

EMI in Stikalni Pretvorniki

Franc Mihalič, Dejan Kos in Karel Jezernik

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova 17, 2000 Maribor

fero@uni-mb.si, dejan.kos1@uni-mb.si, karel.jezernik@uni-mb.si

EMI and Switching Converters

Abstract: *Recently, electromagnetic interference (EMI) and electromagnetic compatibility (EMC) regulations such as FCC, VDE, CISPR, and EN are tighter than ever. Modern power electronics is today an engineering discipline that deals with the conversion of electrical power using fast semiconductor devices. Because the semiconductor devices are utilized as switches reducing the losses is designer's main concern. Switching operation generates signals with high du/dt and di/dt , and, consequently, wide bandwidths of disturbances. Because the power electronics equipment is usually connected to the supplying lines, those wide-band signals are travelling through them and pollute the electromagnetic environment with unwanted interference.*

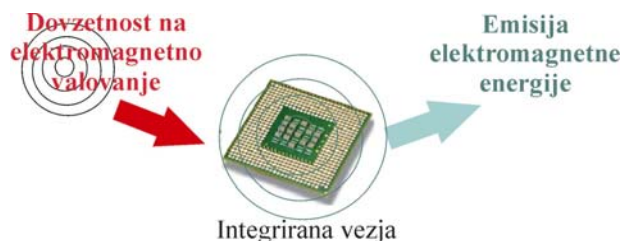
1 Uvod

Področje elektromagnetne združljivosti (*electromagnetic compatibility* – EMC) je zmožnost delovanja električnih naprav brez povzročanja medsebojnih motenj in je tako stara veda kot je elektromagnetizem sam [1]. Po eni strani je to zmožnost elementa, naprave ali sistema, da zadovoljivo deluje v elektromagnetnem okolju (t.i. vidik imunosti) brez vnašanja nesprejemljivih elektromagnetnih motenj v to okolje (t.i. vidik emisije). Po drugi strani pa je EMC inženirska veda, ki je nastala zato, da zagotavlja delovanje elementov, naprav ali sistemov, ki generirajo in/ali porabljajo elektromagnetno energijo. Elektro-magnetna interferenca (*electromagnetic interference* - EMI) je poslabšanje lastnosti elementa, naprave ali sistema zaradi elektromagnetnih motenj.

Ker so naši energetske viri vedno bolj omejeni (premog, nafta, plin...), težimo danes tudi k uporabi alternativnih virov energije (sončna, veterna, vodna...). Za čim bolj racionalno rabo energije so

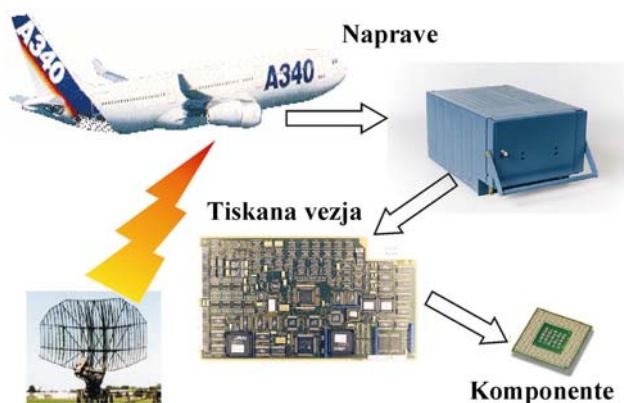
sodobne naprave napajane s stikalnimi pretvorniki, ki danes dosegajo izkoristek >90%. Dostikrat sta zahtevana tudi nizka teža in majhen volumen naprave (letalstvo, vesoljski program), kar lahko zagotavljamo samo z dvigom stikalne frekvence pretvornikov. Posledica takega režima delovanja so visoke strmine toka in napetosti (di/dt in du/dt), ki so glavni vzrok EMI. Področje EMC in EMI ureja veliko mednarodnih standardov: FCC, VDE, CISPR, EN idr. [2].

Tehnologija izdelave novih integriranih vezij teži k vedno višji stopnji integracije in s tem pomika delovanje k vedno višjim stikalnim frekvencam. Zardi tega je problem zagotavljanja EMC vedno bolj aktualen. Kadar govorimo o elektromagnetni združljivosti naprave, razlikujemo dva osnovna principa oz. pojave: prvič govorimo o elektromagnetni emisiji ali oddajanju motenj, ki so lahko v prevodni obliki (po vodnikih) ali pa v obliki sevanja (po zraku). Številna integrirana vezja sama prispevajo k porastu EMI in tako ogrožajo EMC celotnega elektronskega sistema (Slika 1). Drugič pa govorimo o občutljivosti oz. dovzetnosti (*electro-magnetic susceptibility* – EMS) na EMI: narašča število mobilnih telefonov, hitrost prenosa podatkov po mrežnih in brezžičnih sistemih... EMS je nezmožnost elementa, naprave ali sistema, da nemoteno deluje ob prisotnosti EMI.



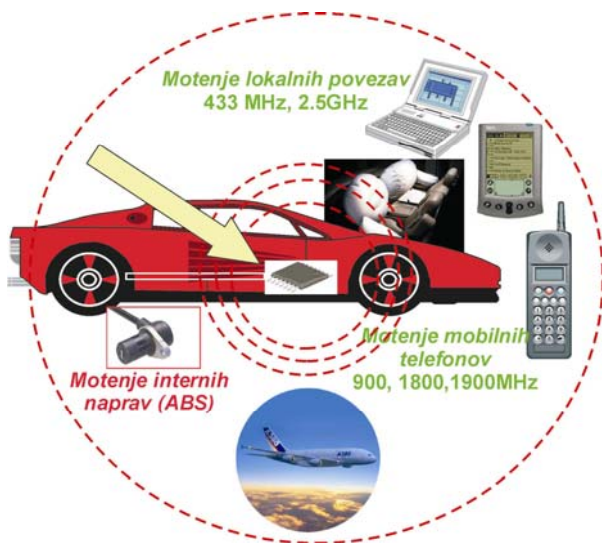
Slika 1: Osnovni problem elektromagnetne združljivosti.

2 Elektromagnetne motnje



Slika 2: Dovzetnost na motnje.

Elektromagnetna motnja je vsak elektromagnetni pojav, ki lahko negativno vpliva na lastnosti elementa, naprave ali celo sistema. Primer dovzetnosti na radijske frekvenčne motnje prikazuje Slika 2, kjer zelo močno radarski valovi obsevajo letalo. Take situacije so zelo pogoste v bližini velikih mednarodnih letališč. Pulz z močjo GW (giga Watt) doseže letalo, ki absorbira delež energije, ki lahko steče do občutljivih naprav, tiskanih vezij in končno do sestavnih komponent ter moti njihovo pravilno delovanje in s tem tudi varnost celotnega letala. Zagotavljanje visoke stopnje elektromagnetne imunosti na motnje vseh naprav v letalu je nujno potrebna.

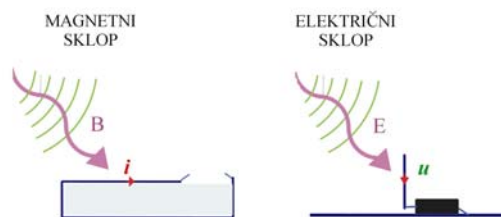


Slika 3: Škodljivi vplivi elektromagnetnih motenj.

Po drugi strani pa parazitna emisija vedno večje množice integriranih vezij v modernih avtomobilih lahko ogroža pravilno delovanje osebnih pripomočkov in naprav kot so mobilni telefoni in radijske povezave (linki, Slika 3). Včasih je lahko parazitna energija dovolj visoka, da ovira delovanje varnostnih sistemov v avtomobilu (ABS, zračne blazine). Kot smo spoznali v primeru dovzetnosti na elektro-magnetne motnje, lahko prihaja do podobnih škodljivih sevanj tudi v samih delujočih napravah v letalu. Da bi čimbolj zmanjšali možnost pojava EMI v letalu, je med poletom prepovedana uporaba mobilnih telefonov in ostalih elektronskih naprav kot so prenosni računalniki idr.

2.1 Osnovni mehanizem generiranja motenj

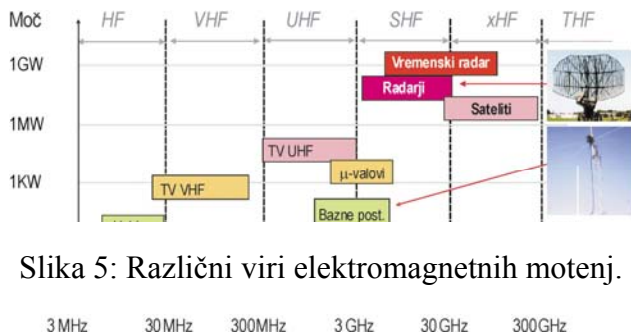
Kot že pove samo ime elektromagnetno okolje, imamo v njem opraviti z dvema načinoma generiranja EMI: kot posledica magnetnetnega sklopa in kot posledica električnega sklopa (Slika 4). Elektromagnetno valovanje je sestavljeno iz električnih in magnetnih valov in lahko generira napetost v liniji, ki deluje kot antena. Magnetno polje pa lahko generira tok v zaključeni tokovni zanki. V praktičnem primeru avtomobila elektromagnetno valovanje vpliva na njegovo ožičenje, ki hkrati deluje kot tokovna zanka in kot antena. Rezultat je napetostni in tokovni šum, ki sta dodana normalnim signalom v teh linijah.



Slika 4: Posledice elektromagnetnega sklopa.

2.2 Viri elektromagnetnih motenj

Živimo v okolju, kjer elektronske naprave sevajo v prostor z različno močjo (Slika 5). Veliko naprav deluje v območju 1-5 GHz: digitalni telefoni (moči 10 mW), mobilni telefoni (1 W), GSM bazne postaje (100 W), mikrovalovne naprave (1 kW), TV oddajniki (10 kW).

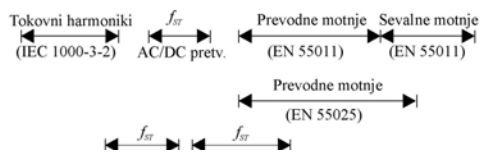


Slika 5: Različni viri elektromagnetnih motenj.

Izvori nad 1 MW so antene za satelitske povezave (linki), vojaški in vremenski radarji. Tako frekvenčno področje 3-30 MHz imenujemo visoke frekvence (High Frequency - HF), 30-300 MHz zelo visoke frekvence (Very High Frequency – VHF), 300 MHz-3 GHz ultra visoke frekvence (Ultra-High Frequency – UHF), 3-30 GHz super visoke frekvence (Super High Frequency – SHF), 30-300 GHz ekstremno visoke frekvence (extremely High Frequency – xHF) in področje 300 GHz-3 THz (tera-Hertz) strahovito visoke frekvence (Tremendously High Frequency – THF).

3 Standardi in EMC

Regulative za EMC se delijo obravnavo prevodnih in sevalnih elektromagnetnih motenj, čeprav zaradi medsebojnega vpliva (interferenc) teh dveh tipov EMI ni mogoče strogo ločiti (Slika 6). Pri uporabi naprav priključenih na elektroenergetsko omrežje (220 V/50 Hz) razlikujemo nizko- in visoko frekvenčno regulativo: v prvem primeru ugotavljamo amplitude tokovnih harmonikov do 2 kHz ($n = 40$), v drugem



Slika 6: Frekvenčna področja najpogostejših pojavov v energetski elektroniki

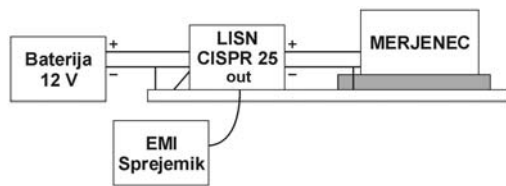
primeru pa se prevodne EMI obravnavajo 150 kHz do 30 MHz. V baterijsko napajanih porabnikih (npr. v avtomobilih) pa standardi določajo dovoljen nivo prevodnih EMI na frekvenčnem območju od 150 kHz do 108 MHz. Za avtomobilske aplikacije EMC določa standard

CISPR25 oz. EN55025, ki bo predstavljen v nadaljevanju in na podlagi katerega so bile izvedene meritve EMI oz. EMC. Ta standard obravnava tako prevodne kot sevalne motnje, vendar se bomo osredotočili na področje prevodnih EMI. V standardu je določeno kritično območje frekvenc, pri katerih obstaja nevarnost motenj ostalih naprav v avtomobilu (radijski sprejemniki, mobilni telefoni, ipd.) ki se napajajo iz istega napetostnega vira (običajno 12 V svinčeva baterija). Frekvenčno področje je razdeljeno na pet frekvenčnih intervalov (od EN550251 do EN550255), kjer je za vsak frekvenčni interval določena dovoljena amplituda EMI v dB μ V. Na podlagi meritev EMC se naprava klasificira v enega od petih EMC razredov, kot prikazuje Tabela I.

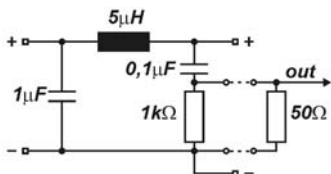
Tabela I: Omejitve za prevodne motnje po EN55025 (CISPR25) za različne razrede.

EMC razred	Amplituda (dB μ V)									
	0,15 MHz do 0,3 MHz		0,53 MHz do 2 MHz		5,9 MHz do 6,2 MHz		30 MHz do 54 MHz		68 MHz do 108 MHz	
	Maks.	Povp.	Maks.	Povp.	Maks.	Povp.	Maks.	Povp.	Maks.	Povp.
1	113	100	95	82	77	64	77	64	61	48
2	103	90	87	74	71	58	71	58	55	42
3	93	80	79	66	65	52	65	52	49	36
4	83	70	71	58	59	46	59	46	43	30
5	73	60	63	50	53	40	53	40	37	24

Nižji EMC razred naprave pomeni manjšo emisijo prevodnih EMI in s tem boljše EMC. Za meritve po standardu CISPR25 potrebujemo: napetostni izvor (12 V baterijo) in LISN («Line Impedance Stabilization Network», Slika 7). Naloga LISN člena je stabilizacija impedance vhodnih napajalnih vodov v celotnem merilnem področju (od 150 kHz do 108 MHz) in zajezitev vseh stikalnih motenj, ki jih povzročata merjenec (npr. stikalni pretvornik in ustrezno breme), ter preprečitev vdora zunanjih motenj v merilni sistem preko napajalnih vodnikov. Strukturo predpisanega merilnega LISN člena za standard EN55025 prikazuje Slika 8.



Slika 7: Popolnoma opremljeno merilno mesto za prevodne motnje po standardu EN55025.



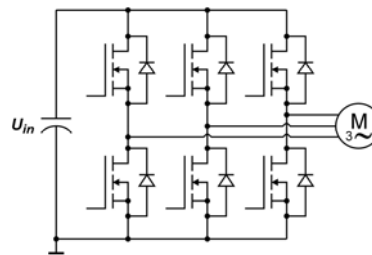
Slika 8: LISN za standard EN55025.

Trajanje meritev EMC je 10 ms v vsaki merilni točki, ki se po frekvenčni osi pomika po koraku 4 kHz v frekvenčnem področju od 150 kHz do 30 MHz in po koraku 40 kHz v višjem frekvenčnem področju (od 30 MHz do 108 MHz). Posebnost meritve je tudi, da se v vsaki merilni točki zajemajo še bližnje frekvence signala s pasovno širino $\pm 4,5$ kHz v področju nizkih in srednjih frekvenc (150 kHz do 30 MHz) in s pasovno širino ± 60 kHz v višjem frekvenčnem področju (30 MHz do 108 MHz).

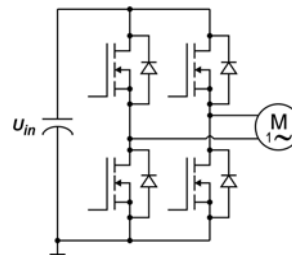
4 Stikalni pretvorniki

Stikalni pretvorniki so danes nepogrešljivi sestavni del reguliranih motornih pogonov, usmernikov (AC-DC pretvorniki), presmernikov (DC-DC pretvorniki) in razsmernikov (DC-AC pretvorniki). Za pogon trifaznih izmeničnih motorjev potrebujemo ustrezno razsmerniško vezje in šest tranzistorjskih stikal (Slika 9). Za pogon enofaznega izmeničnega motorja so dovolj štiri stikala (Slika 10). Kot močnostni stikalni tranzistorji se vse bolj uporabljajo IGBT-ji (visoke moči in stikalne frekvence do 20 kHz) ter MOSFET-i (nizke stikalne izgube in visoke stikalne frekvence do 500 kHz).

Kot kažeta Slika 9 in Slika 10, sta razsmernika v obeh primerih zgrajena zelo podobno, le število vej se razlikuje.

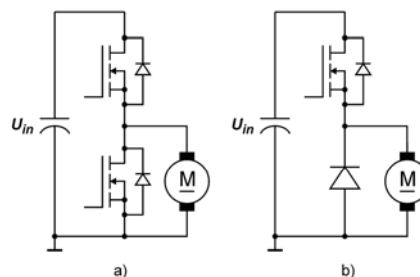


Slika 9: Trifazni stikalni razsmernik.



Slika 10: Enofazni tranzistorjski razsmernik.

Seveda potrebujemo za normalno delovanje mostičnega vezja ustrezne prožilne stopnje in galvanske ločitve, kar nekoliko podraži izvedbo. Prav tako lahko za modulator izberemo določeno pulzno širinsko modulacijo: blokovno, vektorsko, sinu-sno, trikotno, izločanje harmonikov, odvisno od zahtev. Oglejmo si sedaj strukturo ene same veje nekoliko podrobneje: v primerih, ko želimo spreminjati hitrost vrtenja enosmernega motorja samo v eni smeri in obenem še doseči visok izkoristek, lahko uporabimo samo polmostični pretvornik (half-bridge, Slika 11a).



Slika 11: a) Ena veja razsmernika (polmostič) in b) razsmernik z enim aktivnim stikalom.

Seveda bi lahko polmostič nadomestili z uporabo razsmernika z enim aktivnim stikalom (Slika 11b, high-side switch converter), kar bi pomenilo enostavnejšo izvedbo (samo en stikalni tran-

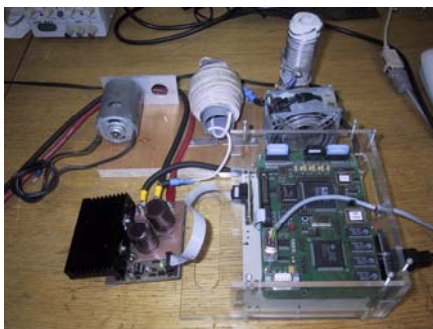
zistor), vendar slabši izkoristek (dioda na izhodnih sponkah ima konstantni prevodni padec napetosti $\approx 0,6$ V) in višje prevodne motnje. Delovanje polmističnega pretvornika je zelo podobno delovanju pretvornika navzdol, kjer je napetost enosmernega motorja (in s tem hitrost vrtenja) proporcionalna napajalni napetosti in prevajalnemu razmerju (duty ratio $D = t_{on}/T_S$):

$$U_M = DU_{in} \quad (1)$$

5 EMI meritve prevodnih motenj

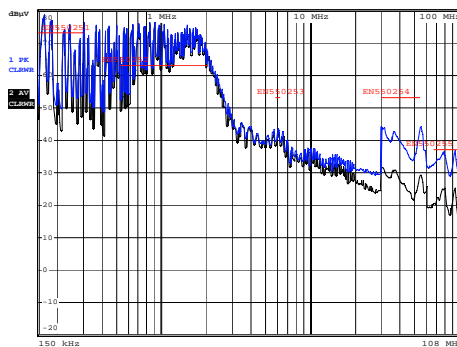
Kot smo opisali že v 3. poglavju, potrebujemo za meritve prevodnih motenj po standardu EN55025 [2] (ki služi za nadzor prevodnih in sevalnih motenj vgrajenih elektronskih naprav v vozilih in plovilih) ustrezno opremljeno merilno mesto (Slika 7). Primer zgrajenega polmističa kaže Slika 12, kjer je za preizkušanje različnih principov proženja uporabljena DSP2 karta, ki vsebuje TMS320C32 signalni procesor. Rezultat tako razkošne postavitve (redundantne) je previsoka količina prevodnih motenj (kot kaže Slika 13).

Kot lahko ugotovimo, je eksterni način proženja prispeval k previsokemu nivoju prevodnih motenj: DSP2 karta ima lasten stikalni napajalnik, ki je hlajen z ventilatorjem, vsebuje še dodatna tiskana vezja, ki pa niso nujno potrebna za našo aplikacijo.

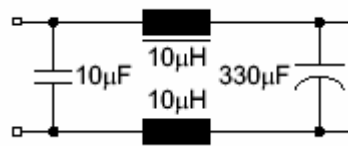


Slika 12: Polmistični pretvornik in DSP2 krmilna kartica.

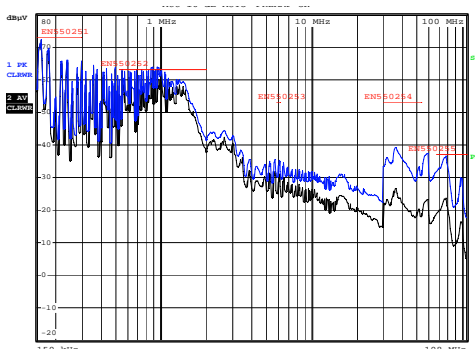
Seveda lahko nivo prevodnih motenj učinkovito znižamo z uporabo EMI filtra na vhodni strani (Slika 14) in rezultat je prikazan na Slika 15.



Slika 13: Prevodne motnje polmističa (PWM, $D = 70\%$)



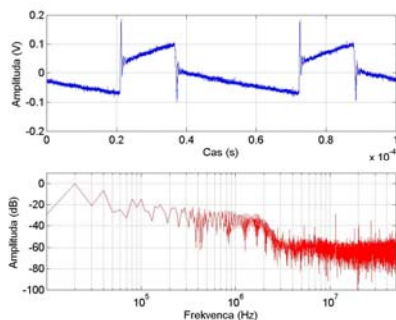
Slika 14: EMI filter.



Slika 15: Polmistič z EMI filtrom.

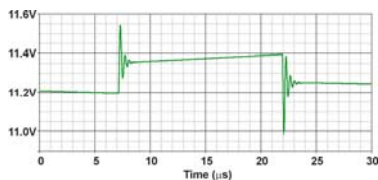
Vendar je bil naš končni cilj doseči elektromagnetno skladnost z EN55025 za sprejemljivo ceno, kar pa uporaba dragih feritnih jeder vsekakor ni. Zato smo skušali poiskati vzroke za tako visoke prevodne motnje v sistemu. Določen delež seveda prinaša redundanca v krmiljenju, večino pa prispevajo visoke strmine toka in napetosti med preklapljanjem. Prvi vzrok bomo odpravili z uporabo mikrokrmilnika PIC16F876, drugega pa moramo najprej diagnosticirati. Posledica visokih strmin napetosti (du/dt) na polprevodniških stikalih se kaže v napetostnih konicah na vходу (Slika 16). V harmonskem spektru lahko vidimo visok nivo v območju do

2 MHz, kar je očitno tudi v izmerjenih prevodnih motnjah (Slika 13).

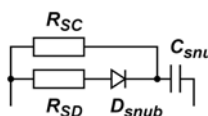


Slika 16: Harmonska analiza DC-linka.

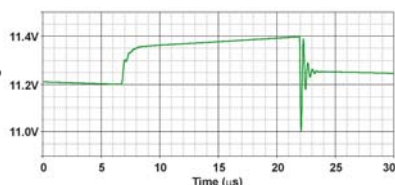
S pomočjo programa Pspice lahko izvedemo zelo natančno analizo dogajanja v vezju stikalnega pretvornika, zato smo zgradili zelo natančen model (Slika 17a). Znano je, da lahko izklopne konice uspešno odpravimo s pomočjo izklopnega razbremenilnega vezja (R^2CD snubber, Slika 17b – podroben opis najdemo v [3]). Delovanje in vpliv prikazuje Slika 17c, kjer vidimo, da so izklopne konice odpravljene.



a)



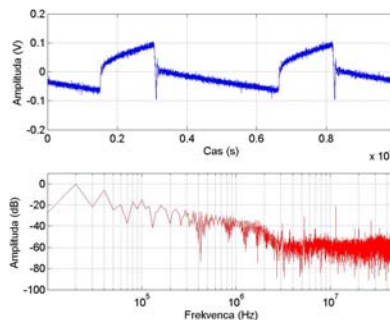
b)



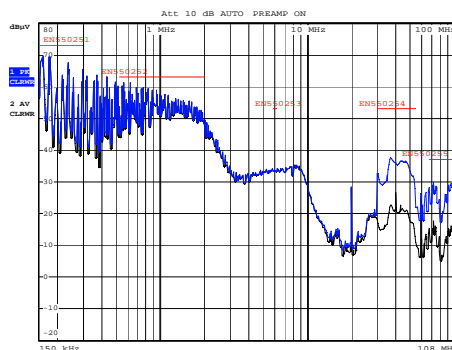
c)

Slika 17: Pspice: Dc-link brez- in z razbremenilnim vezjem (R^2CD).

Odpravljene izklopne konice na enosmerni zbiralki rezultirajo tudi v bolj zglajenem harmonskem spektru (Slika 18) in v dovolj nizkih prevodnih motnjah stikalnega pretvornika (Slika 19). Na tak način je elektromagnetna skladnost z EN55025 zagotovljena.



Slika 18: DC-link po uporabljeni zaščiti.



Slika 19: Prevodne motnje polmostiča z uporabljenim razbremenilnim vezjem.

6 Zaključek

Zagotavljanje EMC je vsakdanji in pereč problem v stikalnih pretvornikih. Obravnavani primer polmostiča je nazorna predstavitev uporabe sodobnih orodij (Pspice, Matlab) in metod (hitra Fourierjeva transformacija – FFT), ki nam učinkovito olajšajo načrtovanje in izvedbo pretvornika v skladu z EN55025.

7 Literatura

- [1] J. J. Goedbloed, *Electromagnetic Compatibility*, Prentice Hall, New York, 1992.
- [2] EN55025 Document, *Radio disturbance characteristics for protection of receivers used on board vehicles, boats, and on devices - Limits and methods of measurements*, 2004.
- [3] D. Kos, F. Mihalič and K. Jezernik, "Conductive EMI reduction in switched-mode power converters," prijava na *IEEE ISIE 2005*, Dubrovnik, junij 2005.