



UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” din BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ ETTI-B

Nr. Decizie din

TEZĂ DE DOCTORAT

Electric Heated Catalyst Controller Design for Automotive Emission Control - Summary -

Doctorand: **Ing. Dipl Kotlar Aurelian-Claudiu**

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. Dr. Ing. Gheorghe Brezeanu	de la	Univ. Politehnica București
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Ing. Paul Svasta	de la	Univ. Politehnica București
Referent	Prof.Dr.ing. Dan Lascu	de la	Univ. Politehnica din Timisoara
Referent	Prof.dr.ing. Dorin Marius Petreus	de la	Univ. Tehnica Cluj-Napoca
Referent	Prof.dr.ing. Alexandru Vasile	de la	Univ. Politehnica București

BUCUREȘTI 2021

Cuvant inainte

Acesta este un rezumat al tezei mele de doctorat. Teza este scrisa in limba engleza. Traducerea unor expresii nu se regasesc direct in limba romana. Pentru clarificarea unor notiuni, cititorul este rugat sa consulte Teza de doctorat. Acest rezumat urmareste structura si capitolele din teza. Pentru a asigura coerenta rezumatului, apar aici doar numele capitolelor si ale subcapitolelor. Acronimele folosite in acest rezumat nu sunt explicate. In cadrul tezei este prezenta o sectiune in care sunt descrise toate acronimele folosite. Numarul figurilor este pastrat ca si in teza. Doar o parte din referintele bibliografice sunt trecute in acest document. Lista completa este disponibila in teza.

Capitolul 1

Introducere

1.1 Introduction

Cresterea industriei automotivе din lumea intreaga a facut ca automobilele sa devina un important factor poluator.

Gazele de esapament contin diverse tipuri de poluanti, care au un puternic impact in mediul inconjurator. CO₂ este un gaz cu efect de sera. Se estimeaza ca circa 20% din emisiile de CO₂ din Uniunea Europeana provin de la vehicule. [1.1]. Monoxidul de carbon este un gaz foarte toxic. Este estimat ca 52% din emisiile de CO sunt generate de vehicule [1.2]. Gazele NO_x sunt oxizi de azot care sunt deoportriva toxici pentru oameni, si pot cauza ploii acide. In Statele Unite, majoritatea poluarii cu gazeNO_x este produsa de vehicule [1.3]. Particulele emise de masini au un efect nociv asupra sanatatii oamenilor. Aproximativ 2% din poluarea cu particule in Statele Unite provin de la masini, majoritatea Diesel.

Avand in vedere impactul industriei automotivе ca si poluator, guvernele din toata lumea au inceput sa defineasca standarde de emisii pentru masini.

Standardele de emisii sunte cerinte legale definite de guvernele din lumea intreaga pentru a limita poluarea aerului.

1.2 Controlul emisiilor

Institutiile de guvernament din toata lumea definesc atat limitele de emisii ce trebuie indeplinite de masinile noi, cat si procedurile de testare pentru a masura aceste emisii. In Europa acestea sunt reglementare prin directive EEC. In Statele Unite, acestea sunt reglmentate de Environmental Protection Agency.

In special pentru motoarele Diesel, sistemele de evacuare au atins un nivel ridicat de complexitate. In acest caz exista o unitate speciala de control pentru managementul emisiilor.

Pentru a diminua emisiile, se pulverizeaza uree in circuitul de evacuare a motoarelor. Aceasta tehnica, impreuna cu catalizatoare specializate este folosita pentru a reduce emisiile. Catalizatorul functioneaza incepand cu o temperatura inalta, denumita temperatura de aprindere. Pentru a asigura aceasta functionarea corecta a catalizatorului, este necesar ca acesta sa atinga temperatura de aprindere. In mod normal, aceasta se intampla prin incalzirea catalizatorului de catre gazele de esapament. Pentru incalzirea acestuia mai rapida, se poate folosi un incalzitor electric.

1.3 Domeniul de cercetare

Domeniul de cercetare al acestei teze este controlul incalzitorului pentru catalizator.

In cadrul tezei este descris modul de operare al catalizatorului incalzit electric. Modurile de operare ale catalizatorului incalzit electric, impreuna cu nivelurile de putere necesare pentru a atinge limitele de emisii sunt definite la nivelul intregului sistem. Aceasta analiza de sistem nu face parte a actualei teze. Sarcina incalzitorului electric este analizata din punct de vedere constructiv si al parametrilor electrici.

Sunt analizate atat sistemele „legacy” de 12V, cat si sistemele mild hybrid cu tensiune de alimentare de 48V. Sunt discutate pe scurt si sistemele de tensiune mai mare de 60V. Aria de cercetare se concentreaza pe sistemele de control al incalzirii catalizatorului pentru masinile cu alimentare de 12V, cat si pe sistemele hybride de 48V. Este prezentata o analiza a solutiilor existente pe piata. Sunt discutate problemele care apar pe aceste sisteme.

In etapa urmatoare, sunt propuse implementari noi atat pentru sistemele auto cu alimentare de 12V, cat si pentru sistemele cu alimentare de 48V. Pentru fiecare solutie, rezultatele prezentare sunt partea de design / calcule, simulari electrice si termice, precum si modul de implementare si rezultatele masuratorilor obtinute.

Problemele aparute in implementare sunt analizate si discutate: impactul temperaturilor de functionare, modul de operare, impactul sistemului de alimentare, emisiile de radiofrecventa conduse, design-ul PCB-ului si partea de „electroniuc packaging”.

Capitolul 2

Legislatia in domeniul Automotiv

2.1 Istoria legislatiei in domeniul auto

Primele norme pentru emisiile gazelor de esapament ale masinilor au fost create in California in 1963, ca raspuns la problemele de mediu aparute in Los Angeles datorita traficului mare. Imediat dupa aceasta, alte state si-au creat propriile norme. In aceasta

teza se va discuta cu precadere despre normele din Europa, trecand scurt in revista normele din SUA[2.1]

Chiar daca fiecare regiune si tara ar putea sa aiba o ligislatie putin diferita pentru emisiile auto, un producator auto care vrea sa isi vand masinile in toata lumea trebuie sa poata sa respecte normele de emisii din fiecare tara.

In aceasta teza se va discuta cu precadere despre partea de vehicule de pasageri.

In Europa, setul de norme EURO a fost introdus incepand cu EURO 1 in 1992. Actual, norma EURO6 – rev B este aprobata, si aceasta reglementeaza cantitatile de CO, NOx, THC si particule pe care le poate emite un vehicul. Pentru a atinge aceste norme se folosesc mai multe tehnologii: Injectia multi-punct, Filtre de particule, injectie de uree combinata cu catalizatoare selective, precum si franare regenerativa pentru sistemele care contin o baterie de 48V. Se prevede ca in viitorul apropiat va aparea o noua norma de emisii – Euro 7, pentru care va fi nevoie de catalizator incalzit electric.

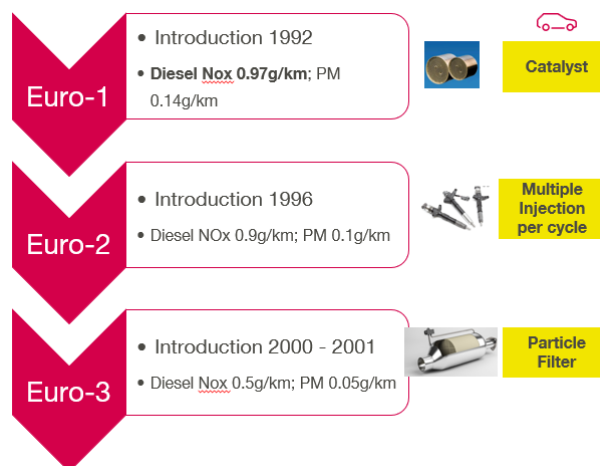


Figure 1 Euro 1- 3 emission control technologies

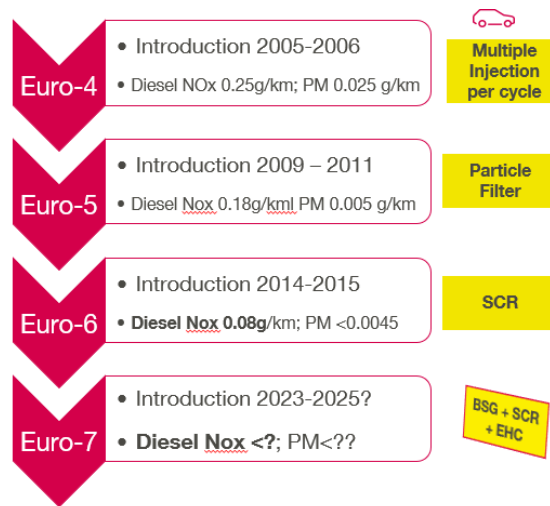


Figure 2 Euro 4- 7 emission control technologies

2.2 Solutii pentru a satisface legislatia de emisii auto - SCR

Pentru motoarele Diesel, injectia de uree combinata cu catalizatoare speciale este folosita pentru a converti Oxizii de azot (Nox) in gaze inerte - Azot N_2 , dioxid de carbon CO_2 si apa H_2O .

Schema generala a acestui sistem este prezentata in figura de mai jos.

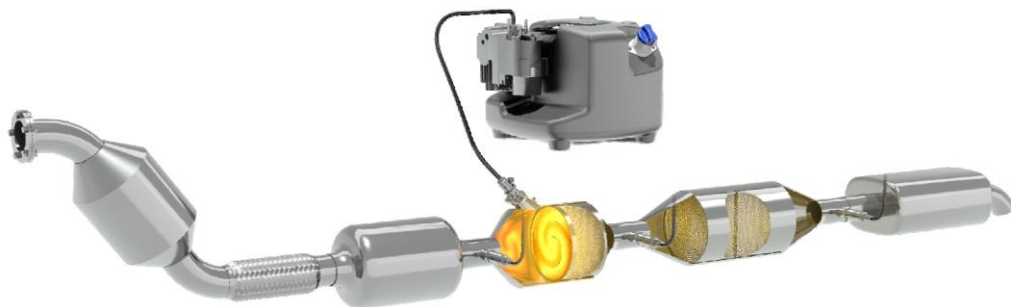


Figure 3 Selective Catalyst reduction system

Reactivul folosit pentru aceasta este Urea, cu numele comercial de AdBlue. Acest reactiv este tinut intr-un rezervor ce trebuie sa fie re-umplut periodic. O pompa scoate lichidul din rezervor si creeaza presiune in teava de alimentare pentru injector.

Injectorul este pozitionat chiar inainte de catalist.

Mai multi senzori sunt pozitionati de-a lungul intregului sistem, in asa fel incat reactia de reducere a Nox-elor sa fie controlata cat mai bine. Acesti senzori sunt: senzori de

temperatura înainte și după catalizator, senzori de NOx înainte și după catalizator, precum și senzori de presiune care pot să detecteze dacă filtrul de particule este infundat.

2.3 Soluții pentru a satisface legislația de emisii auto - EHC

Cum catalizatorul funcționează la o temperatură peste 200°C, sistemul de control al emisiilor nu este complet funcțional în perioadele tranzitorii care apar la pornirea motorului. Sistemul start-stop, care oprește motorul în timpul staționării la un semafor, scade și mai mult eficiența sistemului de control al emisiilor. Aceasta este datorită opririlor frecvente, care fac ca acesta să se răcească. Această problemă apare și la mașinile mild hybrid, care prin natura lor au o operare intermitentă a motorului cu combustie internă.

Pentru a compensa aceasta, un încălzitor electric este poziționat în fața catalizatorului, care să încălzească gazele de esapament. Acestea la rândul lor vor încălzi și mai mult corpul catalizatorului.



Figure 4 Continental Electrically Heated Catalyst (left) and implementation in a gasoline engine(right)

2.1 Soluții pentru a satisface legislația de emisii auto - BSG

Sistemul auto de alimentare la 48V este prezentat în detaliu în capitolul 4.

Un vehicul care conține o baterie de 48V este numit mild-hybrid. Scopul principal al introducerii tehnologiei de 48V este de a reduce emisiile de CO₂, prin recuperarea energiei de frânare, și re folosirea ei pentru pornirea motorului, accelerație și mersul la viteză constantă. În acest sistem se pot conecta sarcini de putere mare comparativ cu sistemul de 12V.

Un exemplu de asemenea sarcina este incalzitorul electric al catalizatorului. Figura de mai jos arata un exemplu de implementare pentru un motor Diesel. Incalzitorul electric este alimentat dintr-un circuit de comanda alimentat la tensiunea de 48V.

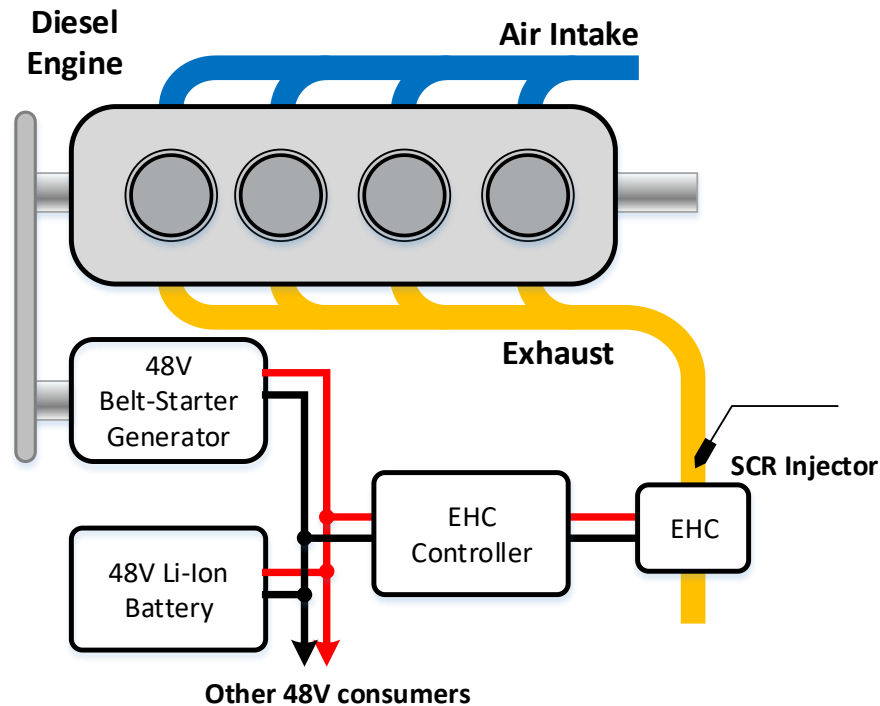


Figure 5 48V system used with EHC to reduce emissions

Pentru motoarele cu benzina, acelasi sistem este folosit, dar fara injectarea de AdBlue. Modul de operare al incalzitorului pentru catalizator este diferit fara de motoarele Diesel.

Capitolul 3

Definitia sarcinii si modul de operare al incalzitorului electric al catalizatorului

Exista mai multi producatori de catalizatori pentru masini, dar doar cativa dintre ei ofera posibilitatea de a avea incalzirea electrica. Sunt si mai putini aceia care sunt pregatiti de a avea o productie in masa pentru acesti catalizatori incalziti electric.

3.2 Sarcina incalzitorului catalizatorului incalzit electric

Incalzitorul electric de la Emitec este construit dintr-o foita de metal sub forma unui carton ondulat, care este infasurat intr-o forma spiralata. Pini de izolare din ceramica fixeaza aceasta spirala in grilajul catalizatorului. Acesti pini au si rolul de a izola incalzitorul rezistiv de partea metalica a catalizatorului.



Figure 6 Emitec EHC build cross-section [3.2] and cut-out [3.1]

In sistemele de 12V este obisnuit de a avea un singur contact pentru partea pozitiva a sarcinii, in timp ce cealalta parte este conectata la sasiul masinii.

Pentru sistemele de 48V, aceasta nu mai este acceptabil, datorita a doi factori importanti. Primul factor este caderea de tensiune care apare pe calea de teava de esapament – motor – sasiu – baterie. Aceasta poate sa impactioneze masuratorile de senzori pozitionati pe motor, si conectate la masa motorului. Al doilea factor este acela ca in caz de defectiune la legatura dintre masa motorului si masa sasiului, intreaga tensiune de pe bateria de 48V va ajunge la unitatea calculator de motor, ceea ce va duce la o defectiune catastrofica. Din aceasta cauza, EHC pentru 48V este alimentat prin 2 pini, ambii pini precum si rezistenta fiind izolati fata de carcasa catalizatorului.

Incalzitorul electric este o sarcina rezistiva, cu un coeficient termic foarte mic. Aceasta este datorita materialului utilizat pentru fabricarea incalzitorului. Parametrii care influenteaza toleranta rezistentei sunt in general variatia grosimii si a latimii foliei de metal din care acesta este facut. Variatia schimbarii temperaturii incalzitorului are de asemenea un impact in rezistenta acestuia. (factorul alfa-prime)

Operarea incalzitorului catalizatorului trebuie facuta in asa fel incat acesta sa nu depaseasca temperatura de 1000°C.

3.3 Modurile de operare ale EHC

Scopul principal al incalzitorului catalizatorului este mentinerea acestuia peste temperatura de aprindere. Modul de operare este diferit intre motoarele Diesel si pe Benzina. Depinde de asemenea de parametrii sistemului in care functioneaza: temperatura gazelor de esapament, debitul gazelor, temperatura exterioara, viteza vehicolului (vantul exterior).

La motoarele pe benzina, temperatura gazelor de esapament este mai mare, iar odata ce catalizatorul a atins temperatura de aprindere, incalzitorul nu mai trebuie sa functioneze pana cand se opreste motorul.

La motoarele diesel, temperatura gazelor de esapament este mai joasa, si se poate intampla ca in timpul rularii sa scada temperatura catalizatorului sub temperatura de arindere. In acest caz, este necesara incalzirea electrica suplimentara a catalizatorului.

In unele cazuri, pentru motoarele diesel, puterea necesara pentru a incalzi catalizatorul poate sa fie pana la 4kW pentru o perioada de 100s. Odata incalzit, nu mai este nevoie de o putere asa de mare. Pentru a mentine temperatura catalizatorului in conditiile cele mai nefavorabile, este cerut un nivel de putere de pana la 1kW, pentru o durata nedefinita..

Incalzirea electrica a catalizatorului este deosebit de importanta pentru masinile hibride si cele echipate cu functia de start-stop. Incalzirea electrica este necesara pentru a compensa racirea catalizatorului in timpul cand motorul este oprit. Aceasta este necsara indiferent de tipul de motor – pe benzina sau diesel.

Capitolul 4

Nivelele de tensiune folosite in

Automotive

Standardul de facto pentru alimentarea in vehiculele auto este nivelul de tensiune de 12V. Sistemul de alimentare cu 12V al masinilor este bine inteles, si exista cateva standarde ISO [4.1] care specifica mediul electric, precum si pulsurile care pot sa apara in acesta.

In ultimii ani, au aparut si alte sisteme care functioneaza in paralel cu sistemul clasic de 12V. Sistemul de 48V apare tot mai des in vehiculele mild hybrid. Standardul VDA320 defineste mediul electric al sistemului de 48V, precum si pulsurile care ar putea sa apara.

Automobilele hibride pot avea baterii de tensiune mare¹ (tensiune mai mare de 60V), ce poate sa ajunga pana la 800V. Pentru aceste sisteme, pe langa mediul electric este necesar sa fie considerat si siguranta la electrocutare.

In acest capitol se face o prezentare generala a sistemelor automotiv cu tensiuni de 12V si de 48V. Foarte pe scurt este prezentata si operarea sistemelor cu tensiuni mari.

4.1 12V Automotive

Sistemul clasic de alimentare cu energie pentru masini este cel cu baterie de 12V. Acesta foloseste o baterie cu plumb, reincarcabila, ce poate sa alimenteze cu curent electric masina. Scopul principal al bateriei este sa porneasca motorul cu ardere interna. Odata acesta pornit, energia necesara masinii este generata de alternator. In mod curent, mai putin de 3% din energia totala a bateriei este necesara pentru pornirea motorului cu ardere interna. Bateriile sunt proiectate ca sa poata furniza un curent mare pentru o scurta durata de timp.

Chiar daca bateria furnizeaza o tensiune stabila, din cauza firelor de alimentare si a diferitelor sarcini care se cupleaza si decupleaza, tensiunea care ajunge la un consumator nu este stabila. De exemplu, tensiunea de alimentare a unui consumator poate sa fluctueze intre 2 si 28V. Dintr-o eroare, poate sa apara o inversare a polilor bateriei. Pot sa apara pulsuri de tensiune intre +/-200V pe linia de alimentare.

Diagrama blocului pentru sistemul standard de 12V este prezentata in figura de mai jos.

¹ In industria automotiv termenul de tensiune mare (High Voltage) se refera la tensiuni mai mari de 60V. Acestea sunt definite ca si "Voltage class B" in standardul LV123.

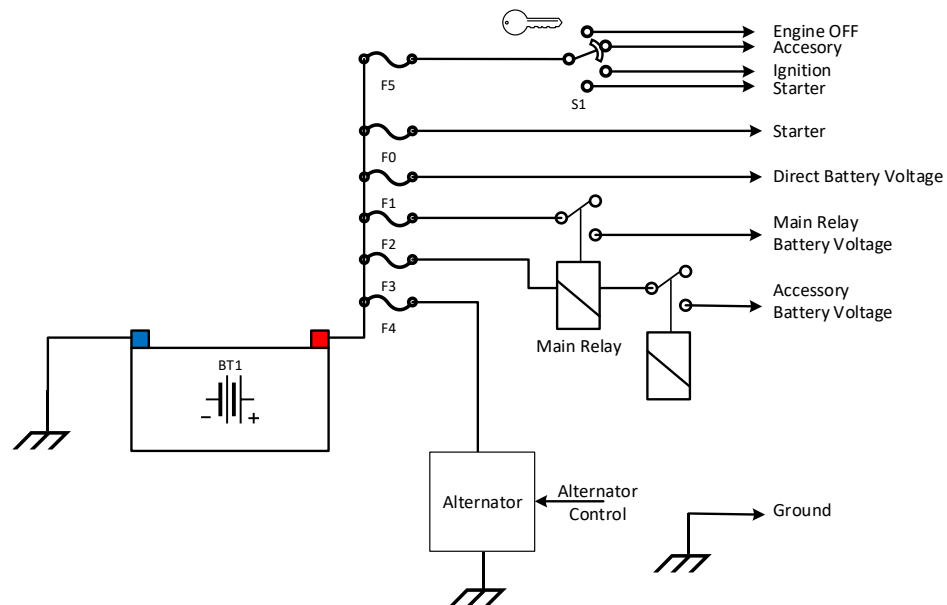


Figure 7 Legacy automotive 12V supply system

Majoritatea subsistemelor electrice sunt alimentate prin contactul unui releu principal, astfel ca vor fi alimentate doar atunci cand motorul functioneaza. Unele subsisteme trebuie sa fie alimentate tot timpul (de ex. Alarma de securitate, sistemele de acces, precum si alte functii avansate). In general, un dispozitiv direct la alimentarea bateriei trebuie sa aiba un curent static in timpul modului „sleep” mai mic de $100\mu\text{A}$.

Sistemele de Start-stop opresc functionarea motorului atunci cand masina este oprita. Atunci cand ambreiajul este apasat, motorul se porneste din nou. Bateria necesara pentru aceste sisteme trebuie sa reziste atat la un numar mai mare de cicluri de pornire, cat si ca sa alimenteze sistemele electrice atunci cand motorul este oprit.

Exista mai multe standarde ISO care definesc pulsurile ce pot sa apara pe alimentarea sistemului de 12V pentru un dispozitiv conectat la acesta. Ex. ISO16750, ISO7637-2. In plus, fiecare producator de masina are propriile lui derivate din aceste standarde, unde adauga experientele individuale (LV124 pentru producatorii Germani, Renault, Ford FMC1278, GM, ...). Un dispozitiv electronic conectat la 12V trebuie sa treaca de un set de teste descrise intr-un plan de calificare, care corespunde acestor standarde. In teza este facuta o descriere detaliata a acestor pulsuri.

4.2 48V mild hybrid

Vehiculele mai noi folosesc o baterie aditionala de 48V. Avantajul principal al acestui sistem este acela ca se pot reduce si mai mult emisiile de dioxid de carbon, prin recuperarea energiei in timpul franarii si re folosirea acesteia pentru re-pornire, acceleratie sau cruising.

Diagrama blocului pentru sistemul de 48V este prezentata in figura de mai jos.

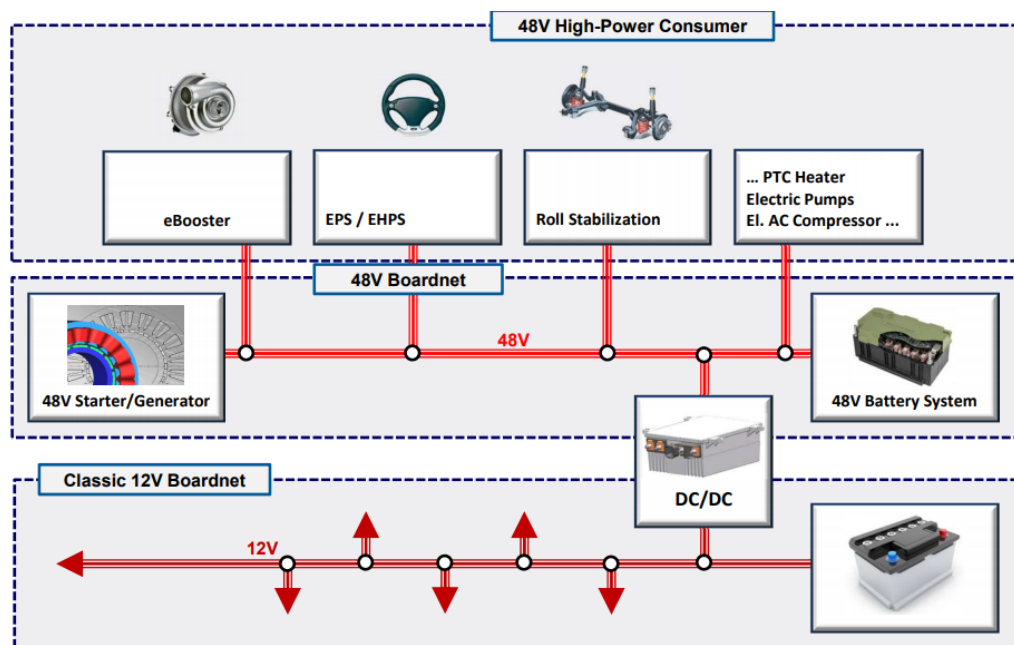


Figure 8 vehicle power architecture for 48V systems [4.7]

In centrul sistemului este bateria de 48V, cu Litiu. Un convertor DC/DC bi-direcional face legatura intre cele doua sisteme de stocare a energiei – 12V si 48V. Systemul permite recuperarea energiei in timpul franarii, cu ajutorul unei masini electrice.

Starter-Generator-ul actionat pe curea (BSG) este una dintre posibilitatile ce pot fi folosite pentru acet sistem. Acesta se dovedeste a fi cea mai ieftina si eficienta solutie de a integra un motor electric intr-un vehicul. BSG-ul se poate monta in locul alternatorului existent, iar un ambreiaj comandat poate sa cupleze si sa decupleze axul BSG-ului la motorul cu combustie interna.

Un convertor DC/DC bidirecional face legatura intre cele 2 baterii. Cu ajutorul acestuia se poate misca energia intre cele 2 sisteme.

In mediul electric de 48V, sunt definite un set de pulsuri posibile si niveluri de tensiune ce pot sa apara pentru un dispozitiv conectat la acesta. Standardul VDA320 [4.13] defineste cerintele si condiriile de test ce trebuie sa fie indeplinite de dispozitivele conectate la acest sistem. In teza este facuta o descriere detaliata a acestor pulsuri.

4.3 Circuite electronice pentru tensiuni mari² (Voltage class B)

Masinile „plug-in hybrid” ce au tensiuni ale bateriei mai mari de 60V DC, au atat avantajul unei autonomii mai mari date de motorul cu ardere interna, cat si posibilitatea de a functiona fara poluare cu ajutorul motorului electric.

Automobilele hibride cu motoare cu ardere interna necesita un catalizator pentru a indeplini normele de emisii viitoare. Pentru a incalzi acest catalizator, este nevoie de un convertor DC-DC izolat. In aceasta teza nu se discuta acest tip de control pentru catalizatorul incalzit electric.

4.4 Cerinte pentru interferentele Electro-magnetice

Compatibilitatea electro-magnetica este un aspect foarte important care trebuie luat in calcul in momentul proiectarii unui produs electronic. Atat partea de emisii cat si partea de interferente sunt reglementate de standarde internationale, precum CISPR25.

Spectrul de interferente electromagnetice poate sa varieze de la unde medii (e.g., zgomot de la sursele de alimentare in comutatie, tensiunile joase de alimentare, amplificatoare), pana la unde ultra-scurte (interferente radio, semnale de comunicatie) si unde milimetrice (telefonie GSM, semnale Radar).

Compatibilitatea electro-magnetica trebuie sa fie analizata atat la nivel de componenta, cat si la nivel de vehicol. O descriere detaliata a procedurilor de testare pentru testele de emisii la nivel de componenta este descrisa in Teza.

² In industria automotiva termenul de tensiune mare (High Voltage) se refera la tensiuni mai mari de 60V. Acestea sunt definite ca si “Voltage class B” in standardul LV123.

Capitolul 5

Circuite electronice pentru controlul incalzitorului electric catalitic

In acest capitol sunt prezentate mai multe solutii pentru controlul incalzitorului electric catalitic, atat pentru sistemele de 12V, cat si pentru sistemele de 48V. Pentru sistemele de 12V, este prezentata starea curenta a tehnicii. Acest capitol contine contributiile mele individuale in aria controllerelor pentru incalzitorului electric catalitic.

5.1 Controlere pentru sistemele de 12V

Primele referinte pentru controlul incalzirii electrice a catalizatorului se pot gasi in patentele producatorilor din Statele Unite si Japonia din anii 90. Solutiile propuse la acel moment erau sau modificarea circuitului alternatorului, sau folosirea unui releu prin care se putea cupla sau decupla rezistenta catalizatorului. Curentul necesar pentru incalzirea catalizatorului este in gama de 100A, la o putere de cativa kW.

Primele solutii nu considerau protectia circuitului si capacitatea de incalzire a acestuia. O potentiala avarie a sistemului (de ex. Scurt-circuit al firelor de alimentare, scurt-circuit in circuitul de control) ar putea sa cauzeze ca vehicolul sa ia foc. In cel mai bun caz, circuitul de control era protejat de o siguranta. Totusi, la curenti asa de mari aceasta s-ar putea sa nu fie suficient, si s-ar putea ajunge ca firele de alimentare sau bateria sa fie supra-stresate.

Este prezentata o alta implementare, in care controlul este facut cu ajutorul semiconductorilor, cu posibilitati mai mari de control. Principalul dezavantaj al implementarii prezentate este lipsa posibilitatilor de diagnoza,

O noua solutie pentru controlul incalzitorului de catalizator este prezentata, in care aceste dezavantaje sunt solutionate. Diagrama de sistem este prezentata in figura de mai jos. Algoritmul de control este implementat in calculatorul de motor, si urmareste controlul puterii si furnizarea echilibrata a energiei intre baterie si alternator. Circuitul de control pentru incalzirea electrica a catalizatorului are functia de a activa sarcina si de a efectua partea de diagnoza.

Electric Heated Catalyst Controller Design for Automotive Emission Control

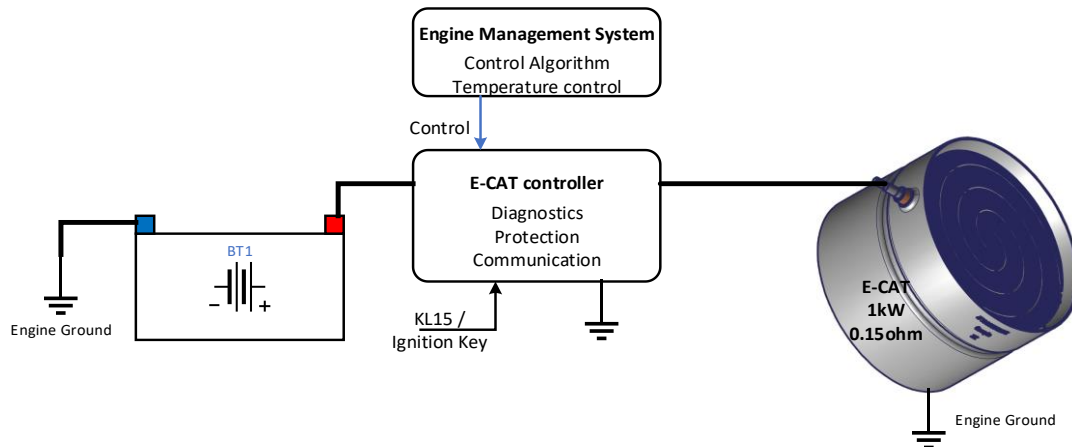


Figure 9 E-CAT system overview

Pentru inceput, cerintele circuitului sunt clar definite. Acestea constau din parametrii electrici, circuitele de control, protectia la avarii si diagnoza, auto-diagnoza circuitului, si mediul de operare.

Diagrama bloc al circuitului de control pentru incalzirea catalizatorului este prezentata in figura de mai jos.

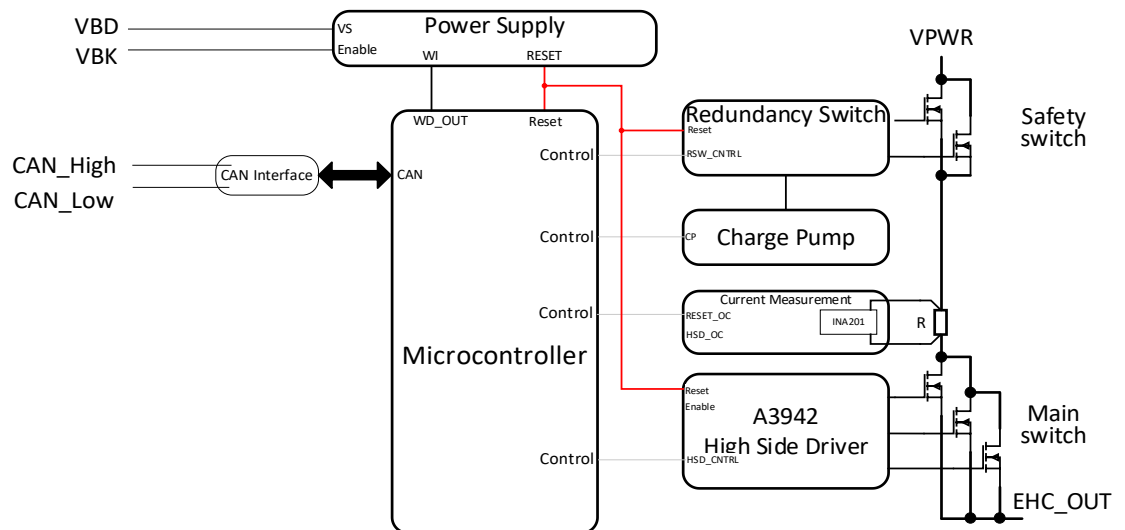


Figure 10 E-CAT controller

Circuitul este construit in jurul unui microcontroller, care controleaza un set de tranzistoare MOS: un switch redundant pentru siguranta circuitului, si un switch principal. Tensiunea si curentul de la iesirea circuitului sunt masurate pentru a asigura diagnoza circuitului. In cazul in care unul dintre switch-uri se defecteaza in modul scurt-circuit, celalalt switch poate sa intrerupa circuitul in siguranta. In mod normal, switch-ul de siguranta este conectat in mod continuu, in timp ce switch-ul principal este folosit pentru controlul PWM.

Electric Heated Catalyst Controller Design for Automotive Emission Control

Pentru a evalua fezabilitatea design-ului, se efectueaza un calcul de putere disipata si o simulare termica. Sunt considerate doua scenarii, si disiparea de putere pentru componentele principale este calculata bazat pe conditiile de operare si specificatiile componentelor. Puterea totala disipata de unitate a fost calculata la 13.9W.

Design-ul carcusei circuitului este facut dintr-o carcasa de plastic, in care se monteaza PCB-ul, iar pe partea de jos este un radiator format dintr-o tabla ambutisata. Acesta este prezentat in figura de mai jos.

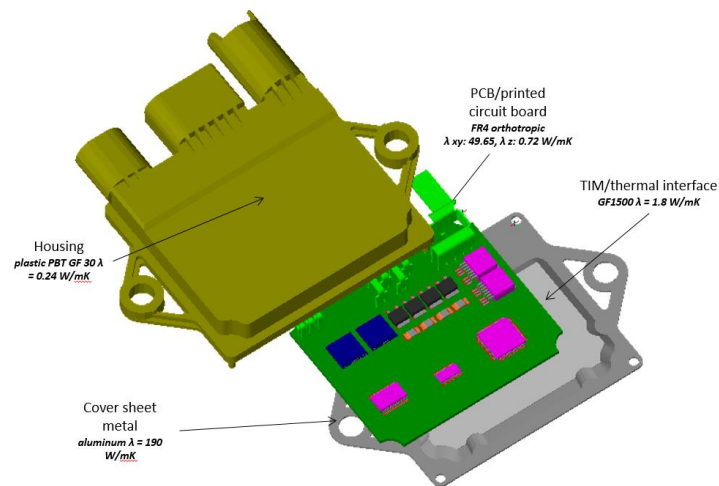


Figure 11 Thermal simulation model

Pentru a rula o simulare termica, este necesar de a fi cunoscute conditiile de operare, modelul mecanic si puterea disipata. Simularea termica este rulata folosind programul de simulare Ansys. Rezultatele obtinute arata ca designul considerat este fezabil.

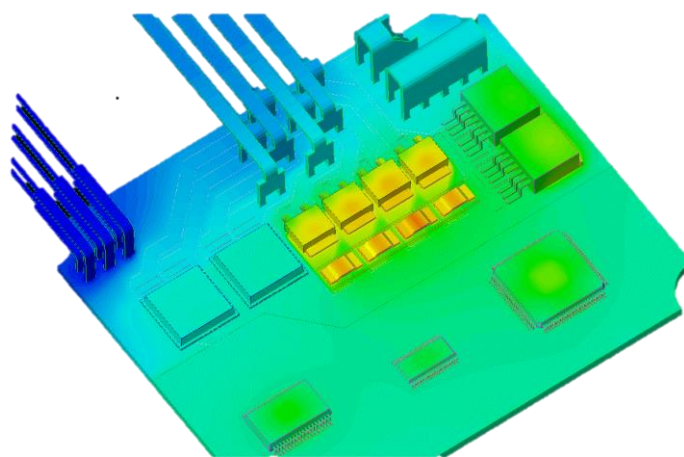


Figure 12 Thermal simulation for E-CAT1 controller, scenario 1

Dupa acest pas, se prezinta modul de design al fiecarui subcircuit.

Circuitul pentru switch-ului de siguranta este bazat pe doua tranzistore MOS de tipu AUIRF1324S-7P. Acestea sunt comandate de un circuit de tip push-pull alimentat de la un circuit de charge pump. In cazul in care tensiunea de control scade sub un

anumit nivel, tranzistoarele sunt oprite pentru a preintampina trecerea acestora in modul de lucru liniar.

Circuitul de masura de curent si protectie detecteaza un supracurent ce trece printr-o rezistenta pentru masurarea curentului. Circuitul INA201 este folosit pentru a masura curentul prin aceasta. Design-ul rezistentei de masura a curentului este facuta astfel incat puterea disipata de aceasta sa fie limitata, dar trebuie asigurata o cadere de tensiune suficient de mare pentru ca amplificatorul operational sa o poata detecta. Rezistenta finala este compusa din trei rezistente a cate $1\text{m}\Omega$ fiecare. Pentru a minimiza erorile de masuratoare, se foloseste o pozitionare speciala a componentelor pe PCB. Eroarea totala de masura a curentului este calculata a fi intre $+6.08\%$ - 6.04% la 100A.

Switch-ul principal este format din trei tranzistore, deoarece aceste tranzistoare opereaza in regim PWM. Aceasta inseamna ca aceste tranzistoare va cadea aditional si puterea disipata in regim tranzitoriu de switching. Circuitul A3942 este folosit pentru a comanda aceste tranzistoare.

O analiza este facuta pentru a demonstra ca toate componentele pot sa reziste in cazul unei avarii precum prezenta unui scurt-circuit la iesire. Pentru a calcula durata pulsului de scurt-circuit sunt considerate atat sarcina cea mai defavorabila (echivalentul a 1metru de cablu de cupru cu sectiunea de 50mm^2), ca si timpul de reactie pentru protectia la scurt-circuit. Curentul prin circuit va creste pana la 176.2A pana la momentul cand curentul prin circuit va fi intrerupt. Este aratat ca toate componentele pot sa reziste la acest puls de scurt-circuit.

Mai departe este descris modul in care este facut Layout-ul pentru circuitul complet. S-au lut precautii pentru a asigura ca curgerea curentului mare este cat mai neteda. Layout-ul este integrat apoi intr-o carcasa pentru intregul ansamblu.

Odata unitatea de control construita, se fac o serie de teste pentru a dovedi functionalitatea acesteia. Testele electronice arata ca performantele circuitului sunt conform cerintelor initiale. Mai multe detalii despre acestea sunt prezente in teza, cu tot cu poze de osciloscop cu operarea in regim nominal, precum si caracteristicile de pornire si oprire. Pentru a verifica incalzirea produsului, se fac masuratori termice. Acestea confirma simularile termice de la inceputul acestui design, precum si capabilitatile acestui design.

La sfarsitul acestui subcapitol, sunt prezentate doua idei de imbunatatire. Prima imbunatatire este de a folosi comunicarea pe linia de alimentare pentru unitatea de control [5.20]. Prin aceasta se pot reduce numarul de conectori, scazand in acest fel costul produsului. A doua imbunatatire se refera la modul de racire a componentelor SMD. Se propune racirea componentelor SMD prin PCB, astfel incat radiatorul de metal este extins printr-o gaura din PCB in asa fel incat se imbunatateste contactul

termic cu componenta ce necesita racire. In acest fel se poate imbunatati transferul termic.

Acest subcapitol se termina cu o vedere de ansamblu a contributiilor mele personale.

5.2 For 48V systems / mild hybrid – Switch

La ora actuala (2021) nu exista pe piata solutii pentru controlul electric al incalzirii catalizatorului pentru sistemele de 48V. Marele avantaj al sistemelor de 48V este ca se pot folosi puteri mai mari pentru incalzirea rezistentei, scazand in acest mod timpul in care catalizatorul ajunge la temperatura de aprindere. Aceasta duce la randul ei la scaderea emisiilor.

Mai departe este analizata functionarea switch-ului. Din cauza gamei largi de tensiuni posibile in sistemul de 48V (in modul de functionare de la 36V la 52V, asa cum este specificat in VDA320), puterea livrata variaza foarte mult, de la 3.2kW la 7.29kW, curnetul instantaneu varind intre 90A si 135A.

Sunt analizate problemele asociate cu aceasta solutie. Activarea si dezactivarea switch-ului produce pulsuri tranzitorii pe linia de alimentare, ce ar putea sa fie in afara limitelor specificate in standardul VDA320. Este nevoie de o pornire si oprire graduala a switch-ului de comutatie, inasa in acest caz energia disipata pe elementul de comutatie este extrem de mare (calculata pana la 100 Jouli, pentru 100ms) Alta problema asociata cu aceasta solutie este aceea ca in cazul in care bateria de 48V este la un nivel scazut, BSG-ul trebuie sa incarce aceasta baterie. Orice sarcina suplimentara de putere mare ce este conectata / deconectata in acest caz va avea un impact direct in modificarea cuplului generat de motorul cu combustie interna. Aceasta poate sa aiba un impact in viteza, accelerarea si decelerarea masinii, lucru ce nu este dezirabil. In cazul in care se foloseste comanda prin PWM, aceasta poate sa impactioneze durata de viata a bateriei.

Ca si concluzie, este nevoie de un dispozitiv care sa porneasca si sa opreasca incalzitorul electric cu o viteza controlata.

Prima idee prezentata este aceea de a controla incalzitorul electric al catalizatorului cu un convertor DC/DC. Schema block a solutiei propuse este prezentata in figura de mai jos.

Electric Heated Catalyst Controller Design for Automotive Emission Control

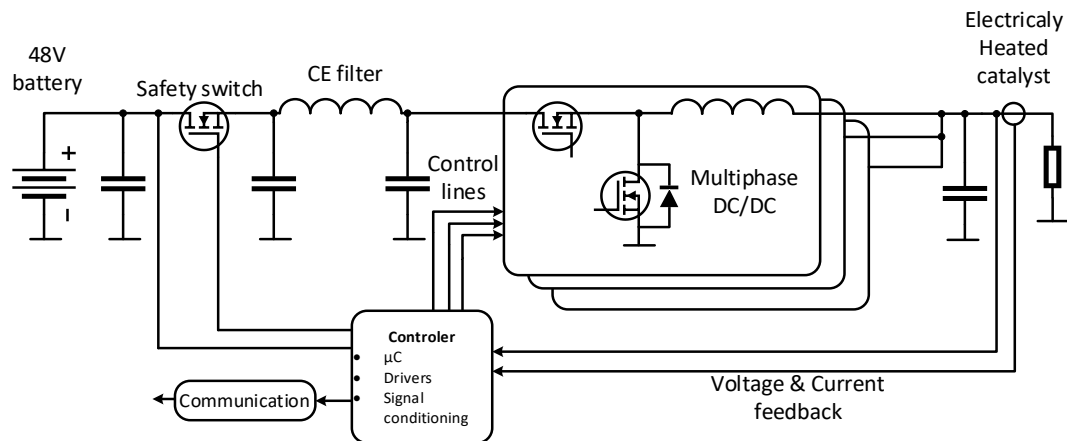


Figure 13 Controlling the EHC through a multi-phase DC/DC converter

Sistemul contine un switch de siguranta, similar ca si functionalitate cu ce a fost prezentat pentru sistemul de 12V. Un filtru de emisii conduse este necesar ca sa reduca zgomotul produs de comutatia convertorului DC/DC. Convertorul DC/DC multi-faza va modula puterea necesara pentru incalzitorul electric al catalizatorului, astfel incat tranzitiile din timpul pornirii si opririi vor fi facute lin.

Acest sistem are dezavantajul ca, chiar si cu o eficienta mare a convertorului DC/DC, puterea pierduta in timpul puterii maxime poate sa fie substantiala, aceasta ajungand pana la 160W.

Pentru a compensa aceasta, este prezentata o alta idee, in care se adauga un switch in paralel cu convertorul DC / DC. Schema block a acestui circuit este prezentata mai jos.

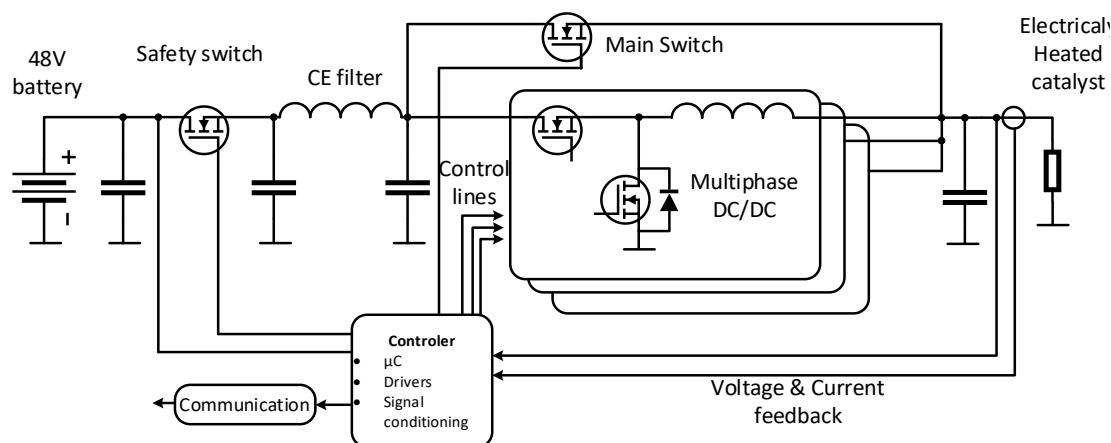


Figure 14 Multi-phase DC/DC converter in parallel with a switch

In aceasta topologie, convertorul DC / DC este folosit doar pentru partea tranzitorie de oprire si pornire a sarcinii. In restul timpului, curentul va circula prin switch-ul principal.

Electric Heated Catalyst Controller Design for Automotive Emission Control

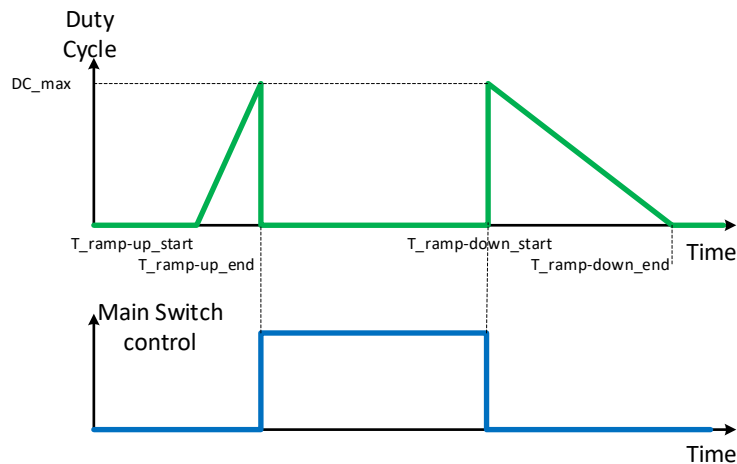


Figure 15 Using a DC/DC controller to ramp-up and ramp-down, and a main switch for the continuous operation of EHC

Folosind acest concept, convertorul DC/DC poate sa fie minimizat in asa fel incat acesta trebuie sa poata sustine curentul si puterea necesara doar in momentele tranzitorii de turn-on si turn-off.

Se face o analiza mai detaliata a acestui concept. La inceput se realizeaza o simulare pentru a demonstra conceptul, si a intelege mai bine functionarea circuitului. Odata dovedita fezabilitatea acestui circuit, urmatorul pas este definirea clara a cerintelor de proiectare. Pe baza acestora se face partea de design a fiecarui sub-circuit.

Pentru convertorul DC/DC multi-faza, se analizeaza valoarea necesara a inductantei, bazat pe curentul prin aceasta si frecventa de operare. Trei valori de inductanta sunt analizate la diferite frecvente si curenti de comutare. Este aleasa o valoare a inductivitatii de $1\mu\text{H}$, ce va opera la 260kHz . Mai departe se face o analiza a modului in care inductanta bobinei se schimba cu curentul prin aceasta. O metoda

Este analizat modul in care inductanta unei bobine se schimba in functie de curentul care trece prin aceasta, si ce impact are lucrul acesta in functionarea convertorului. Este prezentata o metoda pentru calculul curentului prin bobina de DC/DC pe baza graficului de inductanta – curent din specificatia bobinei. Metoda este aplicata pentru bobina selectata - Wuerth 7443640100B – iar rezultatul analizei arata ca aceasta poate sa fie folosita.

Tranzistoarele de comutatie alese sunt GS61008P produse de GaN systems. Acest tip de tranzistoare ofera posibilitatea de a inchide si deschide circuitul intr-un timp foarte scurt.

Ca si in design-ul anterior, se calculeaza puterea disipata pe elementele principale. Chiar daca modul de operare al DC/DC-ului este intermitent, pentru a calcula pierderile pe acesta este considerat punctul cel mai defavorabil, in care puterea livrata este maxima. Pierderile in bobina calculate ating 1.45W . Pentru tranzistoarele de

comutatie, fiecare faza a ciclului de comutatie este analizata. Pentru acestea, puterea disipata ajunge la 21.11W pentru tranzistorul de comutatie, si 17.44W pentru tranzistorul care emuleaza dioda. Eficienta calculata a convertorului este de 98%.

Pentru cele 2 switch-uri de putere mare, sunt folosite cate doua tranzistoare IASU300N08S5 puse in paralel. Curentul circula prin aceste tranzistoare in timpul functionarii in steady-state. Puterea disipata pe aceste tranzistoare este de 8.47W per tranzistor.

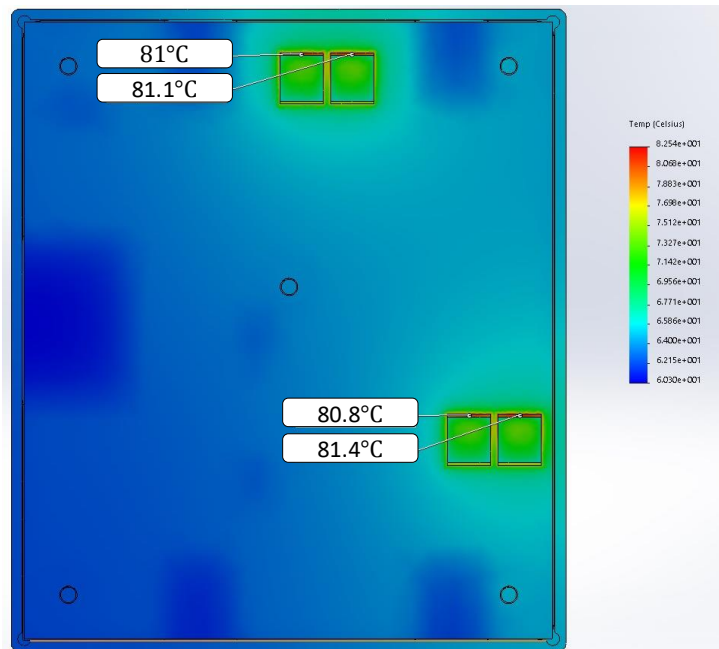


Figure 16 Operation mode 2, Steady-state operation, MOS transistor die temperatures

Folosind valorile calculate pentru pierderile de putere, se face o simulare termica. Atat modul de lucru tranzitoriu (operarea DC/DC-ului), cat si cel steady-state (operarea switch-urilor de putere) sunt analizate. Din simularea termica rezulta ca in timpul operarii, componentele folosite se incalzesc in gama de temperatura acceptabila. In poza de deasupra se poate vedea rezultatul simularii termice pentru conditia de operare steady-state.

Mai departe este prezentat design-ul filtrului pentru emisii conduse. Se specifica cerintele necesare pentru acest filtru, si norma de emisii acceptabile pentru intregul design conform standardului CISPR25, clasa 2 de emisii. Este prezentata o procedura de design pentru filtrul de emisii conduse. Forma curentului care trebuie filtrata, circuitul de masura si limitele impuse sunt definite la inceput. Prin simularea circuitului se verifica daca filtrul propus reuseste sa atinga cerintele de design. Un numar de iteratii se fac pentru a rafina filtrul si pana acesta atinge cerintele.

Datorita faptului ca convertorul DC/DC functioneaza intr-un mod tranzitoriu, in care factorul de umplere al semnalului de comanda este modificat de la aproape 0 la

aproape 100%, semnalul ce necesita filtrare este in continua schimbare. Performanta filtrului este analizata in 6 puncte.

Se urmareeste urmatorul pas din procedura de design, si anume crearea unui model de simulare. Este calculata functia de transfer a circuitului, impreuna cu circuitul de masura. Pentru aceasta, se ia in calcul schema de masura care include retea de stabilizare pentru impedanta liniei (LISN). Sunt analizate doua topologii de filtre, de ordin 3 si 5. Functiile de transfer ale acestora sunt folosite pentru simulare. Pentru inceput se ruleaza o simulare fara filtru, iar rezultatele acestei simulari sunt prezentate in figura de mai jos.

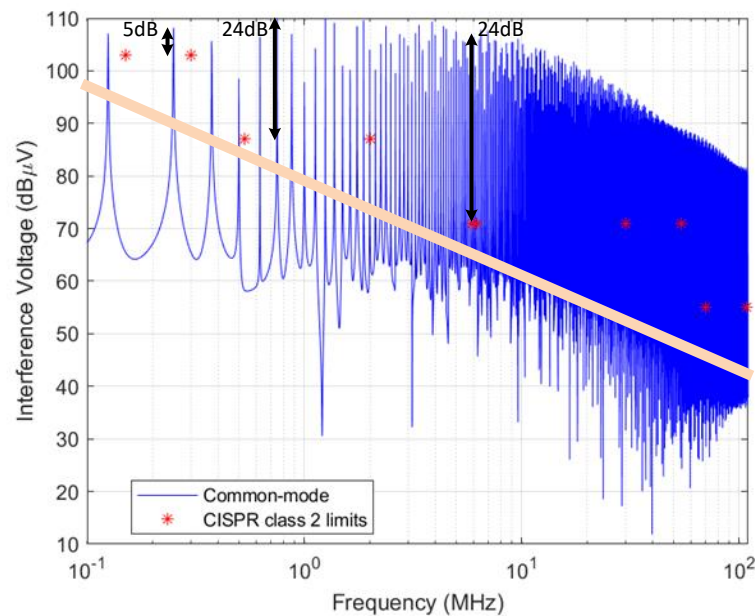


Figure 17 CE Emissions without filtering for current at 25ms, and with how much they are over-passing the limits.

Aceasta arata ca un filtru cu atenuarea de 20dB/decada, cu o frecventa de taiere mai mica de 100kHz poate sa atinga cerintele de design.

Pentru implementarea filtrului se folosesc bobine ecranate si condensatori ceramici. Se ruleaza simularea pentru cele doua topologii de filtru, cu valorile nominale ale componentelor. Cu aceasta, performanta filtrului este in parametrii de design.

Cu toate acestea, se arata ca atunci cand sunt alese componentele reale – condensatorul ceramic TDK CKG57NX7S2A226M500JJ [5.35] si bobina 7443082015 de la Würth – aceste componente isi pot schimba valoarea in functie de modul in care sunt folosite. Valoarea condensatorului este dependenta de temperatura si de valoarea tensiunii de DC bias, in timp ce rezistenta echivalenta serie a acestuia este dependenta de frecventa de operare. In mod similar, dupa cum s-a aratat mai sus, inductanta bobinei depinde atat de curentul care trece prin aceasta, cat si de temperatura la care aceasta opereaza.

Electric Heated Catalyst Controller Design for Automotive Emission Control

In momentul in care acesti parametri sunt luati in calcul, performanta filtrului se modifica in mod semnificativ, si acesta nu mai indeplineste cerintele initiale. Se mai ruleaza o iteratie pentru a gasi implementarea finala a filtrului. In implementarea finala a filtrului, sunt luate in calcul componentele cu parametri reali ai acestora.

Implementarea controlerului pentru incalzirea electrica a catalizatorului alimentat la 48V este facuta cu ajutorul unui circuit FPGA - ICE40LP9K. Diagrama block a intrului circuit este prezentata mai jos.

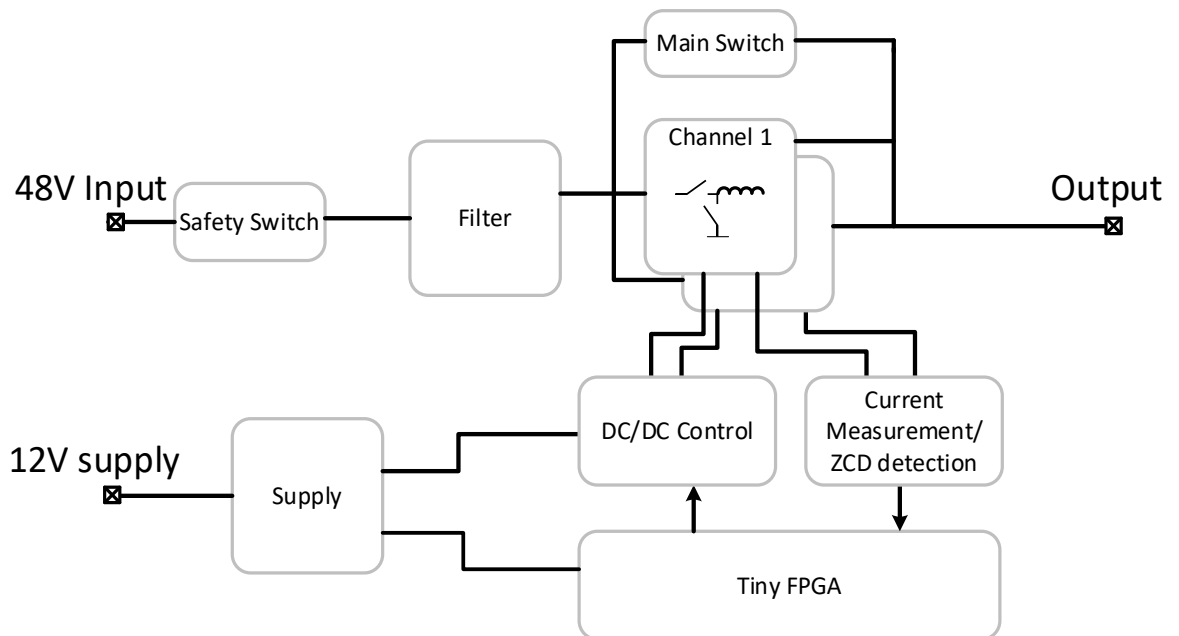


Figure 18 Circuit Block Diagram

Circuitul de alimentare genereaza 6V pentru alimentarea driverelor pentru tranzistoarele GaN, o tensiune negativa de -2.495V folosita de comparatoarele analogice si circuitul preemptiv pentru detectia trecerii prin zero, si un set de tensiuni de 5V si 3.3V pentru alimentarea circuitelor logice.

Circuitul de masurare a curentului foloseste un principiu in care pierderile de putere sunt minimizate - lossless current measurement method. Cu aceasta metoda, tensiunea este masurata peste rezistenta bobinei. Inductanta bobinei este compensata de un circuit R-C care este plasat inainte de intrarea in circuitul INA240A1.

In timpul operarii, se poate intampla ca cele 2 faze ale convertorului sa devina dezechilibrate, iar curentul prin acestea sa nu fie balansat. Pentru a preveni aceasta, se propune un circuit de balansare. Curentul RMS prin fiecare inductor este masurat, iar valoarea acestuia este comparata intre cele doua faze. Aceasta este interpretata de circuitul FPGA, care compenseaza aceasta debalansare modificand subtil latimea pulsului pentru urmatorul ciclu.

În timpul funcționării în mod de curent discontinuu, operarea tranzistorului care emulează dioda în mod continuu ar face să scadă eficiența circuitului, dacă acesta nu este oprit atunci când curentul prin el scade sub 0A. Pentru a preveni aceasta, este propus un circuit care emulează dioda în mod preemptiv. Caderea de tensiune de pe tranzistor este comparată cu un threshold de -100mV. Semnalul de la ieșirea comparatorului este detectat de către circuitul FPGA, care oprește tranzistorul înainte ca curentul prin acesta să scadă sub 0A. Modul de operare al circuitului acesta este prezentat în figura de mai jos.

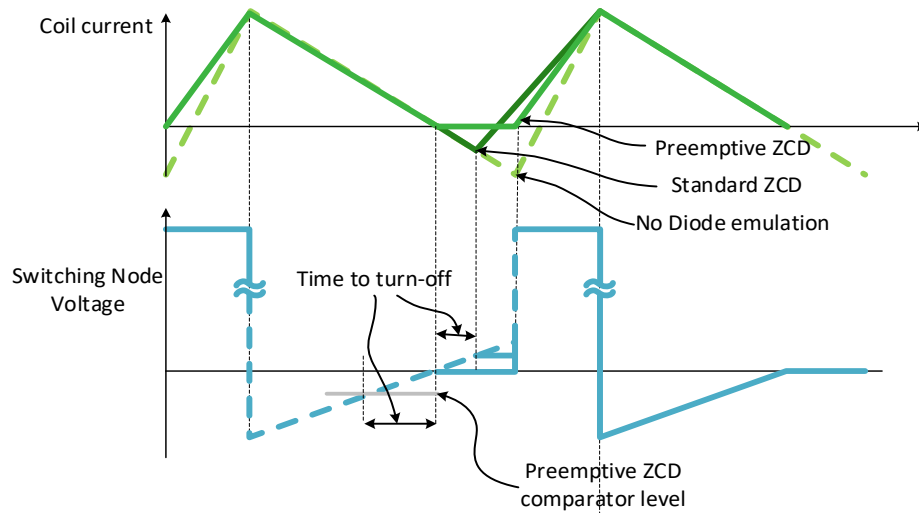


Figure 19 Preemptive diode emulation operation

Pentru a comanda tranzistoarele GaN, este folosit un driver specializat pentru asta – circuitul LMG1205. În timpul design-ului PCB-ului este nevoie de multă atenție din cauza semnalelor foarte rapide.

Pentru layout-ul PCB-ului, sunt luate în considerare mai multe lucruri: Tehnologia de interconectare folosită, capacitățile traseelor de cupru, compatibilitatea electro-magnetică, limitările termice precum și testarea circuitului.

Conexiunile de curent mare sunt făcute printr-un set de conexiuni de la Wuerth denumite power elements. Amplasarea componentelor a fost făcută în așa fel încât calea curentului să urmeze cea mai scurtă cale posibilă. Pentru asta, atât modul de operare tranzitoriu (DC/DC) cât și cel steady-state sunt analizate. Dimensionarea traseelor de cupru a fost făcută în așa fel încât acestea să susțină curentul nominal care trebuie să treacă prin acestea. Conexiunile termice (thermal vias) ale tranzistoarelor au fost deja validate prin simularea termică anterioară.

PCB-ul a fost implementat într-o tehnologie FR4 de 4 straturi, cu grosimea de 1.6mm, și cu grosimea stratului de cupru de 70μm copper. S-a avut mare grijă la trasarea semnalelor de frecvență înaltă – driverele pentru tranzistoarele GaN, asigurând o cale de inductanță scăzută atât pentru încărcarea cât și descărcarea capacității de grila.

Electric Heated Catalyst Controller Design for Automotive Emission Control

Semnalele de masurare a curentului au fost ecranate atat cu un inel de GND, cat si deasupra si dedesubtul lor cu plan de masa.

Componentele filtrului au fost aranjate astfel incat sa nu existe interferente intre diferitele portiuni ale filtrului. O poza 3D a circuitului este prezentata mai jos.

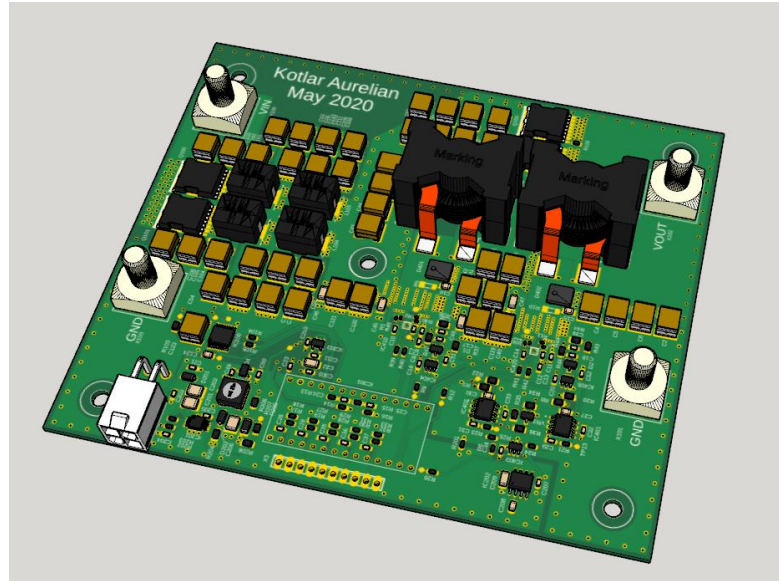


Figure 20 Implementation of the filter on the PCB

Design-ul carcasei metalice a fost facut in asa fel incat sa fie usor de fabricat. Au fost prevazute „buzunare” pentru racirea tranzistoarelor GaN, iar intreg PCB-ul este racit prin lipirea acestuia cu un material interfata termica. In figura de mai jos se poate observa o sectiune prin carcasa.

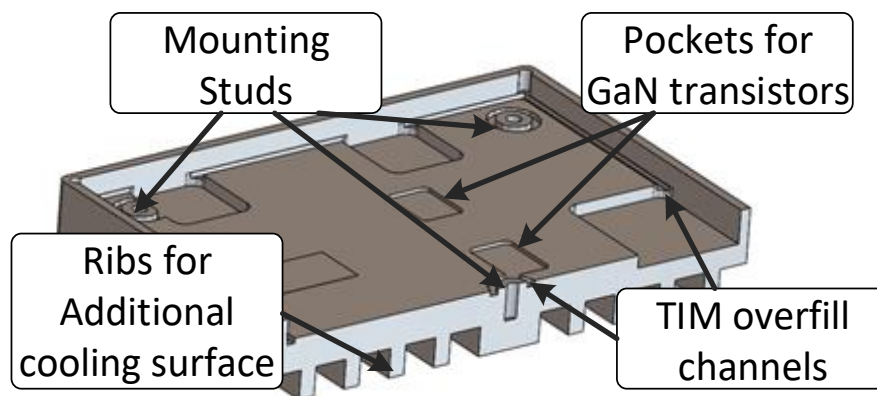


Figure 21 Housing features

Figura de mai jos arata controlul incalzitorului electric al catalizatorului construit.

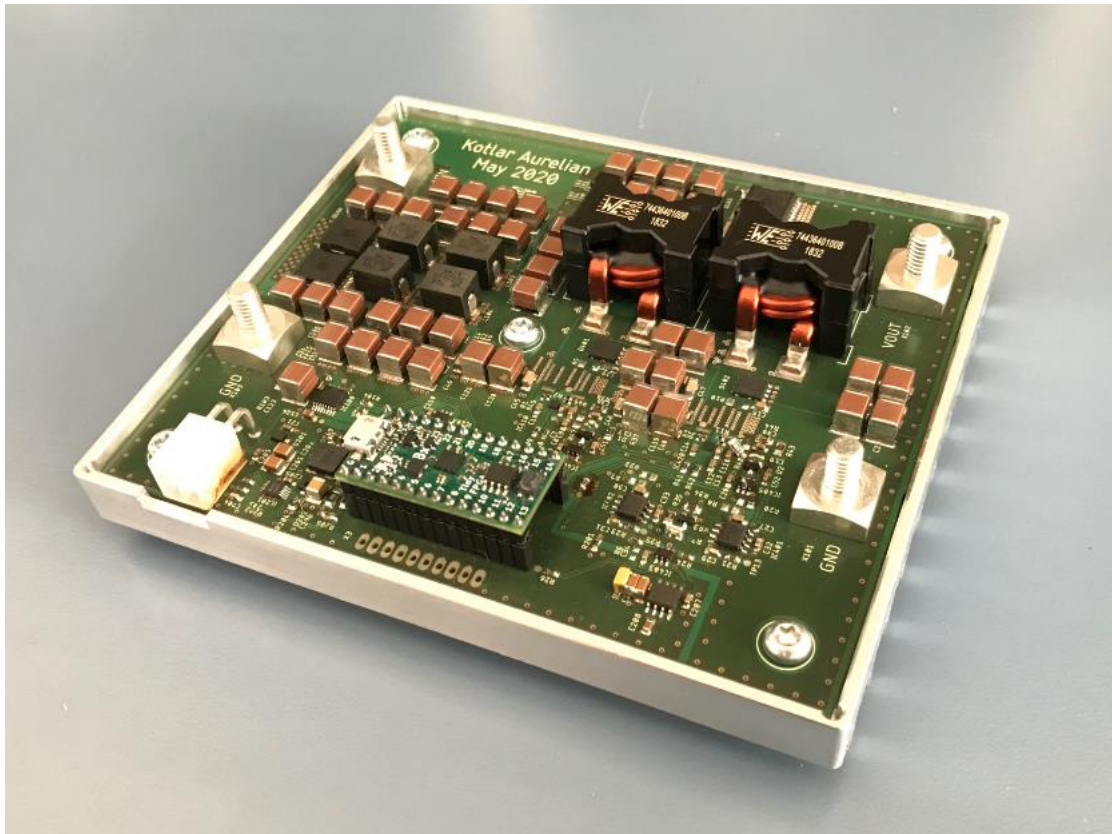


Figure 22 EHC for 48V with DC/DC converter and a parallel switch – product picture

Capitolul 6

Concluzii

Tehnologia incalzirii electrice a catalizatorului are potentialul de a reduce emisiile masinilor. Aceasta reducere poate fi si mai accentuata pentru vehiculele mild hibrid, cu baterie de 48V.

6.1 Concluzii generale

Controlul incalzirii electrice a catalizatorului nu este o sarcina usoara, deoarece curentii necesari pentru aceasta sunt foarte mari. Puterile controlate pot sa varieze de la 1kW pentru sistemele de 12V, pana la 7kW pentru sistemele de 48V.

Pentru sistemele de 12V, se poate folosi un sistem mai simplu. Pentru sistemele alimentate la 48V, este necesara folosirea unui sistem cu un convertor DC/DC specializat, in special pentru a controla momentele de activare si dezactivare ale sarcinii.

Pentru design-ul electronicii de putere, calculul puterii disipate pe elementele active si o simulare termica sunt necesare pentru a verifica viabilitatea design-ului.

Comportamentul real al componentelor trebuie sa fie luat in calcul in timpul fazei de proiectare. In teza sunt prezentate cateva exemple – modificarea inductantei bobinei odata cu cresterea curentului, modificarea capacitatii condensatoarelor ceramice o data cu cresterea tensiunii de bias. Acestea au fost luate in considerare atat pentru design-ul convertorului DC/DC, cat si pentru design-ul filtrului de emisii conduse.

6.2 Rezultate obtinute

In perioada doctoratului, am proiectat, construit, si verificat prototipuri atat pentru controlerul pentru 12V, cat si cel de 48V. Am publicat 5 articole pe teme legate de acest doctorat, si am fost supervizor pentru o lucrare de diploma. Sunt autorul a 3 patente internationale pentru idei prezentate in aceasta teza.

Capitolul 7

Lista contributiilor personale

In acest capitol, este prezentata o lista a tuturor contributiilor personale avute in aria de cercetare pentru aceasta teza. Aceasta lista nu este prezentata mai pe larg in acest rezumat.

Bibliografie

Chapter 1 – Introduction

[1.1] “Commission plans legislative framework to ensure the EU meets its target for cutting CO2 emissions from cars” https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_07_155

Chapter 2 – Automotive emission legislation

[2.1] “Vehicle emission standard” – https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle_emission_standard

Chapter 3 – Electrically Heated Catalyst Load Definition and Operation

[3.1] EMITEC press release, 64th IAA September 2011 “Heated catalysts, the solution to future emission problems”

[3.5] Martin Weiss, Elena Paffumi, Michaël Clairotte, Yannis Drossinos, Theodoros Vlachos, Pierre Bonnel, Barouch Giechaskiel „Including cold-start emissions in the

Real-Driving Emissions (RDE) test procedure”

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC105595/kjna28472enn.pdf>

Chapter 4 – Boardnet Voltage Levels in Automotive

[4.1] Aurelian Kotlar, Paul Svasta, "*Protection Supply Circuit Design for Power Electronics in Automotive*", ISSE Sofia 2017

[4.12] Steven Kowalec, Continental Automotive „*12V / 48V Hybrid Vehicle Technology*”, APEC 2017 presentation,

<https://www.pdma.com/sites/default/files/uploads/tech-forums-transportation-power-electronics/presentations/is115-12v-48v-hybrid-vehicle-technology.pdf>

[4.13] Group standard VW 82148 „*Electric and Electronic Components in Motor Vehicles 48-V Electric System Requirements and Tests*”

[4.14] Group standard VW 80000 „*Electric and Electronic Components in Motor Vehicles up to 3,5t General Requirements, Test Conditions and Tests*”

[4.15] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE, „*CISPR 25 Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles*”

Chapter 5 – Electric Heated Catalyst Controller Designs

[5.1] Masakatsu Fujishita, Takeshi Atago, Keiichi Mashino, Suetaro Shibukawa, Shigeyuki Yoshihara, US5390493A patent, Hitachi Automotive Engineering Co Ltd, „*Apparatus for controlling the electric heating of catalyst*”

[5.16] Bogdan Dan, Aurelian Kotlar, Vitesco Technologies GmbH, DE102019203085A1 patent „*Control device for actuating a load and method for operating such a control device*”

[5.17] Elena-Valentina Dumitrascu, Diploma Project 2020, „*Sistem de comandă și control al unei sarcini rezistive de putere utilizând, drept mediu de transmisie, linia de alimentare în curent continuu*”

[5.18] Aurelian Kotlar, Vitesco Technologies GmbH, US10681801B2 patent, „*Mounting assembly with a heatsink*”

[5.19] Aurelian Kotlar; Paul Svasta, 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), „*Cooling method for high power dissipation SMD packages*”

[5.21] Victor Andrei Iriciuc, Kotlar Aurelian, 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME) „*Sensor Monitoring System for Formula Student Car*”

[5.24] Florin Berinde, Aurelian Kotlar, Paul Svasta, 2019 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), „*Parametric conducted Filter Design for multi-phase DC/DC converters*”

[5.25] Laszlo Molnar, Aurelian Kotlar, Septimiu Lica, 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME) „*High Power Switch using IGBT and GaN MOSFET - a solution proposal*”

[5.26] Aurelian Kotlar, Vitesco Technologies GmbH, Patent WO/2020/254366, „*Exhaust Gas Aftertreatment System and Method for Controlling an Exhaust Gas Aftertreatment System of an Internal Combustion Engine*”