



UNIVERSITATEA “POLITEHNICA” DIN BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ ETTI-B

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

Application-Aware Lifetime Estimation of Power Devices

Estimarea Duratei de Viață a
Circuitelor Integrate de Putere în Aplicații

Doctorand: **Ciprian V. Pop**

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. Dr. Ing. Ion Marghescu	de la	Universitatea POLITEHNICA din București
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Ing. Corneliu Burileanu	de la	Universitatea POLITEHNICA din București
Referent	Prof. Dr. Ing. Georg Pelz	de la	Infineon Technologies AG și Universität Duisburg-Essen, Germania
Referent	Prof. Dr. Ing. Corneliu Rusu	de la	Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
Referent	Prof. Dr. Ing. Gheorghe Brezeanu	de la	Universitatea POLITEHNICA din București

București 2020

Cuprins

1	Introducere	1
1.1	Circuitele integrate de putere comutând sarcini inductive	1
1.2	Descrierea problemei	2
1.3	Motivația	3
1.4	Scopul cercetării	3
1.5	Structura tezei	4
2	Starea artei/Abordări existente	5
2.1	Estimarea duratei de viață	5
2.2	Estimarea variației duratei de viață	6
3	Fundamente teoretice	7
3.1	Regresia liniară	7
3.2	Simularea electro-termică	7
4	Metodologia propusă pentru estimarea ΔT	8
4.1	Estimarea ΔT bazată pe simularea electro-termică	8
4.2	Modelarea ΔT	9
4.3	Validarea modelului ΔT	9
5	Metodologia propusă pentru estimarea duratei de viață în aplicații	10
5.1	Fluxul metodologiei	10
5.2	Dezvoltarea modelului duratei de viață în aplicații	11
5.2.1	Evaluarea legii Coffin-Manson	11
5.2.2	Luarea în considerare a tensiunii induse de pachet	11
5.2.3	Extinderea modelului duratei de viață în spațiul condițiilor de operare	12
5.3	Validarea modelului duratei de viață în aplicații	12
6	Metodologia propusă pentru estimarea variației duratei de viață	13
6.1	Fluxul metodologiei	13
6.2	Găsirea celor mai relevanți Parametri Electrici (EP)	13
6.3	Estimarea coeficienților modelului variației duratei de viață	15
6.4	Validarea modelului variației duratei de viață	15
6.5	Predictia distribuției duratei de viață și a duratei minime de viață . .	15

7	Rezultate experimentale	16
7.1	Echipamentul de măsurare a duratei de viață	16
7.2	Aplicarea metodologiei modelării ΔT	17
7.3	Aplicarea metodologiei de estimare a duratei de viață în aplicații . . .	18
7.3.1	Dezvoltarea modelului duratei de viață în aplicații	18
7.3.2	Validarea modelului duratei de viață în aplicații	20
7.4	Aplicarea metodologiei de estimare a variației duratei de viață	21
7.4.1	Dezvoltarea modelului variației duratei de viață	21
7.4.2	Validarea modelului variației duratei de viață	22
7.4.3	Predicția distribuției duratei de viață și a duratei minime de viață	22
8	Concluzii	24
8.1	Obiective și rezultate	24
8.2	Principalele contribuții ale autorului	25
8.3	Lucrări viitoare	26
8.4	Publicațiile autorului	27
	Bibliografie selectată	28

Capitolul 1

Introducere

Circuitele integrate de putere sunt utilizate pe scară largă în multe domenii în zilele noastre, astfel că evaluarea fiabilității acestora reprezintă o preocupare esențială pentru producători. Deoarece testarea duratei de viață este un proces consumator de timp și necesită echipamente scumpe și foarte complexe, o cantitate limitată de date de fiabilitate este disponibilă. Scopul general al tezei este dezvoltarea de strategii și instrumente care să faciliteze utilizarea împreună a datelor din diferite etape de dezvoltare/testare ale unui produs și a datelor din simulări, pentru evaluarea fiabilității.

Această teză introduce o metodologie cuprinzătoare pentru estimarea duratei medii de viață a circuitelor integrate de putere în aplicații, care primește ca intrări condițiile de operare ale aplicației pentru un circuit integrat de putere și furnizează ca ieșire durata de viață a acestuia, definită ca durata pînă la care performanțele cipului ies în afara specificațiilor. De asemenea, pentru o estimare cu o mai mare acuratețe a duratei de viață minime garantate, este prezentată o metodologie pentru predicția variației duratei de viață. Modelele propuse sunt necesare la caracterizarea duratei de viață a circuitelor integrate de putere într-o gamă largă de condiții de operare ale aplicațiilor clienților din multe industrii. Cercetarea este realizată pe circuite integrate de putere inteligente, cuprinzând structuri MOS cu dublă difuzie (DMOS).

1.1 Circuitele integrate de putere comutând sarcini inductive

Comutarea sarcinilor inductive (relee, motoare, actuatori, valve) este foarte provocatoare din cauza disipării mare de putere și încălzirii corespunzătoare a circuitelor integrate. Pentru a reduce supratensiunile care apar atunci când circuitele integrate opresc sarcinile inductive, comutatoarele de putere inteligente utilizează, de regulă, circuite de clamping integrate (de limitare a tensiunii de ieșire). Chiar și așa, părțile componente de putere sunt supuse unor solicitări severe din cauza comutării active (încălzirii repetitive), denumită și clamping repetitiv, afectându-le durata de viață.

Circuitul tipic al unui comutator de putere bazat pe DMOS low-side ce conduce o sarcină inductivă este prezentat în Figure 1.1 (a), cu formele de undă corespunzătoare ale tensiunilor, curentului de sarcină și puterii pierdute în dispozitiv (b). De fiecare

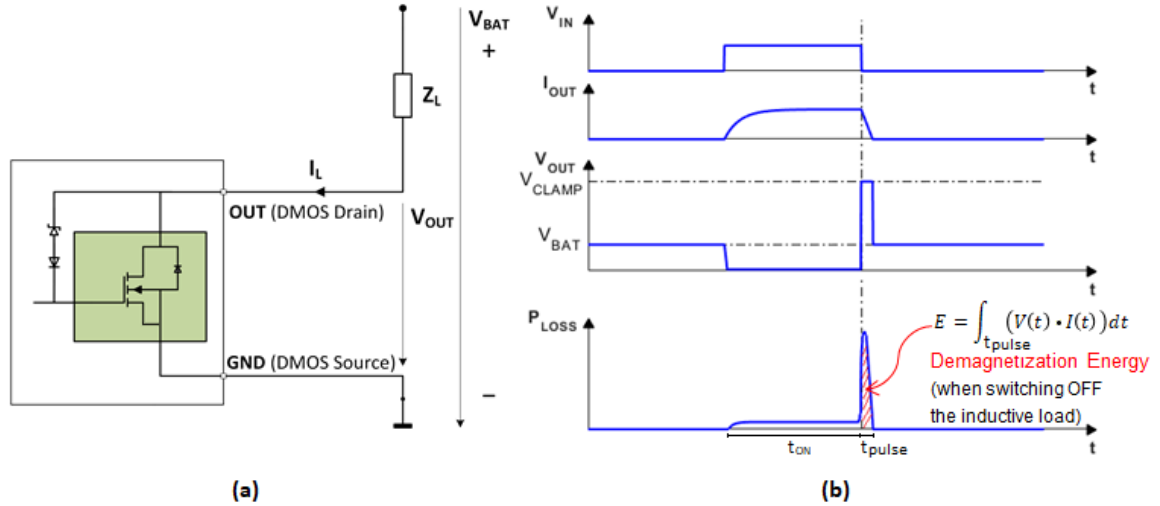


Figura 1.1: (a) Circuitul tipic al unui comutator de putere low-side inteligent ce conduce o sarcină inductivă. (b) Formele de undă corespunzătoare ale tensiunilor, curentului de sarcină și puterii disipate.

dată când sarcina inductivă este oprită, energia de demagnetizare trebuie luată în considerare. Aceasta încălzește circuitul integrat cauzând în special mecanisme de distrugere intrinseci.

1.2 Descrierea problemei

Durata de viață a unui produs depinde puternic de condițiile în care este operat, de sarcina la care este supus și de alte variații ale stimulilor. De exemplu, un comutator electronic de la un sistem de ridicare a ferestrei nu este solicitat în același fel ca un comutator de la un sistem de control al injecției de combustibil. În consecință, în industria semiconductorilor, este necesară estimarea duratei de viață a circuitelor integrate de putere în condiții de operare diferite ale aplicației.

Testele de caracterizare a duratei de viață sunt consumatoare de timp. În special, comutarea activă (comutarea repetitivă a sarcinilor inductive) necesită luni de testare, pentru măsurarea duratei de viață în diferite condiții de operare. Paralelizarea testelor nu este o soluție eficientă, deoarece este foarte costisitoare. De asemenea, testele de stres nu pot fi accelerate, deoarece criteriul de defecțiune nu este distrugerea totală a circuitelor integrate, ci mai degrabă momentul în care circuitele integrate nu mai funcționează în specificații. Pentru aceasta, sunt necesare măsurători continue pentru a verifica starea de degradare și trebuie utilizate sarcini inductive discrete. O altă problemă este că, din cauza procesului de fabricație, durata de viață măsurată are o mare variație. Folosind sarcini inductive discrete, capacitatea echipamentului de test permite doar un număr mic de dispozitive sub test (DUTs) la un moment dat, astfel încât estimarea răspândirii duratei de viață este slabă. Creșterea capacității de măsurare necesită un echipament mult mai complex și mai scump. În consecință, este

disponibilă o cantitate limitată de date de fiabilitate (măsurate pe câteva scenarii de condiții de operare și pe un număr mic de DUTs).

Din aceste motive, producătorii furnizează cel mai adesea parametri de viață doar pentru un set standardizat de condiții de operare, care asigură acoperirea pe o gamă largă de aplicații, iar valorile furnizate sunt foarte conservative. Pe de altă parte, clienții au nevoie de produse fiabile și, în același timp, eficiente din punctul de vedere al costurilor, care se potrivesc corect aplicațiilor lor.

1.3 Motivația

Așa cum s-a descris anterior, în etapa de caracterizare a circuitelor integrate de putere, este necesară estimarea duratei de viață în condiții de operare diferite ale aplicației și estimarea cu o mai mare acuratețe a variației duratei de viață. Marea provocare este de a estima durata de viață cât mai precis posibil și pe un spațiu larg de condiții de operare a aplicației, având la dispoziție doar o cantitate limitată de date de fiabilitate, măsurate pe câteva scenarii de condiții de operare și pe un număr mic de DUTs.

În general, metodele de evaluare a fiabilității definesc durata de viață ca distrugerea totală a circuitelor integrate, în timp ce în caracterizarea circuitelor integrate de putere, sfârșitul vieții este considerat momentul în care performanțele cipului nu mai satisfac specificațiile. Cele mai multe dintre ele constau în modele empirice, bazate pe legea Coffin-Manson [Man66, JED16], în care estimarea cursei maxime a temperaturii joncțiunii în cadrul unui ciclu termic rapid (ΔT) reprezintă cheia, dar și cea mai mare provocare. Acestea au fost extinse cu parametri diferiți, astfel încât modelele necesită pentru calcularea coeficienților cantități mari de date. Alte abordări se bazează pe modelarea fizică, care descrie mecanica deformării materialelor aflate sub sarcini ciclice. Principalele dezavantaje sunt dificultățile de calibrare și utilizare ale acestor modele. Există, de asemenea, metode bazate pe modelarea degradării. Acestea pot estima durata de viață la un nivel de degradare predefinit, dar modelele sunt validate pe un număr limitat de condiții de operare. În concluzie, metodele existente nu îndeplinesc cerințele de caracterizare a circuitelor integrate de putere.

1.4 Scopul cercetării

Scopul principal al cercetării este dezvoltarea unei metodologii cuprinzătoare pentru estimarea duratei medii de viață a circuitelor integrate de putere ținând cont de aplicație, care primește ca intrări condițiile de operare ale aplicației pentru un circuit integrat de putere și furnizează ca ieșire durata de viață a acestuia, definită ca durata pînă la care performanțele cipului ies în afara specificațiilor. De asemenea, pentru o estimare cu o mai mare acuratețe a duratei de viață minime garantate, va fi dezvoltată o metodologie pentru predicția variației duratei de viață. Analiza defectiunilor va fi efectuată pentru a confirma mecanismele și modurile de defectiune sub testul de comutare activă. Metodologiile vor fi construite pe baza unor resurse optime de măsurare a fiabilității. Datele vor fi adunate atât din măsurători de laborator, cât și

din simulări electro-termice. Vor fi utilizate metamodele și alte tehnici de învățare automată pentru construirea modelelor de predicție.

Pentru a îndeplini aceste cerințe, teza prezintă mai întâi o abordare pentru modelarea ΔT (principalul factor de stres al duratei de viață) în diferite condiții de operare, pe baza simulării electro-termice. Apoi, modelul clasic al duratei de viață este evaluat și extins pentru a putea fi aplicat în condiții de operare diferite ale aplicației și pentru un criteriu de degradare predefinit (în loc de distrugerea totală a dispozitivelor).

Teza introduce, de asemenea, o metodologie pentru estimarea variației duratei de viață (cauzată de variația procesului de fabricație), care depășește problema datelor limitate de fiabilitate disponibile, prin utilizarea datelor din diferite etape de dezvoltare și testări ale produsului. În primul rând, este prezentată o metodă de analiză de sensibilitate (SA) globală care performează chiar și cu o cantitate mică de date. Aceasta este utilizată pentru determinarea celor mai relevanți parametrii electrici (EP), măsurati înainte de testul de stres, care se corelează cu variația duratei de viață. Pe baza acestora este dezvoltat modelul variației duratei de viață, iar, prin utilizarea distribuțiilor celor mai relevanți EP din etapa Back-End (BE), unde sunt măsurate mii de dispozitive asamblate, modelul prezice distribuția duratei de viață.

1.5 Structura tezei

Capitolul 2 prezintă metodele existente pentru estimarea duratei de viață a circuitelor integrate de putere și pentru estimarea variației duratei de viață. Sunt subliniate, de asemenea, dezavantajele sau limitările acestor abordări, în contextul obiectivelor tezei.

Capitolul 3 prezintă fundamentele teoretice ale tehnicilor de învățare automată aplicate în această teză. De asemenea, este descris principiul simulării electro-termice.

Capitolul 4 introduce metodologia propusă pentru modelarea cursei maxime a temperaturii joncțiunii (ΔT), principalul factor de stres al duratei de viață, în spațiul condițiilor de operare, pe baza datelor dintr-o grilă de simulări electro-termice.

În capitolul 5 este introdusă metodologia de estimare a duratei de viață în aplicații. Modelul clasic Coffin-Manson este evaluat și apoi extins pentru a dezvolta un model de viață ținând de aplicație, care estimează durata până la care performanțele cipului ies în afara specificațiilor, într-un spațiu larg de condiții de operare.

Capitolul 6 descrie abordarea propusă pentru estimarea variației duratei de viață. În primul rând, este prezentat modul în care sunt identificați cei mai relevanți EP care se corelează cu variația duratei de viață, pe baza unei metode SA dezvoltate special. În continuare, urmează descrierea estimării coeficienților modelului și validării modelului variației duratei de viață. Metodologia se încheie cu estimările distribuției duratei de viață și a duratei de viață minime.

Capitolul 7 prezintă rezultatele experimentale. Mai întâi este prezentată aplicarea metodologiei pentru modelarea ΔT . Apoi, este furnizată aplicarea metodologiei de estimare a duratei de viață în aplicații. Ultima secțiune prezintă aplicarea metodologiei pentru estimarea variației duratei de viață.

În capitolul 8 sunt trase concluziile finale, sunt subliniate principalele contribuții ale acestei teze și sunt propuse perspective de cercetare viitoare.

Capitolul 2

Starea artei/Abordări existente

2.1 Estimarea duratei de viață

Modele empirice. Cea mai cunoscută metodă empirică se bazează pe legea Coffin-Manson [Man66]. Potrivit acesteia, durata de viață (exprimată în cicluri până la eșec) depinde de ΔT prin relația (2.1). Acest model simplu este adecvat atâta timp cât temperatura maximă a ciclurilor nu depășește $120^\circ C$ [BTB⁺11]. Modele îmbunătățite iau în considerare factori suplimentari, cum ar fi temperatura medie (introdusă printr-un termen Arrhenius), sau frecvența ciclurilor de temperatură [NL69]. Lucrarea [BHL⁺08] introduce unul dintre cele mai complexe modele Coffin-Manson extinse, bazat pe o cantitate mare de date din diferite module IGBT și condiții de testare.

$$N_f = a \cdot (\Delta T)^{-n} \quad (2.1)$$

unde: N_f este numărul de cicluri până la defecțiune, ΔT este cursa maximă a temperaturii joncțiunii, a și n sunt parametri care se determină experimental.

Estimarea distribuției duratei de viață. Când sunt disponibile cantități mici de date de fiabilitate, distribuția duratei de viață se estimează. Lucrarea [PPGP12] prezintă o metodă de estimare a distribuției duratei de viață a dispozitivelor de putere bazată pe o combinație de două distribuții normale. În loc de calculul estimărilor în puncte, s-a luat în considerare distribuția posteroară, folosind un cadru bayesian. Această abordare este continuată în [PBP13], prin introducerea de noi parametri care reflectă interacțiunile între diferite proiectări geometrice sau proprietăți ale materialelor dispozitivelor semiconductoare. În ambele lucrări, criteriul de eșec considerat este distrugerea totală a dispozitivelor. Mai mult, metodele nu pot fi aplicate pe puținele date disponibile când se utilizează echipament de testare cu sarcini discrete.

Modele bazate pe modelarea degradării. Modelarea degradării este, de asemenea, utilizată pentru estimarea duratei de viață. În [LCR⁺16] acumularea de daune determinată de uzura lipiciului este modelată de schimbarea în timp a rezistenței termice (R_{th}) a modulelor IGBT. Creșterea R_{th} peste un prag a fost criteriul de eșec a

dispozitivului. Metoda are unele limitări în ceea ce privește temperatura maximă ambientă și a joncțiunii. Lucrarea [HDNA17] propune un model liniar pentru estimarea duratei de viață utile rămase, unde rezistența ON-state este considerată semnătura defectului. Modelul a fost validat pe un număr limitat de condiții de operare.

Modele bazate pe modelarea fizică. O altă abordare folosită pentru estimarea duratei de viață se bazează pe modelarea fizică, de exemplu, care descrie comportamentul lipiciului. Un model termo-mecanic este prezentat în [Cia05, Cia08], ce descrie mecanica deformării materialelor aflate sub sarcini ciclice (plasticitatea dependentă de timp). Lucrarea [KDK10] consideră nu numai deformările dependente de timp, ci și cele elastice și plastice independente de timp, ale lipiciului. Calibrarea și utilizarea unor astfel de modele fizice necesită anumite abilități, deoarece cunoașterea comportamentului mecanic al materialelor supuse ciclurilor termice este esențială.

2.2 Estimarea variației duratei de viață

Considerarea informației inițiale a unui parametru de performanță În literatura de specialitate, conform cunoștințelor noastre, există foarte puține referințe bazate pe ideea estimării variației duratei de viață din valorile inițiale ale EP. Metoda prezentată în [LLY⁺16] prezintă unele asemănări cu abordarea propusă, dar numai din anumite puncte de vedere. Un parametru cunoscut dinainte a fost utilizat pentru a prezice durata de viață a releelor electromagnetice, considerând că informațiile despre parametrul inițial (rezistența inițială de contact) pot indica defecte potențiale ale dispozitivelor. Pentru a măsura informațiile inițiale despre parametru, a fost necesară funcționarea releelor pentru un timp stabilit. Un singur parametru a fost luat în considerare și a fost cunoscut de la început, în timp ce, în cazul dispozitivelor semiconductoare de putere, cel mai adesea acest lucru nu este cunoscut dinainte.

Analiza de sensibilitate globală În ceea ce privește analiza sensibilității, lucrarea [KoB⁺16] prezintă o comparație cuprinzătoare a celor mai utilizate metode SA pentru sisteme cu un număr mare de factori. Cercetarea descrie și compară, din punctul de vedere al identificării factorilor și al costului de execuție, șase metode SA. Patru dintre ele se bazează pe descompunerea varianței: Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST), Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test (EFAST), indicii Sobol și metoda Jansen. O altă metodă prezentată este One-Factor-at-a-Time (OAT) Morris, iar ultima este tehnica metamodelării. Abordarea statistică ANOVA (Analiza Varianței) [SC89] nu este inclusă în acest studiu, deoarece, pentru sistemele cu un număr mare de factori, are o complexitate computațională mai mare. Lucrarea [KIo⁺16] introduce două noi metode, bazate pe entropie, care depășesc limitarea metodelor prezentate mai sus, ce impun un DoE specific și un cost de calcul mare (numărul de simulări/experimente necesare). Problema principală cu toate metodele prezentate este necesitatea unui număr semnificativ de rulări (de cel puțin 10 ori mai mare) în comparație cu numărul de factori. Din acest motiv, metodele SA existente nu sunt adecvate atunci când este disponibilă o cantitate mică de date de măsurare.

Capitolul 3

Fundamente teoretice

3.1 Regresia liniară

Învățarea statistică [GDTR13] constă într-un set de instrumente utilizate pentru înțelegerea datelor. Aceste instrumente sunt clasificate în: supravegheate și ne-supravegheate. În învățarea supravegheată, se construiește un model statistic, pentru a prezice o ieșire din câteva intrări. Regresia liniară este o abordare foarte simplă pentru învățarea supravegheată. Ea este utilă în special pentru a prezice un răspuns cantitativ. Ca exemplu, o regresie liniară simplă este o abordare elementară pentru a prezice un răspuns Y pe baza unei singure variabile X . În acest caz, se presupune o relație liniară aproximativă între X și Y , care, matematic, poate fi scrisă ca (3.1):

$$Y \approx \beta_0 + \beta_1 \cdot X \quad (3.1)$$

unde: β_0 și β_1 sunt două constante necunoscute, ce reprezintă coeficienții sau parametrii modelului, care sunt estimați din date prin metoda celor mai mici pătrate.

3.2 Simularea electro-termică

Simularea electro-termică [PJS08, BIMR18] este un instrument puternic utilizat pentru analiza disipării căldurii în structurile dispozitivelor de putere, în special pentru evaluarea fiabilității. De exemplu, autoîncălzirea dispozitivelor DMOS într-un ciclu termic rapid corespunzător comutării active poate fi simulată și pot fi detectate temperaturi maxime de sute $^{\circ}C$, precum și variații foarte rapide de temperatură.

Un simulator electro-termic estimează propagarea temperaturii în timp și spațiu, din zona sursei de căldură în restul volumului simulat. Pentru a considera temperaturile neuniforme și diferitele densități de putere, structura simulată este împărțită în mai multe părți. Lucrările [PJS08, PBL13] prezintă o strategie cuprinzătoare pentru simularea electro-termică a autoîncălzirii în DMOS până la temperaturi foarte ridicate, incluzând o abordare pentru calibrarea modelului electro-termic al dispozitivului și un simulator de temperatură numeric 3-D optimizat pentru timp redus de simulare. Acestea vor fi considerate principalele referințe pentru simularea electro-termică.

Capitolul 4

Metodologia propusă pentru estimarea ΔT

Acest capitol prezintă contribuțiile autorului la metodologia pentru estimarea și modelarea ΔT în spațiul condițiilor de operare ale aplicațiilor de comutare activă.

Metoda de simulare electro-termică [PBL13] este cea mai potrivită soluție pentru cazul comutării active (clamping repetitiv) a circuitelor integrare de putere, așa cum este prezentat în secțiunea 3.2. Prin urmare, strategia propusă pentru estimarea ΔT se bazează pe simularea electro-termică (introdusă în [PBD⁺19]), cu o abordare suplimentară de calibrare la nivelul pachetului și în spațiul condițiilor de operare a aplicației. Mai mult, teza introduce o metodologie pentru modelarea ΔT în spațiul condițiilor de operare a aplicației, pe baza datelor dintr-o grilă de simulări electro-termice (introdusă în [PBD⁺20]). Metodologia propusă va fi de asemenea aplicată pentru estimarea temperaturii medii în compusul de turnare într-un ciclu termic rapid ($T_{avg-Mold}$), care este utilizată în modelul duratei de viață în aplicații.

4.1 Estimarea ΔT bazată pe simularea electro-termică

Metodologia constă în efectuarea de simulări electro-termice pentru toate profilurile de condiții de operare disponibile, pentru a determina cursele maxime de temperatură a joncțiunii, pe baza propagării simulate în timp și spațiu a temperaturii, în cadrul unui ciclu termic. Profilele de putere ale condițiilor de operare corespunzătoare scenariilor de comutare activă trebuie convertite în impulsuri de putere care vor reprezenta intrări, în format Piecewise Linear (PWL), pentru simulările electro-termice.

Condițiile de operare ale aplicațiilor de comutare repetitivă a sarcinilor inductive

Condițiile de operare considerate în această teză pentru experimentele de comutare activă și pentru modelele dezvoltate sunt temperatura ambiantă (T_{amb}) la care funcționează dispozitivul de putere și măsurile electrice: curentul de sarcină (I_L) și

energia repetitivă (E_R). Se consideră că frecvența și factorul de umplere al impulsului de comandă sunt asigurate de aplicație, pentru a evita acumularea de temperatură.

4.2 Modelarea ΔT

Pentru estimarea principalului factor de stres al duratei de viață, adică cursa temperaturii joncțiunii, în spațiul condițiilor de funcționare a aplicației, se propune următoarea metodologie de modelare. Ideea este de a estima coeficienții modelului ΔT din datele corespunzătoare unei grile de simulări electro-termice efectuate în spațiul condițiilor de operare. În primul rând, pentru a efectua simulări electro-termice în puncte de operare în care nu sunt disponibili parametri de impulsuri de putere din măsurători experimentale, parametrii PWL necesari pentru simulările electro-termice trebuie să fie modelați în spațiul condițiilor de operare.

Cu modelul ΔT dezvoltat pot fi observate dependențele ΔT cu parametrii de operare și se pot face predicții de ΔT pentru diferite condiții de operare a aplicației.

Fluxul metodologiei de modelare a ΔT este prezentat în Figura 4.1.

4.3 Validarea modelului ΔT

Modelul ΔT este validat pe două seturi de date. În primul rând, validarea se efectuează pe setul de date de instruire (datele pe grilă), prin intermediul metodelor leave-k-out și bootstrapping. Apoi, modelul ΔT este evaluat pe datele de simulare electro-termică corespunzătoare scenariilor experimentale de comutare activă.

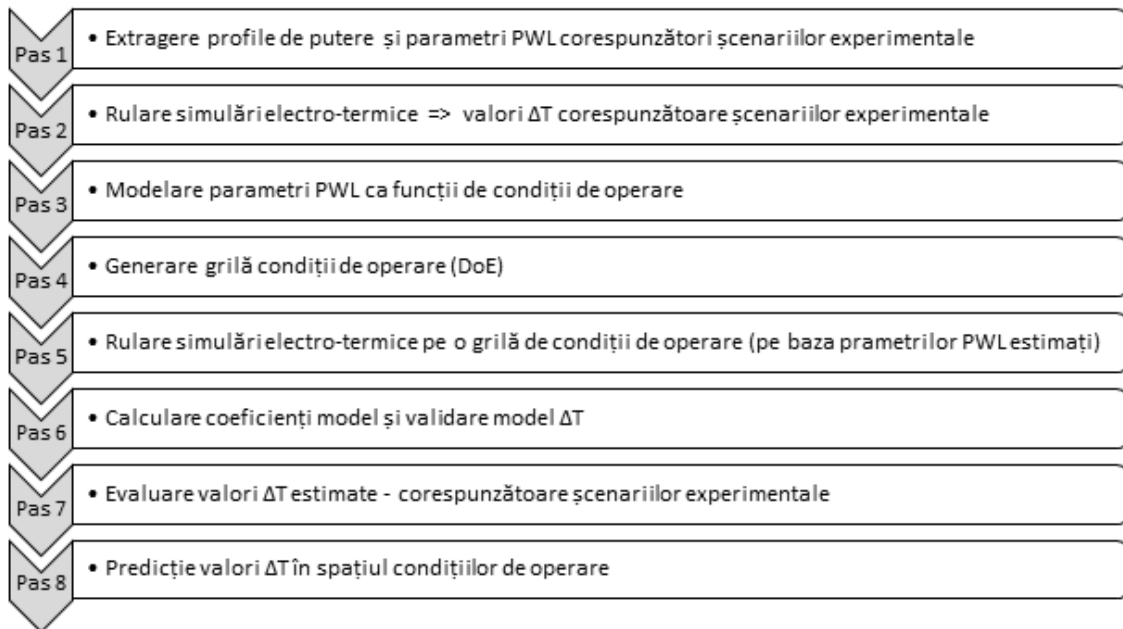


Figura 4.1: Fluxul metodologiei de modelare a ΔT .

Capitolul 5

Metodologia propusă pentru estimarea duratei de viață în aplicații

5.1 Fluxul metodologiei

Figura 5.1 prezintă fluxul metodologiei de estimare a duratei de viață în aplicații.

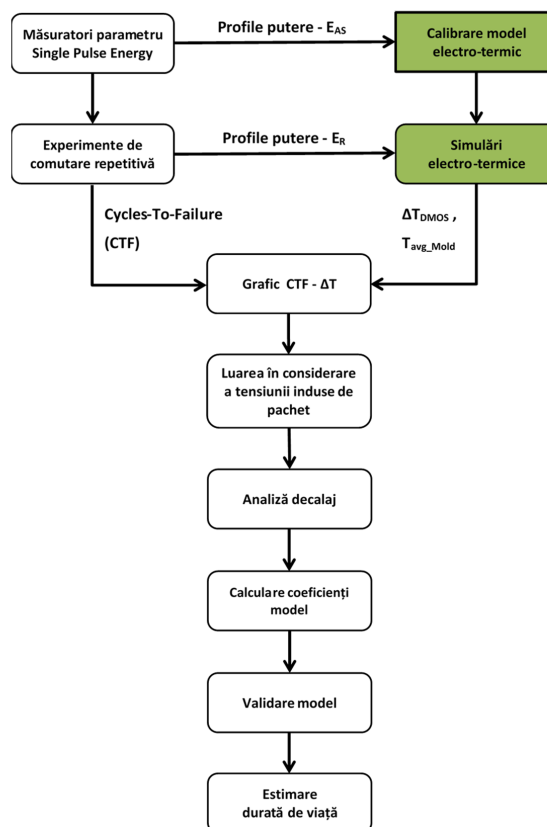


Figura 5.1: Fluxul metodologiei de modelare a duratei de viață în aplicații.

Pornind de la abordarea clasică Coffin-Manson, este dezvoltat un model extins al duratei medii de viață (introdus în [PBD⁺19]), care poate fi aplicat pe diferite condiții de operare a aplicației și pentru un criteriu de degradare predefinit (în loc distrugerea totală a dispozitivelor). Potrivit standardului JEP122H [JED16], mecanismul de ciclare termică este cunoscut de a se conforma legii Coffin-Manson (5.1). În scara logaritmică, această relație arată o dependență liniară între durata de viață și ΔT .

$$N_f \sim [\Delta T]^{-q} \quad (5.1)$$

unde: N_f este durata de viață, exprimată în Cycles-To-Failure (distrugerea totală a dispozitivelor), ΔT reprezintă cursa temperaturii joncțiunii, iar q este o constantă.

Energia pulsului unic (E_{AS}) este determinată experimental pentru toate perechile de condiții de operare (I_L, T_{amb}), iar duratele de viață, exprimate în cicluri până la degradare (CTF), sunt măsurate pe baza experimentelor de comutare activă în diferite condiții de operare. În paralel, sunt rulate simulările electro-termice pentru toate profilele de condiții de operare, pentru determinarea valorilor ΔT corespunzătoare.

5.2 Dezvoltarea modelului duratei de viață în aplicații

5.2.1 Evaluarea legii Coffin-Manson

Pe baza duratelor de viață măsurate și a curselor maxime ale temperaturii joncțiunii corespunzătoare pentru toate scenariile experimentale din diferite condiții de operare, este desenat graficul CTF- ΔT (în scara logaritmică). Din acest grafic s-a observat că dependența liniară așteptată a duratei de viață cu ΔT nu este obținută pentru toate scenariile de condiții de operare. Dependența liniară este valabilă numai la nivel local, pentru scenarii cu condiții de operare (I_L, T_{amb}) fixe, când doar energia repetitivă variază. Se pare că, pentru diferite perechi de condiții de operare (I_L, T_{amb}), ΔT nu este singurul factor de stres. Există, de asemenea, alte surse de stres, care depind de curentul de sarcină și de temperatura ambiantă din experimentul de comutare activă.

5.2.2 Luarea în considerare a tensiunii induse de pachet

Lucrarea [NSK⁺03] prezintă o concluzie similară. Acesta arată că graficul log-log al duratei de viață versus ΔT nu urmează aceeași linie pentru condiții de testare diferite. Autorii explică aici că principala cauză a mecanismului de avarie este tensiunea de forfecare din ambalaj, generată de coeficienții diferiți de expansiune termică a cipului de siliciu, compusului de turnare utilizat la asamblare și substratului ambalajului. Compusul de turnare, care este injectat în procesul de asamblare la temperatură ridicată (aprox. 175 °C), generează o încordare suplimentară asupra cipului, atunci când este răcit la temperatura ambiantă. Această solicitare mecanică din ambalajele din plastic are o amplitudine diferită atunci când dispozitivele sunt operate la temperatură ambiantă diferită. Ea se reduce la zero atunci când temperatura ambiantă este

egală cu temperatura de injecție a compusului de turnare. Astfel, pentru a ține cont de acest efect, termenul ΔT_{Mold} , definit în (5.2), se adaugă în modelul Coffin-Manson.

$$\Delta T_{Mold} = T_{avg_Mold} - T_{molding} \quad (5.2)$$

unde: T_{avg_Mold} este temperatura medie în compusul de turnare în timpul unui ciclu termic rapid, $T_{molding}$ reprezintă temperatura de injecție a compusului de turnare.

Luând în considerare acest efect, dispunerea pe graficul log-log a scenariilor din diferite perechi (I_L, T_{amb}) se modifică. Așa cum era de așteptat, se observă o dispunere diferită pentru scenariile cu temperatură ambiantă scăzută. Cu toate acestea, nu este încă suficient pentru a obține o dependență liniară globală a duratei de viață cu acest factor de stres combinat, pentru toate scenariile de condiții de operare.

5.2.3 Extinderea modelului duratei de viață în spațiul condițiilor de operare

Încă există un termen neconstant (decalaj), pentru diferite perechi (I_L, T_{amb}) de scenarii. Graficul log-log al duratei de viață versus factorul de stres combinat dezvăluie că decalajul fiecărei perechi (I_L, T_{amb}) este proporțional cu nivelul de stres al condițiilor de operare. Mai mult, se va demonstra că acest decalaj poate fi modelat liniar cu un singur factor, și anume produsul dintre curentul de sarcină și temperatura ambiantă. În consecință, modelul propus pentru durata medie de viață este prezentat în (5.3):

$$\log_{10}(CTF) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot I_L \cdot T_{amb} + \beta \cdot \log_{10}(\Delta T_{DMOS} - \Delta T_{Mold}) \quad (5.3)$$

unde: coeficienții α_1 și β au valori negative.

Modelul duratei de viață rezultat este simplu (cu doar trei coeficienți de estimat) și robust, așa cum vor arăta metodele de validare leave-one-out și bootstrapping.

5.3 Validarea modelului duratei de viață în aplicații

Validarea modelului duratei de viață este făcută cu **metoda leave-one-out**. Pentru fiecare set de date de scenariu, coeficienții de model sunt estimați folosind datele celorlalte observații disponibile (scenarii) și, apoi, eroarea relativă de predicție se calculează, prin evaluarea modelului pe observația curentă. Acest proces se repetă pentru toate scenariile disponibile. La sfârșit, este luată în considerare eroarea relativă maximă (fără semn) obținută.

Intervalul de încredere este estimat cu **tehnica bootstrapping**. Din toate măsurătorile disponibile (N), un eșantion de bootstrapp este generat prin alegerea aleatorie a $(1 \div 3) \times N$ observații. În continuare, coeficienții de model sunt calculați pe baza acestui eșantion și observațiile rămase afară (care nu fac parte din eșantionul bootstrapp) sunt estimate cu acest model, rezultând erori relative de predicție. Acești pași se repetă de 10 000 ori. În cele din urmă, limitele de încredere (corespunzătoare nivelului de încredere dorit - de obicei 95%) sunt calculate din histograma erorilor relative de predicție.

Capitolul 6

Metodologia propusă pentru estimarea variației duratei de viață

Acest capitol introduce metodologia de estimare a variației duratei de viață (cauzată de variația procesului de fabricație) și a duratei de viață minime. Metodologia a fost deja prezentată în [PBP⁺19]. Pentru a depăși problema cantității limitate de date de fiabilitate disponibile, sunt utilizate împreună date din diferite etape ale dezvoltării și testării produsului. Legătura dintre măsurătorile de viață și cele din etapa Back-End se face cu ajutorul metodei SA globale dezvoltate (introdusă în [PBP⁺18]), care este capabilă să performeze chiar și atunci când este disponibilă o cantitate mică de date. Aceasta este utilizată pentru a găsi în mod automat cei mai relevanți EP care se corelează cu variația duratei de viață. Modelul variației duratei de viață este calculat din datele experimentale, considerând ca factori cei mai relevanți EP. Estimarea distribuției duratei de viață se face prin evaluarea modelului variației duratei de viață pe distribuțiile BE ale celor mai relevanți EP, măsurate pe mii de dispozitive. Durata minimă de viață este estimată din distribuția prezisă a duratei de viață.

6.1 Fluxul metodologiei

Fluxul metodologiei propuse este prezent în Figura 6.1. În primul rând, sunt efectuate măsurătorile inițiale ale EP pentru toate DUTs, în același mod ca în faza BE a dezvoltării produsului. De asemenea, DUTs sunt numerotate (serializate) pentru urmărirea viitoare a datelor. Apoi, sunt efectuate testele de stres (comutare activă).

6.2 Găsirea celor mai relevanți Parametri Electrici (EP)

Găsirea celor mai relevanți EP corelați cu variația duratei de viață se realizează cu metoda SA globală dezvoltată. Aceasta constă în următoarele etape: pregătirea datelor (gruparea și normalizarea), calcularea corelațiilor (analiza sensibilității), identificarea factorilor relevanți și validarea celor mai relevanți EP.

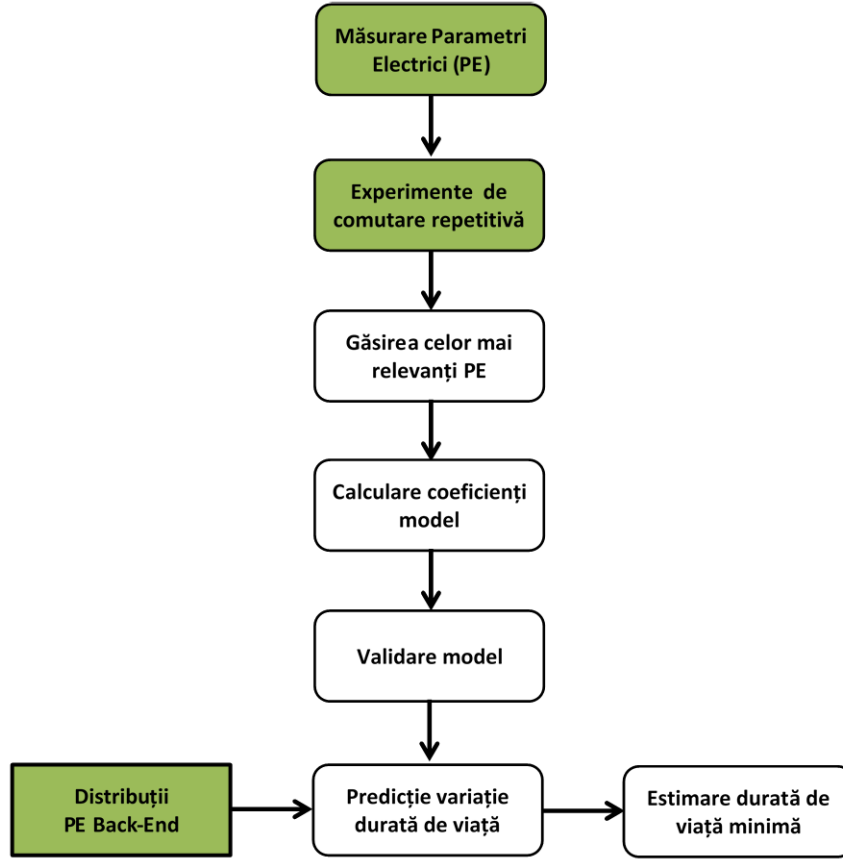


Figura 6.1: Fluxul metodologiei de estimare a variației duratei de viață.

Analiza de Sensibilitate. După etapa de grupare, sunt considerate în continuare doar EP independente (din fiecare grup este păstrat doar cel reprezentativ). Următorul pas constă în calcularea corelațiilor EP inițiale cu variația duratei de viață. Ideea este de a evalua fiecare efect la un moment dat. Pentru aceasta, corelațiile sunt calculate pe trei ordine, care acoperă nu numai efectul liniar, dar și dependențele de interacțiune și de ordin quadratic. Corelația de ordinul întâi reprezintă dependența 1-la-1 a variației duratei de viață cu fiecare parametru electric. Corelația de ordinul doi constă în dependența variației duratei de viață cu factori noi obținuți din produsul fiecărei perechi de EP. În perechi sunt incluse și perechea fiecărui parametru electric cu sine. Corelația de ordinul trei reprezintă dependența variației duratei de viață cu factori noi obținuți din produsul fiecărui triplet de EP.

Metoda SA globală continuă cu **identificarea factorilor (EP)**. Cu corelațiile calculate anterior, se efectuează trei liste Top 10 EP relevanți (corespunzătoare celor trei ordine) și se face lista celor mai importanți factori, calculând scorurile normate ponderate cu (6.1), pe baza numerelor de apariții ale EP în cele trei liste Top 10:

$$score_{EP_i} = 0.45 \cdot \overline{occ_{ord1}} + 0.35 \cdot \overline{occ_{ord2}} + 0.20 \cdot \overline{occ_{ord3}} \quad (6.1)$$

unde: $\overline{occ_{ord1}}$, $\overline{occ_{ord2}}$, $\overline{occ_{ord3}}$ sunt numerele de apariții ale EP_i pe cele trei liste.

6.3 Estimarea coeficienților modelului variației duratei de viață

În secțiunea anterioară, cei mai relevanți EP care explică variația duratei de viață sunt găsiți într-un mod automat. Aceasta nu înseamnă că ei reprezintă cauzele variației duratei de viață. Cu toate acestea, corelația lor cu durata de viață oferă un indiciu important cu privire la răspândirea duratei vieții pentru un set dat de valori EP.

Cu cei mai relevanți EP rezultați, care sunt considerați factori, coeficienții modelului de variație a duratei de viață sunt estimați în pasul următor. Având la dispoziție doar câteva date de fiabilitate disponibile, modele polinomiale complexe sau de ordin mare nu pot fi utilizate. În consecință, modelul liniar (6.2) este considerat. Logaritmul duratei de viață este luat ca rezultat al modelului, astfel încât dependența față de EP (factorii de intrare) să poată fi modelată cu un polinom de ordin scăzut (liniar).

$$\overline{\log_{10}(CTF)} = c_0 + \sum_{i=1}^N c_i \cdot \overline{EP}_i \quad (6.2)$$

unde: CTF este durata de viață (în cicli până la degradare), EP_i sunt cei mai relevanți EP (factori), N este numărul de factori considerați, iar c_i sunt coeficienții modelului.

6.4 Validarea modelului variației duratei de viață

Validarea modelului variației duratei de viață se realizează cu metoda leave-one-out. Pe rând, fiecare eșantion este exclus și coeficienții modelului sunt estimați folosind datele rămase disponibile. Apoi, pentru eșantionul curent lăsat afară, se calculează eroarea relativă de predicție. Procesul se repetă pentru toate eșantioanele disponibile. Eroarea relativă maximă (fără semn) obținută este în cele din urmă considerată.

Intervalul de încredere al predicției este determinat prin tehnica bootstrapping. Din toate măsurătorile disponibile (N), un eșantion de bootstrapp este generat prin alegerea aleatorie a $(1 \div 3) \times N$ observații. Pe baza acestor date de eșantion, este calculat un model. Apoi, observațiile lăstate afară (care nu fac parte din eșantionul de bootstrapp) sunt prezise cu acest model, rezultând erori relative de predicție. Acești pași sunt repetați de 10 000 ori. Din histograma erorilor relative de predicție se calculează limitele de încredere, corespunzând nivelului de încredere dorit.

6.5 Predictia distribuției duratei de viață și a duratei minime de viață

Distribuția duratei de viață corespunzătoare fiecărui scenariu de condiții de operare este estimată prin evaluarea modelului de variației a duratei de viață pe distribuțiile factorilor (cei mai relevanți EP), preluate din etapa Back-End a dezvoltării, în care sunt măsurate mii de dispozitive. Etapa BE reprezintă măsurători de EP (tensiuni, curenți, întârzieri, etc.) ale dispozitivelor asamblate. Pe baza distribuției duratei de viață prezise, durata minimă de viață este estimată calculând cuantila necesară.

Capitolul 7

Rezultate experimentale

7.1 Echipamentul de măsurare a duratei de viață

După măsurarea parametrilor electrici ai DUTs și numerotarea (serializarea) acestora, sunt efectuate testele de durată de viață. Comutarea activă a circuitelor integrate de putere constă în aplicarea de comenzi repetitive de impulsuri de tensiune comutatoarelor de putere care conduc sarcini inductive. Echipamentul testului de stres constă în următoarele componente: PC, cu software personalizat pentru configurare, control, vizualizare și salvare de date; placă de testare dedicată, care conține dispozitivele testate; sarcini inductive discrete (cu rezistențe serie); placă personalizată pentru controlul și oprirea DUTs și interfața de măsurare; instrumente de masura; cameră termică, unde este amplasată placa de testare dedicată care conține 6 DUTs.

Experimentele de clamping repetitiv sunt efectuate pe 12 scenarii de condiții de operare diferite, constând din 5 perechi (I_L, T_{amb}) , fiecare pe 2-3 valori de E_R (energie repetitivă). Figura 7.1 ilustrează duratele de viață măsurate în spațiul condițiilor de operare în care se efectuează experimentele de comutare activă.

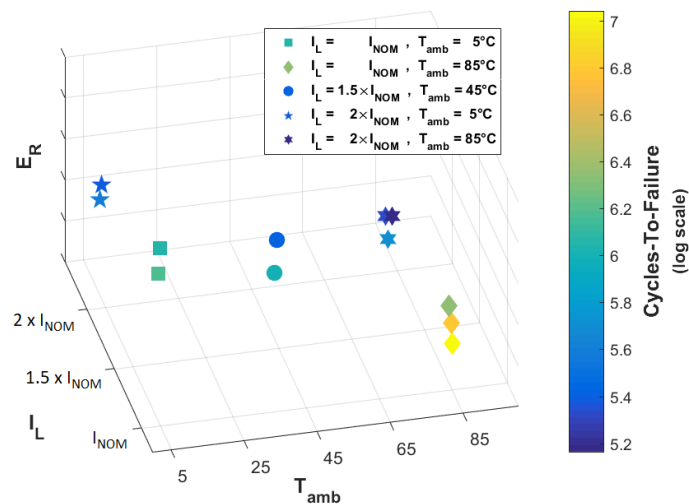


Figura 7.1: Măsurătorile de durată de viață.

7.2 Aplicarea metodologiei modelării ΔT

În prima etapă, profilul de putere și parametrii PWL corespunzători sunt extrasi pentru toate scenariile experimentelor de comutare activă. Pe baza parametrilor PWL ale scenariilor experimentale, sunt construite modele bazate pe date sau formule pentru parametrii PWL, pentru a face predicții în spațiul condițiilor de operare.

Planul de experimente de simulare pe grila de condiții de operare constă în 125 de puncte de date (5 valori pentru fiecare factor). Figura 7.2 prezintă valorile ΔT_{DMOS} simulate pentru grila de scenarii de profiluri de putere (cu cercuri), împreună cu valorile rezultate din simulările profilurilor de putere ale experimentelor de comutare activă (cu buline). Toate valorile ΔT_{DMOS} sunt codate prin culoarea simbolurilor.

Valorile ΔT rezultate din simulările pe grilă sunt utilizate pentru estimarea coeficienților modelului ΔT , care are ca factori condițiile de operare.

Validarea modelului ΔT este realizată cu metoda leave-k-out. Pentru asta, din toate observațiile (puncte de date), un număr de $k = 3$ sunt lăsate afară și modelul ΔT este calculat pe baza observațiilor rămase. Apoi, modelul este evaluat pe cele k puncte de date lăsate afară. Procesul este repetat de 317 750 ori (combinații de 125 luate câte 3). Eroarea relativă maximă (fără semn) de predicție este de 1,34%. Tehnica bootstrapping este utilizată pentru a estima intervalul de încredere al predicției modelului ΔT . Se folosește un set de eșantioane de bootstrapp, care este generat din setul original de observații prin alegerea aleatorie (cu înlocuire) a unui număr de observații egal cu dimensiunea setului de date original. Numărul de observații rămase afară pentru fiecare iterație este ales la întâmplare. În total, sunt efectuate 10 000 iterații (constând în calcularea modelului + evaluare pe punctele de date rămase afară). Conform distribuției erorilor, intervalul nivelului de încredere de 95% se răspândește asupra erorilor relative între limita inferioară de -0,65% și limita superioară de 0,64%.

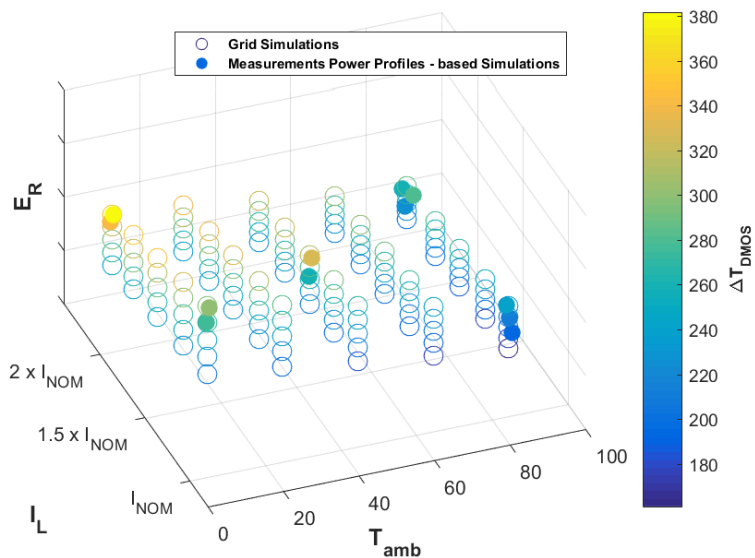


Figura 7.2: Valorile ΔT rezultate pentru scenariile de profiluri de putere pe grilă.

7.3 Aplicarea metodologiei de estimare a duratei de viață în aplicații

7.3.1 Dezvoltarea modelului duratei de viață în aplicații

După cum este prezentat în capitolul 5, primul pas este evaluarea legii Coffin-Manson, în spațiul experimentelor de comutare activă. Având duratele de viață din experimente și valorile ΔT din simulări, este desenată și analizată diagrama log-log CTF- ΔT . Contrar teoriei, dependența liniară așteptată a duratei de viață cu ΔT nu este obținută pentru toate scenariile condițiilor de operare. Legea Coffin-Manson pare a fi valabilă doar local, pentru condiții de operare (T_L, T_{amb}) fixe, în timp ce mărimea ΔT pare să nu fie unicul factor de stres în tot spațiul condițiilor de operare.

Luând în considerare și solicitarea mecanică indusă de pachet, se pot observa unele schimbări în dispunerea scenariilor din diferite perechi (T_L, T_{amb}) de condițiile de operare pe graficul log-log. Așa cum era de așteptat, se poate observa o dispunere diferită pentru scenariile cu temperatură ambientă scăzută. Totuși, nu se poate observa dependența liniară globală a duratei de viață cu factorul de stres combinat, în tot spațiul condițiilor de operare. Figura 7.3 prezintă diagrama log-log. Pentru diferite perechi de scenarii (T_L, T_{amb}) , încă există un termen neconstant (decalaj).

Mai mult, Figura 7.3 arată că decalajul fiecărei perechi (T_L, T_{amb}) este proporțional cu nivelul de stres al condițiilor de operare. Dependența acestui decalaj cu condițiile de operare a fost studiată mai departe și, în cele din urmă, a fost modelată liniar doar cu trăsătura $I_L \cdot T_{amb}$. În consecință, modelul final al duratei de viață (prezentat în 5.3) este obținut. O posibilă explicație pentru această simplă dependență, din punct de vedere fizic, este faptul că, în termeni de energie (și de cursă a temperaturii joncțiunii), există o limitare dată de condițiile de operare (T_L, T_{amb}) . Pentru o pereche dată (T_L, T_{amb}) de condiții de operare, energia repetitivă aplicată nu poate lua orice valoare. E_R este limitată de valoarea E_{AS} corespunzătoare pentru acel scenariu, în timp ce energia pulsului unic este invers proporțională cu produsul $I_L \cdot T_{amb}$.

Mai mult, prin calcularea coeficienților modelului duratei de viață (5.3) și rescrierea ecuației modelului sub forma (7.1), rezultă o dependență liniară globală (în scară logaritmică) a duratei de viață cu factorul unic de stres rezultat, în întreg spațiul condițiilor de operare. Graficul rezultat este prezentat în Figura 7.4. Acesta arată clar că, cu modelul propus al duratei de viață rescris în forma (7.1), dispunerea valorilor duratei de viață (în scară logaritmică), corespunzătoare tuturor condițiilor de operare, versus factorul de stres combinat rezultat urmează o singură linie. Aceasta înseamnă că factorul combinat rezultat (F) este factorul unic de stres pentru toate scenariile de condiții de operare.

$$\log_{10}(CTF) = \alpha_0 + \beta \cdot F \quad (7.1)$$

$$\text{where: } F = \frac{\alpha_1}{\beta} \cdot I_L \cdot T_{amb} + \log_{10}(\Delta T_{DMOS} - \Delta T_{Mold})$$

Tabelul 7.1 arată valorile celor trei coeficienți ai modelului duratei de viață (5.3), estimați cu metoda celor mai mici pătrate, din datele experimentale și de simulare.

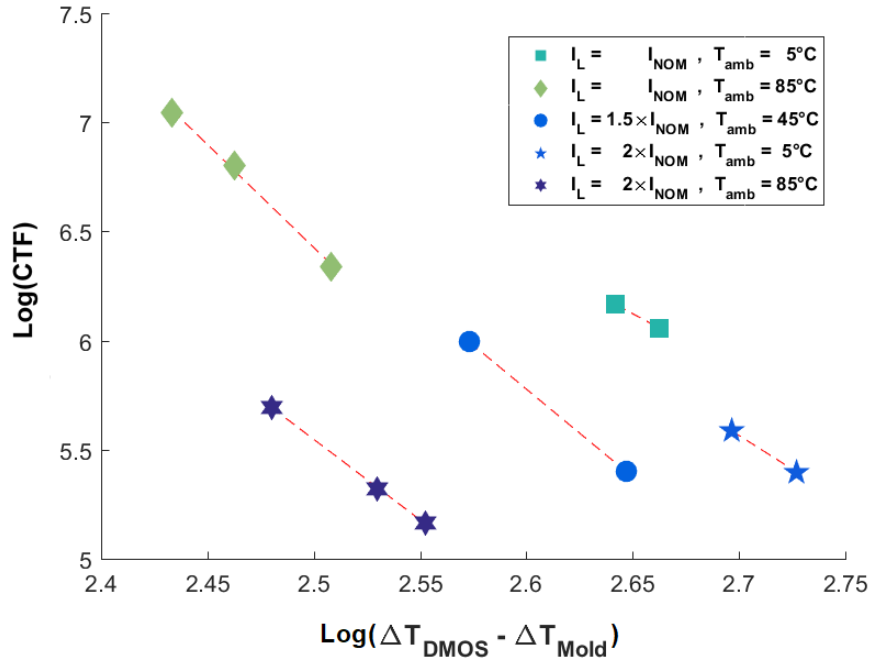


Figura 7.3: Diagrama log-log a duratei de viață versus factorul de stres combinat.

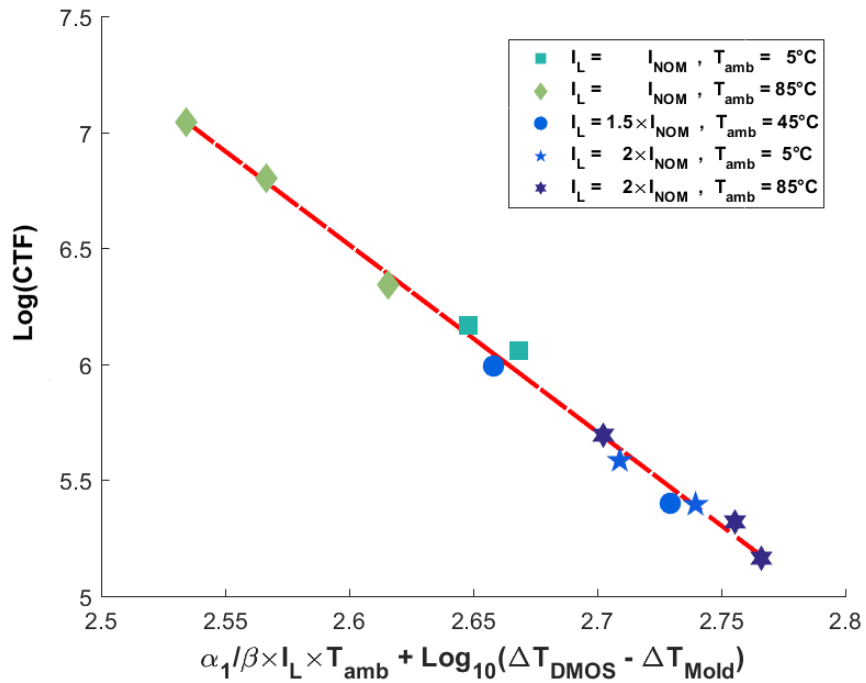


Figura 7.4: Dependența liniară a duratei de viață versus factorul unic de stres.

Tabelul 7.1: Coeficienții modelului duratei de viață (5.3)

α_0	α_1	β
27.5041	-0.0019	-8.0728

7.3.2 Validarea modelului duratei de viață în aplicații

Validarea modelului duratei de viață se face cu **metoda leave-one-out**. Pentru aceasta, fiecare scenariu (din 12 măsurători) este, pe rând, lăsat afară, iar modelul este estimat folosind restul de 11 observații. Apoi, eroarea relativă este calculată pe baza predicției modelului pe observația lăsată afară. Eroarea relativă maximă (fără semn) obținută este de 24%. Intervalul de încredere este estimat cu **tehnica bootstrapping**. Setul de eșantioane de bootstrapp este generat din toate măsurătorile disponibile, prin alegerea aleatorie (cu înlocuire) a 2 x 12 observații. Pe baza setului de bootstrapp, un model este estimat și apoi evaluat pe observațiile rămase afara (ce nu fac parte din acest set de date). Acest proces este repetat de 10 000 ori, fiind calculate în total 16 597 erori. Figura 7.5 prezintă histograma erorilor relative. Intervalul nivelului de încredere de 95% se întinde pe erori relative între limita inferioară de -25% și limita superioară de 25%. Figura afișează, de asemenea, erorile relative obținute cu metoda leave-one-out (cu culoarea verde), valorile fiind înmulțite cu 20.

Metodele de validare arată că modelul rezultat pentru estimarea duratei medii de viață ținând cont de aplicație este robust, în ciuda faptului că nu este un model complex (având doar trei coeficienți ce trebuie estimați).

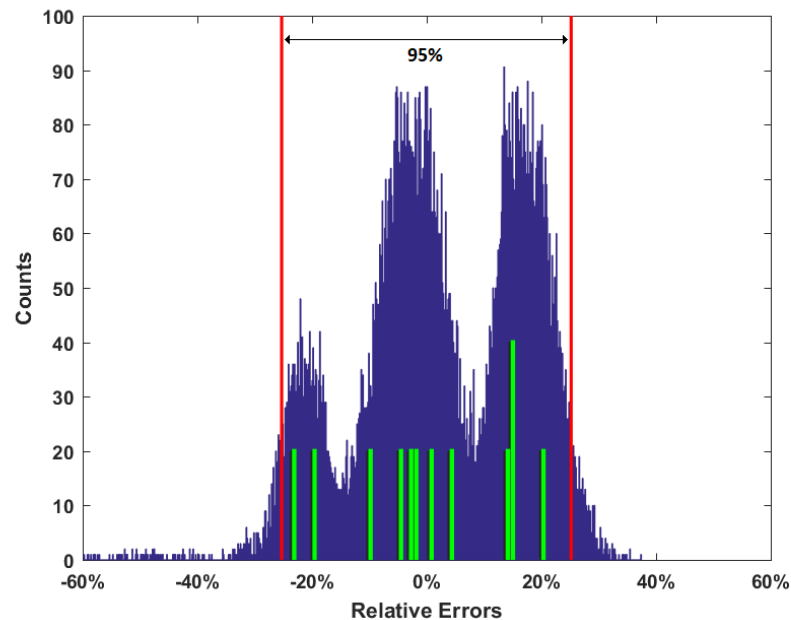


Figura 7.5: Erorile relative de predicție (model 5.3), cu validarea bootstrapping. Erorile cu metoda leave-one-out sunt desenate cu verze (valorile înmulțite cu 20).

7.4 Aplicarea metodologiei de estimare a variației duratei de viață

7.4.1 Dezvoltarea modelului variației duratei de viață

Înainte de a efectua testele de viață, parametrii electrici ai tuturor DUTs sunt măsurati (la fel ca în BE) și dispozitivele sunt numerotate (serializate). Sunt luați în considerare pentru analiză 45 de parametri.

În pasul următor, datele sunt pregătite pentru analiză. Se face gruparea EP, pentru a reduce complexitatea problemei. Pentru aceasta, se folosește metoda bazată pe inter-corelații. Ca și condiție ca EP să facă parte dintr-un grup, este considerat un prag minim de inter-corelație de 0,9. Pentru fiecare grup, parametrul electric care are cel mai mare coeficient de corelație minim cu ceilalți EP din grup este desemnat reprezentativ. Există, de asemenea, EP care sunt considerați independenți, deoarece nu aparțin unui grup (coeficienții de corelație cu ceilalți EP sunt mai mici decât pragul considerat). În total, 11 grupuri sunt găsite, în timp ce 9 EP sunt considerați independenți. Deoarece din fiecare grup se păstrează doar parametrul reprezentativ, 20 EP sunt luați în considerare pentru următoarea analiză.

Experimentele de comutare activă se fac în două scenarii de condiții de operare. Valorile duratelor de viață rezultate și ale EP sunt normalizate în intervalul [0,1]. Acest lucru este necesar deoarece valorile sunt pe diferite intervale și ordine de mărime.

Pe baza datelor duratei de viață și ale EP, analiza de sensibilitate este efectuată în continuare. Ea constă în calcularea corelațiilor datelor duratei de viață cu EP, pe trei ordine, folosind metoda coeficienților Pearson (funcția *corrcoef* - MATLAB). Corelația 1-la-1 a duratei de viață cu fiecare parametru electric este corelația de prim ordin. Corelațiile de ordinul al doilea și al treilea sunt corelațiile duratei de viață cu factorii noi obținuți din produsul fiecărei perechi, respectiv, fiecărui triplet de EP.

Pe baza coeficienților de corelație dintre primii 10 factori, primele 10 perechi de factori și primele 10 triplete de factori, se face clasamentul factorilor. Lista finală cu factorii cei mai relevanți se realizează prin calcularea scorurilor normate ponderate ale EP cu (6.1), pe baza numărului de apariții ale EP în aceste trei liste top 10.

Lista finală a celor mai relevanți 5 EP care explică variația duratei de viață este: 12, 9 13, 10, 7. EP rezultați reprezintă caracteristici ce reflectă capacitatea circuitelor integrate de putere de a disipa căldura internă. Această concluzie este relevantă, știind că, în cazul comutării active, mecanismele de defecțiune termo-mecanice sunt cauzate de cursele mari de temperatură la care sunt expuse dispozitivele.

Validarea clasamentului celor mai relevanți EP se realizează prin calcularea regresii liniare succesive ale duratei de viață cu mărirea pas cu pas a numărului de factori (EP). Pentru fiecare nou factor adăugat în model, deviația standard a reziduurilor (erorilor de estimare) scade. Acest lucru înseamnă că noul parametru electric considerat este relevant și explică o parte din variația duratei de viață. Tabelul 7.2 prezintă evoluția deviației standard a erorilor de estimare pentru metamodele cu 1 până la 5 factori. Procentul de scădere a deviației standard a reziduurilor metamodelului cu 5 factori reprezintă nivelul de explicare a variației duratei de viață (71%).

Tabelul 7.2: Reducerea deviației standard a reziduurilor (model variație durată viață)

	Deviație Standard	Reducere STD
Durată de viață	0,1581	
Reziduuri Model (EP_{12})	0,1193	-25%
Reziduuri Model (EP_{12}, EP_9)	0,0754	-52%
Reziduuri Model (EP_{12}, EP_9, EP_{13})	0,0660	-58%
Reziduuri Model ($EP_{12}, EP_9, EP_{13}, EP_{10}$)	0,0600	-62%
Reziduuri Model ($EP_{12}, EP_9, EP_{13}, EP_{10}, EP_7$)	0,0455	-71%

În următoarea etapă, **modelul variației duratei de viață este calculat**, unde, cei mai relevanți EP rezultați sunt considerați factori. Se folosește modelul liniar (6.2).

7.4.2 Validarea modelului variației duratei de viață

Validarea modelului variației duratei de viață se face cu **metoda leave-one-out**. Pentru aceasta, modelul variației duratei de viață este estimat de 11 ori, pe baza diferitelor seturi de date. Pentru fiecare observație (din 11), modelul este calculat cu restul de 10 puncte de date și se calculează eroarea relativă de predicție a observației actuale. Eroarea relativă maximă (fără semn) obținută este de 25%. Intervalul de încredere este estimat cu **metoda bootstrapping**. Un eșantion de bootstrapp este generat din toate măsurătorile disponibile, alegând la întâmplare 2 x 11 observații. Pe baza acestui eșantion, un model este calculat și apoi evaluat pe punctele de date care nu fac parte din eșantionul bootstrapp (observațiile rămase). Acești pași se repetă de 10 000 ori. În total, sunt calculate 15 179 erori. Intervalul nivelului de încredere de 95% se întinde pe erori relative între -26% (limita inferioară) și 30% (limita superioară).

S-ar putea considera că precizia obținută nu este suficient de mare, dar, fără această metodologie, estimarea duratei minime de viață bazată doar pe măsurătorile câtorva DUTs poate fi făcută foarte conservator, cu marje de siguranță foarte mari.

7.4.3 Predicția distribuției duratei de viață și a duratei minime de viață

În cele din urmă, modelul variației duratei de viață este evaluat pe distribuțiile celor mai relevanți EP (factori), luate din etapa de dezvoltare Back-End, unde au fost măsurate mii de dispozitive. În Figura 7.6 este prezentată **distribuția estimată a duratei de viață** pentru un scenariu de condiții de operare. Cu verde sunt ilustrate numerele măsurate de cicluri până la degradare a 6 DUTs peste distribuția estimată a duratei de viață pentru acel scenariu. Se poate observa aici că măsurătorile de viață nu acoperă distribuția estimată, iar media datelor reale diferă de cea a duratelor de viață prezise. Acest lucru se datorează faptului că un număr mic de dispozitive (doar 6) sunt măsurate și selectarea DUTs, astfel încât întreaga variație a procesului de fabricație să fie acoperită, este foarte dificil de realizat.

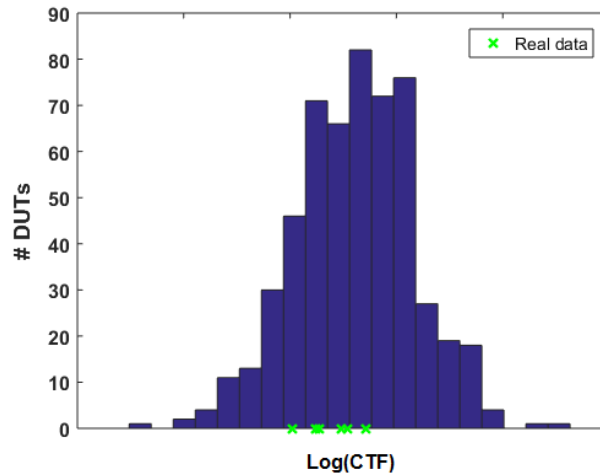


Figura 7.6: Distribuția estimată a duratei de viață.

Durata minimă de viață pentru fiecare scenariu este estimată din distribuția duratei de viață corespunzătoare prezisă. Pentru aceasta, se calculează cuantila de 1 ppm. Figura 7.7 ilustrează funcția de distribuție de probabilitate a duratei prezise de viață, pe o diagramă de probabilitate normală. Pe acest grafic, axa y este modificată astfel încât o distribuție normală să apară ca o linie dreaptă. De asemenea, sunt afișate (cu verde) măsurătorile duratei de viață a 6 DUTs din scenariul de condiții de operare considerat. Se observă că estimarea duratei minime de viață din 6 măsurători poate duce la o concluzie diferită de cea din distribuția prezisă a duratei de viață. Mai mult, în funcție de selecția DUTs pentru măsurătorile duratei de viață, estimarea bazată pe setul mic de date reale poate fi optimistă sau pesimistă. În schimb, pe baza metodologiei propuse, distribuția rezultată a duratei de viață este estimată luând în considerare indirect toleranța procesului de fabricație prin variațiile EP.

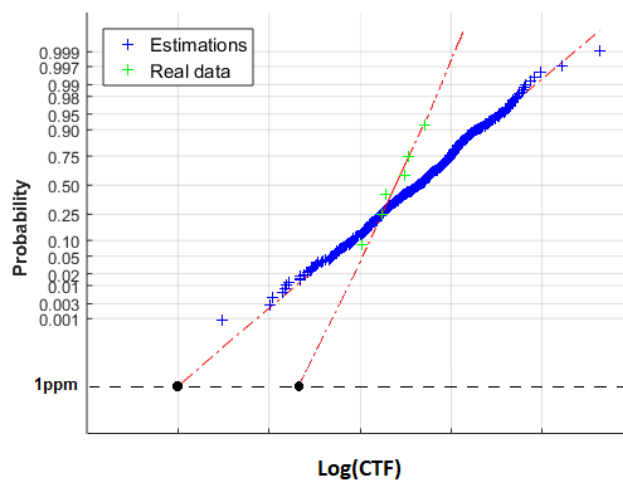


Figura 7.7: Distribuția duratei de viață - pe o diagramă de probabilitate normală.

Capitolul 8

Concluzii

Această cercetare a fost dedicată caracterizării fiabilității circuitelor integrate de putere DMOS inteligente. Deoarece comutarea activă (comutarea repetitivă a sarcinilor inductive) este un proces consumator de timp, iar echipamentele de testare sunt foarte complexe și costisitoare, există o cantitate limitată de date de fiabilitate. Scopul general al acestei teze a fost dezvoltarea de metodologii pentru a caracteriza mai mult circuitele integrate de putere, în termeni de diversitate (estimarea duratei de viață în diferite condiții de operare) și acuratețe (o estimare mai exactă a variației duratei de viață), pe baza datelor de fiabilitate disponibile.

8.1 Obiective și rezultate

I. Estimarea duratei de viață în condiții de operare diferite

Primul obiectiv al cercetării a fost estimarea duratei de viață în diferite condiții de operare a aplicației. Pentru a realiza acest lucru, teza a propus o abordare în doi pași pentru estimarea duratei medii de viață ținând cont de aplicație.

În primul rând, teza a introdus o metodologie pentru modelarea principalului factor de stres, adică cursa temperaturii joncțiunii într-un ciclu termic (ΔT), în diferite condiții de operare, pe baza simulării electro-termice. Conceptul propus implică următoarele etape: estimarea valorilor ΔT corespunzătoare profilurilor de putere ale experimentelor de comutare activă; modelarea parametrilor de timp ai impulsului de putere în spațiul condițiilor de operare; generarea unei grile în spațiul condițiilor de operare, pentru rularea simulărilor electro-termice; estimarea coeficienților modelului ΔT bazat pe date pe grilă de simulări electro-termice. Validarea modelului ΔT cu metodele leave-k-out și bootstrapping a arătat o eroare de predicție relativă maximă de 1.34%. Aceeași metodologie a fost aplicată pentru modelarea temperaturii medii în compusul de turnare într-un ciclu termic rapid (T_{avg_Mold}), necesare modelului duratei de viață ținând cont de aplicație.

Al doilea pas a fost dezvoltarea modelului pentru estimarea duratei medii de viață ținând cont de aplicație, bazat pe simularea electro-termică. Modelul consideră ΔT principalul factor de stres, dar a fost extins și pentru a fi aplicat pe o gamă largă de condiții de operare a aplicației și cu un criteriu predefinit de degradare (în

loc de distrugerea totală a dispozitivelor). Modelul rezultat al duratei de viață este robust și simplu, cu doar trei coeficienți, ce sunt estimați din datele experimentale. Validarea modelului duratei medii de viață a fost efectuată cu metodele leave-one-out și bootstrapping, rezultând o eroare de predicție relativă maximă de 25%.

Teza a introdus, de asemenea, o metodologie bazată direct pe date pentru estimarea duratei medii de viață în spațiul condițiilor de operare a aplicației (neprezentate în acest rezumat). Această abordare este o alternativă rapidă și eficientă pentru estimarea duratei de viață ținând cont de aplicație, dar este destinată numai interpolării estimării duratei de viață în spațiul vizat de condiții de operare, pe baza căruia este calculat modelul duratei de viață și când se observă un singur mecanism de degradare la analiza defecțiunilor.

II. Estimarea cu o mai mare acuratețe a variației duratei de viață

Al doilea obiectiv al cercetării a fost de a îmbunătăți acuratețea estimării variației duratei de viață (cauzată de variația procesului de fabricație). Această cerință a fost și mai dificilă, în contextul existenței unei cantități limitate de date de fiabilitate.

Soluția propusă a fost elaborarea unei metodologii de modelare a variației duratei de viață, care folosește date din diferite etape de dezvoltare și testări ale produsului. Aceasta se bazează în principal pe variațiile celor mai relevanți parametri electrici (EP), măsurați înainte de testul de stres, care se corelează cu variația duratei de viață. Cei mai relevanți EP au fost determinați automat prin metoda globală de analiză a sensibilității (introdusă de asemenea în această teză), care este capabilă să performeze chiar și cu cantități mici de date. Modelul variației duratei de viață a fost calculat din date experimentale, considerând cei mai relevanți EP rezultați ca factori. Modelul a fost validat cu metodele leave-one-out și bootstrapping, rezultând o eroare relativă maximă de 25%. În cele din urmă, prin evaluarea modelului variației duratei de viață pe distribuțiile factorilor (EP) din etapa Back-End (unde sunt măsurate mii de dispozitive), se pot estima distribuția duratei de viață și durata minimă de viață corespunzătoare. Utilizând valorile inițiale ale EP în estimarea răspândirii duratei de viață, variația procesului de fabricație este, în mod indirect, luată în considerare.

8.2 Principalele contribuții ale autorului

Principalele contribuții ale autorului sunt prezentate în capitolele 4, 5, 6 și 7. Metodologiile dezvoltate sunt adaptate pentru cazurile cu cantități mici de date disponibile, așa cum este exemplul evaluării fiabilității circuitelor integrate de putere în comutare activă. Această secțiune sintetizează metodologiile și conceptele introduse în această teză:

- metodologia de estimare a duratei medii de viață ținând cont de aplicație, bazată pe estimarea principalului factor de stres al duratei de viață, adică cursa maximă a temperaturii joncțiunii într-un ciclu termic rapid (ΔT), pe baza simulării electro-termice; modelul rezultat al duratei de viață este robust și simplu, cu doar trei coeficienți de estimat;

- metodologia de estimare a ΔT în diferite condiții de operare, bazată pe simularea electro-termică, incluzând abordarea pentru calibrarea modelului electro-termic al dispozitivului la nivel de pachet (nu este prezentată aici);
- metodologia de modelare a ΔT în spațiul condițiilor de operare a aplicației, incluzând de asemenea:
 - modelul conștient de aplicație pentru predicția energiei repetitive (E_{R-max}) maxime admise în experimentele de comutare activă (neprezentat aici),
 - modele bazate direct pe date pentru estimarea parametrilor de timp ai impulsului de putere în aplicații (neprezentate aici);
- metodologia pentru estimarea duratei medii de viață în aplicații, prin modele bazate direct pe date; abordarea este o soluție rapidă și eficientă pentru estimări de interpolare atunci când un singur mecanism de avarie are loc în spațiul țintit al condițiilor de operare a aplicației (neprezentată aici);
- metodologia de estimare a variației/distribuției duratei de viață și a duratei de viață minime, bazată pe conceptul introdus de utilizare a datelor din diferite etape de dezvoltare a produsului și teste, legate între ele prin intermediul unui grup mic de parametri electrici (EP), identificați în mod automat; scopul general este de a estima variația degradării parametrului vizat sub un test de stres;
- metoda de analiza globală a sensibilității, dezvoltată pentru a performa chiar și atunci când este aplicată pe cantități mici de date; în afară de exemplul de utilizare introdus aici, metoda a fost aplicată cu succes și în cazuri, de exemplu, pentru a găsi corelații între parametrii PCM (Process Control Monitor) și EP;
- metodologia pentru îmbunătățirea indirectă a performanței de degradare a unui parametru vizat sub un test de stres accelerat (de ex. HTOL - High Temperature Operating Life), prin îmbunătățirea robusteții altor EP, ce sunt determinați în mod automat cu metoda SA globală introdusă (neprezentată aici).

8.3 Lucrări viitoare

Lucrările viitoare pot adresa următoarele subiecte:

- extinderea utilizării metodologiei de estimare a duratei de viață ținând cont de aplicație pentru caracterizarea circuitelor integrate de putere pe alte tehnologii;
- aplicarea metodologiei de estimare a variației degradării în monitorizarea produsului, pentru avertizarea timpurie privind abaterile critice în producție;
- în calificarea/caracterizarea produsului: estimarea abaterilor maxime ale EP sub testele de stres, pe baza metodologiei de estimare a variației degradării;
- în dezvoltarea produsului: găsirea factorilor de influență a degradării EP, bazată pe metoda SA globală, pentru a îmbunătăți indirect performanțele acestora.

8.4 Publicațiile autorului

1. [PBBP17] - **Ciprian V. Pop**, Corneliu Burileanu, Andi Buzo and Georg Pelz. Application-Aware Lifetime Estimation of Power Devices. In *2017 22nd IEEE European Test Symposium (ETS)*, pages 1–2, May 2017.
2. [PBP⁺18] - **Ciprian V. Pop**, A. Buzo, G. Pelz, H. Cucu and C. Burileanu. Methodology for Determining the Influencing Factors of Lifetime Variation for Power Devices. In *2018 IEEE 23rd European Test Symposium (ETS)*, pages 1–2, May 2018.
3. [PBD⁺19] - **Ciprian V. Pop**, A. Buzo, C. V. Diaconu, G. Pelz, H. Cucu and C. Burileanu. Application-Aware Lifetime Model for Power Devices based on Electro-Thermal Simulation. In *2019 IEEE 42th International Semiconductor Conference (CAS)*, pages 177–180, Oct. 2019.
4. [PBP⁺19] - **Ciprian V. Pop**, A. Buzo, G. Pelz, H. Cucu and C. Burileanu. The Estimation of the Lifetime Variation for Power Devices. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 19(4):654–663, Dec. 2019.
5. [PBD⁺20] - **Ciprian V. Pop**, A. Buzo, C. V. Diaconu, G. Pelz, H. Cucu and C. Burileanu. Application-Aware Estimation of the Junction Temperature Swing under Active Cycling. *University POLITEHNICA of Bucharest Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science*, 2020.
6. [Pop16a] - Ciprian V. Pop. Application-Aware Lifetime Estimation of Power Devices - State-of-the-Art. Technical report, University POLITEHNICA of Bucharest, PhD Report no. 1, June 2016.
7. [Pop16b] - Ciprian V. Pop. Application-Aware Lifetime Estimation of Power Devices - The Methodology. Technical report, University POLITEHNICA of Bucharest, PhD Report no. 2, Dec. 2016.
8. [Pop17a] - Ciprian V. Pop. Methodology for Determining the Influencing Factors of Lifetime Variation for Power Devices. Technical report, University POLITEHNICA of Bucharest, PhD Report no. 3, June 2017.
9. [Pop17b] - Ciprian V. Pop. The Estimation of the Lifetime Variation for Power Devices. Technical report, University POLITEHNICA of Bucharest, PhD Report no. 4, Dec. 2017.
10. [Pop18] - Ciprian V. Pop. Application-Aware Lifetime Model for Power Devices based on Electro-Thermal Simulation. Technical report, University POLITEHNICA of Bucharest, PhD Report no. 5, June 2018.

Bibliografie selectată

- [BHL⁺08] R. Bayerer, T. Herrmann, T. Licht, J. Lutz, and M. Feller. Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules - various factors influencing lifetime. In *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, pages 1–6, March 2008.
- [BIMR18] G. Breglio, A. Irace, L. Maresca, and M. Riccio. Electro-thermal Simulations of Power Semiconductor Devices during High Stress Events. In *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, pages 1–4, Nov. 2018.
- [BTB⁺11] Cristian Busca, Remus Teodorescu, F. Blaabjerg, Stig Munk-Nielsen, Lars Helle, Tusitha Abeyasekera, and Pedro Rodriguez. An overview of the reliability prediction related aspects of high power IGBTs in wind power applications. *Microelectronics Reliability*, 51:1903–1907, Sep. 2011.
- [Cia05] Mauro Ciappa. Lifetime prediction on the base of mission profiles. *Microelectronics Reliability*, 45:1293–1298, 09 2005.
- [Cia08] M. Ciappa. Lifetime Modeling and Prediction of Power Devices. In *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, pages 1–9, March 2008.
- [GDTR13] James G., Witten D., Hastie T., and Tibshirani R. *An Introduction to Statistical Learning - with Applications in R*. Springer, 2013.
- [HDNA17] M. Heydarzadeh, S. Dusmez, M. Nourani, and B. Akin. Bayesian remaining useful lifetime prediction of thermally aged power MOSFETs. In *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pages 2718–2722, March 2017.
- [JED16] JEDEC Pub. Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices, JEP122H. <https://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JEP122G.pdf>, September 2016.
- [KDK10] I. F. Kovačević, U. Drogenik, and J. W. Kolar. New physical model for lifetime estimation of power modules. In *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA*, pages 2106–2114, June 2010.

- [KIo⁺16] I. Kovacs, A. Iosub, M. Țopa, A. Buzo, and G. Pelz. A novel entropybased sensitivity analysis approach for complex systems. In *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, pages 281–284, December 2016.
- [KoB⁺16] I. Kovacs, M. Țopa, A. Buzo, M. Rafailă, and G. Pelz. Comparison of sensitivity analysis methods in high-dimensional verification spaces. *Acta Tehnica Napocensis Electronics and Telecommunications Journal, Technical University of Cluj-Napoca*, 57(3):16–22, September 2016.
- [LCR⁺16] W. Lai, M. Chen, L. Ran, S. Xu, H. Qin, O. Alatise, and P. A. Mawby. Study on the lifetime characteristics of power modules under power cycling conditions. *IET Power Electronics*, 9(5):1045–1052, 2016.
- [LLY⁺16] Zhigang Li, B. Liu, M. Yuan, F. Zhang, and J. Guo. Characterization of Initial Parameter Information for Lifetime Prediction of Electronic Devices. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5132203/>, December 2016.
- [Man66] S.S. Manson. *Thermal stress and low cycle fatigue*. McGraw-Hill Book Co., 1966.
- [NL69] K. C. Norris and A. H. Landzberg. Reliability of Controlled Collapse Interconnections. *IBM Journal of Research and Development*, 13(3):266–271, May 1969.
- [NSK⁺03] Hieu V. Nguyen, Cora Salm, Benno Krabbenborg, Jaap Bisschop, Ton J. Mouthaan, and Fred G. Kuper. A Reliability Model for Interlayer Dielectric Cracking During Fast Thermal Cycling. In *Advanced Metallization Conference (AMC)*, pages 295–299, Sep.-Oct. 2003.
- [PBBP17] Ciprian V. Pop, Corneliu Burileanu, Andi Buzo, and Georg Pelz. Application-Aware Lifetime Estimation of Power Devices. In *2017 22nd IEEE European Test Symposium (ETS)*, pages 1–2, May 2017.
- [PBD⁺19] C. V. Pop, A. Buzo, C. V. Diaconu, G. Pelz, H. Cucu, and C. Burileanu. Application-Aware Lifetime Model for Power Devices based on Electro-Thermal Simulation. In *2019 IEEE 42th International Semiconductor Conference (CAS)*, pages 177–180, Oct. 2019.
- [PBD⁺20] C. V. Pop, A. Buzo, C. Diaconu, G. Pelz, H. Cucu, and C. Burileanu. Application-Aware Estimation of the Junction Temperature Swing under Active Cycling. *University POLITEHNICA of Bucharest Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science*, 2020.
- [PBL13] M. Pfost, C. Boianceanu, H. Lohmeyer, and M. Stecher. Electrothermal Simulation of Self-Heating in DMOS Transistors up to Thermal Runaway. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 60(2):699–707, Feb. 2013.

- [PBP13] K. Plankensteiner, O. Bluder, and J. Pilz. Application of Bayesian networks to predict SMART power semiconductor lifetime. In *Proceedings of the 2013 9th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, pages 281–284, June 2013.
- [PBP+18] C. V. Pop, A. Buzo, G. Pelz, H. Cucu, and C. Burileanu. Methodology for Determining the Influencing Factors of Lifetime Variation for Power Devices. In *2018 IEEE 23rd European Test Symposium (ETS)*, pages 1–2, May 2018.
- [PBP+19] C. V. Pop, A. Buzo, G. Pelz, H. Cucu, and C. Burileanu. The Estimation of the Lifetime Variation for Power Devices. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 19(4):654–663, Dec. 2019.
- [PJS08] M. Pfost, J. Joos, and M. Stecher. Measurement and simulation of self-heating in dmos transistors up to very high temperatures. In *2008 20th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*, pages 209–212, May 2008.
- [Pop16a] Ciprian V. Pop. Application-Aware Lifetime Estimation of Power Devices - State-of-the-Art. Technical report, University POLITEHNICA of Bucharest, PhD Report no. 1, June 2016.
- [Pop16b] Ciprian V. Pop. Application-Aware Lifetime Estimation of Power Devices - The Methodology. Technical report, University POLITEHNICA of Bucharest, PhD Report no. 2, Dec. 2016.
- [Pop17a] Ciprian V. Pop. Methodology for Determining the Influencing Factors of Lifetime Variation for Power Devices. Technical report, University POLITEHNICA of Bucharest, PhD Report no. 3, June 2017.
- [Pop17b] Ciprian V. Pop. The Estimation of the Lifetime Variation for Power Devices. Technical report, University POLITEHNICA of Bucharest, PhD Report no. 4, Dec. 2017.
- [Pop18] Ciprian V. Pop. Application-Aware Lifetime Model for Power Devices based on Electro-Thermal Simulation. Technical report, University POLITEHNICA of Bucharest, PhD Report no. 5, June 2018.
- [PPGP12] Olivia Pfeiler, Jürgen Pilz, Michael Glavanovics, and Kathrin Plankensteiner. A Bayesian Mixture Coffin-Manson Approach to Predict Semiconductor Lifetime. In *Proceedings of the 2012 2nd International Conference on Stochastic Modeling Techniques and Data Analysis (SMTDA)*, pages 45–52, June 2012.
- [SC89] G. W. Snedecor and W. G. Cochran. *Statistical Methods, 8th Edition*. Iowa State University Press, 1989.