



Universitatea Babeş-Bolyai
Facultatea de Fizica
Şcoala Doctorală de Fizică



Doctoral Thesis

Calibrarea modelelor pentru design termic asistat de simulări

By

Raul Cătălin CIOBAN

Îndrumător științific
Prof. Univ. Dr. Simion SIMON

CLUJ-NAPOCA
2022

Cuprins

Structura tezei.....	4
Capitolul 1	6
Introducerea sistemelor electronice și conceptelor teoretice de evaluare termică	6
1.1 Electronica automobilelor.....	6
1.2 Sisteme electronice si fiabilitatea din punct de vedere termic.....	7
1.3 Teorie termică.....	7
1.4 Metoda Elementului Finit	9
1.5 Concluzii	9
Capitolul 2	10
Metodologie și pregătirea modelului	10
2.1 Introducere	10
2.2 Componentele măsurate	10
2.3 Metodologia de măsurare	11
2.4 Pregătirea CAD-ului.....	11
2.5 Setările inițiale ale modelului	11
2.6 Studii de sensibilitate.....	12
2.7 Calibrarea modelului.....	13
2.7.1 Calibrarea manuală	13
2.7.2 Calibrarea automatizata.....	13
2.8 Concluzii	14
Capitolul 3	15
Calibrarea modelului unei componente de tip MOSFET utilizând măsurătorile T3ster și transformări SF.....	15
3.1 Introducere	15
3.2 Metodologia numerică și experimentală	15
3.3 Rezultate si discuții	16
3.3.1 Măsurători de impedanță termică.....	16
3.3.2 Creerea geometriei	17
3.3.3 Optimizarea.....	18
3.4 Validarea modelului	19
3.5 Concluzii	21
Capitolul 4	22
Către calibrare automată a modelelor.....	22
4.1 Introducere	22
4.2 Considerente teoretice	22

4.3 Metodologie si echipament	23
4.3.1 Măsurători	23
4.3.2 Creerea geometriei	23
4.3.3 Pregătirea modelului de simulare	24
4.4 Calibrarea componentei.....	24
4.4.1 Calibrarea folosind SF și abordarea iterativă	24
4.4.2 Calibrarea automată folosind optiSlang	25
4.5 Concluzii	26
Capitolul 5	27
5.1 Introducere	27
5.3 Modelarea FEM.....	28
5.3.1 Descrierea si modelarea componentelor.....	28
5.3.2 Modelarea configurațiilor de măsurare.....	29
5.3.3 Metodologia OptiSlang	29
5.4 Rezultate si discuții	29
5.4.1 Măsurători	29
5.4.2 Optimizarea automată	30
5.5 Concluzii	31
Capitolul 6	32
Concluzii finale	32
Referințe	33
Anexă – Lista publicațiilor	34

Cuvinte cheie:

modelare numerica, fiabilitate, design termic, optimizare, automatizare

Structura tezei

Industria de electronică și în special cea pentru automobile a văzut o creștere semnificativă în ultimii ani. Aplicațiile pentru siguranța, confort și control au crescut și, ca atare, necesită un număr tot mai mare de unități electronice. Această creștere, la rândul său, a dus atât la un timp mai scurt de dezvoltare a produselor cât și la o creștere a provocărilor din punct de vedere al fiabilității. Pentru a susține aceste activități, modelele numerice au devenit un instrument critic în dezvoltarea produselor. De la primii pași de dezvoltare, când trebuie luate decizii rapide sau sunt necesare modificări rapide în proiect, până în etapele avansate ale proiectului când se răspund la întrebările de fiabilitate.

Unul dintre principalele aspecte ce trebuie luate în considerare în construcția unui ECU (unitate de control electronică) este managementul termic al sistemului. Supra-încălzirea datorată puterii aplicate ridicată, un schimb de căldură scăzut cu ambientul sau o acuratețe scăzută în estimările facute în timpul definirii conceputului de răcire poate duce la întâzieri în procesul de dezvoltare și la defecțiuni în timpul de viață al produsului. Prin crearea reprezentărilor numerice ale sistemului, performanța termică a construcției poate fi verificată și optimizată pentru diferite aplicații. ECU-urile sunt sisteme complexe cu multe părți interconectate iar pentru a avea o reprezentare corectă, modelul trebuie să aibă o acuratețe mare la nivelul fiecărei componente a sa. Modele termice FE (Element Finit) pentru componente electronice cu o structură geometrică detaliată nu sunt în general disponibile de la furnizori, sau dacă sunt disponibile, nu corepund întotdeauna necesităților de acuratețe a unei aplicații specifice.

Teza curentă, are ca scop atât înțelegerea diferiților MOSFET (transistori cu efect de câmp poartă oxid-metal) cât și particularitățile conducției căldurii prin ei dar și a dezvoltării unei metodologii pentru crearea modelelor termice FE pe baza măsurătorilor de impedanță termică. Lucrarea este structurată în două părți și șase capitole cu secțiuni de introducere la începutul fiecăruia și referințe la final.

Prima parte este cuprinsă din două capitole și are ca scop introducerea câtorva aspecte generale ale industriei de automobile și a teoriei necesare înțelegerii principalelor concepte utilizate în studiul nostru. Aceste aspecte sunt urmate de descrierea primilor pași făcuți în găsirea unei metode funcționale de construcție și calibrare a modelelor. Cea de **a doua parte** este împărțită în trei capitole care descriu procesul de calibrare a diferitelor tipuri de MOSFET folosind diferite metode. Fiecare capitol prezintă o nouă etapă în procesul de creare a metodologiei de modelare, construit pe baza experienței dobândite în pasul anterior.

Primul capitol intitulat *“Introducerea sistemelor electronice și conceptelor teoretice de evaluare termică”* începe cu o scurtă istorie și o privire de ansamblu a tendințelor din industria de automobile pentru a înțelege necesitatea noilor tehnologii în dezvoltarea produselor. Pe urmă continuă cu o descriere a ansamblurilor electronice și a fiabilității lor termice. În continuare în capitol, sunt discutate în detaliu conceptele teoretice de bază ale principiilor transferului de căldură și mărimilor fizice termice, cum ar fi rezistența termică și impedanța termică. Capitolul se încheie cu concepte teoretice ale metodei elementului finit (FEM) și implementarea acestuia în simulări termice.

Al **doilea capitol** intitulat *“Metodologie și pregătirea modelului”* descrie dispozitivele măsurate și calibrate în studiile efectuate, împreună cu metodele utilizate pentru

a realiza acest lucru. Prima metodă discutată se referă la o descriere a măsurătorilor de impedanță termică (Z_{th}). Următoarele metode, prezintă măsurătorile analitice utilizate în determinarea structurii interioare a DUT-urilor (componentă testată) și pașii utilizați în crearea unei geometrii CAD. Folosind aceste date, următoarea parte se concentrează pe configurarea modelului de simulare și pe studiile relevante de sensibilitate ale parametrilor săi. În secțiunea finală a acestui capitol, cele două concepte de calibrare a modelului utilizate în capitolele următoare sunt discutate pe scurt.

Al treilea capitol „Calibrarea modelului unei componente de tip MOSFET utilizând măsurătorile T3ster și transformări Structure Function”, se concentrează pe construirea și înțelegerea unei componente de tip LFPak88. În acest capitol ne propunem să măsurăm toate cele trei căi de deplasare a căldurii și să calibrăm modelul de simulare pentru o reprezentare fidelă a tuturor celor trei. Acest lucru se realizează folosind măsurători Z_{th} și transformări de tipul „structure functions” (SF). Folosind PCB-uri (plăci cu circuit imprimat) pe care componenta este cositorită și reprezentarea lor virtuală echivalentă, modelul calibrat este validat cu ajutorul simulărilor.

În cel de al **patrulea capitol „Către calibrare automată a modelelor”,** este discutată o nouă metodă de calibrare a componentelor. Folosind o componentă de tip D2Pak (TO-263) de la Infineon ca dispozitiv testat (DUT), măsurătorile T3ster sunt efectuate pentru o configurație drenă-jos. Inițial, modelul este calibrat cu succes prin aceeași metodă ca cea din capitolul trei. După calibrarea cu succes folosind metoda iterativă, este prezentată o nouă metodă bazată pe algoritmi de optimizare disponibili comercial. Studiul se încheie cu o comparație a celor două și argumentează pentru avantajele calibrării directe a curbelor de impedanță într-o manieră automată față de procesul manual folosind transformări de tipul “structure function”.

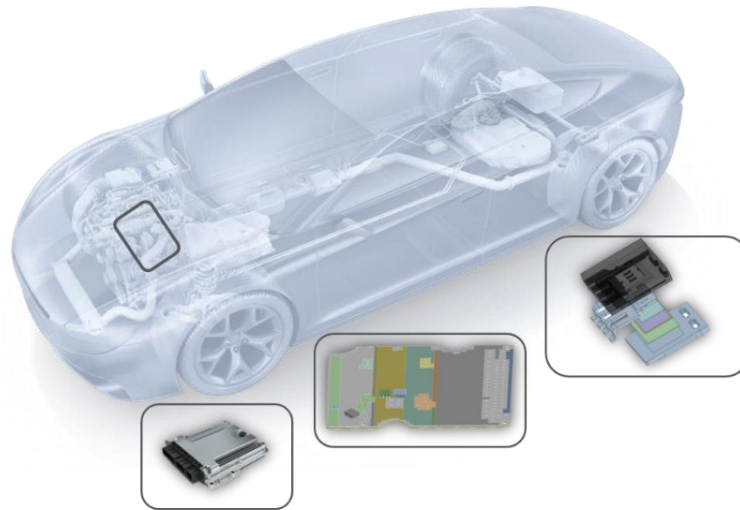
Capitolul cinci „Calibrarea completă a componentelor de tip MOSFET prin optimizare automată” se bazează pe experiența dobândită în timpul studiilor discutate în capitolele precedente. Metoda automatizată, argumentată în capitolul 4, este utilizată în continuare pentru modelarea a două componente diferite de tip LFPak56 și LFPak56D. În timp ce în capitolul 3 am folosit metoda manuală pentru a calibra toate căile de deplasare a căldurii printr-o componentă LFPak88, iar în capitolul 4 ne-am concentrat pe găsirea unui mod de lucru pentru o calibrare directă și automată folosind impedanța termică, în acest capitol cele două sunt aduse împreună. Se face o actualizare a metodologiei pentru a ajusta simultan toate proprietățile fiecărei căii de deplasare folosind algoritmi de optimizare.

Ultimul capitol prezintă concluziile finale și contribuțiile principale ale lucrării.

Deși proprietățile derivate pentru fiecare componentă sunt specifice modelului său corespunzător, diferențele găsite față de valorile din literatură, evidențiază importanța calibrării modelelor folosind măsurători. Metodologia prezentată în acest capitol final, poate fi aplicată cu succes la măsurarea și modelarea oricărei componente de tip MOSFET, rezultând în modele de înaltă precizie, cu o utilizare largă în proiectarea termică.

Capitolul 1

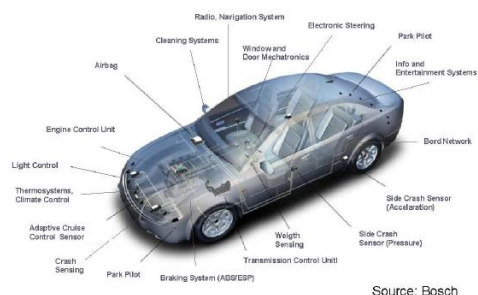
Introducerea sistemelor electronice și conceptelor teoretice de evaluare termică



1.1 Electronica automobilelor

În industria auto, prima unitate electronică de control (ECU) a fost folosită pentru injectia combustibilului. În 1953, înainte de dezvoltarea primelor tranzistoare cu efect de câmp (MOSFET) și microcontrolere, Bendix Corporation a început să dezvolte primul „Electrojector” EFI comercial [1,2]. Bazat parțial pe această tehnologie, Bosch în 1967 a dezvoltat primul său sistem electronic de injecție a combustibilului numit „Jetronic”. O utilizare mai răspândită a electronicii în domeniu a venit la începutul anilor 1970 când dezvoltarea circuitelor integrate și microprocesoarelor MOS a condus la o nouă gamă de aplicații în industria auto, cum ar fi unități de control airbag, unități de control al transmisiei (TCU), control adaptiv al vitezei de croazieră (ACC), program electronic de stabilitate (ESP) și altele. [3]

Acestea au dus mai departe la o creștere a industriei electronice auto în ultimul deceniu, cu aplicații noi (Figura 1a) care vin să răspundă nevoilor clienților. Cantitativ, acest lucru se poate observa în contribuția costului total al electronicelor la costul unui vehicul (Figura 1b), care a crescut de la aproximativ 5% în anii 1970 la 35% în 2010 și se estimează că va crește până la 50% în anul 2030. [4]. Numărul de dispozitive electronice și componente integrate în mașini în aceste zile este în creștere, iar fiabilitatea componentelor electronice utilizate în dispozitivele de control are un impact tot mai mare asupra fiabilității vehiculului în ansamblu.



Source: Bosch

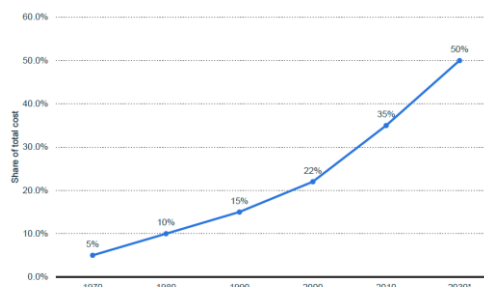


Figura 1. (a) Utilizarea curentă (ECUs) în vehicule comerciale [1];(b) Costul electronicelor raportat la costul total al unui vehicul [4];

1.2 Sisteme electronice si fiabilitatea din punct de vedere termic

Fiabilitatea ECU-urilor este o parte critică a procesului lor de proiectare. Toate elementele de proiectare ale ansamblului, de la elementele de bază ale circuitului, cum ar fi tranzistoarele, rezistențele și condensatorii, până la placa de circuit imprimat (PCB) și carcasa electronicii, trebuie luate în considerare și alese în funcție de aplicația necesară.

Ansamblurile electronice moderne se bazează în principal pe o serie de tranzistoare MOS (semiconductori oxid-metal) și circuite integrate montate pe plăci de circuite imprimate (PCB). Împreună cu elementele pasive ale circuitului, cum ar fi rezistențele și condensatorii, ele alcătuiesc ansamblul plăcii de circuit imprimat (PCBA) care poate îndeplini acum funcția electronică pentru care a fost proiectat. PCBA-ul (Figura 2) este în general conectat la alte părți mecanice, cum ar fi conectori sau carcase, fiecare având un rol specific în construcția ECU.



Figura 2. Exemplul unui anamblu PCBA populat cu componente [5]

Defecțiunile electronicelor pot rezulta dintr-o varietate de factori, cum ar fi proiectarea, componentele și procesele de fabricație, suprasolicitare și întreținere. În funcție de momentul defectării, ele pot fi clasificate în trei clase distincte: timpurii, legate de evenimente și uzură [6].

Majoritatea evaluărilor și predicțiilor pentru defecțiunile ce ar apărea pe durata de viață a ECU-lui pot fi făcute prin testare, ceea ce este posibil doar în etapele finale de proiectare a produsului, când de multe ori devine dificilă și costisitoare implementarea modificărilor.

1.3 Teorie termică

Transferul de căldură se bazează pe trei moduri de transport: conducție, convecție și procese de radiație. Fiecare proces se bazează pe o lege diferită a transportului. [7]

În practică vom avea nevoie, în general, de ecuația de **conducție** a căldurii unidimensionale (Ec. 1).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Cel de al doilea mod de transport pentru căldură este **convecția**, care este procesul de îndepărtare a căldurii dintr-un corp solid de către un fluid în mișcare. Aceasta este reprezentată de legea răcirii lui Newton în forma ei staționară:

$$q = \bar{h}(T_{body} - T_{\infty}) \quad (2)$$

unde \bar{h} este coeficientul mediu de transfer al căldurii pe întreaga suprafață a corpului, h ar fi valoarea locală într-o anumită locație.

Al treilea și ultimul mod de transport este prin radiație. Cantitatea de energie emisă de un corp depinde de temperatură și de proprietățile de suprafață. Deoarece emisia e proporțională cu temperatura absolută la puterea a patra, corpurile mai reci vor emite mai puțină energie decât cele fierbinți. Experimental, legea radiației a fost determinată de Stefan în 1879 și explicată de Boltzmann pe baza termodinamicii în 1884. Pentru un corp negru relația dintre $e(T)$ și T este:

$$e_b(T) = \sigma T^4 \quad (3)$$

unde σ este constanta Stefan-Boltzmann iar valoarea ei este $5.670374 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ și T este temperatura absolută. [7]

Rezistența termică (R_{th}) se definește ca raportul diferenței dintre temperatura T_a și T_b dintre două puncte, și fluxul de căldură ϕ_q dintre ele.

$$\theta_{ab} = \frac{T_b - T_a}{\phi_q} \quad (4)$$

Pentru caracterizarea termică a unui sistem, este de asemenea important să se ia în considerare cantitatea de energie stocată de fiecare material prin capacitatea sa calorică. Acesta este descris de **impedanța termică (Z_{th})** a sistemului. Folosind analogia electrică (Figura 3) discutată mai sus, acestea pot fi modelate ca și condensatori.

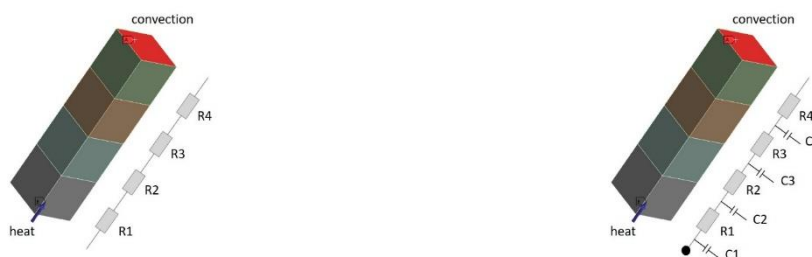


Figura 3. Reprezentarea unei deplasări uni-dimensionale a căldurii

Definiția conceptelor și standardelor pentru măsurarea R_{th} și Z_{th} a unui dispozitiv semiconductor folosind aproximarea uni-dimensională de deplasare a căldurii se regăsește în standardul JEDEC JESD 51-14 [8].

Înțelegerea contribuției fiecărui element din calea căldurii în răspunsul total în impedanța termică nu este trivial, deoarece acesta este o sumă a rezistenței termice și capacităților. În acest sens, o serie de transformări matematice sunt utilizate pentru a converti curbele Z_{th} într-o reprezentare de capacități și rezistențe succesive numită „structure function” (Figura 4) [9].

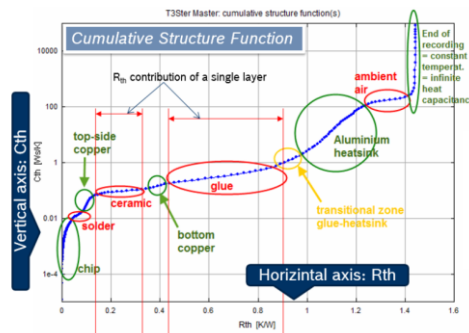


Figura 4. Exemplu de interpretare a unei "structure function" [10]

1.4 Metoda Elementului Finit

Pentru a descrie comportamentul sistemelor cu multiple componente, este o practică obișnuită să-l împărțim în componente individuale sau în ceea ce am putea numi „elemente” care au un comportament bine-cunoscut. Pe baza înțelegerii fiecărui element, sistemul mai complex poate fi apoi reconstruit. Ceea ce numim o problemă „discretă” este descrisă de un număr finit de astfel de elemente bine definite. Dacă împărțirea în elemente ar continua la nesfârșit, problema ar deveni „continuă”, ceea ce este mai aproape de adevărata natură a problemelor de fizică și inginerie.

Metoda elementului finit conform definiției lui O.C. Zienkiewicz este o metodă de aproximare a problemelor continue astfel încât:

- (a) problema continuă este împărțită într-un număr finit de elemente, al căror comportament este specificat de un număr finit de parametri și
- (b) soluția sistemului complet ca un ansamblu al elementelor sale urmează exact aceleași reguli ca cele aplicabile problemelor discrete standard. [11]

Există o cantitate semnificativă de aplicații software care rezolvă aceste tipuri de sisteme discrete. În studiile noastre am folosit programul Ansys Mechanical care implementează ecuația diferențială a câmpului termic în forma sa matriceală:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (5)$$

unde [C] este matricea capacității, [K] este matricea conductivității și Q este fluxul de căldură.

1.5 Concluzii

În acest capitol au fost introduse și discutate principalele concepte teoretice legate de teoria termică și proiectarea asistată de calculator. Aceste puncte sunt esențiale pentru scopul nostru în înțelegerea și dezvoltarea metodologiei de modelare detaliată a elementelor de bază într-un sistem termic. Pentru a completa imaginea, în capitolele care urmează, vor fi introduse conținut teoretic suplimentar împreună cu cazurile de utilizare de ultimă generație.

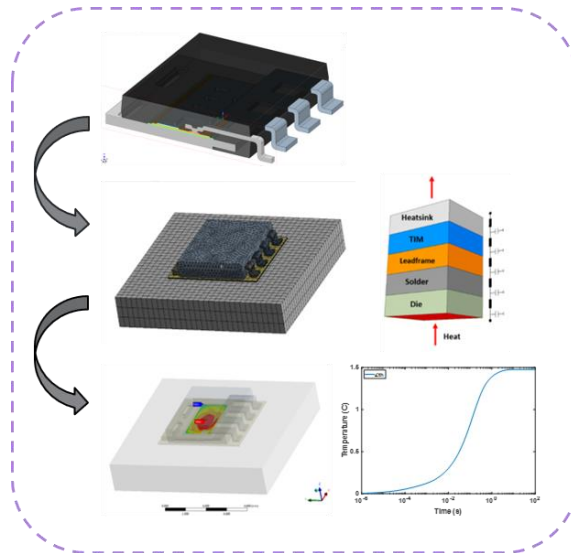
Procesul de calibrare este desul de simplu:

- i) Înregistrarea unei măsuratori termice a unei componente
- ii) Reprezentarea virtuala a acelei componente
- iii) Stearea inițiala a modelului de simulare
- iv) Ajustarea parametrilor modelui pentru a se potrivi cu semnalul măsurat

Pe parcursul tezei prezentăm procesul plecând de la acest procedeu fundamental, continuând cu studiul în profunzime al fiecărui pas, și rafinând abordarea noastră pentru a ajunge la o procedura optimă care să ofere rezultate fiabile și precise.

Capitolul 2

Metodologie și pregătirea modelului



2.1 Introducere

Capitolul curent cuprinde toți pașii necesari făcuți în faza inițială a studiilor noastre. Este inclus totul, de la metodologia de manipulare a măsurătorilor termice până la metodele analitice utilizate în descrierea geometriei dispozitivelor și modelul numeric.

2.2 Componentele măsurate

Datorită atât importanței, cât și numărului de componente de tip MOSFET în proiectarea electronică, aceste tipuri de componente au fost alese ca dispozitiv pilot pentru studiul curent. Au fost studiate patru tipuri de configurații (Figura 1).

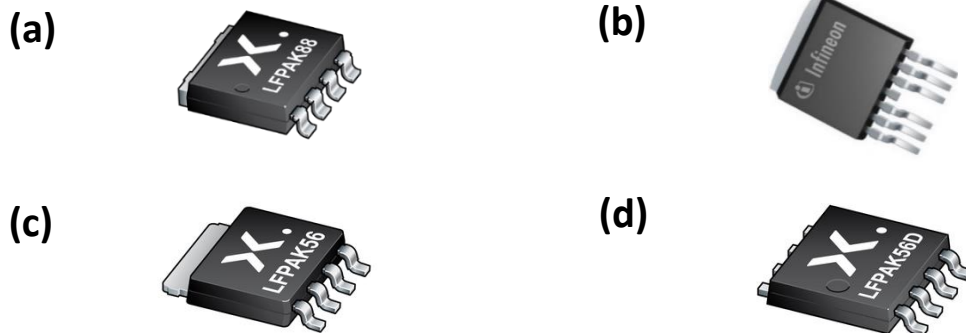


Figura 1. a) BUK7S1R0-40H (LFPak88) [12]; b) IPB180N06S4-H1 (D2Pak) [13]; c) BUK7Y1R7-40H (LFPak56) [12]; d) BUK7K6R8-40E (LFPak56D) [12]

2.3 Metodologia de măsurare

În studiile noastre, am folosit măsurători ale unor parametri sensibili la temperatură (TSP). Măsurarea TSP este obișnuită pentru măsurarea comportamentului termic al semiconductorilor și poate fi descrisă printr-o varietate de parametri, cum ar fi căderea de tensiune a diodei, căderile de tensiune de poartă către sursă, curentul emițătorului etc. Am folosit tensiunea directă a diodei care este, conform standardului JEDEC, cea mai folosită tehnică. Pentru a măsura curba impedanței termice, este necesară o treaptă de putere negativă. Pentru a măsura am folosit echipamentul de măsurare T3ster dezvoltat de Mentor Graphics.

Trei configurații au fost utilizate în măsurătorile noastre inițiale pentru a izola fiecare dintre cele trei căi de deplasare a căldurii într-un dispozitiv MOSFET. Configurația drena-jos se realizează prin fixarea DUT-ului pe o bandă de material de interfață termică (TIM) care este fixată în continuare pe un radiator răcit cu apă. O configurație similară este utilizată pentru măsurătorile drena-sus. Pentru configurarea de răcire prin pini, pinii DUT-ului sunt cositorți pe un bloc mare de cupru care este apoi fixat printr-un strat TIM de radiator.

2.4 Pregătirea CAD-ului

O structură interioară detaliată a componentei este necesară pentru o reprezentare precisă a traseului căldurii prin aceasta. În acest sens, există mai multe tehnici analitice disponibile, cum ar fi **secționarea**, **tomografia computerizată (CT)** și **decapsularea chimică**. Toate cele trei metode au fost utilizate în studiul nostru pentru a obține o bună înțelegere a structurilor investigate.

Folosind tehnicile analitice menționate mai sus, au fost generate imagini și măsurători ca referință pentru model. Datele au fost apoi utilizate în continuare în software-ul **CAD** disponibil comercial **Ansys SpaceClaim** pentru a crea atât geometria modelului componentelor, cât și o geometrie simplificată pentru sistemele măsurătorilor (Figura 2).

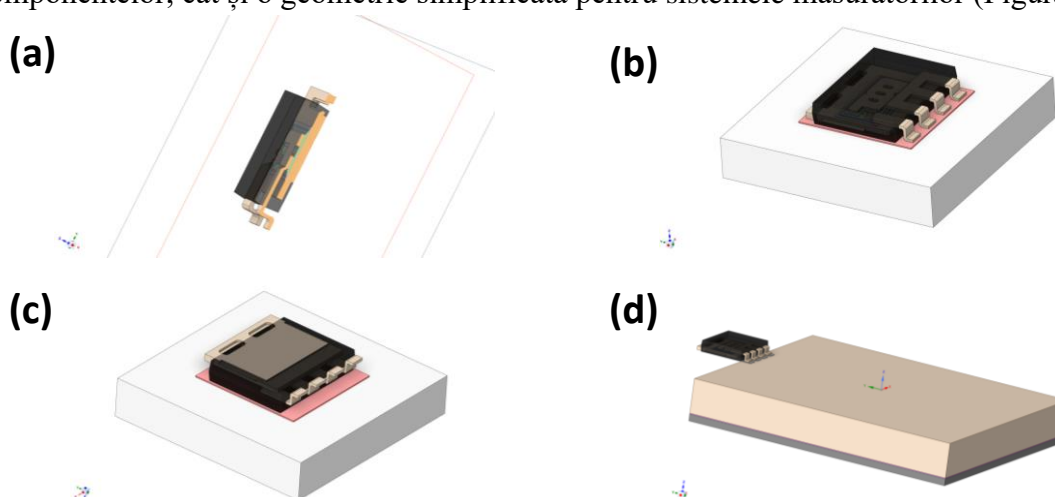


Figura 2. (a) Geometria generată pe baza măsurătorilor; (b) DUT în configurația drena - jos; (c) DUT în configurația drena - sus; (d) DUT în configurația de răcire prin pini

2.5 Setările inițiale ale modelului

Odată ce geometria a fost generată, trebuie să definim setările modelului mecanic. După cum am discutat în capitolul 1, primul pas al procesului este discretizarea modelului (Figura 3).

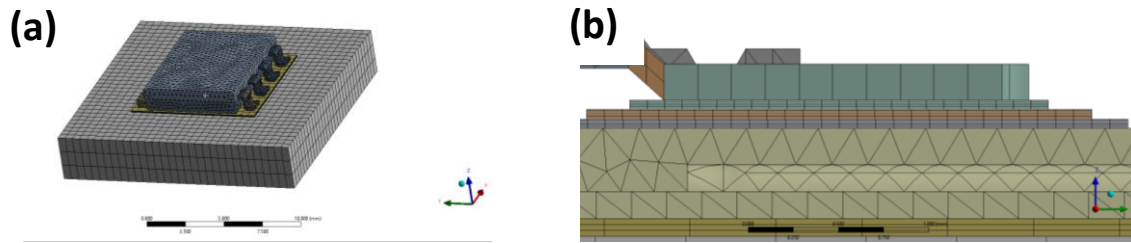


Figura 3. (a) Prezentarea modelului discretizat în configurația drenea-jos; (b) Vedere detaliată a discretizării structurii interne a componentei

Primul parametru al analizei termice este temperatura inițială a sistemului. Deoarece atât R_{th} – ul cât și Z_{th} - ul se bazează pe creșterea temperaturii și nu pe temperatura absolută, este convenabil să o setăm la 0°C . Pentru abordarea inițială a studiului nostru, pentru LFPak88 și D2Pak, am folosit un flux de căldură pe suprafața cipului de 1W . Deoarece reprezentăm un flux de căldură 1D, pentru simplitate, a fost setată o condiție de temperatură fixă de 0°C pe radiator. În figura 4 putem vedea implementarea acestor parametri.

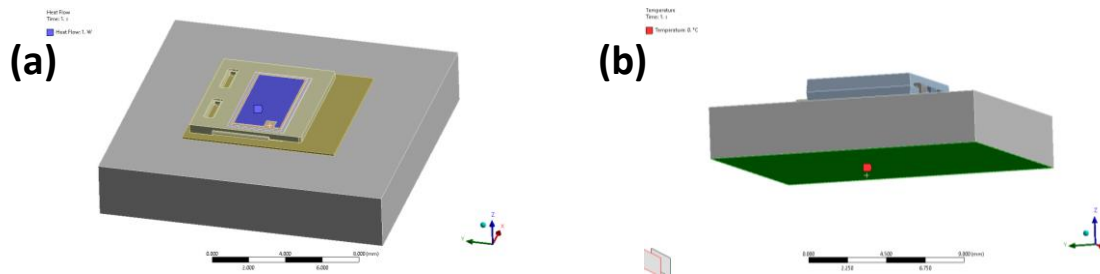


Figura 4. (a) flux de căldură de 1W aplicat pe zona activă a cipului; (b) condiție la limită aplicată pe radiator

Pașul final este evaluarea rezultatelor. Noi vom evalua temperatura medie a regiunii pe care s-a aplicat puterea (Figura 5).

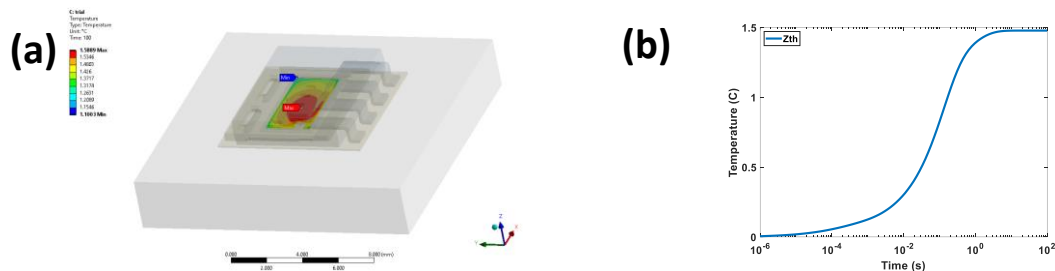


Figura 5. (a) Evaluarea temperaturii pe suprafața cipului; (b) Z_{th} – ul evaluat

2.6 Studii de sensibilitate

Pentru a ajunge la setările descrise mai sus, studii de sensibilitate au fost efectuate la începutul modului de lucru, pentru a înțelege care sunt cele mai bune valori de utilizat pentru diverși parametri cum ar fi nivelul de **discretizare** ale geometriei, discretizarea intervalului de **timp** și care este impactul **convecției** atunci când se presupune un flux de căldură 1D către radiator.

2.7 Calibrarea modelului

2.7.1 Calibrarea manuală

Simularea este efectuată cu proprietățile inițiale ale materialului determinate pe baza literaturii și se extrage temperatura medie a cipului. Reprezentarea tranzitorie a acestei creșteri a temperaturii în raport cu puterea disipată este definită ca $Z_{th}(t)$ [14], care descrie întreaga cale de deplasare a căldurii prin componentă. În timp ce compararea acestor curbe Z_{th} oferă un bun punct de plecare, doar folosind această comparație directă este dificil de identificat ce strat din interiorul componentei necesită ajustare. Ca atare, “structure function” este utilizată ca o reprezentare a rezistenței (R_{th}) și capacității (C_{th}) cumulate a întregii căi de deplasare pe baza transformărilor Cauer - Foster (Figura 6a). O vedere schematică a acestei simplificări a căii de deplasare a căldurii este prezentată mai jos (Figura 6b).

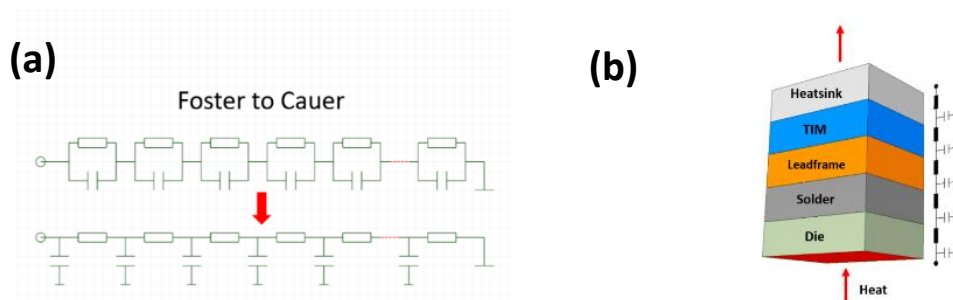


Figura 6. a) conversia Foster – Cauer; b) Calea de deplasare a căldurii schițată

Comportamentul tranzitoriu al unui corp este influențat de trei proprietăți principale de material: conductivitatea termică, densitatea și căldura specifică. Ajustarea SF-ului se face prin modificarea proprietăților materialului pentru fiecare strat din interiorul componentei începând de la cipul de siliciu. Schema acestei abordări este prezentată mai jos în Figura 7.

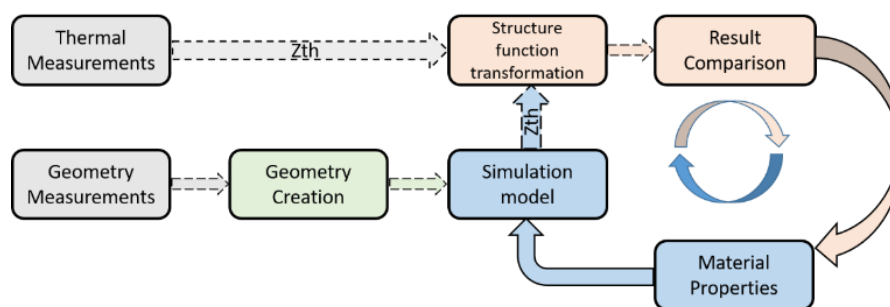


Figura 7. Schița calibrării iterative

2.7.2 Calibrarea automatizată

A doua metodă se bazează pe o calibrare automată folosind algoritmi de optimizare. Spre deosebire de metoda anterioară care necesită aproximări matematice pentru derivarea SF, această metodă permite potrivirea directă a curbelor de impedanță. Folosind aceleași considerații generale și condiții la limită ca și în metoda anterioară, un studiu de sensibilitate a răspunsului termic pe baza proprietăților materialelor este definit în Ansys folosind plug-in-ul optiSlang și metoda DoE.

Pe baza rezultatelor, este generat un metamodel de prognoză optimă (MOP). MOP se bazează pe căutarea valorilor optime ale variabilelor de intrare și a celui mai potrivit model de aproximare [15]. Numărul de puncte de testare disponibile și intervalul în care acestea au fost derivate afectează direct acuratețea MOP-ului. Pornind de la aceste rezultate, optimizarea se face cu o serie de algoritmi.

Primul algoritm folosit în etapa de optimizare este algoritmul evolutiv (EA). După obținerea designului optim folosind acest algoritm, valorile parametrilor rezultate sunt transmise unui algoritm de Programare Neliniară prin Lagrangian Cuadratic (NLPQL) [16].

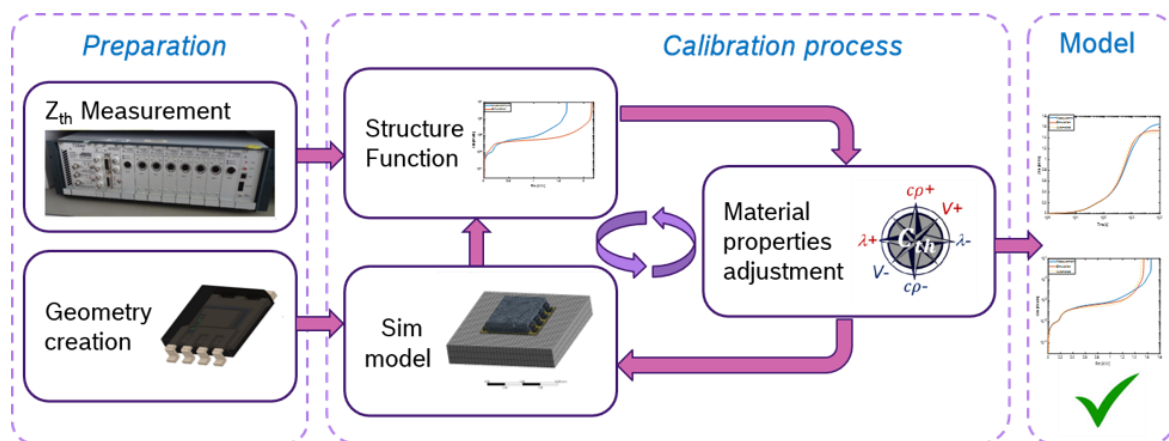
Rezultatele măsurătorilor (Z_{th}) sunt folosite ca referință în optimizare. Prin minimizarea erorii dintre măsurătoare și rezultatele preconizate ale simulării la momente de timp discrete, sunt identificate proprietățile materialelor corespunzătoare modelului calibrat.

2.8 Concluzii

În acest capitol am acoperit o serie de puncte critice pentru următoarele capitole; cum ar fi: descrierea dispozitivelor măsurate, echipamentul de măsurare și configurarea, măsurătorile analitice necesare pentru generarea CAD și o scurtă prezentare generală a setărilor modelului și a metodelor calibrare. Toate metodele analitice și numerice necesare au fost investigate și pot fi ușor transferate pentru a stabili metodologia de calibrare a modelului care este ținta finală a acestei teze. În următoarele capitole metodele vor fi aplicate pe patru componente de tip MOSFET specifice.

Capitolul 3

Calibrarea modelului unei componente de tip MOSFET utilizând măsurătorile T3ster și transformări Structure Function



Reprodus din: Validated Model Calibration for Simulation Aided Thermal Design. IEEE, pp. 114–123. doi:10.23919/SEMI-THERM50369.2020.914285

3.1 Introducere

Scopul acestei lucrări este, în principal, de a prezenta provocările întâmpinate în măsurarea răspunsului termic a MOSFET-urilor și calibrării modelului FE folosind „structure functions” [9]. În al doilea rând, este de a valida modelul calibrat folosind PCB-uri de testare și de a arăta utilitatea în studierea impactului diferitelor construcții și a detaliilor de layout asupra performanței generale de răcire. Componentele de tipul LFPACK au fost alese ca dispozitive pentru testare pentru studiul actual datorită tendințelor de miniaturizare din ce în ce mai puternice.

3.2 Metodologia numerică și experimentală

În abordarea prezentată, am ales următoarele trei configurații de testare răcite conductiv, pentru o caracterizare termică completă a componentei MOSFET de putere [17]:

1. „drena-jos” sau răcire inferioară (drena fixată pe o placă răcită cu apă, pini aflați în aer)
2. Răcire „prin pini” (pini costoriți pe un bloc de cupru, care, la rândul său, este atașat la o placă recită, drena și corpul componentei în aer)
3. Răcire „prin cacasă” sau partea superioară (carcasa de plastic fixată pe placa răcită, cu drena în sus spre aer)

Măsurătorile de impedanță termică au fost efectuate folosind echipamentul comercial T3Ster™.

Procesul de optimizare utilizat pentru calibrare este o abordare manuală, iterativă. Această metodă este utilizată pentru a calibra succesiv toate cele trei căi de deplasare a căldurii prin componentă, începând mai întâi cu calea principală prin drenă.

Pentru simularea modelului FE, s-au folosit două softwareuri comerciale: un software de tip FEA: Ansys Mechanical și unul de tip CFD: Mentor Graphics FloEFD. Această abordare a fost aleasă pentru a stabili dacă modelele derivate sunt valide și interschimbabile între diferite tipuri de software cu algoritmi diferiți.

3.3 Rezultate si discuții

Componenta aleasă pentru caracterizare este un MOSFET de putere de tipul BUK7S1R0-40H în format LPAK88 (SOT1235), realizat de Nexperia. Această componentă a fost aleasă ca obiect de studiu actual datorită conceptului său cu o construcție nouă, performanță termică ridicată și importanța ridicată a căilor de căldură auxiliare atunci când sunt montate pe PCB. Principalele structuri din căile de deplasare a căldurii prin LPAK88 sunt cipul de siliciu, stuctura de atașare pe ambele părți ale cipului de siliciu, drena de cupru în partea de jos și clema de cupru în partea de sus.

3.3.1 Măsurători de impedanță termică

Configurarea testului de tipul **drenă-jos** și rezultatele măsurătorilor sunt prezentate în Figura 1. Radiatorul răcit cu apă oferă o cale de căldură cu rezistență scăzută către apa la 25°C. $R_{th_junction-to-water}$ a fost măsurat în intervalul 1,7 K/W, iar R_{th_JC} al componentei a fost de aproximativ 0,3 K/W (folosind metoda TDIM [8]).

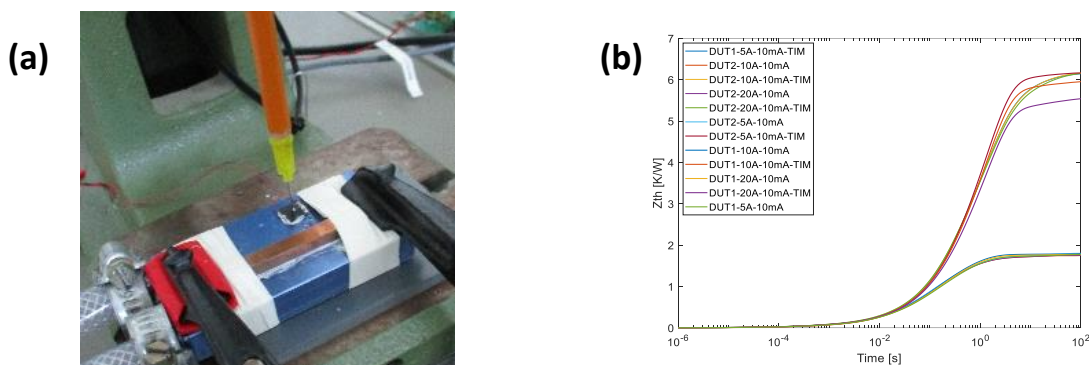


Figura 1. (a) Configurația de răcire Drenă-jos, cu o placă răcită folosită în experimente. (b) Rezultatele de impedanță termică cu și fără TIM, folosind diferiți curenți de încălzire. Curbele superioare sunt fără TIM, cele inferioare cu TIM.

Configurarea testului cu **răcire prin carcasă** (Figura 2) este foarte asemănătoare cu cea anterioară, dar componenta este fixată cu carcasa în jos, spre placa răcită, folosind un TIM, în timp ce drena e poziționată în sus, spre aer. $R_{th_junction-to-water}$ was a fost măsurat în intervalul 15-20 K/W, și R_{th_JC} al componentei a fost de aproximativ 4 K/W, folosind metoda TDIM [8].

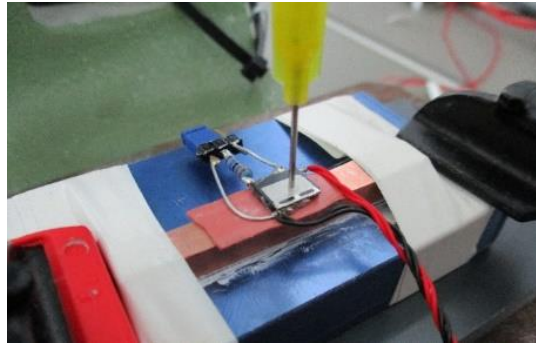


Figura 2. Configurația de răcire prin carcasă (drenă-sus)

Pentru răcirea prin pini, configurația testului cuprinde cinci DUT-uri cositorite pe o bucată placă de cupru (~100 x 50 x 5 mm), prezentate în Figura 3a. Placa de cupru a fost atașată de cea răcită cu apă folosind TIM. Rezultatul măsurătorilor este prezentat în Figura 3b.

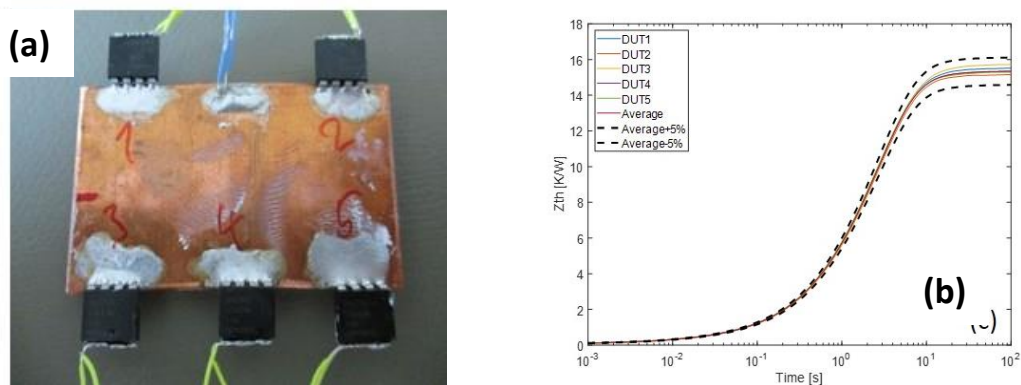


Figura 3. (a) Configurația de răcire prin pini; (b) Curbele Z_{th} măsurate pentru răcirea prin pini ($n=5$, $p=5\%$).

3.3.2 Creerea geometriei

Pe baza secționării, decapsulării și imagisticii cu raze X, un model geometric a fost creat folosind un software CAD SpaceClaim (Figura 4a, b).

Pentru a avea o reprezentare precisă a suprafeței cu sarcină de putere, s-a făcut o separare între zonele active și pasive. Acest lucru a fost realizat pe baza zonei de acoperire a fixării superioare a cipului (fixarea cu clema de cupru).

Pentru reprezentarea schemei de măsurare ale celor trei configurații s-au făcut estimări pentru dimensiunile TIM și ale radiatorului.

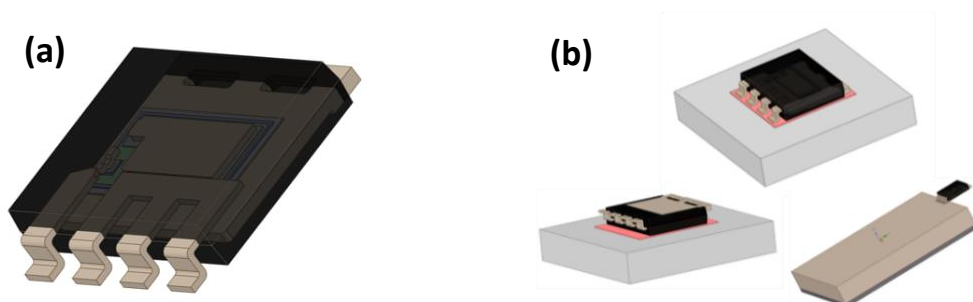


Figura 4. (a) geometrie; (b) schemele de măsurare

3.3.3 Optimizarea

Pentru calibrarea căii principale de deplasare a căldurii, a fost utilizată configurația de răcire drenă-jos. Presupunând un flux de căldură uni-dimensional simplificat, problema se reduce la identificarea și ajustarea proprietăților a trei straturi în SF: cipul de siliciu, fixarea inferioară și drena de cupru. Analizând SF corespunzătoare măsurătorii de imedpanță termică, pot fi identificate trei regiuni distincte ale căii de căldură drenă-jos în interiorul componentei. Prima regiune de până la 0,05 K/W poate fi atribuită căldurii care curge prin cip. A doua caracteristică între 0,05 și 0,09 K/W reprezentând trecerea căldurii prin materialul de fixare de sub siliciu. A treia și ultima caracteristică care se distinge este între 0,09 și 0,3 K/W și descrie fluxul de căldură prin drena subțire de cupru. Rezistența termică de peste 0,3 K/W corespunde căldurii care trece prin materialul de interfață termică și radiatorul răcit cu apă.

Calibrarea modelului (Fig 5a, b) a fost realizată printr-o analiză similară a SF calculate din răspunsurile Z_{th} simulate, în care au fost identificate valorile R_{th} și C_{th} corespunzătoare fiecărui strat și comparate cu rezultatele măsurătorii. Pe baza acestor constatări, ajustările ulterioare ale conductivității termice (TC) și densității fiecărei structuri din calea căldurii au fost efectuate pornind de la cipul de siliciu și deplasându-se spre exterior către radiatorul. După fiecare modificare a proprietăților materialului, a fost efectuată o nouă simulare și a fost făcută o nouă comparație.

Următorul pas în procesul de modelare este calibrarea proprietăților materialului căilor secundare de căldură prin carcasă și pini (Fig 5c, d). Configurația de măsurare a răcirii prin pini a fost prima configurație construită cu condiții la limită similare cu răcirea prin drenă. Utilizarea aceleiași ipoteze a unei căi de căldură uni-dimensionale ar reduce problema la identificarea și calibrarea proprietăților materialului de fixare a clemei și a clemei de cupru.

Pasul final al procesului de calibrare a componentelor a presupus compararea măsurătorilor cu răcire prin carcasă. Folosind aceeași configurație ca și pentru răcirea prin drenă, componenta – acum cu proprietățile materiale actualizate – a fost rotită și poziționată cu carcasa în contact cu TIM. Datorită calibrării configurației de răcire prin pini având și o reprezentare a carcusei, nu a fost necesară nicio calibrare suplimentară, iar modelul a confirmat mai degrabă rezultatele calibrării din pașii anteriori (Figura 5e, f).

Proprietățile rezultate (Tabelul 1) sunt diferite de valorile așteptate în general pentru materialele corespunzătoare. Deși diferențele mai mici în proprietățile drenei de cupru pot fi atribuite toleranțelor geometrice, conductivitatea siliciului și a materialului de fixare au abateri evidente de la ceea ce se pot considera valori fizice plauzibile și este dificil de atribuit doar influențelor geometrice.

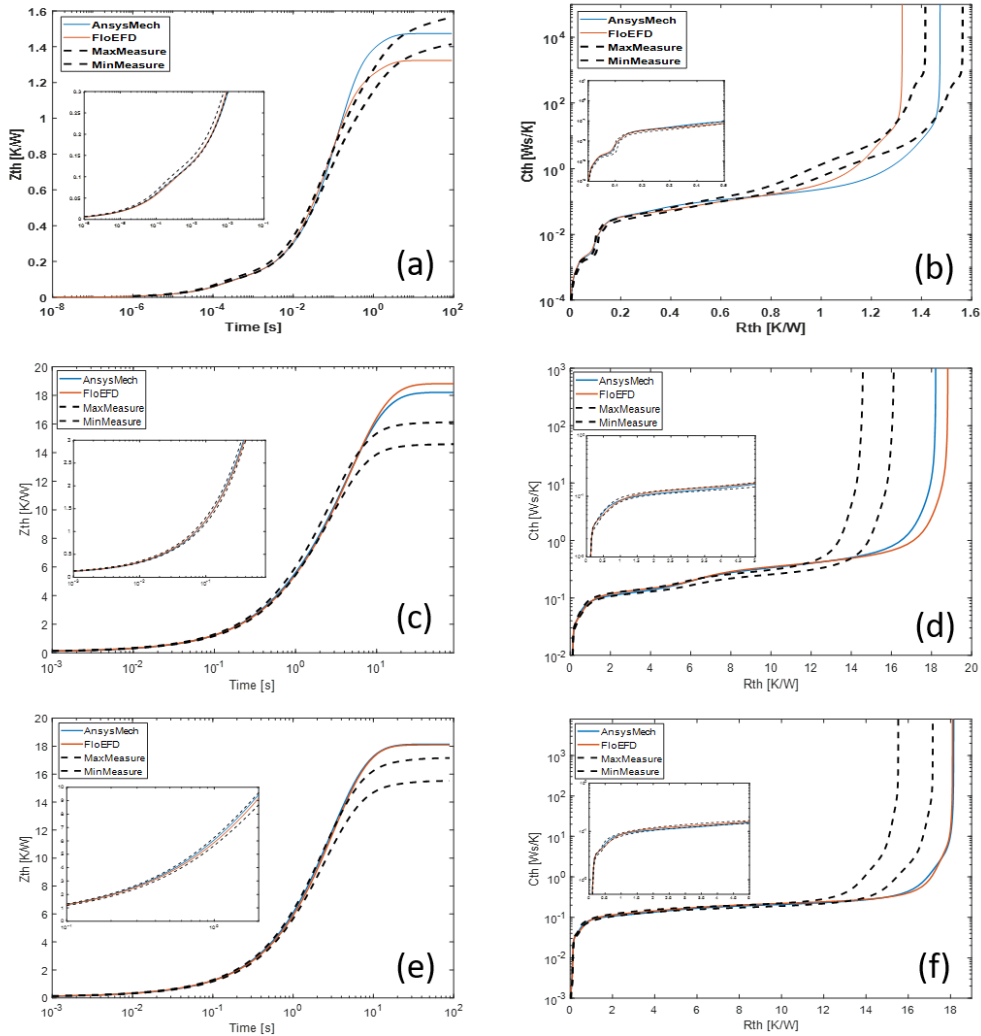


Figura 5. (a) SF pentru răcirea prin drenă (b) Z_{th} pentru răcirea prin drenă (c) SF pentru răcirea prin pini (d) Z_{th} pentru răcirea prin pini (e) SF pentru răcirea prin carcasă (f) Z_{th} pentru răcirea prin carcasă

Tablul 1 Proprietățile de material calibrate pentru o corecție în regiunea de 40-180 μs

Material/Prop	Densitate (Kg/m ³)	TC (W/mK)	Căldură specifică (J/KgK)
Silicon	2300	40	1000
Solder chip	8400	100	210
Solder clip	3200	20	210
Copper slug	10000	450	280
Copper clip	8300	310	280
Mold	4000	1	820

3.4 Validarea modelului

Vehiculul nostru de testare a urmat acest raționament: dacă nu există o modalitate de a obține o verificare precisă a modelului componentei în experimente bazate pe măsurare cu PCB, cel puțin ar trebui să putem demonstra că prin simplificarea suplimentară a modelului (de exemplu, dezactivarea uneia dintre căile secundare de căldură) răspunsul ar fi incorect. Această sarcină este posibilă ca implementare într-un layout care răcește atât drenea, cât și pini în mod egal. Un astfel de layout este prezentat în Figura 6.



Figura 6. Layoutul folosit în validarea modelului

Acest PCB are zone mari, dedicate de răcire pentru drenă de cupru și pini componente. În layoutul PCB-ului, FR4-ul dintre cele două zone a fost, de asemenea, îndepărtat (cu „fante”) pentru a reduce interacțiunea termică și pentru a separa fizic cele două zone. În acest fel, configurația poate exercita cele două căi de deplasare a căldurii mai semnificative ale componente (prin drenă și prin pini) și se așteaptă ca simulările să arate diferențe semnificative între modelele calibrate și necalibrate.

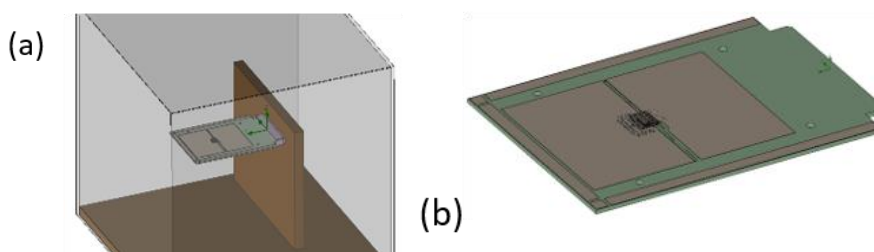


Figura 7. (a) Model CAD al PCB-ului în camera de aer staționar JEDEC (utilizat pentru simulări cu flux de aer); (b) Model FE detaliat al PCB-ului de testare cu o componentă LFPK88 cositorită (include viauri sub componentă)

Atât măsurarea, cât și evaluarea datelor simulate au arătat că valorile R_{th-JA} ale configurațiilor de testare cu PCB plasate în camera de aer staționar sunt foarte mari (>15 K/W) în comparație cu valoarea R_{th-JC} a componente ($<0,5$ K/W). Aceasta înseamnă că performanța termică generală este dominată de răspândirea căldurii în PCB și de blocajul PCB-aer, iar măsurarea prezintă un raport semnal-zgomot slab în intervalul de timp scurt (<100 ms) al Z_{th} -ului din cauza disipării limitate a puterii permise și a fluctuațiilor mici de temperatură a componente de tip LFPK88. Cu toate acestea, dacă ne „de-calibrăm” manual modelul componente (prin modificarea parametrilor materialelor sau prin modificarea geometriei), contribuția relativă a celor două căi principale de căldură din cadrul componente se va modifica, de asemenea, și utilizarea diferită a zonelor mari de drenă și pini a PCB-ului va arăta un efect vizibil asupra rezultatelor simulate. Acest lucru poate fi văzut în mod clar în răspunsurile de impedanță termică și la SF - ul diferitelor modele de simulare (Fig 8a, b). Modelul de componentă cu geometria și materialele corecte se potrivește cu rezultatele măsurătorii într-un interval de toleranță de 5%, în timp ce modelul de componentă cu aceeași geometrie, dar materiale necalibrate (biblioteca standard) arată un rezultat prea optimist.

De asemenea, dacă simplificăm modelul componente prin eliminarea clemei de cupru, ca și cum nu ar fi disponibilă nici o informație despre structura internă (Fig 8a, b), rezultatele arată o diferență semnificativă nu numai în răspunsul timpuriu al componente, ci și în părțile ulterioare. Valorile de temperatură la starea de echilibru devin mai mari cu $>20\%$,

ceea ce este o dovadă bună că modelarea transferului de căldură prin pini este necesară pentru un model termic LFPAK88 aplicabil universal.

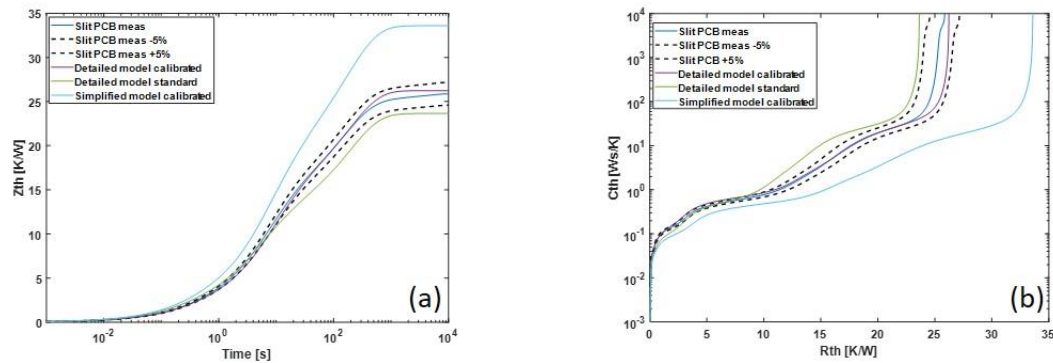


Figura 8. (a) Comparație între curbele de imedanță termică măsurate și cele simulate; (b) Comparație între curbele de SF măsurate și cele simulate.

3.5 Concluzii

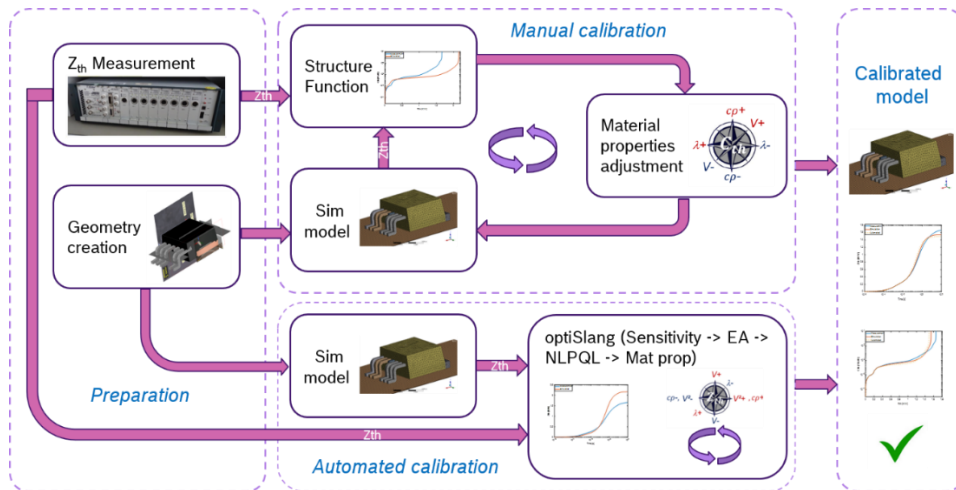
Componenta a fost măsurată, iar modelul acesteia a fost calibrat utilizând compararea SF - ului bazată pe o abordare iterativă, ajustând proprietăți ale materialelor diferitelor structuri. Modelul rezultat prezintă o potrivire foarte bună cu datele de referință măsurate.

Modelul calibrat a fost verificat cu o măsurătoare independentă pentru validare, folosind o placă PCB de test. Simulările FE au arătat o potrivire rezonabilă cu datele măsurate și au arătat că layoutul revizuit al PCB-ului (în cazul în care zone distincte de răcire sunt alocate atât pentru drenaj, cât și pentru pini) este un vehicul de testare adecvat pentru a demonstra că nu sunt posibile alte simplificări și, prin urmare, toate detaliile existente sunt necesare în modelul nostru calibrat.

Obținerea unui model de simulare fiabil cu o acuratețe foarte bună pe baza măsurătorilor, deschide posibilitatea evaluării și comparării performanței termice a diferitelor variante de layout. Aceste informații sunt relevante atunci când se dezvoltă noi produse și se caută construcția optimă în ceea ce privește performanța termică.

Capitolul 4

Către calibrare automată a modelelor



Reprodus din: FEM model calibration for simulation aided thermal design, *Microelectronics Reliability*, Volume 118, 2021, 114042, ISSN 0026-2714, doi: 10.1016/j.microrel.2021.114042.

4.1 Introducere

În acest capitolul, scopul este de a defini și crea un model de simulare cu o acuratețe ridicată, cu o eroare scăzută atât în simulările tranzitorii, cât și în cele ce ajung la starea de echilibru. Metodologia prin care pot fi derivate modele numerice fiabile pentru componente electronice pornind de la măsurători termice este descrisă aici. În timpul procesului de ajustare a modelului se poate investiga sensibilitatea fiecărei structuri a componentei și se poate determina impactul acestora asupra comportamentului termic identificând parametrii critici pentru reprezentarea termică a componentei. În plus, pe baza considerațiilor derivate din calibrarea iterativă, se folosește o metodă automată folosind OptiSlang, iar modelul rezultat este verificat comparând cu un model obținut prin metoda iterativă evidențiind avantajele pe care această metodă automată le aduce.

4.2 Considerente teoretice

Considerentele teoretice fundamentale utilizate în descrierea comportamentului termic al electronicii sunt rezistența termică și impedanța termică discutate mai sus.

În activitățile de dezvoltare ale industriei auto în care componenta este doar o parte a sistemului mai mare, se dorește crearea unor modele precise și fiabile într-un timp scurt.

Abordarea logică ar fi orientarea către metode automatizate, care elimină dezavantajele abordărilor iterative gestionate de utilizator detaliate în capitolul anterior. Mergând mai departe, a fost studiată o abordare alternativă pentru modelarea componentelor folosind un software de optimizare disponibil comercial, anume OptiSLang.

4.3 Metodologie si echipament

4.3.1 Măsurători

Datele de referință pentru procesul de calibrare a modelului au fost obținute prin măsurarea impedanțelor termice (Z_{th}) ale dispozitivelor studiate, în timp ce dispozitivul (DUT) a fost plasat într-o configurație de testare adecvată (similar cu cazul de testare anterior).

Datele de măsurare au fost colectate de la mai multe DUT-uri de același tip și experimentele s-au repetat, pentru a verifica atât variabilitatea de eșantion, cât și variabilitatea setărilor noastre de măsurare (Figura 1).

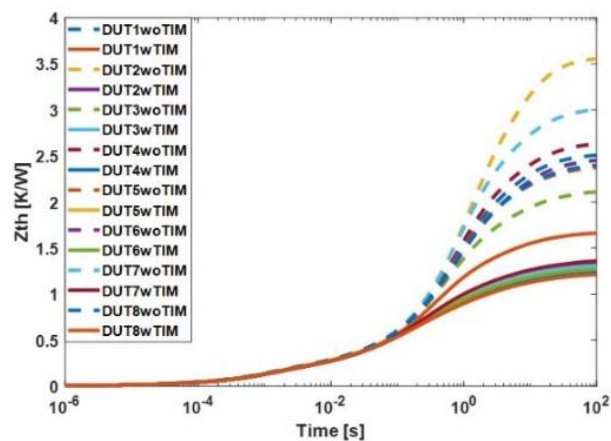


Figura 1. Rezultatele măsurătorilor cu și fără TIM

4.3.2 Creerea geometriei

Componenta utilizată pentru demonstrarea conceptelor acestei lucrări este un dispozitiv IPB180N06S4-H1 de tipul D2Pak (TO-263) de la Infineon. Geometria (Fig. 2) a fost construită pe baza fișelor cu date oficiale, a secționării și a tomografiei computerizate (CT). Mărimea componentei a fost determinată folosind fișa de date împreună cu imagini obținute cu microscopul optic.

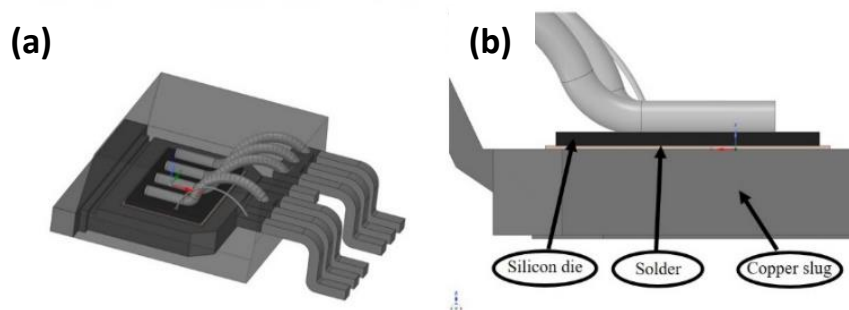


Figura 2. (a) Geometria componentei; (b) Structura internă a componentei.

4.3.3 Pregătirea modelului de simulare

Modelul de simulare a fost creat folosind un software comercial FEA (ANSYS). Proprietățile inițiale ale materialelor (Tabelul 1) au fost stabilite luând în considerare valori „realiste” (pe baza literaturii și experienței anterioare) pentru fiecare tip de material: siliciu pentru cip, cositor pentru materialul de fixare al cipului, aluminiu pentru conexiunile electrice ale cipului, plastic pentru materialul carcasei și cupru pentru pini și drenă.

Table 1 Proprietățile de material inițiale

Component (Material)	Density (Kg/m ³)	Thermal conductivity (W/mC)	Specific heat (J/kgC)
Die (Silicon)	2300	80	1000
Die attach (Solder)	8400	55	210
Slug/Pins (Copper)	8300	310	280
Mold (Plastic)	2000	0.7	820
Wire bonds (Aluminum)	2689	237.5	951

Având în vedere definiția rezistenței termice $R_{th}=(T_j-T_{amb})/P$ și a faptului că nu sunt utilizate proprietăți de materiale dependente de temperatură, temperatura ambientală a fost aleasă ca 0°C și s-a aplicat o puterea de disipare de 1W ca pe suprafața cipului. Aceeași valoare de 0°C este folosită ca o condiție la limită pentru temperatură în partea de jos a configurației de testare pentru a reprezenta răcirea prin radiator (Figura 3). Pentru evaluarea răspunsului termic a fost utilizată temperatura medie a suprafeței superioare a cipului.

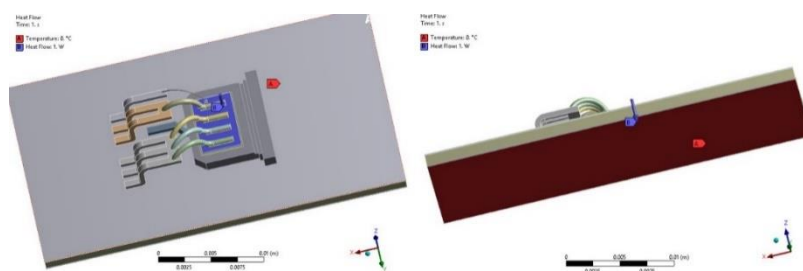


Figura 3. Modelul de simulare

4.4 Calibrarea componentei

4.4.1 Calibrarea folosind SF și abordarea iterativă

Modelul de simulare a fost rulat cu ipotezele prezentate mai sus și curbade impedanță a fost comparată cu măsurătoarea. Comparând cele două curbe, o diferență semnificativă poate fi observată în intervalul de timp de la microsecunde până la milisecunde în care este reprezentat răspunsul componentei. Dincolo de primele 0,1 secunde, Z_{th} -ul este influențat predominant de construcția de testare (TIM și radiator). Prin compararea directă a celor două curbe (Figura 4a), este destul de dificil să se identifice ce parametru de material din stiva sa de straturi specifice necesită ajustare. Ca atare, ar trebui folosită o abordare diferită pentru procesul de calibrare. Din cele două măsurători disponibile, cu și fără TIM, R_{th} -ul componentei a fost determinat a fi 0,34 K/W folosind metoda TDIM.

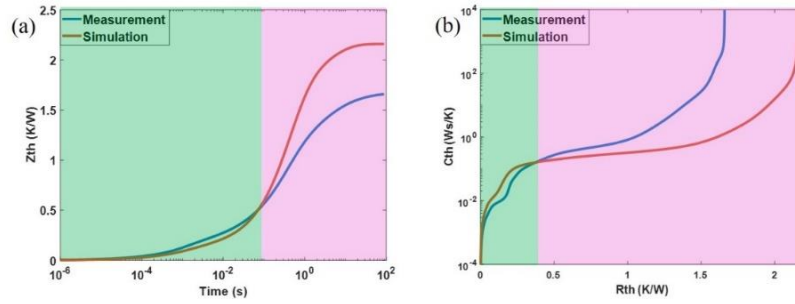


Figura 5. (a) Curbele Z_{th} măsurate și simulate; (b) SF măsurate și simulate; Zona verde marchează regiunea componentei, roz regiunea construcției pentru măsurători.

Scopul calibrării este de a ajunge la o potrivire bună între SF ale măsurătorii și modelul de simulare, prin urmare s-a făcut ajustarea ulterioară a materialului pentru fiecare structură interioară (Tabelul 2). Deoarece densitatea și capacitatea termică s-au dovedit a fi interschimbabile, de dragul simplității, doar densitatea a fost variată în procesul de calibrare. S-a obținut o potrivire bună între cele două răspunsuri (Figura 7).

Table 2. Proprietăți de materiale calibrate

Component (Material)	Density (Kg/m ³)	Thermal conductivity (W/mC)	Specific heat (J/kgC)
Die (Silicon)	1800	65	700
Die attach (Solder)	8400	28	210
Slug/Pins (Copper)	8300	380	280
Mold (Plastic)	2000	0.7	820
Wire bonds (Aluminum)	2689	200	951

4.4.2 Calibrarea automată folosind optiSlang

Procesul de automatizare presupune două etape principale. În primul rând, prin abordarea subiectului folosind o metodologie de tipul “Design of experiments” (DoE), se realizează o analiză de sensibilitate în cadrul proiectului de Ansys Workbench folosind plug-in-ul OptiSlang. Parametrii de intrare (conductivitatea termică și densitatea tuturor structurilor componente) sunt variați, în timp ce Z_{th} -ul rezultat este monitorizat.

În al doilea rând, pe baza rezultatelor DoE, algoritmi de optimizare sunt utilizați pentru a compara Z_{th} - ul măsurat cu simularea și pentru a oferi o prognoză a proprietăților cele mai potrivite pentru sistemul definit. Optimizarea se face prin minimizarea diferenței dintre curbele Z_{th} măsurate și cele simulate. Factori de ponderare au fost utilizați pentru a concentra optimizarea pe comportamentul termic al componentei, mai degrabă decât pe configurația de măsurare. Se folosesc doi algoritmi de optimizare. Prima optimizare se face cu un algoritm evolutiv (EA) pentru o căutare mai largă a parametrilor cei mai potriviți. Designul optim este apoi transferat la un algoritm de programare neliniară (NLPQL), care face o căutare mai fină în jurul valorilor determinate de algoritmul evolutiv.

O diagrama simplificată a procesului este prezentată mai jos:

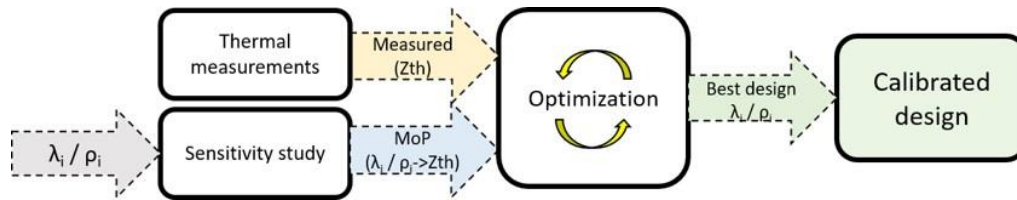


Figura 6. Diagramă de optimizare

Comparând cele două metode de calibrare (manuală și automată) cu rezultatele măsurătorii, s-a obținut o potrivire bună, ambele metode rezultând în proprietăți de material asemănătoare.

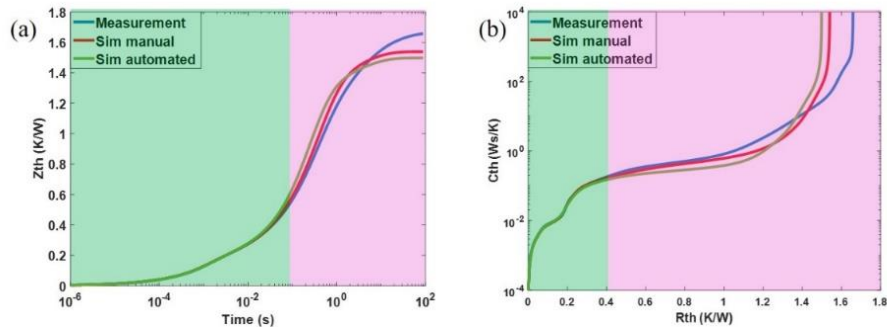


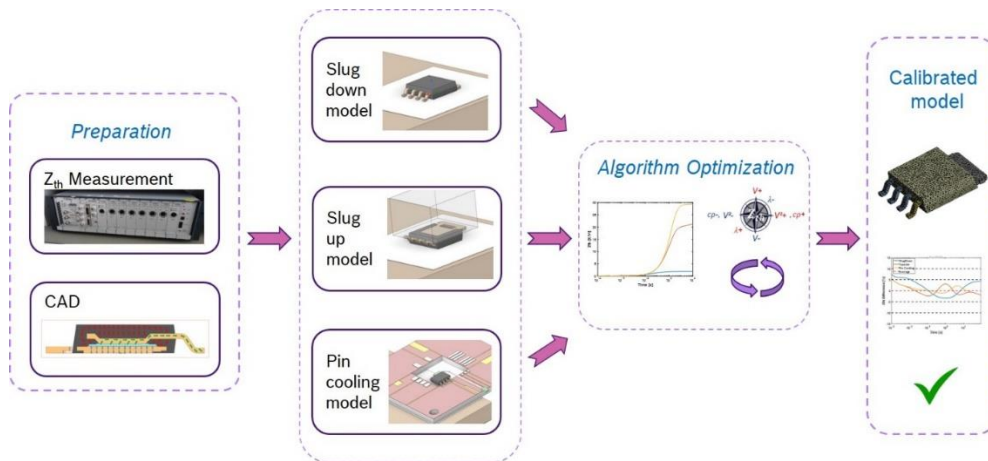
Figura 7. (a) Curbele Z_{th} ale măsurătorii, modelului de simulare calibrat manual și a celui calibrat automat; (b) Curbele SF ale măsurătorii, modelului de simulare calibrat manual și a celui calibrat automat

4.5 Concluzii

Au fost prezentate și comparate două proceduri de calibrare a modelelor FEA bazate pe măsurători termice ale componentelor electronice. Prima metodă de calibrare a constat într-o abordare iterativă manuală în care “structure functions” au fost derivate din curbele de impedanță termică bazate pe metode stabilite. În urma unei analize cuprinzătoare a SF prin varierea parametrilor materialului pentru fiecare strat de structură din interiorul componenteii, s-a ajuns la un acord foarte bun între rezultatele simulării și datele măsurate. Pentru a îmbunătăți performanța și repetabilitatea acestei metode, a fost implementată o a doua metodă de calibrare automată. În această procedură, un software de optimizare este cuplat la mediul de simulare pentru a compara direct măsurătoarea și curba de impedanță termică simulată și pentru a le potrivi, variind simultan toți parametrii materialului. Această abordare nu numai că a condus la modele calibrate, dar o face și într-o manieră eficientă în timp și simplă, ceea ce reduce cerințele de expertiză ale utilizatorului.

Capitolul 5

Calibrarea completă a componentelor de tip MOSFET prin optimizare automată



Reprodus din: Finite element thermal modelling of power MOSFET packages., Microelectronics Reliability, submitted with manuscript number: MICREL-D-22-00024R2, 2022

5.1 Introducere

Scopul acestui capitol este de a descrie metodologia de măsurare și modelare a MOSFET-urilor de putere într-un mod automatizat și standardizat care ia în considerare toate căile de deplasare a căldurii prin componentă. Prin descrierea comportamentului termic complet al componentelor, se asigură acuratețea acestuia în toate scenariile de răcire în care ar putea fi utilizat într-un model ECU. Configurația și metodologia de măsurare descrise, asigură fiabilitatea și repetabilitatea, permițând standardizarea. Eficientizarea procesului de calibrare a modelului se realizează folosind algoritmi de optimizare și ajustarea directă a curbei de impedanță termică. Ca rezultat, timpii de procesare sunt mai mici și înțelegerea transformărilor complexe de SF este ocolită.

5.2 Concepte teoretice

În timp ce în trecut, a fost folosită o abordare manuală, iterativă care implică transformări numerice pentru calibrarea modelului FEM, am evidențiat în capitolul anterior o metodologie care utilizează algoritmi de optimizare OptiSlang pentru un proces de calibrare automatizat.

Folosind aceste concepte, curbele Z_{th} care descriu comportamentul termic ale componentelor de tip MOSFET sunt măsurate și ajustate pentru a genera modele FEM de înaltă precizie pentru simulări complexe la nivel de unități de control. O reprezentare schematică a modului de lucru utilizat este prezentată mai jos în Figura 1.

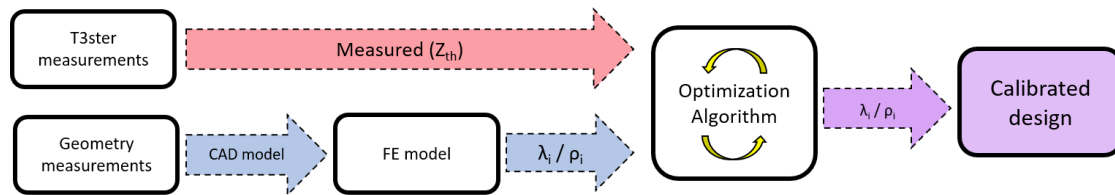


Figura 1. Schematică a modului de lucru

5.3 Modelarea FEM

5.3.1 Descrierea și modelarea componentelor

Cele două componente utilizate în exemplificarea metodologiei prezentate în acest capitol sunt de tipul LFPak56 (Figura 2a) și LFPak56D (Figura 2b). Între LFPak56 și LFPak56D, diferența majoră vine din prezența a două cipuri de siliciu în LFPak56D, care duc la divizarea atât a drenei, cât și a clemei de cupru în două părți.

Modelele geometrice rezultate ale celor două componente construite pe baza aceleiași metodologii prezentate anterior, pot fi văzute mai jos în Figura 2.

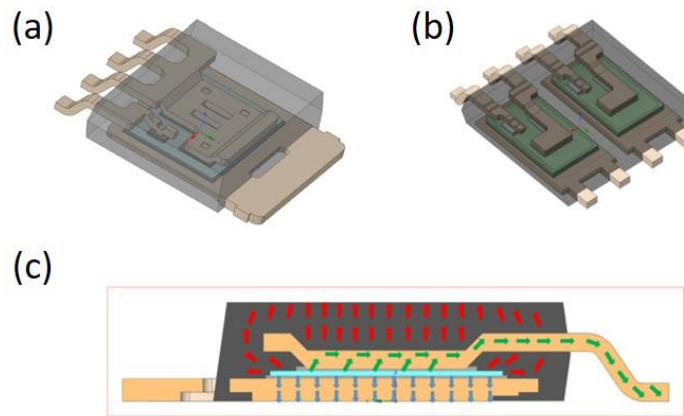


Figura 2. Model geometric (a) BUK7Y1R7-40H LFPak56; (b) BUK7K6R8-40E LFPak56D; (c) Căile de deplasare a căldurii printr-o componentă

Deoarece metodologia de calibrare din această lucrare se referă la toate cele trei căi de transfer ale căldurii, trebuie definite materiale separate atât pentru drenă și clemă, cât și pentru materialele de fixare a cipului de jos și de sus, pentru a asigura suficiente grade de libertate pentru optimizator. În scopul calibrării modelelor actuale, proprietățile standard din literatura de specialitate au fost utilizate ca valori de pornire pentru proprietățile de ajustare. Tabelul 1 detaliază aceste valori.

Tabel 1. Proprietățile de material inițiale

Proprietăți	Densitate [kg/m ³]	Cond. termică [W/(m*K)]	Căldura specifică [J/(kg*K)]
Silicon	2330	117	700
Solder (chip to slug)	8500	50	176
Solder (chip to clip)	8500	50	176
Copper (slug)	8960	401	385
Copper (clip)	8960	401	385
Mold	1120	0.88	1400

5.3.2 Modelarea configurațiilor de măsurare

Pentru a izola fiecare cale de deplasare a căldurii și pentru a măsura impedența termică corespunzătoare, au fost construite trei configurații distincte.

Deoarece metodologia din această lucrare vizează ajustarea modelului tuturor celor trei căi de căldură simultan, toate cele trei configurații sunt prezente în același model de simulare (Figura 3). Un set comun de proprietăți ale materialelor este utilizat pentru toate cele trei componente simulate în diferite configurații. În acest fel, orice modificare a unei proprietăți va influența răspunsul tuturor celor trei sisteme.

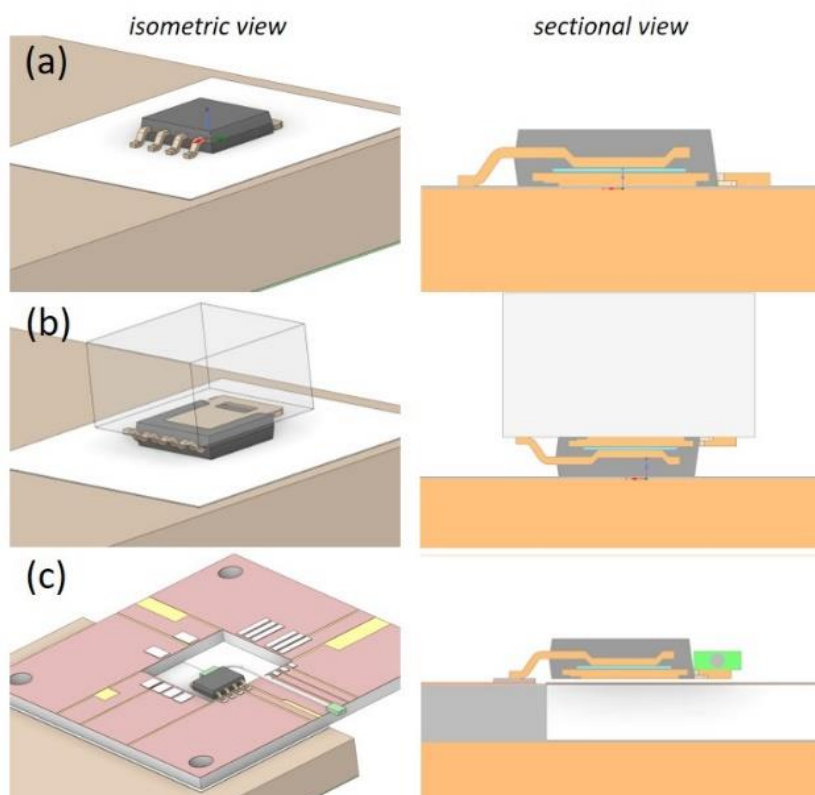


Figura 3. (a) Modelul pentru configurația drenă-jos; (b) Modelul pentru configurația drenă-sus; (c) Modelul pentru configurația de răcire prin pini;

5.3.3 Metodologia OptiSlang

Pentru calibrarea modelului, procesul utilizează OptiSlang ca software de optimizare, asemănător cu capitolul descris anterior.

5.4 Rezultate și discuții

5.4.1 Măsurători

Un număr de cinci DUT-uri au fost utilizate pentru măsurători de referință folosind fiecare configurație, însumând un număr de 15 măsurători. Pe baza fiecărui set de date, a fost calculată o curbă Z_{th} medie pentru fiecare din cele trei configurații (Figura 4).

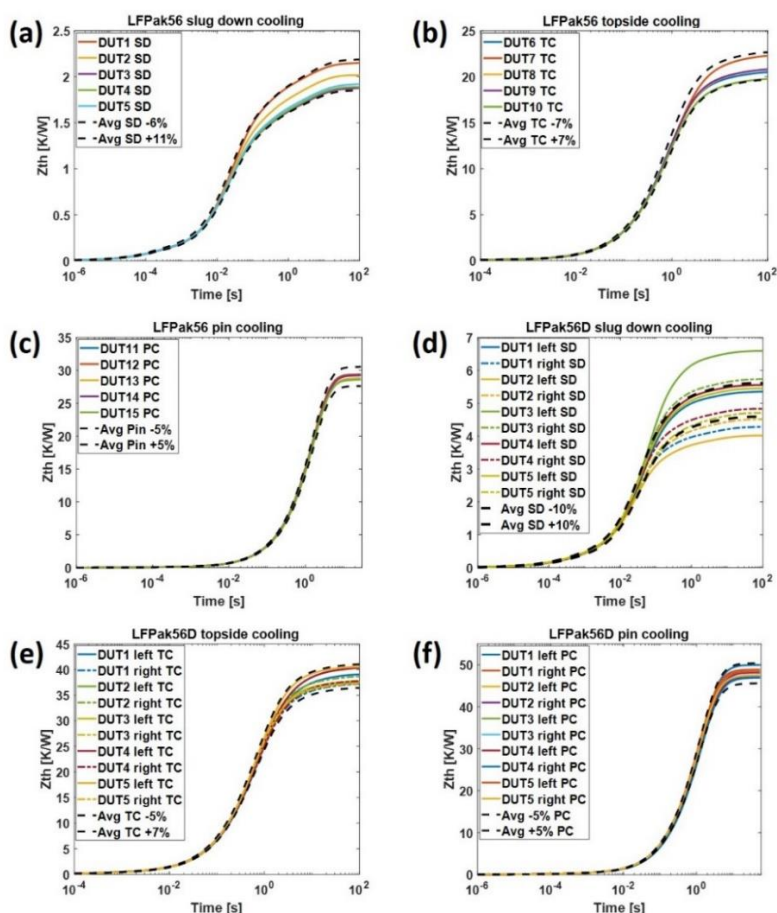


Figura 4. (a) Măsurătorile drenă-jos pentru LFPak56; (b) Măsurătorile drenă-sus pentru LFPak56; (c) Măsurătorile cu răcire prin pini pentru LFPak56 pin cooling measurements; (d) Măsurătorile drenă-jos pentru LFPak56D; (e) Măsurătorile drenă-sus pentru LFPak56D; (f) Măsurătorile cu răcire prin pini pentru LFPak56D

5.4.2 Optimizarea automată

Pentru o calibrare automată de succes, este important să avem o bună reprezentare a construcției de măsurare, altfel încercând să forțăm o potrivire bună a contribuției acestora în Z_{th} , optimizatorul ar putea compromite acuratețea în regiunea de răspuns a componentei. Modelul de prognoză (MoP) generat de studiul de sensibilitate, a necesitat 67 de puncte de design pentru a atinge un coeficient de prognoză bun ($CoP > 98\%$). Modelul a fost rulat pe o stație de lucru cu 20 de nuclee și 512 GB de RAM și a necesitat aproximativ 16 ore pentru a ajunge la MoP. În comparație cu procesul dificil și lung necesar calibrării manuale a fiecărei căi, metodologia de optimizare a ajuns la o potrivire bună ($<10\%$) într-un interval de timp scurt.

Tabel 2 Diferența în procente a proprietățile de material calibrate față de cele inițiale

Prop. materiale	Densitate [kg/m^3]		Cond. termică [$W/(m^*K)$]	
	LFPak56	LFPak56D	LFPak56	LFPak56D
DUT				
Silicon	- 66.9%	- 4.0%	- 65.5%	- 39.2%
Solder (chip to slug)	- 27.2%	- 2.5%	- 23.2%	- 21.2%
Solder (chip to clip)	- 30.9%	- 16.5%	- 36.3%	+ 24.0%
Copper (slug)	+ 4.2%	- 25.0%	- 0.2%	- 11.5%
Copper (clip)	+ 7.3%	- 17.6%	- 7.1%	+ 4.7%
Mold	+ 51.6%	+ 34.5%	+ 36.2%	+ 30.7%

Pentru LFPak56 am găsit un acord bun între configurația de tip drenă-jos rezultată din proprietățile calibrate și valoarea medie a măsurătorii variind într-un interval de 10% pentru intervalul de timp 0,001 – 0,01 s și coborând sub 5% pentru restul intervalului de timp. În configurația drenă-sus și răcire prin pini am obținut o diferență mai mică de 5% pentru întreg intervalul de timp (Figura 5a). S-au obținut rezultate similare pentru a doua componentă (LFPak56D), cu o diferență sub 5% față de medie pentru toate configurațiile de răcire (Figura 5b). Această comparație ne ajută să definim acuratețea modelelor și să înțelegem capacitatea de utilizare a acestora în simularea sistemelor complexe.

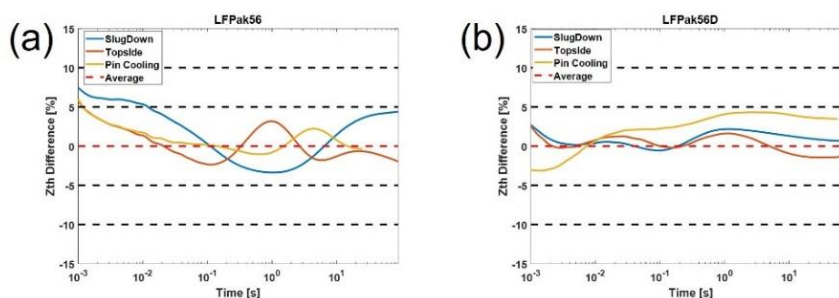


Figura 5. Diferența procentuală de Z_{th} față de măsurători pentru (a)LFPak56; (b)LFPak56D; Diferența procentuală de Z_{th} între modelul calibrat și cel inițial (c) LFPak56; (d) LFPak56D.

Utilizarea algoritmilor de optimizare aduce un beneficiu semnificativ față de calibrarea manuală succesivă a fiecărei căi de transfer a căldurii. O abordare manuală clasică ar necesita ca fiecare strat din calea căldurii să fie ajustat în ordinea prezenței sale în transfer pentru fiecare configurație de răcire. Utilizarea unei calibrări automate cu ajutorul unui software de optimizare permite generarea unui Model de Prognoză bazat pe un DoE predefinit, care variază toate proprietățile pentru fiecare strat, în același timp, acest lucru fiind realizat semnificativ mai rapid.

5.5 Concluzii

În comparație cu metoda manuală convențională care necesită transformări matematice complexe pentru a înțelege transferul de căldură și încercări repetitive consumatoare de timp pentru a potrivi parametrii materialelor, prin utilizarea acestor metode automate procesul este simplificat și standardizat. Astfel, necesitând mai puține informații și o înțelegere mai puțin profundă a transferului de căldură de către utilizator.

Prin compararea proprietăților materialelor rezultate cu proprietățile generice găsite în literatură, pot apărea diferențe semnificative de până la 60%. Acest nivel de erorare în aproximare s-ar propaga mai departe în simularea sistemului, făcând rezultatele incerte. Ca atare, se subliniază încă o dată importanța măsurării răspunsurilor Z_{th} realiste și modelării componentelor cu proprietăți corespunzătoare.

În concluzie, deși proprietățile materialelor derivate pentru modelele studiate în această lucrare nu sunt universale, deoarece depind de dimensiunile exacte utilizate și de parametrii de discretizare, am schițat o metodologie care poate fi aplicată cu succes la măsurarea și modelarea oricărei componente de tip MOSFET particular.

Capitolul 6

Concluzii finale

Această lucrare și-a propus să găsească un concept de lucru pentru construcția modelelor de componente cu precizie înaltă pentru domeniul termic, care să fie utilizate în continuare în simulările de sisteme complexe.

Începând cu primul capitol al lucrării, au fost introduse și discutate principalele concepte teoretice legate de teoria termică și proiectarea asistată de calculator. Procedura fundamentală de calibrare a oricărui sistem poate fi împărțită în câțiva pași de bază: i) înregistrați o măsurătoare termică a dispozitivului testat, ii) construiți o reprezentare virtuală a dispozitivului menționat, iii) construiți o reprezentare virtuală a dispozitivului, iv) configurarea modelului de simulare inițial, v) ajustarea parametrilor modelului pentru a se potrivi cu răspunsul măsurat.

Capitolul doi a acoperit o serie de puncte cruciale pentru procedura fundamentală de calibrare. Prin descrierea dispozitivelor măsurate, echipamentul de măsurare și diferitele configurații, măsurătorile analitice necesare pentru generarea CAD și o scurtă prezentare generală a configurării modelului și a abordării calibrării, a fost stabilită direcția de parcurs a procesului care urmează să fie utilizat pentru dispozitive specifice.

În capitolul trei, a fost dezvoltat un proces manual de calibrare iterativă pentru descrierea completă a transferului de căldură (prin drenă, prin pini și prin carcasă) folosind un MOSFET de tipul LFPak88 ca dispozitiv de testare. Proprietățile materialelor diferitelor straturi din componentă au fost ajustate pentru a ajunge la o corespundență bună între răspunsul măsurat și simulat în ceea ce privește SF. Modelul reglat a fost verificat cu o măsurătoare independentă pentru validare, folosind o placă PCB care arată o potrivire rezonabilă cu datele măsurate.

Al patrulea capitol se concentrează pe dezvoltarea în continuare a metodologiei pentru o procedură automată. Folosind un D2Pak ca vehicul de testare, au fost prezentate și comparate două proceduri pentru calibrarea modelelor FEA bazate pe măsurătorile impedanței termice. Pentru a îmbunătăți performanța și repetabilitatea metodei iterative, a fost implementată și testată o a doua metodă de calibrare automată pentru configurația de răcire prin drenă a dispozitivului. În această procedură, un software de optimizare este cuplat la mediul de simulare pentru a compara direct măsurătorile și curbele de impedanță termică simulate și pentru a le potrivi. Această abordare nu numai că a condus la modele calibrate cu o acuratețe mare, dar o face și într-o manieră eficientă în timp și simplă, ceea ce reduce cerințele de expertiză ale utilizatorului.

Ultimul capitol completează metodologia de lucru automată, luând în considerare toate cele trei căi de transfer al căldurii printr-o componentă. Bazat pe alte două cazuri de utilizare: un LFPak56 și un LFPak56D, metoda s-a dovedit a avea succes în atingerea nivelului de precizie dorit într-o manieră simplificată.

În concluzie, în această lucrare am propus o metodologie generală atât pentru măsurarea, cât și pentru calibrarea modelelor de simulare a componentelor pentru utilizare ulterioară în sisteme și ansambluri complexe. Am arătat aplicabilitatea pe diferite tipuri de MOSFETuri și care sunt provocările întâlnite atât pentru conceptele de măsurare, cât și pentru modelare.

În timp ce relevanța fiecărei direcții de transfer termic depinde de aplicație și metoda de răcire a sistemului, o descriere detaliată a modelului aduce un mare beneficiu în asigurarea unor rezultate precise pentru orice configurație dată. Acest lucru deschide posibilități multiple atunci când vine vorba de optimizarea designului termic, în ceea ce privește performanța termică. Rezultatele descrise în această lucrare deschid calea pentru o metodologie standardizată în proiectarea electro-termică fiabilă și eficientă pentru industria auto și orice altă arie de dezvoltare a electronicii.

Referințe

- [1] Ingraham, Joseph C. (24 March 1957). "Automobiles: Races; Everybody Manages to Win Something At the Daytona Beach Contests". *The New York Times*. p. 153. Retrieved 1 May 2015.
- [2] "The Rambler Rebel's fuel injection – The Dream and the Legend". *Hemmings*. 27 June 2017. Retrieved 8 November 2018.
- [3] Benrey, Ronald M. (October 1971). "Microelectronics in the '70s". *Popular Science*. Bonnier Corporation. 199 (4): 83–5, 150–2. ISSN 0161-7370.
- [4] <https://www.statista.com/statistics/277931/automotive-electronics-cost-as-a-share-of-total-car-cost-worldwide/#statisticContainer>
- [5] <https://www.bosch.de/unser-unternehmen/bosch-in-deutschland/salzgitter/>
- [6] *Electronic Failure Analysis handbook*, Perry L. Martin chapters 1.1 – 1.5
- [7] Lienhard, J.H., Lienhard, J.H., 2011. *A heat transfer textbook*, 4th ed. ed. Dover Publications, Mineola, N.Y
- [8] "Transient dual interface test method or the measurement of the thermal resistance junction to case of semiconductor devices with heat flow through a single path", JEDEC Standard JESD51-14, Nov. 2010.
- [9] V. Székely "A new evaluation method of thermal transient measurement results", *Microelectronics Journal* issue 3, vol. 28, p.277-292
- [10] Sümegi Ambrus, "Calibration of temperature sensitive parameter at high currents", BSc Thesis
- [11] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Zhu, J.Z., 2013. *The finite element method: its basis and fundamentals*, Seventh edition. ed. Elsevier, Butterworth-Heinemann, Amsterdam.
- [12] <https://www.nexperia.com/products/mosfets/automotive-mosfets/>
- [13] <https://www.infineon.com/cms/en/product/packages/PG-TO263/PG-TO263-7-3/>
- [14] Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P., 2003. *Power electronics: converters, applications, and design*, 3rd ed. ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 571-581;
- [15] Most, T. and J. Will (2008). *Metamodel of Optimal Prognosis - an automatic approach for variable reduction and optimal metamodel selection*. In Proc. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 5.0, Weimar, Germany, November 20-21, 2008.
- [16] Schittkowski, K. (1986). NLPQL: A Fortran subroutine for solving constrained nonlinear programming problems. *Annals of Operations Research* 5, 485–500.
- [17] Sz. Szöke, Z. Kórádi, "Component Model Calibration Using Transient Thermal Test Methods and Multiple Measurement Setups", 25th International Workshop Thermal Investigations of ICs and System (Therminic 2019)

Anexă – Lista publicațiilor

Jurnale

R. Cioban, Sz. Szőke, D. Zaharie-B, Z. Kórádi, C. Leordean, S. Simon, “FEM model calibration for simulation aided thermal design,” *Microelectronics Reliability*, Volume 118, 2021, 114042, ISSN 0026-2714, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114042>, (IF 1.589, AIS 0.293)

R. Cioban, Sz. Szőke, D. Zaharie-B, Z. Kórádi, C. Leordean, S. Simon, “Finite element thermal modelling of power MOSFET packages,” *Microelectronics Reliability*, submitted with manuscript number: MICREL-D-22-00024R2, 2022 (IF 1.589, AIS 0.293)

Conferințe

R. Cioban, S. Szőke, Z. Kórádi, D. Zaharie-B. and C. Leordean, "Validated Model Calibration for Simulation Aided Thermal Design," 2020 36th Semiconductor Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM), 2020, pp. 114-123, doi: 10.23919/SEMI-THERM50369.2020.9142853.