą MES. Modelowanie zazwyczaj wymaga wprowadzenia wielu uproszczeń, ze względu na ograniczone możliwości obliczeniowe wykorzystanych komputerów. Ponieważ w modelu występują uproszczenia, należy przeprowadzić jego weryfikację eksperymentalną, porównując wyniki analizy z pomiarami dla wybranych wymuszeń. Zaproponowano, przedstawiony na rysunku 8, uproszczony model MES obudowy TO-220. W modelu nie uwzględniono otworu montażowego oraz faktu, że metalowa podstawa jest oblana plastikiem obudowy z każdej strony. Takie postępowanie ogranicza poziom złożoności modelu.



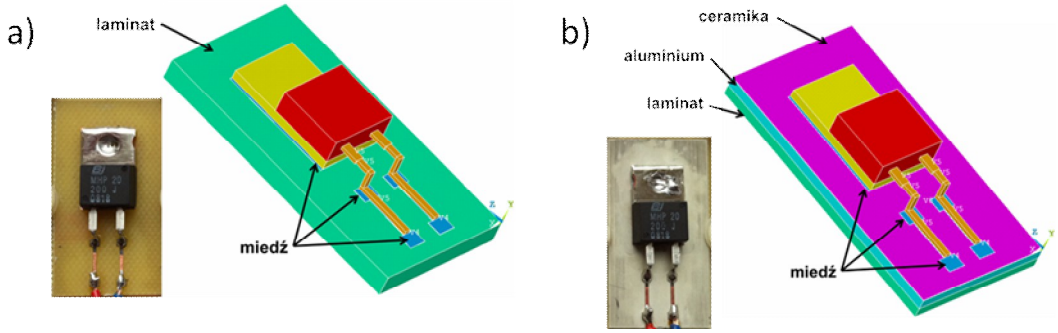
Rys. 8. Uproszczony model obudowy TO-220
Fig. 8. Simplified model of TO-220 package

Do weryfikacji eksperymentalnej wykorzystano dwa sposoby montażu obudowy TO-220. Pierwszy - to klasyczne rozwiązanie z laminatem FR-4. Drugi - to materiał IMS. Układ pomiarowy (rys. 9) pozwalał również na wyznaczenie rozkładu temperatury w układzie z mostkami termicznymi, ale takie rozwiązanie zostało pominięte w analizie MES. Układ pomiarowy został zaprojektowany tak, żeby oddziaływanie poszczególnych rozwiązań obwodów drukowanych nie wpływało na siebie. W tym celu rezystory w obudowach TO-220, będące źródłami ciepła, umieszczono na obwodach PCB o wymiarach 20 na 38 mm, przy czym każdy wykonany jest w innej technologii. Dodatkowo obwody te oddzielono od siebie laminatem FR-4 o słabej przewodności cieplnej. Dla takiego układu można przyjąć, że każda obudowa pracuje niezależnie od siebie, a ciepło przekazywane pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami jest pomijalne. Pozwala to na łatwiejszą weryfikację modeli MES.



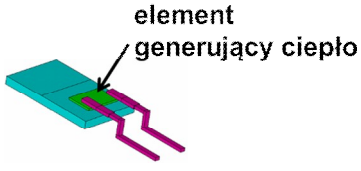
Rys. 9. Układ testowy
Fig. 9. Tested board

Model MES obudowy TO-220 wraz z fragmentem obwodu PCB (rys. 10) został wykonany w taki sposób, aby był jak najbardziej zbliżony do płytek pomiarowych. Pozwala to na miarodajną weryfikację modelu.



Rys. 10. Model MES obudowy TO-220 na płytce pomiarowej z: a) laminatu FR-4; b) materiału IMS.
Fig. 10. MES model of TO-220 package on the measurement plate based on: a) FR-4 laminate; b) IMS material

W modelu MES obudowy TO-220 ciepło jest generowane przez element pokazany na rysunku 11. Takie podejście pozwala odwzorować rzeczywistą obudowę, w której również występuje element mocy z wyprowadzeniami, a całość otoczona jest plastikiem obudowy. Ciepło generowane w elemencie mocy przekazywane jest na drodze przewodzenia do poszczególnych elementów obudowy i płytki PCB, a następnie konwekcyjnie do otoczenia.



Rys. 11. Element generujący ciepło w modelu MES obudowy TO-220
Fig. 11. The heat generating element in the model of the T0-220 package

4. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA

Weryfikacja eksperymentalna modeli z punktu 3 polega na porównaniu rozkładu temperatury rezystorów w obudowie TO-220 (rys. 9) otrzymanej pomiarowo z rozkładem temperatury obliczonej metodą MES. Dodatkowo istotna jest temperatura maksymalna występująca w układzie. Jest ona wyznacznikiem, dzięki któremu można ilościowo porównać wyniki. Podczas testów laboratoryjnych utrzymywano moc dostarczaną do każdego z rezystorów na poziomie 2 W. Po uzyskaniu termicznego stanu ustalonego wykonano zdjęcia kamerą termowizyjną. Taka sama generowana moc została zasymulowana w modelu MES. Wyniki porównania rozkładu oraz temperatury maksymalnej zostały przedstawione na rysunkach 12 i 13.

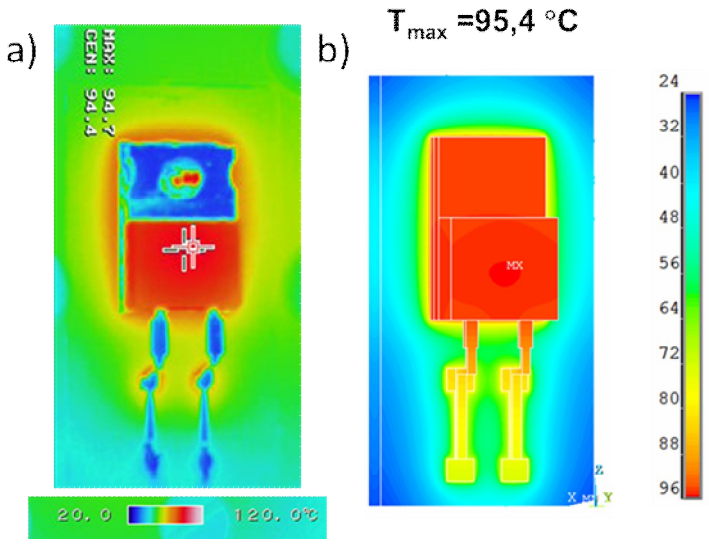
W przypadku pomiarów termowizyjnych można zauważyć, że temperatura metalowej części obudowy jest zafałszowana. Mierzona temperatura jest zdecydowanie zbyt niska. Wynika to z ograniczeń metody termowizyjnej, w której należy uwzględnić współczynnik emisyjności badanego materiału. Ze względu na znaczną różnicę współczynnika emisyjności metalu (< 0,1 W/m^2) oraz plastiku obudowy (> 0,9 W/m^2) możliwe jest uzyskanie poprawnej temperatury tylko dla jednego materiału. W pomiarach współczynnik emisji ustawiony był dla plastiku. Sytuacja taka nie występuje w przypadku metody obliczeniowej, w której temperatura metalu jest zbliżona do temperatury obudowy. Porównując zmierzony rozkład temperatury dla obwodu klasycznego (rys. 12) oraz IMS (rys. 13) z obliczonym rozkładem temperatury, można zauważyć jego dużą zbieżność. W obwodzie klasycznym temperatura laminatu bardzo szybko spada ze względu na dużą rezystancję termiczną materiału FR-4. W obwodzie IMS temperatura całej płytki pomiarowej jest jednakowa. Potwierdza to dobre odprowadzanie ciepła z obudowy.

Tabela 1

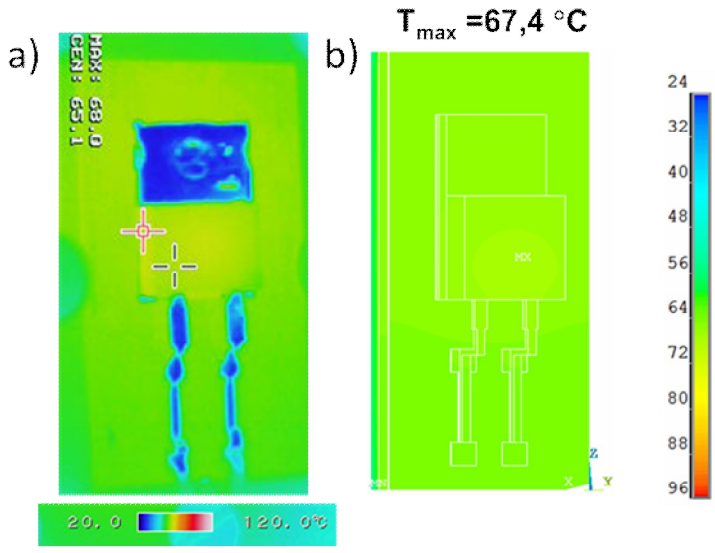
Porównanie temperatury maksymalnej w obwodach drukowanych

Obwód PCB	**Pomiar °C**	**Analiza MES °C**	**Różnica %**
klasyczny	94,7	95,4	0,7
IMS	65,1	67,4	3,5

Uzyskane temperatury maksymalne również są do siebie zbliżone (tab. 1). Otrzymane pomiarowo i obliczeniowo temperatury maksymalne nie różnią się od siebie o więcej niż 4%. Pozwala to na stwierdzenie, że użyte uproszczenia modelu i przyjęte w obliczeniach parametry materiałowe są poprawne i pozwalają użyć zaproponowanych modeli do analizy obwodów PCB.



Rys. 12. Rozkład temperatur w obwodzie z laminatu FR-4: a) zmierzony kamerą termowizyjną; b) obliczony metodą MES dla generowanej mocy równej 2 W i temperatury otoczenia 22 °C
Fig. 12. Temperature distribution in the PCB based on FR-4 laminate: a) measured of infrared camera; b) calculated using FEM model for generated power of 2 W and ambient temperature 22 °C

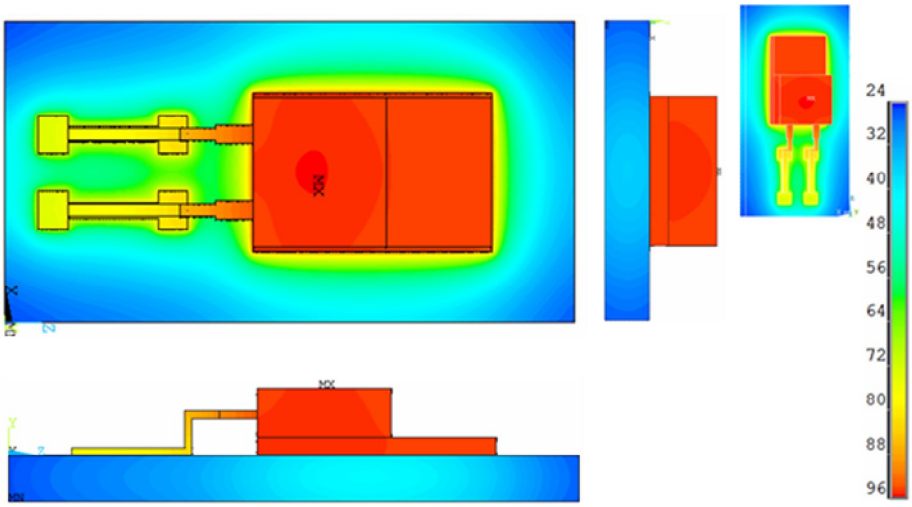


Rys. 13. Rozkład temperatur w obwodzie IMS FR4: a) zmierzony kamerą termowizyjną; b) obliczony metodą MES dla generowanej mocy równej 2 W i temperatury otoczenia 22 °C
Fig. 13. Temperature distribution in the PCB based on IMS: a) measured of infrared camera; b) calculated using FEM model for generated power of 2 W and ambient temperature 22 °C

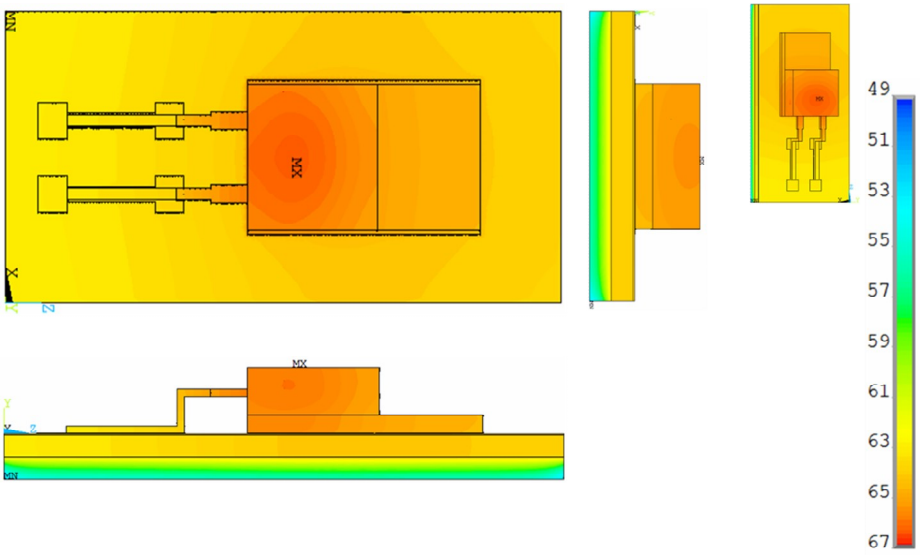
5. ANALIZA MES

Wykorzystując zweryfikowane eksperymentalnie modele MES obudowy TO-220, możliwe jest wyznaczenie rozkładu temperatury w dowolnym miejscu obwodu PCB wykonanego w technologii klasycznej (rys. 14) czy z materiału IMS (rys. 15). Dodatkowo

badania mogą odbywać się przy dowolnej temperaturze otoczenia. Wyznaczenie pomiarowe rozkładu temperatury w dowolnym punkcie jest możliwe, ale zmiana parametrów otoczenia jest trudniejsza, i wymaga stosowania dodatkowych urządzeń, np. pieca, który utrudnia pomiar.

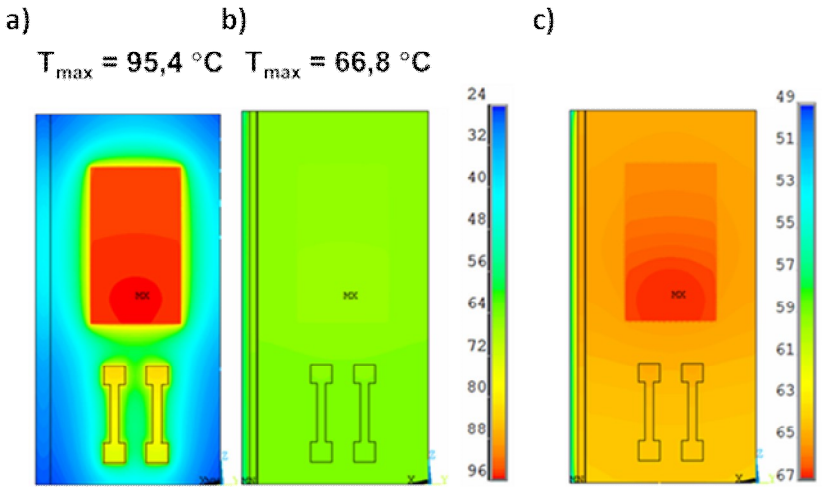


Rys. 14. Obliczony metodą MES rozkład temperatury dla obudowy TO-220 i laminatu FR-4
Fig. 14. Temperature distribution calculated using MES method for TO-220 package and FR-4 laminate



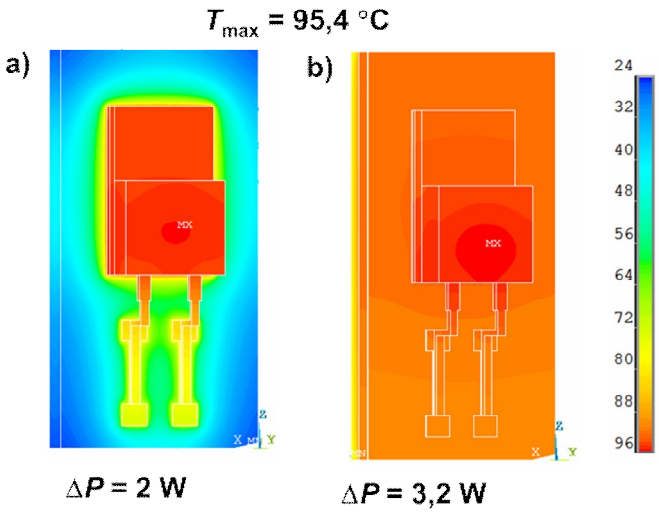
Rys. 15. Obliczony metodą MES rozkład temperatury dla obudowy TO-220 i materiału IMS
Fig. 15. Temperature distribution calculated by FEM for TO-220 package and IMS material

Analiza MES pozwala wyznaczyć temperaturę w miejscach niedostępnych pomiarowo, jak np. w padach lutowniczych pod obudową (rys. 16) czy w przekroju samej obudowy.



Rys. 16. Rozkład temperatury w padach lutowniczych: a) rozwiązanie klasyczne; b) materiał IMS, c) materiał IMS dla dopasowanej skali temperatury
Fig. 16. Temperature distribution in the pad: a) classic PCB; b) IMS material; c) IMS material for fitting scale of temperature

Kolejną zaletą modeli MES jest to, że w łatwy sposób można wyznaczyć straty mocy, przy których temperatura maksymalna będzie taka sama dla obwodu klasycznego oraz IMS (rys. 17). Dla temperatury maksymalnej wynoszącej 95,4°C będzie to odpowiednio 2 W dla klasycznego rozwiązania i 3,2 W dla materiału IMS.



Rys. 17. Straty mocy przy temperaturze 95,4°C dla: a) obwodu klasycznego; b) materiału IMS
Fig. 17. Power losses at a temperature of 99.4°C for: a) classic PCB; b) IMS material

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przed współczesnymi obwodami drukowanymi stawia się coraz większe wymagania. Dąży się do miniaturyzacji, która wymaga stosowania nowoczesnych materiałów oraz zmiany podejścia do projektowania obwodów. Większego znaczenia nabierają zagadnienia związane z optymalizacją rozmieszczenia elementów oraz lepszego odprowadzania ciepła. Konieczne staje się tworzenie narzędzi, pozwalających na optymalizację obwodów drukowanych.

Odpowiedzią na współczesne wymagania może być materiał IMS, pozwalający na lepsze odprowadzanie ciepła oraz wyrównanie temperatury całego obwodu drukowanego. Ogranicza to występowanie punktów, w których temperatura jest znacznie wyższa od temperatury całego obwodu. Wykorzystanie analizy MES pozwala na optymalne rozmieszczenie elementów.

BIBLIOGRAFIA

1. AN–1050 – DirectTEF® Technology Materials and Practices Application Note. International Rectifier-DirectFET® Technology, November 2010
2. Domoracki A.: Materiały z izolowanym podłożem metalowym. „Napędy i sterowanie” 2014, nr 3, s. 144-149.
3. Domoracki A.: Co to jest IMS? „Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne” 2013, nr 98, s. 1-6.
4. IMS – Insulated Metal Substrate. NCAB Group, Bromma, Sweden 2009.
5. JEDEC STANDARD – Guidelines for Reporting and Using Electronic Package Thermal Information JESD51-12, Jedec Solid State Technology Association, May 2005.
6. Quick design guide for IMS technology. AUREL s. p. a, Modigliana, Italy 2012.
7. Thermal Clad® Selection Guide – Thermal Solutions for Surface Mount Power Applications. The Bergquist Company, January 2002.
8. Thermal Clad® Selection Guide – Thermal Solutions For LEDs and Surface Mount Power Applications. The Bergquist Company, June 2011.

Dr inż. Arkadiusz DOMORACKI
Dr inż. Krzysztof BODZEK
Politechnika Śląska
Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki
ul. B. Krzywoustego 2
44-100, Gliwice
Tel. (032) 237-28-02; arkadiusz.domoracki@polsl.pl
Tel. (032) 237-28-42; Krzysztof.bodzek@polsl.pl