



УНИВЕРЗИТЕТ  
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ  
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Југославија  
Деканат: 021 350-413; 021 450-810; Централа: 021 350-122  
Рачуноводство: 021 58-220; Студентска служба: 021 350-763  
Телефакс: 021 58-133; e-mail: ftndean@uns.ns.ac.yu



Сертификован  
систем  
квалитета



## PROJEKAT IZ

### PROJEKTOVANJA ELEKTRONSKIH KOLA POMOĆU RAČUNARA

#### NAZIV PROJEKTA:

Laboratorijski izvor napajanja

#### MENTOR PROJEKTA:

Dr Miodrag Brkić

#### TEKST ZADATKA:

Projektovati laboratorijsko napajanje tako da je opseg podešavanja napona od 1.5 V do 25 V,  
Maksimalna struja podešljiva u opsegu 0.05 A do 1 A

#### PROJEKAT IZRADILI:

Đorđe Drozgović EE43/2018  
Vanja Lazarević EE149/2019

## SADRŽAJ

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | Uvod.....                                       | 3  |
| 2.  | Šematski prikaz laboratorijskog napajanja ..... | 3  |
| 3.  | Proračun kondenzatora C1 .....                  | 5  |
| 4.  | Deo kola za strujnu zaštitu .....               | 6  |
| 5.  | Princip stabilizacije kola .....                | 7  |
| 6.  | Rezultati simulacija.....                       | 10 |
| 7.  | Nezavisnost izlaznog napona od potrošača.....   | 13 |
| 8.  | Efikasnost napajanja .....                      | 14 |
| 9.  | Zaključak.....                                  | 15 |
| 10. | Literatura.....                                 | 16 |

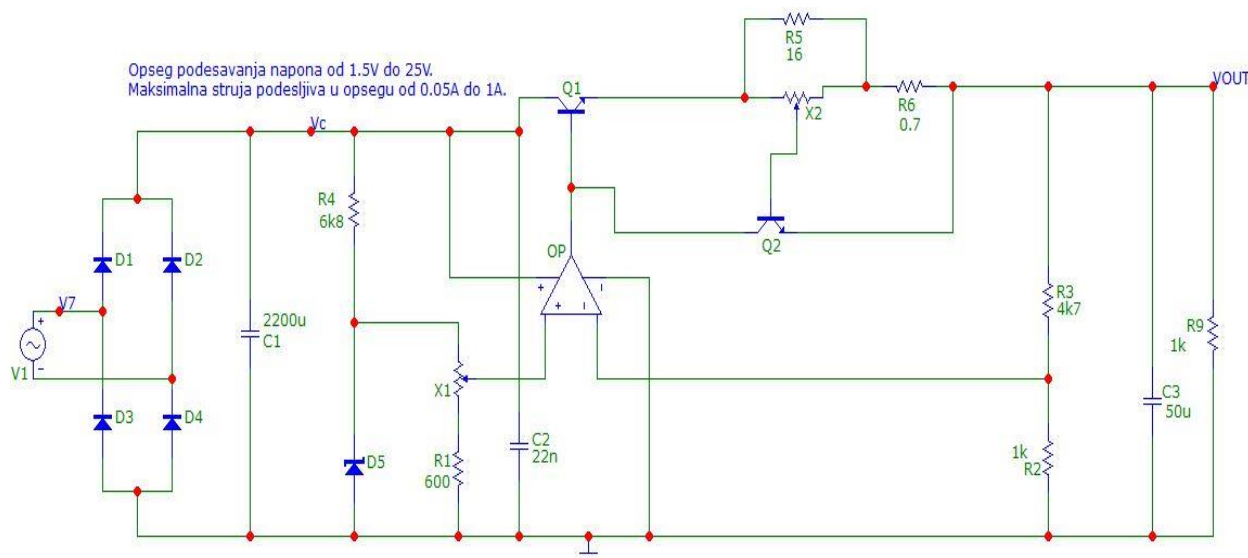
## 1. Uvod

Zadatak projekta je realizacija laboratorijskog izvora napajanja sa mogućnošću podešavanja izlaznog napona od 1.5 V do 25 V i maksimalnom izlaznom strujom od 0.05A do 1 A.

Električna šema, kao i sve neophodno simulacije i analize izvršene su u alatu MicroCap. Funkcionalnost kola je uspešno realizovana korišćenjem dole opisanih komponentata i njihovim pravilnim povezivanjem.

## 2. Šematski prikaz laboratorijskog napajanja

Na *slici 1.* je prikazana šema kola za laboratorijsko napajanje. Napajanje je realizovano na klasičan način.



Slika 1. Šematski prikaz kola

Na ulazu imamo transformator (na šemi prikazan pomoću sinusnog generatora V1) amplitude 40V. Nakon toga imamo 4 ispravljačke diode 1N5400 koje predstavljaju Greco ispravljač, sačinjen od 4 ispravljačke diode, D1, D2, D3 i D4. Ovaj punotalasni ispravljač od sinusoidnog oblika napona pravi povorku pozitivnih poluperioda. U slučaju vezivanja dioda u obrnutom smeru, dobila bi se povorka negativnih poluperioda. Na njihovom izlazu dobijamo jednosmerni pulsirajući napon.

Na izlazu punotalasnog ispravljača imamo fildarski kondenzator C1 kapacitivnosti 2200 uF koji služi za otklanjanje napona brujanja, koji pored toga što je kapacitivni filter može biti i izvor napajanja ukoliko diode ne provode. Ovo je omogućeno zahvaljujući akumuliranoj energiji. S obzirom da taj napon nije dovoljno stabilizovan, potrebno ga je dodatno stabilizovati, a to ustvari vrši ostatak ovog kola.

Operacioni pojačavač LM358A predstavlja pojačavač greške. Na njegovom neinvertujućem ulazu vezuje se referentni napon, a na invertujućem se vezuje izlazni napon umanjen preko naponskog razdelnika R2 i R3. Na njegovom izlazu vezan je tranzistor Q1 da bi se obezbedilo dovoljno pojačanje i dovoljno velika izlazna struja. S obzirom da se vraćeni izlazni signal vezuje na invertujući ulaz operacionog pojačavača, imamo negativnu povratnu spregu na kojoj se i zasniva princip rada ovog kola. Kako operacioni pojačavač radi u aktivnom režimu, on forsira da na svojim ulazima ima iste vrednosti napona. Na ovaj način se izjednačavaju referentni i izlazni napon (umanjen preko naponskog razdelnika).

Referentni napon, realizovan je korišćenjem cener diode D5 (1N750). Ova dioda na svojim krajevima ima konstantan napon od 4.7 V sve dok kroz nju teče struja od oko 20mA (podaci iz tehničke specifikacije). Ova vrednost napona je pogodna za temperaturnu stabilnost, koja je veoma bitan faktor. Dioda je vezana na ulazni, nestabilisani napon. Mnogo elegantnije rešenje je vezati cener diodu na izlazni, stabilisani napon. Međutim, ovde to nije bilo moguće jer je napon diode 4.7 V, a napon na izlazu treba da bude u opsegu od 1.5 V do 25 V. Dakle, ako na izlazu imamo manje vrijednosti od 4.7 V tada dioda ne bi mogla da radi tj. ne bi se ponašala kao naponski izvor.

Napon cener diode se razdeljuje preko naponskog razdelnika otpornika R4 i potencijometra X1. Ovo se koristi da bismo na izlazu mogli dobiti podešljiv napon. Drugi način bi bio da potencijometar stavimo između otpornika R2 i R3 (ili umesto R3) i da na taj način imamo podešljiv izlazni napon. Međutim, tada bi referentni napon cener diode morao biti manji od minimalnog izlaznog napona (1.5 V) što nije lako realizovati. Otpornik R1 od 650  $\Omega$  ograničava tj. obezbeđuje minimalni izlazni napon koji je 1.5 V. Bez ovog otpornika, ako bismo klizač potencijometra stavili u skroz donji položaj, dobili bismo referentni, a samim tim i izlazni napon od približno 10 mV. Ako je klizač potencijometra u gornjem položaju tada na izlazu dobijamo oko 25 V što znači da imamo, uz pravilan odabir otpornika R1, na izlazu vrednost podešljivog napona od 1.5 V do 25 V.

Zahvaljujući konstantnoj struji polarizacije, otpornik R1 ima ključnu ulogu u stvaranju stabilnog napona.

Korišćenjem potencijometra X1, pojačavača greške OP, otpornika R1, R2, R3, kao i tranzistora Q1, se ostvaruje željeni napon na izlazu. Strujna zaštita je realizovana preko tranzistora Q2, otpornika R5 i R6, i potencijometra X2.

Kondenzator C3 od 50  $\mu$ F služi za smanjenje izlazne impedanse na visokim učestanostima, kada negativna povratna reakcija lošije radi, do nekoliko MHz. Ako je potrebno koristiti ovo napajanje za potrošače koji rade na višim učestanostima, tada do izražaja dolazi parazitna induktivnost ovog kondenzatora tako da je pametno paralelno njemu vezati jedan keramički kondenzator reda 100 nF koji na visokim učestanostima ima dovoljno malu impedeansu (do nekoliko stotina MHz), dok na nižim učestanostima nema nikakvu funkciju.

Kondenzator C2 od 22 nF služi da dodatno ispegla napon napajanja operacionog pojačavača. On je praktično vezan paralelno kondenzatoru C1, ali ga u praksi treba fizički postaviti što bliže priključcima operacionog pojačavača.

### 3. Proračun kondenzatora C1

Za realizaciju Grecovog spoja korišćene su diode 1N5400. Na osnovu podataka iz *datasheet-a* se vidi da je maksimalni strujni pik ove diode 200 A, a napon proboja je 50 V. Sledeći izraz prikazuje vezu između struje kroz potrošač i strujnog pika diode:

$$\frac{I_m * T}{2} = \frac{I_{dm} * T_{pd}}{2} \quad (1)$$

$I_m$ -struja kroz potrošač

$T$ -perioda

$I_{dm}$ -struja kroz diodu

$T_{pd}$ -vreme provođenja diode

Ukoliko se uzme da je  $T_{pd}$  otprilike 10% od  $T/2$ , tada važi da je:

$$I_{dm} = 20 * I_m \quad (2)$$

Kao što je već ranije opisano, kao kapacitivni filter se koristi kondenzator C1 kapacitivnosti 2200 uF. Preko izraza 3 se može odrediti ova vrednost:

$$0.9 * V_{1amp} - 2 * V_d - U_{brmax} \geq V_{pmax} + V_{cemin} + V_{be} \quad (3)$$

pri čemu je:

$V_{1amp}$ -amplituda ulaznog signala (*u našem slučaju 38.5V*)

$V_{pmax}$ -maksimalni izlazni napon (*u našem slučaju 25V*)

$V_d$ -pad napona na diodi 1N5408 (*uzimamo vrednost 1V*)

$$0.9 * 38.5V - 2V - U_{brmax} \geq 25V + 1V + 0.7V$$

sledi da je:

$$U_{brmax} \leq 5.95V$$

Na osnovu dobijenog napona brujanja, dobija se minimalna vrednost tražene kapacitivnosti:

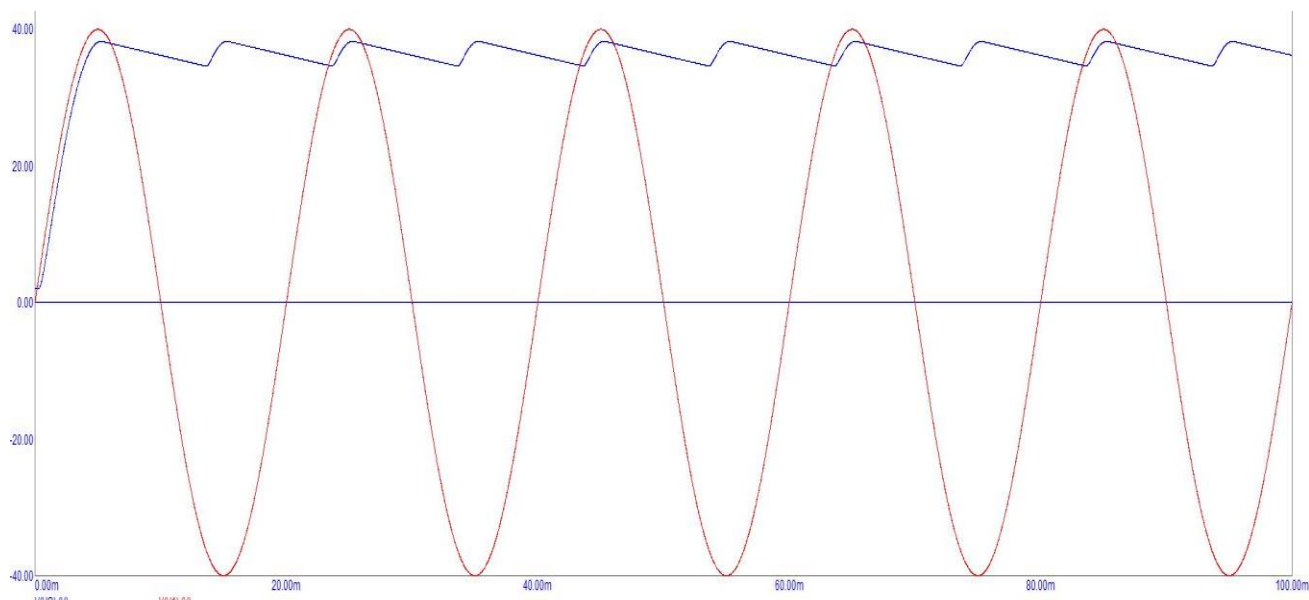
$$U_{brmax} = \frac{I_m * T}{2 * C_1} \quad (4)$$

pri čemu je  $T = \frac{1}{50Hz}$ , tako da se dobija vrednost kondenzatora od:

$$C_1 = \frac{I_m * T}{2 * U_{brmax}} = 1666\mu F$$

Kako ova vrednost ne postoji, uzimamo prvu sledeću koja je veća od ove tako da C1 biramo da bude 2200uF.

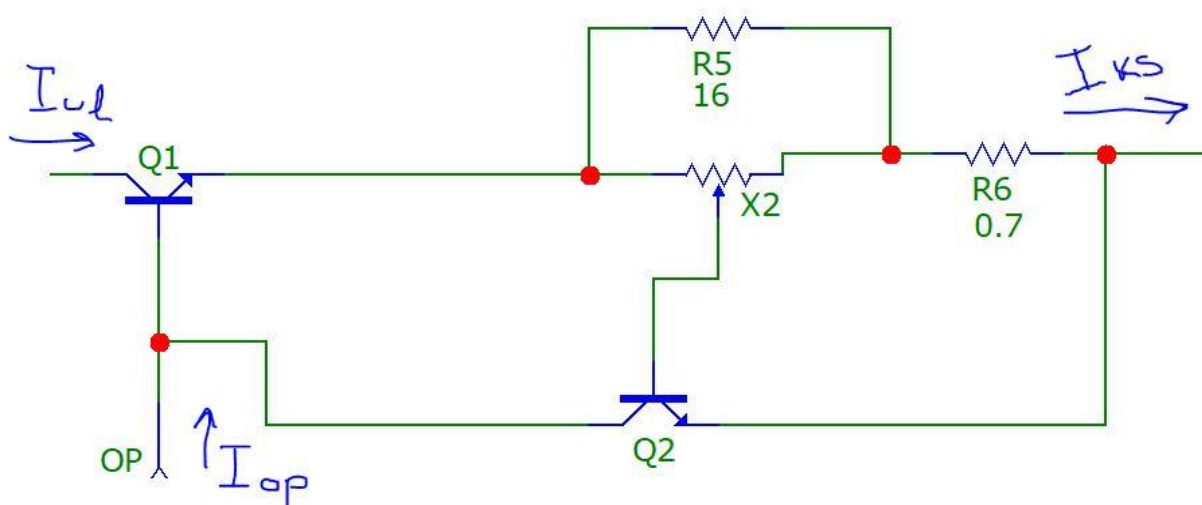
Na slici 2, prikazani su napon na ulazu u Grec (crvenom bojom), napon na izlazu iz Greca, odnosno napon na kondenzatoru (plavom bojom). Sa slike možemo videti da je napon na kondenzatoru umanjen za vrednost  $2 \cdot V_d$ , jer tokom svake poluperiode, provode dve diode u ispravljaču. Ova analiza je izvršena za najgori mogući slučaj, odnosno kada je napajanje podešeno tako da na izlazu daje 25 V. Izlaz je kratko spojen i podešena je maksimalna izlazna vrednost struje od 1 A. S obzirom da komponente zadovoljavaju najgori slučaj, to znači da će pravilno raditi i u svakom drugom slučaju.



Slika 2. Napon na ulazu i izlazu Greca

#### 4. Deo kola za strujnu zaštitu

Na slici 3 prikazan je deo kola koji kontroliše maksimalnu izlaznu struju.  $I_{ul}$  je ulazna struja koju daje filterni kondenzator,  $I_{op}$  je izlazna struja pojačavača greške tj. operacionog pojačavača, dok je  $I_{ks}$  izlazna struja u najgorem slučaju odnosno kada na izlazu dođe do kratkog spoja.



Slika 3. Deo kola za strujnu zaštitu

Željena vrednost struje u opsegu 0.05A-1A se ostvaruje pomoću strujne zaštite koju čine tranzistor Q2, otpornici R5 i R6 i potencijometar X2 od 100  $\Omega$ . Princip rada se zasniva na tome da kada napon  $V_{be}$  tranzistora Q2 dostigne vrednost od 0.7V, tranzistor Q2 provede i "ukrade" struju baze tranzistoru Q1. Time se ograničava maksimalna izlazna struja. Treba proračunati otpornost tako da  $I_{max}$  bude u zadanom opsegu. To se ostvaruje pomoću potencijometra X2 za čije dve krajnje vrednosti klizača se ostvaruje taj opseg struje.

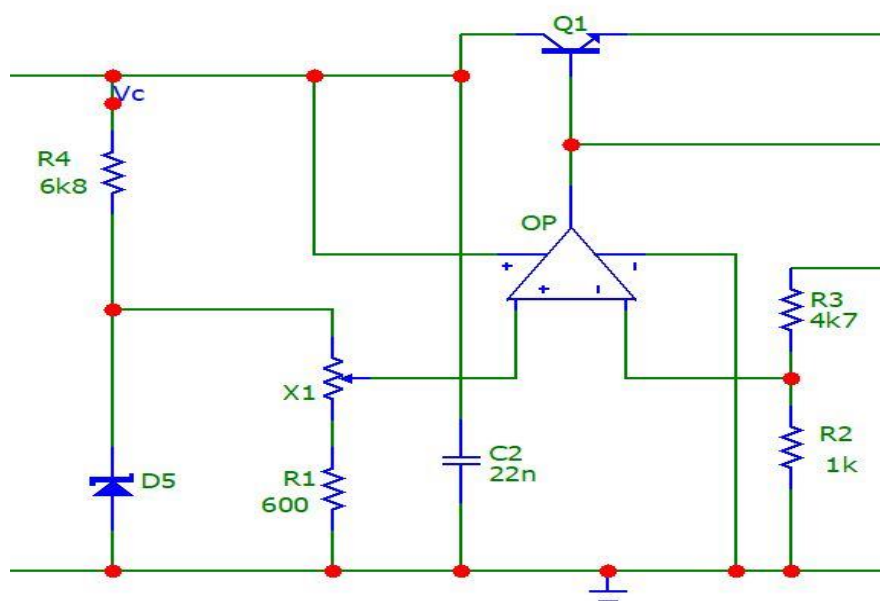
Za slučaj  $I_{max} = 1A$ ,  $R_{ekv} = 0.7V / 1A = 0.7\Omega$ , pa se za drugi krajnji položaj klizača ( $X2 = 0\Omega$ ) dobije da je  $R6 = 0.7\Omega$ .

Za slučaj  $I_{max} = 0.05A$ ,  $R_{ekv} = 0.7V / 0.05A = 14\Omega$  što znači  $14\Omega = X2 || R5 + R6$ . Za prvi krajnji položaj klizača ( $X2 = 100\Omega$ ) i  $R6 = 0.7\Omega$  dobije da je  $R5 = 16.27\Omega$ .

Kako bi se postigle odgovarajuće vrednosti izlazne struje, kao potrošač se koristi otpornik veoma male vrednosti (kratak spoj). Kada je klizač u krajnjem levom položaju, maksimalna izlazna struja je 0.05 A, tako da smo na ovaj način dobili podešljivu maksimalnu izlaznu struju u opsegu od 0.05A do 1 A. S obzirom da ne postoji potencijometar od 70  $\Omega$ , on se može realizovati korišćenjem potencijometra od 100  $\Omega$  sa kojim se paralelno veže otpornik od 240  $\Omega$ . To nije nacrtano na šemi radi jednostavnosti.

## 5. Princip stabilizacije kola

Na slici 4. je prikazan deo kola neophodan za stabilizaciju. Ovde je korišćen operacioni pojačavač LM358 realizovan u vidu negativne povratne sprege. Pomoću potencijometra X1 vrednosti 10 K se može podešavati vrednost referentnog napona, koji je povezan na invertujući ulaz ovog pojačavača.



Slika 4. Deo kola za stabilizaciju

Kao što je već ranije rečeno, cener dioda Z1 od 4.7 V je izabrana jer diode od 4 do 7 V daju relativno dobru naponsku i temperaturnu stabilizaciju. Otpornik R3 je izabran da bi struja kroz diodu bila dovoljna da dioda daje konstantan napon i da nema opasnosti od odlaska mirne radne tačke u koleno karakteristike. Korišćena Zener dioda je testirana u uslovima kada kroz nju teče struja od 5 mA, te je vrednost otpornika R4 upravo podešena u skladu sa tim. Otpornost se računa iz sledećeg izraza:

$$R_4 = \frac{V_{grec} - V_z}{5mA} = \frac{38.5V - 4.7V}{5mA} = 6.76K\Omega$$

Napon na oba ulaza operacionog pojačavača se računa putem naponskog razdelnika:

$$V^+ = \frac{R_1 + x * X_1}{R_1 + X_1} * V_z \quad (5)$$

$$V^- = \frac{R_2}{R_2 + R_3} * V_{out} \quad (6)$$

Kako važi relacija  $V^+ = V^-$ , vrednost  $V_{out}$  je opisana izrazom:

$$V_{out} = \left( \frac{R_2 + R_3}{R_2} \right) * \left( \frac{R_1}{R_1 + X_1} \right) * V_z \quad (7)$$

Levim i desnim krajnjim položajem potencijometra  $X_1$ , određene su vrednosti otpornosti  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$ .

$$\text{Za } X_1 = 0, \text{ važi da je } V_{out} = 1.5V = \left( \frac{R_2 + R_3}{R_2} \right) * \left( \frac{R_1}{R_1 + X_1} \right) * V_z \quad (8)$$

$$\text{Za } X_1 = 1, \text{ važi da je } V_{out} = 25V = \left( \frac{R_2 + R_3}{R_2} \right) * \left( \frac{R_1}{R_1 + X_1} \right) * V_z \quad (9)$$

Iz relacije 9 se dobije da je:

$$25V = \frac{R_2 + R_3}{R_2} * 4.7V$$

$$1 + \frac{R_3}{R_2} = 5.32$$

$$\frac{R_3}{R_2} = 4.32$$

Kako bi se zadovoljio ovaj odnos, za otpornik  $R_3$  uzeta je vrednost od 4.3 k $\Omega$ , a za  $R_2$  vrednost od 1 k $\Omega$ .



Vraćanjem vrednosti u relaciju (8), dobija se:

$$1.5V = \frac{5.3 * 4.7 * R_1}{R_1 + 10K}$$

$$1.5 * (R_1 + 10K) = 24.91 * R_1$$

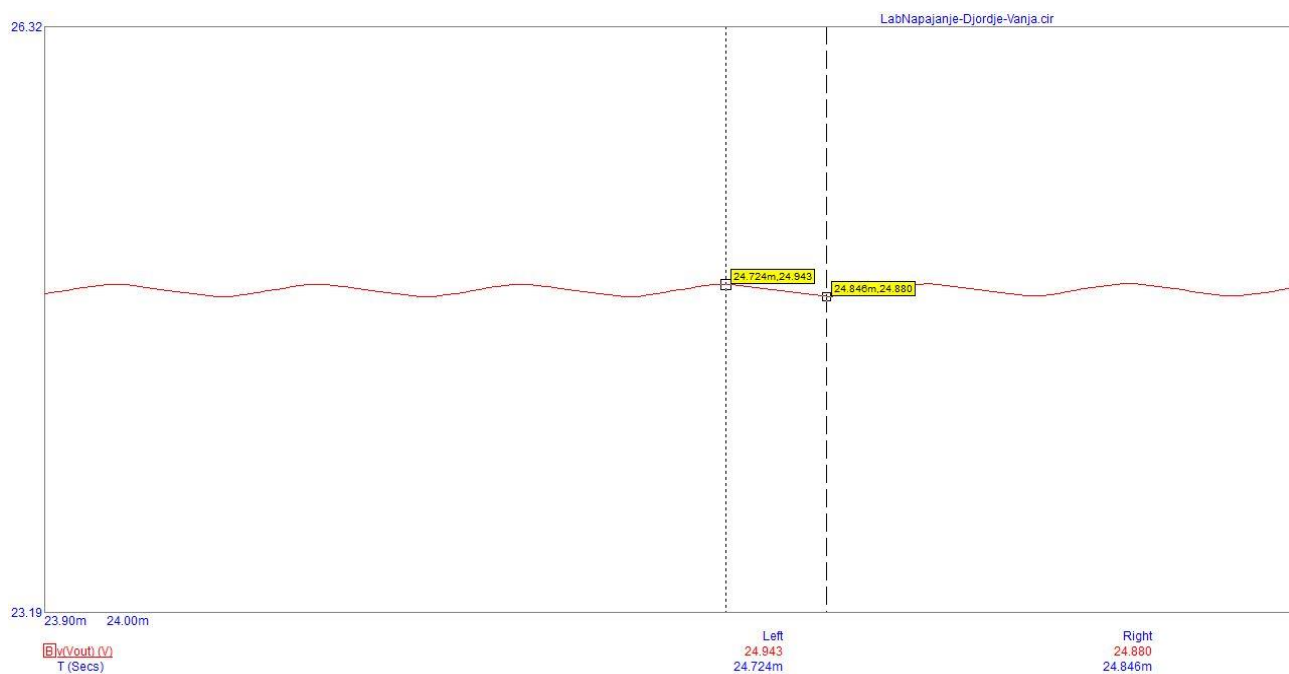
$$R_1 + 10K = 16.6 * R_1$$

$$10K = 15.6 * R_1$$

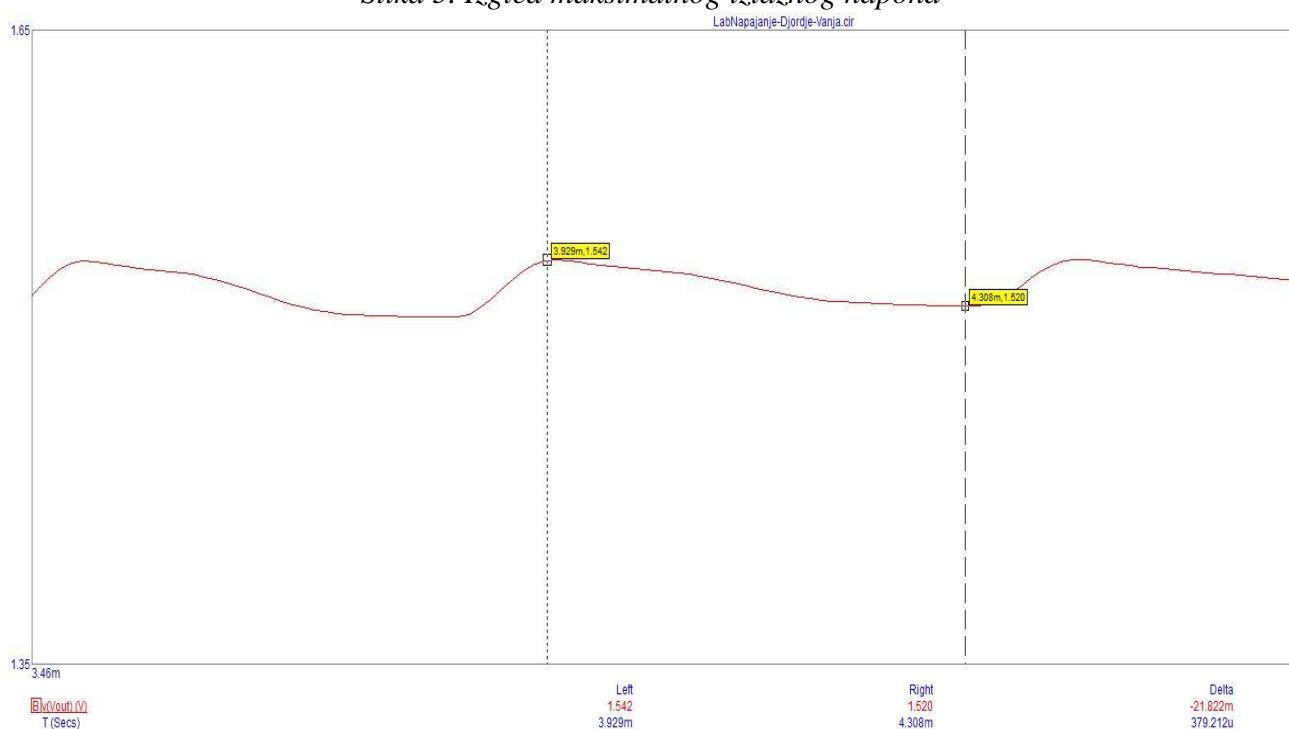
*sledi da je  $R_1 \sim 650 \Omega$*

## 6. Rezultati simulacija

Prvo je izvršena simulacija tako da se vidi vrednost izlaznog napona sa potrošačem koji vuče oko 1A struje za minimalni i maksimalni izlazni napon.

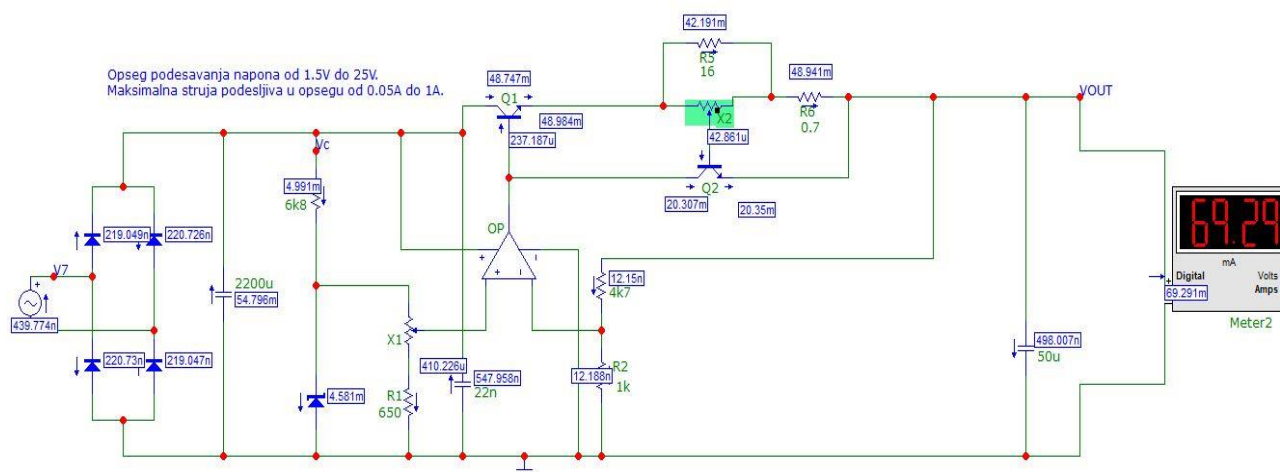


Slika 5. Izgled maksimalnog izlaznog napona

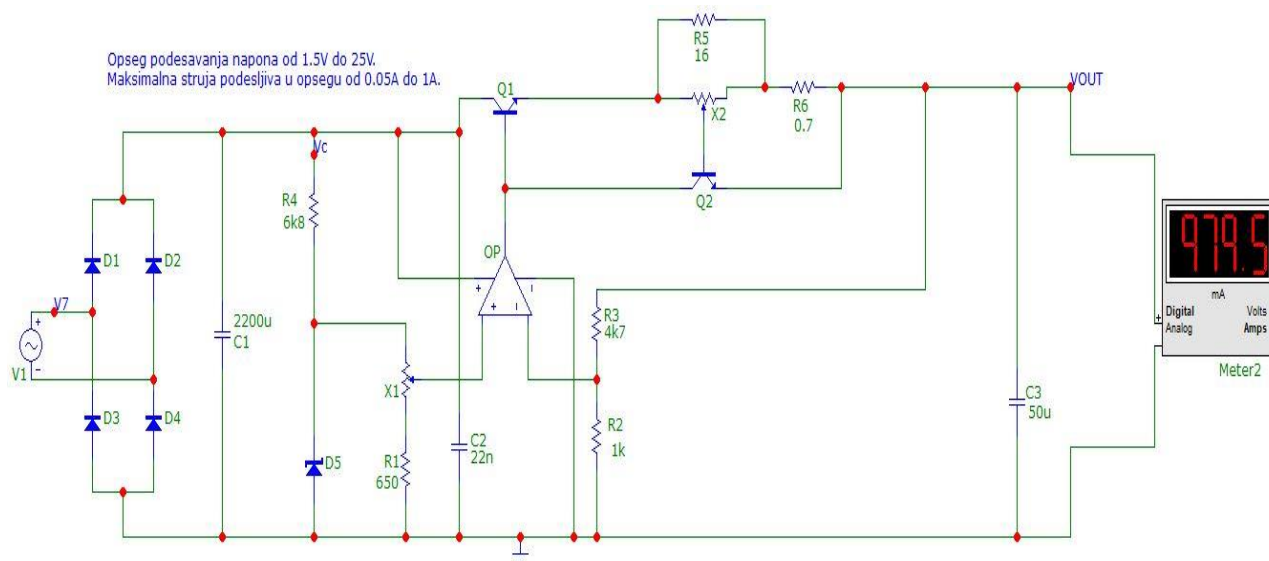


Slika 6. Izgled minimalnog izlaznog napona

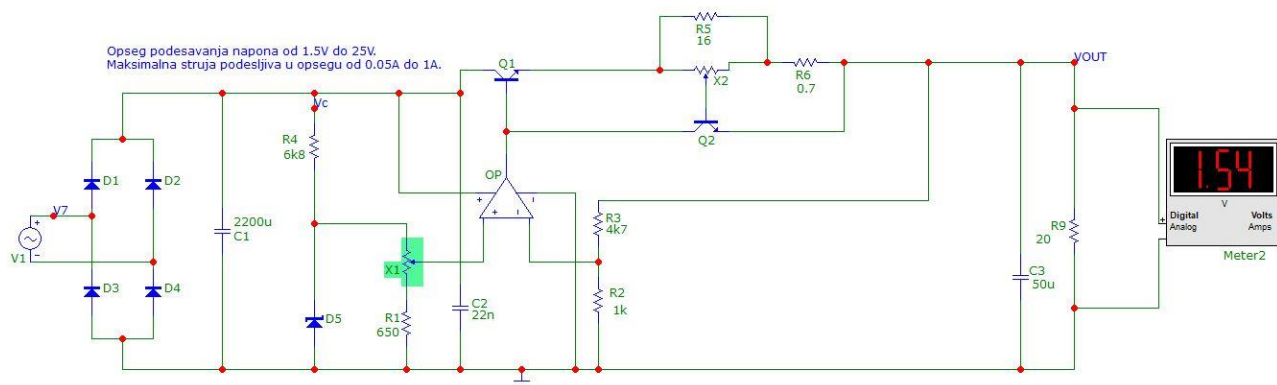
Nakon toga, potrebno je izvršiti simulaciju tako da se vidi da li strujna zaštita ispravno radi. To je urađeno za podešen izlazni napon od 25V, tako što je merena struja kratkog spoja za minimalnu (0.05A) i maksimalnu (1A) podešenu vrijednost.



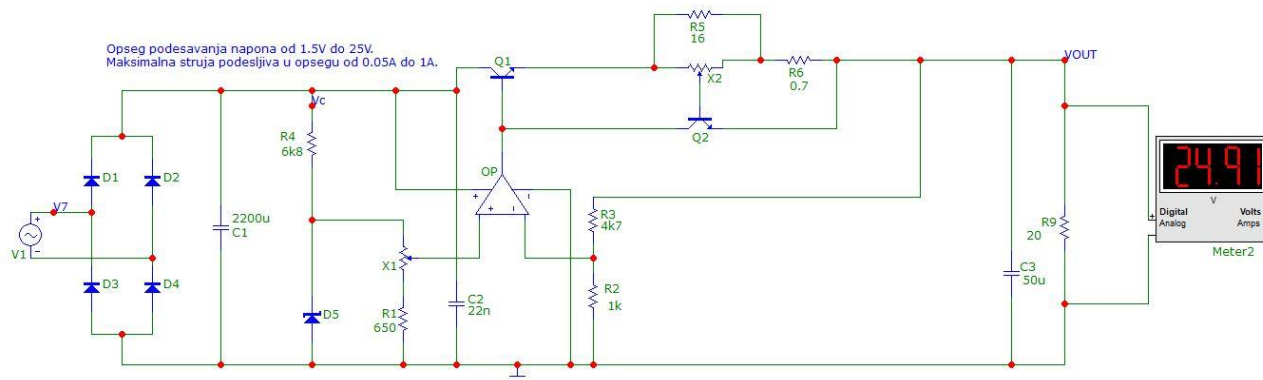
Slika 7. Struja kratkog spoja podešena na minimalnu vrednost



Slika 8. Struja kratkog spoja podešena na maksimalnu vrednost



Slika 9. Izlazni napon podešen na minimalnu vrednost

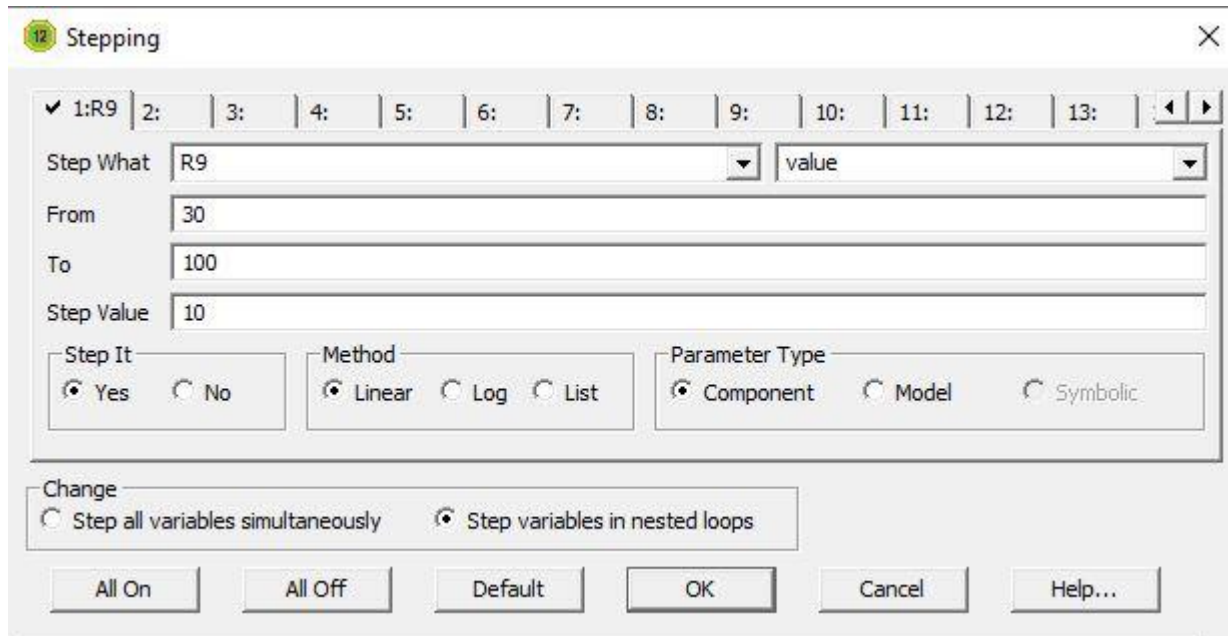


Slika 10. Izlazni napon podešen na maksimalnu vrednost

## 7. Nezavisnost izlaznog napona od potrošača

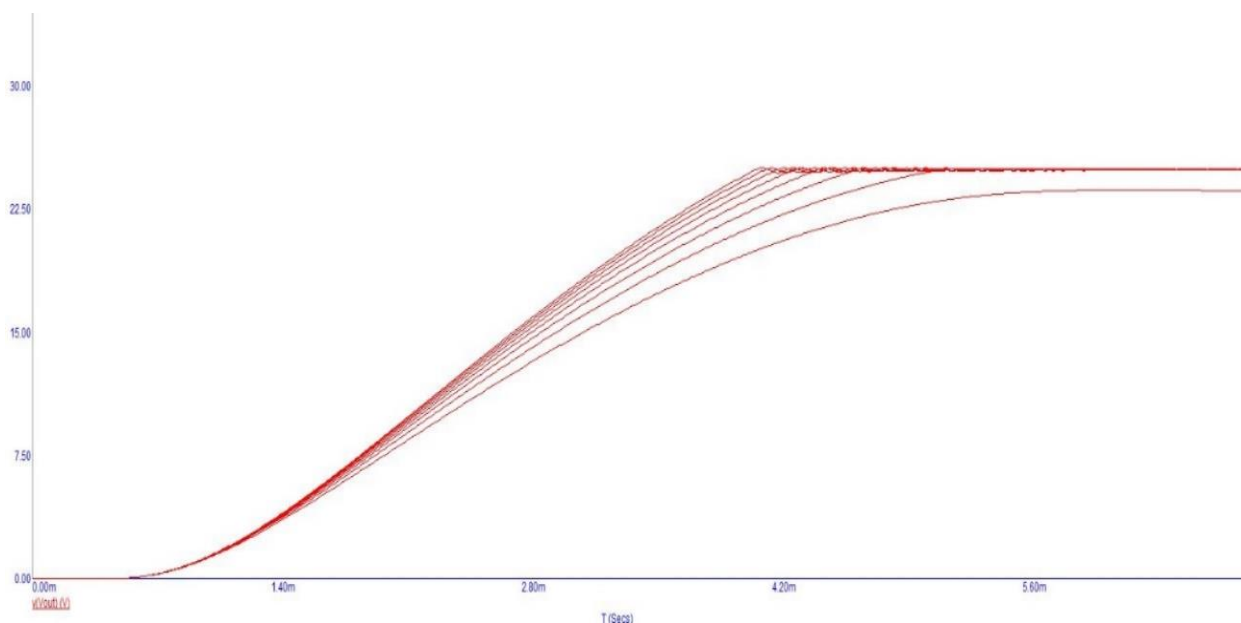
Ovo kolo je testirano za vrednost potrošača od  $30\ \Omega$ . Tranzientnom analizom je neophodno utvrditi da se vrednost izlaznog napona ne menja sa promenim vrednosti potrošača.

Sa slike 11. se vidi da je uključena stepping opcija po potrošaču R9, sa promenom vrednosti od  $30\ \Omega$  do  $100\ \Omega$  i korakom od  $10\ \Omega$ .



Slika 11. Stepping podešavanja

Na slici 12. se vidi rezultat ove analize pri maksimalnoj podešenoj struji od 1A. Kao što je i bilo očekivano, vrednost izlaza je konstantna za bilo koju korišćenu vrednost otpornosti potrošača. Ovo je još jedna bitna odlika ovog kola.



Slika 12. Zavisnost izlaza od vrednosti potrošača

## 8. Efikasnost napajanja

Efikasnost napajanja predstavlja meru kvaliteta kola. Računa se kao odnos izlazne snage  $P_{out}$  i ulazne snage  $P_{in}$ , kao u formuli:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (10)$$

$P_{out}$  se računa kao proizvod izlazne struje i napona. Ovde je korišćen izraz za snagu preko otpornosti i napona, gde se za vrednost potrošača uzima  $1\text{ K}\Omega$ , a za izlazni napon  $25\text{V}$ .  $P_{in}$  se računa kao proizvod napona  $V_{grec}$  i ulazne struje u stabilizator.

Kako se ulazna i izlazna struja stabilizatora poistovećuju, izraz za efikasnost napajanja menja oblik i svodi se na:

$$\eta = \frac{V_{out}}{V_{grec}} \quad (11)$$

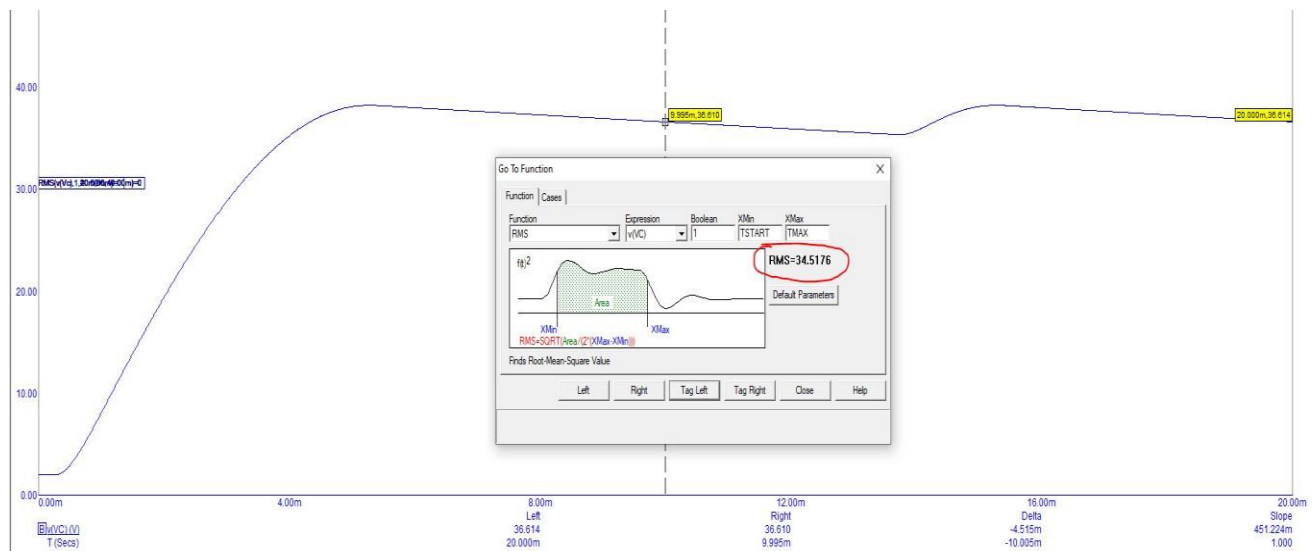
Kao što se vidi na slici 13. koristeći opciju RMS (eng. Root Mean Square) tj. kvadratne sredine, a vremena koja su uzeta su sledeća:

XMin=TSTART=10ms

Xmax=TMAX=20ms

Uzimamo vrednost napona na Grecovom spoju od  $34.5176\text{ V}$ , pa se izraz 11 svodi na oblik:

$$\eta = \frac{25\text{V}}{34.5176\text{V}} \sim 72\%$$



Slika 13. Vrednost napona  $V_{grec}$

## 9. Zaključak

S obzirom da se ovaj projekat neće praktično realizovati, naš izbor je bio da koristimo operacioni pojačavač i diskretne komponente za njegovu realizaciju. Bolji uređaj dobio bi se korišćenjem nekog linearnog stabilizatora, međutim tokom semestra iz predmeta “Projektovanje elektronskih kola pomoću računara” analizirana su slična napajanja kao što je i ovo u projektu pa je to dodatni razlog zašto je realizovan baš na ovaj način.

Zahvaljujući odgovarajućim matematičkim proračunima određene su željene vrednosti, kao i komponente koje na najbolji način doprinose radu ovog kola. Njihovim pravilnim vezivanjem uspešno je ostvarena funkcionalnost linearnog stabilizatora, uz dobijanje zadatog strujnog i naponskog opsega na izlazu. Izvršene simulacije i parametrizovane analize predstavljaju dokaz ispravnog ponašanja kola.

## **10. Literatura**

[ 1 ] Laslo Nađ, Skripta za predmet Projektovanje elektronskih kola pomoću računara, FTN, Novi Sad, 2015.