

# Efikasno upravljanje *IGBT* tranzistora upotrebom *TD350* integralnog kola

Nenad Jovančić, Nijaz Hadžimejlić, Pero Čeklić

Odjeljenje za energetska elektroniku  
KV Team (u saradnji sa DV Power, Švedska)  
Sarajevo

Bosna i Hercegovina

[nenad.j@kvteam.com](mailto:nenad.j@kvteam.com), [nijaz.h@kvteam.com](mailto:nijaz.h@kvteam.com), [pero.c@kvteam.com](mailto:pero.c@kvteam.com)

*Sadržaj*— U cilju obezbjeđenja pouzdanog i efikasnog rada elektronskog uređaja, prilikom njegovog projektovanja, a zbog negativnog uticaja parazitnih komponenti, često je neophodno realizovati dodatnu zaštitu pojedinih elemenata. S tim u vezi, u radu je razmatran uticaj parazitnih induktivnosti na pojavu prenapona kod prekidačkih elemenata, koji su nezaobilazan dio kod većine pretvarača energetske elektronike. Navedene su osnovne metode za suzbijanje ovih pojava. Na konkretnom primjeru pretvarača opisana je realizacija prenaponske zaštite *IGBT* tranzistora na bazi upravljačkog kola *TD350*.

*Ključne riječi: parazitna induktivnost, prenaponska zaštita, pretvarač energetske elektronike, IGBT tranzistor; Keywords: parasitic inductance, overvoltage protection, power converter, IGBT transistor*

## I. UVOD

Danas je teško zamisliti elektronski uređaj bez nekog od pretvarača energetske elektronike. U svakom od njih postoji najmanje jedan prekidački element (elektronski prekidač) koji igra ključnu ulogu u radu pretvarača. Samim tim, pouzdanost i efikasnost elektronskog uređaja direktno zavisi od pouzdanog i efikasnog rada prekidača.

Kod izbora prekidača ključno je da karakteristike, kao što su nominalna struja i napon, zadovoljavaju strujne i naponske prilike koje vladaju u njegovom radnom okruženju. Pored nominalnih vrijednosti parametara električnih elemenata, uvijek su, u manjoj ili većoj mjeri, prisutne i parazitne komponente svakog od njih. Njihovo prisustvo obično ima negativan uticaj na rad sistema.

U radu će biti riječi o uticaju parazitnih induktivnosti na pojavu prenapona na prekidačkim elementima, koje mogu ozbiljno da ugroze njihovu pouzdanost i efikasnost u radu. S tim u vezi, biće naveden pregled osnovnih metoda za ublažavanje prenapona. Na kraju, biće predstavljeno jedno konkretno rješenje prenaponske zaštite *IGBT* tranzistora na bazi upravljačkog kola *TD350*.

## II. PARAZITNA INDUKTIVNOST I NJEN UTICAJ NA POJAVU PRENAPONA KOD PREKIDAČKIH ELEMENATA

Kod električnih šema, veze između elektronskih elemenata predstavljene su kao idealni provodnici – nulta otpornost,

induktivnost i kapacitivnost. Međutim, u praksi to nije slučaj, jer su električne veze obično izvedene od materijala konačne provodnosti (bakar, aluminijum, platina, srebro, zlato...). Takođe, površina, oblik i međusobni položaj veza određuje veličinu induktivnosti i/ili kapacitivnosti među njima. Pošto su vrijednosti ovih veličina jako male i njihov uticaj obično negativan, najčešće se nazivaju parazitnim. Primjera radi, parazitna induktivnost bakarnog sloja štampe debljine 70  $\mu\text{m}$ , dužine 35 mm i širine 10 mm iznosi oko 20 nH. [1]

Kod isključenja prekidača, energija koja je akumulirana u parazitnim induktivitetima, kroz koje postoji struja i koju prekidač treba da prekine, biva oslobođena, pri čemu dolazi do pojave prenapona između energetskih priključaka samog prekidača. Nivo prenapona direktno zavisi od količine nagomilane energije u parazitnom induktivitetu i brzine isključenja prekidača (1).

$$u(t) = L \frac{di}{dt} [V] \quad (1)$$

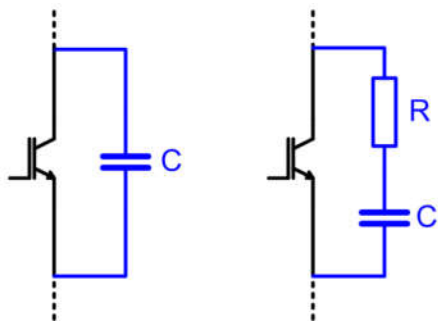
Ovako formirani prenaponi sa sobom nose dovoljnu količinu energije koja može trajno da ošteti elektronski prekidač i/ili da generišu elektromagnetske smetnje, zbog čega je jako važno da se prilikom dizajniranja pretvarača ove pojave ograniče ili potpuno eliminišu.

## III. MJERE ZA SPREČAVANJE NASTANKA I OGRANIČAVANJE PRENAPONA KOD PRETVARAČA ENERGETSKE ELEKTRONIKE

Prilikom dizajniranja pretvarača treba uraditi sve kako bi vrijednosti parazitnih komponenti bile minimalne. To znači da međusobne veze trebaju biti što je moguće kraće. Takođe, površine petlji koje obrazuju reaktivni i prekidački elementi, što je moguće manje. U radu će biti pokazano kako se i načinom upravljanja prekidačkim elementima može postići redukcija nivoa prenapona.

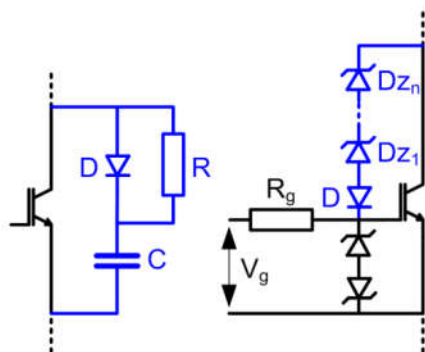
Pored metoda za sprečavanje uzroka nastanka, postoje metode za prigušenje već nastalih prenapona, gdje se dio energije prekidačkih gubitaka disipira na elementima prenaponske zaštite (u engl. lit. „snubbers“) ili se vraća prema ulaznom izvoru energije. U literaturi postoje različiti pokušaji da se napravi generalna podjela tipova prenaponske zaštite. Za potrebe ovog rada, podjela je izvršena na sljedeći način: [2]

**Pasivna prenaponska zaštita** sastavljena od mreže pretežno linearnih elemenata (otpornika, kondenzatora i/ili induktiviteta). Energija prekidačkih gubitaka disipira se na elementima prenaponske zaštite.



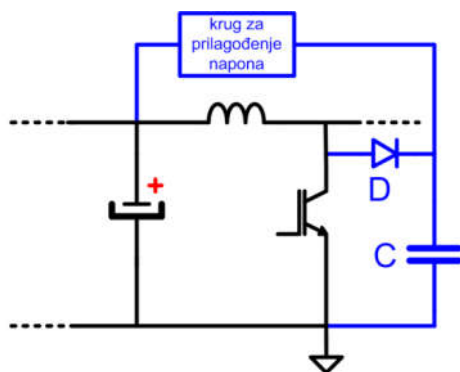
Slika 1. Primjeri pasivnih tipova prenaponske zaštite

**Aktivna prenaponska zaštita – sa disipacijom energije** sastavljena je od mreže aktivnih elemenata, kao što su diode (elektronski prekidači uopšte) u kombinaciji sa otpornicima, induktivitetima i/ili kondenzatorima. Energija prekidačkih gubitaka se disipira na elementima prenaponske zaštite ili se vraća u upravljački krug prekidača, na račun čega dolazi do ponovnog uključivanja prekidača, što sprječava dalji porast prenapona.



Slika 2. Primjeri aktivnih prenaponskih zaštita sa disipacijom energije

**Aktivna prenaponska zaštita – sa rekuperacijom energije** realizovana je tako da se energija prekidačkih gubitaka, umjesto da troši na elementima prenaponske zaštite, najčešće preusmjerava na ulazni izvor energije, preko kruga za prilagođenje napona.



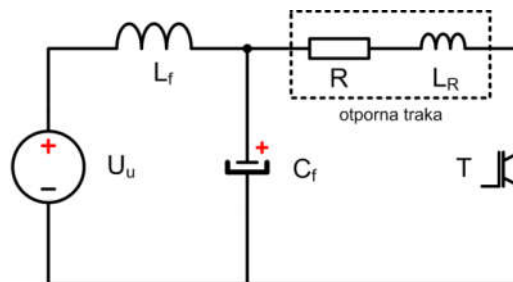
Slika 3. Primjer aktivne prenaponske zaštite sa rekuperacijom energije

#### IV. PRIMJER REALIZACIJE EFIKASNE PRENAPONSKE ZAŠTITE IGBT TRANZISTORA

Zbog svoje robusnosti (može da podnese velika strujna i naponska naprezanja) i jednostavnog upravljanja, IGBT tranzistor često ima ulogu prekidača kod pretvarača energetske elektronike većih snaga (desetine kilovata, pa čak i stotine). Na primjeru pretvarača, čiji opis slijedi u nastavku, biće predstavljena efikasna zaštita IGBT tranzistora od uticaja prenapona, koja je bazirana na kombinaciji pasivnih i aktivnih tipova prenaponske zaštite kao i inteligentnog načina upravljanja.

##### A. Struktura pretvarača energetske elektronike i uslovi rada IGBT tranzistora

Pretvarač, koji je predmet ovog rada, predstavlja centralni dio sistema elektronskog tereta čija je funkcija da oponaša programabilno opterećenje čisto omskog karaktera. U osnovi, sklop je veoma jednostavan (slika 4).



Slika 4 – Blok šema elektronskog tereta

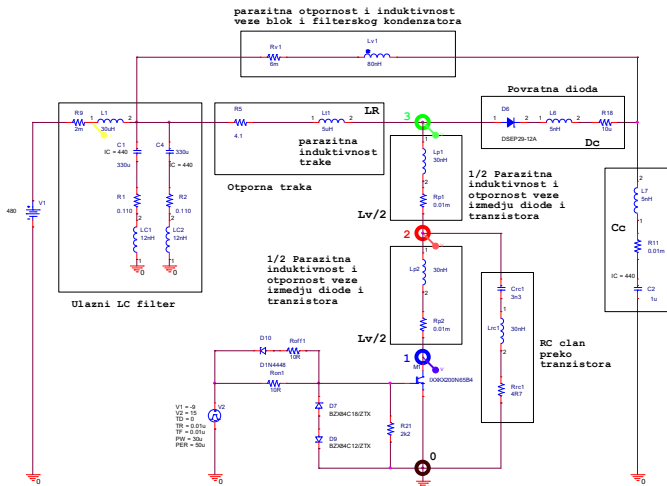
Na ulazu se nalazi filter, sastavljen od induktiviteta  $L_f$  i kondenzatora  $C_f$ , čija je funkcija da obezbijedi neprekidnu struju izvora  $U_u$ . Element na kome se vrši disipacija najvećeg dijela snage čini spiralno postavljena otporna traka. Kao takva, pored omskog otpora  $R$ , traka ispoljava i osobine induktiviteta – parazitnu induktivnost  $L_R$ . Regulacija struje se vrši pomoću IGBT tranzistora  $T$ , koji radi u prekidačkom režimu. Kompletan sistem elektronskog tereta prilagođen je radu sa naponima do 500 VDC i maksimalnim snagama do 25 kW.

##### B. Računarski model pretvarača

Za potrebe analize uticaja parazitnih induktivnosti veza između tranzistora i pripadajućih elemenata pretvarača na pojavu prenapona, razvijen je računarski model pretvarača (slika 5) sa realnim modelima pojedinih elemenata pretvarača (u modele elemenata uvrštene su parazitne vrijednosti omske otpornosti, kapacitivnosti i induktivnosti). Vrijednosti su uzete iz kataloških podataka proizvođača pripadajućih elemenata pretvarača. Dalje, parazitne induktivnosti otporne trake ( $L_R$ ), kao i parazitne induktivnosti i otpornosti međusobnih bakarnih veza na štampi ( $L_v$ ) mjerene su uz pomoć RLC metra *SANWA LRC700*.

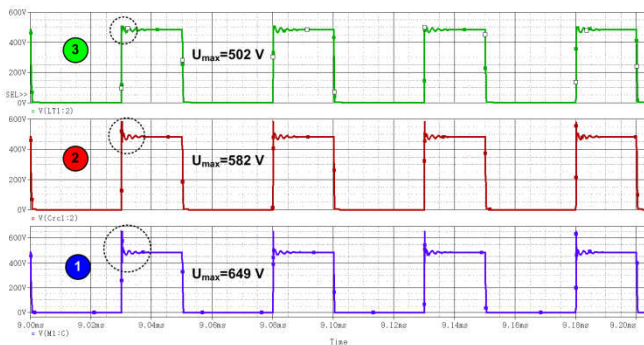
Rezultati simulacije daju odgovore na dva pitanja: na koji način parazitne induktivnosti veza utiču na raspodjelu prenapona između pojedinih tačaka pretvarača i kakav uticaj na nivo prenapona ima sam način upravljanja tranzistorom. Rezultati koji će biti prikazani i analizirani u nastavku, dobijeni su pri sljedećim parametrima simulacije:  $U_u=480$  VDC,  $I_u=60$  A,  $f=20$  kHz, napon gejta na uključanju i

isključenju  $U_{g1}=15$  VDC i  $U_{g2}=-9$  VDC, respektivno. Promjena napona između ova dva nivoa je linearna funkcija vremena.



Slika 5. Računarski model sistema (u OrCAD-u)

1) *Uticaj parazitnih induktivnosti veza na raspodjelu prenaponsa.* Veza između kolektora IGBT tranzistora prema diodi Dc modelovana je iz dva dijela – veza tranzistora (tačka 1, sa slike 5) prema jednom kraju otpornika  $R_{RC}$  (tačka 2, sa slike 5) modelovana je preko omske otpornosti ( $R_{V1}=10$  u $\Omega$ ) i parazitne induktivnosti ( $L_{V1}=30$  nH). Dalje, veza između spomenute tačke 2 i anode diode Dc (tačka 3 sa slike 5) takođe je modelovana preko omske otpornosti ( $R_{V2}=10$  u $\Omega$ ) i parazitne induktivnosti ( $L_{V2}=30$  nH).

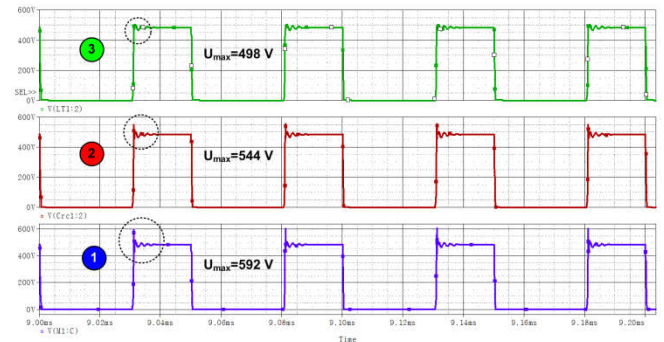


Slika 6. Uticaj parazitnih induktivnosti na raspodjelu prenaponsa ( $T_r=100$  ns)

Na slici 6 prikazani su talasni oblici napona u tačkama 1, 2 i 3, za slučaj kada je vrijeme pada struje kroz tranzistor  $T_r=100$  ns. Jasno se može uočiti da je nivo prenaponskog napona najveći na kolektoru IGBT tranzistora (tačka 1). Što pokazuje da je nivo prenaponskog napona u direktnoj vezi sa veličinom parazitne induktivnosti koja se nalazi u liniji tranzistora prema ostalim elementima pretvarača.

2) *Uticaj brzine isključenja tranzistora na nivo prenaponsa.* Na slici 7 prikazani su talasni oblici napona u tri karakteristične tačke (1, 2 i 3) pri istim uslovima kao u prethodnom testu, s tim da je vrijeme pada struje kroz tranzistor povećano sa 100 ns na 2 us.

U tački 3, nivo prenaponskog napona je praktično ostao isti. Međutim, u ostalim tačkama došlo je do značajne redukcije prenaponsa. Tako je u tački 2 nivo prenaponskog napona manji za 38 V (6,5%), dok je u tački 1 nivo prenaponskog napona manji za čak 57 V (8,7%).



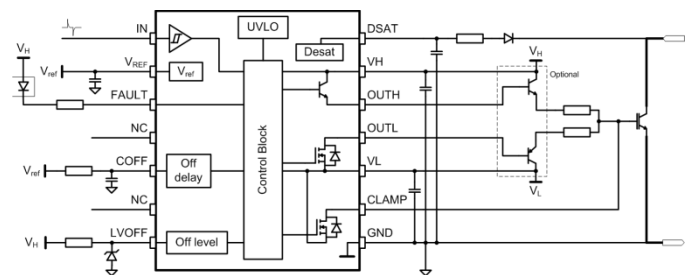
Slika 7. Uticaj vremena isključenja tranzistora na nivo prenaponsa ( $T_r=2$  us)

Na osnovu činjenice da nivo prenaponskog napona zavisi od brzine promjene struje kroz tranzistor (jednakost (1)) i dobijenih simulacionih rezultata, može se zaključiti da je kontrolom brzine isključenja tranzistora moguće uticati na nivo prenaponskog napona koji se javlja u trenutku njegovog isključenja.

Zbog nelinearnosti funkcije  $I_C=f(U_{GE})$ , koja je posljedica postojanja parazitnih kapaciteta između gejta i emitera  $C_{GE}$  i gejta i kolektora  $C_{GC}$  (tzv. Milerova kapacitivnost) i fenomena njihovog punjenja/praznjenja, u cilju što efikasnijeg upravljanja, neophodno je primjeniti inteligentne načine upravljanja [5]. Za potrebe upravljanja tranzistorom razvijenog prototipa pretvarača iskorišteno je upravljačko kolo TD350 o kojem će biti više riječi u nastavku.

### C. Realizacija inteligentnog načina upravljanja – upravljačko kolo TD350.

Kolo TD350 predstavlja inteligentno upravljačko kolo sa integrisanim upravljačkim i zaštitnim funkcijama koje su neophodne za pouzdan i efikasan rad IGBT tranzistora. Razvijeno je od strane kompanije za proizvodnju elektronskih komponenti STMicroelectronics ([www.st.com](http://www.st.com)) i posebno je prilagođeno za rad sa 1200 V IGBT tranzistorima, nazivnih struja od 15 A do 75 A. Na slici 8 prikazana je blok šema kola kojeg karakterišu sljedeće funkcije: [3]



Slika 8. Interna blok struktura TD350 kola u okruženju tipične primjene [3]

**Ulazni/okidni stepen (IN)** predstavlja analogni ulaz. Dizajniran je tako da se kolo može okidati preko otpokaplera ili impulsnog transformatora. Posto je za okidanje dovoljna ivica ulaznog signala, pruža se mogućnost korišćenja impulsnih transformatora male snage, dimenzija i cijene.

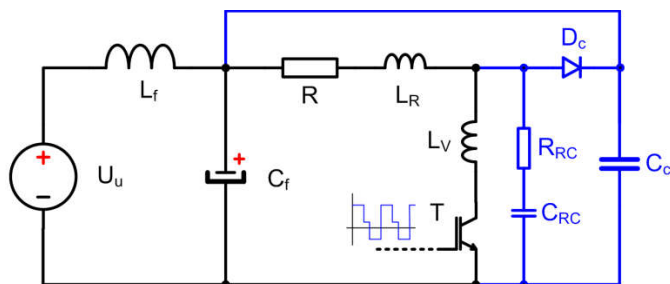
**Izlazni stepen (OUTPUT)** realizovan je kao dvokanalni. Kanali su odvojeni, tako da dozvoljavaju nezavisno uključivanje i isključivanje tranzistora bez korišćenja eksternih dioda. Garantovana struja uključivanja i isključivanja tranzistora, za puni opseg promjene radne temperature (-40 – 125 °C), iznosi 1,20 A i 0,75 A, respektivno. Maksimalni napon za pojedine kanale je  $V_H=18$  V i  $V_L=-12$  V.

**Funkcija isključenja u dva nivoa** obezbeđuje pouzdano isključenje tranzistora u normalnom radu i u slučaju detekcije struje kratkog spoja. Unutar **TD350** kola, umjesto nagle promjene napona gejta sa  $V_H$  na  $V_L$  nivo, realizovana je funkcija koja pravi vremensku zadržku (**Ta**) na redukovanoj vrijednosti napona **OUTH** koja je  $V_H < LV_{OFF} < 0$  i na taj način usporava isključenje, što ograničava nivo prenapona preko tranzistora. Vrijednosti **Ta** i **LV<sub>OFF</sub>** se preko eksternih elemenata (otpornika i kondenzatora) mogu podesiti u zavisnosti od okruženja i izabranog tipa tranzistora.

**Aktivni Milerov ograničavač** obezbeđuje kontrolu struje gejta za vrijeme brzih promjena  $dV/dt$ , čime se eliminiše potreba za negativnim naponom gejta pri isključenju. Dok traje isključenje tranzistora, vrši se nadgledanje napona gejta i kada on padne ispod 2 V, izlaz kola (**CLAMP**) postaje aktivan i gejt tranzistora kratko spaja prema masi. Na taj način se vrši pražnjenje parazitnih kapacitivnosti na ulazu **IGBT** tranzistora i obezbeđuje sigurno isključenje tranzistora.

#### D. Ostvareni rezultati kod razvijenog prototipa pretvarača

Na bazi znanja stečenog kroz teorijske osnove nastanka i uticaja prenapona kod pretvarača energetske elektronike, kao i analize rezultata simulacionog modela, razvijen je prototip pretvarača čija je šema, sa pripadajućim elementima prenaponske zaštite, prikazana na slici 9.

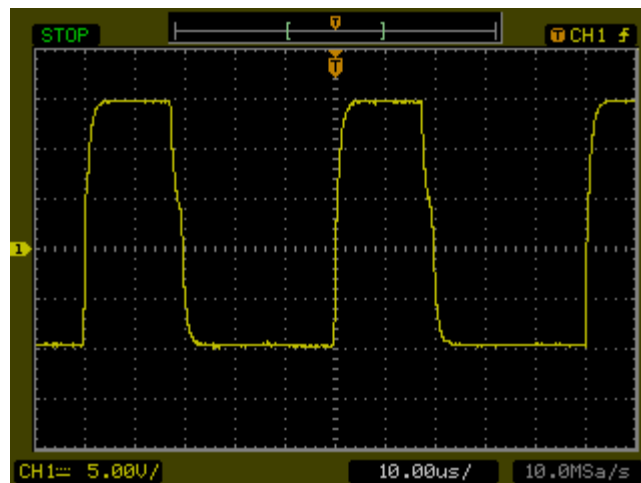


Slika 9. Blok šema razvijenog prototipa pretvarača sa pripadajućim elementima prenaponske zaštite

Zbog parazitne induktivnosti otporne trake ( $L_R \approx 5$  uH), realizovana je prenaponska zaštita **IGBT** tranzistora kao kombinacija aktivne (**D<sub>c</sub>-C<sub>c</sub>**) i pasivne (**R<sub>RC</sub>-C<sub>RC</sub>**) prenaponske zaštite. Zbog prisustva parazitnih induktivnosti veza između **IGBT** tranzistora i njegovog okruženja ( $L_V \approx 60$  nH) i strogo postavljenog zahtjeva za nivo prenapona na tranzistoru, bilo je neophodno uvesti dodatne mjere, u vidu inteligentnog načina upravljanja tranzistorom, kako bi se prenaponi sveli na zadovoljavajući nivo.

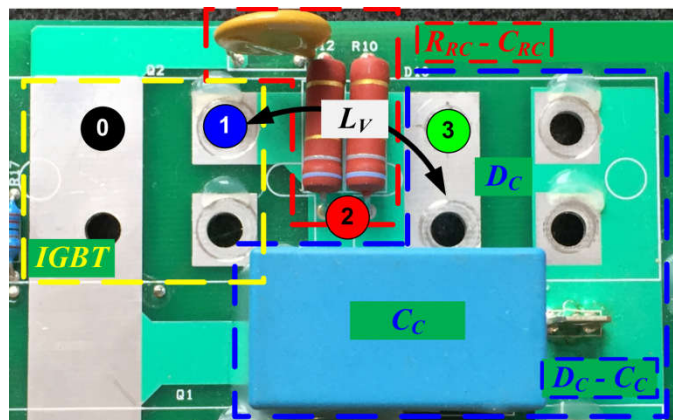
Upravljanje **IGBT** tranzistorom realizovano je preko upravljačkog kola **TD350**. Parametri funkcije za isključenje u dva nivoa konfigurisani su na sljedeći način: nivo napona za

uključenje  $V_H=15$  VDC, nivo napona za isključenje  $V_L=-9$  VDC, vrijeme zadržke na isključenju  $T_a=2$  us i nivo međunapona na isključenju  $LV_{OFF}=2,5$  V. Kompletan talasni oblik upravljačkog signala na izlazu prema **IGBT** tranzistoru prikazan je na slici 10.



Slika 10. Talasni oblik upravljačkog signala

Na slici 11 prikazan je dio razvijenog prototipa pretvarača. Posebno su označene pozicije **IGBT** tranzistora i elemenata prenaponske zaštite.



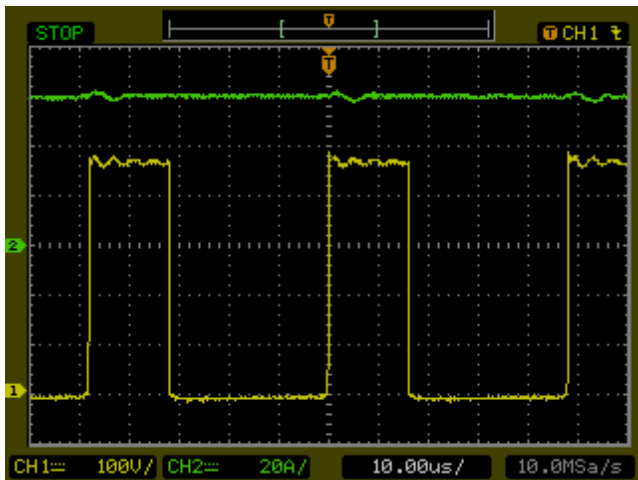
Slika 11. Razvijeni prototip pretvarača - pozicija **IGBT** tranzistora i elemenata prenaponske zaštite

Kao što se može vidjeti, položaj elemenata realizovan je tako da dužina međusobnih veza bude minimalna. Samim tim i parazitne induktivnosti veza svedene su na minimum. Takođe, označene su i tačke (**1, 2 i 3**) u kojima vladaju naponi o kojima je bilo riječi u okviru analize simulacionih rezultata (slika 6 i 7).

U nastavku slijedi pregled i analiza rezultata koji su ostvareni na realizovanom prototipu pretvarača:

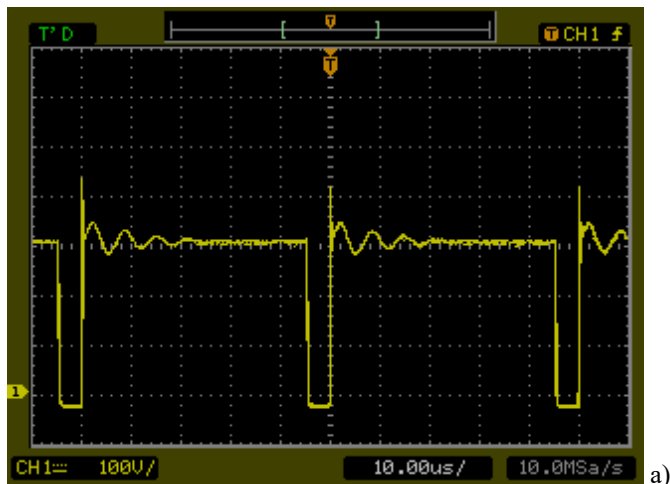
Na talasnom obliku napona **IGBT** tranzistora ( $U_{CE}$ ) pri  $U_{in}=480$  VDC i  $I_{in}=60$  A, koji je prikazan na slici 12, može se vidjeti da prenapona, u vidu uskog „špica“ praktično i nema. Jedino se primjećuje prigušena sinusna oscilacija čija se frekvencija poklapa sa rezonantnom frekvencijom pasivnog dijela prenaponske zaštite – RC člana.



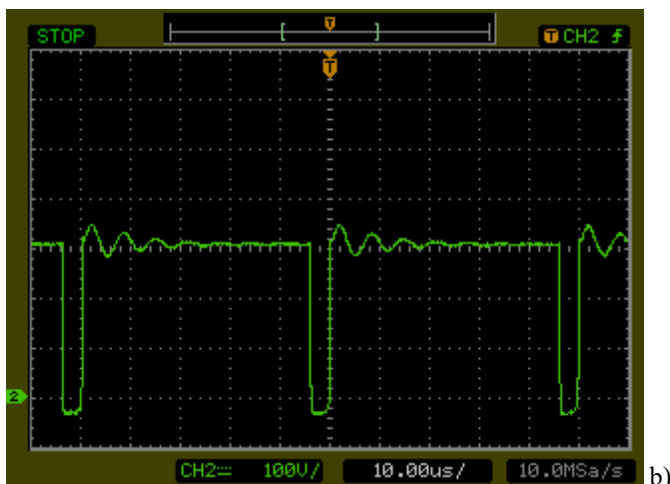


Slika 12. Talasni oblik  $U_{CE}$  (CH1) i  $I_U$  (CH2) pri  $U_{in}=480$  VDC

Poređenja radi, na slici 13 prikazani su talasni oblici napona  $U_{CE}$  pri vremenu isključenja  $T_{fA}=100$  ns (A) i  $T_{fB}=2$  us. U oba slučaja, vrijednosti ulaznog napona i struje iznosile su  $U_{in}=300$  VDC i  $I_U=70$  A.



a)



b)

Slika 13. Talasni oblici napona  $U_{CE}$  pri  $T_{fA}=100$  ns (a) i  $T_{fB}=2$  us (b)

Evidentna je razlika u nivoima prenapona za ova dva slučaja. Za  $T_{fA}=100$  ns, maksimalna vrijednost napona  $U_{CE}$  iznosi 440 V, dok je za  $T_{fB}=2$  us, maksimalna vrijednost napona značajno niža i iznosi 350 V.

Prikazani eksperimentalni rezultati jasan su pokazatelj da se prekidačkim elementima, kod pretvarača energetske elektronike, pravilnim dizajnom elemenata prenaponske zaštite i izborom adekvatnog načina upravljanja, mogu obezbjediti uslovi rada koji u normalnim i havarijskim stanjima garantuju pouzdanost i efikasnost.

## V. ZAKLJUČAK

Prilikom razvoja pretvarača energetske elektronike treba voditi računa o uzrocima nastanka i negativnim uticajima parazitnih induktivnosti, koje mogu da naruše pouzdanost i efikasnost rada prekidačkih elemenata, koji su najčešće ključni elementi pretvarača. U radu je napravljen osvrt na osnovne principe nastanka i ublažavanja uticaja prenapona na rad pretvarača. Posebno je istaknut princip inteligentnog načina upravljanja tranzistorom, kao efikasna mjera za sprečavanje nastanka prenapona. Predstavljen je primjer primjene namjenski dizajniranog upravljačkog kola koje na račun usporavanja procesa isključenja tranzistora vrši redukciju prenapona. Kroz prikazane rezultate, koji su dobijeni simulacijom i eksperimentalnim mjerjenjima na razvijenom prototipu pretvarača, pokazano je da se kombinacijom aktivne i pasivne prenaponske zaštite, uz inteligentan način upravljanja, može ostvariti efikasna prenaponska zaštita IGBT tranzistora.

## LITERATURA

- [1] <http://chemandy.com/calculators/flat-wire-inductor-calculator.htm>.
- [2] Rudy Severns, „Snubber Circuits for Power Electronics“, 2008.
- [3] ST Microelectronics, „Advanced IGBT/MOSFET driver“ DocID018539 Rev 3, 2013
- [4] Yi Zhang, Saed Sobhani, Rahul Chokhawala, „Snubber Considerations for IGBT Applications“ International Rectifier Applications Engineering, 233 Kansas St., El Segundo, CA, 90245 USA
- [5] Andreas Volke, Michael Hornkamp, „IGBT Modules – Technologies, Driver and Application“, Infineon Technologies AG, Munich, Second edition 2012.

## ABSTRACT

*Securing reliable and efficient operation of electronic devices often requires additional protection of individual elements of a circuit from parasitic components during the design stage. Therefore, this paper analyzes the influence of parasitic inductance on overvoltages at switching elements, which are an unavoidable part of most electronic converters. The paper also lists the basic methods for avoiding this phenomenon. One example of overvoltage protection of IGBT transistors based on TD350 control circuit is provided on a specific converter.*

## Efficient Control of IGBT Transistors Using a TD350 Integrated Circuit

Nenad Jovančić, Nijaz Hadžimejlić, Pero Čeklić