

**CONTRIBUȚII PRIVIND PROIECTAREA CIRCUITELOR AFERENTE UNITĂȚII  
ELECTRONICE DE CONTROL AL TRANSMISIEI AUTOMATE DIN DOMENIUL  
AUTOMOTIVE**

**Teză de doctorat – Rezumat**

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Electrică

**autor ing. Diana-Raluca BIBA (căs. POPA)**

conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Sorin MUȘUROI

Iunie 2023

**Cuprins**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Domeniul tezei .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>Direcții de cercetare .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>Capitolul 1. Introducere.....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>Capitolul 2. Descrierea generală a sistemului electronic de control al transmisiei automate .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>Capitolul 3. Contribuții la sistemul de alimentare în condiții de siguranță a unității electronice de control al transmisiei automate.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>Capitolul 4. Contribuții la sistemul de alimentare în condiții de siguranță a unității electronice de control – sistem hibrid 48V.....</b>      | <b>7</b>  |
| <b>Capitolul 5. Contribuții privind evaluarea performanțelor termice ale sistemului de control al motorului– sistem hibrid 48V.....</b>            | <b>9</b>  |
| <b>Capitolul 6. Contribuții privind estimarea duratei de viață a condensatoarelor ceramice multistrat din unitatea electronică de control.....</b> | <b>11</b> |
| <b>Capitolul 7. Concluzii generale. Perspective de dezvoltare ulterioară .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>Concluzii generale.....</b>   | <b>13</b> |
| <b>Perspective de dezvoltare ulterioară .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>Bibliografie selectivă .....</b>  | <b>15</b> |

## Domeniul tezei

„Automotive” reprezintă domeniul tehnologic al dispozitivelor electronice utilizate în industria producătoare de autovehicule. La momentul actual, gradul de computerizare al autoturismelor este foarte ridicat, luând în considerare numărul foarte mare de componente electrice și electronice ce aparțin unităților electronice de control, numite și ECU-uri (Electronic Control Unit). Un autovehicul modern conține chiar mai mult de 100 de astfel de unități electronice de control (ECU-uri), astfel încât performanțele și calitatea unui autoturism sunt direct influențate de fiabilitatea fiecărei componente electronice. O scurtă enumerare a celor mai utilizate ECU-uri ar fi: unitatea electronică de control al motorului (ECU - Engine Control Unit), **unitatea electronică de control al transmisiei automate (TCU - Transmission Control Unit)**, unitatea electronică de control pentru 4 roți (XCU- 4 wheel drive Control Unit/ Transfer Case Control Unit), sistemul electronic de stabilitate (ESP - Electronic Stability Programme), sistemul electronic de frânare (ABS - Anti-lock Braking System), sisteme de control al tracțiunii (TCS - Traction Control Systems), sistemul electronic de control (adaptiv) al vitezei (CC - Cruise Control, ACC - Adaptive Cruise Control), șamd.

Cerințele pieței automotivă impun inovații continue și implicit creșterea complexității/performancei la intervale din ce în ce mai scurte. Totul de datorează mai multor factori, cum ar fi: creșterea cerințelor pentru protecția mediului prin reducerea emisiilor de dioxid de carbon, consolidarea siguranței funcționale și a securității cibernetice, creșterea eficienței economice, scăderea timpului de livrare, scalabilitatea unor produse care să poată fi folosite cât mai ușor, confort sporit. Pe măsură ce toate aceste cerințe au devenit obligatorii în momentul de față, cu atât mai mult este necesar să fie livrate sisteme electronice ECU validate din punct de vedere funcțional, dar și din punct de vedere al siguranței.

Unitățile de control electronic din industria automotivă fac parte din categoria dispozitivelor cu fiabilitate ridicată, deoarece pe primul loc este siguranța pasagerilor și a autovehiculului, pe toată durata de funcționare. Astfel, fiecare ECU din industria automotivă se supune unui proces riguros de dezvoltare de produs, dintre care cele mai comune sunt modelul “V cycle”, modelul cascadă (Waterfall) sau modelul agil (Agile). Indiferent de modelul de dezvoltare de produs ales, proiectarea propriu-zisă se realizează pe mai multe niveluri, plecând de la analiza cerințelor, concept, arhitectură, modelare și simulare până la testare, validare și integrare. Acest proces de dezvoltare, pe de o parte trebuie să respecte norme legislative impuse de legislația europeană, americană, respectiv asiatică, iar pe de altă parte standardul internațional pentru siguranță în automotive ISO26262. La acestea se adaugă și cerințele și standardele specifice producătorilor de autovehicule.

De notat este că nu numai producătorii de ECU-uri trebuie să îndeplinească aceste standarde, ci fiecare companie producătoare de componente electronice destinate industriei automotivă trebuie să urmărească cele mai recente standarde impuse acestei industrii. Abaterea de la aceste standarde și norme pot face un produs neutilizabil în industria automotivă, amenzi de non-conformitate, abateri legale și nu în ultimul rând afectarea imaginii companiei. Pentru a putea pune în evidență și a dovedi funcționarea în siguranță a unui ECU, din punct de vedere calitativ, procesul de proiectare pentru ECU-uri trebuie să fie structurat pe mai multe niveluri, eficient și suficient de fiabil în toate condițiile de operare.

Pe lângă cumulul de norme și standarde, mai există un alt factor cheie pentru procesul de dezvoltare al unui ECU, și anume timpul procesului de proiectare. Datorită globalizării și adaptării autovehiculelor la noile concepte de piață, etapele dezvoltării unui ECU au un ciclu

de dezvoltare cuprins între 2 și 3 ani, comparativ cu anul 1990 când ciclul de dezvoltare ajungea chiar și la 5 ani. Practic, în momentul de față se asistă la o înjumătățire a timpului de dezvoltare alocat, rezultând clar o nevoie de îmbunătățire a procedurilor de proiectare și o nevoie de standardizare a conceptelor pentru reutilizare. Provocările date de dezvoltarea unui ECU într-un timp cât mai scurt reprezintă de fapt și **motivația principală** a tezei de doctorat. Se pune în evidență și importanța definirii clare a întregului proces de dezvoltare. În plus, în baza experienței profesionale a autorului, se urmărește definirea unor proceduri de proiectare pentru diferite circuite electronice destinate utilizării în aplicațiile automotivă, precum este unitatea electronică de control al transmisiei automate.

### **Direcții de cercetare**

Principala direcție de cercetare a acestei teze o reprezintă proiectarea și validarea diferitelor circuite electronice constitutive unui TCU. Modulul electronic TCU poate părea la început un modul foarte bine definit de-a lungul anilor, anul 2022 fiind un an aniversar în care s-au împlinit 40 de ani de la apariția primului sistem de transmisie automată. Privind la situația actuală totuși, se poate spune că este deosebit de interesant și provocator de a implementa noi soluții pentru TCU care să se urmărească noul trend de electrificare. Industria automotivă se confruntă actualmente cu noi provocări în această direcție de a avea pe piață doar autovehicule hibride/electrice. Astfel, pentru fiecare nivel al întregului sistem sunt necesare schimbări sau îmbunătățiri. De altfel, și unitatea electronică de control al transmisiei automate se supune trendului schimbărilor, deci partea hardware aferentă prezintă o mulțime de particularități careia pot fi aduse îmbunătățiri.

Scopul principal al acestei teze este de a analiza și a furniza diferite soluții de optimizare ce privesc funcționarea robustă a unui TCU în condiții de siguranță, fie impusă prin standarde internaționale ori norme legislative, fie cerută de producătorii de autovehicule. Experiența profesională a autorului, din ultimii zece ani în domeniul de dezvoltare hardware din industria automotivă, a reprezentat un factor decisiv pentru alegerea temei de doctorat “Contribuții privind proiectarea circuitelor aferente unității electronice de control al transmisiei automate din domeniul automotiv”.

Totuși au fost **două provocări** care au stat tot timpul la baza conținutului acestei teze, și anume:

- 1) Cum ar arăta o proiectare în care s-ar putea implementa noțiunea de siguranță funcțională și siguranță termică încă din etapa de proiectare?
- 2) Ce îmbunătățiri ar putea fi aduse pentru a garanta că un circuit va funcționa corespunzător pe întreg ciclul de viață?

În contextul evoluției științifice actuale din domeniul automotivă, cercetarea doctorală are la bază o abordare structurată. Pentru început se colectează informațiile privind stadiul actual al cercetării din domeniul automotivă. Dincolo de aspectele legate de înțelegerea noțiunilor teoretice și experimentale vizate de studiul abordat, scopul principal îl reprezintă cercetarea unităților electronice de control al transmisiei automate, prin propunerea de noi proceduri de proiectare ce se focusează pe îmbunătățirea părții hardware. Aplicarea și validarea modelelor propuse au urmărit respectarea etapelor:

Cerințe → Arhitectură/Concept → Proiectare → Validare/Verificare.

Atât metoda de proiectare, cât și interpretarea rezultatelor, s-au realizat într-un mod detaliat și cât mai accesibil, în scopul creării unui produs scalabil. Adică, s-a urmărit crearea posibilității utilizării informației și de către alte potențiale unități de control, nu neapărat doar de cele aferente transmisiei automate.

**Obiectivele** urmărite în cadrul cercetării sunt următoarele:

- definirea unei proceduri de proiectare care poate fi folosită cu succes pentru realizarea unui proiectări hardware ce corespunde cerințelor de siguranță din automotive în ceea ce privește partea de alimentare;
- definirea unor proceduri generice de evaluare termică ce corespunde cerințelor de siguranță din automotive, în ceea ce privește partea de siguranță în funcționarea unor componente electronice de bază;
- standandizarea procedurilor propuse pentru a consolida noțiunea de modele generice, sustenabile, reutilizabile;
- validarea modelelor propuse prin experiment.

Urmărind obiectivele enunțate mai sus, cercetarea s-a axat pe analiza și selecția componentelor electronice principale, precum: componente de alimentare, microcontroler și componente aferente circuitului de putere. Produsul obținut se dorește a fi robust atât din punct de vedere al siguranței, cât și din punct de vedere al funcționalității pe o plajă extinsă de temperaturi. Sub acest aspect, nu doar selecția componentelor contează, ci și procedura de proiectare, motiv pentru care se vor propune, în baza experienței proprii, proceduri de proiectare ale unei unități de control electronic. Pentru atingerea obiectivelor menționate în cadrul acestui capitol, întreaga teză este organizată pe **trei direcții importante**:

- prezentarea soluțiilor teoretice existente
- sinteza cerințelor și normativelor ce se referă la subiectul tratat
- experiența rezultată din activitatea profesională

## **Capitolul 1. Introducere**

Teza este structurată pe șapte capitole, fiecare dintre ele având la bază cele trei direcții relevante de cercetare anterior amintite. Primul capitol este cel introductiv în care s-au prezentat obiectivele, motivația și direcția de cercetare, realizând totodată încadrarea temei de cercetare abordată în contextul vast al domeniului automotive.

## **Capitolul 2. Descrierea generală a sistemului electronic de control al transmisiei automate**

Din perspectiva motivației temei alese spre cercetare în teza de doctorat, în capitolul 2 s-a prezentat o trecere în revistă a stadiului actual al transmisiei automate. De asemenea, s-a prezentat și o sinteză a cerințelor principale de care trebuie să se țină cont în dezvoltarea unității electronice de control al transmisiei automate. În plus, s-au conturat și principalele considerații teoretice, încadrate în contextul dezvoltării actuale, cu privire la etapele dezvoltării sigure a unei unități electronice de control și a principalelor componente aferente: microcontroler, circuit de alimentare, circuit de control al punții invertoare și elementele în comutație. Fazele de dezvoltare pentru o arhitectură hardware a unui TCU au fost prezentate amănunțit, prezentarea lor fiind trecută prin filtrul experienței profesionale.

S-au analizat următoarele aspecte:

- Prezentarea sintetică a unui scurt istoric privind evoluția sistemelor de transmisie automată și a unităților electronice de control ale transmisiei automate
- Clasificarea sistemelor de transmisie automată și prezentarea transmisiei cu dublu ambreiaj pentru autovehicule
- Clasificarea configurațiilor actuale de unități electronice de control în funcție de localizarea lor în autovehicul și în funcție de tipul sistemului de acționare controlat (electrohidraulic sau electromecanic)
- Definierea procesului de dezvoltare a unui TCU prin intermediul modelului “V-cycle”: concept – proiectare - validare
- Prezentarea în detaliu, în baza experienței proprii, a fiecărei etape pentru dezvoltarea unui TCU: definirea și analiza cerințelor, implementarea arhitecturii și proiectarea propriu-zisă, plecând de la modelare/simulare și la final, validarea proiectului prin verificări experimentale
- Definierea conceptului de proiectare a unui TCU, prin conturarea clară a celor mai semnificative cerințe: localizare TCU, domeniu de putere necesar pentru motor, algoritmul de control pentru motor, cerințele de siguranță și de securitate cibernetică, cerințele de funcționalitate specifice producătorului autovehiculului, condițiile de operare, nivelul de integrare, și nu în ultimul rând, costul total
- Menționarea succintă a cerințelor de proiectare a unității electronice de control al transmisiei automate și evidențierea oportunităților de îmbunătățire privind performanța acesteia
- Studiu analitic și descriptiv al tehnologiilor moderne, privitor la principalele componente electronice aferente TCU, schema bloc fiind evidențiată în fig.1:

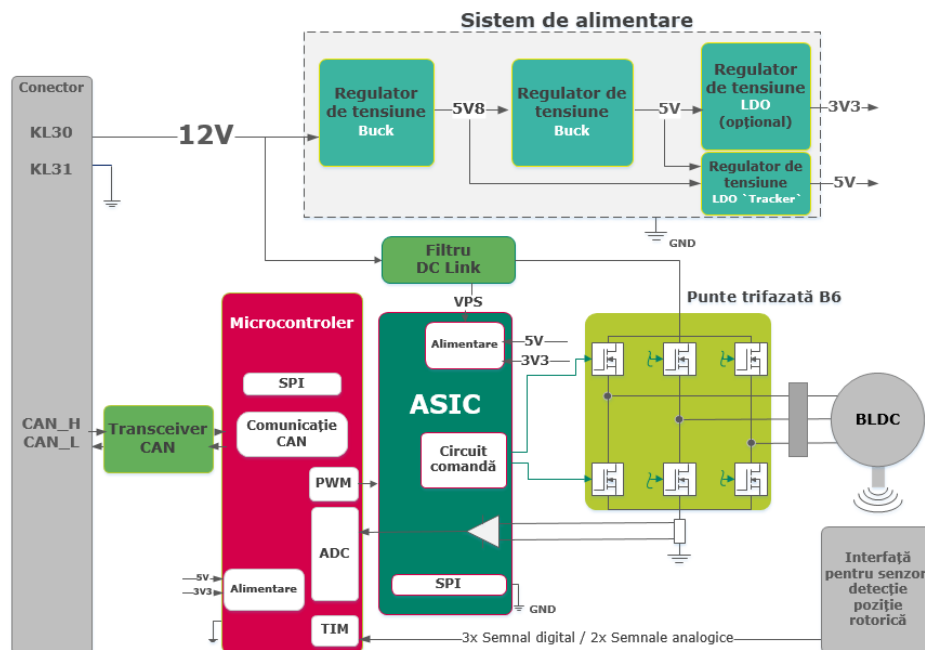


Fig.1. Schemă bloc clasică pentru TCU pentru control motor de tip BLDC

- Studiul detaliat al circuitelor principale aferente unui TCU în scopul unei selecții adecvate ce corespunde cerințelor aplicației. Studiul s-a axat pe sistemul de alimentare, microcontroler, circuitul de control al punții inverteoare și elementele de comutație constituente.

### Capitolul 3. Contribuții la sistemul de alimentare în condiții de siguranță a unității electronice de control al transmisiei automate

La începutul capitolului trei s-a oferit o analiză comparativă în ceea ce privește cele mai performante componente, de ultimă generație. S-a luat în considerare a gamă largă de producători de top din domeniul automotive pentru microcontroler și circuitul integrat de alimentare. Pentru că o proiectare hardware este privită pe de o parte prin lentila performanței, dar pe de altă parte și prin cea a siguranței în automotive, s-a propus și o procedură de proiectare într-o manieră bazată pe expertiza acumulată din activitatea industrială. Procedura propusă constă în respectarea a mai multor etape de proiectare, menționând cerințele fiecărei etape cu scopul de a obține în final un produs robust și stabil. Procedura s-a aplicat în proiectarea circuitului de alimentare și a microcontrolerului aferent unui TCU. Pentru complexitatea și inovația conceptului propus s-a luat în calcul și conceptul de activare a stării de siguranță pentru aplicații cu nivel de siguranță ridicat cum e ASIL C (Automotive Safety Integrity Level).

S-au analizat următoarele aspecte:

- Sinteza proprietăților aferente siguranței funcționale pe care le prezintă componentele principale dintr-o unitate microcontroler (MCU) și system basics chip (SBC), în vederea proiectării unui sistem tolerant la defecte, care să asigure stabilitatea și performanțele dorite
- Prezentarea procedurii de proiectare: propunerea, în baza experienței și în baza modelului teoretic V-cycle, a unei proceduri de proiectare de referință pentru interconectarea unor circuite de top (MCU - SBC), în baza lucrării proprii [4]
- Descrierea fiecărei etape din procedura de proiectare pentru a-i conferi portabilitatea necesară în vederea dezvoltării oricărui circuit nou, nu doar aferent unității TCU, ci aplicabilă oricărei unități electronice de control
- Studiu analitic și comparativ: investigarea “pieței” semiconductorilor la momentul actual, în vederea selectării adecvate a componentelor: MCU - SBC
- Propunerea unui concept inedit de alimentare unică, considerând doar 5V între microcontroler și SBC, plecând de la cerințe, precum cele legate de tensiuni de alimentare, de cost, de integrare, de timp, de posibilități de diagnoză și management al erorilor, de condiții de operare. Diagrama bloc propusă este redată în fig.2.
- 

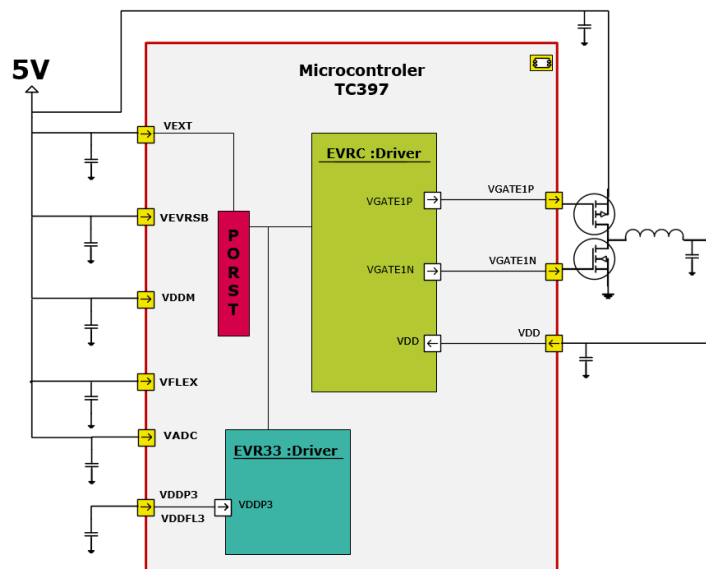


Fig.2. Diagrama bloc propusă pentru alimentare unică de 5V a microcontrolerului TC397

- Prezentarea criteriului pentru o proiectare robustă prin impunerea unor analize/ simulări ce cuprind scenarii în cele mai defavorabile cazuri. Nu se vor lua în considerare valorile tipice oferite de obicei în specificațiile tehnice ale producătorilor de componente
- Urmărirea celor mai restrictive reglementări privind siguranța funcțională
- Propunerea unui nou concept de activare a stării de siguranță funcțională în caz de eroare, cuprinzând toate cazurile de defectare
- Prezentarea conceptului de activare a stării de siguranță într-o manieră modulară – scalabilă. Cele două atribute contribuie la o ușoară integrare a circuitului propus într-un ciclu rapid de dezvoltare al unei unități electronice de control.
- Arhitectură denumită SWOP (Switch-off Path) a fost propusă de autor în vederea asigurării siguranței funcționale pentru detecția, prevenirea și izolarea defectelor. Principalul beneficiu pe care această arhitectură îl aduce este faptul că este un concept generalizat și se poate aplica oricărei combinații MCU - SBC.

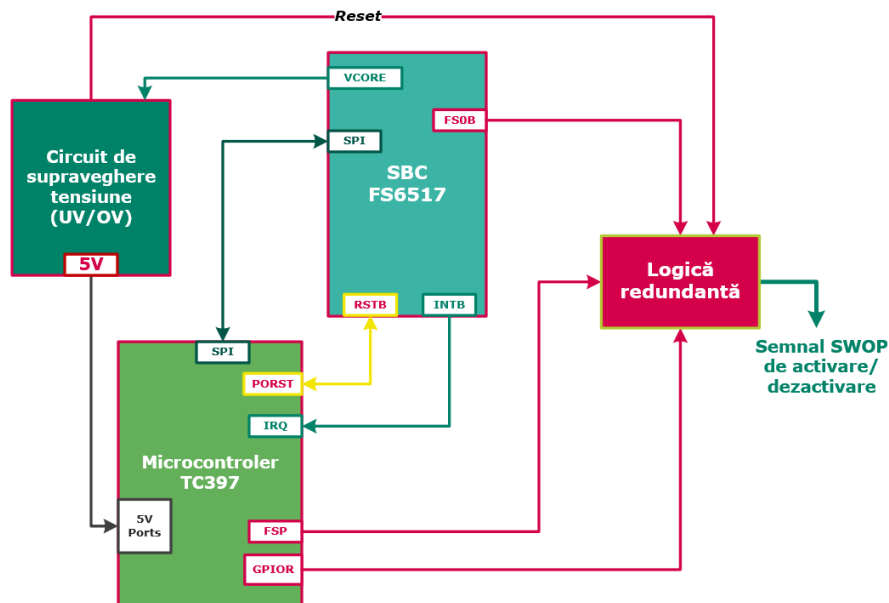


Fig.3. Diagrama bloc propusă pentru dezactivare TCU în caz de eroare

#### Capitolul 4. Contribuții la sistemul de alimentare în condiții de siguranță a unității electronice de control – sistem hibrid 48V

În capitolul 4 s-a prezentat tendința de electrificare din domeniul automotive, urmată de o descriere succintă a sistemelor hibride. De mare interes la momentul actual este sistemul mild-hibrid a cărui sursă principală de alimentare are nivelul de 48V. Plecând de la proiectarea unităților electronice de control aferente sistemelor mild-hibrid, s-au evidențiat regulile și cerințele specifice dezvoltării produselor, cu referire la standardele VDA320 și ISO26262. Ca urmare a complexității sistemului mild-hibrid și a cerințelor noi impuse de siguranță și fiabilitate, s-a propus o nouă arhitectură de alimentare pentru unitatea de control al transmisiei automate de 48V.

Pentru că siguranța funcțională este cea urmărită cu precădere, s-a urmărit capacitatea unității de a monitoriza nivelurile tensiunilor de alimentare, dar și reacția întregului sistem în caz de eroare. În acest sens, conceptul propus a fost supus validării experimentale prin intermediul unei plăci prototip. Placa de test a fost proiectată pentru a acoperi o diversitate de erori (supratensiune, subtensiune), fiind utilizabilă atât pentru testare manuală, cât și automată.

Conceptul de alimentare 48V a fost supus validării experimentale pentru a obține certificarea că va putea fi integrat oricând pentru aplicații TCU de serie de tipul hibrid.

S-au analizat următoarele aspecte:

- Prezentarea tendinței de electrificare printr-o descriere cuprinzătoare a sistemelor mild-hibrid 48V și prin evidențierea stării actuale privind la cumulum provocărilor de proiectare
- Descrierea succintă a sistemului mild-hibrid a cărui sursă principală de alimentare are nivelul de 48V

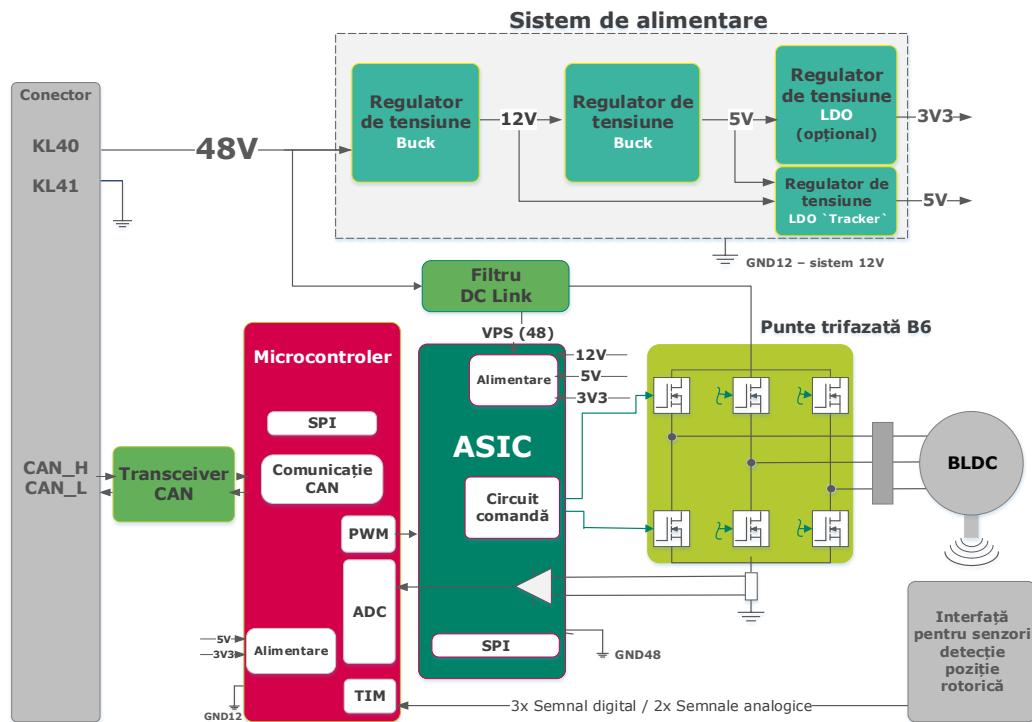


Fig.4. Schema bloc TCU – sistem de alimentare 48V pentru control motor BLDC

- Sintetizarea reglementărilor în vigoare și a cerințelor pentru dezvoltarea unităților electronice, cu referire la standardele VDA320 și ISO26262
- Ca urmare a complexității sistemului mild-hibrid și a cerințelor noi impuse de siguranță și fiabilitate, s-a propus o nouă arhitectură de alimentare pentru unitatea electronică de control al transmisiei automate de 48V
- Propunerea unei noi arhitecturi TCU pentru un sistem mild-hibrid de 48V, în baza lucrării proprii [9]
- Prezentarea unei platforme de validare pentru arhitectura propusă, având ca și interes monitorizarea tensiunilor de alimentare, dar și reacția întregului sistem în caz de eroare
- Identificarea și expunerea tuturor avantajelor de a avea un concept validat încă din timpul fazei de dezvoltare a unui produs
- Proiectarea și implementarea unei platforme de testare pentru a acoperi o diversitate de erori (supratensiune, subtensiune), fiind utilizabilă atât pentru testare manuală, cât și automată
- Validarea experimentală a nivelurilor maxim admise pentru tensiunile aferente, al cărui montaj este prevăzut în fig.5. Aceasta se face printr-un procedeu de injecție de erori descris detaliat. Nu în ultimul rând, importanța siguranței funcționale este de asemenea demonstrată prin definirea și validarea timpilor toleranți la eroare pentru astfel de sisteme.



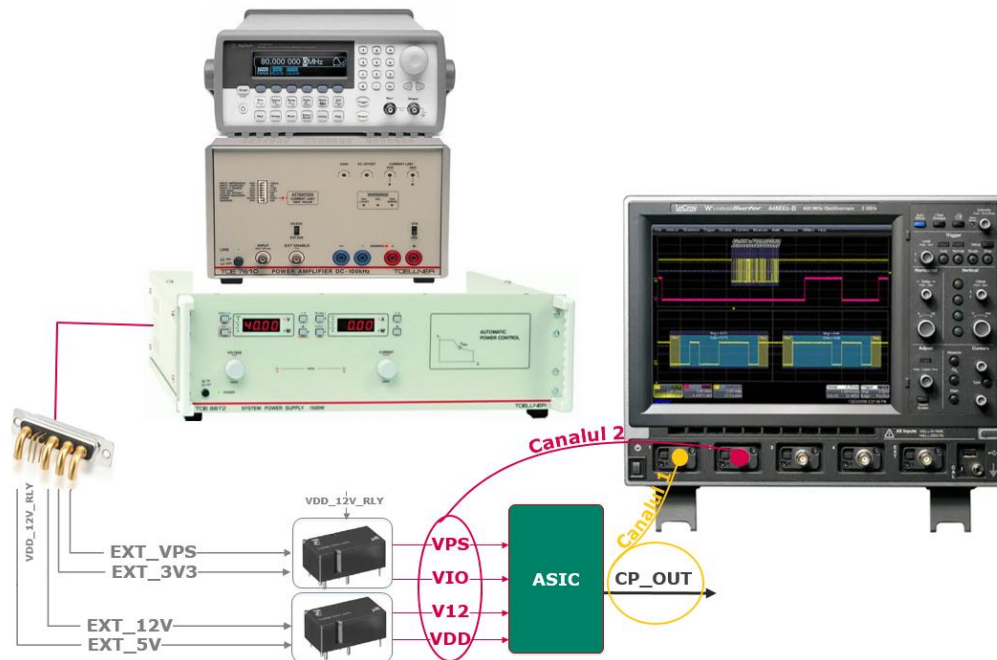


Fig.5. Montaj experimental pentru detecția pragurilor de subtensiune și supratensiune

- Consolidarea conceptului de alimentare validat, care va putea fi integrat oricând pentru aplicații TCU de serie de tipul hibrid.

## Capitolul 5. Contribuții privind evaluarea performanțelor termice ale sistemului de control al motorului– sistem hibrid 48V

Capitolul 5 a avut la bază cerințele de siguranță funcțională din punct de vedere termic. S-a pus accentul pe măsurarea temperaturii cu maximă acuratețe și importanța măsurărilor precise în domeniul automotive cu niveluri de siguranță ASIL ridicate. În prima parte a capitolului, autorul a enumerat posibilitățile de proiectare care există la momentul actual în ceea ce privește detecția temperaturii componentelor în circuit. Soluția oportună pentru identificarea circuitului de măsurat temperatura s-a ales utilizând metoda Pugh. În a doua parte, s-a urmărit validarea experimentală pentru componentele alese. S-a insistat pe faptul că defecțiunea sau degradarea circuitului de putere cauzate de funcționarea temperaturi ridicate pot fi anticipate dacă se ia în considerare auto-încălzirea componentelor în timpul fazei de proiectare. De mare interes au fost elementele în comutație, tranzistoare de tip MOSFET, întrucât ele sunt elementele principale din circuitul de putere din arhitectura TCU mild-hibrid. S-a investigat performanța termică a acestora și s-a propus o metodă de investigație a temperaturii joncțiunii, ținând cont și de temperatura datorată auto-încălzirii.

S-au analizat următoarele aspecte:

- Prezentarea posibilităților de proiectare care există la momentul actual în ceea ce privește măsurarea temperaturii interioare din cadrul unei unități electronice de control
- Revizuirea posibilităților existente în ceea ce privește modalitățile de măsurare a temperaturii joncțiunii componentelor
- Studiul analitic aplicând metoda Pugh în scopul identificării celei mai potrivite soluții în conformitate cu cerințele aplicației
- Defecțiunea sau degradarea circuitului de putere cauzate de funcționarea la temperaturi ridicate poate fi anticipată dacă se ia în considerare auto-încălzirea componentelor în

timpul fazei de proiectare. De mare interes sunt aceste elemente în comutație, tranzistoare de tip MOSFET, întrucât ele sunt elementele principale din circuitul de putere din arhitectura TCU mild-hibrid.

- Propunerea, în baza lucrării proprii [15], a unei metode de investigare completă a temperaturii joncțiunii, ținând cont și de temperatura datorată auto-încălzirii. Etapele sunt ilustrate în fig.6:

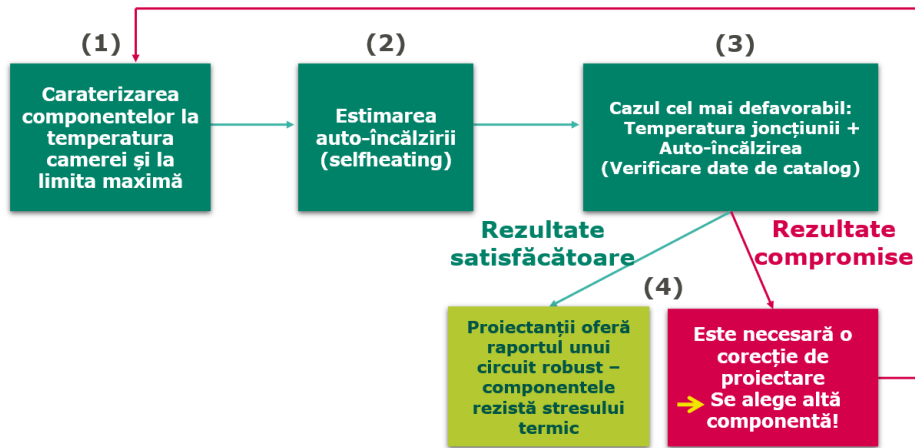


Fig.6. Procedură pentru determinarea temperaturii joncțiunii finale a tranzistoarelor

- Evidențierea scalabilității metodei, întrucât există posibilitatea de reutilizare și în alte aplicații cu nivel de siguranță ridicat ce integrează elemente de putere în comutație
- Validarea experimentă a comportamentului termic al componentelor de putere alese în proiectare. Doar prin verificarea experimentală (montajul este ilustrat în fig.7) se poate garanta că proiectarea respectă limitele și cerințele impuse de aplicație.

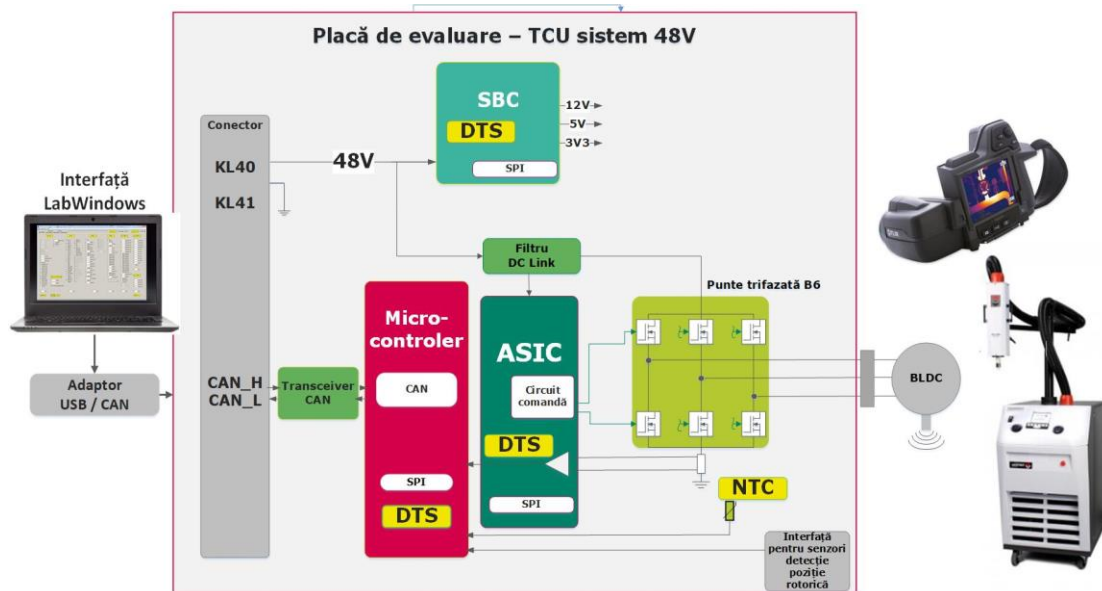


Fig.7. Configurație stand experimental pentru măsurări termice (MOSFET)

## Capitolul 6. Contribuții privind estimarea duratei de viață a condensatoarelor ceramice multistrat din unitatea electronică de control

Capitolul 6 a pus accentul pe studiul siguranței funcționale din punct de vedere termic prin evaluarea fiabilității și robusteții componentelor electronice. S-au prezentat metode de estimare a duratei de viață a componentelor electronice, în special pentru componente pasive, precum condensatoarele ceramice multistrat (MLCC- Multilayer Ceramic Capacitors). Cercetarea a fost dedicată estimărilor privind durata de viață și distribuția duratei de viață pentru MLCC. Estimarea duratei de viață este necesară pentru a defini comportamentul MLCC în condițiile de operare și pentru a dovedi robustețea, fiabilitatea și siguranța proiectării. S-a considerat cazul cel mai defavorabil, atunci când există și stimuli externi de temperatură din cauza puterilor disipate din circuit. Astfel, capitolul a inclus contribuții în ceea ce privește o estimare completă a duratei de viață, s-au luat în considerare influența temperaturii datorate de fenomenul de auto-încălzire.

S-au analizat următoarele aspecte:

- Introducere privind noțiunea de fiabilitate în general și mai apoi, definirea fiabilității pentru condensatoare ceramice multistrat - MLCC
- Trecerea în revistă a cunoștințelor teoretice existente cu privire metoda generică de estimare a duratei de viață a componentelor în general, respectiv o amplă documentare privind metoda prin accelerare. S-a prezentat delatată metoda de accelerare pentru calculul duratei de viață a condensatoarelor MLCC.
- În baza lucrării proprii [17], propunerea unui algoritm de calcul ce contribuie la îmbunătățirea acurateții estimării duratei de viață, considerând și fenomenul de auto-încălzire a componentelor
- Propunerea unei proceduri de estimare completă a duratei de viață și a distribuției acesteia. Etapele procedurii sunt ilustrate în fig.8. S-a evidențiat procesul decizional în ceea ce privește păstrarea/schimbarea componentei în funcție de rezultatul distribuției de viață calculate.

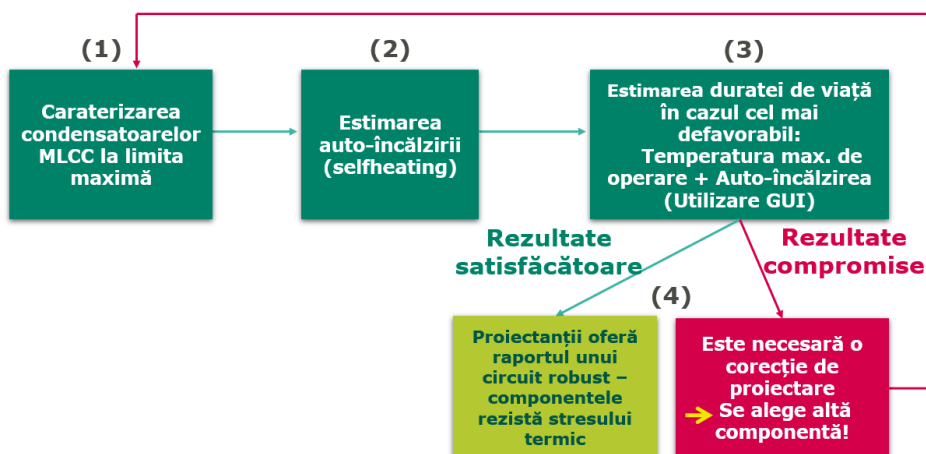


Fig.8. Fluxul procedurii de estimare propuse a duratei de viață a MLCC

- Dezvoltarea unei interfețe grafice (conform fig.9), cu posibilitate de reutilizare și în alte aplicații cu nivel de siguranță ridicat, ce integrează calculul automat al distribuției duratei de viață pentru condensatoare de tip MLCC.
- Evidențierea și în acest caz a noțiunii de scalabilitate/modularitate -interfața grafică este generalizată, include datele specifice a 6 producători diferiți de condensatoare ceramice.

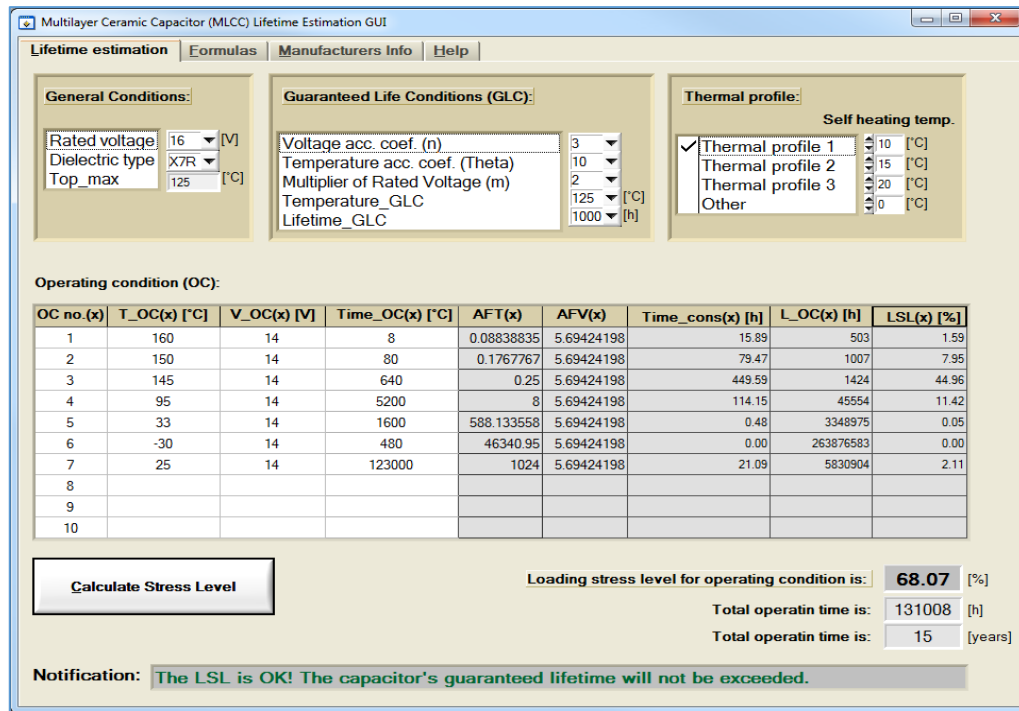


Fig. 9. Fluxul procedurii de estimare propuse a duratei de viață a MLCC

- Validarea procedurii experimentale prin implementarea algoritmului pentru selecția MLCC în aplicația TCU, montajul fiind ilustrat în fig.10.

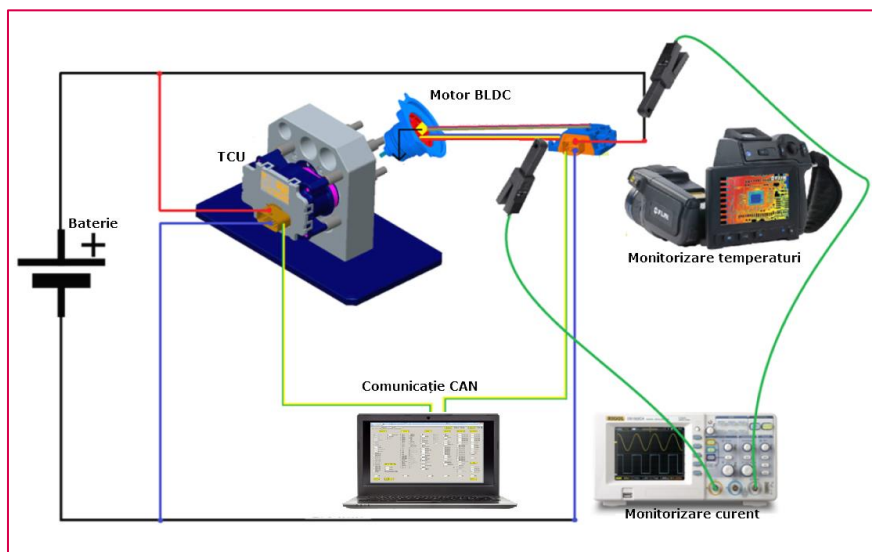


Fig. 10. Configurație stand experimental pentru măsurări termice (MLCC)

Dacă MLCC analizat depășește limita maximă a nivelului de stres, acesta poate fi înlocuit în timpul fazei de proiectare, fără costuri sau efort. Așa cum s-a demonstrat în secțiunea experimentală, aplicarea metodei propuse în scopul determinării distribuției duratei de viață are o importanță majoră în procesul decizional facilitând astfel interpretarea rezultatelor. În acest fel, inginerul proiectant hardware poate fi sigur că MLCC-urile își îndeplinesc sarcina dorită chiar și în condiții dure, cum ar fi funcționarea la temperaturi ridicate.

## Capitolul 7. Concluzii generale. Perspective de dezvoltare ulterioară

### Concluzii generale

Teza de doctorat reprezintă o sinteză a activității autorului desfășurată în cadrul unui concern industrial. Activitatea de proiectare a unor circuite specifice unității electronice de control pentru transmisia automată (TCU) a abordat un domeniu de mare actualitate, domeniul automotive. Transmisia automată tinde mereu spre inovare și este supusă permanent perfecționării, plecând de la inovațiile industriei producătoare de componente și unități electronice, până la evoluția industriei producătoare de autovehicule.

Demersul de cercetare a plecat de la studiul sistemelor de transmisie automată în contextul evoluției științifice. Totodată s-au colectat cerințele standardelor și specificațiile aferente dezvoltării unui TCU, atât în sistem clasic 12V, cât și în sistem hibrid de 48V. Eforturile de cercetare s-au axat pe analiza și furnizarea diferitelor soluții și proceduri de proiectare ce cuprind funcționarea robustă, sigură, stabilă și eficientă a unui TCU în condiții de siguranță ridicată.

Teza este structurată pe **7 capitole**, fiecare dintre acestea având la bază trei direcții relevante de analiză: prezentarea cunoștințelor teoretice existente aferent subiectului tratat, sinteza cerințelor și a normativelor, experiența rezultată din activitatea profesională. Pentru fiecare în parte, s-a urmărit o structură cu **trei abordări: teoretică** prin încadrarea problematicii în stadiul actual, **metodică** prin prezentarea detaliată a procedurilor/arhitecturilor propuse și **experimentală** privind validarea teoriei propuse. Atât procedurile propuse, cât și interpretarea rezultatelor, s-au realizat într-un mod accesibil, în scopul creării unui produs scalabil. Adică, s-a urmărit crearea posibilității reutilizării informației și de către alte unități de control, nu neapărat doar cele aferente transmisiei automate.

Gradul de noutate și valoarea științifică sunt consolidate prin îndeplinirea **obiectivelor trasate** la început. Se pot defini următoarele rezultate:

- s-a definit o procedură completă de dezvoltare ce implică un produs cu siguranță funcțională ridicată
- s-au definit și validat arhitecturi noi ce corespund cerințelor de siguranță din automotive cu particularități specifice pentru sistemul de alimentare (12V și 48V)
- s-au definit proceduri generice de evaluare termică și a duratei de viață a componentelor în contextual cerințelor de siguranță sporită.

## Perspective de dezvoltare ulterioară

Concretizarea tuturor acestor arhitecturi îmbunătățite și a procedurilor de proiectare propuse în prezenta cercetare reprezintă un argument solid de utilizare în proiectarea viitoare a unităților electronice de control al transmisiei automate și nu numai, întrucât necesită doar o adaptare pentru specificul aplicației. Cum domeniul automotive este însă în plină dezvoltare, la fel și proiectarea hardware trebuie să urmeze același trend. Astfel, se subliniază încă o dată importanța de a avea arhitecturi concept și proceduri bine-definite. Plecând de la procesul de proiectare prezentat în cadrul tezei pentru unități TCU alimentate clasic (12V) și pentru unități TCU hibride (48V), se poate extinde cercetarea către noi produse din domeniul automotive. Ca tendință majoră actualmente este tranziția către produsele aferente mobilității complet electrice datorate electrificării autovehiculelor.

**Procesul de electrificare** este unul de-a dreptul revoluționar pentru această industrie cuprinzând toate segmentele de dezvoltare: de la componente, unități electronice de control și până la autovehicule. În toate cele trei arii există necesitatea inovațiilor tehnologice, iar piața concurențială favorizează o dezvoltare cât mai rapidă. Nu numai concurența, ci și reglementările internaționale au forțat producătorii să inoveze. Dacă în perioada 2015-2020 s-au dezvoltat îndeosebi produse aferente arhitecturii clasice și hibride, perioada 2020 – 2025 pune accent pe unități electronice aferente arhitecturii complet electrice.

Urmărind acest trend, se prevăd tendințe tehnologice care vor influența complet proiectarea, deoarece acum bateriile autovehiculelor au tensiuni de alimentare de ordinul sutelor de volți: 400V, 800V. Cerințele și reglementările mai stricte pentru astfel de valori ale tensiunilor de alimentare obligă practic industria să exploreze topologii, componente și materiale complet noi. Practic, electronica de putere va domina această piață, de unde și nevoia apariției de componente electronice specifice, precum sunt **tranzistoare semiconductoare de putere de tip bandă interzisă largă: Wide Band Gap**. Introducerea componentelor noi, precum și definirea de concepte noi de alimentare pentru unitățile de control vor fi surse de studiu pentru cercetări viitoare.

Plecând de la procedurile de proiectare prezentate în cadrul acestei teze, dar abordând tehnologia nouă pentru produse aferente electrificării, se pot crea perspective de dezvoltare ulterioară. Propun ca procesul viitor de dezvoltare a unei unități electronice de control să se supună unui “V cycle” ușor modificat pentru a accentua **agilitatea** și perspicacitatea. Dacă dezvoltarea agilă se implementează foarte mult în dezvoltarea software, pentru proiectarea hardware încă nu e resimțită și e un punct de plecare oportun pentru produse complet noi.

## Bibliografie selectivă

- [1] R. K. Jurgen, "Electric and Hybrid-Electric Vehicles - Overviews and Viewpoints", SAE International, USA, 2011
- [2] P. D. Walker, B. Zhu and N. Zhang, "Powertrain dynamics and control of a two speed dual clutch transmission for electric vehicles", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 85, pp. 1-15, 2017
- [3] Continental AG, R. Stark, "Innovative Technologies for Transmission Control Units", Schaeffler Symposium 2010
- [4] **D.R. Biba**, M.C Ancuti, A. Ianovici, C. Sorandaru and S.Musuroi, "Power Supply Platform and Functional Safety Concept Proposals for a Powertrain Transmission Electronic Control Unit", *Electronics*, 9(10) 1580, 2020 <https://doi.org/10.3390/electronics9101580>
- [5] P. Kilian, et al., "Emergency Operation in the Power Supply Domain According to ISO26262", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 47557-47569, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3170903
- [6] A. N. Lokanathan and J. B. Brockman, "Efficient worst case analysis of integrated circuits" *Proceedings of the IEEE 1995 Custom Integrated Circuits Conference*, Santa Clara, CA, USA, 1995, pp. 237-240, doi: 10.1109/CICC.1995.518176
- [7] F. Prutianu, V. Popescu and P. C. Ioana Monica, "Validation system for power supply module part of automotive ECUs", 2012 10th International Symposium on Electronics and Telecommunications, Timisoara, Romania, 2012, pp. 75-78, doi: 10.1109/ISETC.2012.6408069
- [8] "48-volt mild hybrid applications and developments", *Automotive 48-volt Technology*, SAE, 2016, pp.19-27
- [9] **D.R. Biba**, S. Muşuroi and M. Svoboda, "Powertrain 48V Power Supply Proposal and Safety Validation Voltage Levels for BLDC Motor Driver ASIC", 2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, Romania, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICATE.2018.8551470
- [10] S. Hayslett, K. Van Maanen, W. Wenzel and T. Husain, "The 48-V Mild Hybrid: Benefits, Motivation, and the Future Outlook", *IEEE Electrification Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 11-17, June 2020, doi: 10.1109/MELE.2020.2985481
- [11] S. Saponara, P. Tisserand, P. Chassard and D. -M. Ton, "Design and Measurement of Integrated Converters for Belt-Driven Starter-Generator in 48 V Micro/Mild Hybrid Vehicles", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 4, pp. 3936-3949, July-Aug. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2687406
- [12] F. A. d. Silva, A. C. Bagbaba, S. Hamdioui and C. Sauer, "Efficient Methodology for ISO26262 Functional Safety Verification," 2019 IEEE 25th International Symposium on On-Line Testing and Robust System Design (IOLTS), Rhodes, Greece, 2019, pp. 255-256, doi: 10.1109/IOLTS.2019.8854449
- [13] G. Juez, et al., "Safety assessment of automated vehicle functions by simulation-based fault injection," 2017 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), Vienna, Austria, 2017, pp. 214-219, doi: 10.1109/ICVES.2017.7991928
- [14] N. Vichare, and M.G. Pecht, "Prognostics and Health Management of Electronics," *IEEE Transation. on Components and Packaging Technologies*, Vol. 29, No. 1, March 2006, pp. 222–229
- [15] **D.R. Biba**, C. Sorândaru, C. Ancuți and S. Muşuroi, "An Experimental Study of Temperature Influence for A Gate Driver and Power MOSFETS Used in A 48v Transmission Control Unit for A BLDC Actuator Control," 2019 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM), Timisoara, Romania, 2019, pp. 104-108, doi: 10.1109/CIEM46456.2019.8937630
- [16] D.-L. Blackburn, "Temperature measurements of semiconductor devices-A review", *Proceedings 20th Annu. Semicond. Therm. Meas. Manage. Symp*, pp. 70-80, Mar. 11–24, 2004
- [17] **D.R. Biba**, S. Musuroi and M. Svoboda, "A new approach to lifetime and loading stress level estimation for Multilayer Ceramic Capacitors in Electronic Control Units", 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), Brasov, Romania, 2017, pp. 37-42, doi: 10.1109/OPTIM.2017.7974944
- [18] N. Vichare and M.G. Pecht, "Prognostics and Health Management of Electronics," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 29, No. 1, March 2006, pp. 222–229.
- [19] R-W Johnson, "The Changing Automotive Environment: High-temperature Electronics", *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Volume: 27, Issue: 3, pp 164-176, July 2004
- [20] NASA, "Reliability of Multilayer Ceramic Capacitors with Base-Metal Electrodes", *EEE Parts Bulletin*, April/May 2013, Volume 5, Issue 2 (Published since 2009)
- [21] L.A Escobar and W.Q Meeker, "Review of Accelerated Test Models", *Statistical Science*, 2006, Vol. 21, No. 4, 552–577, DOI: 10.1214/088342306000000321
- [22] JEITA Standard RCR-2335-C, "Calculation of estimated lifetime and estimated failure", Annex F, p. 78, Tokyo, Revised in March 2014