

Nieliniowe modele termiczne elementów elektronicznych

Streszczenie. W pracy przedstawiono postać skupionego nieliniowego modelu termicznego elementów elektronicznych. Model ten uwzględnia wpływ temperatury wnętrza modelowanego elementu na skuteczność odprowadzania ciepła generowanego w tym elemencie oraz na wzajemne sprzężenia cieplne między komponentami takiego elementu. Zaproponowano sposób implementacji opracowanego modelu w programie SPICE w postaci obwodowej dla układów zawierających struktury półprzewodnikowe umieszczone na wspólnym podłożu oraz dla elementów magnetycznych. Przedstawiono wyniki obliczeń i pomiarów dowodzące praktycznej użyteczności opisywanego modelu. Wskazano też na ograniczenia zakresu jego stosowalności.

Abstract. This paper presents the form of a compact non-linear thermal model of electronic components. This model takes into account the influence of the junction temperature of the modeled element on the efficiency of dissipation heat generated in this element and on mutual thermal couplings between the components of such an element. A method of implementing such a model in the SPICE in the network form for systems containing semiconductor dies placed on a common substrate and for magnetic components is proposed. The results of calculations and measurements proving the practical usefulness of the described model are presented. Limitations of the scope of its applicability are also indicated. (**Nonlinear thermal models of electronic components**)

Słowa kluczowe: skupiony model termiczny, SPICE, elementy półprzewodnikowe, elementy magnetyczne, samonagrzewanie, wzajemne sprzężenia cieplne

Keywords: compact thermal model, SPICE, semiconductor devices, magnetic components, self-heating, mutual thermal couplings

Wprowadzenie

Modele termiczne umożliwiają obliczenie temperatury wnętrza elementu elektronicznego przy znanym przebiegu wydzielanej w nim mocy. Model taki może mieć formę modelu o stałych rozłożonych lub modelu skupionego [1, 2]. Pierwszy z wymienionych rodzajów modeli umożliwia uzyskanie czasowo-przestrzennego rozkładu temperatury, ale niestety stosowanie tego modelu wymaga długiego czasu trwania obliczeń oraz sformułowania odpowiednich warunków początkowych i brzegowych [1, 2]. Dlatego modele takie nie są stosowane przy analizie właściwości układów elektronicznych, lecz ich zastosowanie jest ograniczone do analiz pojedynczych elementów.

Powszechnie w praktyce inżynierskiej stosowane są skupione modele termiczne, które umożliwiają wyznaczenie czasowych przebiegów temperatury wnętrza elementu. Typowo, w modelach tych stosuje się jedną uśrednioną temperaturę dla całego elementu [2, 3]. W klasycznym przypadku dyskretnego elementu elektronicznego jego temperatura wnętrza T_j jest wyższa od temperatury otoczenia T_a na skutek zjawiska samonagrzewania. Tymczasem w przypadku elementów elektronicznych złożonych z wielu komponentów, np. modułów LED, czy elementów magnetycznych zawierających uzwojenia i rdzenie, zachodzą dodatkowo wzajemne sprzężenia cieplne między tymi komponentami [1, 4].

W takim przypadku czasowy przebieg temperatury wnętrza komponentu elementu elektronicznego z dwoma komponentami można opisać wzorem o postaci [1, 5]

$$(1) T_j(t) = T_a + \int_0^t Z'_{th}(t-\tau) \cdot p_1(\tau) \cdot d\tau + \int_0^t Z'_{thm}(t-\tau) \cdot p_2(\tau) \cdot d\tau$$

We wzorze tym występują pochodne czasowe własnej $Z_{th}(t)$ i wzajemnej $Z_{thm}(t)$ przejściowej impedancji termicznej, moce $p_1(t)$ i $p_2(t)$ są wydzielane w rozważanych elementach. Obie przejściowe impedancje termiczne są typowo opisywane zależnością o postaci [1, 6]

$$(2) Z_{th}(t) = R_{th} \cdot \left[1 - \sum_{i=1}^N a_i \cdot \exp\left(-t/\tau_{thi}\right) \right]$$

We wzorze (2) R_{th} oznacza rezystancję termiczną, a_i to współczynniki wagowe związane z termicznymi stałymi czasowymi t_{thi} , zaś N jest liczbą tych stałych czasowych.

Znane od kilkudziesięciu lat skupione modele termiczne należą do grupy modeli liniowych, w których wartości wszystkich parametrów występujących we wzorze (2) są stałe. Tymczasem, wydajność mechanizmów odprowadzania ciepła (przewodnictwa, konwekcji i promieniowania) zależy od temperatury otoczenia i temperatury chłodzonego elementu [1, 2, 7]. Uzyskanie wysokiej dokładności obliczeń wymaga uwzględnienia tego faktu przy formułowaniu modelu termicznego. Postulat ten spełnia nieliniowy model termiczny. Przykłady nieliniowych skupionych modeli termicznych podano m.in. w pracach [7-10].

W niniejszej pracy opisano sposób formułowania nieliniowych skupionych modeli termicznych elementów zawierających wiele komponentów. Przedstawiono postać takiego modelu, która jest uniwersalna i może być stosowana zarówno dla przyrządów półprzewodnikowych mocy, modułów LED, jak i dławików oraz transformatorów impulsowych. Model ten ma formę podukładu dla programu SPICE. Opisano sposób wyznaczania parametrów modelu i pokazano wyniki obliczeń i pomiarów ilustrujących praktyczną użyteczność takiego modelu.

W rozdziale drugim opisano postać rozważanego modelu. Rozdział trzeci zawiera opis sposobu wyznaczania wartości jego parametrów. W rozdziale czwartym zamieszczono przykładowe wyniki obliczeń i pomiarów ilustrujące przydatność praktyczną rozważanego modelu.

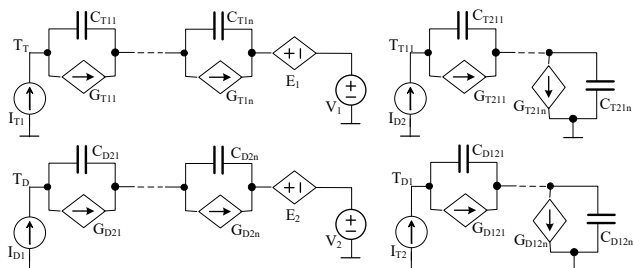
Postać modelu

Rozważany w niniejszej pracy nieliniowy skupiony model termiczny został sformułowany w postaci obwodowej dedykowanej dla programu SPICE. Model ten umożliwia wyznaczenie temperatury poszczególnych komponentów badanych elementów elektronicznych przy uwzględnieniu zachodzącego w każdym z nich zjawiska samonagrzewania oraz wzajemnych sprzężeń cieplnych między każdą parą tych komponentów.

Przy tworzeniu struktury prezentowanego modelu bazowano na reprezentacji obwodowej liniowego modelu termicznego w postaci sieci Cauera lub Fostera prezentowanych między innymi w pracach [1, 2, 11]. W obwodowych modelach termicznych wykorzystuje się typowo analogię elektryczno-termiczną, zgodnie z którą napięcia w węzłach modelu termicznego odpowiadają

temperaturom poszczególnych komponentów, a prądy – mocom wydzielanym w tych komponentach. W liniowych modelach termicznych własne i wzajemne przejściowe impedancje termiczne są reprezentowane przez obwody RC.

Reprezentację obwodową nieliniowego modelu termicznego elementu zawierającego 2 komponenty pokazano na rys. 1. Przykład ten dotyczy tranzystora IGBT, który we wspólnej obudowie zawiera strukturę tranzystorową oraz strukturę diodową.



Rys. 1. Reprezentacja obwodowa nieliniowego modelu termicznego elementu zawierającego 2 komponenty na przykładzie tranzystora IGBT z wbudowaną strukturą diodową

Na rysunku tym widoczne są 4 podobwoły umożliwiające wyznaczenie wartości temperatury wnętrza obu struktur odpowiadających napięciom w węzłach T_T (tranzystor) i T_D (dioda). Podobwoły umieszczone z lewej strony rysunku modelują wpływ samonagrzewania na przyrost temperatury każdej ze struktur, a podobwoły umieszczone z prawej strony – przyrost tych temperatur (odpowiednio T_{T1} oraz T_{D1}) spowodowany przez wzajemne sprzężenia cieplne.

Źródła prądowe I_{T1} oraz I_{T2} generują identyczny prąd odpowiadający mocy wydzielanej w strukturze tranzystorowej, natomiast źródła prądowe I_{D1} oraz I_{D2} – mocy wydzielanej w strukturze diodowej. Źródła napięciowe V_1 i V_2 wytwarzają napięcie o wartości odpowiadającej temperaturze otoczenia T_a . Sterowane źródła napięciowe E_1 oraz E_2 wytwarzają napięcia równe napięciom w węzłach odpowiednio T_{T1} oraz T_{D1} .

Własne i wzajemne przejściowe impedancje termiczne są modelowane przez szeregowo połączone dwójniki zawierające sterowane źródła prądowe oraz kondensatory. Jak wynika m.in. z pracy [7], rezystancje termiczne własne R_{th} oraz wzajemne R_{thm} wykazują silną malejącą zależność od temperatur T_a oraz T_j . Zależność ta jest modelowana za pomocą sterowanych źródeł prądowych G_i opisanych wzorem o postaci

$$(3) \quad G_i = \frac{V_{Gi}}{a_i \cdot \left(R_{th1} \cdot \exp\left(-\frac{T_j - T_a}{T_0}\right) + R_{th0} \right)}$$

gdzie V_{Gi} oznacza napięcie na źródle G_i , a_i jest współczynnikiem wagowym występującym we wzorze (2), R_{th0} oznacza minimalną wartość rezystancji termicznej, R_{th1} – szerokość zakresu zmian wartości rezystancji termicznej, T_0 – parametr charakteryzujący stromość opadania zależności $R_{th}(T_j - T_a)$.

Ze względu na fakt, że pojemności cieplne zależą od rozmiarów poszczególnych elementów konstrukcyjnych systemu chłodzenia, które słabo zmieniają się przy zmianach temperatury, w prezentowanym modelu pominięto wpływ temperatury na pojemności występujące w tym modelu.

Struktury nieliniowego modelu termicznego dla różnych elementów elektronicznych są podobne do struktury zaprezentowanej na rys. 1. Jednak zawierają one różne

liczby podobwołów, w zależności od liczby komponentów, z jakich składa się modelowany element. Każdy kolejny komponent powoduje wystąpienie dodatkowych podobwołów modelujących przyrost temperatury każdego z komponentów na skutek wzajemnych sprzężeń cieplnych z tym komponentem. Liczba komponentów determinuje też liczbę wyznaczanych temperatur w modelu. Jeżeli element zawiera n komponentów, to liczba podobwołów w reprezentacji obwodowej jego modelu termicznego jest równa n^2 i wyznaczanych jest za jego pomocą n temperatur.

Przykładowo, model termiczny induktora zawierającego rdzeń ferromagnetyczny i uzwojenie zawiera 4 podobwoły. Model transformatora (2 uzwojenia i 1 rdzeń) – 9 podobwołów. Moduł mocy zawierający 2 tranzystory i 2 diody opisuje model termiczny zawierający 16 podobwołów.

Wyznaczanie parametrów modelu

W celu praktycznego zastosowania opisanego modelu niezbędne jest wyznaczenie wartości jego parametrów. Proces ten wymaga wykonania odpowiednich pomiarów i obliczeń. Jest on realizowany w 4 krokach obejmujących:

1. Pomiar przebiegów własnych przejściowych impedancji termicznych $Z_{th}(t)$ dla każdego z komponentów modelowanego elementu oraz wzajemnych przejściowych impedancji termicznych $Z_{thm}(t)$ między każdą parą takich komponentów. Pomiarów te należy wykonać dla różnych wartości mocy wydzielanej w tych komponentach oraz różnych wartości temperatury otoczenia.
2. Odczyt ze zmierzonych przebiegów $Z_{th}(t)$ oraz $Z_{thm}(t)$ wartości rezystancji termicznych R_{th} oraz R_{thm} i odpowiadających im wartości temperatury wnętrza T_j w stanie ustalonym.
3. Przygotowanie wykresów zmierzonych zależności $R_{th}(T_j)$ oraz $R_{thm}(T_j)$.
4. Wyznaczenie wartości współczynników występujących we wzorze

$$(4) \quad R_{th} = R_{th1} \cdot \exp\left(-\frac{T_j - T_a}{T_0}\right) + R_{th0}$$

poprzez dopasowanie krzywych zmierzonych (wykreślonych w punkcie 3) oraz krzywych obliczonych z tego wzoru.

5. Dla przebiegów $Z_{th}(t)$ oraz $Z_{thm}(t)$ (zmierzonych przy największej spośród wartości mocy, dla których wykonano pomiary) należy wyznaczyć wartości parametrów a_i oraz τ_{thi} poprzez iteracyjne wykreślanie zależności opisanych wzorem

$$(5) \quad y_i(t) = \ln\left(1 - \frac{Z_{th}(t)}{R_{th}} - \sum_{j=1}^{i-1} a_j \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{thj}}\right)\right)$$

i aproksymowanie ich za pomocą zależności

$$(6) \quad y_i(t) = -\frac{t}{\tau_{thi}} + \ln(a_i)$$

Obliczenia wykonuje się kolejno dla wartości indeksu i od 1 do N , osobno dla przebiegów $Z_{th}(t)$ oraz $Z_{thm}(t)$. Wartości pojemności C_i stanowią iloraz τ_{thi} przez R_{th} .

Wyniki badań

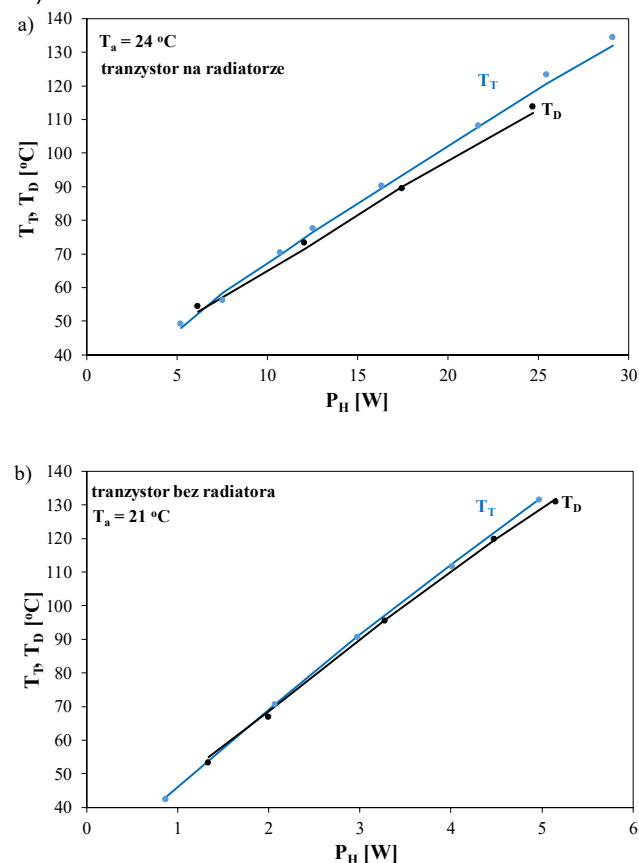
W celu wykazania praktycznej przydatności opisanego nieliniowego skupionego modelu termicznego do analizy termicznej właściwości różnych elementów elektronicznych zawierających różną liczbę komponentów przeprowadzono szereg obliczeń i pomiarów. Wybrane wyniki takich badań pokazano w dalszej części tego rozdziału.

Pierwsza grupa wyników dotyczy tranzystora IGBT zawierającego we wspólnej obudowie typu TO-247 dwie struktury półprzewodnikowe. Miedziana podstawa tej obudowy ma wymiary 13 x 10 mm, struktura tranzystorowa – 6 x 4 mm, a struktura diodowa – 3 x 4 mm. Odległość między brzegami tych struktur wynosi 2 mm. Rozmiary podstawy obudowy wynoszą 15 x 20 mm.

Mała odległość między strukturami półprzewodnikowymi powoduje, że w takim elemencie półprzewodnikowych zachodzą silne sprzężenia cieplne. Różne rozmiary struktur powodują, że rezystancje termiczne diody i tranzystora są różne. Szczególnie wyraźne różnice między nimi można zaobserwować dla elementu umieszczonego na dużym radiatorze. W tym przypadku, przy mocy równej 10 W wartość rezystancji termicznej struktury tranzystorowej wynosi 4 K/W, struktury diodowej – 4,6 K/W i wzajemnej rezystancji termicznej między nimi – 3,8 K/W [5]. Różnice między wartościami wymienionych parametrów przekraczają zatem 15%.

W pracy [7] zilustrowano wpływ zmian temperatury otoczenia na rezystancje termiczne w tranzystorze IGBT. W cytowanej pracy wykazano, że wzrost wartości tej temperatury o około 70 °C może spowodować wzrost wartości jego rezystancji termicznej nawet o 35%.

Na rys. 2 przedstawiono obliczone (linie) i zmierzone (punkty) zależności temperatury obu struktur półprzewodnikowych (tranzystora T_T oraz diody T_D) od mocy P_H wydzielanej w tranzystorze. Zależności te dotyczą stanu ustalonego dla elementu umieszczonego na radiatorze (rys. 2a) oraz pracującego bez radiatora (rys. 2b).

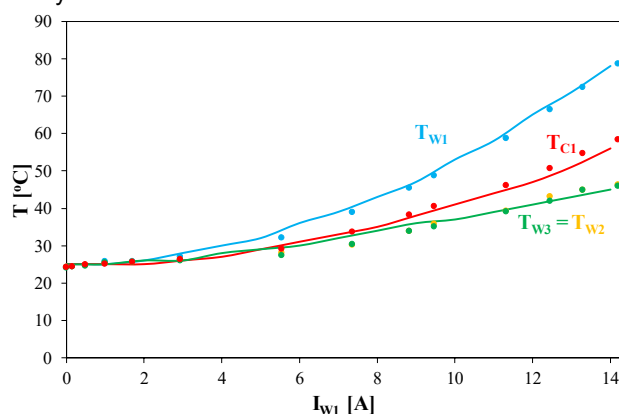


Rys. 2. Obliczone (linie) i zmierzone (punkty) zależności temperatur komponentów tranzystora IGBT z wbudowaną strukturą diodową od wydzielanej mocy

Jak widać, rozważane zależności $T_T(P_H)$ oraz $T_D(P_H)$ są rosnącymi funkcjami nieliniowymi. Nieliniowości widać przede wszystkim w zakresie niewielkich wartości mocy P_H .

Różnice między wartościami tych temperatur rosną wraz ze wzrostem wartości mocy P_H . Nie przekraczają one 2 °C przy pracy badanego elementu bez radiatora i osiągają nawet 8 °C dla elementu umieszczonego na radiatorze. Różnice między tymi temperaturami są większe, gdy moc jest wydzielana w diodzie.

Kolejny przykład (rys. 3) ilustruje zależność temperatur komponentów (trzech uzwojeń i rdzenia) dławika sprzężonego z rdzeniem nanokrystalicznym od prądu płynącego tylko przez jedno uzwojenie. W takim przypadku samonagrzewanie zachodzi tylko w jednym uzwojeniu o temperaturze T_{W1} , a wzrost temperatury pozostałych uzwojeń T_{W2} i T_{W3} oraz rdzenia T_C następuje tylko dzięki sprzężeniu cieplnym między tymi komponentami i nagrzewanym uzwojeniem [12]. W testowanym dławiku wszystkie uzwojenia są takie same i są rozmieszczone na obwodzie pierścieniowego rdzenia w taki sposób, że odległości każdego uzwojenia od dwóch pozostałych są identyczne.



Rys. 3. Obliczone (linie) i zmierzone (punkty) zależności temperatur komponentów dławika sprzężonego od prądu uzwojenia W_1

Zgodnie z oczekiwaniem, najwyższą temperaturę osiąga uzwojenie W_1 , przez które przepływa prąd. Temperatura pozostałych komponentów jest niższa nawet o 40 °C. Przepływ ciepła między uzwojeniami odbywa się za pośrednictwem rdzenia. Dlatego temperatura rdzenia T_C jest wyższa od temperatury uzwojeń $T_{W2} = T_{W3}$, przez które prąd nie płynie. Rozbieżności między temperaturami poszczególnych komponentów badanego elementu rosną wraz ze wzrostem wartości prądu I_{W1} płynącego przez nagrzewane uzwojenie.

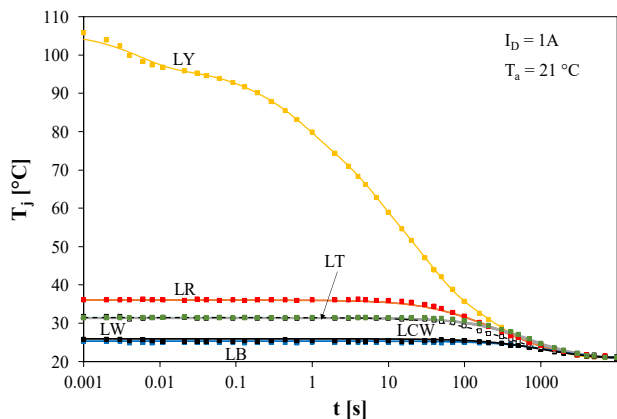
Sprzężenia cieplne zachodzą także między przyrządami półprzewodnikowymi umieszczonymi na wspólnej płytce drukowanej. Kolejny przykład ilustruje przydatność przedstawionego modelu do opisu właściwości cieplnych diod LED mocy umieszczonych na wspólnej płytce MCPCB o wymiarach 100 x 100 mm. Na płytce tej znajdują się różnokolorowe diody LED umieszczone w dwóch rzędach oddalonych od siebie o 11 mm. Każdy rząd zawiera po 3 diody umieszczone w odległości 24 mm między sobą [9].

W czasie badań, których wyniki pokazano na rys. 4 prąd o wartości 1 A przepływał przez jedną diodę (oznaczona jako LY) tak długo, aż osiągnięto ustalony rozkład temperatury na płytce. Następnie, w chwili $t = 0$ wyłączono ten prąd i rejestrowano czasowe zmiany temperatury wnętrza poszczególnych diod w czasie studzenia płytki (oznaczonych jako LR, LW, LB, LT, LCW).

Wszystkie widoczne przebiegi $T_i(t)$ są funkcjami monotonicznie malejącymi, które w stanie ustalonym osiągają wartość równą temperaturze otoczenia. Po nagrzaniu temperatura diody LY jest najwyższa i osiąga aż 105 °C. Temperatury pozostałych diod mieszczą się w zakresie od 25 do 36 °C, przy czym temperatury diod położonych bliżej diody LY są wyższe. Warto zauważyć, że

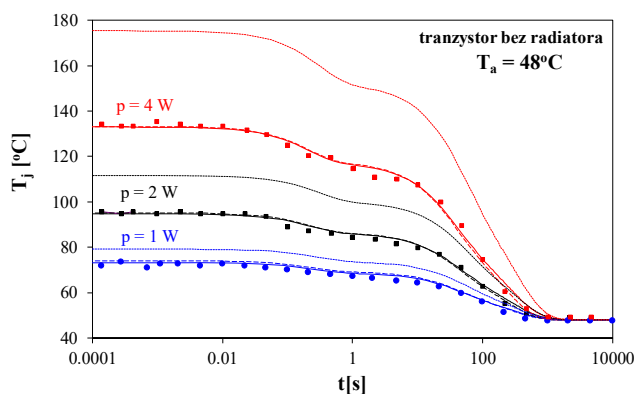
proces studzenia diody LY zaczyna się praktycznie natychmiast po wyłączeniu jej zasilania. Tymczasem temperatury pozostałych diod zaczynają maleć dopiero po upływie czasu z przedziału od 10 do 100 s w zależności od odległości między rozważaną diodą a diodą LY.

Przedstawione przykłady dowodzą, że w przypadku elementów składających się z wielu komponentów warto w analizach termicznych uwzględnić fakt zróżnicowania temperatur tych komponentów zamiast klasycznego charakteryzowania całego elementu za pomocą jednej temperatury [13, 14]. Z drugiej strony wykazano, że wzajemne sprzężenia termiczne między rozważanymi komponentami mogą powodować istotny wzrost temperatury ich wnętrza. Dowodzi to potrzeby uwzględniania tego zjawiska w modelach termicznych rozważanych elementów.



Rys. 4. Obliczone (linie) i zmierzone (punkty) czasowe przebiegi temperatury wnętrza diod umieszczonych na wspólnej płytce MCPCB w czasie chłodzenia po nagrzewaniu diody LY

Na rys. 5 zilustrowano wpływ uwzględnienia nieliniowości modelu termicznego tranzystora IGBT na dokładność wyznaczenia temperatury jego wnętrza w czasie procesu studzenia. Na rysunku tym linie ciągłe oznaczają wyniki obliczeń przeprowadzonych za pomocą prezentowanego modelu, linie kreskowe – obliczeń za pomocą liniowego modelu termicznego, zaś punkty – wyniki pomiarów.



Rys. 5. Obliczone (linie) i zmierzone (punkty) czasowe przebiegi temperatury wnętrza tranzystora IGBT przy różnych wartościach wydzielanej w nim mocy

Jak można zauważyć, zastosowanie nieliniowego modelu termicznego pozwala na uzyskanie bardzo dobrej zgodności między wynikami obliczeń i pomiarów. Liniowy model termiczny zapewnia akceptowalne dopasowanie wyników obliczeń i pomiarów tylko przy najmniejszej z rozważanych wartości mocy. Przy największej z rozważanych wartości mocy za pomocą modelu liniowego

uzyskuje się wartości temperatury T_j zawyżone nawet o 40°C w stosunku do wyników pomiarów.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono sposób formułowania nieliniowego skupionego modelu termicznego dla elementów elektronicznych zawierających różne komponenty. Model taki jest dedykowany dla programu SPICE i umożliwia wyznaczenie czasowego przebiegu temperatury każdego z komponentów modelowanego elementu przy uwzględnieniu zjawiska samonagrzewania w każdym z tych komponentów oraz wzajemnych sprzężeń cieplnych między nimi. Jednocześnie uwzględniono w modelu nieliniowości zjawisk cieplnych poprzez uzależnienie parametrów opisujących własne i wzajemne przejściowe impedancje termiczne od temperatury poszczególnych komponentów i temperatury otoczenia.

Przedstawione w niniejszej pracy przykładowe wyniki obliczeń i pomiarów dowiodły poprawności opracowanej koncepcji modelowania zarówno dla przyrządów półprzewodnikowych zawierających we wspólnej obudowie dwie struktury półprzewodnikowe, dla diodów sprzężonych oraz dla modułów LED zawierających diody LED umieszczone na wspólnej płytce MCPCB. Przykłady te dowodzą, że w rozważanych elementach występuje zróżnicowanie temperatury poszczególnych komponentów i może ono osiągać duże wartości. Widoczny jest też silny wpływ wzajemnych sprzężeń cieplnych między komponentami testowanych elementów na temperatury wnętrza tych komponentów.

Na przykładzie tranzystora IGBT wykazano zasadność uwzględniania nieliniowości zjawisk cieplnych w modelu termicznym. W przedstawionym przykładzie uzyskano znacznie zawyżone wartości temperatury wnętrza tranzystora przy zastosowaniu liniowego modelu termicznego dla dużych wartości wydzielanej mocy. Rozbieżności takich nie zanotowano, gdy używany był nieliniowy model termiczny.

Przedstawiony sposób modelowania właściwości cieplnych elementów elektronicznych jest uniwersalny, jeśli chodzi o rodzaj modelowanych elementów. Jednak jego wadą jest ograniczenie praktycznej stosowalności do elementów zawierających co najwyżej kilka komponentów ze względu na rosnący z kwadratem liczby tych komponentów stopień skomplikowania uzyskiwanego modelu. W dalszych pracach autorzy będą dążyli do opracowania skupionego nieliniowego modelu termicznego pozbawionego tej niedogodności.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, dr hab. inż. Kalina Detka, prof. UMG, dr hab. inż. Paweł Górecki, prof. UMG, dr hab. inż. Przemysław Ptak, prof. UMG, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81 - 87, 81-225 Gdynia, E-mails: k.gorecki@we.umg.edu.pl, k.detka@we.umg.edu.pl, p.gorecki@we.umg.edu.pl, p.ptak@we.umg.edu.pl,

LITERATURA

- [1] K. Górecki, J. Zarębski, P. Górecki, P. Ptak: Compact thermal models of semiconductor devices – a review. *Int. Journal of Electronics and Telecom.*, Vol. 65, No. 2, 2019, pp. 151-158.
- [2] W. Janke, *Zjawiska termiczne w elementach i układach półprzewodnikowych*, WNT, Warszawa, 1992.
- [3] V. Szekely: A new evaluation method of thermal transient measurement results, *Microelectronics Journal*, Vol. 28, pp. 277-292, 1997.
- [4] D. Schweitzer, F. Ender, G. Hantos, P.G. Szabo: Thermal transient characterization of semiconductor devices with multiple heat-sources—Fundamentals for a new thermal standard. *Microelectronics J.*, Vol. 46, 2015, pp. 174–182.
- [5] P. Górecki, K. Górecki: Measurements and computations of internal temperatures of the IGBT and the diode situated in the common case. *Electronics*, Vol. 10, No. 2, 2021, 210.

- [6] J.W. Sofia, Analysis of thermal transient data with synthesized dynamic-models for semiconductor-devices. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology Part A, Vol. 18, No. 1, 1995, pp. 39-47.
- [7] K. Górecki, P. Górecki: Nonlinear compact thermal model of the IGBT dedicated to SPICE. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, No. 12, 2020, pp. 13420-13428.
- [8] K. Górecki, K. Detka, K. Górski: Compact thermal model of the pulse transformer taking into account nonlinearity of heat transfer. Energies, Vol. 13, No. 11, 2020, 2766.
- [9] K. Górecki, P. Ptak: Compact modelling of electrical, optical and thermal properties of multi-colour power LEDs operating on a common PCB. Energies, Vol. 14, No. 5, 2021, 1286.
- [10] K. Górecki, K. Posobkiewicz: Influence of a Cooling System on Power MOSFETs' Thermal Parameters. Energies, Vol. 15, No. 8, 2022, 2923.
- [11] P.E. Bagnoli., C. Casarosa, M. Ciampi and E. Dallago: Thermal Resistance Analysis by Induced Transient (TRAIT) Method for Power Electronic Devices Thermal Characterization – Part I: Fundamentals and Theory, IEEE Trans. on Power Elect., Vol. 13, No. 6, 1998, pp. 1208–1219.
- [12] K. Detka, K. Górecki: Electrothermal model of coupled inductors with nanocrystalline cores. Energies, Vol. 15, No. 1, 2022, 224.
- [13] L. Dupont, Y. Avenas: Preliminary evaluation of thermo-sensitive electrical parameters based on the forward voltage for online chip temperature measurements of IGBT devices. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 51, No. 6, pp. 4688-4698, 2015.
- [14] L. Dupont, Y. Avenas, P.-O. Jeannin: Comparison of junction temperature evaluations in a power IGBT module using an IR camera and three thermosensitive electrical parameters. IEEE Trans. on Industry App., Vol. 49, No. 4, pp. 1599-1608, 2013.