



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

MILICA LJUMOVIĆ

**INTEGRACIJA SIMULACIONOG
POSTUPKA ZA RJEŠAVANJE PROBLEMA
ELEKTROMAGNETNE KOMPATIBILNOSTI
U RAZVOJNI PROCES AUTOMOBILSKIH
INSTRUMENT TABLI**

MAGISTARSKI RAD

Podgorica, 2016.

PODACI O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Milica Ljumović

Datum i mjesto rođenja: 08.12.1990. Podgorica, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:

Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Odsjek za Elektroniku, Telekomunikacije i Računare, 2013.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskog studija: Mikrotalasna tehnika

Naslov rada: Integracija simulacionog postupka za rješavanje problema elektromagnetne kompatibilnosti u razvojni proces automobilskih instrument tabli

Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 27.10.2015.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 28.03.2016.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

Prof. dr Đorđe Jovanović

Prof. dr Dragan Filipović

Prof. dr Ana Jovanović

Mentor: Prof. dr Dragan Filipović

Komisija za ocjenu magistarskog rada:

Prof. dr Đorđe Jovanović

Prof. dr Dragan Filipović

Prof. dr Ana Jovanović

Komisija za odbranu magistarskog rada:

Prof. dr Đorđe Jovanović

Prof. dr Dragan Filipović

Prof. dr Ana Jovanović

Datum odbrane: -----

Datum promocije: -----

IZJAVA

Ja, ispod potpisana Milica Ljumović, izjavljujem da sam ovaj magistarski rad napisala sama, uz konsultacije sa mentorom, bez zabranjene pomoći trećih lica i bez upotrebe pomoćnih sredstava osim onih specificiranih u radu (literatura, softverski alati i slično). Pojmovi preuzeti direktno ili indirektno iz drugih izvora označeni su kao takvi. Ovaj rad nije prethodno prezentovan u identičnoj ili sličnoj formi nijednoj crnogorskoj ili stranoj ispitnoj komisiji.

Istraživanje sprovedeno u radu izvođeno je u periodu od 15.04.2015. do 14.10.2015. godine, pod nastavnim mentorstvom Prof. dr Filipović Dragana (Univerzitet Crne Gore - Elektrotehnički fakultet Podgorica) i Leibinger Arpada (Robert Bosch GmbH, CM-IS/ECF21) u kompaniji Robert Bosch GmbH, sektor Car Multimedia - Instrumentation Systems, Leonberg, Njemačka.

Leonberg, 14.10.2015.

Milica Ljumović



Abstract

Trend of equipping nowadays automobiles with more and more electrical and electronic devices led to bottom-up approach when it comes to electromagnetic compatibility (EMC) planning. Instead of performing EMC measurements starting from the component level (e.g. instrument cluster), starting point became the module level (e.g. switch-mode power supply). EMC problems discovered on this isolated module are easier to fix, cheaper and more reliable due to the lack of other components and modules connected that can affect the measurements. The goal of the research, performed within this thesis, was establishing a procedure for faster and cheaper conducted electromagnetic interference (EMI) suppression on module level in both module design and testing. The procedure was developed on switched-mode power supply - boost converter module by combining upgraded $1/150 \Omega$ measurement method with 2D and 3D simulations. By using this procedure, we can rely more on the simulation results in the early stage of EMI estimation and design optimization, which is time- and cost-saving. With a model correctly built that approximates the measurement geometry and environment well, we were able to establish a simulation procedure that can be used for these module types in general as well as on some others with required modifications implemented.

Sažetak

Trend primjene sve većeg broja električnih i elektronskih uređaja u automobilskoj industriji doveo je i do povećanja vjerovatnoće pojave elektromagnetne interferencije (EMI) među njima. Kao posljedica toga, dolazi do bottom-up pristupa u projektovanju i procjeni elektromagnetne kompatibilnosti (EMC) uređaja sa nivoa komponente (npr. instrument table) na nivo modula (npr. prekidački izvor napajanja). Na nivou modula, problemi izazvani interferencijom kao i izvori interferencije lakše se mogu otkriti i riješiti, a rezultati mjerenja su pouzdaniji usljed izostanka drugih komponenti i modula koji mogu uticati na rezultate mjerenja. Istraživanje sprovedeno u radu, za cilj ima razvoj procedure za brže i jeftinije otkrivanje i suzbijanje uzroka provedene EMI pri dizajnu i testiranju modula. Procedura je zasnovana na primjeru prekidačkog izvora napajanja - podizача napona i to kombinovanjem unapriđene 1/150 Ω mjerne metode sa 2D i 3D simulacijama. Primjenom ove procedure, pokazalo se da se u ranijem stadijumu projektovanja sigurnije možemo osloniti na simulacije pri procjeni EMI i određivanju mjera za optimizaciju kola. Time se postiže ušteda na vremenskom i ekonomskom planu zbog značajnog smanjenja broja potrebnih testnih štampanih ploča. Sa precizno izgrađenim modelom, koji dobro aproksimira geometriju i elektromagnetnu sredinu u mjernoj metodi, procedura predstavljena u radu bi se, uz manje izmjene, mogla primjenjivati i na drugim modulima u automobilu, što joj dodaje na značaju.

EM - Electromagnetic
EMC - Electromagnetic Compatibility
EMI - Electromagnetic Interference
IC - Integrated Circuit
SMPS - Switched-Mode Power Supply
PCB - Printed Circuit Board
CISPR - Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
IEC - International Electrotechnical Commission
ISO - International Organization for Standardization
SAE - Society of Automotive Engineers
DUT - Device Under Test
LISN - Line Impedance Stabilization Network
ESD - Electrostatic Discharge
DC - Direct Current
AC - Alternate Current
FM - Frequency Modulation
RF - Radio Frequency
LCD - Liquid-Crystal-Display
MOSFET - The Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
ESR - Equivalent Series Resistance
ESL - Equivalent Series Inductance
USB - Universal Bus Interface
SPI - Serial Peripheral Interface
I2C - Inter-Integrated Circuit
PWM - Pulse-Width Modulated
SMA - SubMiniature version A connector
FFT - Fast Fourier Transformation
CST - Computer Simulation Technology
FEM - Finite Element Method

Sadržaj

Uvod	1
1 Teorijska osnova	3
1.1 Elektromagnetna interferencija (EMI) i elektromagnetna kompatibilnost (EMC)	3
1.2 Izvori EMI	4
1.3 Sprega EMI	4
1.4 EMC u automobilskoj industriji	5
2 EMC Mjerenja	7
2.1 Klasifikacija EMC mjerenja	8
2.2 Mjerenja imuniteta	8
2.2.1 Imunitet na konducionu emisiju	9
2.2.2 Imunitet na zračenu emisiju	10
2.2.3 Mjerenja elektrostatičkog pražnjenja	11
2.3 Mjerenja emisije	12
2.3.1 Zračena emisija	12
2.3.2 Mjerenje pomoću trakastog voda	13
2.3.3 Kondukcionalna emisija	14
2.4 EMC mjerenja integrisanih kola (IC)	15
2.4.1 1/150 Ω metoda za mjerenje kondukcione emisije	15
3 Prekidački izvori napajanja	17
3.1 Spuštač napona - Buck konverter	18
3.2 Podizač napona - Boost konverter	21
3.3 Tehnike redukovanja kondukcione emisije	23

3.3.1	Dizajn ulaznog filtra	23
3.3.2	Ulazna kapacitivnost	24
3.3.3	Teorija kritične petlje [1]	27
3.3.3.1	Buck konverter	27
3.3.3.2	Boost konverter	28
3.3.4	Komutaciona tačka	28
3.3.5	Snubber kolo	28
3.3.6	Uzemljenje	30
4	Mjerna postavka	31
4.1	Kontrolna tabla	32
4.2	Mjerna sonda	33
4.3	Organizacija mjerne postavke	34
4.4	Ponovljivost mjernih rezultata	35
5	Layout dizajn	37
6	Simulaciona postavka	44
6.1	2D Simulacije	44
6.1.1	Power Stage Designer	44
6.1.2	LT Spice IV Simulacija	46
6.1.2.1	Upoređivanje simulacionog modela sa realnim kolom	51
6.1.3	CST Studio Suite 2015 2D Simulacija	57
6.1.4	Pojednostavljenje modela	59
6.2	3D simulacija	64
6.2.1	Priprema 3D modela	64
6.2.2	Povezivanje 3D modela sa šemom	68
6.2.3	Ko-simulacija 3D modela i šeme kola	68
6.2.4	Boost konverter modul bez uzemljenja na gornjem sloju	71
7	Eksperimentalni rezultati	74
7.1	Rezultati mjerenja	74
7.2	Rezultati simulacija	79
	Zaključak	84

SADRŽAJ

Popis slika	86
Reference	90
Dodatak	93

Uvod

Od početaka radio prenosa dvadesetih godina prošlog vijeka pa sve do današnje ekspanzije razvoja električnih i elektronskih uređaja i sistema, elektro inženjeri se suočavaju sa brojnim primjerima lošeg ili potpunog izostanka funkcionisanja ovih sistema usljed elektromagnetne interferencije (EMI). S obzirom na trendove današnjice i brzinu razvoja tehnike, može se zaključiti da će ovakvi primjeri postati učestaliji i komplikovaniji za rješavanje u bliskoj budućnosti.

Da bi se postiglo pravilno funkcionisanje uređaja ili sistema u realnim uslovima, mora se ostvariti elektromagnetna kompatibilnost (EMC) između djelova datog uređaja, odnosno sistema i njihovog elektromagnetnog okruženja. EMC je postala ozbiljan problem današnjice, a jedan od faktora koji je doveo do toga je povećanje broja električnih/elektronskih uređaja u svakodnevnoj upotrebi. Drugi dominantan faktor jeste sve veća primjena tehnologije integrisanih kola (IC) koja omogućava implementaciju velikog broja sofisticiranih kola na malom prostoru. Drugim riječima, dimenzije sistema se smanjuju, a vjerovatnoća pojave interferencije se povećava. Ovo nije problem koji pogađa samo potrošačku već i u automobilsku industriju. U cilju zadovoljenja potreba tržišta i poboljšanja performansi, pojedini mehanički djelovi i sistemi u vozilima morali su biti zamijenjeni električnim. U neke od ovih sistema spadaju: sistem za kontrolu potrošnje i regulaciju ubrizgavanja goriva, sistem za kontrolu trakcije, razni indikatori na instrument tabli i mnogi drugi. Čak i srednje opremljeno vozilo danas sadrži nekoliko stotina električnih i elektronskih uređaja za različite kontrolne, sigurnosne i multimedijalne funkcije. Svi ovi uređaji i sistemi moraju pravilno funkcionisati, bez međusobnog ometanja. Da bi se to obezbijedilo, svi ovi sistemi i uređaji moraju zadovoljiti stroge internacionalne i državne EMC standarde i regulative prije odlaska u serijsku proizvodnju. Iako se EMC mjerenja i testiranja sprovode u kasnom stadijumu razvoja proizvoda, ona se i te kako moraju uzeti u obzir tokom kompletnog procesa

njegovog dizajna i razvoja. Razloga za to je više. Sva detaljnija istraživanja uzorka EMI na nivou sistema teža su zbog njegove kompleksnosti, a uvođenje modifikacija, pa čak i veoma malih, vremenski je i ekonomski zahtjevno. Dobar alternativni pristup problemu EMI jeste pristup u ranom stadijumu razvoja. To podrazumijeva predviđanje mogućih uzroka i posljedica EMI i suzbijanje tih posljedica optimizacijom datog dijela sistema. Ovakvim pristupom takođe se postiže i optimizacija na nivou kompletnog sistema. Mjerenja i simulacije, sprovedene na izolovanim djelovima sistema, mogu dati bolji uvid u uzroke i posljedice EMI, bez potrebe za proizvodnjom velikog broja testnih uređaja odnosno, u ovom slučaju, ploča sa štampanim kolima.

U ovom radu biće opisana kombinacija standardizovanih mjernih metoda i simulacija za ispitivanje i evaluaciju kondukcione elektromagnetne emisije izolovanog modula automobilske instrument table. Metoda će biti zasnovana na primjeru modula prekidačkog izvora napajanja - podizača napona za pozadinsko osvjetljenje instrument table (*backlight boost converter*). Namjerno je odabran ovaj modul iz razloga što ovi uređaji imaju tendenciju da budu najčešći izvori kondukcione emisije u instrument tabli. Uvod i osnovne definicije vezane za oblast elektromagnetne kompatibilnosti opisani su u poglavlju 1. Poglavlje 2 posvećeno je standardizovanim EMC mjernim metodama koje se koriste u automobilskoj industriji. Uzevši u obzir da je testni modul za metodu iz rada prekidački izvor napajanja, poglavlje 3 daje uvod u principe rada ove vrste kola, kao i neke od metoda za redukciju EMI u ovim tipovima električnih kola. Postavka mjerne metode, kao i dizajn štampane ploče sa modulom (koja će biti referenca za simulacije), opisani su u poglavljima 4 i 5, a u poglavlju 6 podešavanja i postupak izgradnje simulacionog modela. Evaluacija dobijenih rezultata, zajedno sa prednostima i manama ove metode, izvršena je u poglavlju 7.

Cilj ovog rada je doprinos bržem, jeftinijem i preciznijem razvoju instrument tabli na taj način što bi se problemi vezani za EMI eliminisali u ranom stadijumu razvoja na izolovanim modulima. Zahvaljujući simulacijama i efektima koji se pomoću njih mogu vizualizovati, a koji se ne mogu vidjeti u mjernim postupcima, primjena ove metode značajno bi smanjila broj potrebnih testnih tabli i varijanti plana komponenti (*layout-a*¹) i dala bolji uvid u uzroke i posljedice EMI na nivou modula.

¹Layout - plan rasporeda komponenti i signalnih putanja na štampanoj ploči

Poglavlje 1

Teorijska osnova

1.1 Elektromagnetna interferencija (EMI) i elektromagnetna kompatibilnost (EMC)

Brojni električni ili elektronski uređaji i sistemi zrače ili provode elektromagnetnu energiju, što znači da stvaraju određenu elektromagnetnu sredinu u prostoru koji ih okružuje. Ako uzmemo u obzir broj ovakvih uređaja i sistema u svakodnevnici, možemo zaključiti da je ovakva elektromagnetna sredina neizostavan dio svijeta u kome živimo. Neka od zračenja predstavljaju dio normalnog režima rada uređaja/sistema (npr. radio i televizijske stanice, telekomunikacione stanice itd.). Sa druge strane, postoje situacije u kojima neki uređaji emituju elektromagnetnu energiju, iako to nije dio njihovog normalnog režima rada (npr. sistem za paljenje kod automobila, pojedina industrijska oprema, pokvareni električni aparati itd.). Elektromagnetno zračenje, bilo namjerno ili neplanirano, ukoliko je dovoljno jako, može dovesti do interferencije sa drugim uređajima i stvoriti smetnje u njihovom radu.

‘Elektromagnetna smetnja je bilo koji elektromagnetni fenomen koji može degradirati performanse uređaja, opreme ili sistema. Može se javiti u obliku elektromagnetnog šuma, neželjenog signala ili promjene u samom propagacionom medijumu’ [2].

Na osnovu prethodne definicije, *elektromagnetna interferencija* se može definisati kao posljedica elektromagnetne smetnje. Dakle, EMI predstavlja degradaciju performansi uređaja, opreme ili sistema, izazvanu elektromagnetnom smetnjom. [2].

‘Elektromagnetna kompatibilnost je sposobnost električnog sistema da (1) funkcioniše pravilno u svojoj predviđenoj elektromagnetnoj sredini i (2) ne bude izvor elek-

tromagnetne smetnje u toj sredini.' [3]

U zavisnosti od toga da li uređaj emituje ili provodi elektromagnetnu energiju, mogu se definisati dva aspekta EMC: osjetljivost i emisija. *Osjetljivost* se definiše kao sposobnost uređaja da reaguje na neželjenu elektromagnetnu energiju. Međutim, u literaturi i u automobilskoj industriji, u češćoj je upotrebi izraz imunitet ili izdržljivost i on opisuje koliko dobro i koji nivo EMI uređaj može podnijeti prije nego što dođe do pojave problema u radu. *Emisija* opisuje sposobnost uređaja da izazove interferenciju/smetnju.

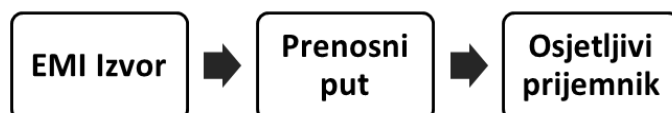
1.2 Izvori EMI

Izvori EMI mogu biti prirodni ili vještački. Prirodni izvori EMI dijele se na nebeske i zemaljske. Nebeski izvori podrazumijevaju kosmički i solarni šum, dok u zemaljske spadaju gromovi i druge atmosferske pojave. Vještački izvori EMI potiču od strane čovjeka i mogu se posmatrati na nivou sistema i na nivou električnog kola. Sistemi koji su česti izvori EMI su: navigacioni/radarski/komunikacioni sistemi, sistemi za paljenje kod automobila, mikrotalasne pećnice, mikseri, usisivači itd. Česti izvori EMI u električnim kolima su: lokalni oscilatori, prekidači, releji, nelinearne komponente u kolima, osigurači, logička i digitalna kola itd. [2]. U narednim poglavljima, fokus će biti na izvorima EMI i njenim posljedicama na nivou električnog kola.

1.3 Sprega EMI

Postoje različite vrste sprege EMI od njenog izvora do prijemnog uređaja. U tom sistemu neophodna su 3 elementa: izvor interferencije, prenosni put/medijum i osjetljivi prijemnik.

Svaki vid sprege EMI može se opisati Maksvelovim jednačinama, ali u ovom radu biće data samo uopštena klasifikacija. Prenosni put može uključivati jedan ili više od sljedećih tipova prostiranja [3] [4]:



Slika 1.1: Uopšteni model sprege EMI.

- Kondukciona sprega
- Induktivna (magnetna) sprega
- Kapacitivna (električna) sprega
- Zračenje

Kondukciona sprega nastaje kada postoji provodni put između izvora i prijemnika, na primjer, u kablovima za napajanje, kućištima, uzemljenjima itd. Najčešće nastaje usljed istrošene izolacije, neizolovanih signalnih kablova ili grešaka u povezivanju. Postoje dva tipa ove vrste sprege i to su normalna (*common-mode*) i diferencijalna (*differential mode*) sprega, zavisno od toga da li se smetnja prostire u istom ili suprotnom smjeru u provodnicima.

Induktivna (magnetna) sprega nastaje usljed proticanja struje u provodnicima na jako malom međusobnom rastojanju. Strujni tok i promjenljivo magnetno polje koje on stvara, izazivaju promjenu napona u drugom provodniku.

Kapacitivna (električna) sprega može nastati među provodnicima koji rade na visokim naponima, a rastojanje među njima je manje od jedne desetine talasne dužine signala smetnje. Tako, promjenljivo električno polje u jednom provodniku izaziva promjenu napona u drugom provodniku.

Zračenje se odnosi na situacije kada su izvor i prijemnik na velikom rastojanju i ponašaju se kao radio antene. Elektromagnetni talas, emitovan od strane izvora interferencije, primljen je od strane osjetljivog uređaja na drugoj strani.

1.4 EMC u automobilskoj industriji

Kao što je pomenuto u uvodnom dijelu, trenutno se u automobilskoj industriji izvodi implementacija kompleksnih sistema za kontrolu, sigurnost i zabavne sadržaje u svakom vozilu. Paralelno sa tim, nove funkcije i sistemi u konstantnom su razvoju. Iz tih razloga, EMC je postala prioritet pri projektovanju električnog sistema vozila. Iako se EMC problemi ne razlikuju mnogo od onih u potrošačkoj industriji, elektromagnetna sredina u automobilu se veoma razlikuje od one u domaćinstvu ili drugim oblastima industrije. Tu razliku čini raznovrsnost implementiranih električnih i elektronskih uređaja i sistema, kao i njihova neposredna blizina. Vođeni internacionalnim

1.4 EMC u automobilskoj industriji

kriterijumima i odredbama za regulaciju EMC, a ujedno i specifičnošću tržišta, mnogi proizvođači automobila razvili su svoje EMC testne i mjerne metode kako bi obezbijedili visok nivo sigurnosti njihovih vozila od uticaja EMI. Neki od ovih posebnih standarda i mjernih metoda biće opisani u poglavlju 2.

Poglavlje 2

EMC Mjerenja

Različite svjetske agencije razvile su brojne standarde i regulative kojima se definišu zahtijevane performanse uređaja i sistema, a sve to kao praktičnu mjeru osiguranja njihove EMC. Ovi standardi i regulative propisuju nivoe dozvoljene elektromagnetne emisije i zahtijevanog imuniteta za različite tipove sistema i uređaja. Njima su takođe regulisane tačne EMC testne i mjerne procedure kako bi se osigurao visok nivo reprodukcije mjernih rezultata. Ovdje se ubrajaju internacionalni standardi kao što su: CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques), IEC (International Electrotechnical Commission), 61000 family International Organization for Standardization (ISO), Society of Automotive Engineers (SAE) i mnogi drugi. Ovi standardi moraju se pažljivo primjenjivati iz razloga što se često mijenjaju i dopunjavaju.

Kada se govori o automobilskoj industriji, zahtjevi koje vozilo mora da ispuni veći su i kompleksiji od onih u potrošačkoj industriji zbog kombinacije različitih vrsta sistema koji se ugrađuju u vozilo i njihovog malog međusobnog rastojanja. To je uzrokovalo razvoj posebnih EMC standarda i testnih procedura za automobilsku industriju. Jedan od ovih standarda je CISPR 25 [5] koji sadrži ograničenja i mjerne procedure za frekvencijski opseg od 150 kHz - 2500 MHz (na nivou kompletnog vozila ali i pojedinih djelova) i obuhvata mjerenja emisije i imuniteta. Sva mjerenja, sprovedena u ovom radu, zasnivaju se na tom standardu uz dodatak IEC 61000 reda standarda koji, između ostalog, sadrži regulative za integrisana kola. [6] [7] [8] [9] [10]

2.1 Klasifikacija EMC mjerenja

EMC mjerenja mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije: mjerenja emisije i mjerenja osjetljivosti/imuniteta. Dalja klasifikacija se obavlja na osnovu mehanizma prostiranja (provođenje, zračenje) pa tako razlikujemo sljedeće tipove mjerenja:

- Kondukciona emisija
- Zračena emisija
- Imunitet na kondukcionu emisiju
- Imunitet na zračenu emisiju

Kratak pregled navedenih tipova mjerenja dat je u nastavku ovog poglavlja, a fokus rada je na provedenoj emisiji, o kojoj će biti više riječi u narednim poglavljima.

2.2 Mjerenja imuniteta

‘Osjetljivost je sposobnost uređaja ili kola da reaguje na neželjenu elektromagnetnu energiju.’ [3]

Zbog veće upotrebe termina imunitet, čiji se nivo u mjerenjima i ispituje, ovaj izraz će se koristiti u nastavku rada. Mjerenja imuniteta uređaja izvode se u oklopljenim kućistima i to njegovim izlaganjem različitim pulsirajućim signalima, definisanim u [11]. Ti signali simuliraju različite prelazne pojave (trenutne varijacije napona i struje) do kojih može doći u vozilu. Performanse uređaja prije i nakon izlaganja ovim uticajima prate se preko *high-speed* video kamera. [12]

Kategorizacija rezultata mjerenja imuniteta (i na kondukcionu i na zračenu emisiju EMI) može se definisati na osnovu zahtijevanih performansi testnog uređaja:

- *Klasa A*: Podrazumijeva normalan rad uređaja prije i nakon izlaganja signalu smetnje, a funkcionalnost mora odgovarati opisanoj od strane proizvođača. Nijakva degradacija performansi ili gubitak funkcionalnosti nije dozvoljena.
- *Klasa B*: Nije dozvoljena degradacija performansi ili gubitak funkcionalnosti *nakon* testiranja. Međutim, jedan ili više dijelova sistema mogu raditi izvan propisanog tolerantnog opsega tokom testa, ali se automatski moraju vratiti u normalan režim rada nakon uklanjanja smetnje.

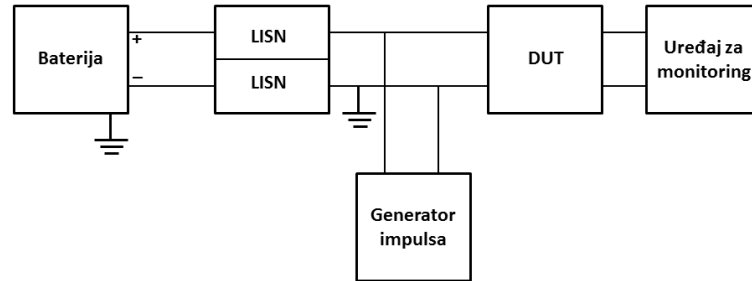
- *Klasa C*: Privremena degradacija performansi ili gubitak funkcionalnosti dozvoljeni su tokom perioda izloženosti uređaja signalu smetnje. Uređaj se vraća u normalan režim rada nakon uklanjanja signala smetnje bez izvođenja kontrolne reset operacije.
- *Klasa D*: Privremena degradacija performansi ili gubitak funkcionalnosti dozvoljeni su tokom perioda izloženosti uređaja signalu smetnje. Uređaj se vraća u normalan režim rada nakon uklanjanja signala smetnje ali uz izvođenje kontrolne reset operacije.
- *Klasa E*: Trajna degradacija performansi i gubitak funkcionalnosti usljed izlaganja signalu smetnje. Neophodna je popravka/zamjena djelova ili kompletnog uređaja.

Prve četiri klase definisane su u regulativama ISO [13]. Zavisno od primjene, uređaj mora pripadati jednoj od njih. Klasa E je data samo kao primjer kakav efekat može imati EMI na uređaj koji ne ispunjava EMC zahtjeve vezane za imunitet. Nijedan uređaj na tržištu ne bi smio pripadati klasi E.

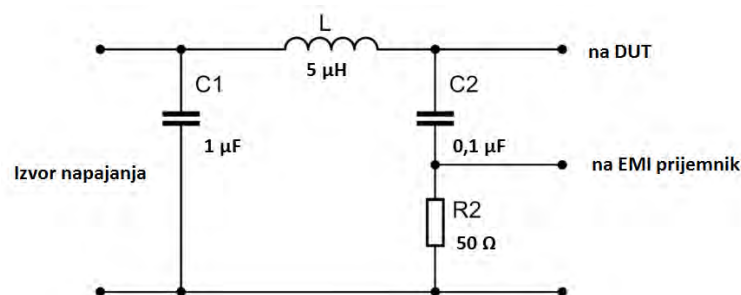
2.2.1 Imunitet na kondukcionu emisiju

U određenim situacijama može se desiti da se vrste EMI kao što su: grmljavina, elektromagnetni impulsi, elektrostatičko pražnjenje itd. sprovedu do uređaja kroz njegovu AC napojnu mrežu. Ovakve velike varijacije u okviru mreže za napajanje mogu izazvati probleme i uticati na imunitet uređaja. To znači da uređaj ispoljava degradaciju performansi usljed ovih uticaja. Ovaj problem se naročito detaljno ispituje u automobilskoj industriji. U slučaju vozila, pomenuti tipovi EMI mogu se sprovesti do elektronskog modula u vozilu kroz njegove DC ili signalne linije. Testiranje ove vrste imuniteta izvodi se dovodenjem struje na širokom frekvencijskom opsegu na svakoj ulaznoj liniji modula tj. uređaja koji se ispituje (*DUT - Device Under Test*). Jako je važno da mjerna postavka dobro aproksimira uslove i okruženje u kome bi uređaj normalno radio. Na osnovu dobijenih rezultata vrši se klasifikacija uređaja prema prethodno navedenoj podjeli.

LISN (*Line Impedance Stabilization Network*) sa Slike 2.1 označava serijsku mrežu za stabilizaciju impedanse, čija je glavna funkcija da obezbijedi preciznu impedansu ulazu za napajanje DUT-a i osigura ponovljivost mjerenja šuma na ulazu DUT-a. Druga



Slika 2.1: Uopšteni blok dijagram mjerenja imuniteta na kondukcionu emisiju.



Slika 2.2: Tipični dijagram serijske mreže za stabilizaciju impedanse u automobilskoj industriji.

važna funkcija LISN-a jeste prevencija provođenja visokofrekventnog šuma od strane izvora napajanja do uređaja, tako što se ponaša kao filter propusnik niskih učestanosti, a van tog opsega kao visoka impedansa za RF šum [3].

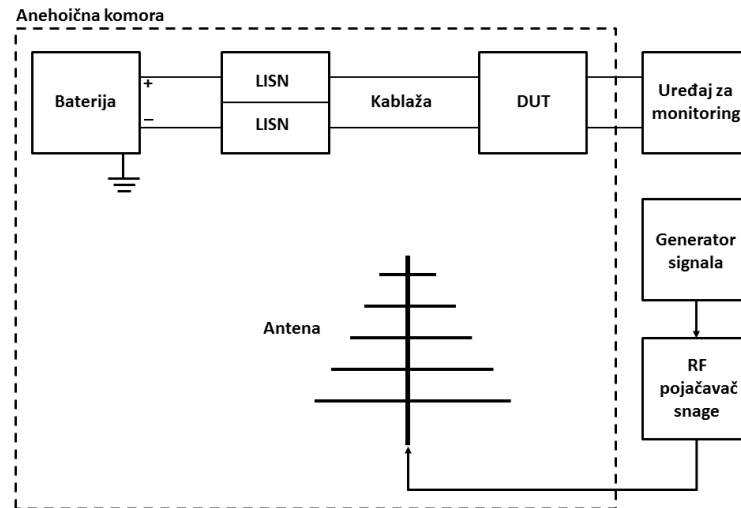
5 μH LISN se najčešće koristi za aproksimaciju kratkih žica u vozilima i standardizovana je da ima impedansu sličnu impedansi električne mreže instalirane u vozilu.

2.2.2 Imunitet na zračenu emisiju

Testiranja imuniteta na zračenu emisiju podrazumijevaju zadovoljavajuće funkcionisanje DUT-a kada je izložen uticaju zračenja jakog elektromagnetnog polja. U slučaju automobilske industrije, definisane jačine polja koje uređaji moraju biti u stanju da izdrže, jako su visoke. Iz tih razloga, ovi tipovi mjerenja izvode se u anehoičnim komorama¹ ili testnim ćelijama. Mjerne metode za ovu vrstu imuniteta uključuju frekvencij-

¹Anehoična komora - prostorija čiji zidovi u potpunosti absorbiraju audio i elektromagnetne talase.

sko skeniranje na određenom fiksnom nivou jačine polja (koji je određen standardom). Mjerenje se izvodi u intervalima gdje svaki interval predstavlja procentualnu vrijednost trenutne frekvencije. Skeniranje DUT-a izvodi se sve dok se ne otkrije degradacija performansi.



Slika 2.3: Uopšteni blok dijagram mjerenja imuniteta na zračenu emisiju.

2.2.3 Mjerenja elektrostatičkog pražnjenja

Mjerenja elektrostatičkog pražnjenja (*ESD - Electrostatic Discharge*) predstavljaju podvrstu mjerenja imuniteta. Iako se može izmjeriti i emisija, fokus je na mjerenjima imuniteta zbog činjenice da su se dimenzije uređaja i sistema smanjile i da rade na nižim naponima, što drugim riječima znači da se njihova osjetljivost na ESD povećala. ESD zaštita mora biti obavezan dio dizajna i razvoja sistema, a ne dodata na kraju kada se otkrije postojanje problema. ESD zaštita sastoji se od 3 glavna postupka:

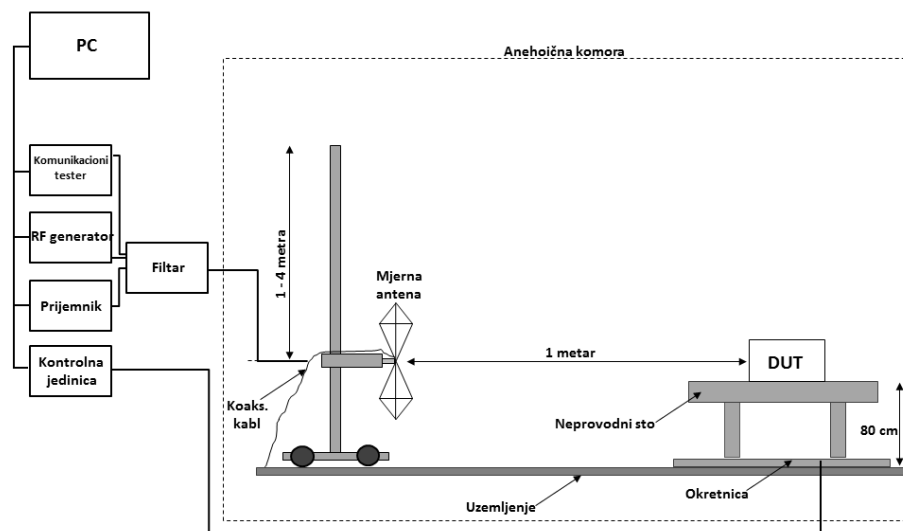
- prevencija ili minimizacija ulaska tranzijentnih struja
- ojačavanje najosjetljivijih dijelova sistema/električnog kola
- razvijanje software-a za detekciju i moguću korekciju problema izazvanih tranzijentnim strujama [3]

2.3 Mjerenja emisije

Elektromagnetna emisija, koja ne spada u normalan režim rada uređaja, naziva se emisija smetnje i može uticati na obližnje sisteme i uređaje. Zavisno od tipa propagacije smetnje, mogu se definisati zračena i kondukciona (provedena) emisija. Zračena emisija se odnosi na slučajeve kada se kablaza i sam uređaj ponašaju kao antena i emituju signal smetnje, dok se kondukciona emisija odnosi na situacije u kojima se struja smetnje prostire kroz kablazu/električne veze u uređaju.

2.3.1 Zračena emisija

Uređaj koji generiše elektromagnetna polja koja se nehotično prostiru od njegove strukture u okolni prostor, naziva se izvorom zračene emisije. Ova pojava ne nastaje samo kod nehotimičnih izvora zračenja već i kod hotimičnih (npr. antena) kada generišu komponente van njihovog radnog frekvencijskog opsega. Mjerenja zračene emisije izvode se u anehoičnim ili polu-anehoičnim komorama sa širokopoljnom antenom (obično rog, log periodična, bi-konusna) kao prijemnikom za jačinu bliskog polja DUT-a. Frekvencijski opseg propisan za ovaj tip mjerenja obično je od 150 kHz - 3 GHz. Ako jačina zračenog polja ne prelazi nivo definisan standardom, uređaj prolazi test. Ovaj uslov mora biti zadovoljen za svaku moguću orijentaciju uređaja koji se testira.

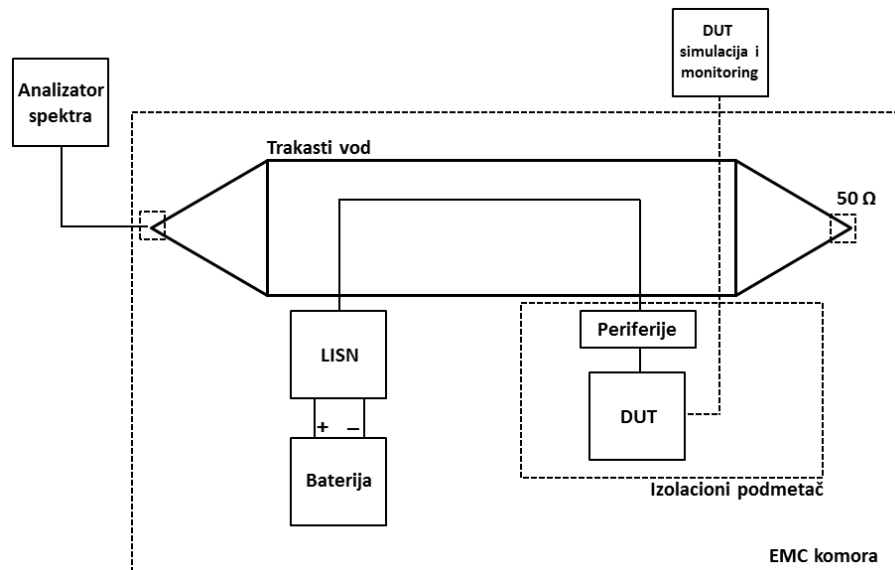


Slika 2.4: Uopštena mjerna postavka za mjerenje zračene emisije.

2.3.2 Mjerenje pomoću trakastog voda

Mjerna metoda pomoću trakastog voda (*Stripline measurement*) ponekad se koristi u automobilskoj industriji za obje vrste mjerenja - i emisije i imuniteta. Ipak, možda najčešće za mjerenje imuniteta na zračenu emisiju. Standardizovana je tako da se može koristiti za testiranje komponenti i modula, kao i kablaze.

Ova metoda je razvijena iz metoda TEM-ćelije (TEM-cell) ali sa redukovanim brojem rezonantnih frekvencija što je značajno pojednostavljuje za izvođenje. U slučaju mjerenja imuniteta, izvodi se izlaganjem DUT-a elektromagnetnom polju generisanom između dvije paralelne ploče (obično na rastojanju od 150 mm). Ukoliko se primjenjuje za mjerenje emisije, trakasti vod ima ulogu prijemnika za jačinu bliskog elektromagnetnog polja od strane DUT-a. Frekvencijski opseg u kome se izvodi ovaj tip mjerenja je 150 kHz - 1 GHz. Ova metoda takođe daje dobar uvid u parazitne efekte (npr. induktivna i kapacitivna sprega) koji nastaju u elektromagnetnoj sredini samog vozila.

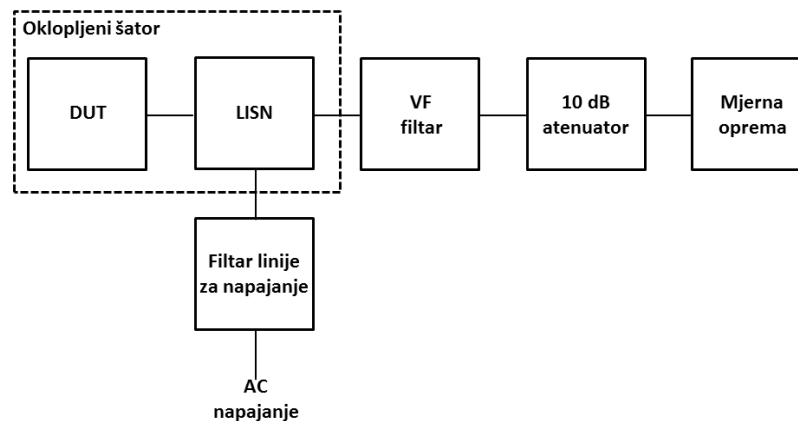


Slika 2.5: Uopštena mjerna postavka za mjerenje emisije pomoću trakastog voda.

2.3.3 Kondukciona emisija

Kondukciona emisija podrazumijeva slučajeve kada je EMI sprovedena do uređaja kroz njegov AC kabl za napajanje. Na taj način, EMI može biti provedena do kompletne prenosne mreže sistema na koji je uređaj povezan i zračiti signal smetnje efikasnije nego na nivou samog uređaja. Ovo je glavni uzrok za potrebom regulisanja ovog tipa emisije. Kondukciona emisija mjeri se na onom kraju LISN-a koji je povezan sa samim uređajem dok je drugi kraj LISN-a povezan na glavni AC izvor napajanja (vidi Sliku 2.6).

Preporučljivo je izvoditi ovu vrstu mjerenja u oklopljenoj prostoriji (ili šatoru) uz dodavanje filtara na napojnu liniju. Uloga ovih filtara je da zaštite glavni AC izvor napajanja od provedene EMI.



Slika 2.6: Uopštena mjerna postavka za mjerenje provedene emisije.

Prije izvođenja samog mjerenja preporučuje se takođe izvođenje jednostavnog validacionog testa da bi se otkrilo prisustvo mogućih eksternih izvora smetnje, a zatim samo mjerenje. Kao mjera zaštite za visokoosjetljivu mjernu opremu, visokopropusni filter i 10 dB atenuator obično se dodaju na ulaz analizatora spektra ili drugog tipa mjernog uređaja, a za dodatnu zaštitu, sam analizator spektra može se podesiti tako da ima interni 10 dB atenuator.

2.4 EMC mjerenja integrisanih kola (IC)

Elektromagnetna kompatibilnost integrisanih kola dobila je na značaju u posljednjih par decenija. Do ranih 1990ih, projektanti električnih kola nisu se suočavali sa ovim problemom u razmjerama u kojima to čine danas. U to vrijeme, problem se uglavnom rješavao na nivou uređaja ili sistema. U godinama koje su uslijedile EMC je postala neizostavan dio dizajna integrisanih kola i to zbog njihove povećane primjene, povećanja kompleksnosti ovih kola, veće koncentracije komponenti, viših radnih frekvencija itd. Današnja integrisana kola rade na frekvencijama do reda GHz sa vremenima paljenja i gašenja reda nekoliko pikosekundi i na veoma niskim naponima. To je dovelo do njihove povećane sklonosti ka emisiji i smanjenju imuniteta na EMI. Projektanti i proizvođači poluprovodničkih komponenti suočavaju se sa teškoćama u ispunjavanju kriterijuma tržišta i proizvodnji visoko imunih integrisanih kola sa niskim nivoima emisije.

EMC mjerne metode za integrisana kola izvedene su iz mjernih tehnika opisanih u prethodnim sekcijama. Na osnovu sljedećih standarda, [5] [9] [10], grupa eksperata i članova iz German National Standardization Organization, DKE iz Robert Bosch GmbH, Infineon Technologies AG i Continental Automotive GmbH, kreirali su Generic IC EMC Test Specification [14] koji opisuje praktične realizacije mjernih postupaka TEM-ćelije, zračene i provedene emisije i imuniteta na iste. Specifikacija takođe sadrži i predloge za šematski i *layout* dizajn testnih kola i mreža za izvođenje mjerenja na različitim pinovima IC-a. Mnogi proizvođači poluprovodničkih komponenti izvode EMC testove na svojim proizvodima u skladu sa ovim standardom. [12]

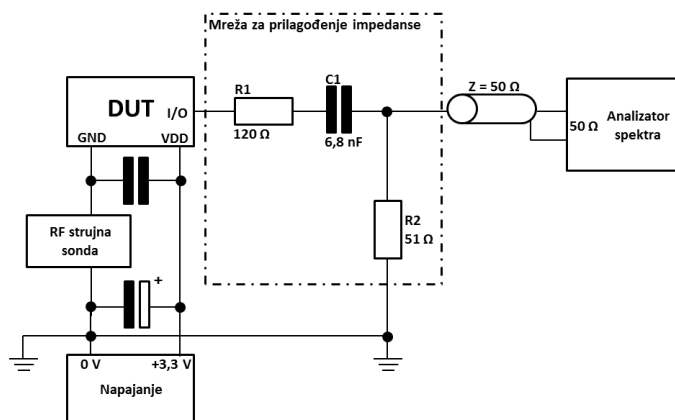
Oslanjajući se na pomenute standarde, mjerenja kondukcione emisije u okviru ovog rada biće izvedena u frekvencijskom opsegu od 30 - 300 MHz primjenom $1/150 \Omega$ mjerne metode. Simulacije će, međutim, biti ograničene na užu frekvencijski opseg kako bi se pojednostavio proračun. Ovaj (pod)opseg biće određen na osnovu rezultata mjerenja i predstavljaoće frekvencijski opseg sa najvećim nivoom kondukcione emisije.

2.4.1 $1/150 \Omega$ metoda za mjerenje kondukcione emisije

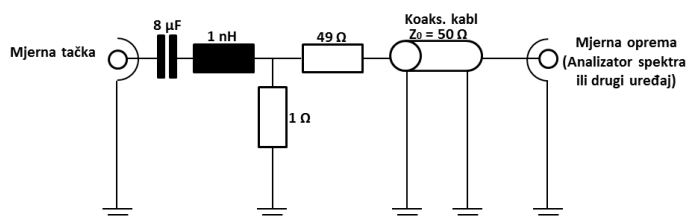
$1/150 \Omega$ metoda za mjerenje provedene emisije specificirana je i predstavljena u standardu IEC 61967-4 [8]. Ona podrazumijeva mjerenje RF struja i napona dodavanjem 1Ω i 150Ω mreža za prilagođenje impedanse, respektivno [15]. Ove mreže za prilagođenje

2.4 EMC mjerenja integrisanih kola (IC)

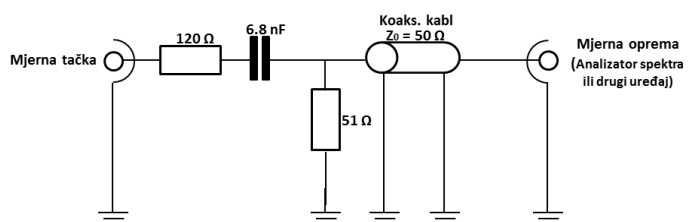
dodaju se direktno na pin DUT-a. Metoda garantuje visok nivo reprodukcije rezultata zahvaljujući svojoj jednostavnosti.



Slika 2.7: Blok dijagram mjerne postavke za 1/150 Ω metodu.



Slika 2.8: Uopštena postavka 1 Ω metode za mjerenje struje smetnje.



Slika 2.9: Uopštena postavka 150 Ω metode za mjerenje napona smetnje.

U poglavlju 4 predstavljena je unaprijeđena metoda za 1 Ω mjerni postupak i provjeren nivo njene ponovljivosti. U poglavlju 7, 1 Ω i 150 Ω mjerni postupci, bazirani na postavci iz poglavlja 4 sprovedeni su na ulazu i izlazu DUT-a koji je, već pomenuti, prekidački podizač napona za osvjetljenje instrument table.

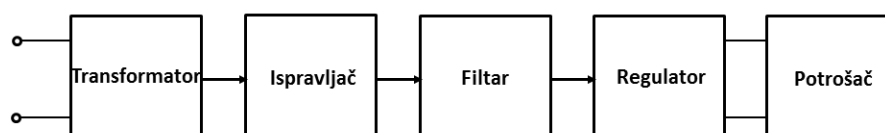
Poglavlje 3

Prekidački izvori napajanja

Izvori napajanja su električni uređaji koji snabdijevaju električnom energijom neko električno opterećenje, odnosno potrošača. U praksi se najviše koriste za konvertovanje napona izvora u oblik koji odgovara potrošaču. Na osnovu režima rada, izvori napajanja mogu se podijeliti u dvije kategorije:

- Linearni izvori napajanja
- Prekidački izvori napajanja

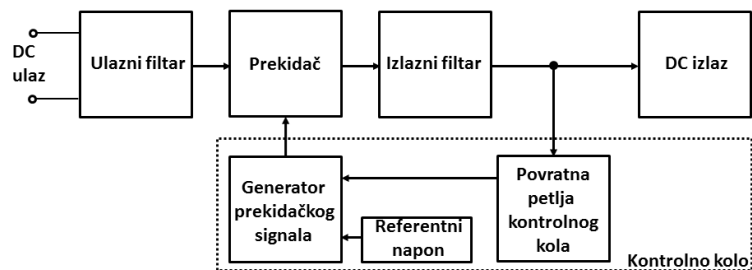
Linearni izvori napajanja imaju veoma dobra regulaciona svojstva: malu izlaznu otpornost, veliku stabilnost rada, nisku stopu greške i ne proizvode smetnje drugim uređajima (smetnja koju proizvode zanemarljivog je nivoa). Sa druge strane, ovi izvori napajanja velikih su dimenzija, imaju veću potrošnju snage i manje su efikasni od prekidačkih izvora napajanja. AC-DC transformator na ulazu zahtijeva velike odvođe toplote, što povećava dimenzije sistema. Ovi izvori napajanja se, stoga, primjenjuju u situacijama gdje je izlazni napon približno jednak ulaznom jer tu imaju veću efikasnost, kao i u situacijama gdje dimenzije sistema nisu od suštinske važnosti već dobre regulatorne i EMC karakteristike.



Slika 3.1: Uopšteni blok dijagram linearnog izvora napajanja.

3.1 Spuštač napona - Buck konverter

Prekidački izvori napajanja, za razliku od linearnih, ne sadrže velike transformatore pa samim tim nema potrebe ni za hladnjacima, što dalje znači da su kompaktnih dimenzija i sa malim gubicima. Njihova efikasnost je velika i dostiže i preko 90% , a mogu raditi i na širem opsegu ulaznih napona. Međutim, zbog velike brzine komutacije, prekidački izvori napajanja imaju tendenciju generisanja visokofrekventnih smetnji i time mogu stvoriti probleme drugim uređajima i sistemima u neposrednoj blizini. Upravo je ovaj tip uređaja najčešći uzrok provedene emisije u integrisanim kolima. Postoje

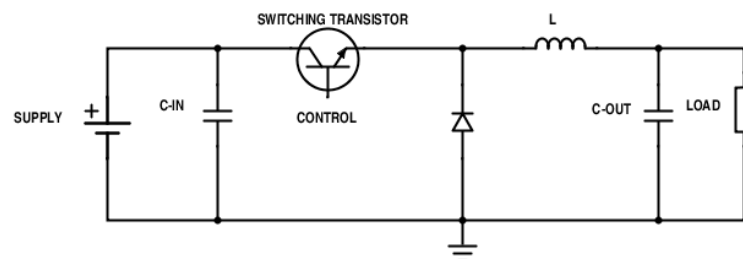


Slika 3.2: Uopšteni blok dijagram prekidačkog izvora napajanja.

različite vrste prekidačkih izvora napajanja: spuštač napona (buck converter), podizač napona (boost converter), buck-boost konverter, sepic konverter, ćuk konverter itd. U ovom radu biće opisane samo dvije najosnovnije topologije buck i boost konvertera, koje će ujedno biti i primjeri za EMC probleme koji nastaju usljed provedene emisije.

3.1 Spuštač napona - Buck konverter

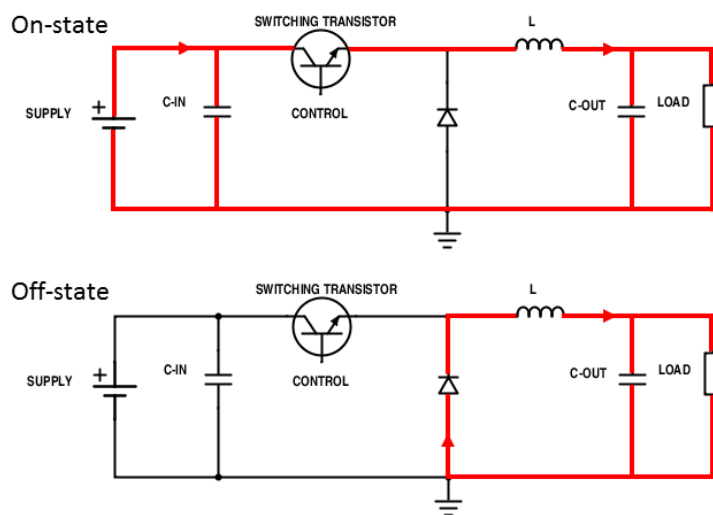
Buck konverter je DC-DC spuštač napona. On smanjuje visoke vrijednosti napona na niske, potrebne za rad integrisanih kola ili drugih vrsta uređaja koji funkcionišu na malim naponima. Uopštena topologija buck konvertera prikazana je na slici 3.3.



Slika 3.3: Uopštena šema buck konvertera.

3.1 Spuštač napona - Buck konverter

Osnovna radna stanja ovog prekidačkog izvora napajanja mogu se objasniti kroz promjenu struje i napona na kalemu. Zavisno od toga da li tranzistor (koji ima ulogu prekidača) provodi ili ne provodi, razlikujemo dva radna stanja: *on stanje* i *off stanje*.



Slika 3.4: Protok struje tokom *on* i *off* stanja buck konvertera.

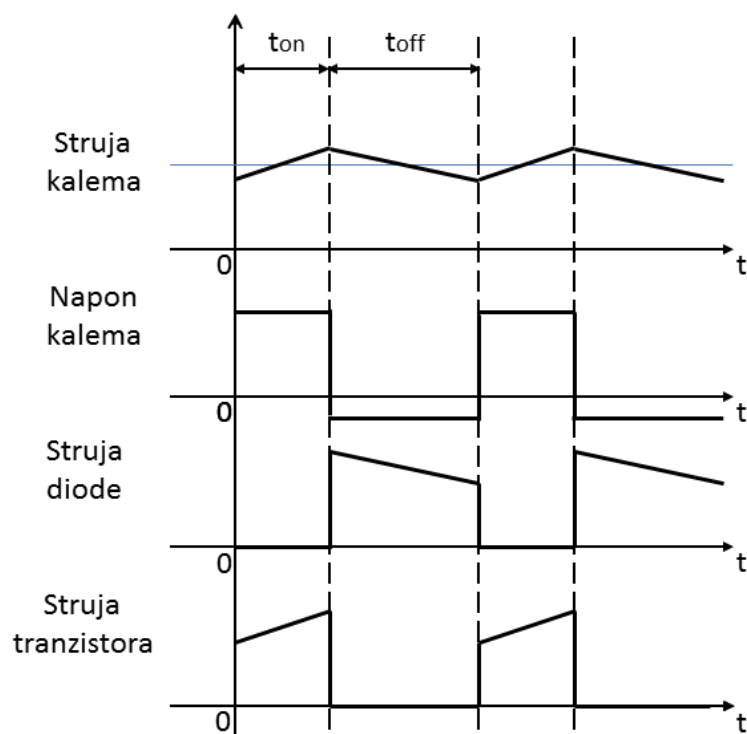
Rad počinje *off* stanjem. Tranzistor ne provodi i strujni tok u kolu nije uspostavljen. Kada se prekidač zatvori po prvi put (tranzistor provodi) dolazi do uspostavljanja strujnog toka u kolu. Usljed protoka struje dolazi do pojave napona na kalemu, koji predstavlja reakciju kalema na promjenu struje u kolu i iznosi:

$$U = L \frac{di}{dt}$$

Ovaj napon je suprotnog polariteta u odnosu na ulazni napon i na taj način smanjuje pad napona na potrošaču, odnosno na izlazu kola. Tokom ovog perioda kalem akumulira energiju u obliku magnetnog polja. Kada se prekidač otvori (tranzistor je zakočen/ne provodi), jačina struje u kolu počinje da opada iz razloga što naponski izvor sada nije povezan sa ostatkom kola. U toku ovog perioda kalem oslobađa energiju, akumulisanu tokom *on* stanja, i njome podržava protok struje kroz direktno polarisanu diodu do ostatka kola tj. ponaša se kao naponski izvor. Ako se prekidač ponovo zatvori, prije nego što jačina struje kroz kalem padne na nulu, postojaće uvijek pad napona na

3.1 Spuštač napona - Buck konverter

potrošaču i kolo će raditi u kontinualnom režimu rada. Karakteristike kontinualnog režima rada date su vremenskim dijagramima na slici 3.5.

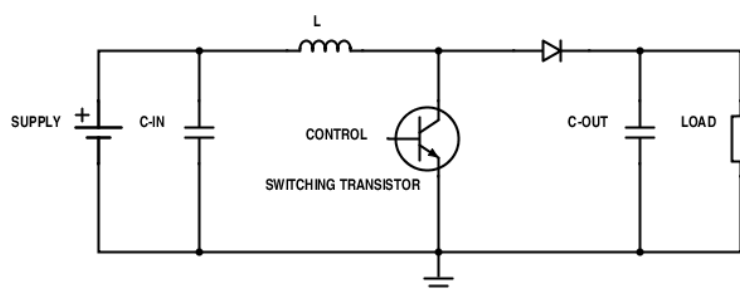


Slika 3.5: Vremenski dijagrami buck konvertera u kontinualnom režimu rada.

Buck konverteri najčešće se koriste u snabdijevanju niskonaponskih uređaja, kao što su mikroprocesori i mikrokontroleri. Jedan od primjera upotrebe buck konvertera jeste redukcija glavnog napona kompjutera na nivo potreban za rad procesora.

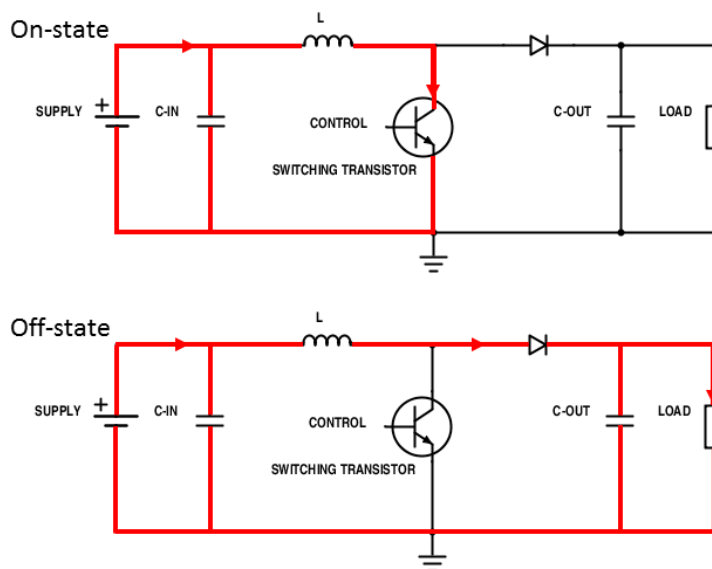
3.2 Podizač napona - Boost konverter

Boost konverter je DC-DC podizač napona, što ukazuje da je izlazni napon ovog kola veći od ulaznog. Topologija ovog izvora napajanja slična je buck konverteru, ali je princip rada drugačiji. Ulazna snaga za podizač napona može poticati od bilo kojeg odgovarajućeg jednosmjernog izvora kao što su baterija, solarni panel ili generator jednosmjerne struje.



Slika 3.6: Uopštena šema boost konvertera.

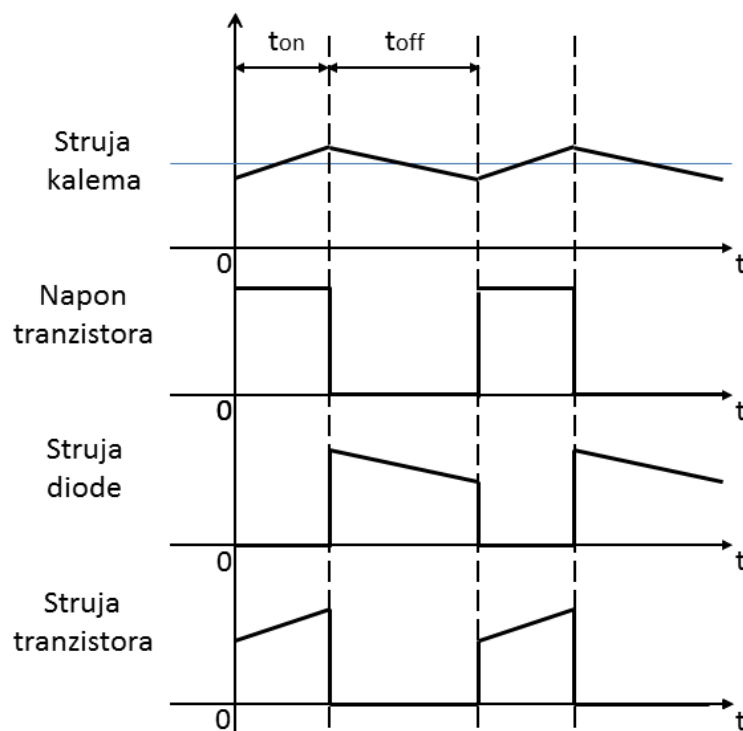
Kao i u slučaju buck konvertera, za boost konverter takođe možemo definisati dva radna stanja - *on* i *off* stanje, opet u zavisnosti da li tranzistor provodi ili ne.



Slika 3.7: Protok struje tokom *on* i *off* stanja boost konvertera.

3.2 Podizač napona - Boost konverter

Počecemo od *on* stanja kada je prekidač zatvoren (tranzistor provodi) i jačina struje u kolu se povećava. Tokom ovog perioda, kalem akumulira energiju u obliku magnetnog polja. Kada se prekidač otvori (tranzistor ne provodi) impedansa kola se povećava zato što potrošač postaje dio strujnog toka. Da bi se strujni tok održao kroz diodu i potrošač, kalem postaje inverzno polarisan i praktično se ponaša kao naponski izvor, redno vezan na već postojeći ulazni napon tako što oslobađa energiju, akumulisanu tokom *on* perioda. Tokom ovog perioda, izlazni kondenzator akumulira energiju u obliku električnog polja. Kada se prekidač ponovo zatvori (tranzistor provodi), kalem ponovo počinje da akumulira energiju, a u isto vrijeme se izlazni kondenzator prazni kroz potrošač, dok inverzno polarisana dioda sprečava njegovo pražnjenje kroz tranzistor. Ako je komutacioni period podešen tako da struja kroz kalem nikada ne pada na nulu, potrošač će u svakom trenutku "vidjeti" veći napon nego što je na ulazu kola.



Slika 3.8: Vremenski dijagrami boost konvertera u kontinualnom režimu rada.

Boost konverteri se najčešće koriste u baterijskim napojnim sistemima jer se njihovom implementacijom može smanjiti broj potrebnih baterijskih ćelija (npr. sistemi za osvetljenje, sistemi za napajanje u hibridnim el. vozilima i sl.). Takođe se mogu

koristiti za napajanje prenosnih sistema za osvjetljenje, kao što su baterijske lampe, osvjetljenje LCD ekrana itd.

3.3 Tehnike redukovanja kondukcijske emisije

Tokom godina razvijene su brojne procedure i tehnike za redukovanje uticaja EMI, koje se primjenjuju pri dizajnu električnih kola. U ovom dijelu biće navedene neke od metoda koje se tiču projektovanja prekidačkih izvora napajanja u cilju prevencije uticaja provedene EMI, a kasnije će biti i implementirane u dizajn testnog modula u radu. Ove metode uključuju postupke kao što su: uzemljenje, dodavanje filtera, pravilna distribucija komponenti, dizajn komutacione tačke itd.

3.3.1 Dizajn ulaznog filtera

Cilj projektovanja ulaznog filtera jeste potiskivanje normalnih *common mode* (CM) i diferencijalnih *diferencijal mode* (DM) smetnji [16] [3] [2]. Prekidačka funkcija MOSFET-a, tipično primijenjivana u prekidačkim izvorima napajanja u automobilskoj industriji, izaziva strujne impulse na ulazu i varijacije napona na izlazu kola.

$$I_{CM} = C_{par} \frac{dU}{dt}$$
$$U_{DM} = L \frac{di}{dt}$$

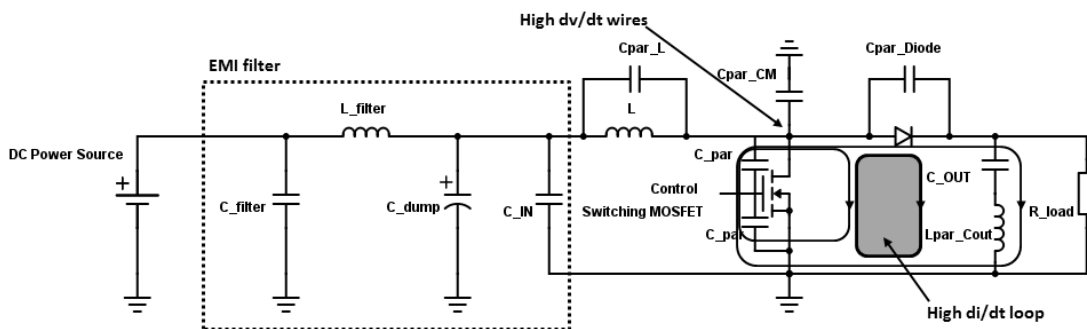
Implementacijom ulaznog filtera i metoda koje će biti opisane u narednim sekcijama, ovi neželjeni efekti mogu se redukovati na prihvatljivi nivo. Ulazni filter obično je propusnik niskih učestanosti, postavljen između prekidačkog izvora napajanja i njegovog izvora snage (*input power source*). Topologija filtera zavisi od same primjene, ali obično je u pitanju pasivni LC filter ili neka od njegovih varijanti, koja mora imati sposobnost da oslabi i normalne i diferencijalne smetnje.

Najčešći izvori CM smetnji u prekidačkim izvorima napajanja su parazitne kapacitivnosti diode i MOSFET-a. Kako drejn (*drain*) MOSFET-a ima visoko promjenljivu stopu dv/dt , tako je najveća parazitna kapacitivnost upravo od drejna ka uzemljenju. Odatle možemo zaključiti da se EMI od strane ovih izvora može smanjiti dodavanjem *stray* kondenzatora između komponenti kola i uzemljenja.

Parazitne induktivnosti u kombinaciji sa visoko promjenljivom stopom di/dt u pulsirajućim prekidačkim strujama, dovode do pojave diferencijalnih smetnji. DM smetnje

3.3 Tehnike redukovanja kondukcione emisije

su direktno povezane sa frekvencijom komutacije prekidačkog izvora napajanja. Ove vrste smetnje mogu se ublažiti pravilnim layout dizajnom dodavanjem snubber kola itd. Osnovni koraci u projektovanju ulazog filtra su [17]:



Slika 3.9: Boost konverter sa pojednostavljenom šemom ulaznog filtra.

1. Izmjeriti normalni (CM) i diferencijalni (DM) šum na ulazu kola, bez umetanja filtra, i odrediti nivo šuma na frekvenciji komutacije (*switching frequency*).
2. Izračunati potrebno slabljenje:

$$(U_{req-cm})_{dB} = (U_{cm})_{dB} - (U_{limit})_{dB}$$

$$(U_{req-dm})_{dB} = (U_{dm})_{dB} - (U_{limit})_{dB}$$

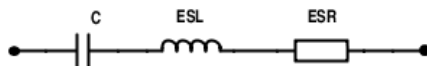
3. Odrediti graničnu frekvenciju filtra.
4. Izračunati vrijednosti i izvršiti selekciju komponenti.

3.3.2 Ulazna kapacitivnost

U zavisnosti od vrste same primjene prekidačkog izvora napajanja, određuju se vrijednosti ulazne i izlazne kapacitivnosti. Pri odabiru ovih vrijednosti mora se obratiti pažnja na zahtjeve sistema, kao i na prostor koji će zauzimati ove komponente na štampanoj ploči (po mogućnosti što manji), ali i na cijenu. [18]

Na visokim frekvencijama, impedansa kondenzatora postaje kompleksna zato što u tom frekventnom području dolaze do izražaja uticaji ekvivalentnog rednog induktiviteta (ESL) i otpornosti (ESR). Model realnog kondenzatora dat je na slici 3.10.

3.3 Tehnike redukovanja kondukcione emisije



Slika 3.10: Ekvivalentno kolo realnog kondenzatora na visokim frekvencijama.

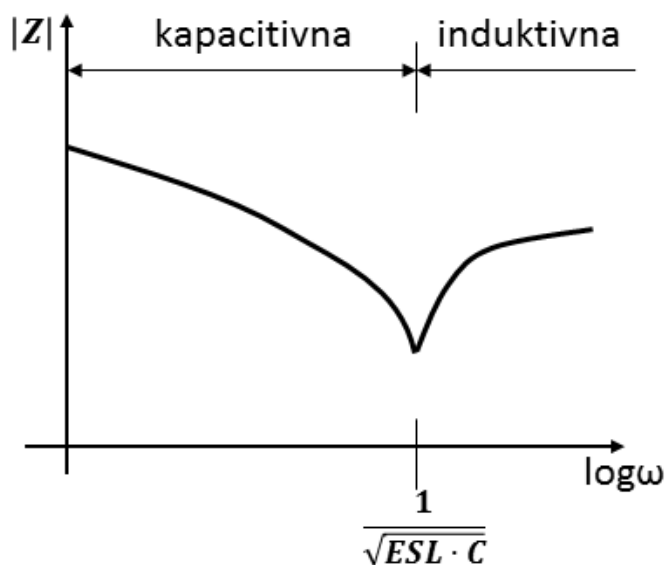
Ekvivalentna impedansa ovog kondenzatora računa se prema formuli:

$$Z = ESR + j\omega ESL + \frac{1}{j\omega C} = ESR + j \frac{\omega^2 ESLC - 1}{\omega C}$$

Apsolutna vrijednost impedanse iznosi:

$$|Z| = \sqrt{ESR^2 + \left(\frac{\omega^2 ESLC - 1}{\omega C}\right)^2} = \frac{\sqrt{\omega^2 ESR^2 C^2 + (\omega^2 ESLC - 1)^2}}{\omega C}$$

Promjena ove impedanse u zavisnosti od frekvencije data je na slici 3.11



Slika 3.11: Zavisnost impedanse realnog kondenzatora od frekvencije.

Kao što se može uočiti sa grafika, nakon dostizanja sopstvene rezonanse (Tomsonova formula: $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{ESLC}}$) kondenzator počinje da se ponaša kao kalem zbog dominantnog efekta ekvivalentnog induktiviteta. Ova marginalna frekvencija obrnuto je proporcionalna kapacitivnosti. U cilju postizanja boljih performansi filtriranja i povećanja propusnog opsega filtra, ulazna kapacitivnost se u praksi najčešće realizuje

3.3 Tehnike redukovanja kondukcione emisije

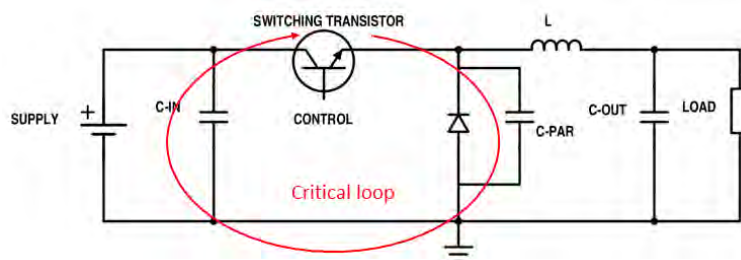
kao paralelna veza dva, tri kondenzatora, čija ukupna ekvivalentna kapacitivnost odgovara ulaznoj kapacitivnosti, zadatoj u zahtjevima projekta. Ovo će biti primijenjeno na modulu u ovom radu. Na primjer, ulazna kapacitivnost od $1.1\mu\text{F}$ može se realizovati kao paralelna veza kondenzatora vrijednosti $1\mu\text{F}$ i 100 nF . Slična tehnika se može primijeniti i kada su u pitanju kalemovi. Razlika je u ekvivalentnom kolu. Iako se korišćenjem više paralelno vezanih kondenzatora poboljšavaju performanse filtriranja, sa druge strane javlja se problem smanjenja dimenzija kritične petlje (o kojoj će biti više riječi u 3.3.3). Jedno od pravila projektovanja, koje se u ovom slučaju primjenjuje u praksi, jeste postavljanje kondenzatora manje kapacitivnosti (veće marginalne frekvencije) bliže komutacionoj tački tj. tranzistoru. Na taj način se postiže da struje smetnje na visokim frekvencijama zatvaraju jako malu petlju. [12]

3.3.3 Teorija kritične petlje [1]

Teorija kritične petlje predstavlja polaznu tačku za mnoga poboljšanja rada prekidačkih izvora napajanja. Bazira se na nepoželjnom fenomenu koji se može javiti u kolima sa dvije poluprovodničke komponente, povezane na istom čvoru. U ovom dijelu, teorija kritične petlje biće objašnjena na primjerima buck i boost konvertera. Kao što je opisano u 3.1 i 3.2 buck i boost konverteri imaju dva radna stanja: *on* i *off* stanje. Tokom svakog od navedenih radnih stanja, aktivna je samo jedna poluprovodnička komponenta u kolu (ili dioda ili tranzistor). Međutim, usljed neidealnosti realnih komponenti i njihovog ograničenog vremena komutacije, može se desiti trenutak u kome obje poluprovodničke komponente provode. Ova pojava se naziva kros-kondukcija.

3.3.3.1 Buck konverter

Ako se ponovo osvrnemo na karakteristike i princip rada buck konvertera, možemo uočiti da se, u trenutku prelaska iz *off* stanja u *on* stanje, tranzistor pali i počinje da provodi, ali dioda ne može odmah da prestane da provodi zbog difuznog kapaciteta (C-PAR na slici 3.12). Dakle, obje poluprovodničke komponente provode dok se difuzna kapacitivost diode ne isprazni [19] [20] [21] [22] [23]. U međuvremenu, tranzijentna struja smetnje prolazi kroz petlju i može izazvati EMI okolnim uređajima i sistemima.

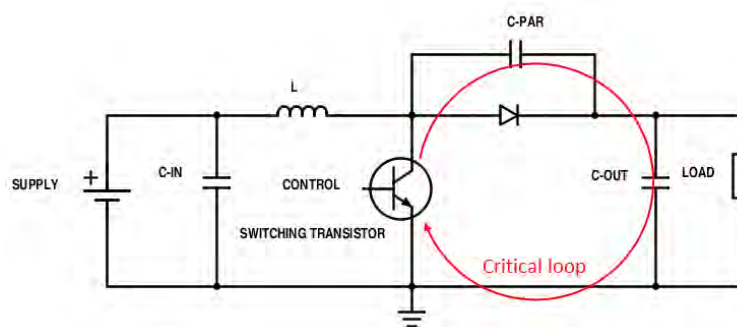


Slika 3.12: Kritična petlja buck konvertera.

Cilj je smanjenje vremena pražnjenja difuzne kapacitivnosti, a to se može postići smanjenjem dimenzija petlje, induktanse petlje, kao i parazitne rezonanse.

3.3.3.2 Boost konverter

Kao i u slučaju buck konvertera, dimenzije kritične petlje boost konvertera moraju se svesti na minimum. Razlika je samo u tome što je u ovom kolu kritična petlja izlazna petlja i trzajna struja smetnje prolazi kroz potrošač.



Slika 3.13: Kritična petlja boost konvertera.

3.3.4 Komutaciona tačka

Komutaciona tačka predstavlja najvažniji čvor u prekidačkim izvorima napajanja, pa je samim tim i najkritičnija tačka kola zato što su na njoj pristune velike oscilacije visokofrekventnih napona. Da bi se izbjegle velike oscilacije struje u ovoj tački, kapacitivnost u toj oblasti treba da bude svedena na minimum zato što je struja proporcionalna kapacitivnosti i pomjeni napona u datoj tački [24] [25] [26].

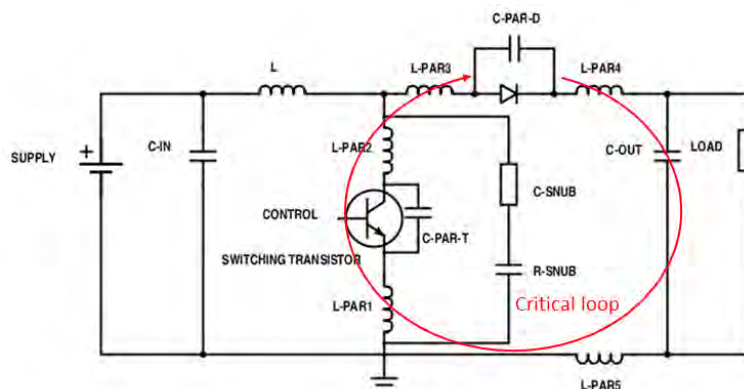
$$i_{switching_point} = C \frac{dU}{dt}$$

Smanjenje kapacitivnosti može se postići u layout dizajnu, održavanjem dimenzija komutacione tačke minimalnim.

3.3.5 Snubber kolo

Da bi se smanjile moguće štetne oscilacije napona na komutacionoj tački, nekad nije dovoljno smanjiti samo dimenzije već je potrebna i primjena drugih tehnika, kao što je dodavanje snubber kola na prekidač. Osim za redukciju provedene emisije, ovo kolo se stavlja i kao mjera zaštite za sami prekidač koji može biti uništen ukoliko oscilacije napona prelaze maksimalnu dozvoljenu vrijednost na prekidaču.

3.3 Tehnike redukovanja kondukcijske emisije



Slika 3.14: Snubber kolo za boost konverter

Parazitne induktanse koje se mogu javiti oko komutacione tačke, mogu se ublažiti smanjenjem njenih dimenzija. Pri odabiru MOSFET-a i dioda, takođe se mora voditi računa o njihovim parazitnim efektima i trebalo bi odabrati komponente sa minimalnim vrijednostima parazitne kapacitivnosti.

Snubber kolo realizuje se kao redna veza otpornika i kondenzatora. Ono stvara alternativni put do uzemljenja za struju koja prolazi kroz parazitne elemente i, na taj način, ublažava oscilacije napona pri paljenju prekidača. Ove oscilacije nastaju usljed prisustva parazitne kapacitance (C_{par}) i induktanse (L_{par}) u kolu. Nakon određivanja vrijednosti frekvencije ovih oscilacija, dodaje se kondenzator između komutacione tačke i uzemljenja, takve vrijednosti da smanji frekvenciju oscilovanja na pola. Vrijednosti komponenti u snubberu računaju se prema formulama:

$$C_{Snubb} = 3C_{par}$$

$$R_{Snubb} = \sqrt{\frac{L_{par}}{\frac{C_{Snubb}}{3}}}$$

Dodavanje snubber kola postalo je neizostavan dio ranog stadijuma projektovanja svakog savremenog prekidačkog izvora napajanja, a parametri snubbera računaju se na osnovu rezultata dobijenih mjerenjem napona na komutacionoj tački [25] [12] [27] [28].

3.3.6 Uzemljenje

Uzemljenje predstavlja električno-provodnu površinu, koja je povezana na električnu masu. Kada su u pitanju štampane ploče, uzemljenje je najčešće realizovano kao velika površina prekirivena slojem bakra, koja ne sadrži komponente i signalne putanje. U višeslojnim štampanim pločama, uzemljenja su takođe realizovana i kao posebni slojevi. To projektantu električnog kola omogućava lakše uzemljavanje komponenti i ne zahtijeva dodavanje putanja na tabli već samo bušenje rupa (*via*), čime se komponenta povezuje sa pomenutim posebnim slojem - uzemljenjem.

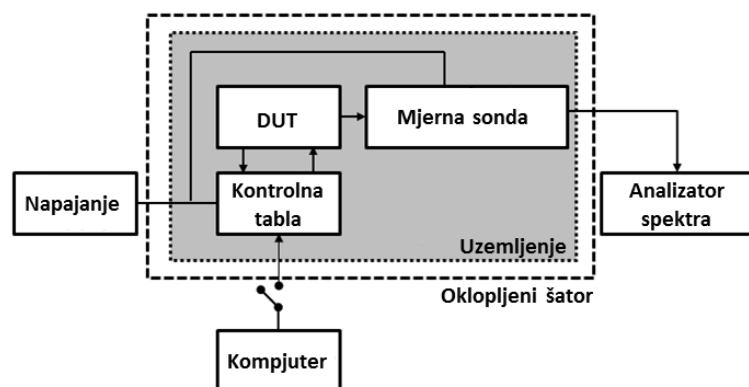
Dobro uzemljenje kod štampanih ploča značajno smanjuje smetnje i EMI, i sprečava interferenciju između signalnih putanja na ploči (*cross-talk*). Na primjer, pri promjeni stanja digitalnih kola veliki strujni impulsi prolaze kroz aktivne komponente (tranzistore, integrisana kola) do uzemljenja. Isto tako, ukoliko izvor napajanja i uzemljenje imaju značajnu impedansu, pad napona na njima može proizvesti naponske impulse, koji mogu nanijeti smetnje drugim djelovima kola (*ground bounce*). Velika provodna površina ploče za uzemljenje ima mnogo manju impedansu od signalnih putanja na ploči, pa strujni impulsi stvaraju manje smetnje od naponskih u višeslojnim štampanim pločama. Slojevi za uzemljenje, u višeslojnim štampanim pločama, nekad su ukombinovani sa slojevima koji provode signale za napajanje djelova kola (*power layer*), odnosno koji distribuišu jednosmjernu struju aktivnim djelovima kola. Ovakav jedan sloj, paralelno sa slojem za uzemljenje, čini jedan veliki razdvojni kondenzator (*decoupling capacitor*) koji sprečava spregu smetnje od strane jednog električnog kola do drugog kroz napajanje.

Ploče za uzemljenje nekad su realizovane kao dvije odvojene ploče, povezane tankom putanjom. Ovako se realizuje razdvajanje analognog od digitalnog uzemljenja ili ulaza i izlaza pojačavača. Tanki putanja ima dovoljnu impedansu da drži obje vrste uzemljenja na istom potencijalu, dok sa druge strane sprečava struje od jedne strane da budu provedene do druge strane uzemljenja. Uticaj uzemljenja na performanse kola biće prikazan u narednim poglavljima.

Poglavlje 4

Mjerna postavka

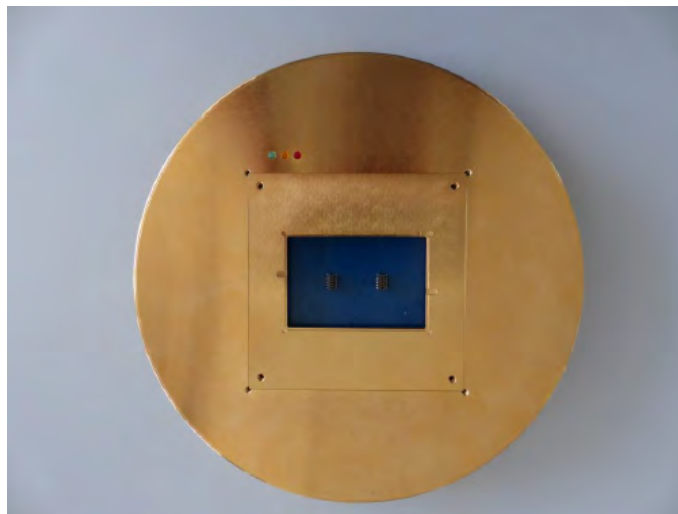
Mjerna postavka, opisana u ovom poglavlju, razvijena u je u Bosch ispostavi u Budimpešti u sektoru CM-IS/ECF2-Bp [12]. Ona predstavlja unaprijeđenu komercijalnu realizaciju $1/150 \Omega$ mjerne metode kompanije Langer EMV Technik GmbH [29]. Unapređenje podrazumijeva prilagođenje mjerne postavke za ispitivanje hardver modula, a ne samo integrisanih kola, kako je prvobitno projektovana. Ono obuhvata i dizajn kontrolne table sa mogućnošću prilagođavanja za potrebe različitih projekata.



Slika 4.1: Blok dijagram mjerne postavke.

Sa slike 4.1 se lako da uočiti da, DUT, aktivna mjerna sonda i kontrolna tabla dijele isto uzemljenje sa odličnim provodnim sposobnostima. USB port omogućava povezivanje sa kompjuterom, koje je potrebno za podešavanje kontrolnih operacija na DUT-u ili za dodatne informacije nakon mjerenja. Za prikaz i čuvanje rezultata korišćen je analizator spektra.

Štampana ploča sa modulom tj. DUT stavlja se na posebnu ploču koja se naziva adaptivna tabla. Ona sadrži, zavisno od primjene, jedan ili dva *board-to-board*¹ konektora koji postavljeni DUT povezuju sa kontrolnom tablom, koja je smještena na zadnjoj strani adaptivne table. Zapravo, adaptivna tabla je posrednik između DUT-a i kontrolne table. Kontrolna tabla napaja DUT i dovodi kontrolne signale, ukoliko je potrebno. Za mjerenje u ovom poglavlju korišćen je jednosmjerni napon od 12V.



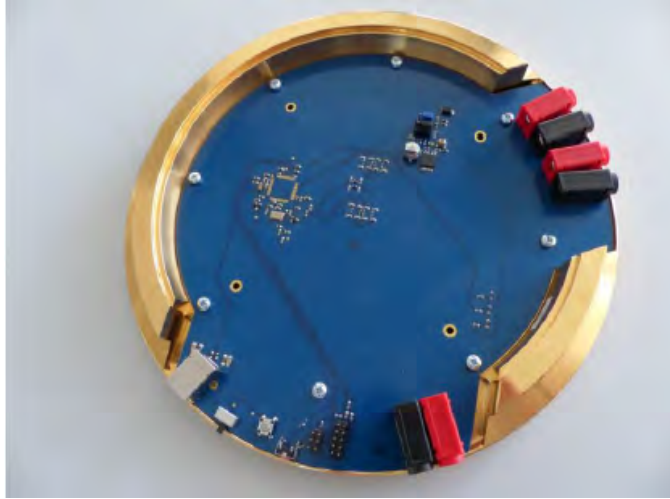
Slika 4.2: Adaptivna tabla sa uzemljenjem. [12]

4.1 Kontrolna tabla

Kontrolna tabla sadrži mikrokontroler, čiji rad pokreće linearni konvertor napona, i koji ima sljedeće specifikacije:

- Jednostavnost, nije predviđen za komplikovane kalkulacije
- Režim rada na 5V ili 3.3V, kako bi mogao omogućiti različite naponske nivoe za digitalne signale
- I2C port (*Inter-Integrated Circuit port*)
- SPI port (*Serial Peripheral Interface port*)
- Jednostavna programabilnost kroz USB-2.0 port
- PWM signalni portovi
- Digitalni u analogni konverter

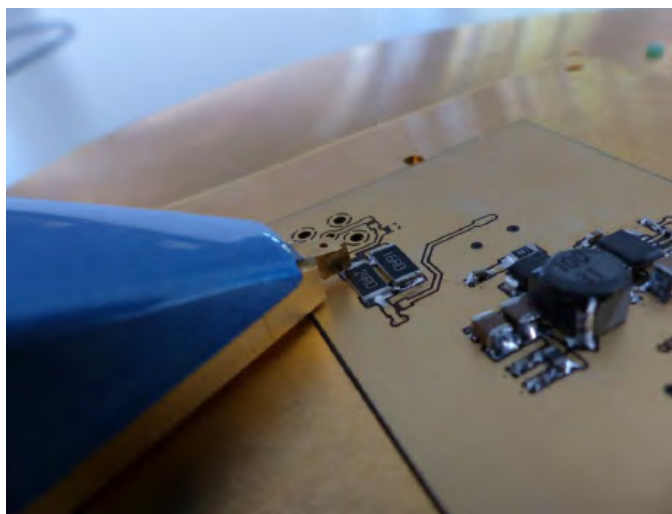
¹Board-to-board konektor - posebna vrsta konektora za međusobno povezivanje štampanih ploča



Slika 4.3: Kontrolna tabla montirana na zadnjoj strani adaptivne table. [12]

4.2 Mjerna sonda

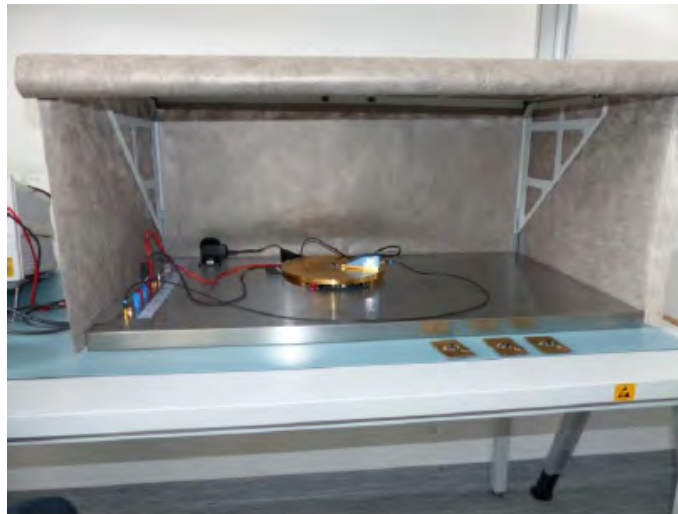
Mjerna sonda može služiti za mjerenje struje ili napona, a postavlja se obično na ulaz ili izlaz kola DUT-a. Vrh sonde treba da dodiruje mjesto na modulu gdje želimo ispitati provedenu emisiju, jer sadrži šant za napone ili struje smetnje u kolu kojim ih izdvaja za mjerenje. Izlazni SMA konektor sonde povezan je na analizator spektra (ili drugi uređaj za prikaz rezultata) preko koaksijalnog kabela i omogućava vizualizaciju mjernih rezultata sa šant otpornika u samoj sondi.



Slika 4.4: Langer sonda prikačena na mjernu tačku na modulu. [12]

4.3 Organizacija mjerne postavke

Da bi se mjerna procedura izolovala od uticaja okolne opreme i sistema, kompletna mjerna postavka postavljena je u "oklopljeni šator". Mjerna postavka je veoma jednostavna i pristupačna za rad i daje pouzdane rezultate.



Slika 4.5: Konačna organizacija mjerne postavke. [12]

4.4 Ponovljivost mjernih rezultata

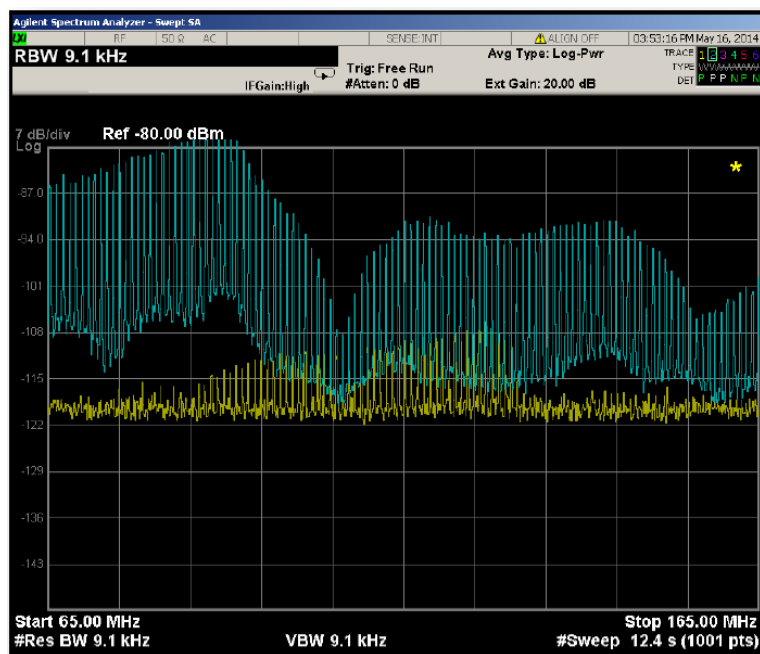
Da bi se ispitao nivo reprodukcije mjernih rezultata, dobijenih pomoću ove mjerne postavke, ponovljeno je prošlogodišnje mjerenje iz [12]. To podrazumijeva ponovno mjerenje provedene emisije buck konverter modula. Mjerni rezultati prikazuju provedenu emisiju izazvanu od strane struje smetnje, a izmjereni su na ulazu kola.

Kao što se može uočiti sa slika 4.6 i 4.7, mjerenje ima visok nivo reprodukcije mjernih rezultata. Ovdje su upoređene dvije varijante modula. Jedna varijanta ima dobro realizovano uzemljenje (žuti signal na slici 4.7), dok druga varijanta nema (zeleni trag na slici 4.7). Na osnovu rezultata mjerenja iz tog rada i prethodnih iskustava iz drugih projekata, došlo se do zaključka da uzemljenje ima najveći efekat na smanjenje/ublažavanje uticaja EMI, kada se radi o provedenoj emisiji. Dobrim uzemljenjem uticaj EMI može se svesti na prihvatljivi nivo, a dalja poboljšanja kola mogu se ostvariti promjenom komponenti, dodavanjem snubbera itd.

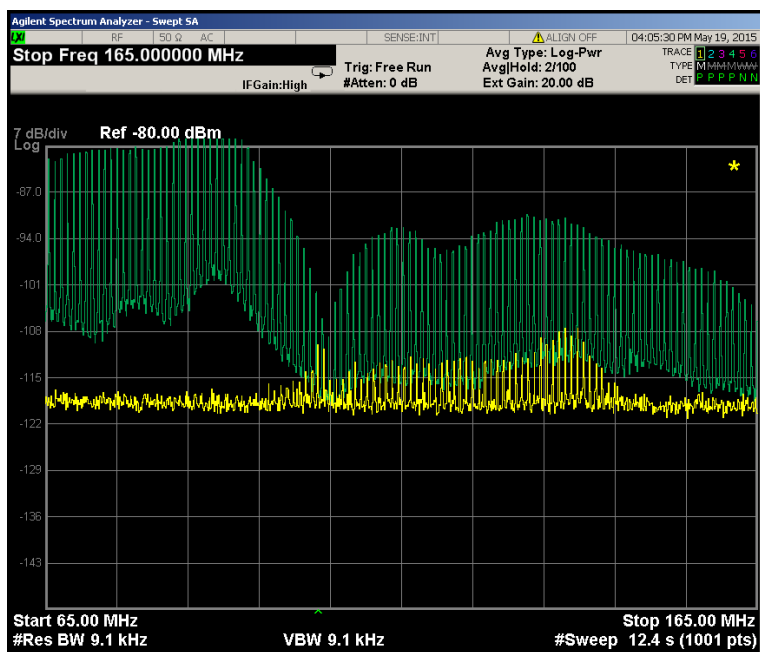
Ideja istraživanja u ovom radu jeste uspostavljanje procedure za optimizaciju modula kroz simulacije (2D i 3D) i validaciju efikasnosti optimizacije, primjenom opisane mjerne postavke na finalnom testnom modulu. Iz tih razloga, ova mjerna postavka biće primijenjena za mjerenje provedene emisije boost konvertera, a dobijeni rezultati poslužiće kao referenca za simulaciju. Na osnovu toga biće određeni koraci za pripremu i poboljšanje simulacionog modela tako da dobro aproksimira uslove iz mjerne postavke (dizajn mjerne sonde itd.).

Za potrebe mjerenja u ovom radu biće izvršena neka prilagođenja opisane mjerne postavke, iz prostog razloga što je DUT u radu boost, a ne buck konverter. Boost modul zahtijeva, pored napajanja, eksitacione signale kojima se definiše frekvencija komutacije, kao i jačina osvjetljenja ekrana. Funkcije za ove eksitacione signale biće dodate kontrolnoj tabli putem flash-ovanja kontrolne table i definisanja signala u posebnom software-u.

4.4 Ponovljivost mjernih rezultata



Slika 4.6: Rezultati prošlogodišnjeg mjerenja.



Slika 4.7: Rezultati ponovljenog mjerenja.

Poglavlje 5

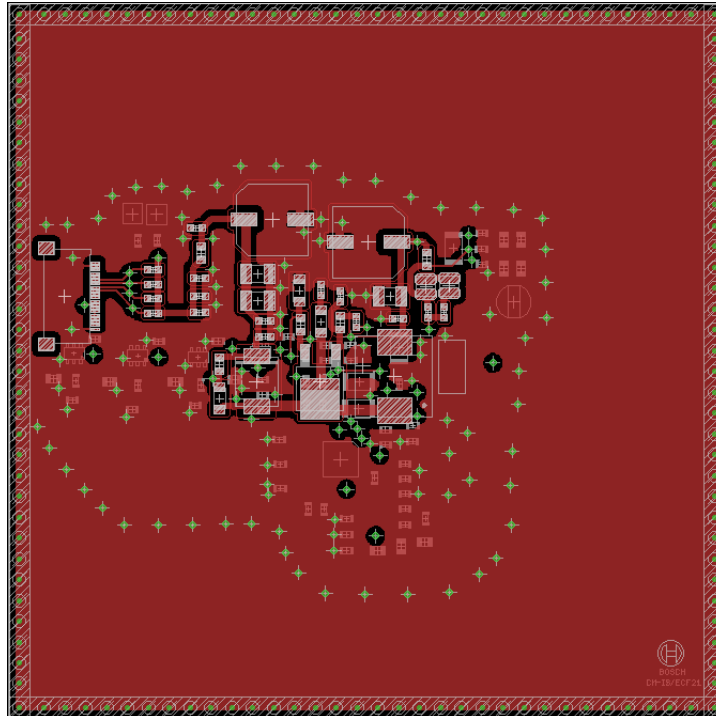
Layout dizajn

Tema ovog poglavlja je projektovanje i proizvodnja nove štampane ploče sa boost konverter modulom [26]. Ova ploča će predstavljati referencu za simulacioni model.

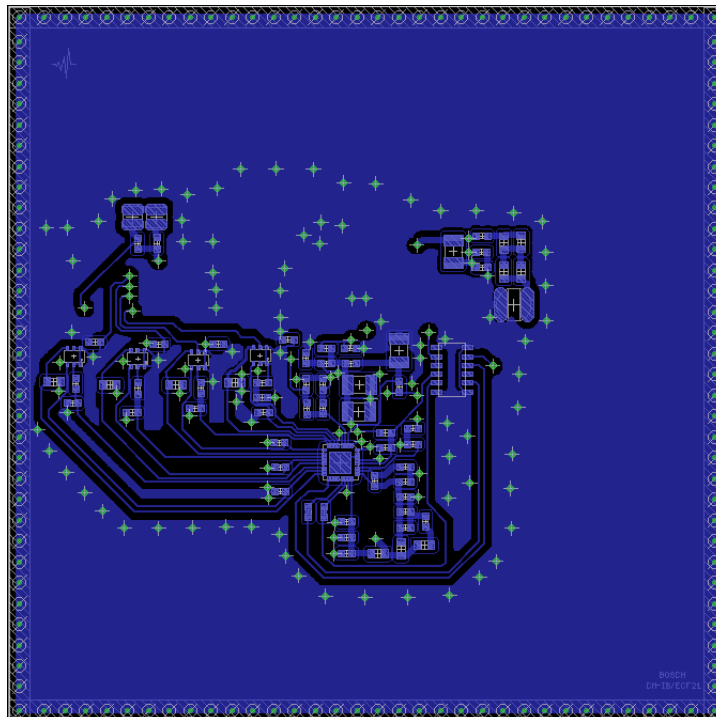
Upoređivanjem rezultata između mjerenja i simulacija, kao i analizom njihovih razlika, moguće je zaključiti koji efekti (od strane opreme, okruženja, materijala itd.) moraju biti uključeni u simulacionu metodu, a koji su zanemarljivi. Na taj način, moguće je, korak po korak, razviti simulacionu proceduru za određeni tip modula.

Layout dizajn štampane ploče sa modulom izvršen je u programu EAGLE CAD. Oslanjajući se na prethodni projekat sa ovim tipom modula, layout je izmijenjen i dodati su filtri koji će biti potrebni za EMC mjerenja provedene emisije, a koji ne utiču na rad kola. EMC mjerenja ovog modula izvedena su na sistemu, opisanom u poglavlju 4. Dimenzije ploče sa modulom prilagođene su da odgovaraju potrebama mjerne postavke i iznose 103 x 103 mm. Štampana ploča ima 4 (bakarna) sloja sljedeće organizacije:

1. Signalni sloj (komponente)
2. Uzemljenje
3. Signali za napajanje
4. Signalni sloj (komponente)



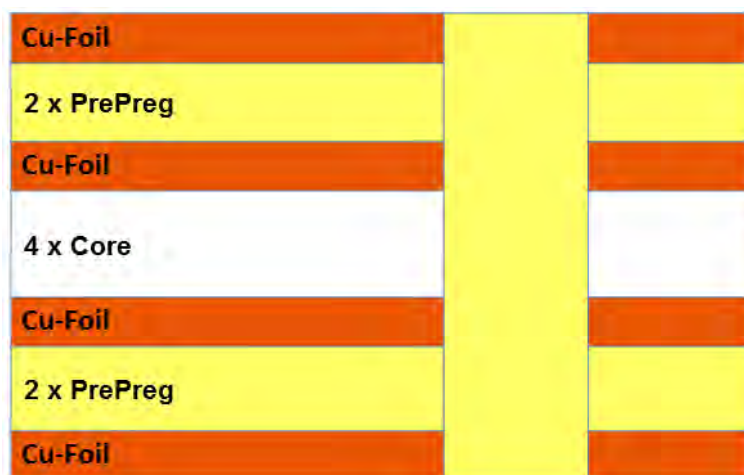
(a) PCB: Gornja strana.



(b) PCB: Donja strana.

Slika 5.1: Modul boost konvertera u programu EAGLE CAD.

Između prethodno pomenutih slojeva bakra umeće se izolacioni materijal, a konačna organizacija slojeva prikazana je na slici 5.2. Ukupna debljina štampane ploče iznosi 1.55 mm.

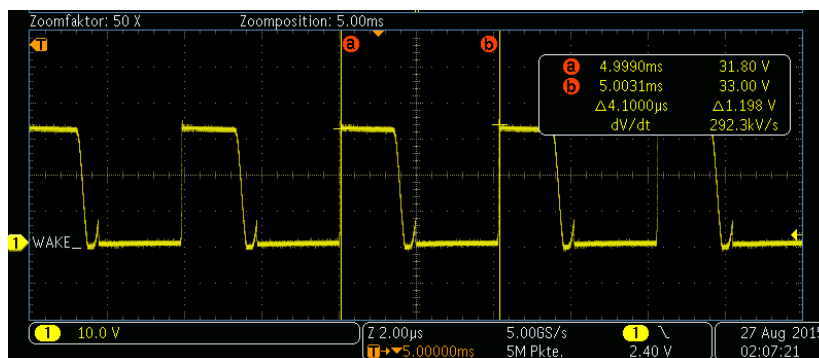


Slika 5.2: PCB: Organizacija slojeva.

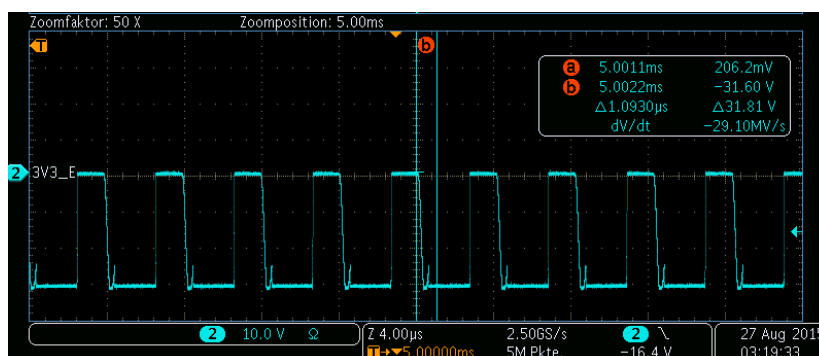
Finalna verzija šalje se proizvođaču koji vrši dodatnu provjeru dizajna i, ukoliko je uspješna, proizvodnju štampane ploče. Nakon postavke komponenti, modul je spreman za provjeru funkcionalnosti. Mikrokontroler, postavljen na donjoj strani štampane ploče, vrši regulaciju frekvencije komutacije, implementira prenaponsku i prestrujnu zaštitu za modul, definiše izlazni napon itd. Njegova uloga je, takođe, povezivanje ovog modula sa ostalima u instrument tabli preko različitih interfejsa. Parametri koje je potrebno podesiti da bi se izvršilo mjerenje su:

- RTCT kolo ugrađenog oscilatora: $R = 820 \Omega$, $C = 4,7 \text{ nF}$
- Frekvencija komutacije oko 250 kHz
- Izlazni napon 37 V (podešen preko naponskog djelitelja)
- EMC filtri nisu potrebni za ovu provjeru pa su zamijenjeni otpornicima od 0Ω
- Signali za pokretanje rada modula:
 - Ulazni napon: 12 V
 - SYNC/ENABLE signal: 3 V (always high)

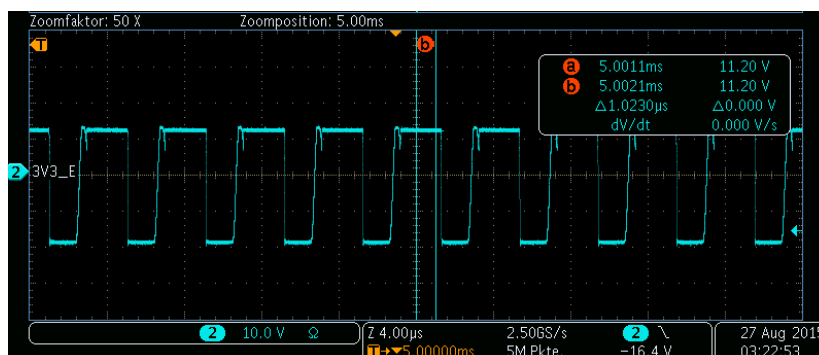
- PWM signal: pravougaoni impulsi frekvencije 400 Hz, minimalne amplitude 1.5V i max amplitude 3.5V (uvijek osvjetljen ekran)
- I2C interfejs nije korišćen za regulaciju



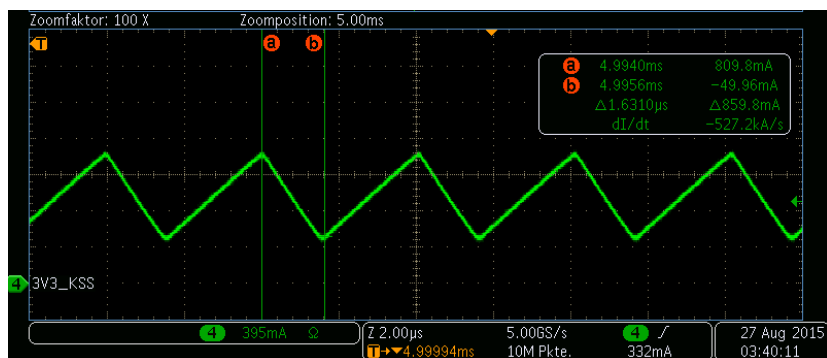
Slika 5.3: Napon na komutacionoj tački.



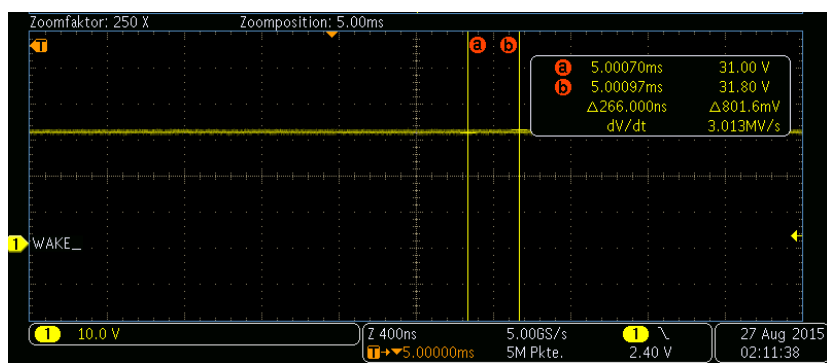
Slika 5.4: Napon na diodi.



Slika 5.5: Napon na kalemu.



Slika 5.6: Struja kalema.

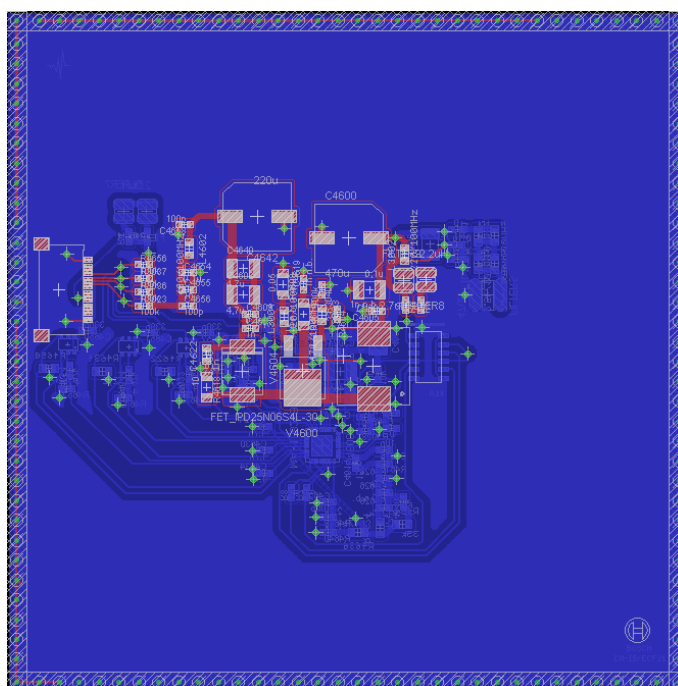


Slika 5.7: Izlazni napon.

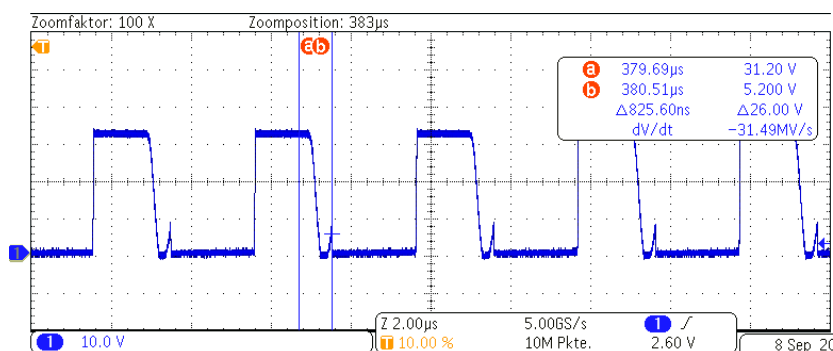


Slika 5.8: Oscilacije izlaznog napona.

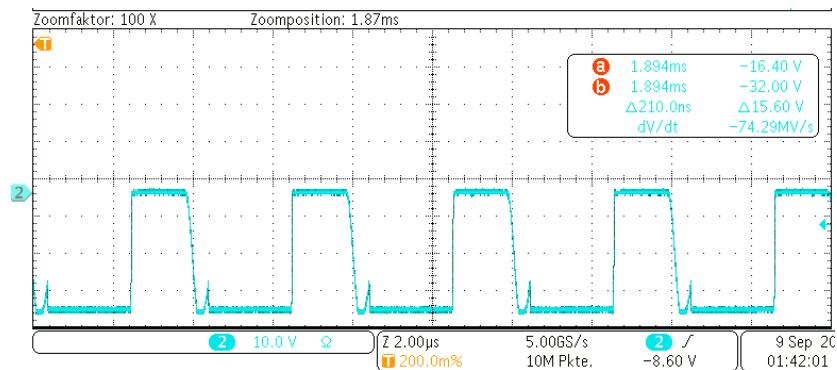
Iz dobijenih rezultata može se zaključiti da PCB ispunjava zadate zahtjeve funkcionalnosti. Izlazni napon je s namjerom podešen na 37 V, zato što na izlazu kola imamo dodatni pad napona na MOSFET-ima, tako da se na izlazu konačno dobija napon od 31 V. Druga verzija ovog modula napravljena je bez uzemljenja na gornjem sloju, kako bi smo ispitali kakav efekat ima nedostatak uzemljenja na provedenu emisiju. Funkcionalnost ove ploče takođe je testirana prema prethodno opisanom postupku.



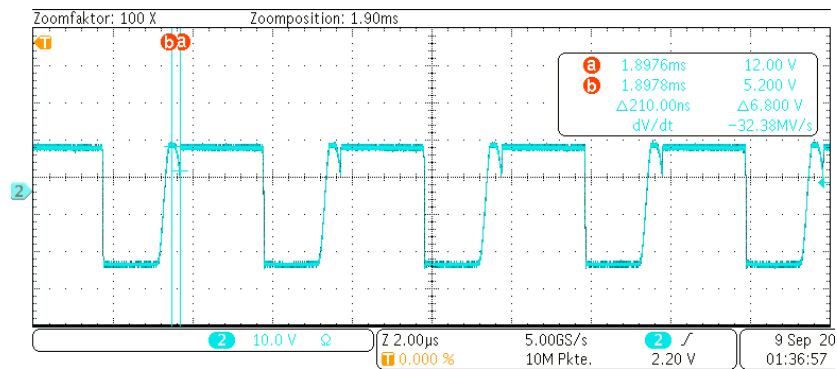
Slika 5.9: Modul boost konvertera bez uzemljenja na gornjem sloju (EAGLE CAD).



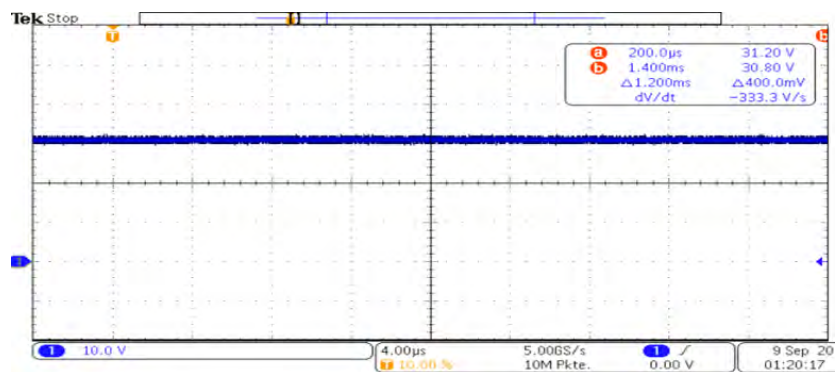
Slika 5.10: Napon na komutacionoj tački.



Slika 5.11: Napon na diodi.



Slika 5.12: Napon na kalemu.



Slika 5.13: Izlazni napon.

Kao što je bilo i za očekivati, rezultati su isti kao i u slučaju prve varijante. Razlike će biti evidentne u mjerjenjima i simulacijama provedene emisije.

Poglavlje 6

Simulaciona postavka

U ovom poglavlju akcenat će biti na razvoju procedure za simulaciju kondukcijske emisije, a to podrazumijeva postepenu pripremu simulacionog modela u programima kao što su Power Stage Designer, LT Spice IV i CST Studio Suite 2015. Uz to, biće riječi o poboljšanju i pojednostavljenju modela, kao i o prednostima i manama navedenih simulacionih metoda.

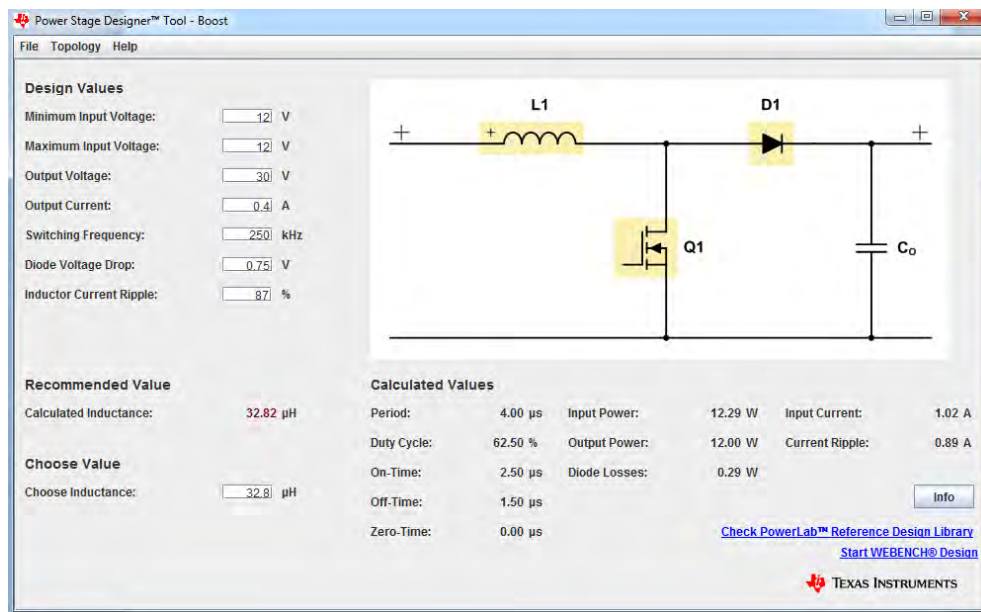
6.1 2D Simulacije

6.1.1 Power Stage Designer

Boost konverter za pozadinsko osvjetljenje instrument table tj. DUT u radu, dio je jednog od projekata sektora CM-IS/ECF21 i njegove performanse moraju biti poboljšane tako da ispunjava nove klijentove, kao i EMC zahtjeve. Kriterijumi, zadati projektom, koje modul mora ispuniti su sljedeći:

- Ulazni napon: 12 V
- Izlazni napon: 26,94 - 44,91V
- Frekvencija komutacije: oko 250 kHz
- Izlazna snaga za napajanje lanaca LED dioda: 12 W
- Vrijednost induktiviteta: 32,8 - 33 μ H

Ovi parametri unešeni su u program Power Stage Designer (PSD), razvijen od kompanije Texas Instruments. Prilagođavanjem parametara dobijamo željenu specifikaciju kola uz neke dodatne informacije koje se tiču oscilacija struje i napona, trajanja *on* i *off* perioda i gubitaka na diodi. U ovom slučaju, za izlazni napon izabrana je vrijednost iz predloženog opsega i iznosi 30 V. Ostali parametri prikazani su na slici 6.1.



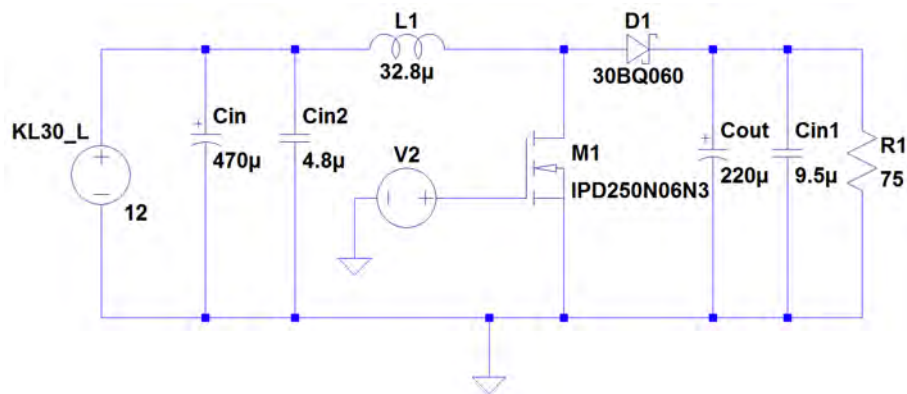
Slika 6.1: Power Stage Designer korisničko okruženje sa dobijenim parametrima kola.

Pored izračunavanja gore pomenutih parametara, program nudi i opciju vizualizacije očekivanih naponskih i strujnih karakteristika za kalem, diodu i MOSFET, i daje okvirnu referencu kakve rezultate treba da očekujemo. Drugim riječima, parametri finalnog modela moraju biti makar uporedivi sa ovim, dobijenim u PSD-u. Treba, međutim, imati na umu da ovo kolo u PSD-u predstavlja idealnu verziju najjednostavnije boost topologije i ne sadrži nikakve informacije o parazitnim efektima i nesavršenostima djelova kola. Iz tog razloga, biće samo okvirna referenca za naredne simulacije.

6.1.2 LT Spice IV Simulacija

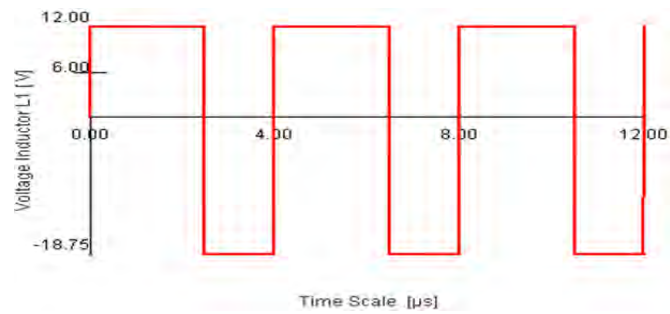
LT Spice IV je odličan SPICE simulacioni alat kojim se može izvršiti 2D dizajn električnih kola i vizualizacija talasnih oblika parametara kola. Zahvaljujući različitim poboljšanjima i ugrađenim modelima, značajno je olakšana simulacija prekidačkih izvora napajanja. Ovaj simulacioni alat sadrži i veliku bazu podataka različitih tipova komponenti sa veoma jednostavnim pristupom fajlovima sa njihovim tehničkim specifikacijama. Dakle, projektovanje simulacionog modela u ovom alatu jednostavno je i lako, a rezultati su vidljivi već nakon par minuta.

Prvi korak u izgradnji simulacionog modela jeste pravljenje idealnog modela (poput onog u PSD-u) i provjera njegovih performansi. To uključuje dodavanje ulaznih i izlaznih kondenzatora, odabir diode i MOSFET-a iz baze podataka i ekvivalentiranje potrošača otpornikom. Vrijednost otpornosti potrošača dobijena je jednostavnom kalkulacijom na osnovu zadanog izlaznog napona i izlazne snage.

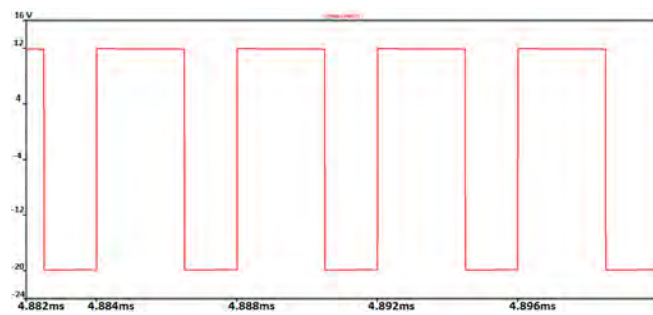


Slika 6.2: Osnovni model boost konvertora sa ekvivalentnim rezistivnim potrošačem.

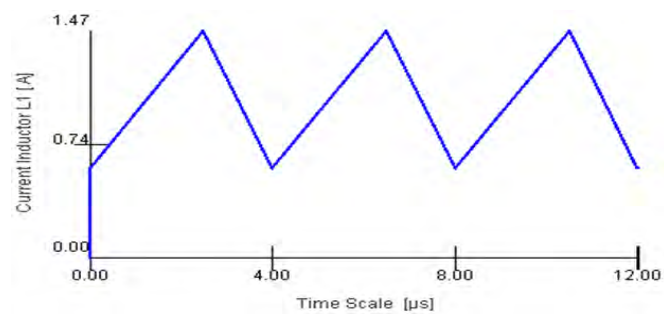
Model je poboljšán testiranjem performansi pri primjeni različitih modela poluprovodničkih komponenti iz LT Spice biblioteke komponenti, usljed nedostatka modela koji se koriste u realnom kolu. Odabir ovih komponenti vršen je upoređivanjem tehničke specifikacije realnih komponenti sa parametrima postojećih komponenti iz LT Spice biblioteke i selekcijom onih sa najvećim stepenom sličnosti. Rezultati simulacije upoređivani su sa onima iz PSD-a, sve dok se nije postigla zadovoljavajuća aproksimacija. Finalna verzija ovog jednostavnog kola data je na slici 6.2, a rezultati performansi, upoređeni sa onima iz PSD-a, na slinama 6.3 i 6.4.



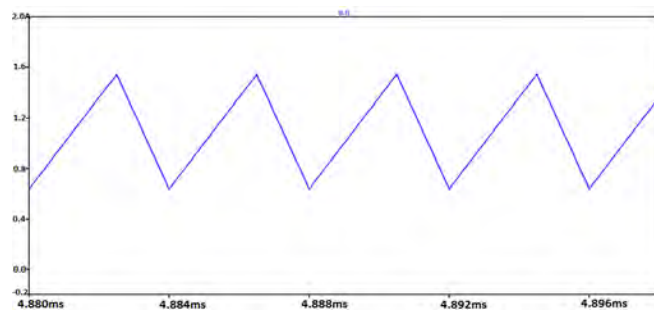
(a) PSD: Napon na kalemu.



(b) LT Spice IV: Napon na kalemu.

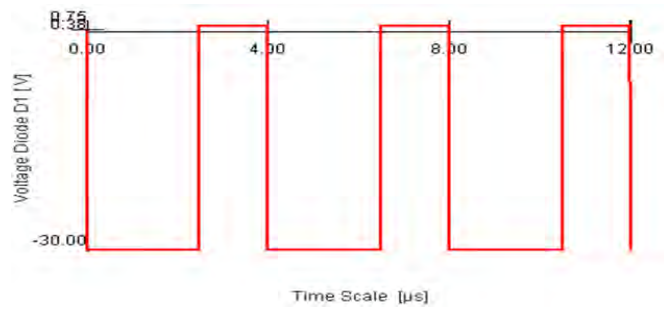


(c) PSD: Struja kalema.

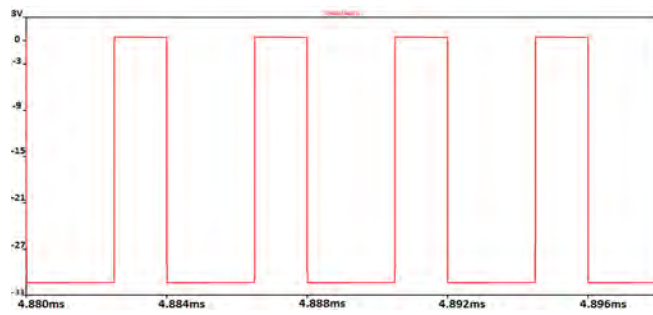


(d) LT Spice IV: Struja kalema.

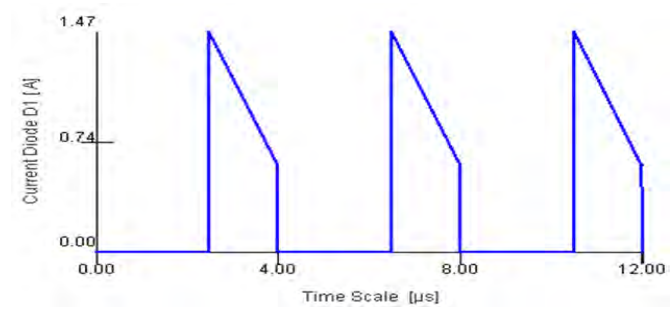
Slika 6.3: Poređenje karakteristika kalema između PSD i LT Spice IV simulacija.



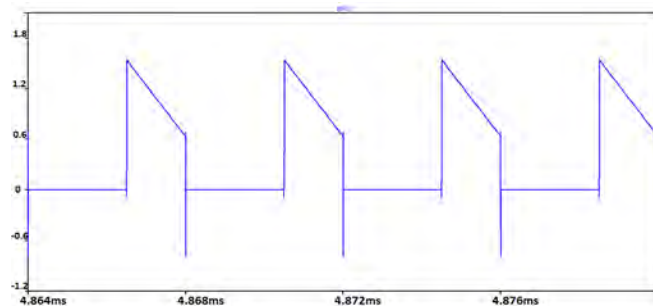
(a) PSD: Napon na diodi.



(b) LT Spice IV: Napon na diodi.



(c) PSD: Struja diode.

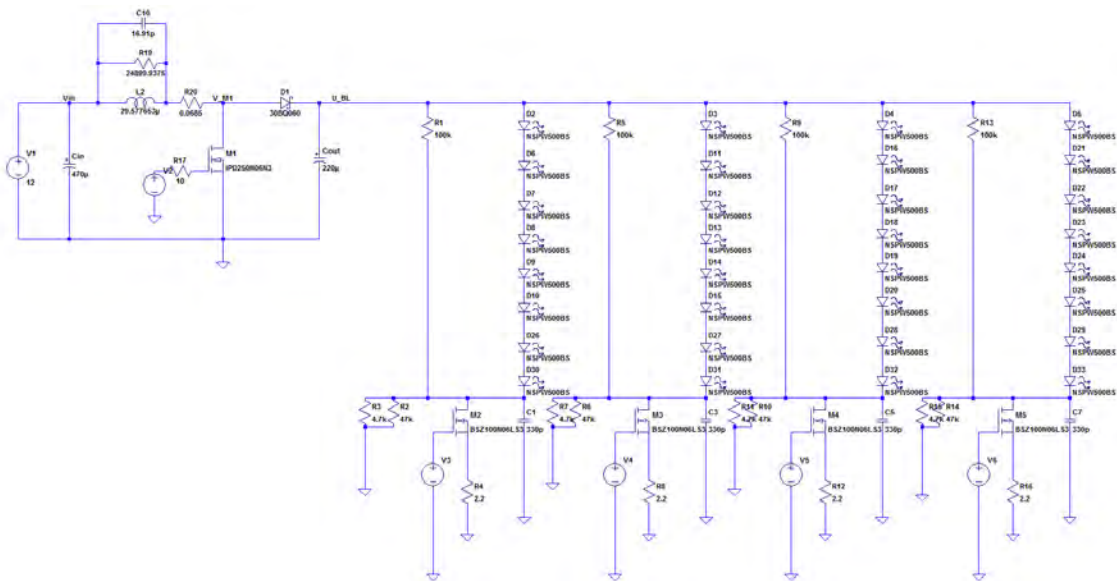


(d) LT Spice IV: Struja diode.

Slika 6.4: Poređenje karakteristika diode između PSD i LT Spice IV simulacija.

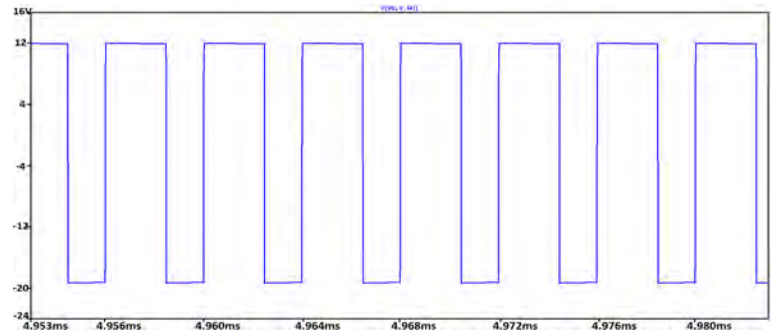
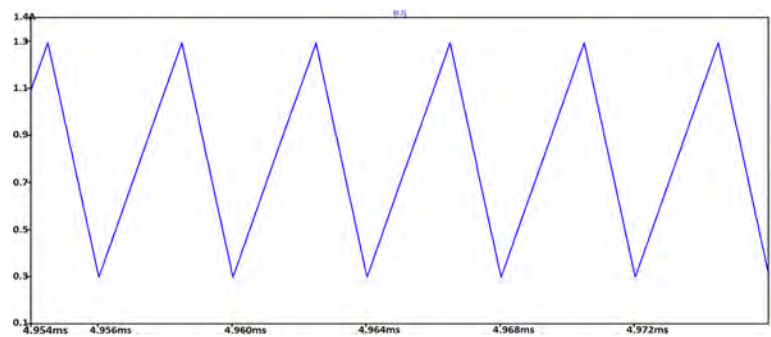
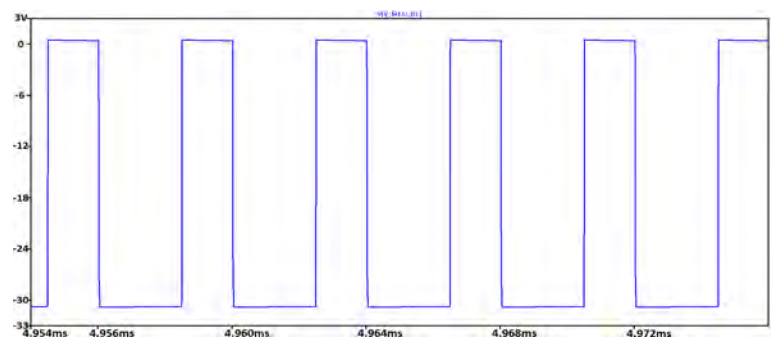
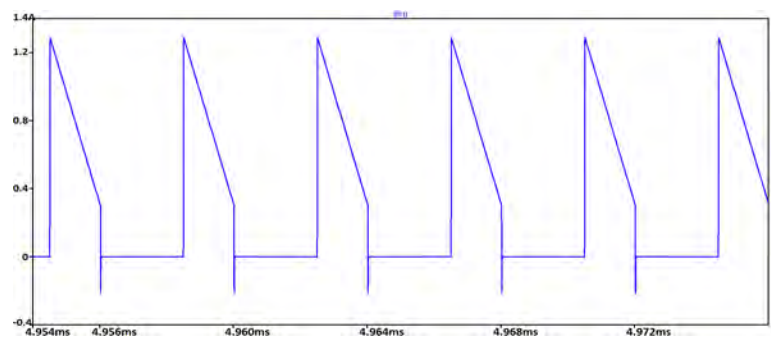
Rezultati, predstavljeni na slikama, odgovaraju onima dobijenim u PSD-u uz neznatna odstupanja. To je bilo i za očekivati zbog dodatih različitih vrijednosti ulazne i izlazne kapacitivnosti, kao i upotrebe drugačijih modela MOSFET-a i diode od onih u PSD-u. Koristeći ovaj model kao osnovu, sledeći korak je izgradnja kompleksnijeg modela koji će aproksimirati realno kolo.

U ovoj poboljšanoj verziji, rezistivni potrošač zamijenjen je lancima LED dioda koje služe za pozadinsko osvetljenje ekrana. MOSFET-ova prekidačka funkcija realizovana je pomoću naponskog izvora koji ga snabdijeva pravougaonim impulsima odgovarajućih karakteristika, zadatih u projektu (amplituda napona, perioda, trajanje *on* i *off* perioda). Polarizovanim kondenzatorima dodate su informacije o parazitnim efektima, a kalem je predstavljen svojim ekvivalentnim modelom, onako kako je dato u tehničkoj specifikaciji proizvođača. Odabirom odgovarajućih komponenti iz LT Spice baze podataka, parametri simulacionog modela prilagođeni su tako da odgovaraju onima iz realnog kola.



Slika 6.5: Unaprijeđeni model boost konvertera.

Rezultati simulacije za ovaj unaprijeđeni model, prikazani na slici 6.6, pokazuju dobru funkcionalnost modela uz visok nivo uporedivosti sa rezultatima iz PSD-a.

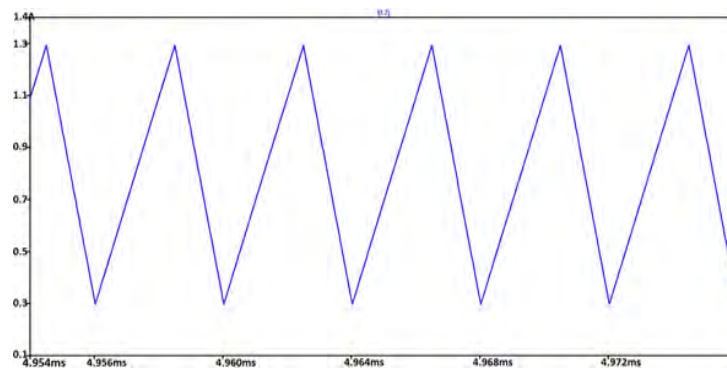
(a) *Napon na kalem.*(b) *Struja kalem.*(c) *Napon na diodi.*(d) *Struja diode.*

Slika 6.6: LT SpiceIV: Rezultati simulacije unaprijedenog modela.

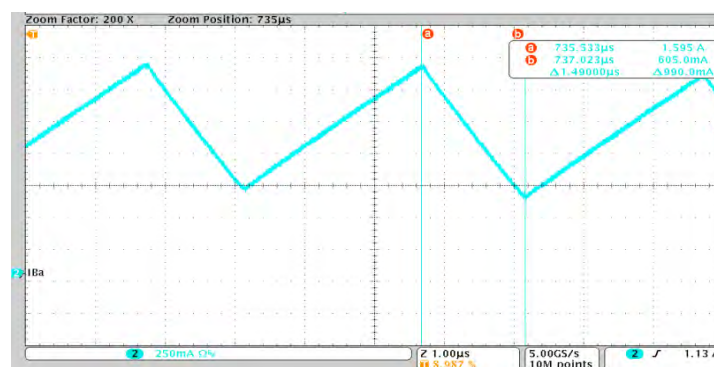
6.1.2.1 Upoređivanje simulacionog modela sa realnim kolom

Da bi se izvršila validacija performansi simulacionog modela, rezultati su upoređeni sa onima u realnom kolu. Instrument tabla sa ovim modulom priključena je na ulazni napon 12.15-12.71V i Tektronix MSO 4104 Mixed Signal Osciloskop. Za mjerenje struje korišćena je Tektronix TCPA 300 strujna sonda sa 5 A/V opsegom i DC spregom.

Važni parametri za upoređivanje su: struja na kalemu, napon na komutacionoj tački, vremena paljenja i gašenja MOSFET-a, oscilacije izlaznog napona, kao i karakteristike kola u frekvencijskom domenu. To podrazumijeva primjenu FFT u kombinaciji sa sa Hammingovim prozorom i u mjerenju i u simulaciji.



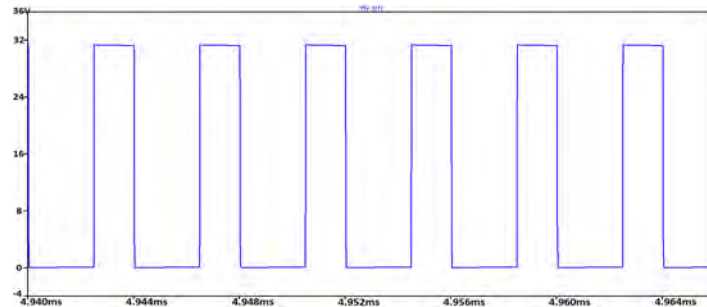
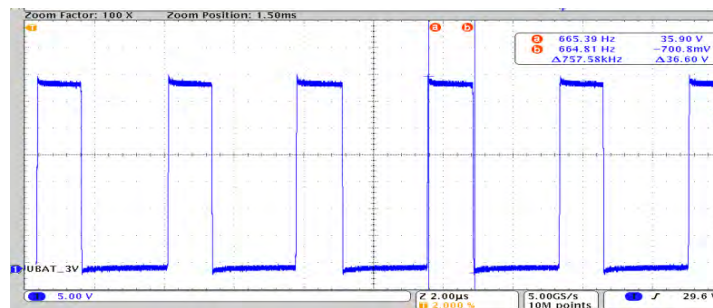
(a) *LT Spice: Struja kalema.*



(b) *Osciloskop: Struja kalema.*

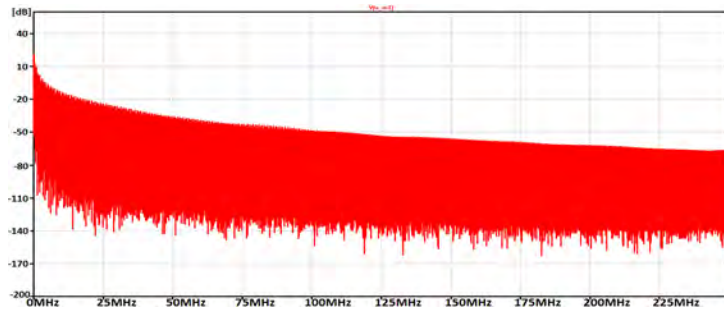
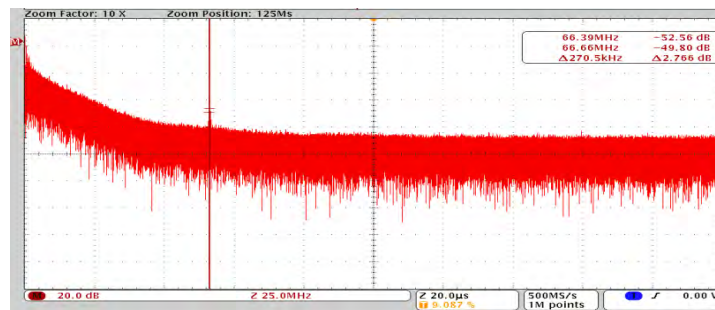
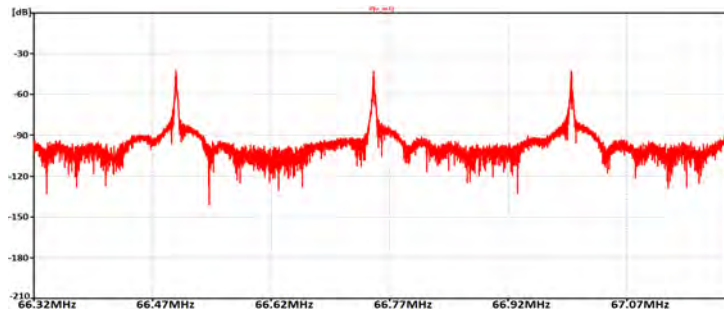
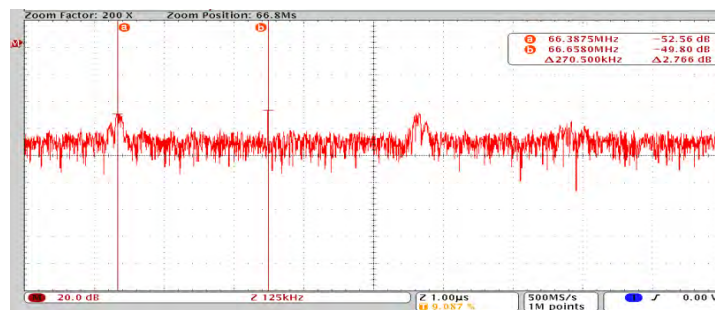
Slika 6.7: Upoređivanje struje kalema između mjerenja i simulacije.

Simulacija dobro aproksimira mjerni rezultat sa malo nižim nivoom struje. Ostali parametri kao što su amplituda, *on* i *off* vrijeme poklapaju se i u mjerenju i u simulaciji.

(a) *LT Spice: Napon na komutacionoj tački.*(b) *Osciloskop: Napon na komutacionoj tački.***Slika 6.8:** Upoređivanje napona na komutacionoj tački u vremenskom domenu.

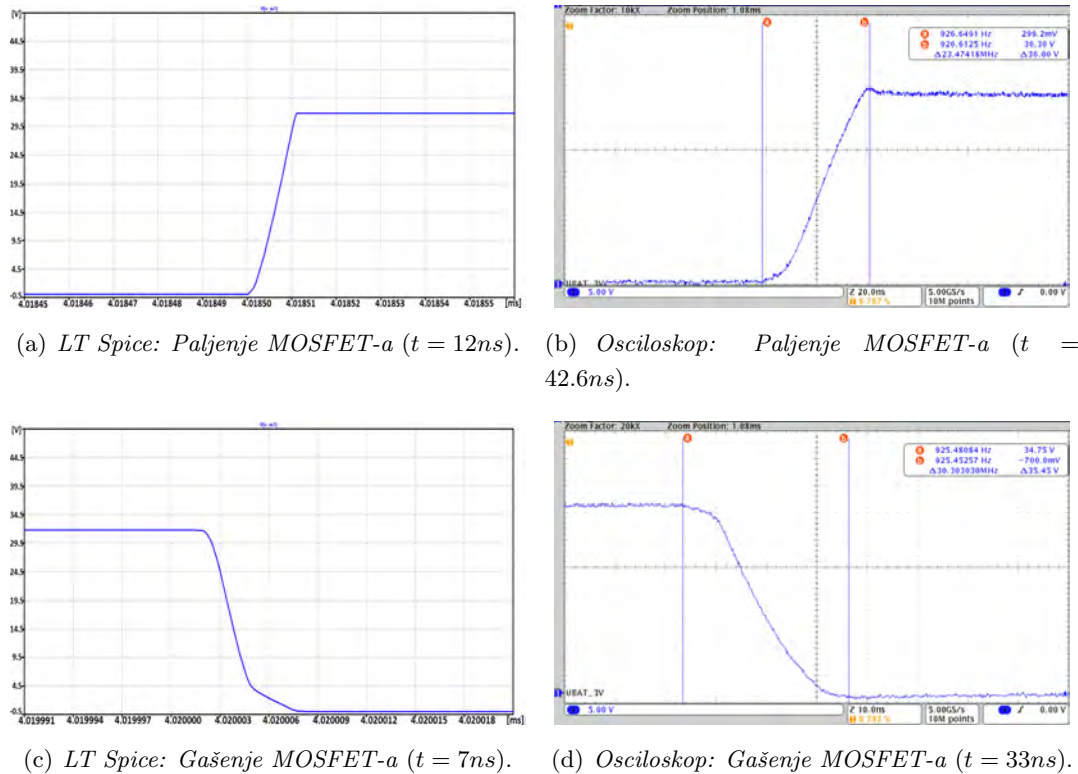
Karakteristike napona na komutacionoj tački u realnom kolu odgovaraju onima dobijenim u LT Spice simulaciji uz očekivana mala odstupanja u oscilaciji napona (karakteristika u realnom kolu nije idealna kao u LT Spice-u) zato što upotrijebljeni MOSFET ne odgovara u potpunosti realnom. Ove oscilacije napona nastaju zbog brze komutacije i činjenice da potrošač nije u svakom trenutku u potpunosti povezan na kolo. Napon na realnom kolu ima takođe i malo veću vrijednost. Sa druge strane, frekvencija komutacije i trajanje *on* i *off* stanja poklapaju se u simulaciji i realnom kolu.

Kada je u pitanju napon komutacione tačke u frekvencijskom domenu, kao referentno mjesto za poređenje uzete su komponente na 66 MHz zbog očiglednog *peak-a* na toj frekvenciji od -49.8 dB u realnom kolu. Nivo ovih komponenti u LT Spice-u je oko -42.8 dB i nisu toliko vidljive kao u mjerenju osciloskopom. Bolja reprezentacija mogla bi se postići daljim podešavanjem vremena akvizicije i mijenjanjem parametara za samu FFT ili njenu prozorsku funkciju ali za samo grubo poređenje, što je ovdje slučaj, je u redu.

(a) *LT Spice: FFT napona na komutacionoj tački.*(b) *Osciloskop: FFT napona na komutacionoj tački.*(c) *LT Spice: FFT napona na komutacionoj tački, uveličana.*(d) *Osciloskop: FFT napona na komutacionoj tački, uveličana.*

Slika 6.9: Upoređivanje napona na komutacionoj tački u frekvencijskom domenu.

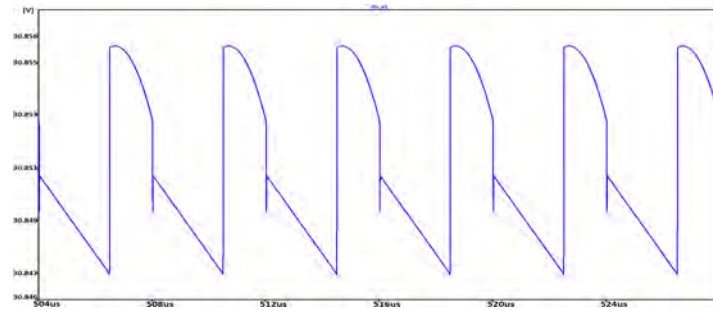
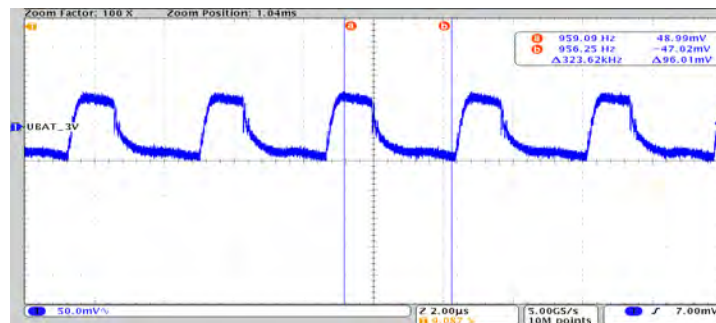
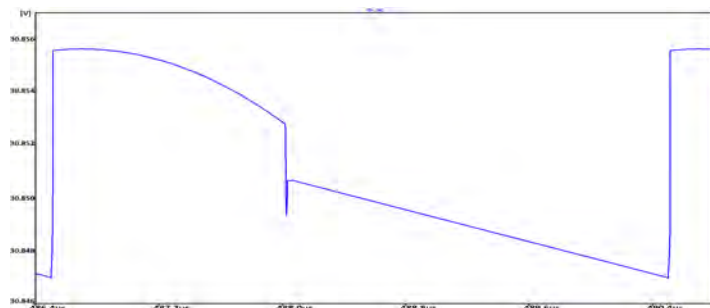
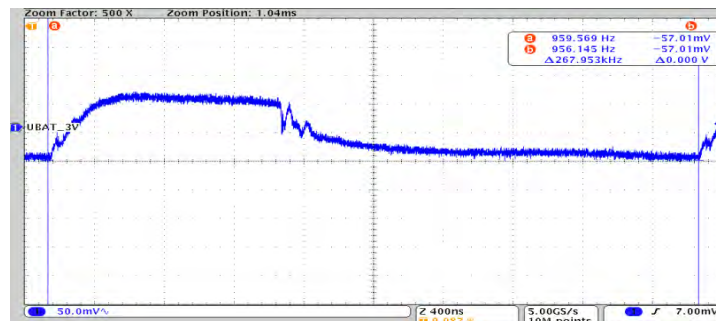
Kako je komutaciona tačka ključna tačka u kolu, upoređeni su nagibi naponske karakteristike pri paljenju i gašenju MOSFET-a, respektivno.



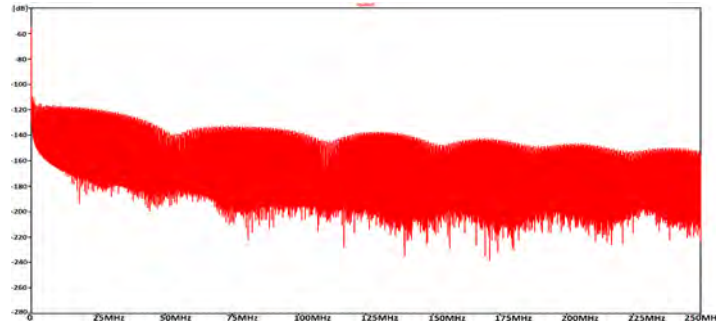
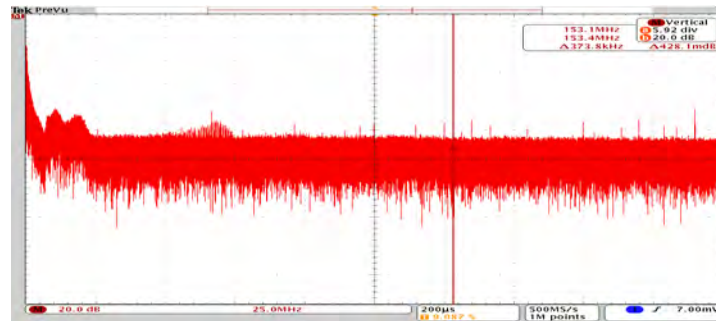
Slika 6.10: Upoređivanje naponskih karakteristika paljenja i gašenja MOSFET-a.

Iako su naponske karakteristike sa slike 6.10 veoma slične, vremena paljenja i gašenja MOSFET-a se razlikuju usljed razlika u MOSFET modelima između realnog kola i simulacionog modela, kao i definicije komutacionog signala u LT Spice-u. Tako imamo kraće vrijeme paljenja i gašenja MOSFET-a u simulaciji. Ovi parametri su naknadno podešeni tako da odgovaraju onima u realnom kolu kroz precizniju definiciju eksitacionog signala za MOSFET u LT Spice-u.

Važna napomena za ovo upoređivanje je da jeste da je za mjerenje korišćen kompletna instrument tabla, a ne samo izolovani boost konverter modul. To znači da je mogućica i nekih drugih djelova kola na rezultate u dobijene pomoću osciloskopa u frekvencijskom domenu.

(a) *LT Spice: Oscilacije izlaznog napona.*(b) *Osciloskop: Oscilacije izlaznog napona.*(c) *LT Spice: Izlazni napon, uveličan.*(d) *Osciloskop: Izlazni napon, uveličan.*

Slika 6.11: Upoređivanje karakteristika izlaznog napona u vremenskom domenu.

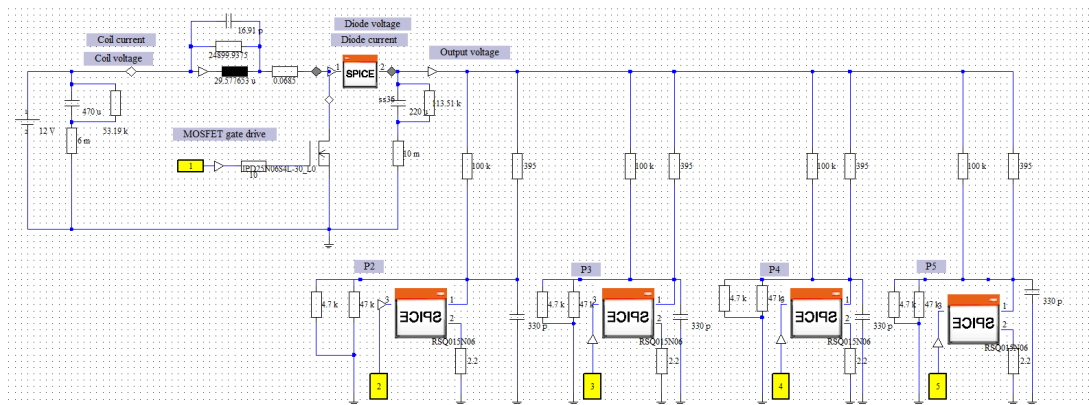
(a) *LT Spice: FFT izlaznog napona.*(b) *Osciloskop: FFT izlaznog napona.***Slika 6.12:** Upoređivanje karakteristika izlaznog napona u vremenskom domenu.

Izlazni napon u simulaciji odgovara onom u realnom kolu. Razlika je samo u idealnosti karakteristike jer u simulaciji ne možemo aproksimirati sve neidealnosti realnog kola. U frekvencijskom domenu uočavamo odstupanja rezultata zato što u simulaciji ne možemo izvršiti dobru AC spregu izlaznog napona i izmjeriti precizno smetnje na izlazu kola. Rezultati sa osciloskopa su u ovom slučaju mnogo pouzdaniji i daju bolju vizualizaciju komponenti i na višim frekvencijama, koje nisu tako očigledne u rezultatima simulacije (komponente na frekvencijama 96 MHz, 120 MHz, 200 MHz, 240 MHz itd.).

Cilj ovog mjerenja je bio da se ispita uporedivost realnog i simulacionog modela i da se, u skladu sa tim, odrede dalji koraci u poboljšanju 2D modela. Iz dobijenih rezultata možemo zaključiti da simulacioni model aproksimira realni na zadovoljavajućem nivou. Sljedeći korak jeste realizacija ovog istog 2D modela u programu CST Studio Suite, kao osnove za realizaciju 3D modela u istom programu.

6.1.3 CST Studio Suite 2015 2D Simulacija

CST Studio Suite je moćan alat za elektromagnetne simulacije i dizajn električnih kola [30]. On obuhvata alate za dizajn i optimizaciju uređaja iz širokog frekvencijskog opsega - od statičnog do optičkog. Analize se mogu ticati ispitivanja termalnih ili mehaničkih efekata, kao i simulacije kola. CST Studio Suite obuhvata sljedeće module: CST Microwave Studio, CST EM Studio, CST Particle Studio, CST Cable Studio, CST PCB Studio, CST Mphysics Studio i CST Design Studio. U zavisnosti od tipa problema, primjenjuje se odgovarajući modul. Prednost koju nudi ovaj simulacioni alat jeste kombinacija simulacionih modula za različite vrste problema, što će biti slučaj u ovom radu. Prvi korak u izgradnji 3D simulacionog modela jeste 2D model kola u modulu CST Design Studio. [31]



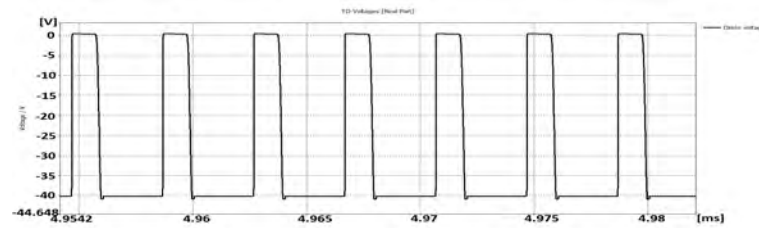
Slika 6.13: CST Design Studio: Boost konverter kolo sa PSpice modelima.

Ovaj model napravljen je na osnovu simulacionog modela iz LT Spice-a. Izvršena je analiza kola u vremenskom domenu kako bi se snimile i uporedile strujne i naponske karakteristike na važnim djelovima kola.

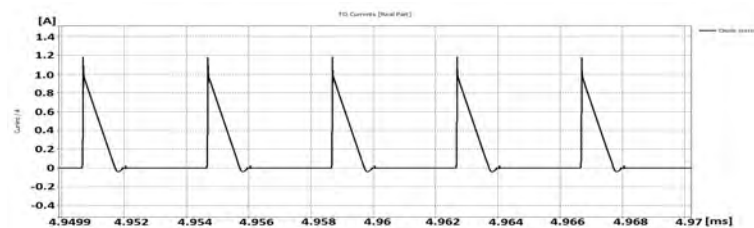
Prvo je napravljena šema koja odgovara onoj sa slike 6.5. Neke komponente poput polarizovanih kondenzatora i kalema predstavljene su svojim ekvivalentnim kolima. Ovo ne utiče na rezultat, što je prvenstveno provjereno u LT Spice-u. Kako baza podataka CST Studio Suit-a ne sadrži odgovarajuće modele MOSFET-a i dioda potrebne za ovaj projekat, ovi modeli su unešeni kao PSpice modeli, dobijeni od proizvođača. Lanci LED dioda zamijenjeni su otpornicima odgovarajuće vrijednosti otpornosti kako bi se pojednostavila kalkulacija. Eksterni portovi, numerisani 1-5, obezbjeđuju eksitacione signale za MOSFET-e. U LT Spice-u ovo je bilo realizovano pomoću naponskih

6.1 2D Simulacije

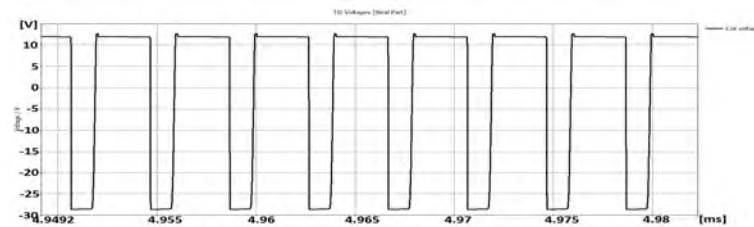
izvora (vidi sliku 6.5). Simulacija kola u vremenskom domenu izvedena je od 0 do 5 ms kako bi se izmjerile karakteristike kola u stabilnom režimu rada (nastupa nakon 4.5ms). Maksimalna frekvencija za proračun podešena je na 1000 MHz. Rezultati su prikazani na slikama 6.14 i 6.15.



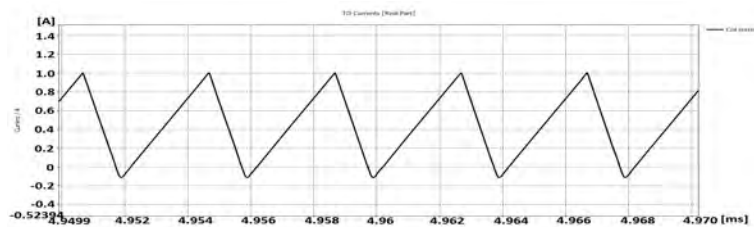
(a) Napon na diodi.



(b) Struja diode.

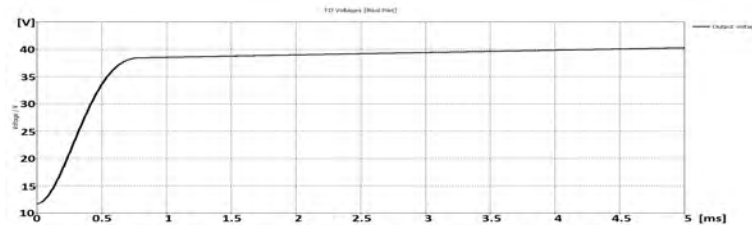


(c) Napon na kalemu.

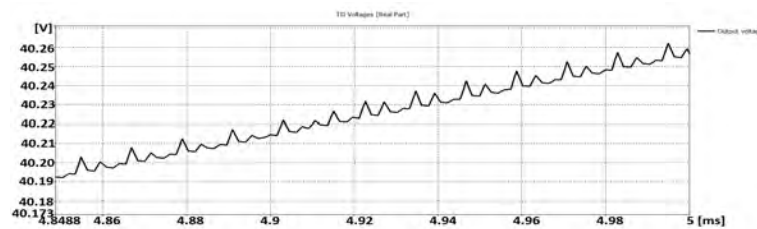


(d) Struja kalem.

Slika 6.14: Rezultati simulacije 2D modela u CST Design Studio - karakteristike kalem i diode.



(a) Izlazni napon.



(b) Oscilacije izlaznog napona.

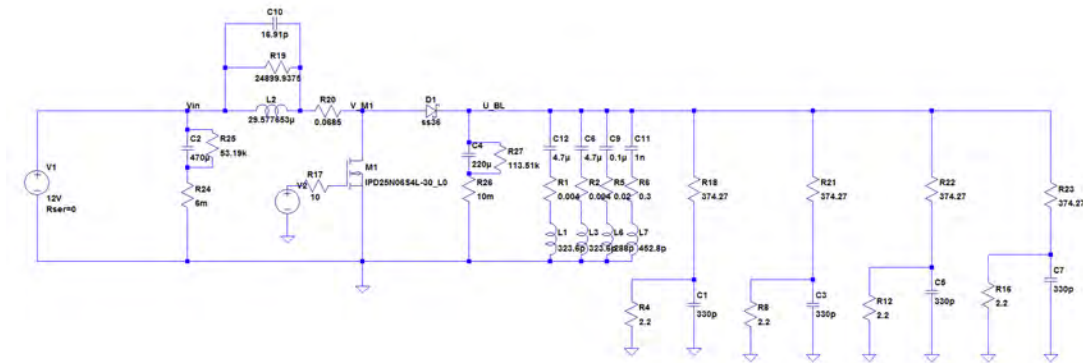
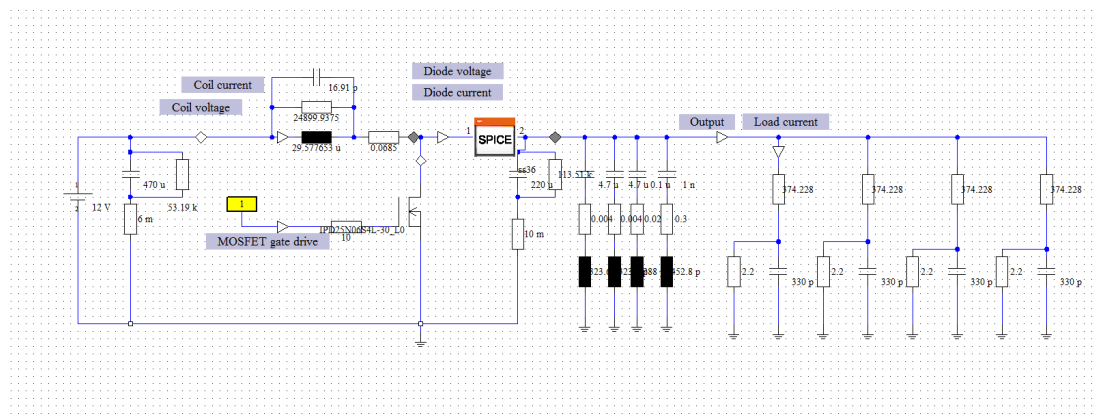
Slika 6.15: Rezultati simulacije 2D modela u CST Design Studio - karakteristike izlaznog napona.

Sa slike 6.14(d) očigledno je da kolo radi u nekontinualnom režimu rada zato što jačina struje na kalemu pada na 0. Posljedično, rezultati simulacije razlikuju se od onih sa slike 6.6. U cilju postizanja boljih rezultata i rada kola u kontinualnom režimu, biće izvršena poboljšanja ovog modela.

6.1.4 Pojednostavljenje modela

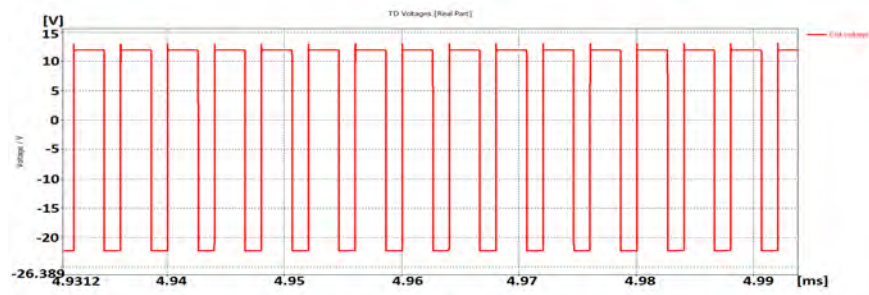
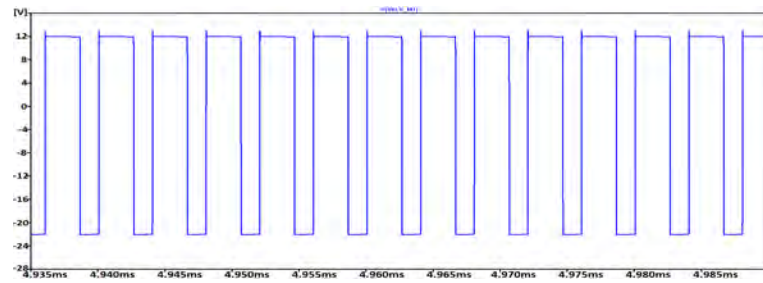
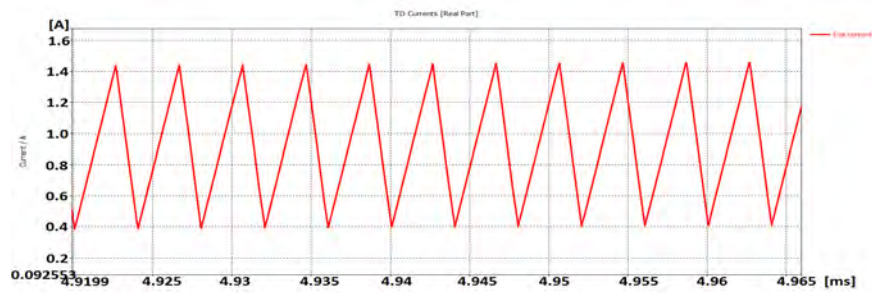
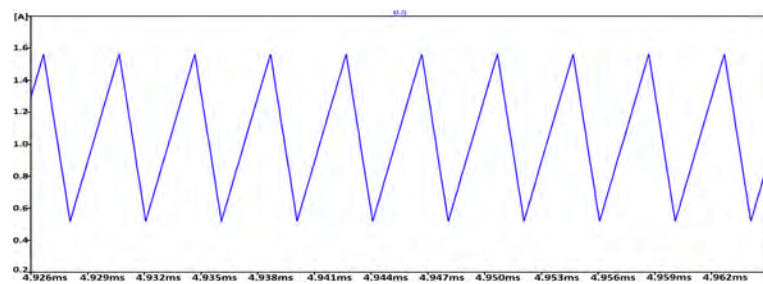
Svrha unaprijeđenja modela, koje će biti opisano u nastavku ovog dijela, jeste poboljšanje funkcionalnosti kola i skraćenje vremena potrebnog za simulaciju. Da bi se postiglo oboje, kolo je malo pojednostavljeno. Ovaj postupak obuhvata uklanjanje nepotrebnih komponenti (koje nemaju velikog efekta na funkcionalnost kola) korak po korak. Uticaj uklanjanja svake komponente, pojedinačno, provjeren je prvenstveno u LT Spice modelu, a zatim izveden u CST modelu. Dodati su kondenzatori na izlazu kola, povećano je vrijeme paljenja i gašenja MOSFET-a tako da više odgovara realnom.

Izlazni napon kola je 33.6V sa izlaznom snagom od 12 W. Poboljšanje modela obuhvatilo je i pojednostavljenje potroša ekvivalentnom impedansom, kao i dodatak kondenzatora na izlazu kola. Ovi kondenzatori predstavljeni su svojim ekvivalentnim

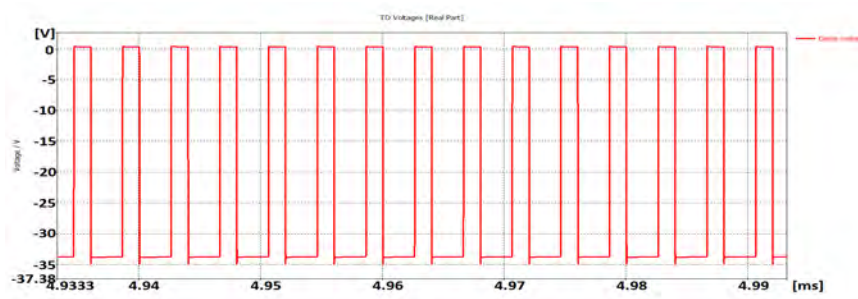
(a) *LT Spice.*(b) *CST Studio Suite.***Slika 6.16:** Poboljšana verzija modela boost konvertera.

kolima kako bi se imao bolji uvod u parazitne komponente. Uklanjanje MOSFET-a iz potrošača nema efekta na funkcionalnost, samo predstavlja situaciju u kojoj je osvjetljenje ekrana podešeno na najveću vrijednost. Isti SPICE modeli korišćeni su u oba modela (LT Spice i CST model).

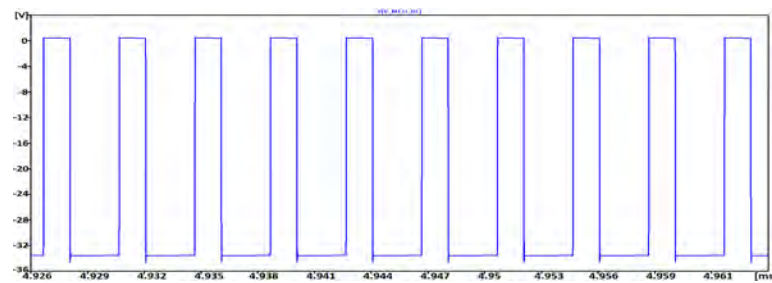
Vrijeme paljenja MOSFET-a promijenjeno je sa 0.1 ps na 50 ns, što više odgovara realnosti. Ovo je dovelo i do ubrzanja simulacije u CST Studio Suite programu. Naponi i struje su mjereni sondama na bitnim tačkama kola u vremenskom intervalu od 0 do 5 ms. Uočeno je da kolo postiče stabilan rad nakon očekivanih 4.5 ms tako da su rezultati iz ovog vremenskog intervala predstavljeni u radu i upoređeni.

(a) *CST: Napon na kalemu.*(b) *LT Spice: Napon na kalemu.*(c) *CST: Struja kalema.*(d) *LT Spice: Struja kalema.*

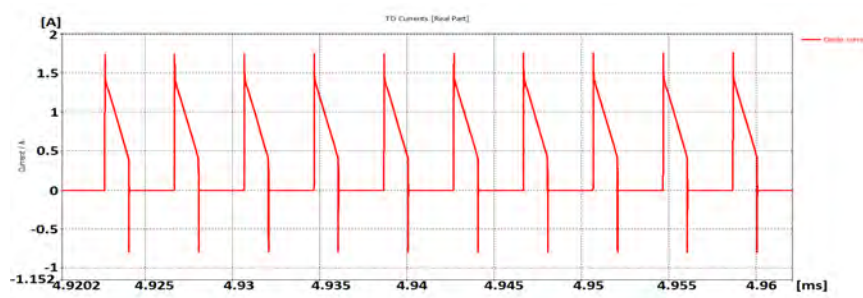
Slika 6.17: Karakteristike kalema.



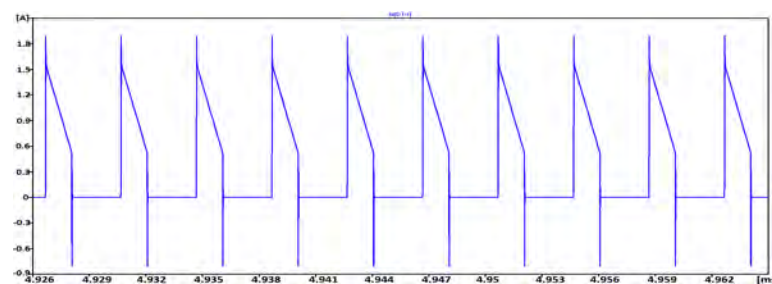
(a) CST: Napon na diodi.



(b) LT Spice: Napon na diodi.

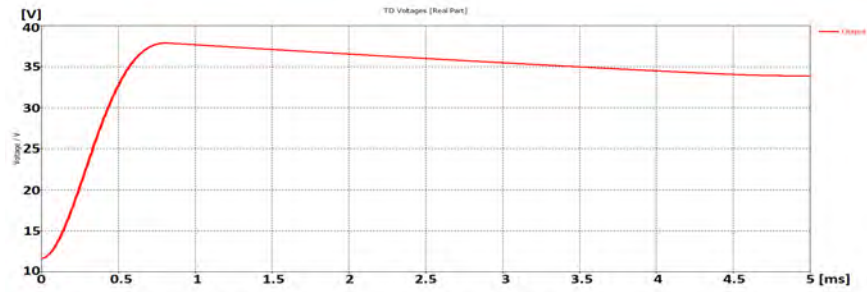
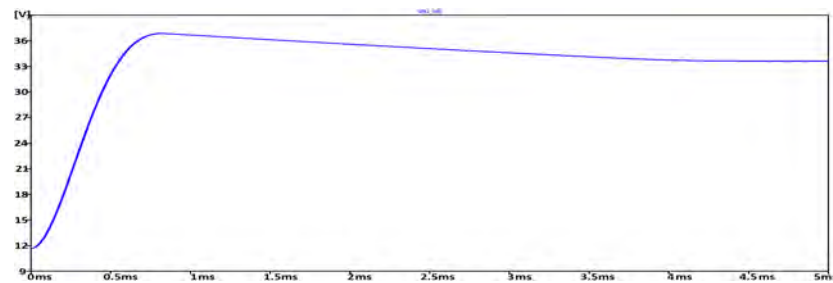


(c) CST: Struja diode.



(d) LT Spice: Struja diode.

Slika 6.18: Karakteristike diode.

(a) *CST Studio Suite: Izlazni napon.*(b) *LT Spice: Izlazni napon.***Slika 6.19:** Izlazni napon boost konvertera.

Rezultati simulacija sa slika 6.17, 6.18 i 6.19 definitivno potvrđuju dobru funkcionalnost simulacionog modela. To dalje znači da je opisani model dobra osnova za izgradnju 3D modela, što je tema narednog dijela.

6.2 3D simulacija

Priprema i simulacija 3D modela obuhvataju sljedeće korake:

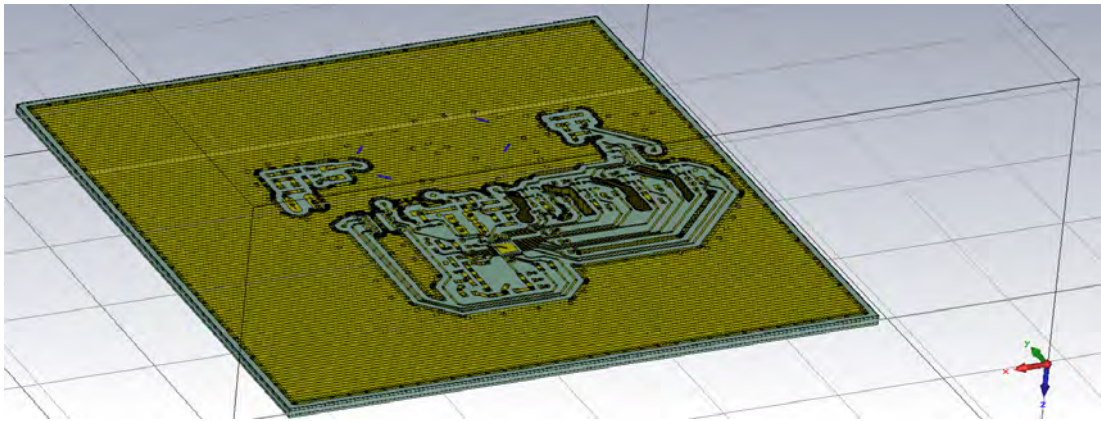
- Priprema 3D modela:
 - Import layout fajla (iz programa EAGLE CAD)
 - Postavka komponenti u obliku diskretnih portova ili ekvivalentnih RLC kola
 - Podešavanje simulacije (granični uslovi [32], frekvencijski opseg, tip solver-a, tačnost itd.)
 - Dodavanje monitora za snimanje polja (*field monitors*)
 - Simulacija 3D modela
- Povezivanje 3D modela sa šemom:
 - Dodavanje kompleksnih djelova kola i parazitnih elemenata na šemu
 - Objezbjeđivanje eksitacionih signala za kolo kroz eksterne portove
 - Postavljanje mjernih sonde na važnim djelovima kola
- Ko-simulacija 3D modela i šeme (2D kola):
 - Definisanje simulacionog zadatka i naknadne obrade rezultata

6.2.1 Priprema 3D modela

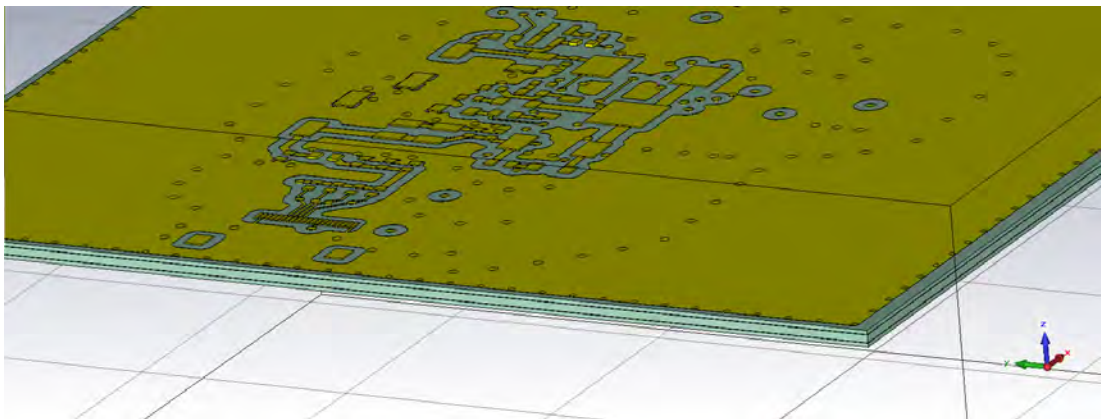
Pripremni korak za 3D simulaciju je realizacija jednostavnog funkcionalnog 2D modela kola koje želimo da simuliramo (vidi sliku 6.16(b)). Kada se dostignu zadovoljavajuće performanse 2D modela, kao što je to opisano u prethodnom dijelu, može se nastaviti sa modelovanjem tog kola u modulu CST Microwave Studio. Za simulaciju kompleksnih modela, kao što je štampana ploča iz poglavlja 4, potrebno je ubaciti EDA tip fajla u CST Microwave Studio. Program nudi mogućnost importa raznih formata poput: Zuken, ODB++, Gerber, DXF itd.

Kako je štampana ploča modula dizajnirana u programu EAGLE CAD, postojale su dvije opcije za export - DXF ili Gerber fajl. Oba su isprobana i upoređena. Konačno, odlučeno je da se koristi DXF fajl zbog veće slobode unošenja modifikacija, iako je to značilo više posla. Najbolja opcija bi bila korišćenje ODB++ ili Zuken falova kao

osnove jer sadrže više informacija o samom modelu nego DXF i Gerber fajlovi. To znači da su signalne putanje i tačke u kolu automatski povezane i označene nakon importa. Sa DXF fajlom kao osnovom, ove radnje moraju se ručno obaviti pomoću tkz. Boolean operatora za modelovanje i označavanje čvorova, pojedinačno. PrePreg izolacioni materijal između slojeva na ploči mora se takođe ručno ubaciti i u tu svrhu korišćen je materijal oznake Isola 408. Iako je ovaj korak vremenski zahtjevan, krajnji rezultat je svakako funkcionalan model.



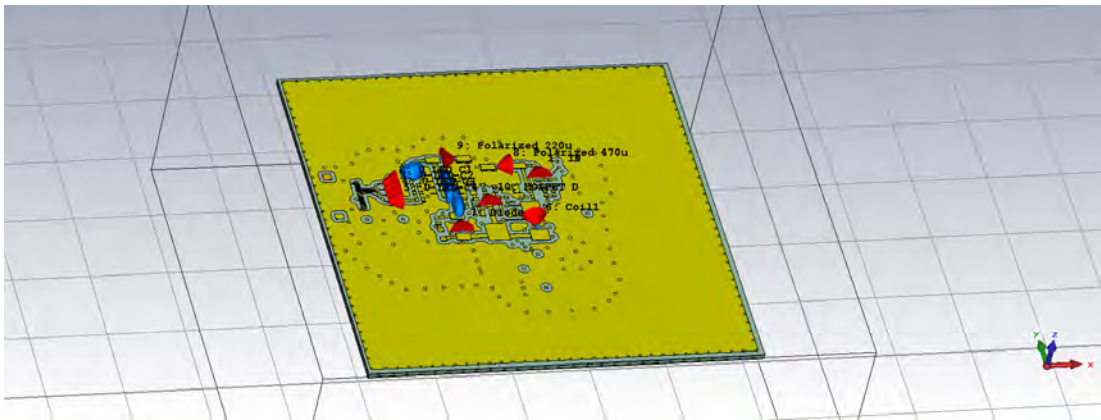
Slika 6.20: Štampana ploča modula importovana kao DXF fajl u CST Microwave Studio.



Slika 6.21: Štampana ploča modula sa povezanim putanjama i čvorovima u kolu.

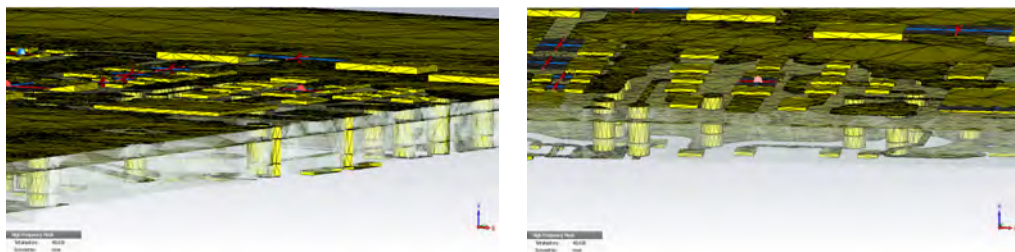
Nakon povezivanja svih signalnih putanji i definisanja čvorova, dodaju se elementi kola. To su komponente iz 2D šematskog modela koje se moraju pravilno unijeti u 3D model. Komponente se realizuju kao portovi ili ekvivalentna RLC kola na 3D modelu,

pri čemu se mora voditi računa o pravilnoj orijentaciji portova. Kompleksni djelovi kola i parazitni efekti realizuju se na šemi simulacionog modela tj. u modulu CST Design Studio. Ovo je velika prednost CST softvera zato što olakšava realizaciju kompleksnih djelova na 3D modelu i daje slobodu definisanja njihovih parametara na šemi. Kosimulacijom ova dva modula (CST Microwave i CST Design Studio), kao što će biti prikazano u narednim djelovima, postiže se isti efekat kao da su komponente direktno postavljene na 3D model, a sve bez njihovog komplikovanog 3D modelovanja.



Slika 6.22: 3D model boost konvertera sa dodatim elementima kola.

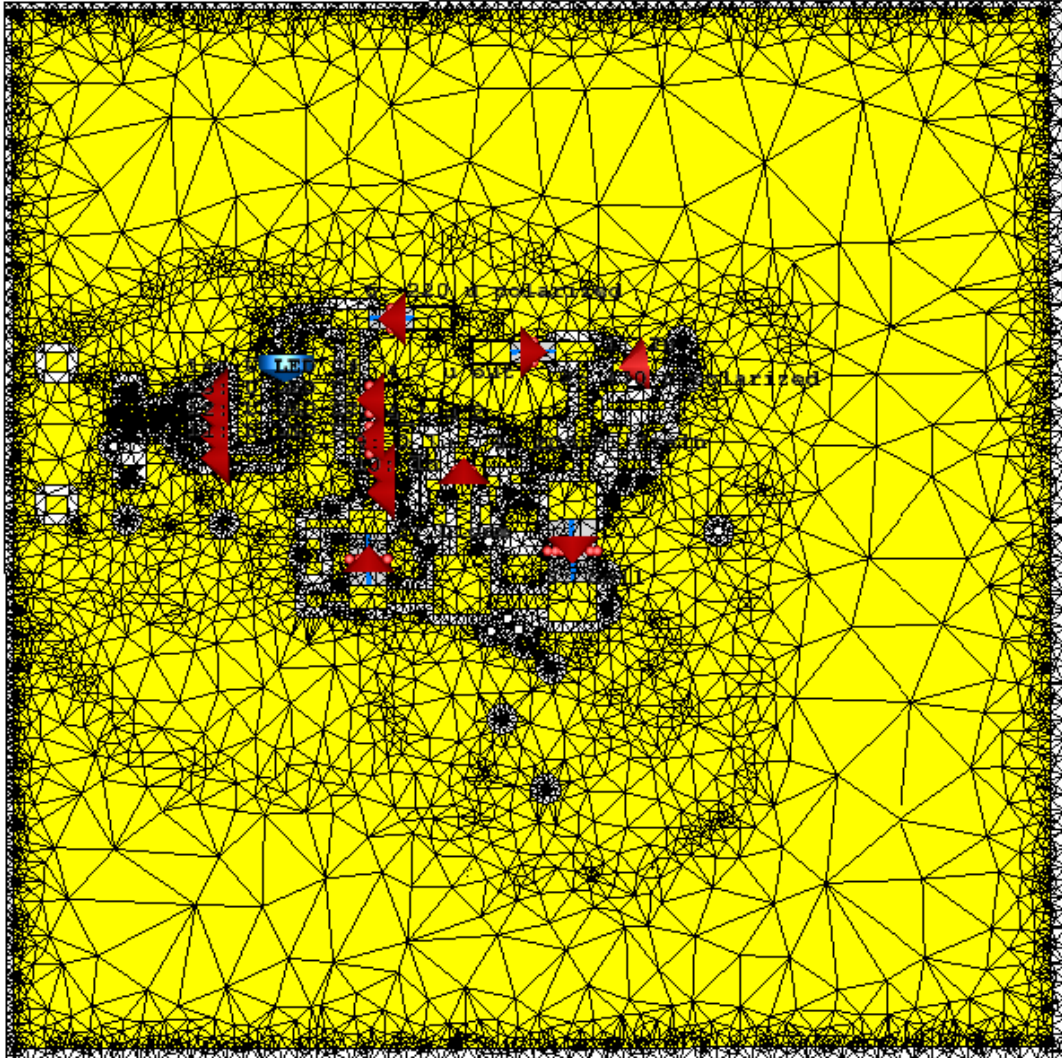
Sljedeći korak jeste postavka simulacije i podešavanja graničnih uslova, tipa solvera, frekvencijskog opsega itd. Kako model u radu sadrži dosta portova, korišćen je Frequency Domain Solver zato što je simulacija za ovaj tip problema sa ovim tipom solvera mnogo brža od Time Domain Solvera. Krajnji rezultat je, svakako, nezavistan od izbora tipa solvera.



(a) Presjek modela u XZ ravni.

(b) Presjek modela u YZ ravni.

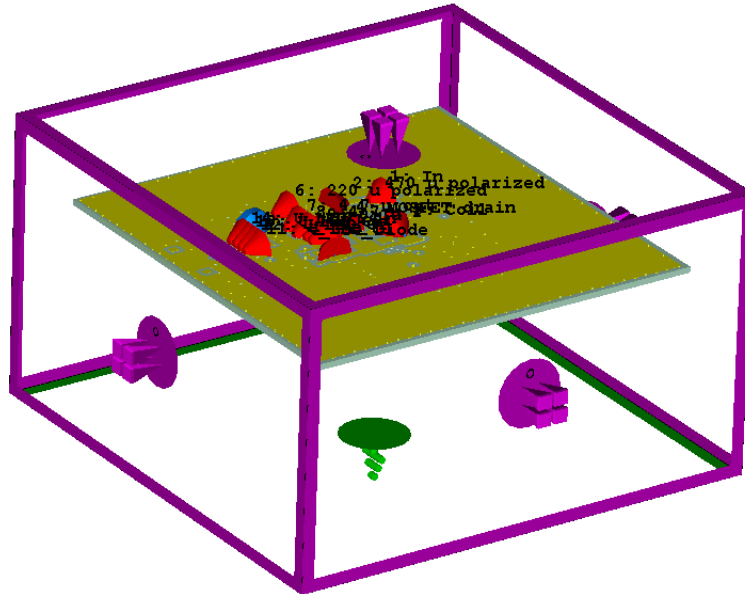
Slika 6.23: Presjeci 3D modela sa prikazom tetraedralne mreže.



Slika 6.24: 3D model boost konvertera sa prikazom tetraedralne mreže.

Solver dijeli model u brojne tetraedre i računa parametre za svaki pojedinačno metodom konačnih elemenata (FEM). Ovaj dio simulacije iziskuje najviše vremena iz razloga što solver vrši i adaptaciju mreže dok ne proračuna optimalnu. Glavne postavke ove simulacije su sljedeće:

- **Tip solvera:** Frequency Domain Solver
- **Tip mreže:** Tetraedralna mreža za simulacije na visokim frekvencijama
- **Granice:** Zmin - Električna ($E_t = 0$), ostale - otvorene
- **Frekvencijski opseg:** 0 - 30 MHz



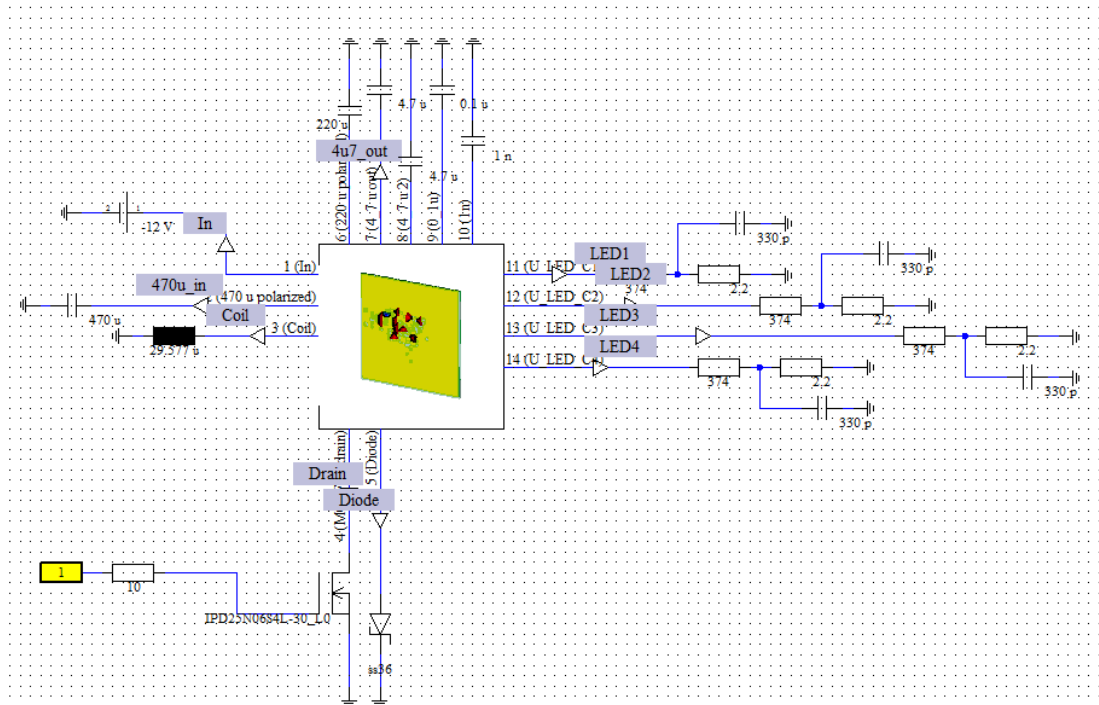
Slika 6.25: 3D model boost konvertera sa prikazanim graničnim uslovima.

6.2.2 Povezivanje 3D modela sa šemom

Nakon adaptacije tetraedralne mreže i uspješno obavljene simulacije 3D modela, može se otpočeti rad na realizaciji kompleksnih djelova kola na šemi. Ovaj postupak se izvodi u modulu CST Design Studio, koji je direktno povezan sa CST Microwave Studio u kome se nalazi 3D model. Na mjestima portova, sada se na šemi dodaju MOSFET, ekvivalentno kolo kalema, SPICE modeli komponenti itd. Kao što je i prije napomenuto, komponente se moraju postaviti u skladu sa orijentacijom portova na 3D modelu. Kada se to pravilno izvrši, 3D model će imati iste performanse kao da su komponente direktno postavljene na 3D ploču.

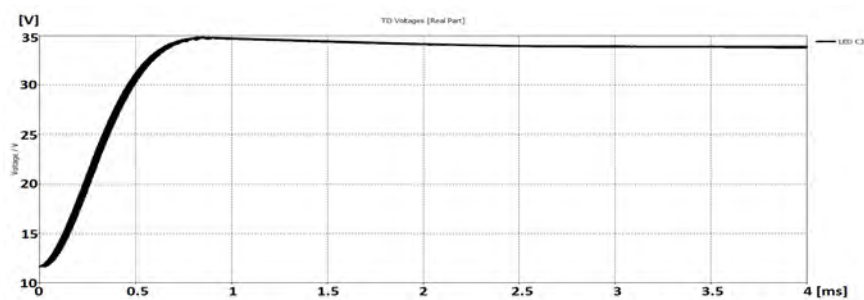
6.2.3 Ko-simulacija 3D modela i šeme kola

Završenom 3D modelu, zajedno sa šemom, dodaju se eksitacioni signali kroz eksterne portove (npr. signal za kontrolu komutacije MOSFET-a kroz port 1 na slici 6.30), kao i mjerne sonde za mjerenje napona i struja. Prvo se provjerava funkcionalnost kola i za nju se definiše simulacioni zadatak. U ovom slučaju to je analiza kola u vremenskom domenu - *transient analysis task*. Na osnovu dobijenih rezultata možemo provjeriti i

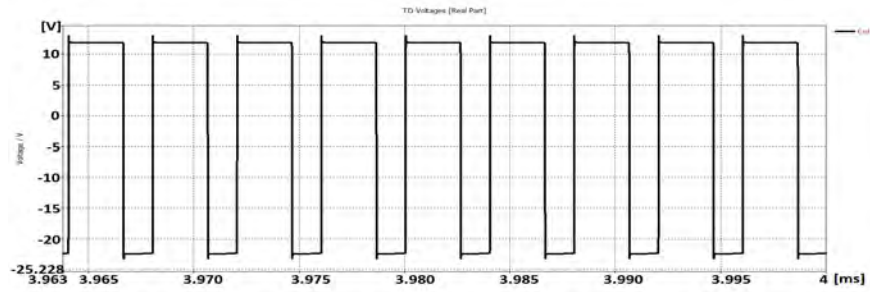


Slika 6.26: 3D model boost konvertera sa realizacijom komponenti u CST Design Studio.

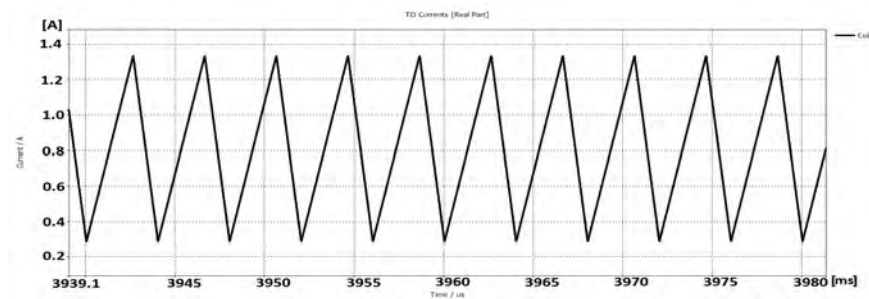
da li je orijentacija portova pravilno definisana. Ova ista analiza biće primijenjena i za estimaciju provedene emisije, ali uz neke dodatne korake. Simulacija je izvedena u vremenskom intervalu od 0 do 4 ms.



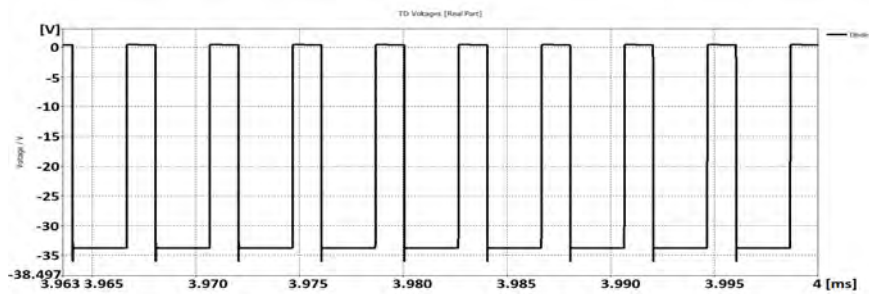
Slika 6.27: Izlazni napon izmjeren na potrošaču.



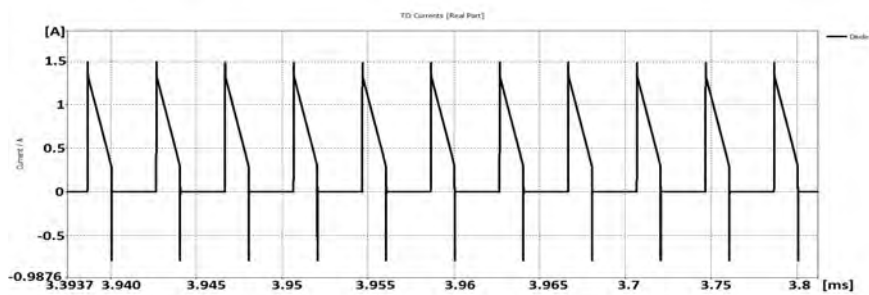
(a) Napon na kalemu.



(b) Struja kalema.



(c) Napon na diodi.



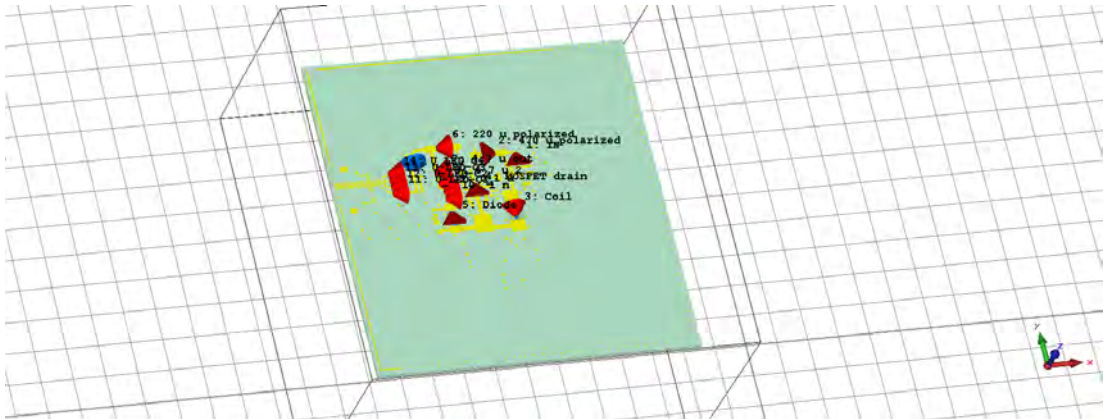
(d) Struja diode.

Slika 6.28: Rezultati kosimulacije u vremenskom domenu.

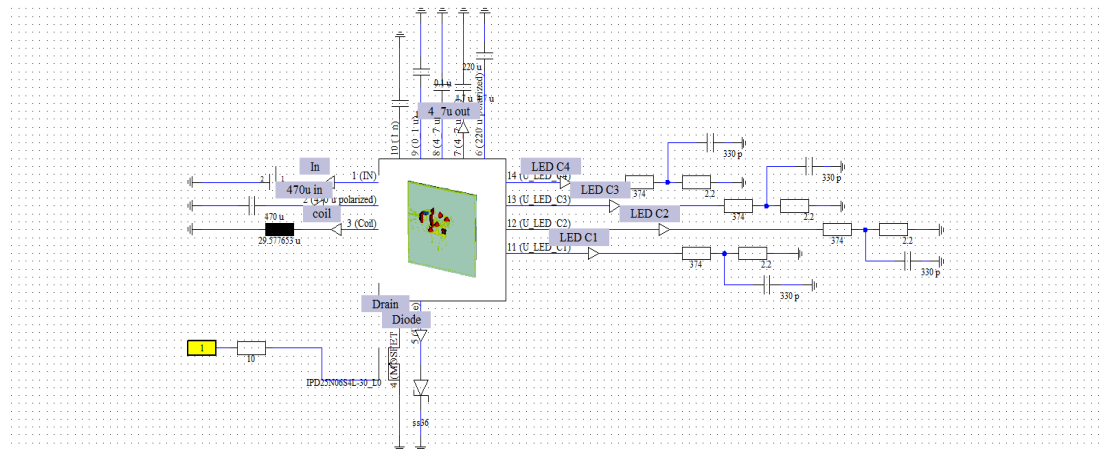
Dobijeni rezultati uporedivi su sa onim dobijenim za 2D model (vidi sliku 6.17 i sliku 6.18), što znači da su komponente pravilno definisane i da je model dobra osnova za estimaciju provedene emisije. Ovo će biti tema poglavlja 7 i, na osnovu dobijenih rezultata, biće predloženi naredni koraci u poboljšanju modela. Rezultati dobijeni u vremenskom domenu biće naknadno obrađeni primjenom Furijeove transformacije.

6.2.4 Boost konverter modul bez uzemljenja na gornjem sloju

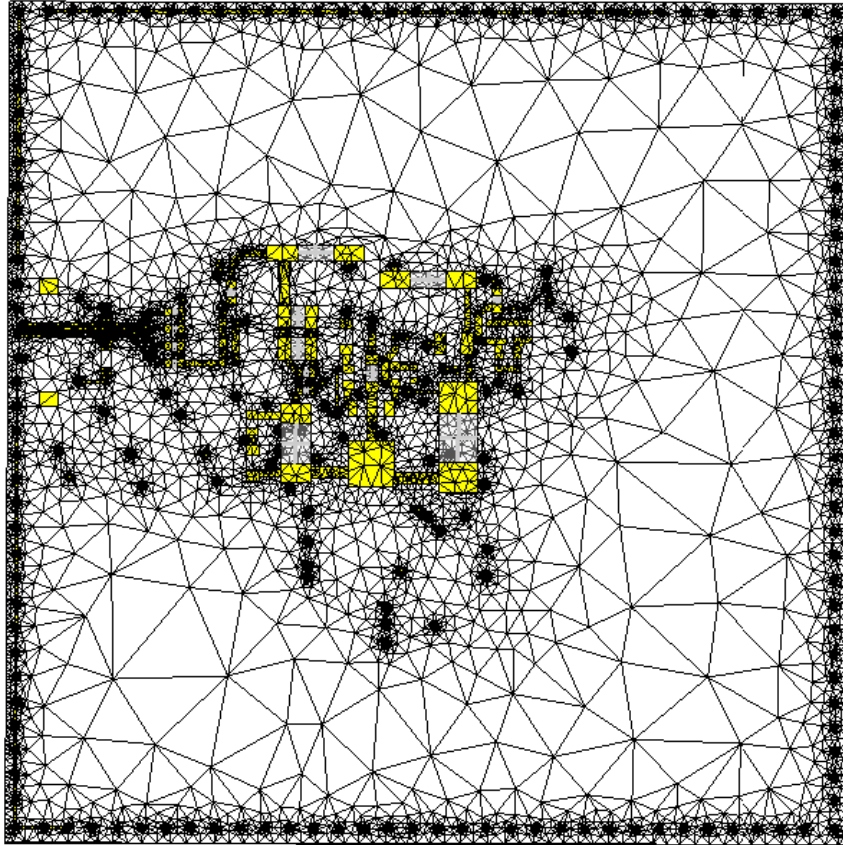
Ista procedura, opisana u prethodnom dijelu, primijenjena je i na varijanti modula bez uzemljenja na gornjem sloju. Sva podešavanja simulacije (granični uslovi, frekvenciski opseg, tip solvera itd.) iz prethodnog dijela su ista i za ovu simulaciju.



Slika 6.29: 3D model boost konverter modula bez uzemljenja na gornjem sloju.

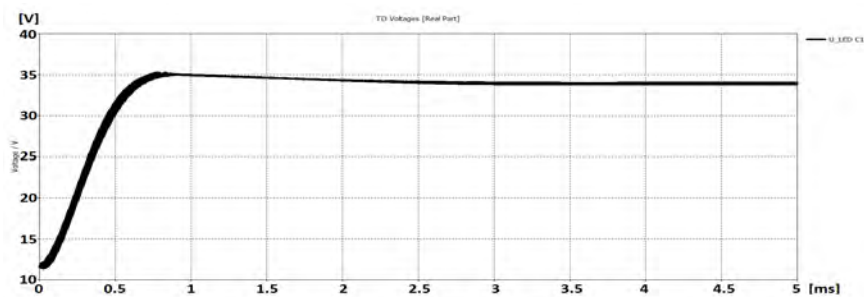


Slika 6.30: Šema 3D modela boost konverter modula bez uzemljenja na gornjem sloju.

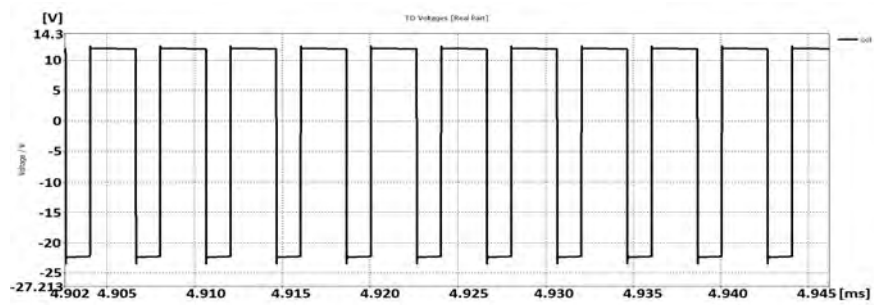


Slika 6.31: Prikaz tetraedralne mreže 3D modela boost konvertera.

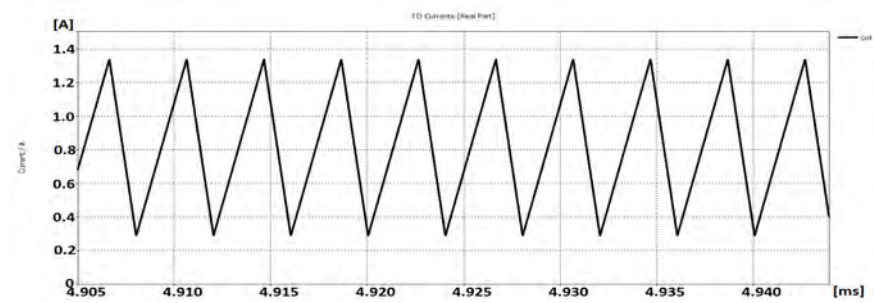
Provjera funkcionalnosti ovog modela, dala je iste rezultate kao na slikama 6.27 i 6.28, što je i bilo za očekivati. Mjerenje provedene emisije na ovim modelima uključivaće dodavanje mjerne sonde na šemi u CST Design Studio na istom mjestu gdje je bila postavljena u mjernoj postavci, opisanoj u poglavlju 4.



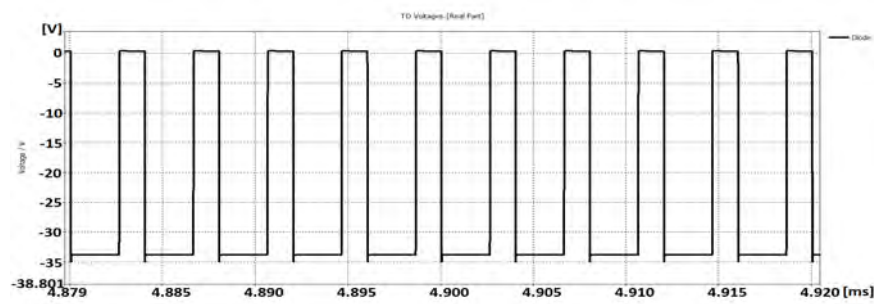
Slika 6.32: Izlazni napon izmjeren na potrošaču.



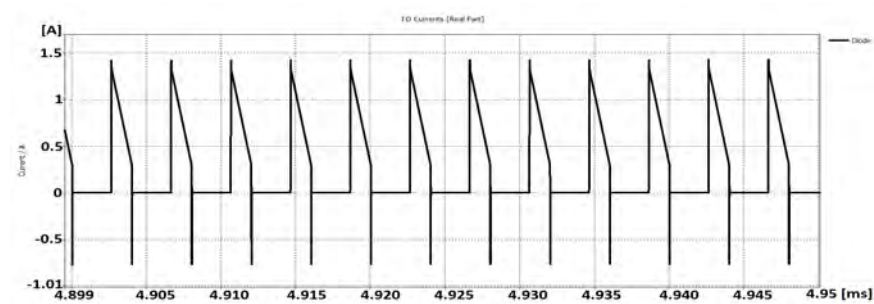
(a) Napon na kalem.



(b) Struja kalem.



(c) Napon na diodi.



(d) Struja diode.

Slika 6.33: Rezultati simulacije u vremenskom domenu.

Poglavlje 7

Eksperimentalni rezultati

U ovom poglavlju biće predstavljene i analizirane rezultate dobijene putem mjernih i simulacionih metoda, opisanih u poglavljima 4 i 6. Prvenstveno će biti predstavljene rezultate mjerenja iz razloga što su referenca za simulaciju. Nakon toga, biće prezentovani rezultati simulacije i upoređeni sa mjernim rezultatima, na osnovu čega će se izvršiti validacija rezultata i biće predložene mjere za poboljšanje simulacionog modela.

7.1 Rezultati mjerenja

Mjerenja kodukcione emisije izvedena su u Robert Bosch Kft. u Budimpešti na mjernoj postavci iz poglavlja 4. Kao što je već bilo prikazano u poglavlju 5, testna ploča sa modulom projektovana je da sadrži filtre za EMC mjerenja. Ova filtarska kola dodata su na ulaz i izlaz električnog kola testnog modula. Na ulazu su izvođena mjerenja struje (1 Ω metoda), a na izlazu kola vršeno je mjerenje napona (150 Ω metoda). Ukupno je izvršeno 8 mjerenja na dvije varijante modula boost konvertera: 4 mjerenja za modul sa uzemljenjem na gornjem sloju i 4 za varijantu modula bez uzemljenja na gornjem sloju:

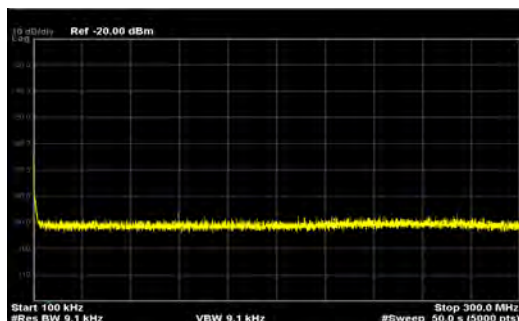
1. Modul sa uzemljenjem, mjerenje struje (1 Ω metoda). Nisu korišćeni filtri sa feritnim jezgrima, samo 0 Ω otpornici.
2. Modul bez uzemljenja na gornjem sloju, mjerenje struje (1 Ω metoda). Nisu korišćeni filtri sa feritnim jezgrima, samo 0 Ω otpornici.

3. Modul sa uzemljenjem, mjerenje napona (150 Ω metoda). Nisu korišćeni filtri sa feritnim jezgrima, samo 0 Ω otpornici.
4. Modul bez uzemljenja na gornjem sloju, mjerenje struje (1 Ω metoda). Nisu korišćeni filtri sa feritnim jezgrima, samo 0 Ω otpornici.
5. Modul sa uzemljenjem, mjerenje struje (1 Ω metoda). Korišćeni su filtri sa feritnim jezgrima na ulazu kola i na sorsu MOSFET-a.
6. Modul bez uzemljenja na gornjem sloju, mjerenje struje (1 Ω metoda). Korišćeni su filtri sa feritnim jezgrima na ulazu kola i na sorsu MOSFET-a.
7. Modul sa uzemljenjem, mjerenje napona (150 Ω metoda). Korišćeni su filtri sa feritnim jezgrima na ulazu kola i na sorsu MOSFET-a.
8. Modul bez uzemljenja na gornjem sloju, mjerenje napona (150 Ω metoda). Korišćeni su filtri sa feritnim jezgrima na ulazu kola i na sorsu MOSFET-a.

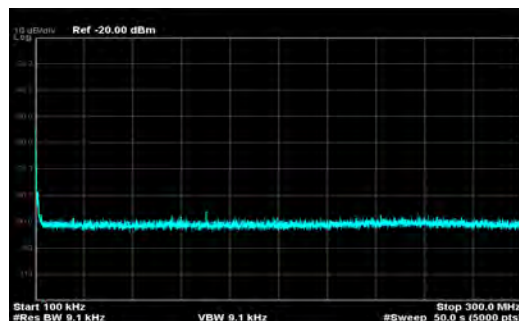
Mjerenja su s namjerom izvođena bez filtara sa feritnim jezgrima i sa njihovim dodatkom, kako bi se ispitao i njihov uticaj na kondukcionu emisiju. Kao i u poglavlju 4, analizator spektra korišćen je za prikaz rezultata i to sa sljedećim parametrima za svih 8 mjerenja:

- 9.1 kHz propustni opseg rezolucije (resolution bandwidth)
- Mjerni opseg: 100kHz - 300 MHz; podopseg 100kHz - 30 MHz
- Peak detector
- Sweep vrijeme: 50s
- PWM signal: uvijek uključen (100 % osvjetljenje ekrana)
- Ref. -20 dBm

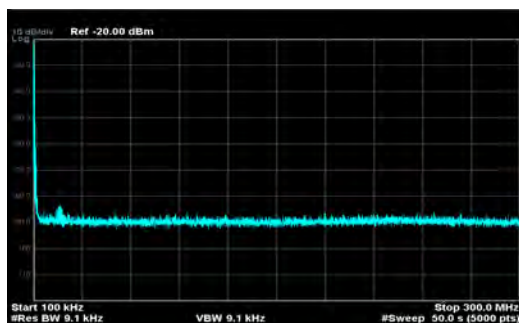
7.1 Rezultati mjerenja



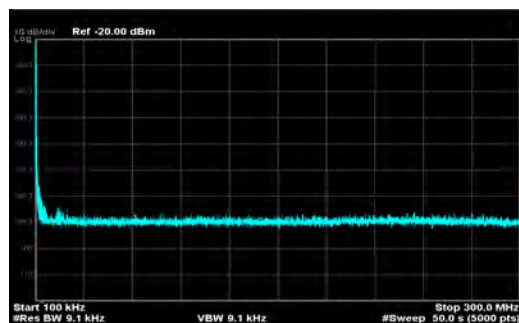
(a) Mjerenje 1.



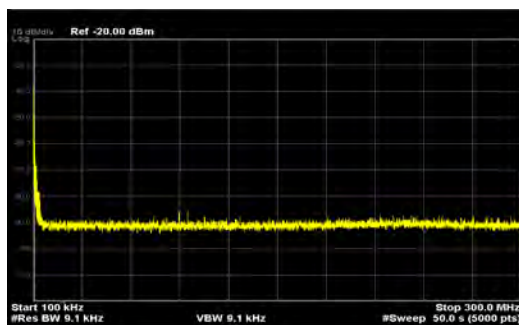
(b) Mjerenje 2.



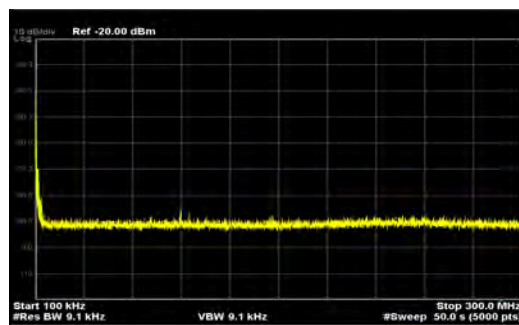
(c) Mjerenje 3.



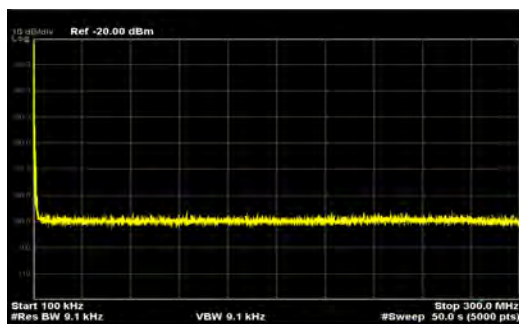
(d) Mjerenje 4.



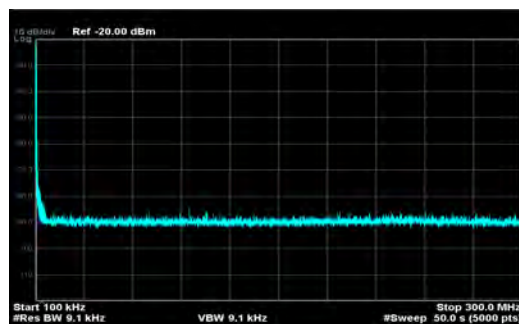
(e) Mjerenje 5.



(f) Mjerenje 6.



(g) Mjerenje 7.



(h) Mjerenje 8.

Slika 7.1: Mjerni rezultati u opsegu od 100 kHz - 300 MHz.

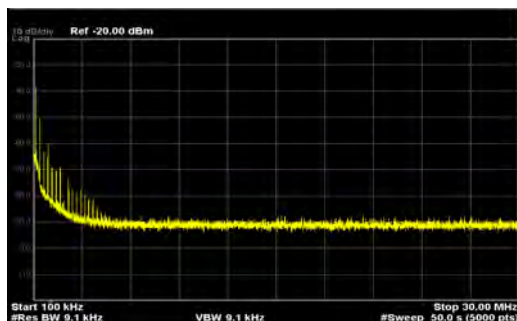
Prva stvar koja se da primijetiti posmatranjem rezultata sa slike 7.1 jeste da je najveća koncentracija kondukcijske emisije smještena u frekvenzijskom opsegu od 100 kHz do 30 MHz. Ovaj frekvenzijski opseg će, stoga, biti opseg od interesa u radu i simulaciju ćemo prilagoditi prvenstveno za taj frekvenzijski opseg. Drugi zaključak koji se može izvesti tiče se dodavanja filtera sa feritnim jezgrom. Očigledno je da ublažavaju efekat kondukcijske emisije na izlazu kola u frekvenzijskom opsegu od interesa. Bolja vizualizacija ovih uticaja i, uopšte, samih rezultata data je na slici 7.2, gdje su prikazani ponovno izmjereni rezultati u frekvenzijskom opsegu sa najvećom koncentracijom kondukcijske emisije (100 kHz - 30 MHz) radi kvalitetnijeg prikaza mjernih rezultata.

Upoređivanjem rezultata na slikama 7.2(c) i 7.2(g), kao i rezultata na slikama 7.2(d) i 7.2(h), uočava se koliko zapravo dodatak filtera sa feritnim jezgrom ublažava nivo kondukcijske emisije na izlazu kola u datom frekvenzijskom opsegu.

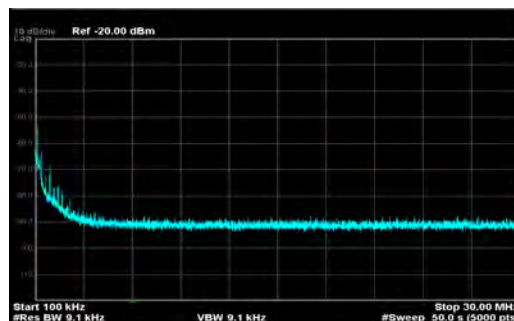
Ako sada uporedimo iste mjerne rezultate između dvije varijante modula (sa i bez uzemljenja na gornjem sloju), uočavamo da se rezultati, dobijeni mjerenjem struje na ulazu kola, ne razlikuju mnogo između ove dvije varijante modula, dok je razlika primjetna u rezultatima na izlazu kola (mjerenja napona). Iz tog razloga, simulacijom ćemo pokušati da reprodukujemo rezultate izmjerenog napona sa izlaza kola. Ograničićemo se na rezultate sa slika 7.2(c) i 7.2(d). Uticaj prisustva uzemljenja na gornjem sloju ploče ovdje je evidentan pa ćemo simulacijom pokušati da reprodukujemo i taj efekat, pomoću modela pripremljenog u poglavlju 6. Efekat je izražen ali ne daje visok nivo kondukcijske emisije kao na slici 4.6. Razlog za to jeste uklanjanje uzemljenja samo sa gornjeg sloja štampane ploče, a ne i sa donjeg gdje su takođe komponente, što je bio slučaj sa buck konverterom u poglavlju 4. Donji sloj štampane ploče sa modulom, koja je predmet istraživanja u radu, sadrži veoma veoma osjetljive elektronske komponente. Tu ubrajamo mikrokontroler, kao i MOSFET-e sa kojima za hlađenje tako da bi nedostatak uzemljenja na ovom sloju mogao dovesti do pregrijavanja ovih komponenti. U svakom slučaju, nedostatak uzemljenja na gornjem sloju štampane ploče dovodi do pogoršanja performansi kola u pogledu kondukcijske emisije i nije zanemarljiv, ali neće dovesti do velike emisije kola u kompletnom frekvenzijskom opsegu, kao kada se ukloni i sa donjeg sloja gdje se nalazi kolo za kontrolu rada boost konvertera.

Sa ovim rezultatima kao referencom, simulacioni modeli su unaprijeđeni i njihove performanse ocijenjene u skladu sa dobijenim rezultatima.

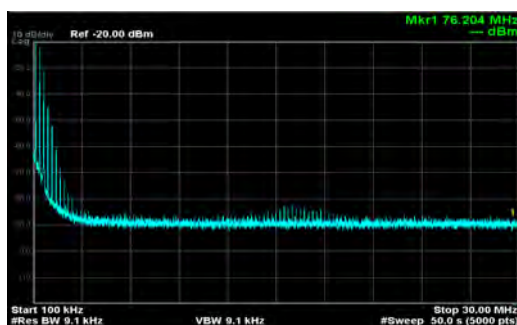
7.1 Rezultati mjerenja



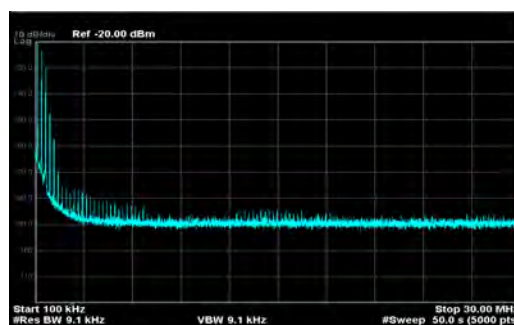
(a) Mjerenje 1.



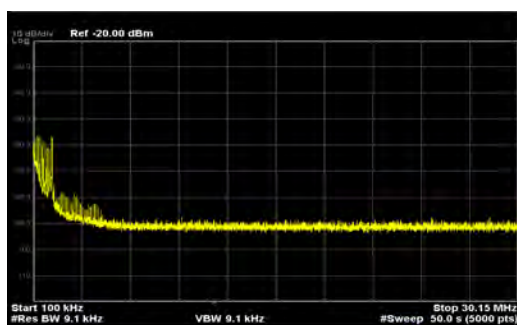
(b) Mjerenje 2.



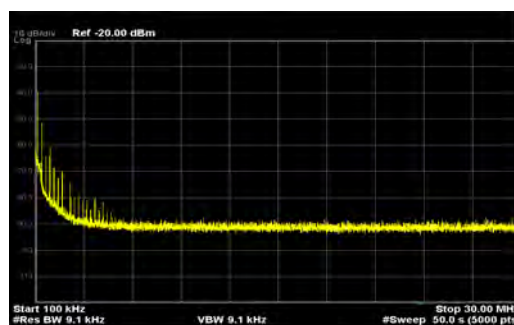
(c) Mjerenje 3.



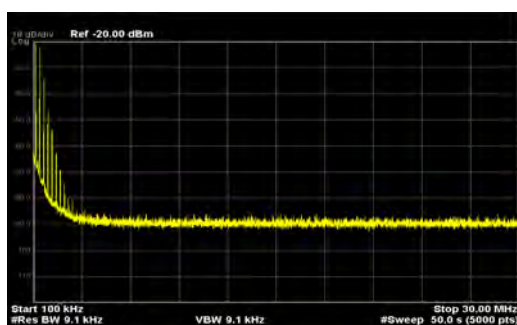
(d) Mjerenje 4.



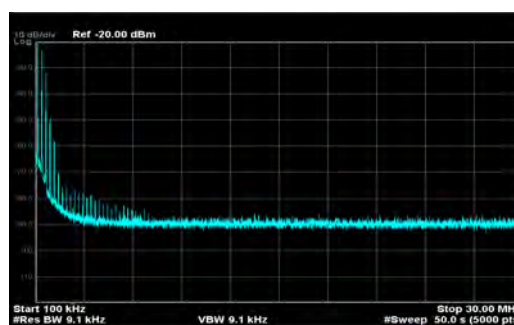
(e) Mjerenje 5.



(f) Mjerenje 6.



(g) Mjerenje 7.

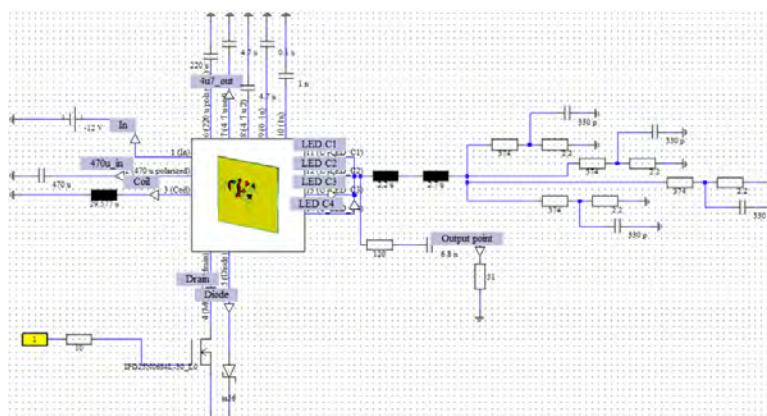


(h) Mjerenje 8.

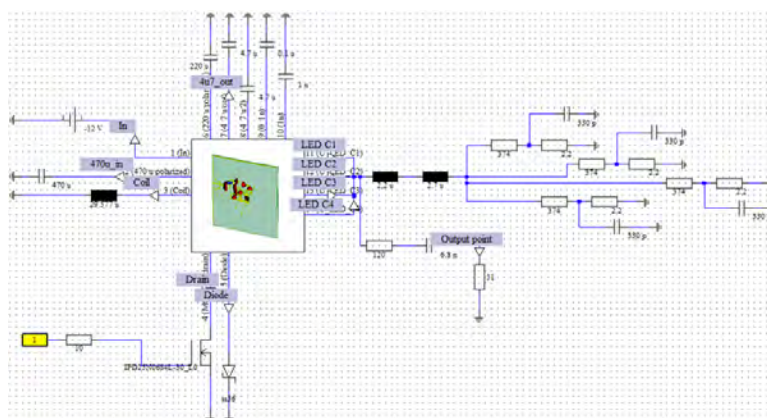
Slika 7.2: Mjerni rezultati u opsegu od 100 kHz - 30 MHz.

7.2 Rezultati simulacija

Simulacionim modelima iz dijela 6.2 dodati su elementi iz mjerne postavke kako bi se ona što vjernije aproksimirala. To podrazumijeva dodavanje kola za filtriranje na izlazu, kao i dodavanje mjerne sonde tj. njenog ekvivalentnog kola.



(a) PCB: Model sa uzemljenjem.

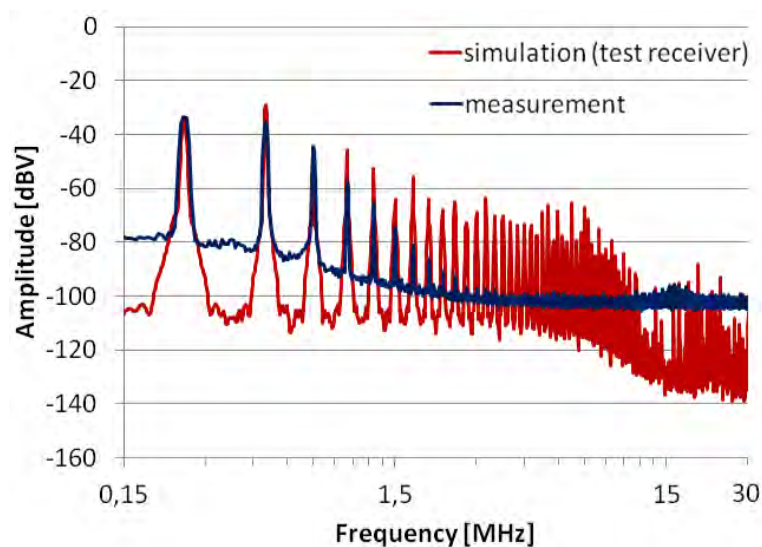


(b) PCB: Model bez uzemljenja na gornjem sloju.

Slika 7.3: Konačni simulacioni modeli sa dodatim elementima iz mjerne postavke.

Nad modelima sa slike 7.5 izvedena je simulacija u vremenskom domenu i to u vremenskom intervalu od 0 do 5 ms (kao i u 6.2.3). Rezultati naponske karakteristike, dobijene na mornoj sondi u simulaciji, naknadno su obrađeni pomoću Furijeove transformacije. Furijeova transformacija nad ovim signalom u vremenskom domenu izvedena je u 5000 tačaka i taj rezultat upoređen je sa rezultatom iz mjernog postupka

na slici 7.4. U tu svrhu, rezultati mjerenja prikazani su u logaritamskoj skali, umjesto linearne, radi lakše komparacije.

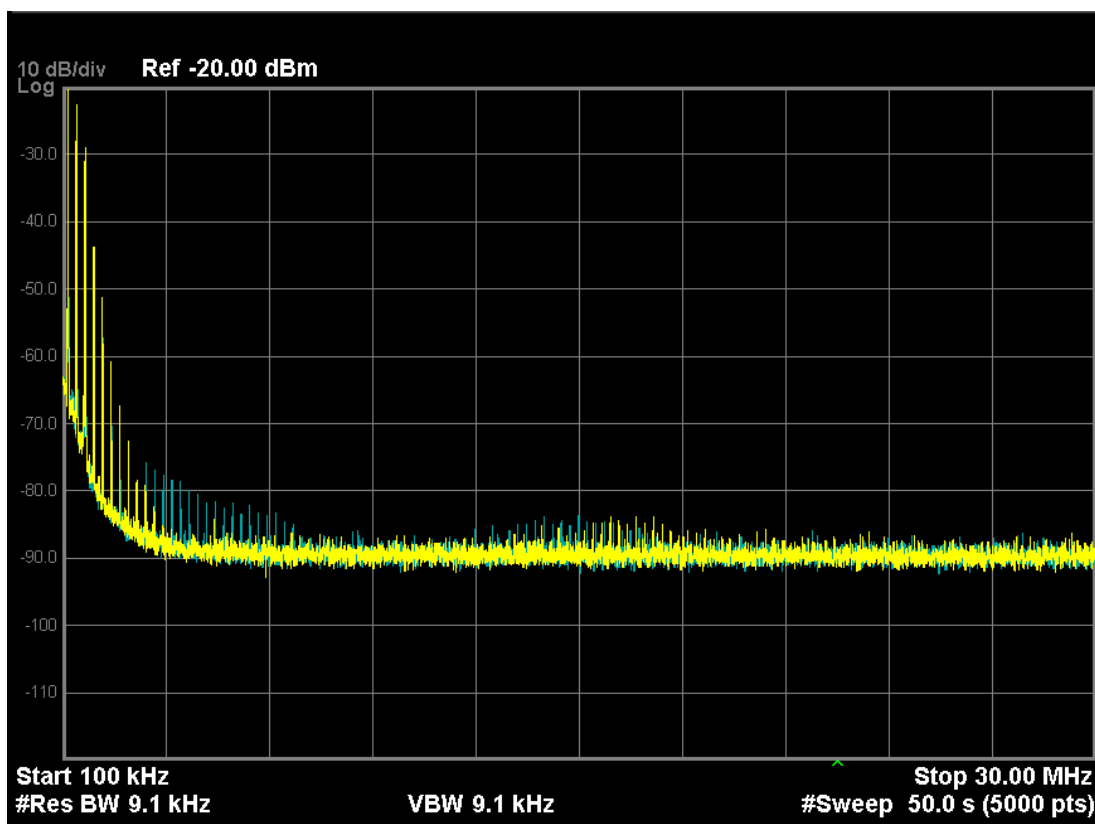


Slika 7.4: Preliminarni rezultati simulacije, upoređeni sa rezultatima mjerenja.

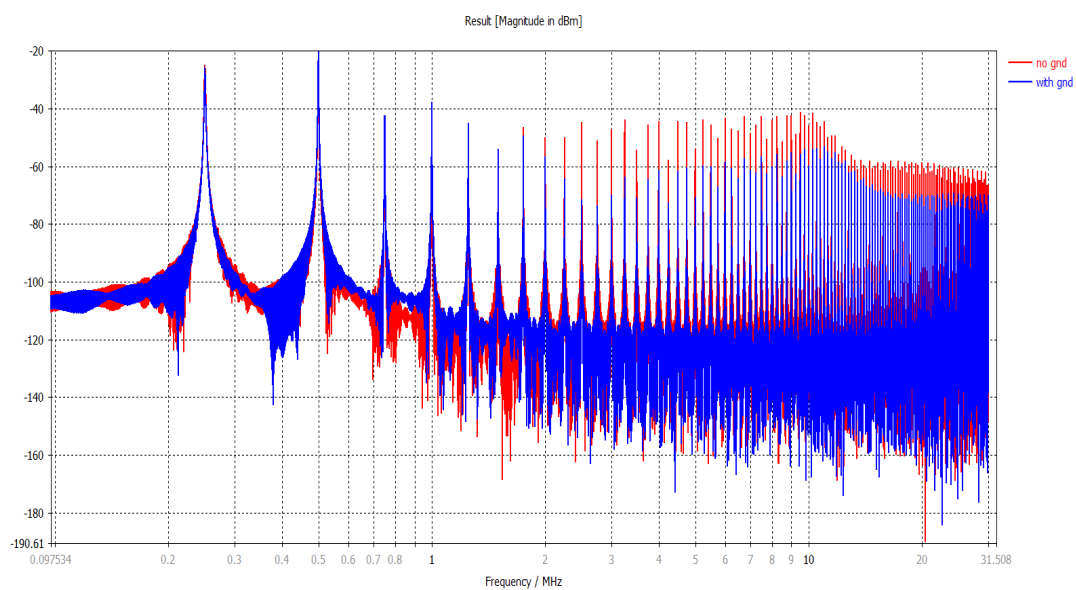
Posmatrajući rezultate, uočavamo dobru aproksimaciju od strane simulacionog modela na početku i po frekvenciji i po amplitudi ali zatim dolazi do naglog odstupanja simulacije od mjerenja po pitanju amplitude. Postoji nekoliko mogućih razloga za to. Prvi, i najvjerojatniji, razlog jeste problem u proračunu, koji nam ukazuje na nedovoljan broj tačaka za proračun (mora se uzeti broj tačaka veći od 5000). Takođe, parametri u reprezentaciji rezultata mjerenja mogli bi se dodatno prilagoditi. Problem u proračunu rezultata očigledan je oko frekvencije od 15 MHz gdje neki odbirci fale i izražen je pad u nivou šuma, što se kosi sa realnošću. Drugi mogući razlozi za odstupanja simulacije mogu biti neprecizne aproksimacije parazitnih efekata elemenata kola, kao i same mjerne sonde. Ovo će biti naredni koraci u poboljšanju simulacionog modela.

Druga simulacija izvršena je sa većim bojem odbiraka - 1000000 na obje varijante modula (sa i bez uzemljenja na gornjem sloju). Poređenja rezultata data su na slici 7.5. Uočavamo dobru korelaciju između modela i u mjerenju i u simulaciji. To ukazuje da model radi dobro i da ima prostora za postizanje još boljih rezultata, odnosno većeg nivoa uporedivosti između simulacije i mjerenja kroz dalje poboljšanje simulacionog modela i bolju reprezentaciju mjernih rezultata.

7.2 Rezultati simulacija



(a) Mjerenje.

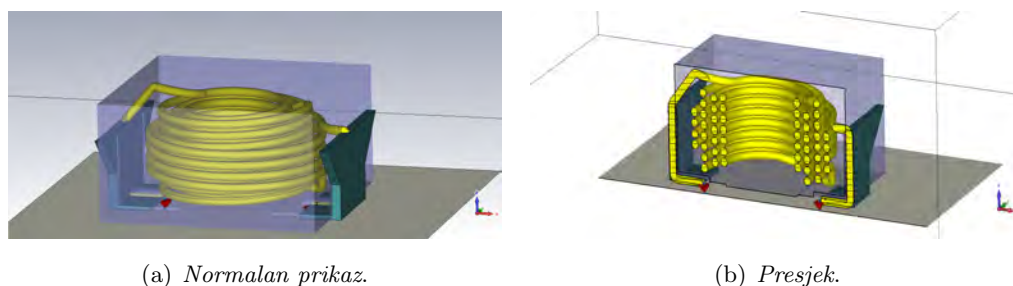


(b) Simulacija.

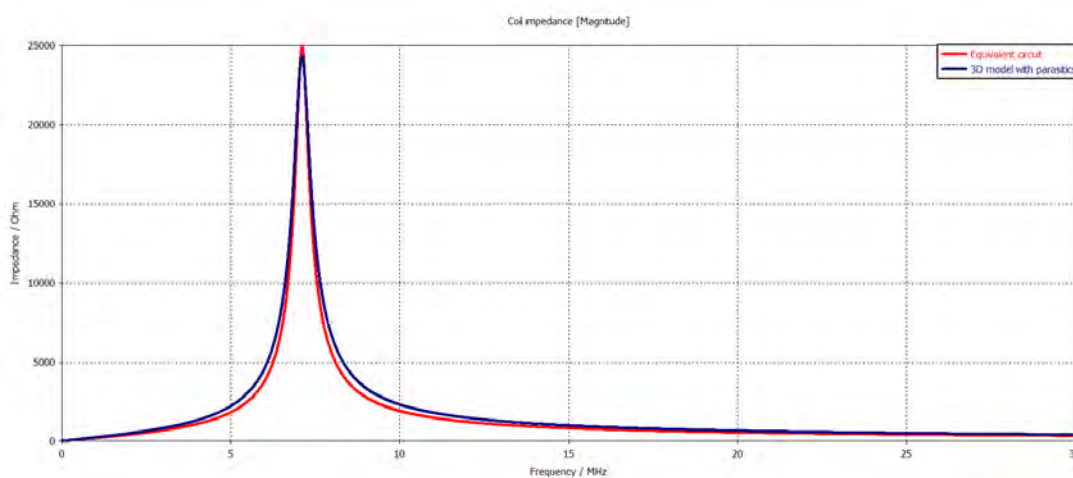
Slika 7.5: Rezultati mjerenja i simulacija između dvije varijante modula.

7.2 Rezultati simulacija

Korak bliže poboljšanju simulacionog modela jeste dodavanje 3D modela kalema tj. aproksimacije realnog kalema. Performanse 3D modela upoređene su sa performansama ekvivalentnog kola od proizvođača u frekvencijskom opsegu od 100 kHz - 30 MHz. Na osnovu rezultata sa slike 7.6, uočavamo da 3D model dobro aproksimira ekvivalentni i da mu je rezonantna frekvencija oko 7.1 MHz.



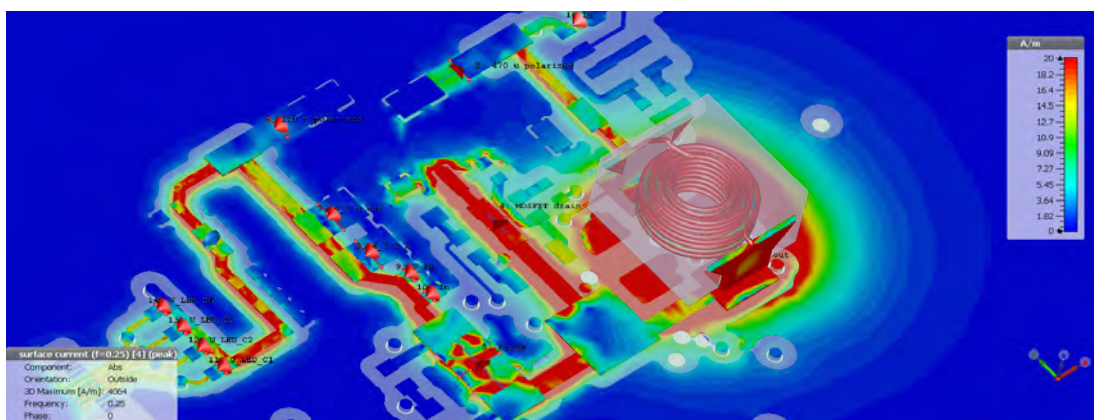
Slika 7.6: 3D model realnog kalema.



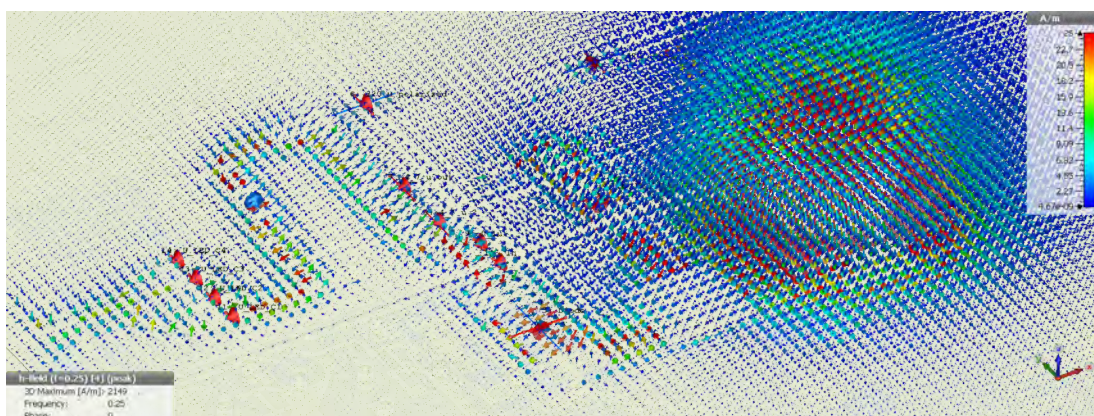
Slika 7.7: Impedansa kalema u frekvencijskom domenu.

Simulacija modela sa dobrim uzemljenjem izvedena je ponovo sa dodatkom realnog kalema. Postavljanjem monitora polja na frekvenciju komutacije i na rezonantnu frekvenciju kalema, možemo vizualizovati H polje i površinske struje. Njihova distribucija može nam ukazati na moguće probleme koje ne možemo uočiti mjerenjem. Program nudi i mogućnost prikaza ovih rezultata na pojedinačnim slojevima ploče. Ovo predstavlja veliku prednost modernih simulacionih metoda i alata.

7.2 Rezultati simulacija



(a) Površinske struje na 250 kHz.



(b) H-polje na 250 kHz.

Slika 7.8: Prikaz 2D/3D rezultata simulacionog modela.

Iako simulacija u ovom trenutku ne aproksimira perfektno mjerenje, postoji dobra korelacija među simulacionim modelima, isto kao i među varijantama modula u realnosti i dobra je osnova za nastavak rada na poboljšanju modela i postizanju većeg stepena uporedivosti sa realnim. Ipak, model i u ovom trenutku može služiti za komparativne analize, kao što je bio slučaj sa uzemljenjem u radu, na osnovu kojih možemo pouzdano zaključiti da li će neka promjena na layout-u dovesti do poboljšanja ili pogoršanja konduktivne emisije modula. Na osnovu ovih komparativnih analiza, takođe se mogu predlagati mjere za optimizaciju kola, ali to prevazilazi okvire ovog rada.

Zaključak

U toku ovog šestomjesečnog istraživanja, predložena je i ispitana ideja razvoja procedure za simulaciju kondukcione emisije tipičnog hardver modula u instrument tabli, kao i mogućnost njene integracije u kompletan razvojni proces automobilskih instrument tabli. Motivacija za istraživanje bila je unaprijeđenje postojećeg pristupa u razvojnom procesu tkz. *front loaded engineering*, koji podrazumijeva dizajn i optimizaciju proizvoda već u ranom razvojnom stadijumu. U slučaju automobilske industrije i, konkretno, razvoja instrument tabli, front loaded engineering se odnosi na procese hardver i layout dizajna i razvoja. Optimizacijom na nivou hardver modula, postiže se i optimizacija na nivou komponente odnosno kasnije i na nivou sistema, čime se postiže ušteda vremena i novca. Dodatak simulacija ovom procesu doveo bi do dodatne uštede na vremenskom i ekonomskom planu.

Uzevši za primjer modul boost konvertera i rezultate mjerenja kondukcione emisije na njemu za referencu, simulaciona procedura razvijana je sa ciljem da dobro aproksimira rezultate dobijene mjerenjem.

Prvenstveno je odabrana mjerna metoda za mjerenje kondukcione emisije i to je unaprijeđena verzija $1/150 \Omega$ mjerne metode (vidi poglavlje 4) zbog svoje jednostavnosti i pouzdanosti mjernih rezultata. Uzimajući u obzir zahtjeve mjerne postavke (potrebne dimenzije modula, EMI filtri), kao i mjere za redukciju kondukcione emisije modula, layout dizajn boost konverter modula napravljen je u programu EAGLE CAD. Varijanta istog modula, bez uzemljenja na gornjem sloju, dizajnirana je u cilju ispitivanja efekta uzemljenja na provedenu emisiju. Rezultati mjerenja kondukcione emisije na izlazu ovih modula odabrani su za reference za simulacione modele.

Razvoj simulacionog modela čine dvije faze: 2D i 3D modelovanje. 2D modelovanje podrazumijeva šematski dizajn kola u programima Power Stage Designer, LT Spice i CST Design Studio. 3D modelovanje vršeno je u CST Microwave Studio modulu tako

što je za osnovu upotrijebljen importovani DXF fajl sa pomenutim layout dizajnom modula iz programa EAGLE CAD. Na ovaj model dodati su elementi kola u vidu portova ili ekvivalentnih RLC kola, a zatim povezani sa šemom kola u modulu CST Design Studio koji je direktno povezan sa modulom CST Microwave Studio radi lakše realizacije kompleksnih djelova kola. Nakon definisanja parametara simulacije i dodavanja elemenata iz mjerne postavke (mjerna sonda i filtri), izvršena je ko-simulacija 2D i 3D modela u vremenskom domenu. Rezultati simulacije u vremenskom domenu se primjenom Furijeove transformacije prebacaju u frekvencijski domen. Preliminarni rezultati pokazali su određena odstupanja simulacije od rezultata mjerenja, kao i da se veća tačnost može postići daljim poboljšanjem modela i same simulacione postavke. Dobra korelacija između mjernih i simulacionih rezultata pri ispitivanju uticaja uzemljenja na kondukciju emisiju potvrđuje dobru funkcionalnost modela i daje mogućnost primjene modela za komparativne analize.

U toku istraživanja došlo se do nekoliko zaključaka. Prvenstveno, 2D simulacije nude dobre rezultate kada je u pitanju provjera funkcionalnosti kola. Ukoliko se model pravilno projektuje, tako da dobro aproksimira realni, moguće je 2D simulacijom vizualizovati i neke parazitne efekte, kao što je Milerov efekat na MOSFET-u i slično. Drugo, simulaciona procedura i model dobijen kao krajnji rezultat može izvršiti estimaciju kondukcione emisije u frekvencijskom opsegu od 100 kHz - 30 MHz sa određenom tačnošću uz mogućnost primjene za komparativne analize. Treće, benefit primjene ove simulacione procedure jeste vizualizacija efekata koji nisu vidljivi mjerenjem. To podrazumijeva 2D i 3D rezultate simulacije i prikaz distribucije H polja i površinskih struja na željenim frekvencijama. Postoji i mogućnost vizualizacije ovih efekata na svakom sloju štampane ploče pojedinačno, što je naročito korisno za otkrivanje problema u kolu. Četvrto, model se uz manje izmjene može ponovo koristiti i prilagođavati za ispitivanje kondukcione emisije u drugim projektima.

Rad ostavlja je i mogućnost daljeg istraživanja na ovu temu kao što je određivanje tehnika za poboljšanje simulacionog modela u cilju povećanja tačnosti simulacije: definisanje parazitnih efekata u kolu, ponovno mjerenje sa drugačijim podešavanjima za prikaz rezultata, kao i dodavanje 3D modela realnih komponenti (kalem, polarizovani kondenzatori) u simulacioni model. Prevažilaženje ograničenja u radu, kao što su frekvencijski opseg za simulaciju (tj. njegovo proširenje) i kvalitet modela, mogla bi se ispitati izgradnjom modela na nekom od boljih formata, kao što su Zuken ili ODB++.

Popis slika

1.1	Uopštteni model sprege EMI.	4
2.1	Uopštteni blok dijagram mjerenja imuniteta na kondukcioni emisiju. . .	10
2.2	Tipični dijagram serijske mreže za stabilizaciju impedanse u automobilskoj industriji.	10
2.3	Uopštteni blok dijagram mjerenja imuniteta na zračenu emisiju.	11
2.4	Uopšttena mjerna postavka za mjerenje zračene emisije.	12
2.5	Uopšttena mjerna postavka za mjerenje emisije pomoću trakastog voda. .	13
2.6	Uopšttena mjerna postavka za mjerenje provedene emisije.	14
2.7	Blok dijagram mjerne postavke za 1/150 Ω metodu.	16
2.8	Uopšttena postavka 1 Ω metode za mjerenje struje smetnje.	16
2.9	Uopšttena postavka 150 Ω metode za mjerenje napona smetnje.	16
3.1	Uopštteni blok dijagram linearnog izvora napajanja.	17
3.2	Uopštteni blok dijagram prekidačkog izvora napajanja.	18
3.3	Uopšttena šema buck konvertera.	18
3.4	Protok struje tokom <i>on</i> i <i>off</i> stanja buck konvertera.	19
3.5	Vremenski dijagrami buck konvertera u kontinualnom režimu rada. . . .	20
3.6	Uopšttena šema boost konvertera.	21
3.7	Protok struje tokom <i>on</i> i <i>off</i> stanja boost konvertera.	21
3.8	Vremenski dijagrami boost konvertera u kontinualnom režimu rada. . . .	22
3.9	Boost konverter sa pojednostavljenom šemom ulaznog filtra.	24
3.10	Ekvivalentno kolo realnog kondenzatora na visokim frekvencijama. . . .	25
3.11	Zavisnost impedanse realnog kondenzatora od frekvencije.	25
3.12	Kritična petlja buck konvertera.	27

3.13	Kritična petlja boost konvertera.	28
3.14	Snubber kolo za boost konverter	29
4.1	Blok dijagram mjerne postavke.	31
4.2	Adaptivna tabla sa uzemljenjem. [12]	32
4.3	Kontrolna tabla montirana na zadnjoj strani adaptivne table. [12]	33
4.4	Langer sonda prikačena na mjernu tačku na modulu. [12]	33
4.5	Konačna organizacija mjerne postavke. [12]	34
4.6	Rezultati prošlogodišnjeg mjerenja.	36
4.7	Rezultati ponovljenog mjerenja.	36
5.1	Modul boost konvertera u programu EAGLE CAD.	38
5.2	PCB: Organizacija slojeva.	39
5.3	Napon na komutacionoj tački.	40
5.4	Napon na diodi.	40
5.5	Napon na kalem.	40
5.6	Struja kalema.	41
5.7	Izlazni napon.	41
5.8	Oscilacije izlaznog napona.	41
5.9	Modul boost konvertera bez uzemljenja na gornjem sloju (EAGLE CAD).	42
5.10	Napon na komutacionoj tački.	42
5.11	Napon na diodi.	43
5.12	Napon na kalem.	43
5.13	Izlazni napon.	43
6.1	Power Stage Designer korisničko okruženje sa dobijenim parametrima kola.	45
6.2	Osnovni model boost konvertora sa ekvivalentnim rezistivnim potrošačem.	46
6.3	Poređenje karakteristika kalema između PSD i LT Spice IV simulacija.	47
6.4	Poređenje karakteristika diode između PSD i LT Spice IV simulacija.	48
6.5	Unaprijeđeni model boost konvertera.	49
6.6	LT SpiceIV: Rezultati simulacije unaprijeđenog modela.	50
6.7	Upoređivanje struje kalema između mjerenja i simulacije.	51
6.8	Upoređivanje napona na komutacionoj tački u vremenskom domenu.	52
6.9	Upoređivanje napona na komutacionoj tački u frekvencijskom domenu.	53

6.10	Upoređivanje naponskih karakteristika paljenja i gašenja MOSFET-a. . .	54
6.11	Upoređivanje karakteristika izlaznog napona u vremenskom domenu. . .	55
6.12	Upoređivanje karakteristika izlaznog napona u vremenskom domenu. . .	56
6.13	CST Design Studio: Boost konverter kolo sa PSpice modelima.	57
6.14	Rezultati simulacije 2D modela u CST Design Studio - karakteristike kalema i diode.	58
6.15	Rezultati simulacije 2D modela u CST Design Studio - karakteristike izlaznog napona.	59
6.16	Poboljšana verzija modela boost konvertera.	60
6.17	Karakteristike kalema.	61
6.18	Karakteristike diode.	62
6.19	Izlazni napon boost konvertera.	63
6.20	Štampana ploča modula importovana kao DXF fajl u CST Microwave Studio.	65
6.21	Štampana ploča modula sa povezanim putanjama i čvorovima u kolu. . .	65
6.22	3D model boost konvertera sa dodatim elementima kola.	66
6.23	Presjeci 3D modela sa prikazom tetraedralne mreže.	66
6.24	3D model boost konvertera sa prikazom tetraedralne mreže.	67
6.25	3D model boost konvertera sa prikazanim graničnim uslovima.	68
6.26	3D model boost konvertera sa realizacijom komponenti u CST Design Studio.	69
6.27	Izlazni napon izmjeren na potrošaču.	69
6.28	Rezultati kosimulacije u vremenskom domenu.	70
6.29	3D model boost konverter modula bez uzemljenja na gornjem sloju. . .	71
6.30	Šema 3D modela boost konverter modula bez uzemljenja na gornjem sloju.	71
6.31	Prikaz tetraedralne mreže 3D modela boost konvertera.	72
6.32	Izlazni napon izmjeren na potrošaču.	72
6.33	Rezultati simulacije u vremenskom domenu.	73
7.1	Mjerni rezultati u opsegu od 100 kHz - 300 MHz.	76
7.2	Mjerni rezultati u opsegu od 100 kHz - 30 MHz.	78
7.3	Konačni simulacioni modeli sa dodatim elementima iz mjerne postavke.	79
7.4	Preliminarni rezultati simulacije, upoređeni sa rezultatima mjerenja. . .	80

7.5	Rezultati mjerenja i simulacija između dvije varijante modula.	81
7.6	3D model realnog kalema.	82
7.7	Impedansa kalema u frekvencijskom domenu.	82
7.8	Prikaz 2D/3D rezultata simulacionog modela.	83
7.9	Mjerna sonda prikačena za mjerenje struje na ulazu kola.	94
7.10	Filtar na izlaznoj tački kola za mjerenje napona.	94
7.11	Modul boost konvertera sa uzemljenjem na gornjem sloju.	95
7.12	Modul boost konvertera bez uzemljenja na gornjem sloju.	96

Reference

- [1] Mark Csornyei, Robert Bosch GmbH, “Conducted emission measurement of power supply modules,” *Application Note*, 2014. iii, 27
- [2] Prasad Kodali, *Engineering Electromagnetic Compatibility*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1996. 3, 4, 23
- [3] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2009. 4, 8, 10, 11, 23
- [4] Prof Dr rer nat Wolfgang Langguth, “Power Quality Application Guide - Earthing and EMC: Fundamentals of Electromagnetic Compatibility (EMC),” *Leonardo Power Quality Initiative and Copper Development Association*, 2006. 4
- [5] Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques, “CISPR 25:2008 Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers,” 2008. 7, 15
- [6] International Electrotechnical Commission, “IEC 61000-4-3:2006 + AMD1:2007 + AMD2:2010 : Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test,” 2010. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/4212> 7
- [7] International Organization for Standardization, “ISO 7637-2:2011 Road vehicles - Electrical disturbances from conduction and coupling - Part 2: Electrical transient conduction along supply lines only,” 2011. [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=50925 7

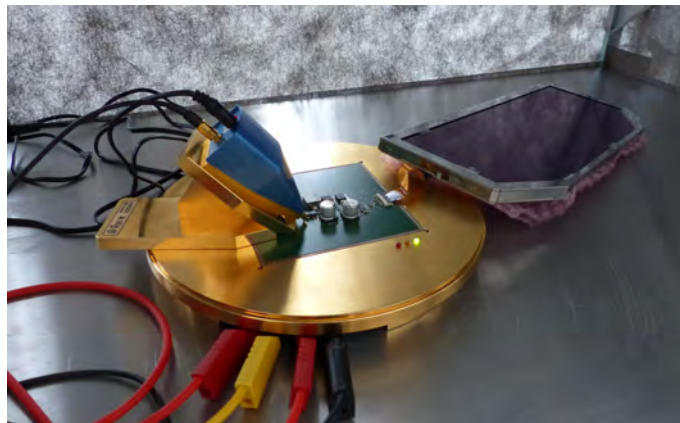
- [8] International Electrotechnical Commission , “IEC 62132-1:2006 Integrated circuits - Measurement of electromagnetic immunity, 150 kHz to 1 GHz - Part 1: General conditions and definitions,” 2006. 7, 15
- [9] International Electrotechnical Commission, “IEC 61967-1:2002 Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz - Part 1: General conditions and definitions,” 2002. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/6184> 7, 15
- [10] International Electrotechnical Commission , “IEC 61967-4:2002+AMD1:2006 CSV Consolidated version: Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz - Part 4: Measurement of conducted emissions - 1 Ω /150 Ω direct coupling method,” 2006. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/6190> 7, 15
- [11] BMW Group Standard, “GS95002 2010-06: Electromagnetic compatibility (EMC) requirements and tests.” 2010. 8
- [12] B. Szűcs, *Development of a measurement arrangement for evaluation of electromagnetic disturbance emission of switched mode power supplies*. Bachelor thesis, Budapest University of Technology and Economics, 2014. 8, 15, 26, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 87
- [13] International Organization for Standardization, “ISO 26262: Road vehicles - Functional safety,” 2011. [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=43464 9
- [14] ZVEI -Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., *Generic IC EMC Test Specification: (ZVEI – German Electrical and Electronic Manufacturers’ Association) Electronic Components and Systems Division*, 2010. 15
- [15] Bernd Deutschmann, Gunter Winkler, Roland Jungreithmair, “Measuring the Electromagnetic Emissions of Integrated Circuits with IEC 61967-4 (The Measuring Method and its Weaknesses),” *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE 2002*, 2002. 15

- [16] Billings, Keith H. and Morey, Taylor, *Switchmode Power Supply Handbook*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2011. [Online]. Available: <http://www.worldcat.org/oclc/676809857> 23
- [17] Texas Instruments Incorporated [SNVA489,C], “AN-2162 Simple Success With Conducted EMI From DC-DC Converters (Rev. C),” *Application Report*, 2013. 24
- [18] Texas Instruments Incorporated, Jason Arrigo, “Input and Output Capacitor Selection,” *Application Report*, 2006. 24
- [19] Tsyoshi Funaki, “A study on self turn-on phenomenon in fast switching operation of high voltage power MOSFET,” *3rd CPMT Symposium Japan (ICSJ), Kyoto, IEEE 2013*, 2013. 27
- [20] Juergen Boehmer, Joerg Schumann, Hans-Guenter Eckel, “Effect of the miller-capacitance during switching transients of IGBT and MOSFET,” *15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), Novi Sad, 2012*. 27
- [21] Advanced Power Technology: McArthur, Ralph C., “Optimizing MOSFET and IGBT Gate Current to Minimize dv/dt Induced Failures in SMPS Circuits,” *Application Note APT0102*, 2001. 27
- [22] Fairchild Semiconductor: Peter Haaf, Jon Harper, “Understanding Diode Reverse Recovery and its Effect on Switching Losses,” *Fairchild Power Seminar*, 2007. 27
- [23] Zhe LI, David Pommeranke, “EMI Specifications of Synchronous DC-DC Buck Converters,” *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE 2005*, 2005. 27
- [24] Texas Instruments Incorporated , “Minimizing Buck-Boost (Inverting) Converter High Frequency Switching Noise,” *Application Report*, 2011. 28
- [25] Texas Instruments Incorporated, Jeff Falin, “Minimizing Ringing at the Switch Node of a Boost Converter,” *Application Report*, 2006. 28, 29
- [26] Texas Instruments Incorporated, “Switched mode power supplies layout tips and hints: Texas Instruments in Automotive,” *Application Note*, 2014. 28, 37

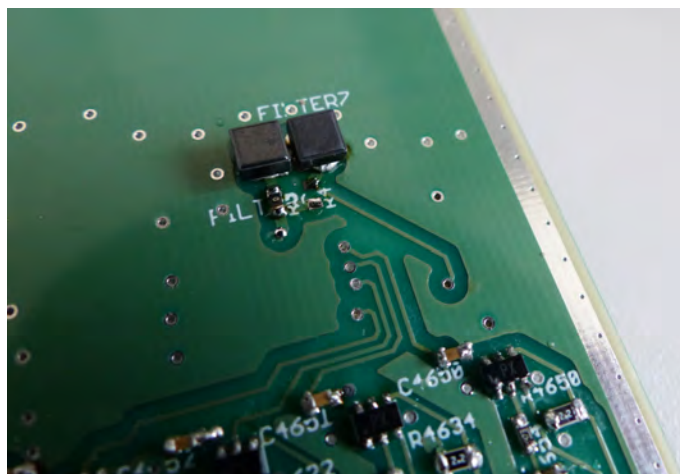
REFERENCE

- [27] Keong Kam, David Pommeranke, “EMC Guideline for Synchronous Buck Converter Design,” *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE 2009*, 2009. 29
- [28] C. Tantisukarom, W. Khan-ngern, S. Nitta, “Conducted emission of active snubber boost converter at design stage,” *Proceedings of the Power Conversion Conference, PCC Osaka 2002*, 2002. 29
- [29] Langer EMV-Technik GmbH, “EMC Measurement on IC: Emission: RF current/voltage.” [Online]. Available: <http://www.langer-emv.com/beratung/messunterstuetzung-am-ic/messplaetze/emission-hf-strom-spannung/> 31
- [30] Andreas Barchanski, Jens Krämer, Pietro Luzzi, “EMC Simulation in the Design Flow of Modern Electronics,” *Microwave Journal*, 2014. [Online]. Available: https://www.cst.com/Content/Articles/article988/2014-12_MWJ_EM-Design-Flow-Modern-Electronics.pdf 57
- [31] Computer Simulation Technology (CST), “CST MICROWAVE STUDIO - Workflow and Solver Overview,” 2015. 57
- [32] Computer Simulation Technology (CST), Lamb Kevin, “White paper on boundaries and symmetries for EM simulatios,” 2011. 64

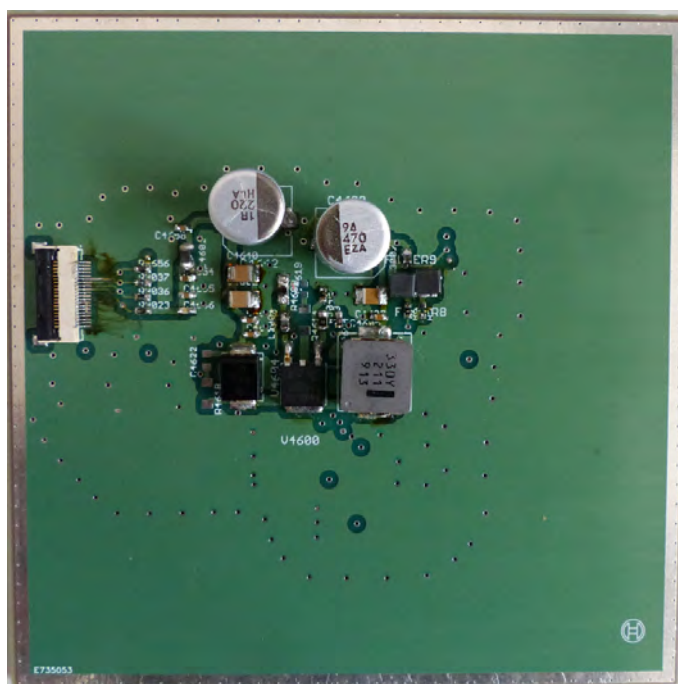
Dodatak



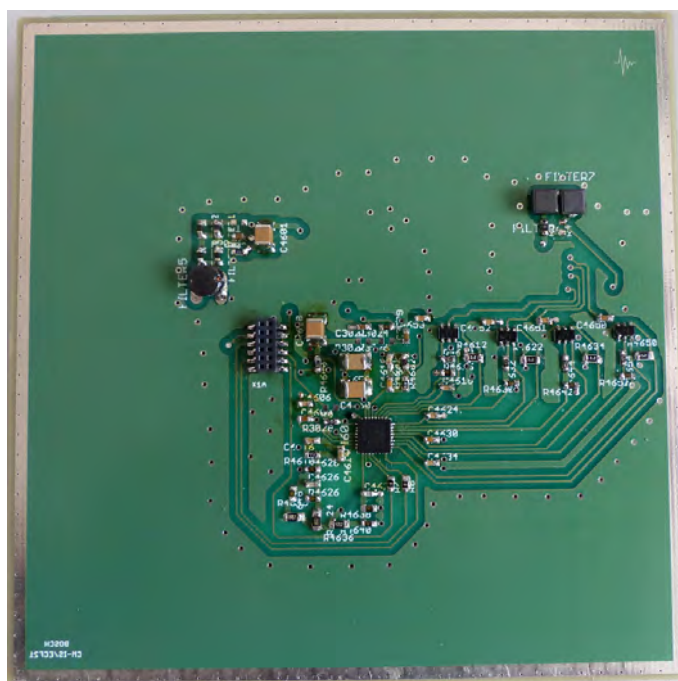
Slika 7.9: Mjerna sonda prikačena za mjerenje struje na ulazu kola.



Slika 7.10: Filtar na izlaznoj tački kola za mjerenje napona.

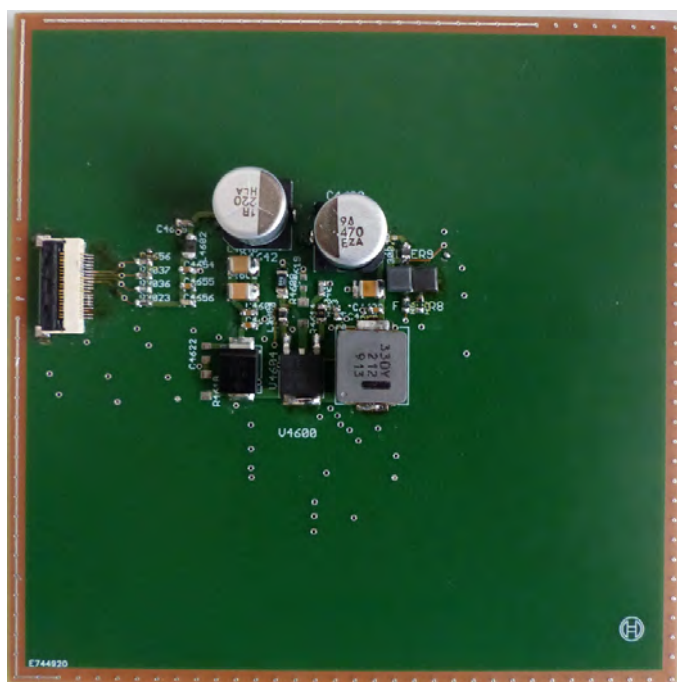


(a) PCB: Gornja strana.

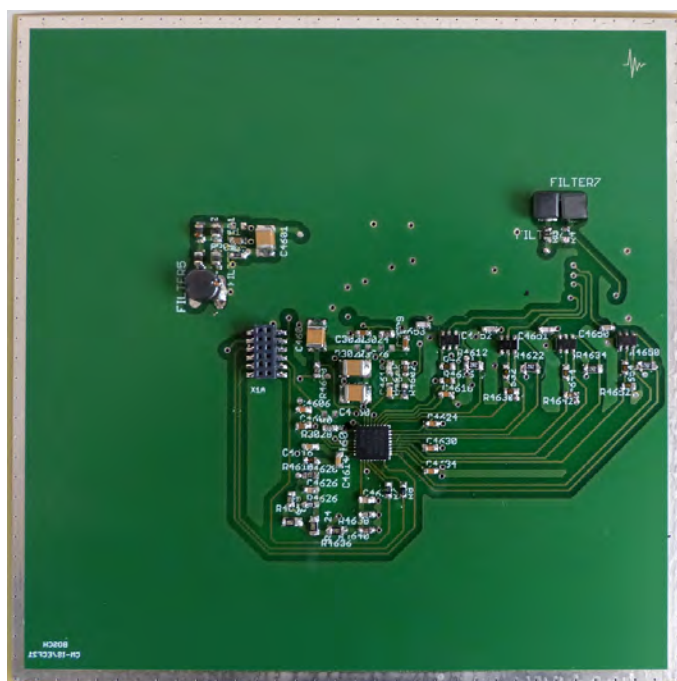


(b) PCB: Donja strana.

Slika 7.11: Modul boost konvertera sa uzemljenjem na gornjem sloju.



(a) PCB: Gornja strana.



(b) PCB: Donja strana.

Slika 7.12: Modul boost konvertera bez uzemljenja na gornjem sloju.

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u **Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore** unese magistarski rad pod naslovom

INTEGRACIJA SIMULACIONOG POSTUPKA ZA RJEŠAVANJE PROBLEMA ELEKTROMAGNETNE KOMPATIBILNOSTI U RAZVOJNI PROCES AUTOMOBILSKIH INSTRUMENT TABLI

koji je moj autorski rad. Autorska prava na rad dijelim sa kompanijom Robert Bosch GmbH u okviru koje sam i vršila istraživanje opisano u radu. Izuzeci zahtijevaju pismenu saglasnost autora i kompanije Robert Bosch GmbH.

Magistarski rad, pohranjen u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore može se koristiti pod uslovima definisanim licencom Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio/la¹

- Autorstvo
- Autorstvo – bez prerada
- Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima
- Autorstvo – nekomercijalno
- Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada
- Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

Potpis magistranda

Žuravović M.

U Podgorici

Datum: 27.04.2016.

¹ Odabрати (čekirati) jednu od šest ponuđenih licenci (kratak opis licenci dat je na poledini ovog priloga)

Autorstvo

Licenca sa naširim obimom prava korišćenja. Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Djelo se može koristiti i u komercijalne svrhe.

Autorstvo – bez prerada

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerade se moraju distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

Autorstvo – nekomercijalno

Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada

Licenca kojom se u najvećoj mjeri ograničavaju prava korišćenja djela. Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerada se mora distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Djelo i prerade se ne mogu koristiti u komercijalne svrhe.