

INTEGRISANI EMI FILTRI U SISTEMIMA ENERGETSKE ELEKTRONIKE INTEGRATED EMI FILTERS IN SYSTEMS POWER ELECTRONICS

Vladimir Šinik, *Technical Faculty "Mihajlo Pupin" Djure Djakovica bb, Zrenjanin*

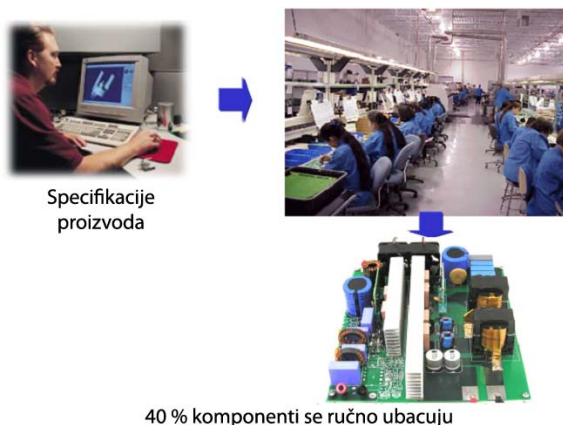
Sažetak: Na početku rada je data potreba za planarnom integrisanom tehnologijom u sistemima energetske elektronike pomoću kojih se pokušavaju prevazići dominantne postojeće tehnološke barijere. Date su karakteristike integrisanih EMI filtera i njihovo poređenje sa klasičnim (diskretnim) filtrima.

Abstract: At the beginning of the data needs for planar integrated technology in power electronics systems by which the dominant attempt to overcome existing technological barriers. The characteristics of integrated EMI filters and their comparison with the classical (discrete) filters.

Ključne riječi: planarne intefrisane tehnologije, integrisani EMI filtri

1.UVOD

Proizvodi energetske elektronike, do danas, su u osnovi projekti po narudžbini čije je projektovanje dugotrajno. Oprema se projektuje i proizvodi uz korišćenje nestandardnih delova. Proces proizvodnje zahteva puno rada i zato su cene visoke. Na slici 1 je prikazan tok procesa proizvodnje uređaja energetske elektronike na dosadašnji konvencionalan način.



Sl.1 – Tok procesa proizvodnje uređaja energetske elektronike u dosadašnjoj praksi

Tokom poslednje dekade, performanse sistema energetske elektronike su unapređene poboljšanjima ostvarenim kod poluprovodničkih komponenata. Prelazak sa bipolarne na MOSFET tehnologiju [1], doveo je do skraćanja vremena prekidanja tako da se danas ispituju ograničenja usled strukturnih induktivnosti vezanih za pakovanje kao i onih ograničenja koja potiču od termičkih zahteva. Tako će povećanje brzine prekidanja za jedan red veličina, što je moguće sa novim tehnologijama aktivnih komponenti, zahtevati bitno smanjenje strukturnih kapacitivnosti i induktivnosti vezanih za pakovanje samih naprava i za pakovanje na nivou sistema.

Poslednjih godina, razvijen je nivo integracije u kome se snažne poluprovodničke komponente u formi matrice –

kalupa montiraju na zajedničku podlogu i međusobno povezuju bondovanjem. Iako je minijaturizacija ostvarena do određenog nivoa, još uvek ostaje niz međuveza i funkcija kao kod konvertora izrađenog u diskretnoj tehnologiji. Kod ovog pristupa mogućnosti za tro–dimenzionalnu (3–D) integraciju su još uvek ograničene i što se tiče prostornog rasporeda komponenata postala su dominantna elektromagnetna ograničenja. Termalno upravljanje kod ovog tipa pakovanja je u osnovi ograničeno na jedno–dimenzionalno uklanjanje toplote sa matrice – kalupa. Postalo je jasno, međutim, da moduli energetske elektronike predstavljaju jedan od podsticaja ka modularizaciji i integraciji sistema energetske elektronike. Poslednje inovacije kod snažnih modula su uglavnom ostvarene razvojem u oblasti poluprovodnika koji je potpomognut poboljšanjima u tehnologijama prostornog raspoređivanja i pakovanja [1].

Iako će poluprovodničke komponente i dalje biti jedan od podsticaja za budući razvoj energetske elektronike, same komponente za sada ne predstavljaju osnovno ograničenje u tehnologiji konverzije snage. Već neko vreme se tvrdi da pakovanje, upravljanje, uklanjanje toplote i sistemska integracija danas predstavljaju dominantne tehnološke barijere koje ograničavaju brzi porast primena konverzije snage [2]. Na osnovu [1–6] se ukratko diskutuje tehnološki napredak koji je neophodan za poboljšanje karakteristika sistema energetske elektronike, kao i tehnologija koje se razvijaju za integraciju više–kilovatne energetske elektronike. Među tehnologijama koje su u razvoju su tehnologija veza između komponenti planarnom metalizacijom, što omogućuje 3–D integraciju snažnih komponenti, kao i integraciju pasivnih komponenata snage u cilju povećanja gustine snage pošto one dominiraju fizičkom veličinom sistema.

Ovde se na osnovu literature iznose rezultati ostvareni različitim tehnologijama koje su u razvoju a koje su u delokrugu istraživanja novih centara za sisteme energetske elektronike (CSEE), čiji je zadatak da promoviše pristup integraciji sistema energetske elektronike kroz visoko integrisane module energetske elektronike (IMEE). S obzirom da su ove tehnologije rezultat iz istraživačkog programa CSEE, jasno je da su one u osnovi još uvek na laboratorijskom nivou [1]. Osnovna vizija CSEE je da razvijaju pristup ka integrisanom sistemu kroz module

energetske elektronike (IMEE) koji može da vodi ka pristupu standardizovanih sistema energetske elektronike koji je podesan za automatsku izradu i masovnu proizvodnju. Predviđeno rešenje za integrisanu energetske elektroniku se zasniva na konceptu unapredene integracije u formi standardnih funkcionalnih blokova, tj. IMEE, i integracije tih blokova u sistemsku rešenja namenjena za datu primenu. Ovaj pristup će podržati razvoj projektovanja standardizovanih sistema preko funkcionalnih blokova, kao i modularizaciju i standardizaciju funkcionalnih modula. IMEE pristup omogućuje dramatično poboljšanje u pogledu performansi i efektivnosti i ceni koštanja sistema energetske elektronike.

Uticaj poboljšanja u tehnologiji energetske elektronike i sistemskoj integraciji preko IMEE pristupa se može uporediti sa uticajem koji je ostvaren sa poboljšanjem u tehnologiji veoma velikog stepena integracije (VVSI) kola. Primena VVSI tehnologije je omogućila brzi napredak u informacionim tehnologijama i dovela do digitalne revolucije, koja je praćena standardizacijom, modularizacijom, funkcionalnom integracijom i stalnim opadanjem proizvodnih cena opreme. IMEE pristup će takođe omogućiti povećanje nivoa integracije u modulima koji sačinjavaju elektronski sistem – naprave, kola, upravljanje, senzori i aktuatori – koji se mogu integrisati u izvodljive podsklopove i module. Primena ovih modula/podsklopova će omogućiti relativno lako komponovanje sistema za namenjenu primenu umesto neophodnog projektovanja i izgradnje sistema počev od nivoa komponenata. Razumljivo, s obzirom na velike varijacije u nivoima snage u energetske elektronici, prednosti ovog pristupa mogu inicijalno da budu ograničene tako da se prednosti ovog pristupa primenjuju za niže nivoa snage i za pojedine oblasti primene [1].

2. MOTIVACIJA ZA PLANARNU INTEGRACIONU TEHNOLOGIJU U PRIMENI ELEKTRONIKE SNAGE

Prednosti planarne integracione tehnologije dobro je ilustrovana napretkom mikroelektronike u prošlosti [2]. Iako je obrada elektronike snage različita od obrade informacija, važno je uočiti sledeće paralele:

- 1) Obe tehnologije imaju osnovna ograničenja u elektromagnetici;
- 2) Obe tehnologije su eventualno termo – mehanički ograničene
- 3) Obe tehnologije su ograničene materijalima;
- 4) Nove primene obe tehnologije su podstaknute nezadrživom spiralom obaranja cena.

2.1. TEHNOLOGIJE ZA INTEGRACIJU

Tekući proizvodni procesi različitih tipova komponenata i njihovog pakovanja, koji su primenjeni u energetske elektronici, nisu usaglašeni sa integrisanjem u jednu proizvodnu liniju. Primeri ovakvih tehnologija su obrada snažnih poluprovodnika, motanje transformatora, motanje kondenzatora i druge metode izrade kondenzatora, tehnologije izrade otpornika i konstruisanje snažnih elektronskih konvertora u diskretnoj tehnologiji metodom sprežanja namotaja [1].

Potrebni su kompatibilni procesi koji se mogu uključiti u jednu integrisanu proizvodnu liniju. Međutim, s obzirom da će priroda integrisanog modula biti hibridna, mora se pretpostaviti da će postojati proizvodni procesi za razne materijale (npr. za proizvodnju matrica – kalupa snažnih poluprovodnika, magnetnih limova, dielektričnih tabaka, slojnih podloga) koji prethode planarnoj metalizaciji, postavljanju metalnih i termalnih kontakata na velikim površinama, formiranju integrisanih planarnih pasivnih elemenata snage i operacijama slaganja slojeva i pakovanja [2]. U tehnologijama koje sa nadalje diskutuju, primenjeni su sledeći procesi pošto su svi oni kompatibilni sa već postojećim proizvodnim procesima za integrisane module [1]:

- 1) tehnologija planarne metalizacije korišćenjem postupka rasprašivanja i elektronanošenja;
- 2) lemljenje kvalitetnih električno – termalnih međuveza velikih površina;
- 3) nisko – temperaturno sinterovanje za kvalitetne električno – termalne međuveze velikih površina;
- 4) fotolitografija i vlažno hemijsko ecovanje za definisanje oblika;
- 5) plazma čišćenje kao međuproceni koraci za poboljšanje međuveza;
- 6) lasersko sečenje i trimovanje kao mehanički procesi oblikovanja;
- 7) tehnologija enkapsulacije radi električne, mehaničke i termalne zaštite.

Dalja razmatranja treba da budu posvećena integraciji na nivou tehnološkog procesa gde je poželjno ostvariti istovremeno izvršenje velikog broja paralelnih koraka kada je u pitanju međupovezivanje.

2.2. PODELA U CILJU INTEGRACIJE

Termička i funkcionalna razmatranja favorizuju podelu na aktivne IMEE za snažne prekidačke stepene, pasivne IMEE za elektromagnetno skladištenje i konverziju energije i filterske IMEE za elektromagnetne smetnje. Dok je gustina energetske gubitaka kod prekidačkih naprava velika, gustina energetske gubitaka kod pasivnih modula je mala. Ovo zahteva različite termičke pristupe radi postizanja optimalnog učinka modula.

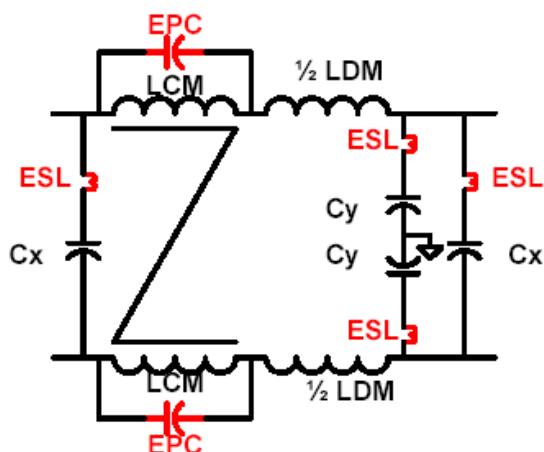
Elektromagnetne karakteristike pasivnih IMEE nisu podesne za integraciju filtera elektromagnetnih smetnji kada su projektovani u skladu sa zahtevima za optimalni učinak modula u pogledu skladištenja i obrade elektromagnetne energije, pošto filterski moduli moraju da slabe elektromagnetnu energiju na prekidačkoj frekvenciji i iznad nje. Prema tome, treći tip IMEE postaje neophodan, kao što sledi i na osnovu funkcionalnih razmatranja.

3. INTEGRISANI EMI FILTER IMEE

Kao što je poznato da su prekidački konvertori potencijalno veliki izvor šuma za svoju okolinu. Povećana frekvencija prekidanja može u izvesnoj meri da smanji veličinu konvertora, njegovu težinu i cenu, ali će za uzvrat povećati brige oko elektromagnetne kompatibilnosti. Koristeći najnovije tehnologije za pakovanje i integraciju

smeštaju se sve više komponenta u sve manje prostore. Posledica je da projektanti kola moraju da brinu sve više o elektromagnetnoj kompatibilnosti (EMI). Za smanjenje preslušavanja između prekidačkog konvertora i okolne elektronike, puno napora se fokusira na poboljšanje topologije kola radi potiskivanja prekidačkog šuma primenom tehnologije mekog prekidanja, aktivnih i pasivnih prigušivačkih (snuber) kola, tako da se generisani visokofrekventni šum u prelaznim stanjima može smanjiti. Međutim, šum na frekvenciji prekidanja i njegovim harmonici su svojstvo prekidačke funkcije snažnih konvertora; on se ne može sasvim ukloniti tehnikom mekog prekidanja ili usavršenim poluprovodničkim napravama. Dakle, elektromagnetni filteri su uvek neophodni.

Konvencionalno, elektromagnetni filteri se primenjuju uz korišćenje diskretnih komponenta. Šema veza tipičnog elektromagnetnog filtera je prikazana na slici 2. Međutim, sa diskretnim filterima postoje izvesni problemi. To su, pre svega, postojanje degradirajućih parazitnih komponenta pasivnih diskretnih komponenta, kao što su ekvivalentna paralelna kapacitivnost (EPK) induktora i ekvivalentna redna induktivnost (ERI) kondenzatora usled čega je upotrebljivi frekventni opseg ograničen na nekoliko MHz. Drugo, parazitni parametri prouzrokovani rasporedom komponenta filtera će dalje degradirati visoko – frekventne performanse filtera, tako da elektromagnetni filter uvek zahteva veliku pažnju i potrebni su posebno znanje i iskustvo. Treće, diskretni elektromagnetni filter sadrži veći broj komponenta. One se moraju obrađivati različito i funkcionalno i strukturno one su odvojene. Takođe, svaka od komponenta se posebno pakuje. To povećava upotrebu materijala i proizvodnog vremena. Konačno, različite komponente diskretnog elektromagnetnog filtera su različitog tipa, vrednosti, veličine i oblika, a neophodan je i prostor za međusobno povezivanje svih komponenta. Dakle, prostor ne može da se upotrebi na optimalan način. U cilju poboljšanja visoko – frekventnih karakteristika, smanjenja veličine, smanjenja visine i postizanja strukturne, funkcionalne i procesne mehaničke integracije, a sve radi smanjenja vremena izrade i troškova, razvijena je planarna elektromagnetna integraciona tehnologija za integraciju elektromagnetnih filtera.



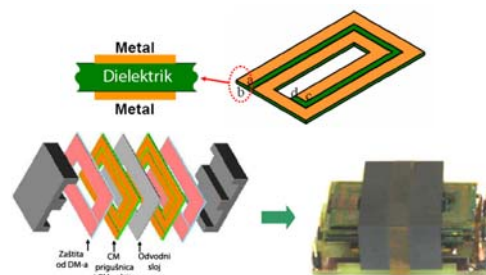
Sl. 2 – Šema veza tipičnog elektromagnetnog filtera i odgovarajući paraziti EPC i ESL [5]

Iako se elektromagnetni filteri takođe sastoje od pasivnih elektromagnetnih komponenta, njihove funkcije i zahtevi nisu skladištenje energije i prenos kao kod prekidačkih konvertora snage. To je stoga što elektromagnetni filteri moraju da priguše, umesto da prenesu energiju na frekvenciji prekidanja i iznad nje. Dakle, visoko – frekventne karakteristike, a ne efikasnost, su glavna briga za elektromagnetne filtere. Radi poboljšanja visoko – frekventnih karakteristika integrisanih elektromagnetnih filtera moraju se razviti posebne tehnologije koje će obuhvatiti smanjenje EPK, smanjenje ERI i povećanje faktora gušenja.

Za smanjenje EPK integrisanih induktora podesniji je uzan debeo provodnik nego konvencionalni širok i tanak provodnik koji je normalno podesniji za druge primene zbog zahteva za smanjenjem gubitaka usled visoko – frekventnih vrtložnih struja. Za elektromagnetne filtere uzan i debeo provodnik može da smanji površinu provodnika i tako strukturno smanji kapacitivnost namotaja. On takođe može da poveća gubitke usled visoko – frekventnih vrtložnih struja i tako poveća visoko – frekventni faktor slabljenja [5]. Za dalje smanjenje EPK koristi se raščlanjen i umetnut namotaj. On značajno povećava rastojanje između slojeva i značajno smanjuje EPK usled magnetne sprege između CM namotaja prigušnice i tako strukturna kapacitivnost namotaja može da se smanji. Primenom ovih tehnologija EPK konstruisanog prototipa je smanjena sa prvobitnih 100 pF na manje od 10 pF [5].

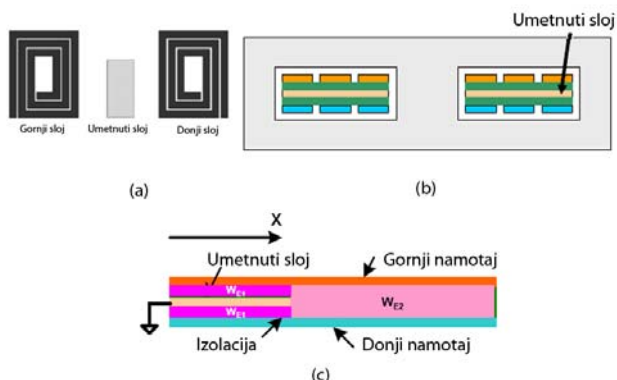
Presek jednog integrisanog elektromagnetnog filtera sa raščlanjenim i umetnutim spiralnim namotajem je prikazan na slici 3. Projektovani prototip integrisanog elektromagnetnog filtera ima istu funkciju kao diskretni filter, ali ima veću gustinu snage, manje je visine (profila) i ima isto ili veće visoko – frekventno slabljenje.

Iako se EPK može dobro smanjiti korišćenjem raščlanjenog i umetnutog namotaja, cena koja se plaća je da je takav namotaj znatno deblji i kompleksniji. Štaviše, umetanje ne samo da značajno smanjuje nakupljenu energiju električnog polja usled CM pobude, već značajno smanjuje i nakupljenu energiju magnetnog polja usled DM pobude. Prema tome, rasipna induktivnost je značajno umanjena i neće biti dovoljno velika da bi se realizovala neophodna DM induktivnost. Moraju se umetnuti dopunsko magnetno jezgro i namotaji da bi se ostvarila DM induktivnost (prikazano na slici 3) sa kompromisnim DM karakteristikama.



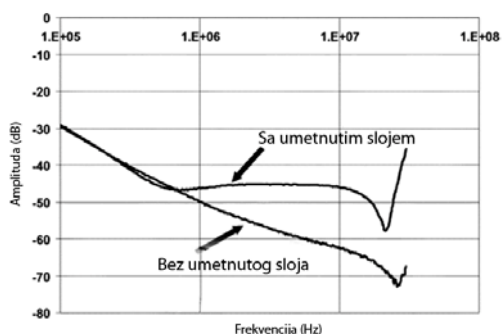
Sl. 3. Struktura izgled integrisanog elektromagnetnog filtera, [5]

Kao što je pokazano u [5], kompenzacija EPK se može ostvariti prostim umetanjem provodnog sloja između planarnih namotaja CM prigušnice, kao što je prikazano na slici 4.



Sl. 4 – Struktura namotaja sa umetnutim provodnim slojem: (a) uvećano, (b) spređa, (c) bočno [5]

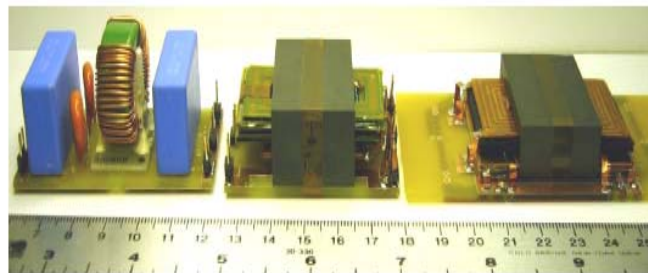
Sa promenom površine uzemljenog sloja menja se takođe i odnos energija W_{E1} i W_{E2} . Dokazano je da kada uzemljeni sloj ima površinu takvu da je $W_{E1} = W_{E2}$, strukturna kapacitivnost namotaja je potpuno kompenzovana [1] i [5]. Detaljna analiza ekvivalentnog kola se može naći u [1] i [5]. U cilju projektovanja umetnutog sloja, energetski zasnovan model strukturne kapacitivnosti namotaja za planarni spiralni višeslojni namotaj je razvijen i dobijeni rezultati su u okviru prihvatljive tačnosti za potrebe projektovanja [1]. Efektnost ove tehnologije je demonstrirana pomoću konstruisanog nisko – propusnog L – C filtera sa planarnom induktivnošću u koju je umetnut uzemljeni provodni sloj. Izmerena prenosna funkcija je prikazana na slici 5 i upoređena sa istom tom induktivnošću bez umetnutog sloja [1].



Sl.5 Izmerena prenosna funkcija prototipa nisko propusnog filtera sa i bez umetnutog sloja [1]

Evidentno je da je sa umetnutim slojem sopstvena rezonancija prouzrokovana sa EPK skoro potpuno kompenzovana i može se dobiti mnogo povoljnije slabljenje na visokim frekvencijama. Ova tehnologija kompenzacije se može primeniti kod integrisanih elektromagnetnih filtera. Primenujući tehnologije integracije i EPK kompenzacije na integrisane elektro – magnetne filtere, konstruisan je poboljšani integrisani elektro – magnetni filter za DPS sa kompenzovanom kapacitivnošću namotaja, kao što je prikazano na slici 6. Za određivanje performansi filtera

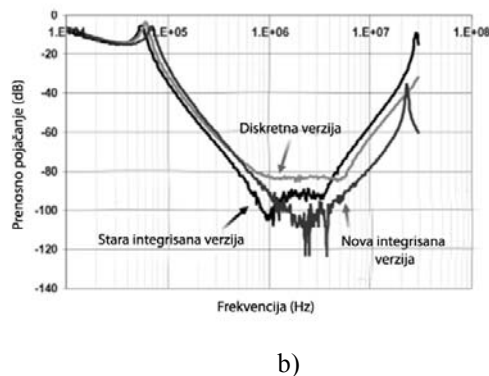
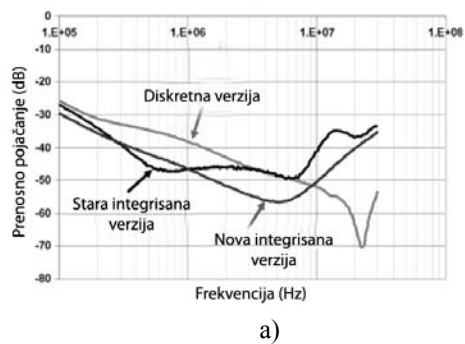
konstruisan je takođe i bazni diskretni filter sa istim vrednostima komponenta. Poređenje parametara poboljšanog elektro – magnetnog filtera sa prethodno razvijenim integrisanim elektro – magnetnim filterom i baznim diskretnim filterom je prikazano u tabeli 1. Izmerene karakteristike su prikazane na slici 7.



Sl. 6 – Poređenje integrisanih i diskretnih EMI filtera [1]

Tabela.1 – Poređenje parametara integrisanih elektromagnetnih filtera i filtera sa diskretno realizovanim komponentama [1]

Parametri	Diskretni	Prethodni integrisan	Poboljšani integrisan
Br.komponenta	5	1	1
Profil (cm)	2,6	1,6	1
Zapremina (cm)	39,8	27,4	20



Sl. 7 – Poređenje merenog prigušenja (slabljenja) DM a) i CM b) za diskretni, stariju i noviju izvedbu integrisanog filtera [1], [5]

Iz ovih mernih rezultata može se zaključiti da integrirani elektro – magnetni filteri imaju iste funkcije kao i diskretne verzije, ali sa ostvarenom strukturnom, funkcionalnom i procesnom integracijom. Poboļjšani integrirani elektro – magnetni filter ima profil i zapreminu približno upola manje od diskretnog filtera, ali mnogo bolje visoko – frekventne DM karakteristike i slične CM visoko – frekventne karakteristike.

4. ZAKLJUČAK

Razvojem planarne elektromagnetne integrirane tehnologije, pored integriranih prekidačkih modula snage, integriranih elektromagnetskih pasivnih modula razvijeni su integrirani elektromagnetski filteri. Integrirani elektro magnetni filteri imaju iste funkcije kao i diskretne verzije, ali sa ostvarenom strukturnom, funkcionalnom i procesnom integracijom. Poboļjšani integrirani elektro magnetni filteri imaju profil i zapreminu približno upola manje od diskretnih filtera, što je opšti današnji trend. Uloga prethodno pomenutih tehnologija u koncepciji IMEE je ključna za ostvarenje integracije visokog nivoa i omogućenje značajnog porasta industrije energetske elektronike. Evidentno je da su neophodne dalje inovacije za ostvarenje povećanja u gustini snage. Uticaj sistemske integracije kroz IMEE će omogućiti brzi porast primena energetske elektronike uz smanjenje troškova i skraćenje ciklusa projektovanja što se može uporediti sa uticajem VLSI tehnologije na povećanje računarskih primena.

5. LITERATURA

- [1] Jacobus Daniel van Wyk, Fred C. Lee, Zhenxian Liang, Rengang Chen, Shuo Wang, and Bing Lu; Integrating Active, Passive and EMI-Filter Functions in Power Electronics Systems: A Case Study of Some Technologies, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 20, NO. 3, MAY 2005
- [2] J. D. vanWyk, F. C. Lee, D. Boroyevich, Z. Liang, and K. Yao, "A future approach to integration in power electronics systems," in *Proc. IEEE IECON'03 Conf.*, vol. 1, Nov. 2–6, 2003, pp. 1008–1019.
- [3] J. T. Strydom, J. D. van Wyk, and M. A. de Rooij, "Integration of a 1 MHz converter with active and passive stages," in *Proc. IEEE APEC*, vol. 2, Anaheim, CA, Mar. 4–8, 2001, pp. 1045–1050.
- [4] R. Chen, J. D. van Wyk, S. Wang, and W. G. Odendaal, "Electromagnetic integration technologies for integrated EMI filters," in *Proc. IEEE Industry Applications Soc.*, vol. 1, 2003, pp. 296–300.
- [5] Rengang Chen, Integrated EMI Filters for Switch Mode Power Supplies, Thesis of Doctor of Engineering, November, 2004, Blacksburg, VA
- [6] R. Chen, F. Canales, B. Yang, and J. D. van Wyk, "Volumetric optimal design of passive integrated power electronic module (IPEM) for distributed power system (DPS) front-end dc/dc converter," in *Proc. IEEE Industry Applications Soc.*, vol. 3, Oct. 2002, pp. 1758–1765.