

## IMPULSNI STRUJNI GENERATOR PULSE CURRENT GENERATOR

Zdravko Gotovac, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

### Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

**Kratak sadržaj** – U ovom radu prikazana je jedna realizacija impulsnog strujnog generatora koji je namenjen za ispitivanje i odabiranje zavojnica čija je uloga prikupljanje elektromagnetne energije. Standardom su definisani talasni oblici strujnog impulsa kojima se vrši simulacija udara groma ili pražnjenja usled prenapona na dalekovodu. Generatori koji u potpunosti zadovoljavaju specifikacije su izuzetno skupi, njihova cena višestruko prevazilazi raspoloživi budžet. Zato je projektovan impulсни strujni generator čija je osnovna osobina ponovljivost talasnog oblika impulsa. Ovo se pokazalo kao dovoljno dobro rešenje u izboru optimalne zavojnice za prikupljanje električne energije, što i predstavlja sledeći korak u istraživanju.

**Ključne reči:** strujni impuls, RLC kolo, mikrokontroler

**Abstract** – This paper shows the realization of an pulse current generator whose purpose is to test and find an adequate coil which will be used for harvesting electric energy. Standard defines signal wave forms of current impulse which are used to simulate thunderbolt, or electrical discharge caused by overvoltage in high voltage transmission lines. Generators which completely fulfill required specifications are prohibitively expensive, and their price far exceeds available budget. This is the reason for designing pulse current generator whose main characteristic is repeatable pulse waveform. This has been shown as a sufficient solution in choosing optimal coil for harvesting electrical energy, which represents the next step in research.

**Keywords:** current pulse, RLC circuit, microcontroller

### 1. UVOD

Struja koja protiče kroz provodnik stvara magnetno polje u njegovoj okolini. Ako se zavojnica postavi u promenljivo magnetno polje u njoj će, usled pojave električne indukcije, doći do pojave elektromagnetnog polja. Zavisno od oblika i dimenzija zavojnice, kao i od broja zavojaka, prikupljanje električne energije će biti manje ili više efikasno.

Struja kroz provodnik može biti jednosmerna ili naizmjenična. Takođe, možemo posmatrati ustaljeni ili prelazni režim rada. Trenutno se u okviru istraživanja raspolaze skupom zavojnica koje treba ispitati i ustanoviti koja je najefikasnija u prikupljanju električne energije.

### NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio prof. dr Dragan Pejić.

U prvoj fazi su zavojnice ispitivane u ustaljenom naizmeničnom režimu. Obavljena su ispitivanja pri struji efektivne vrednosti od 30 A i frekvenciji 3 kHz. Neki od razloga zbog kojih je ispitivanje u ustaljenom režimu nedovoljno dobro su:

- na odziv zavojnice utiče efektivna vrednost struje, ali i vrednost prvog izvoda struje, što je direktno srazmerno frekvenciji
- zavojnica će biti korišćena u praksi u impulsnom, a ne u ustaljenom režimu.

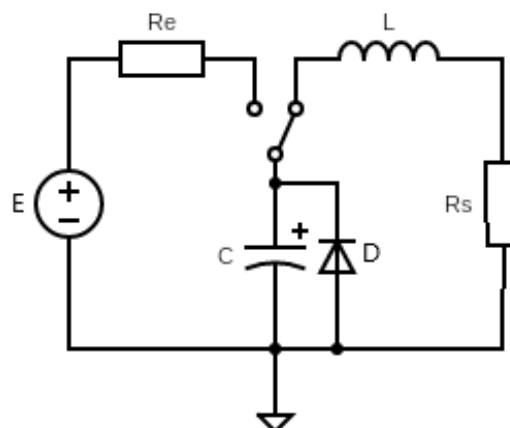
Kako bi se obezbedilo korektnije ispitivanje zavojnica, projektovan je impulсни strujni generator. Cilj projektovanja je napraviti strujni impuls veće vrednosti struje (od raspoloživih 30 A), sa brzinom porasta i opadanja ivice većom nego pri frekvenciji od raspoloživih 3 kHz i sa ponovljivim talasnim oblikom.

Olakšavajuća okolnost je što impulсни strujni generator ne treba da proizvede i veliki napon (a time i veliku snagu), što ga razlikuje od standardnih rešenja koja postoje, ali su izuzetno skupa: zavisno od snage, njihova cena se kreće od nekoliko hiljada do nekoliko stotina hiljada evra.

### 2. SIMULACIJA, IZRADA I ISPITIVANJE KOLA

#### 2.1. Teorijski opis funkcionisanja kola

Da bi se shvatio rad čitavog kola, prvo je potrebno upoznati se sa osnovnom šemom koja objašnjava bazično kolo (slika 1), na kom se zasniva rad ispitivanog kola, odnosno na pražnjenju kondenzatora kroz zavojnicu i otpornik (RLC kolo).

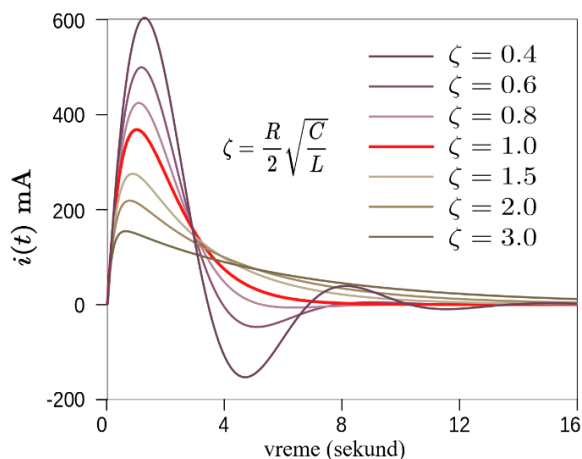


Slika 1. Osnovna šema kola

Na slici 1. možemo da vidimo osnovne komponente kao što su izvor napajanja E, otpornici Re i Rs, zavojnica L, kondenzator C, i zaštitna dioda D.

Kondenzator se prvo napuni kroz otpornik  $R_e$  iz jednosmernog izvora (preklopnik u levom položaju). Onda se preklopnik prebaci u desni položaj, pa se kondenzator prazni kroz zavojnicu  $L$  i otpornik  $R_s$ .

Uzimajući u obzir ograničenja napajanja koje je povezano na kondenzatore, kada je preklopnik u levom položaju (slika 1), struja kojom se kondenzator puni nije velika, te se sporo puni. Kako je ekvivalentna otpornost desnog dela kola mala, kada je preklopnik u desnom položaju (slika 1), struja je velika. Dakle to su dva razloga zbog kojih se kondenzatori u kolu sporo pune, i brzo prazne (u vidu impulsa).



Slika 2. Strujni odzivi kola, kao funkcija upotrebljenih komponenti

Kako je potrebno uobličiti impulsni signal, odnosno uzlaznu ivicu strujnog signala, u kolo je ubačena zavojnica  $L$ , koja sprečava brze promene u jačini struje unutar kola.

Odzivi koji se mogu videti na slici su posledica faktora prigušenja ( $\zeta$ ). Kada je faktor prigušenja manji od jedan ( $\zeta < 1$ ), onda je reč o slabo prigušenom kolu. Za kolo čiji je faktor prigušenja veći od jedan ( $\zeta > 1$ ), kažemo da su dobro

prigušena. Postoji i poseban slučaj, a to je kada je faktor prigušenja jedan jedinici ( $\zeta = 1$ ), i tada je reč o kritično prigušenom kolu. Faktor prigušenja zavisi od vrednosti komponenti RLC kola.

Strujni odzivi slabo prigušenog kola su prikazani na slici 2. kao krive ljubičastih boja, dok su strujni odzivi dobro prigušenog kola predstavljeni u vidu krivih oker boje. Za ispitano kolo idealan bi bio strujni odziv na slici prikazan crvenom bojom, odnosno odziv kritično prigušenog kola, pa je kolo napravljeno tako da ima taj odziv.

Zbog nesavršenosti električnih elemenata korištenih za pravljenje kola, može se desiti da kolo bude slabo prigušeno, što može dovesti do proticanja struje u suprotnom smeru, što bi oštetilo kodnezatore.

Da bi se sprečilo potencijalno oštećenje kondenzatora dodata je dioda  $D$ .

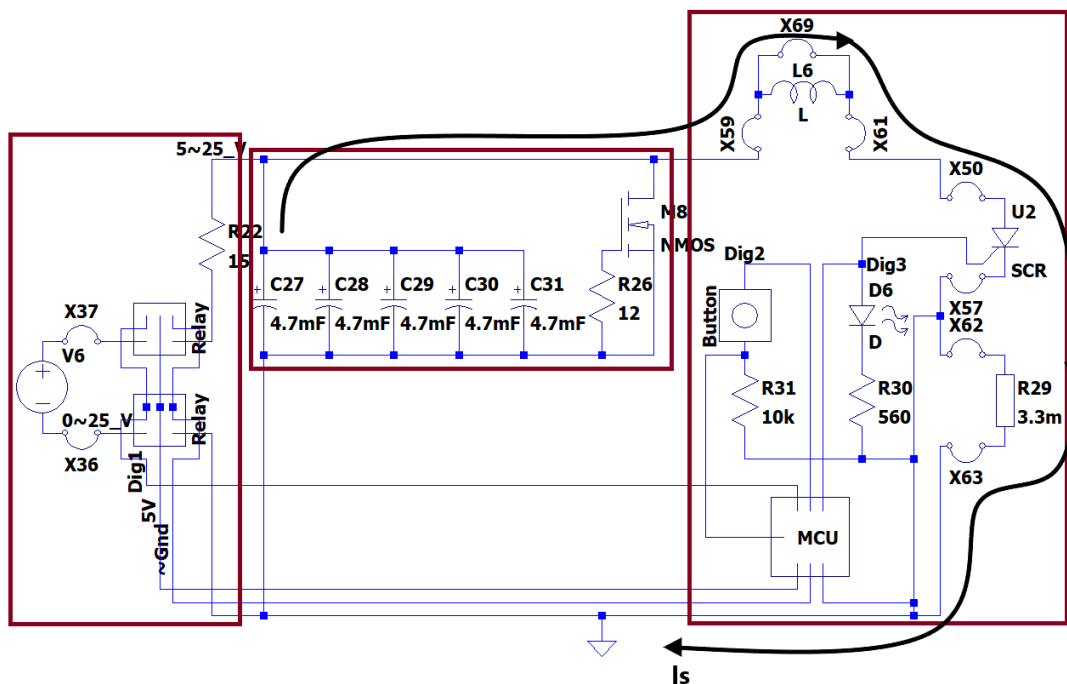
## 2.2. Simulacija i skiciranje kola

Konačna šema čitavog kola može se videti na slici 3, na kojoj se mogu uočiti obeležena tri glavna dela šeme. Prvi deo šeme (gledano sa leva na desno) predstavlja deo kojim se kontroliše napajanje čitavog kola. Mogu se videti releji obeleženi sa Relay, džamperi  $X36$  i  $X37$ , otpornik  $R22$  i naponski izvor  $V6$ .

Džamperi predstavljaju terminale na konektoru na koje se povezuje napajanje  $V6$ , i to je spoljno dovedeno napajanje. Kolo se snabdeva jednosmernim naponom koji se može menjati od 0 V do 30 V. Prilikom testiranja kolo nije napajano naponom većim od 25 V, i to je bilo dovoljno za ispitivanje osobina kola. Napajanje je redno povezano sa sledećim delom kola, otpornikom  $R22$ .

Sledeći deo kola predstavlja pet kondenzatora koji su povezani u paralelnu vezu. Kako je svaki od kondenzatora iste nazivne kapacitivnosti, ukupna ekvivalentna kapacitivnost dobija se formulom:

$$C_u = C27 + C28 + C29 + C30 + C31 = 5 \times C27 \quad (1)$$



Slika 3. Šema kompletnog kola

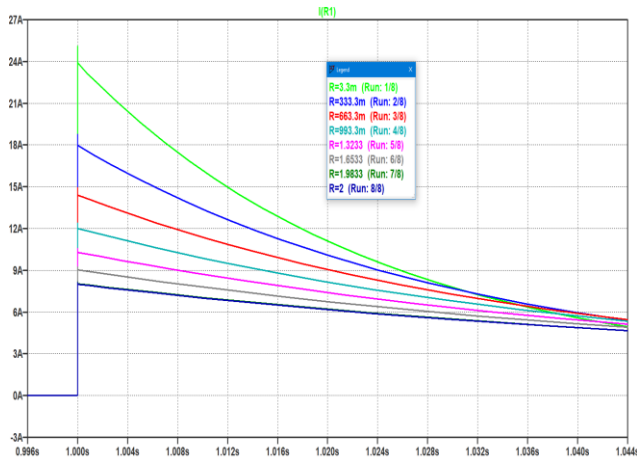
Paralelno sa kondenzatorima nalazi se povezan MOSFET M8, koji je n-kanalnog tipa (NMOS). Korišteni MOSFET je 26NM60N, koji može da izdrži konstantni napon (VDS) između drejna (engl. Drain) i sorsa (engl. Source) u visini od 600 V, i konstantnu struju drejna ( $I_d$ ) u visini od 20 A. Otpornik R26 drži NFET u isključenom stanju, tako da do izraza dolazi samo ugrađena zaštitna antiparalelna dioda, koja odgovara diodi sa slike 1.

Na pozitivni kraj diode povezan je terminal, na šemi predstavljen džamperima X59 i X61, i on je prva komponenta sledećeg, i poslednjeg dela kola. Terminal je postavljen tako da se na njegove konektore može povezati kalem L6, ili kratkospojnik X69, u zavisnosti od toga koja se konfiguracija komponentni unutar kola želi ispitati. Na kalem se redno povezuje tiristor U2, koji ima ulogu prekidačke komponente.

Na šemi su dodati džamperi da se naglasi gde se sve vrše spajanja spoljašnjih komponenti na štampanu ploču. Svako takvo spajanje je potencijalno povećanje ukupne otpornosti u kolu, a to može bitno da promeni (smanji) maksimalnu vrednost struje.

Mikrokontroler (MCU) upravlja prekidačkim komponentama (tiristorom i relejima), tasterom Button kojim se pokreće proces električnog pražnjenja, koja je kao program smeštena na mikrokontroler, i signalna LED koja se koristi kao indikator izvršavanja određenog dela programa.

Kada se kolo poveže na spoljašnje napajanje, i kada se mikrokontroleru obezbedi napajanje, pritiskom na taster, i detekcijom visokog nivoa na ulaznom pinu mikrokontrolera, mikrokontroler počinje proces električnog pražnjenja koji se nalazi na njemu.



Slika 4. Veza odziva impulsnog signala i otpornosti kola

Prvo se uključuju releji, koji u tom slučaju spajaju napajanje sa ostatkom kola, na način koji je pokazan na šemi. Taj deo programa se izvršava određeno vreme, koje može biti izmenjeno u zavisnosti od potrebe. To vreme izvršavanja dela programa zavisi od vremena potrebnog da se napune kondenzatori. Vreme punjenja kondenzatora zavisi od otpornika kroz koji protiče struja od izvora ka pozitivnim pinovima kondenzatora, kao i od kapacitivnosti samih kondenzatora, budući da proizvod te dve veličine definiše vremensku konstantu:

$$\tau = RC \quad (2)$$

Kada se kondenzatori napune releji se isključuju, i tako su kondenzatori u potpunosti galvanski izolovani od izvora

napajanja, i ovo je neophodno da se uradi, jer se prilikom testiranja primetio veliki šum na kanalu jedan (grafik 1, CH1), koji je sprečavao ispravnu akviziciju signala. Napunjeni kondenzatori se koriste kao baterija u sledećem delu izvršavanja programa.

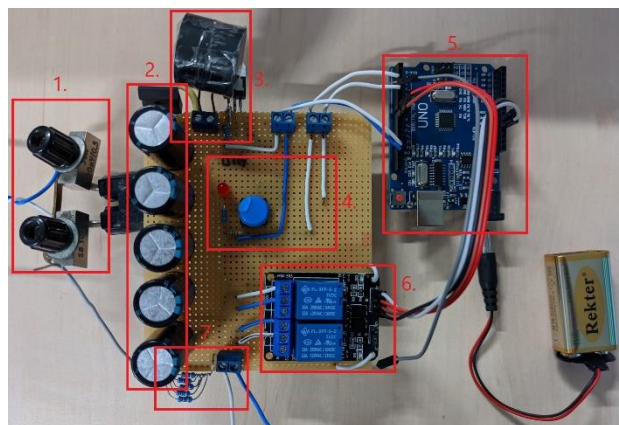
Sledeći korak je paljenje tiristora, koji se nakon paljenja ponaša kao kratak spoj, i ostvaruje vezu između jednog kraja terminala na koji je povezana zavojnica i šanta (otpornik R29).

Bitno je napomenuti da je vrednosti otpornosti šanta reda  $m\Omega$ , dok je otpornost vodova i kontakata značajno veća, reda  $\Omega$ . Taj problem se izbegava četvorožičnim povezivanjem. Šant se povezuje četvorožično pa je lako izračunati struju koja prolazi kroz njega.

Prilikom ostvarivanja veze između terminala na kojima se nalazi zavojnica i šanta, kondenzatori se brzo isprazne, u vidu strujnog impulsa. Struja nastala prilikom pražnjenja kondenzatora može se videti na slici 4.

### 2.3. Izrada kola

Realizovano kolo može da se vidi na slici 5. Za bazu kola korištena je bakarna pločica na kojoj se nalaze zalemljene komponente. Može se videti terminal na koji je povezan šant (1), deo kola na kom su paralelno povezani kondenzatori i MOSFET (2), terminal na koji je povezana zavojnica i na njega redno tiristor (3), kolo sa tasterom i signalnom LED (4) i terminal na koji se povezuje napajanje, i na njega redno povezana grupa paralelnih otpornika (7).



Slika 5. Realizovano električno kolo

Na slici se može videti da je kao mikrokontroler korištena Arduino UNO razvojna platforma (5), i pločica na kojoj se nalaze dva zalemljena relejna kola (6).

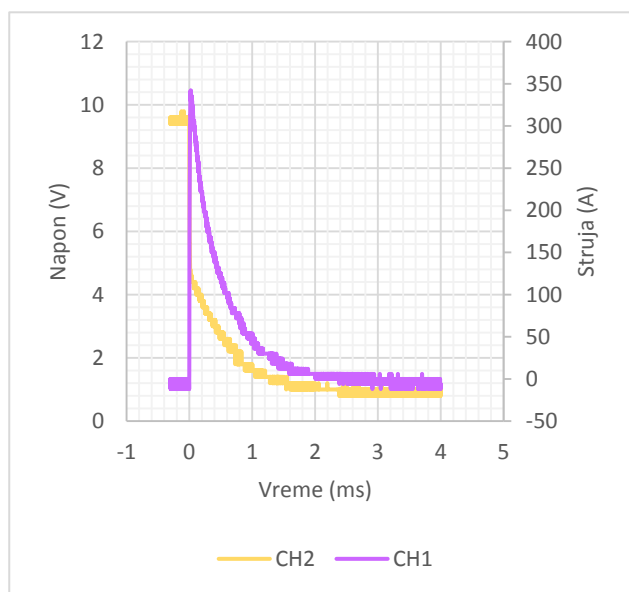
Napajanje Arduino UNO razvojne platforme, kao i kola sa tasterom i signalne LED obezbeđeno je baterijom od 9 V.

### 2.4. Ispitivanje signala unutar kola

Mereni signali nalaze se prikazani na grafiku 1, gde se pored signala koji je meren na kanalu jedan (CH1), a koji predstavlja signal na šantu, vidi i signal meren na kanalu 2 (CH2), koji predstavlja struju koja prolazi kroz šant.

Početak snimanja signala je obavljen u trenutku nakon punjenja kondenzatora, i kratak vremenski period nakon njihovog pražnjenja. Može se videti kako se napon kondenzatora na početku naglo menja, jer je u tom trenutku najveća struja koja prolazi kroz šant. Sa smanjivanjem

napona na pozitivnom kraju kondenzatora (negativni kraj je povezan na GND), smanjuje se i struja koja prolazi kroz šant.



Grafik 1. Signalni odzivi unutar kola, napon na kondenzatorima (CH1) i struja kroz otpornik  $R_s$  (R26)

Tako dobijamo impulsni signal koji ima karakterističan talasni oblik koji zavisi od komponenti od kojih se sastoji kolo (kondenzatora, kalema i otpornika). Signal na krajevima šanta brzo dostiže svoj maksimum, i na grafiku se može videti, da kada struja unutar kola dostigne svoj maksimum, iznosi  $\sim 342$  A.

Kolo dostiže ovaj maksimum za manje od  $100 \mu s$ , i kao i na jačinu struje, na brzinu odziva signala može se uticati različitim konfiguracijama elemenata unutar kola.

### 3. ZAKLJUČAK

U radu je dat prikaz realizacije jednostavnog impulsnog generatora. Prikazani su rezultati teorijske i simulacione analize, ali i rezultati merenja na realizovanom prototipu.

Uprkos rezultata koji su dobijeni teorijskom obradom, i simulacijama, koje su pokazale, impulsni generator je napravljen od realnih komponenti, pa je kao takav posedovao određene nesavršenosti.

Otpornost provodničkih veza između komponenti su predstavljale značajnu razliku u odnosu na ono što su simulacije pokazivale. Zbog njihovih otpornosti, koje su bile značajno veće, u poređenju sa otporničkim elementom (šant) koji se nalazi unutar realizovanog kola, strujni impuls koji se javljao tokom pražnjenja je bio značajno slabiji.

Unutrašnje kapacitivne, kao i induktivne, osobine komponenti uticale su na talasni oblik impulsnog signala koji se generisao prilikom pražnjenja kondenzatora.

Ali kao što je pre početka rada predpostavljeno, u radu se pokazala realnom mogućnost realizacije impulsnog strujnog generatora.

Na veličinu strujnog impulsa se može uticati povećanjem napona napajanja i smanjenjem otpornosti u kolu. Trenutno korišteni kondenzatori su predviđeni za maksimalni napon od 35 V. Otpornost u kolu se može smanjiti kvalitetnijom izradom vodova kroz koje protiče velika struja. Ukoliko se želi postići brza uzlazna ivica, potrebno je smanjivati vrednost induktivnosti.

Sa jednostavnim komponentama, napravljen je impulsni strujni generator malih dimenzija, koji je u stanju da generiše ponovljivi signal, a da je taj strujni impulsni signal ima izuzetno kratak vremenski odziv (reda par milisekundi), i veliku jačinu struje (reda nekoliko stotina ampera).

### Kratka biografija:



**Zdravko Gotovac** rođen je u Novom Sadu 1997. god. Bachelor rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Merenje i regulacija odbranio je 2020.god.  
kontakt: gotovaczdravko17@gmail.com