

# Uzlazni pretvarač za ulazne napone do 1 V

---

**Balentović, Matej**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:328293>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-31**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**UZLAZNI PRETVARAČ ZA ULAZNE NAPONE DO 1 V**

**Završni rad**

**Matej Balentović**

**Osijek, 2019.**

## Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| 1. Uvod.....   | 2  |
| 1.1. Zadatak završnog rada.....  | 2  |
| 2. Osnovna topologija uzlaznog pretvarača .....  | 3  |
| 3. Načelo rada uzlaznog pretvarača.....  | 4  |
| 3.1. Režimi rada .....   | 4  |
| 3.1.1 Kontinuirani režim rada .....  | 4  |
| 3.1.2. Diskontinuirani režim rada.....   | 6  |
| 3.2. Načini upravljanja .....  | 7  |
| 4. Proračun parametara.....  | 8  |
| 5. Izbor komponenti i izrada modela u programu Multisim .....                                | 11 |
| 6. Analiza promjene parametara na izlazni napon .....  | 13 |
| 6.1. Ovisnost izlaznog napona o promjeni induktiviteta zavojnice <b>LE</b> .....             | 14 |
| 6.2. . Ovisnost izlaznog napona o promjeni frekvencije .....                                 | 16 |
| 6.3. Ovisnost izlaznog napona o promjeni vrijednosti kapaciteta kondenzatora <b>Cd</b> ..... | 19 |
| 7. Zaključak.....  | 21 |
| LITERATURA.....  | 22 |
| SAŽETAK.....   | 23 |
| ABSTRACT .....   | 23 |
| ŽIVOTOPIS .....  | 24 |
| PRILOZI.....   | 25 |
| Prilog 1. Stranica podatkovne tablice (eng. <i>data-sheet</i> ) za MOSFET BSH105 .....       | 25 |
| Prilog 2. Prva stranica podatkovne tablice (eng. <i>data-sheet</i> ) za diodu 1N5391 .....   | 25 |

## 1. Uvod

Istosmjerni pretvarači su električki uređaji koji povezuju dvije istosmjerne mreže, čiji napon na izlazu može biti viši ili niži, ovisno o tipu pretvarača, a koriste se za napajanje elektroničke opreme i sklopova, u postrojenjima koja iz akumulatorskih baterija napajaju trošila različitih naponskih razina te u električnoj vuči za pogon ili regulaciju brzine vlakova koji predstavljaju trošilo velike snage. Sve istosmjerne pretvarače karakterizira jako niska potrošnja, što govori da imaju jako visok stupanj korisnosti. Uzlazni pretvarač (eng. *Boost converter*) pripada skupini istosmjernih pretvarača u koje se još ubrajaju silazni pretvarači (eng. *Buck converter*) te uzlazno-silazni pretvarači (eng. *Buck-boost converter*), a predstavlja spoj između strujnog izvora i naponskog uvora. Takav električki sklop je značajan po tome što je izlazni napon viši od ulaznoga. U nastavku biti će objašnjena osnovna topologija te načelo rada i režimi rada uzlaznog pretvarača. Također biti će izveden model pretvarača koji će napone na ulazu od 1V ili manje dizati na 5V na izlazu, gdje će biti opisan izbor poluvodičkih komponenti, izbor zavojnice i kondenzatora te prikazane ovisnosti parametara frekvencije, induktiviteta i kapaciteta za što optimalniji rad pretvarača.

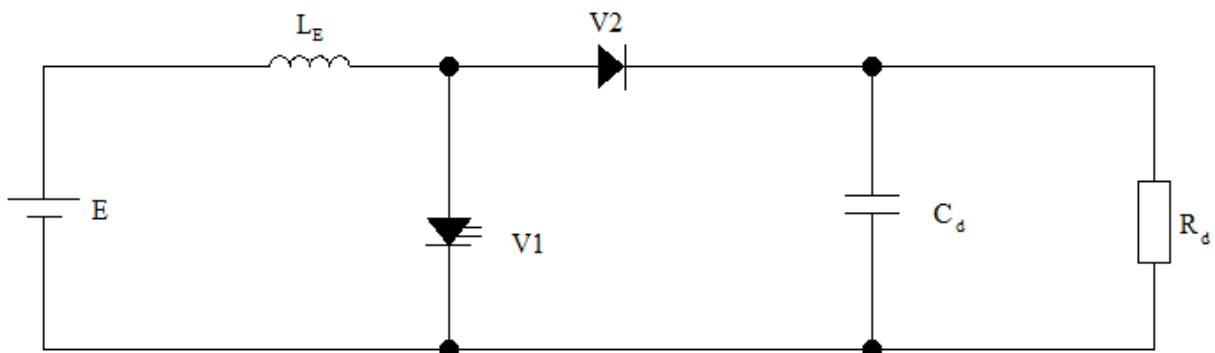
### 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada je simulirati i optimirati parametre istosmjernog uzlaznog pretvarača napona za primjenu u sustavima bežičnog napajanja, odnosno sustavima žetve energije, tj. za rad s ulaznim naponima do 1 V.

## 2. Osnovna topologija uzlaznog pretvarača

Osnovni model uzlaznog pretvarača se sastoji od:

- Ventil  $V_1$  – realizacija tranzistorom,
- ventil  $V_2$  – realizacija neupravljivom diodom,
- istosmjerni naponski izvor  $E$ ,
- zavojnica induktiviteta  $L_E$ ,
- kondenzator kapaciteta  $C_d$ ,
- trošila otpora  $R_d$ .



Slika 2.1. Shematski prikaz uzlaznog pretvarača

Na slici 2.1. možemo primjetiti kako je ventil  $V_1$  predstavljen tranzistorom jer nam je potrebna sklopka koja će uklapati i isklapati krug dovoljno brzo kako se energija pohranjena u zavojnici i u kondenzatoru ne bi potpuno ispraznila, što je bitno za generiranje napona na izlazu te nam je potrebna upravljiva sklopka zbog odabira potrebne naponske razine koje sami ugađamo promjenom sklopne frekvencije tranzistora. Takav način upravljanja bit će realiziran oscilatorom čija svrha je osigurati impulse na gate-u tranzistora.

### 3. Načelo rada uzlaznog pretvarača

Temeljni pojam na kojem se zasniva rad uzlaznog pretvarača je skladištenje energije. U krugu se nalazi zavojnica koja skladišti energiju kada kroz nju poteče struja kada je ventil  $V_1$  zatvoren. Dolazi do stvaranja magnetskog polja na zavojnici koje se, kada se ventil  $V_1$  otvori, a ventil  $V_2$  zatvori, narušava i šalje energiju prema trošilu  $R_d$ , dok se za to vrijeme kondenzator  $C_d$  prazni preko trošila  $R$  i ne vraća prema izvoru zbog realizacije ventila  $V_2$  diodom koja ne propušta struju u obrnutom smjeru. U tom slučaju imamo dva izvora spojena u seriju koja pune kondenzator kada ventil  $V_1$  prestane voditi, a ventil  $V_2$  provede. Zbog toga je kod uzlaznog pretvarača izlazni napon viši od ulaznog.

#### 3.1. Režimi rada

Kod analize rada uzlaznog pretvarača postoje dva režima rada:

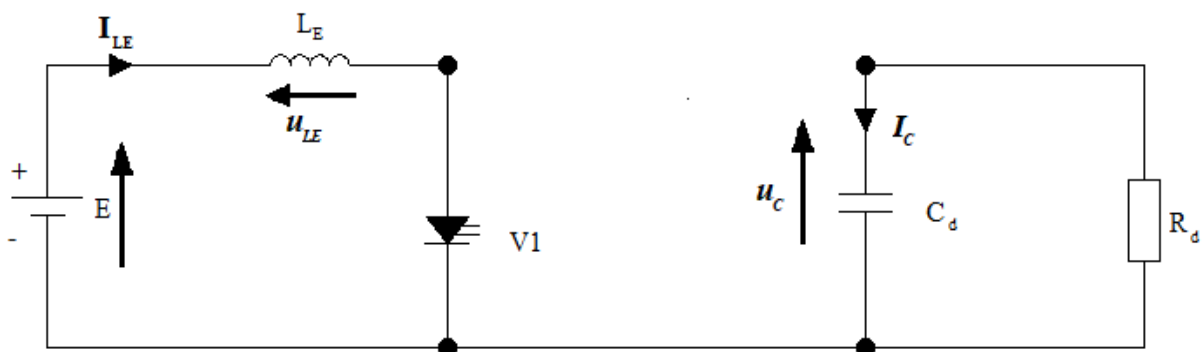
- kontinuirani režim rada i
- diskontinuirani režim rada

Kod kontinuiranog režima rada struja na zavojnici unutar sklopne periode  $T_s$  nikada neće pasti na nulu, dok kod diskontinuiranog režima struja u jednom dijelu intervala padne na nulu.

##### 3.1.1 Kontinuirani režim rada

Kod kontinuiranog režima rada razmotrit ćemo slučajeve kada vodi samo ventil  $V_1$  i kada vodi samo ventil  $V_2$ .

- 1) Interval  $\langle 0, \alpha T_s \rangle$  u kojem vodi ventil  $V_1$



Slika 3.1. Shema spoja za kontinuirani režim rada u intervalu  $\langle 0, \alpha T_s \rangle$

Kada ventil  $V_1$  vodi, napon na zavojnici induktiviteta  $L_E$  jednak je konstantnom naponu izvora  $E$ , što znači da će struja na zavojnici rasti linearno po pravcu.

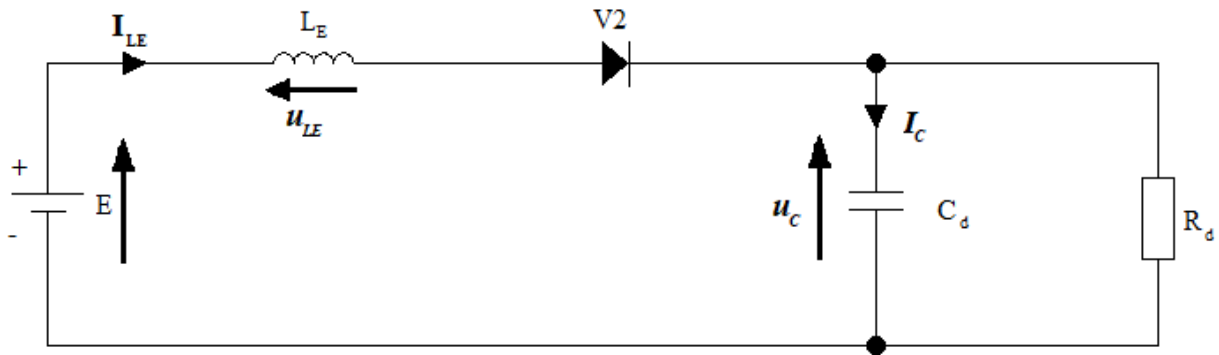
$$E = u_{LE} = L_E \frac{di_{LE}}{dt} \quad (1)$$

$$i_{LE} = \frac{1}{L_E} \int_0^{\alpha T_s} u_{LE} dt + i_{LE}(0) \quad (2)$$

Kondenzator će se za to vrijeme prazniti preko otpornika  $R_d$  pa je napon na njemu:

$$u_c = \frac{1}{C_d} \int_0^{\alpha T_s} i_c dt + u_c(0) \quad (3)$$

2) Interval  $(\alpha T_s, T_s)$  u kojem vodi ventil  $V_2$



Slika 3.1. Shema spoja za kontinuirani režim rada u intervalu

Prema shemi možemo vidjeti kako je napon na zavojnici  $U_{LE} = E - U_C$  koristeći Kirchoffov zakon za napone. Uvrstimo li napon na zavojnici  $U_{LE} = L \frac{di_{LE}}{dt}$ , tada dobivamo:

$$i_{LE} = \frac{E - U_C}{L} \int_0^t dt \quad (4)$$

Srednja vrijednost napona na zavojnici tijekom jednog perioda  $T_s$  jednak je nuli:

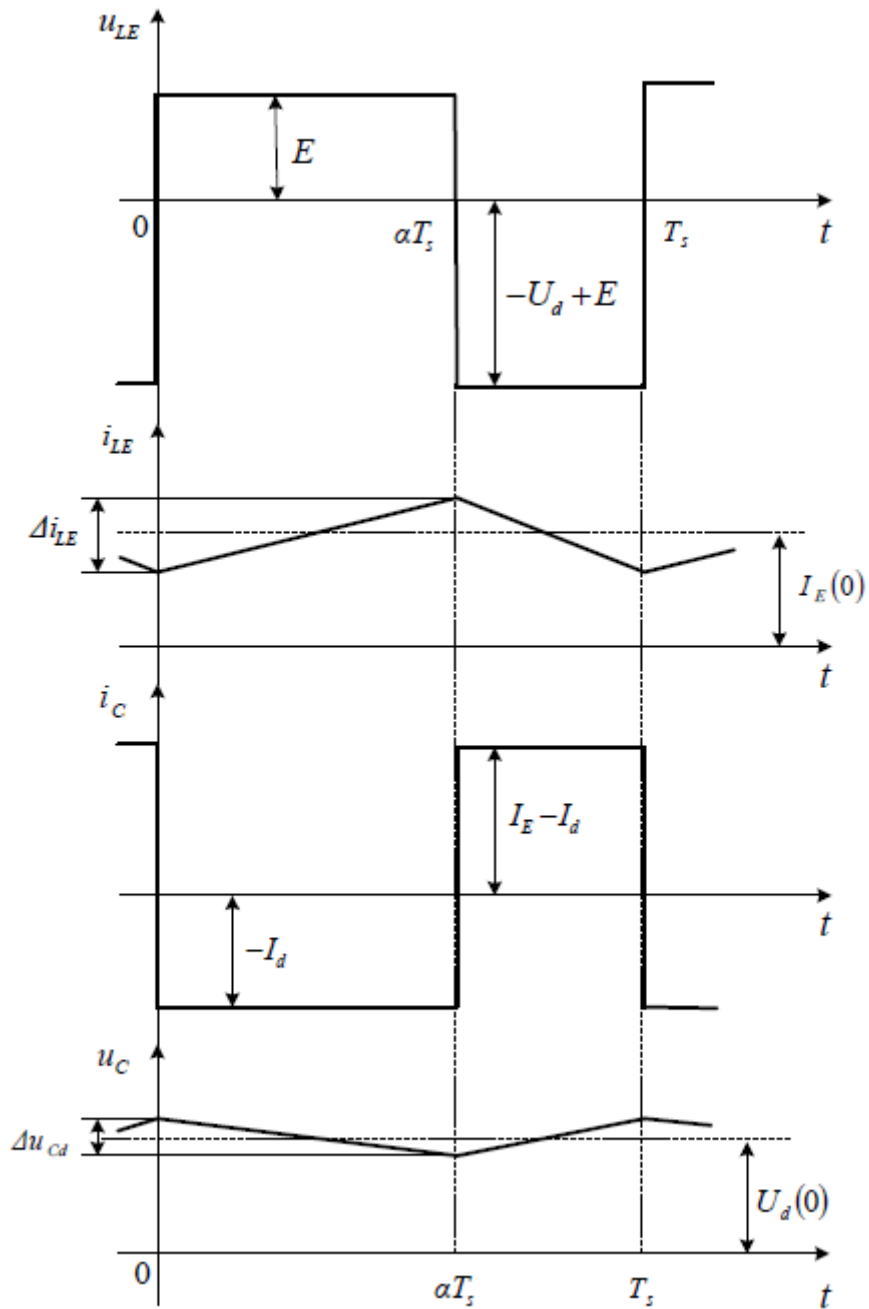
$$\frac{1}{T} \int_0^{T_s} U_{LE} dt = 0 \quad (5)$$

Proširenjem izraza dobivamo:

$$\frac{1}{T} \int_0^{\alpha T_s} E dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T_s}^{T_s} (U_c - E) dt = 0 \quad (6)$$

U konačnici, rješenje jednadžbe je omjer izlaznog i ulaznog napona, a on predstavlja istosmjerni faktor pretvorbe i upravljačku karakteristiku:

$$U_c = E \frac{1}{1 - \alpha} \quad (7)$$



Slika 3.2. Valni oblici kontinuiranog režima rada [3]

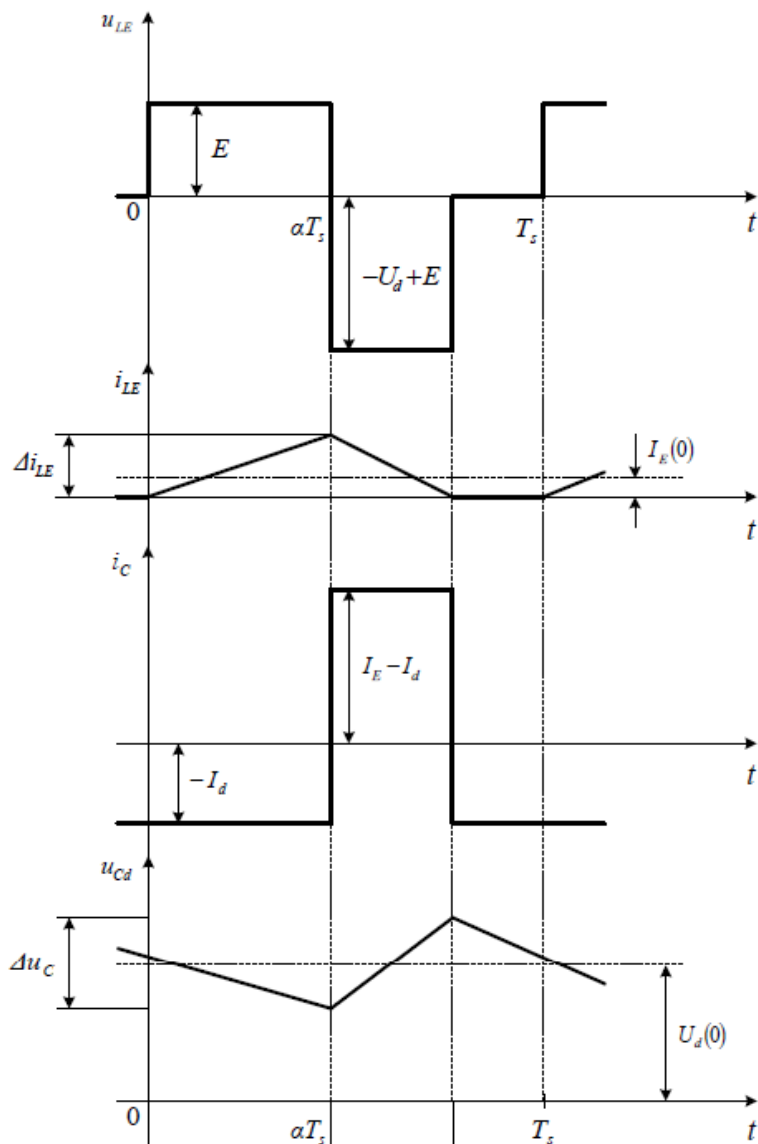
### 3.1.2. Diskontinuirani režim rada

U diskontinuiranom režimu rada postoje tri intervala:

- 1) Interval u kojem vodi samo ventil  $V_1$ ,
- 2) Interval u kojem vodi samo ventil  $V_2$ ,
- 3) Interval u kojem ne vodi niti jedan ventil.



Prva dva intervala, kada vodi svaki ventil posebno, su u analizi rada ista kao i za kontinuirani režim rada, dok u trećem intervalu ne vodi niti jedan ventil, što znači da su struja i napon na zavojnici jednaki nuli.



Slika 3.4. Valni oblici diskontinuiranog režima rada [3]

### 3.2. Načini upravljanja

Uzlazni pretvarač moguće je upravljati na 3 načina:

- 1) Pulsno-širinsko upravljanje: sklopna perioda  $T_s$  ostaje nepromjenjena, dok se vrijeme trajanja vođenja upravljivog ventila  $V_1$  mijenja. Ovakav tip upravljanja je najuobičajeni za takve sklopove. Njegova prednost je jednostavna promjena vremena trajanja vođenja MOSFET-a na način da na gate dovodimo napon pravokutnog oblika i mijenjamo vrijeme

pozitivnog napona - duty-cycle. Prednost je mogućnost prilagođavanja izlaznog napona pomoću upravljačke karakteristike (7)

- 2) Frekvencijsko upravljanje: vrijeme trajanja vođenja ventila  $V_1$  ostaje nepromjenjeno, a mijenja se vrijeme trajanja sklopne periode  $T_s$ . Na ovaj način mijenjamo sklopnu frekvenciju rada uzlaznog pretvarača što je mana jer povećanjem frekvencije povećava se gubitak na MOSFET-u.
- 3) Širinsko-frekvencijsko upravljanje: mijenjaju se vremena trajanja vođenja ventila  $V_1$  i vrijeme trajanja sklopne periode  $T_s$ . Ovj način je spoj prva dva načina upravljanja gdje mijenjamo i sklopnu frekvenciju i vrijeme vođenja MOSFET-a. Jedina mana je skuplja izrada upravljačkog sklopa koji bi mijenjao ta dva parametra.

#### 4. Proračun parametara

Kako bi odredili vrijednosti induktiviteta zavojnice  $L_E$  i vrijednost kapaciteta  $C_d$  potrebno je znati sljedeće vrijednosti parametra:

- najniži ulazni napon  $U_{ul. min}$
- najviši ulazni napon  $U_{ul. max}$
- izlazni napon  $U_{izl.}$
- maksimalna struja na izlazu  $I_{izl. max}$ ,
- sklopna frekvencija  $f_s$
- korisnost  $\eta$
- izlazna snaga  $P_{izl.}$

Najviši ulazni napon je određen i iznosi  $U_{ul. max} = 1V$ , dok je vrijednost najnižeg napona jednaka naponu praga MOSFET-a  $U_{ul. min} = 0,4V$ , a izbor i ostali podaci MOSFET-a biti će obrađeni u nastavku. Napon na izlazu bi trebao biti između 3V i 5V, no kod proračuna uzimamo  $U_{izl.} = 5V$  jer je poželjan napon što bliži 5V. Maksimalnu izlaznu struju dobijemo omjerom izlazne snage  $P_{izl.}$ , koju odredimo proizvoljno ovisno o primjeni samog sklopa i izlaznog napona  $U_{izl.}$

$$I_{izl.max} = \frac{P_{izl.}}{U_{izl.}} \quad (8)$$

$$I_{izl.max} = \frac{1}{5} = 0.2A$$

Za početak potrebno je odrediti kut upravljanja  $\alpha_{min}$  za najniži ulazni napon  $U_{ul. min}$ , a on se koristi jer će tada poteći najviša struja uklapanja. Kut upravljanja  $\alpha$  predstavlja omjer vremena vođenja ventila  $V_1$  i perioda sklapanja  $T_s$ . Za korisnost sklopa pretpostavljamo 90% zbog velikog napretka u tehnologiji izrade poluvodičkih komponenti čija potrošnja doseže sve niže vrijednosti i relativno malo komponenti na kojim bi se disipacija vršila.

$$\alpha_{min} = 1 - \frac{U_{ul. min} \cdot \eta}{U_{izl}} \quad (9)$$

$$\alpha_{min} = 1 - \frac{0.4 \cdot 0.9}{5} = 0.928$$

U jednadžbi (9) možemo vidjeti da je korištena korisnost samoga sklopa i to baš zato što postoje gubici na pojedinim komponentama jer u stvarnosti u svakoj od komponenti postoji djelatni otpor koji uzrokuje mali pad napona te u konačnici utječe na iznos napona na izlazu. Sljedeći korak je izračunati valovitost struje zavojnice  $\Delta I_L$ . Kod izračuna te struje, ako vrijednost induktiviteta nije poznata, pretpostavlja se kako ona iznosi od 20% do 40% izlazne struje pa će se za izračun uzeti 30%.

$$\Delta I_L = 0.3 \cdot I_{izl. max} \cdot \frac{U_{izl.}}{U_{ul.}} \quad (10)$$

$$\Delta I_L = 0.3 \cdot 0.2 \cdot \frac{5}{1} = 0.3A$$

Kada smo izračunali valovitost struje na zavojnici, sada preostaje izračunati vrijednost induktiviteta zavojnice  $L_E$ . Vrijednost sklopne frekvencije  $f_s$  uzimamo proizvoljno, tako da ona iznosi 10kHz.

$$L_E = \frac{U_{ul.} \cdot (U_{izl.} - U_{ul.})}{\Delta I_L \cdot f_s \cdot U_{izl.}} \quad (11)$$

$$L_E = \frac{1 \cdot (5 - 1)}{0.3 \cdot 10000 \cdot 5} = 266.6667 \mu H$$

Za izračun vrijednosti kapaciteta kondenzatora  $C_d$  na izlazu potrebno je pretpostaviti iznos valovitosti napona  $\Delta U_{izl.}$  zbog ESR-a kapaciteta. U ovom modelu biti će korišten keramički kondenzator, a tipične vrijednosti ESR-a su između  $0.01\Omega$  i  $0.1\Omega$ . U ovom slučaju uzimamo najveću vrijednost ESR-a.

$$\Delta U_{izl.} = ESR \left( \frac{I_{izl. max}}{1 - \alpha} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \quad (12)$$

$$\Delta U_{izl.} = 0.1 \cdot \left( \frac{0.2}{1 - 0.928} - \frac{0.3}{2} \right) = 0.293V$$

Nakon izračuna valovitosti napona na kondenzatoru  $C_d$ , možemo odrediti njegov kapacitet uz već poznatu frekvenciju  $f_s$ , izlaznu struju  $I_{izl.max}$  i kut upravljanja  $\alpha$ .

$$C_d = \frac{I_{izl.max} \cdot \alpha}{f_s \cdot \Delta U_{izl.}} \quad (13)$$

$$C_d = \frac{0.2 \cdot 0.928}{10000 \cdot 0.293} = 63.346 \mu F$$

Vrijednosti izračunatih kapaciteta i induktiviteta su pretpostavljeni kao najmanji iznos koji se treba koristiti. U tablici 1. izračunate su vrijednosti za slučaj izlazne snage od 1W, 1mW i 1 $\mu$ W koristeći relacije (8)-(13).

| Izlazna snaga $P_{izl.}$                       | 1 W             | 1m W            | 1 $\mu$ W     |
|--|-----------------|-----------------|---------------|
| Najviši ulazni napon<br>$U_{ul. max}$          | 1 V             | 1 V             | 1 V           |
| Najniži ulazni napon<br>$U_{ul. min}$          | 0.4 V           | 0.4 V           | 0.4 V         |
| Izlazni napon                                  | 5 V             | 5 V             | 5 V           |
| Sklopna frekvencija                            | 10 kHz          | 10 kHz          | 10 kHz        |
| Korisnost                                      | 90%             | 90%             | 90%           |
| Maksimalna struja na izlazu<br>$I_{izl. max,}$ | 0.2A            | 200 $\mu$ A     | 0.2 $\mu$ A   |
| Minimalni kut upravljanja                      | 0.928           | 0.928           | 0.928         |
| Valovitost struje na zavojnici                 | 0.3 A           | 300 $\mu$ A     | 0.3 $\mu$ A   |
| Induktivitet zavojnice                         | 266.667 $\mu$ H | 266.667 mH      | 266.667 H     |
| Valovitost napona na kondenzatoru              | 0.293 V         | 262.778 $\mu$ V | 0.262 $\mu$ V |
| Kapacitet kondenzatora                         | 63.346 $\mu$ F  | 70.63 $\mu$ F   | 70.84 $\mu$ F |

Tablica 1. izračun parametara za različite izlazne snage

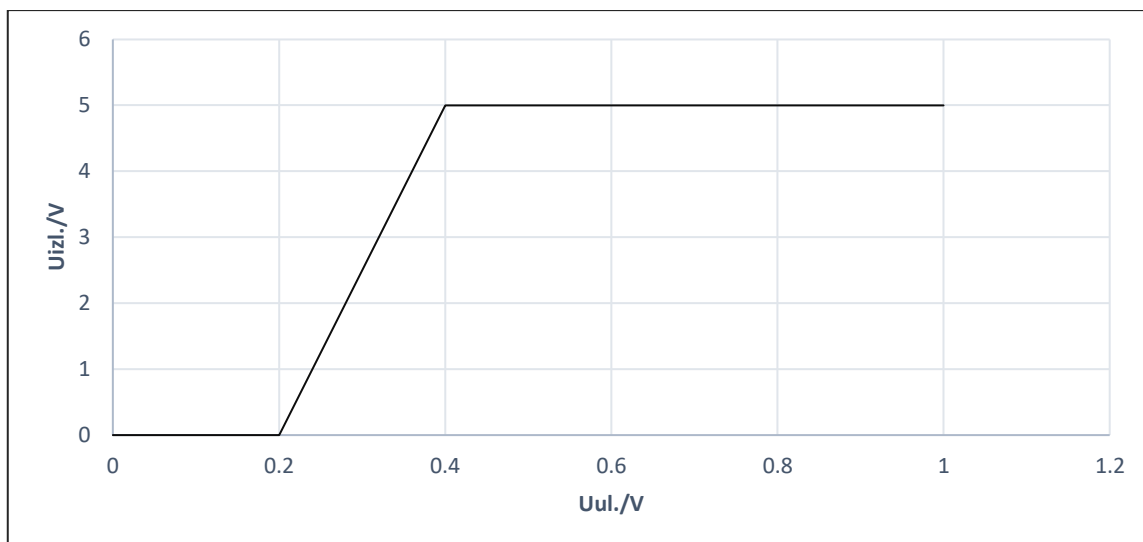
Promotrimo li tablicu 1. možemo primjetiti kako promjenom trošila na izlazu, trošila manje snage, zahtijeva puno veću vrijednost induktiviteta pri nepromjenjenim parametrima frekvencije i ulaznog napona zadanih na početku poglavlja 4. Vrijednosti induktiviteta dosežu visoku vrijednost zbog potrebe niske struje na izlazu zbog niže snage na izlazu, dok vrijednost napona ostaje na vrijednosti od 5V. Zanimljivo je kako vrijednost kapaciteta na izlazu  $C_d$  ostaje gotovo nepromjenjena.

## 5. Izbor komponenti i izrada modela u programu Multisim

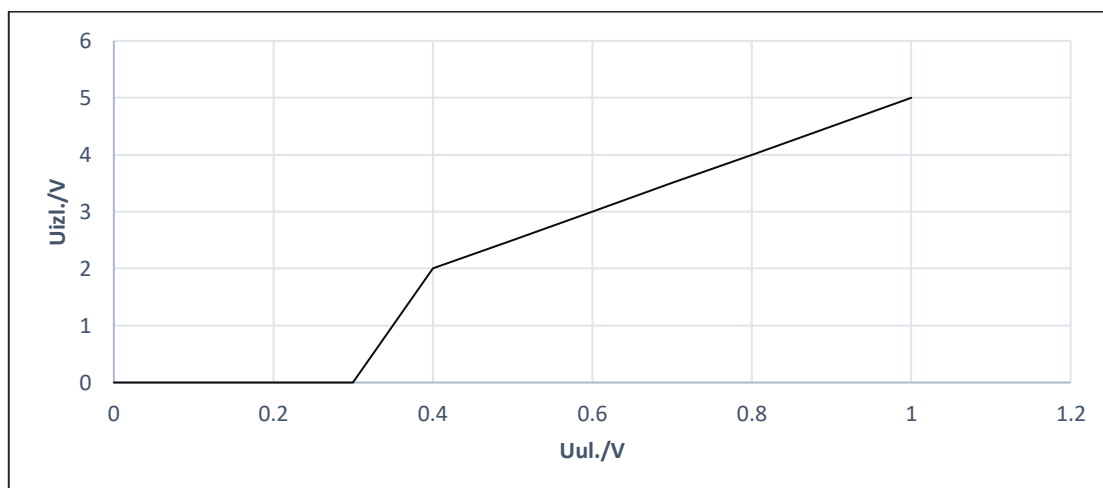
Kod izbora pojedinih komponenti potrebno je uzeti u obzir određene parametre, no zbog ograničenosti u izboru zbog samoga programa koji se koristi, uzimamo najprihvatljivije. Izvor E predstavljen je istosmjernim naponskim izvorom, čiji napon mijenjamo između 0.4V (ograničenje zbog napona praga MOSFET-a) i 1V. Vrijednost otpora na izlazu je 25 Ω. Vrijednost induktiviteta zavojnice  $L_E$  zaokružujemo na prvi najbliži iznos koji je viši od onoga izračunatoga, a to je 270μF. Ventil  $V_1$  realiziran je MOSFET-om, a kod njegovog odabira je najbitniji podatak napon praga između gate-a i source-a. Taj napon praga mora biti što niži zbog niskog ulaznog napona. Izabrani MOSFET je N-kanalni MOSFET BSH105 i njegove karakteristike dane su u tablici 2.

| SYMBOL        | PARAMETER                        | CONDITIONS  | MIN.             | TYP.                     | MAX.                     | UNIT                 |
|---------------|----------------------------------|---|------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| $V_{(BR)DSS}$ | Drain-source breakdown voltage   | $V_{GS} = 0 \text{ V}; I_D = 10 \mu\text{A}$  | 20               | -                        | -                        | V                    |
| $V_{GS(TO)}$  | Gate threshold voltage           | $V_{DS} = V_{GS}; I_D = 1 \text{ mA}$<br>$T_j = 150^\circ\text{C}$  | 0.4<br>0.1       | 0.57<br>-                | -<br>-                   | V<br>V               |
| $R_{DS(ON)}$  | Drain-source on-state resistance | $V_{GS} = 4.5 \text{ V}; I_D = 0.6 \text{ A}$<br>$V_{GS} = 2.5 \text{ V}; I_D = 0.6 \text{ A}$<br>$V_{GS} = 1.8 \text{ V}; I_D = 0.3 \text{ A}$<br>$V_{GS} = 2.5 \text{ V}; I_D = 0.6 \text{ A}; T_j = 150^\circ\text{C}$ | -<br>-<br>-<br>- | 140<br>180<br>240<br>270 | 200<br>250<br>300<br>375 | mΩ<br>mΩ<br>mΩ<br>mΩ |
| $g_{fs}$      | Forward transconductance         | $V_{DS} = 16 \text{ V}; I_D = 0.6 \text{ A}$  | 0.5              | 1.6                      | -                        | S                    |
| $I_{GSS}$     | Gate source leakage current      | $V_{GS} = \pm 8 \text{ V}; V_{DS} = 0 \text{ V}$  | -                | 10                       | 100                      | nA                   |
| $I_{DSS}$     | Zero gate voltage drain current  | $V_{DS} = 16 \text{ V}; V_{GS} = 0 \text{ V};$<br>$T_j = 150^\circ\text{C}$   | -                | 50<br>1.3                | 100<br>10                | nA<br>μA             |
| $Q_{g(tot)}$  | Total gate charge                | $I_D = 1 \text{ A}; V_{DD} = 20 \text{ V}; V_{GS} = 4.5 \text{ V}$  | -                | 3.9                      | -                        | nC                   |
| $Q_{gs}$      | Gate-source charge               |   | -                | 0.4                      | -                        | nC                   |
| $Q_{gd}$      | Gate-drain (Miller) charge       |   | -                | 1.4                      | -                        | nC                   |
| $t_{d on}$    | Turn-on delay time               | $V_{DD} = 20 \text{ V}; I_D = 1 \text{ A};$   | -                | 2                        | -                        | ns                   |
| $t_r$         | Turn-on rise time                | $V_{GS} = 8 \text{ V}; R_G = 6 \Omega$  | -                | 4.5                      | -                        | ns                   |
| $t_{d off}$   | Turn-off delay time              | Resistive load  | -                | 45                       | -                        | ns                   |
| $t_f$         | Turn-off fall time               |   | -                | 20                       | -                        | ns                   |
| $C_{iss}$     | Input capacitance                | $V_{GS} = 0 \text{ V}; V_{DS} = 16 \text{ V}; f = 1 \text{ MHz}$  | -                | 152                      | -                        | pF                   |
| $C_{oss}$     | Output capacitance               |   | -                | 71                       | -                        | pF                   |
| $C_{rss}$     | Feedback capacitance             |   | -                | 33                       | -                        | pF                   |

Tablica 2. Električne karakteristike MOSFET-a BSH105



Slika 5. 1 Grafički prikaz izlaznog napona o ulaznom naponu s promjenom kuta upravljanja



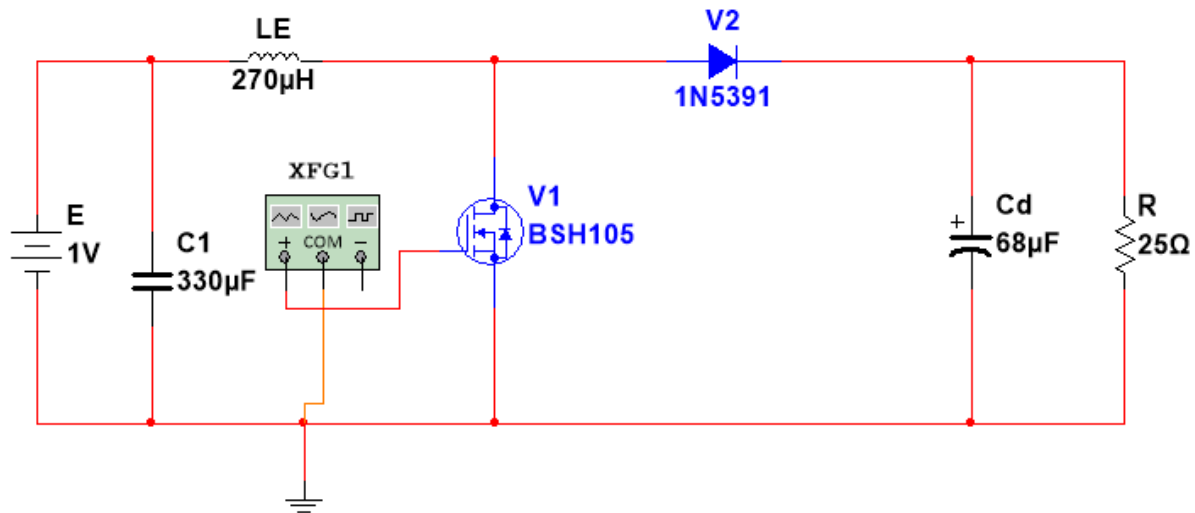
Slika 5. 2 Grafički prikaz izlaznog napona u ovisnosti o ulaznom naponu pri konstantnim kutom upravljanja  $\alpha=0.8$

U tablici 3. nalazi se popis svih komponenti bitnih za rad pretvarača.

| <i>Naziv komponente</i>          | <i>Oznaka</i>        | <i>Vrijednost komponente</i>      |
|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| <i>Otpornik</i>                  | <i>R</i>             | <i>25 <math>\Omega</math></i>     |
| <i>N-kanalni MOSFET</i>          | <i>V1</i>            | <i>20V / 1.05A</i>                |
| <i>Schottky dioda</i>            | <i>V2</i>            | <i>50V / 1.5A</i>                 |
| <i>Elektrolitski kondenzator</i> | <i>C<sub>d</sub></i> | <i>330<math>\mu</math>F / 16V</i> |
| <i>Zavojnica</i>                 | <i>L<sub>E</sub></i> | <i>270<math>\mu</math>H</i>       |

Tablica 3. Oznake komponenata i njihove vrijednosti

Ventil  $V_2$  realiziran je ispravljačkom diodom 1N5391, a jedini podatak na koji se treba paziti je maksimalna struja. Kod takve diode maksimalna struja koju ona može podnijeti je 1.5A, što je više nego dovoljno jer je najviši očekivani iznos struje na izlazu 0.2A. Kapacitet kondenzatora  $C_d$  određen je u proračunu, a za njegova vrijednost u modelu iznosi  $68\mu\text{F}$ .



Slika 5. 3 Shematski prikaz modela uzlaznog pretvarača

Na slici 5.3. možemo vidjeti da se na izvoru nalazi kondenzator  $C_1$ , a njegova svrha je da stabilizira napon izvora napajanja  $E$ . Ventil  $V_1$ , u ovom slučaju MOSFET BSH105, biti će upravljan pomoću generatora funkcija, koji će biti postavljen da na izlazu daje pravokutni napon frekvencije 10kHz i vrijednosti napona kao i izvor. Način upravljanja uzlaznog pretvarača biti će promjenom vremena vođenja MOSFET-a kako bi na izlazu, ovisno o ulaznom naponu, imali željeni iznos napona i to što bliži naponu od 5V. Upravljanje MOSFET-om nije moguće ostvariti korištenjem komponente NE555, poznatiju kao timer 555 zbog niskog napona izvora  $E$  koji nije dovoljan za napajanje samog oscilatora. Upravljanje MOSFET-a pomoću nestabilnog multivibratora također nije ostvarivo zbog velike disipacije.

## 6. Analiza promjene parametara na izlazni napon

U nastavku biti će se mijenjati vrijednosti induktiviteta zavojnice  $L_E$ , kapaciteta kondenzatora  $C_d$  te frekvencije rada uzlaznog pretvarača  $f_s$ . Pri tim promjenama biti će očitane vrijednosti napona i struje na izlazu, struje kroz zavojnicu  $L_E$  i napona na kondenzatoru  $C_d$ . Vrijednost izlaznog napona biti će prikazana na dijagramu u ovisnosti o promjenjenom parametru te će sve vrijednosti biti prikazane i tablično.

## 6.1. Ovisnost izlaznog napona o promjeni induktiviteta zavojnice $L_E$

U ovom potpoglavlju mijenjat će se induktivitet zavojnice  $L_E$  i promatrati promjena napona na izlazu. Sklopna frekvencija ostati će nepromjenjena iznosa 10kHz. Kut upravljanja  $\alpha$  ostaje nepromjenjen i iznosi 0.83. Postavke osciloskopa postavljene su tako da je vremenska baza 5 ms/podjeljku i amplitudna baza 5 V/podjeljku.

| <i>Vrijednost induktiviteta</i> | <i>Vrijednost izlaznog napona</i> | <i>Redni broj dijagrama</i> |
|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| <i>10<math>\mu</math>H</i>      | <i>11 V</i>                       | <i>1</i>                    |
| <i>50 <math>\mu</math>H</i>     | <i>7.5 V</i>                      | <i>2</i>                    |
| <i>100 <math>\mu</math>H</i>    | <i>5.437 V</i>                    | <i>3</i>                    |
| <i>150 <math>\mu</math>H</i>    | <i>4.87 V</i>                     | <i>4</i>                    |
| <i>200 <math>\mu</math>H</i>    | <i>4.85 V</i>                     | <i>5</i>                    |
| <i>270 <math>\mu</math>H</i>    | <i>4.8 V</i>                      | <i>6</i>                    |
| <i>500 <math>\mu</math>H</i>    | <i>4.8 V</i>                      | <i>7</i>                    |
| <i>1 mH</i>                     | <i>4.8 V</i>                      | <i>8</i>                    |
| <i>5 mH</i>                     | <i>4.8 V</i>                      | <i>9</i>                    |
| <i>10 mH</i>                    | <i>4.8 V</i>                      | <i>10</i>                   |

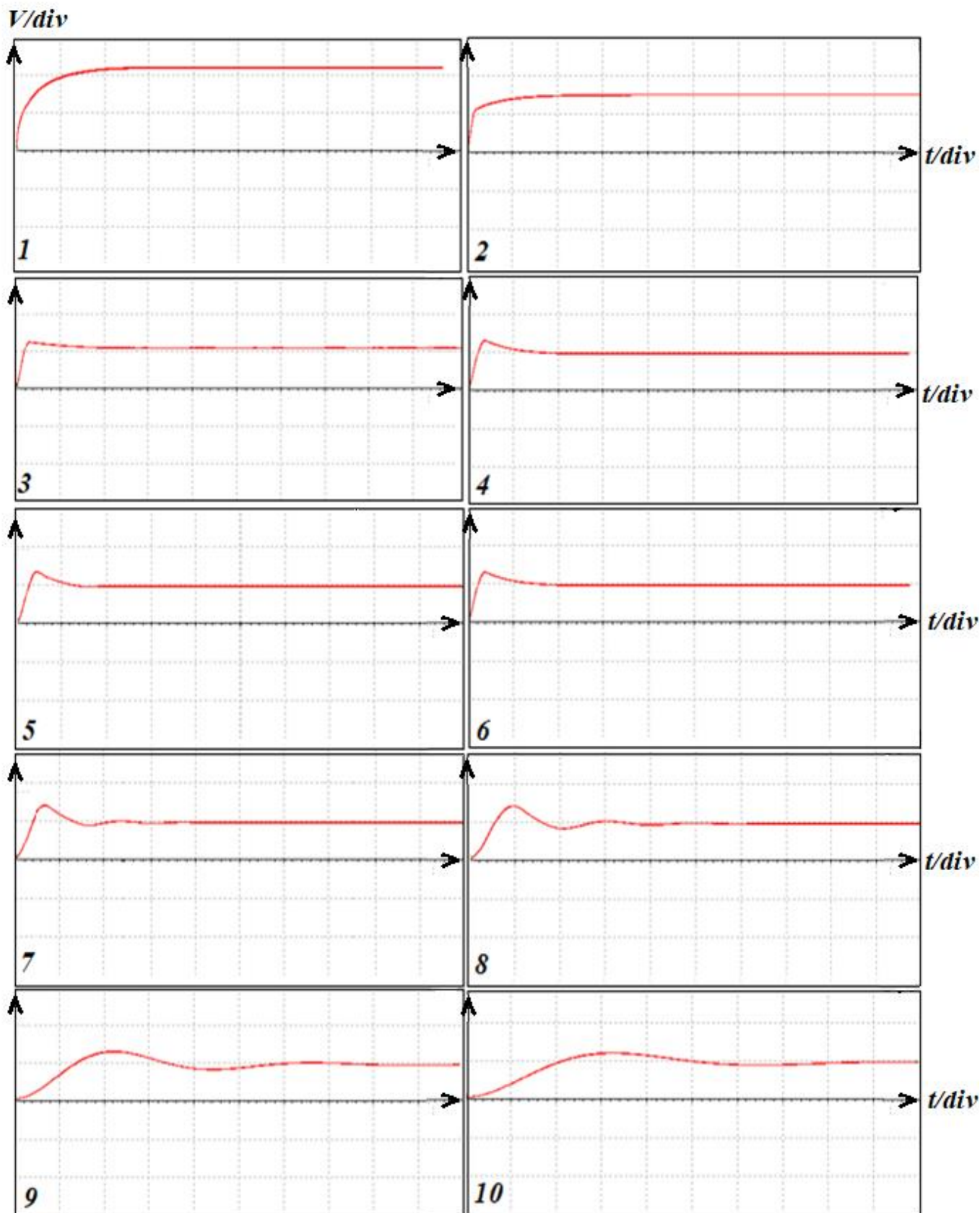
Tablica 4. Vrijednosti napona nakon promjene induktiviteta

Iz tablice 4. može se vidjeti kako izlazni napon ovisi o promjeni induktiviteta. Napon za jako male iznose induktiviteta biti će viši zbog konstitutivne relacije za zavojnicu koja glasi:

$$U_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (14)$$

Promjena struje na zavojnici biti će veća što je induktivitet zavojnice manji i zato se na izlazu javlja viši napon. Prema slici 6.1. vidimo da povećanjem induktiviteta javljaju se sve veće oscilacije izlaznog napona te se on sve sporije ustaljuje na konačnu vrijednost. To se javlja zbog velikog induktiviteta jer je potrebno puno vremena dok se zavojnica dovoljno magnetizira kako bi poslala skladištenu energiju prema izlazu. Promjenom induktiviteta zaključujemo kako se izlazni napon može promijeniti, no ako je iznos induktiviteta previsok, izlazni napon će jako sporo doseći svoju konačnu vrijednost te ako je induktivitet prenizak, poteći će jako visoka struja magnetiziranja i na izlazu se javlja visoki napon.





Slika 6.1. Grafički prikaz izlaznog napona za različite vrijednosti induktiviteta  $L_E$  gdje je podjela napona 10 V/podjeljku, a vrijeme 2 ms/podjeljku

## 6.2. . Ovisnost izlaznog napona o promjeni frekvencije

Frekvencijom rada uzlaznog pretvarača mijenja se broj uklapanja i isklapanja MOSFET-a. U ovom potpoglavlju mijenjat će se frekvencija, a vrijednosti ostalih parametara neće se mijenjati. Ovisnost napona na izlazu o frekvenciji biti će prikazana grafički i tablično. Postavke osciloskopa postavljene su tako da je vremenska baza 20 ms/podjeljku i amplitudna baza 5 V/podjeljku.

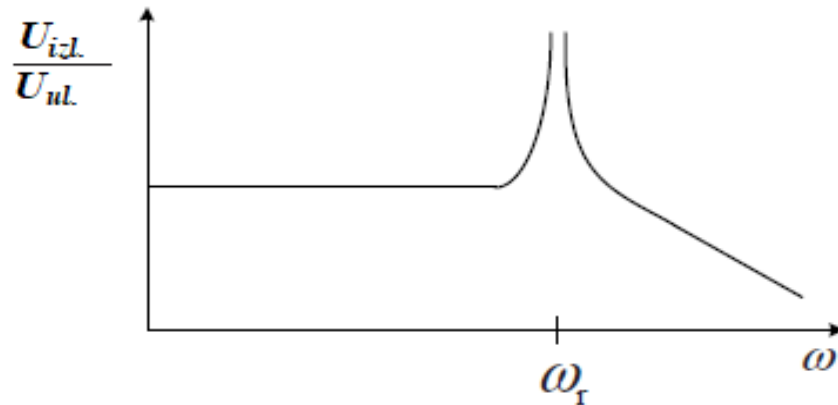
| <i>Frekvencija</i> | <i>Izlazni napon</i> | <i>Redni broj dijagrama</i> |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|
| <i>10 Hz</i>       | <i>1.18 V</i>        | <i>1</i>                    |
| <i>100Hz</i>       | <i>3.064 V</i>       | <i>2</i>                    |
| <i>1 kHz</i>       | <i>9.337 V</i>       | <i>3</i>                    |
| <i>5 kHz</i>       | <i>5.54V</i>         | <i>4</i>                    |
| <i>10 kHz</i>      | <i>5.3 V</i>         | <i>5</i>                    |
| <i>20 kHz</i>      | <i>5.15 V</i>        | <i>6</i>                    |
| <i>50 kHz</i>      | <i>4.86 V</i>        | <i>7</i>                    |
| <i>100 kHz</i>     | <i>4.2 V</i>         | <i>8</i>                    |

Tablica 5. Vrijednosti napona nakon promjene sklopne frekvencije  $f_s$

Promjenom frekvencije se vidno utječe na izlazni napon. Pogledamo li dijagrame pod rednim brojem 1 i 2 vidimo kako je frekvencija preniska i da se kondenzator na izlazu  $C_d$  postepeno prazni te je napon u jednom trenutku pada na nulu. Na dijagramu 3 vidimo kako je napon na izlazu veoma visok i to dvostruko viši od očekivanog napona. Takva pojava se javlja zbog pojave rezonancije u krugu. Rezonantna frekvencija dobije se jednadžbom:

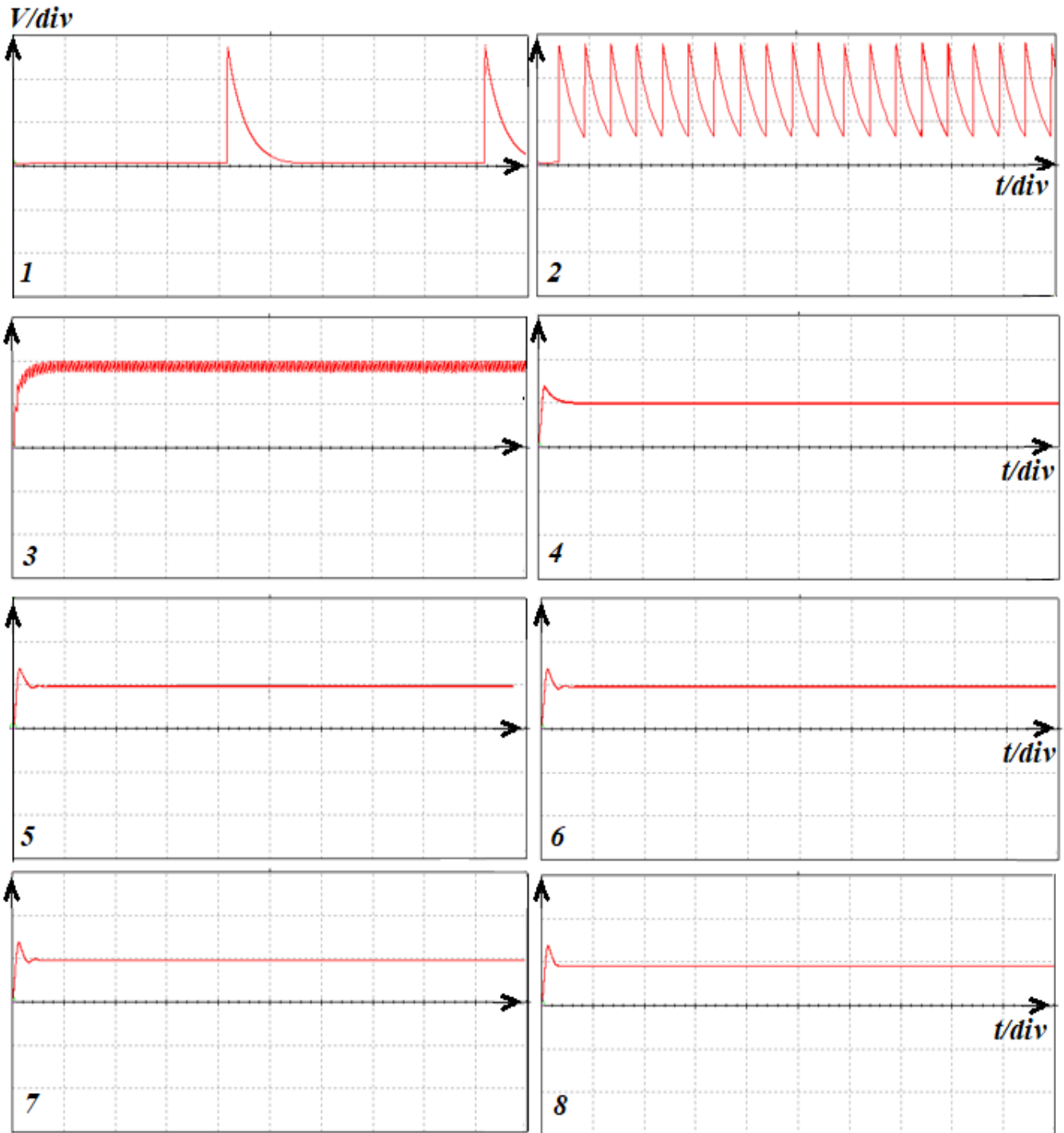
$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_E \cdot C_d}} \quad (15)$$

Takav tip uzlaznog pretvarača naziva se rezonantni ulazni pretvarač [4] i kod takvog pretvarača karakteristična je pojava veoma visokog napona na izlazu.



Slika 6.2. Ovisnost omjera izlaznog i ulaznog napona o promjeni frekvencije

Daljnim povećanjem sklopne frekvencije ne utječe se bitno na izlazni napon, no njegova vrijednost na početku oscilira i tek nakon nekog vremena ustali se na konstantnu vrijednost. Trajanje oscilacija ovisi o vrijednosti sklopne frekvencije, što znači da što je frekvencija višlja, to će se napon na izlazu sporije ustaliti. Isto tako napon na izlazu polako opada povećanjem frekvencije, a to se događa zbog brzog izbijanja kondenzatora na izlazu te zbog malog vremena skladištenja energije u zavojnici. Povećanjem frekvencije valovitost struje  $\Delta I_L$  se smanjuje, a vrijednost induktiviteta zavojnice  $L_E$  ne mijenja i to rezultira nižim naponom na izlazu od očekivanog te prema jednadžbi (14) možemo vidjeti kako su napon na zavojnici i valovitost struje u proporcionalnom odnosu.



Slika 6.3. Grafički prikaz izlaznog napona za različite sklopne frekvencije  $f_s$ , gdje je podjela napona 5 V/podjeljku, a vrijeme 20 ms/podjeljku

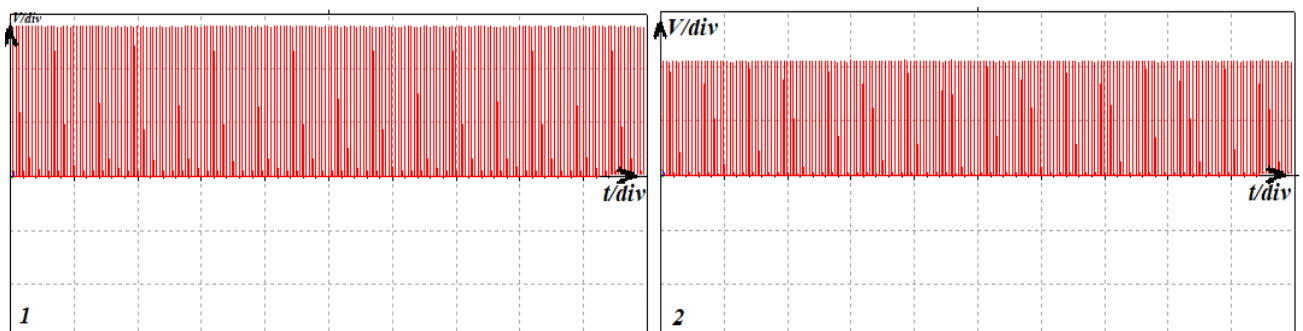
### 6.3. Ovisnost izlaznog napona o promjeni vrijednosti kapaciteta kondenzatora $C_d$

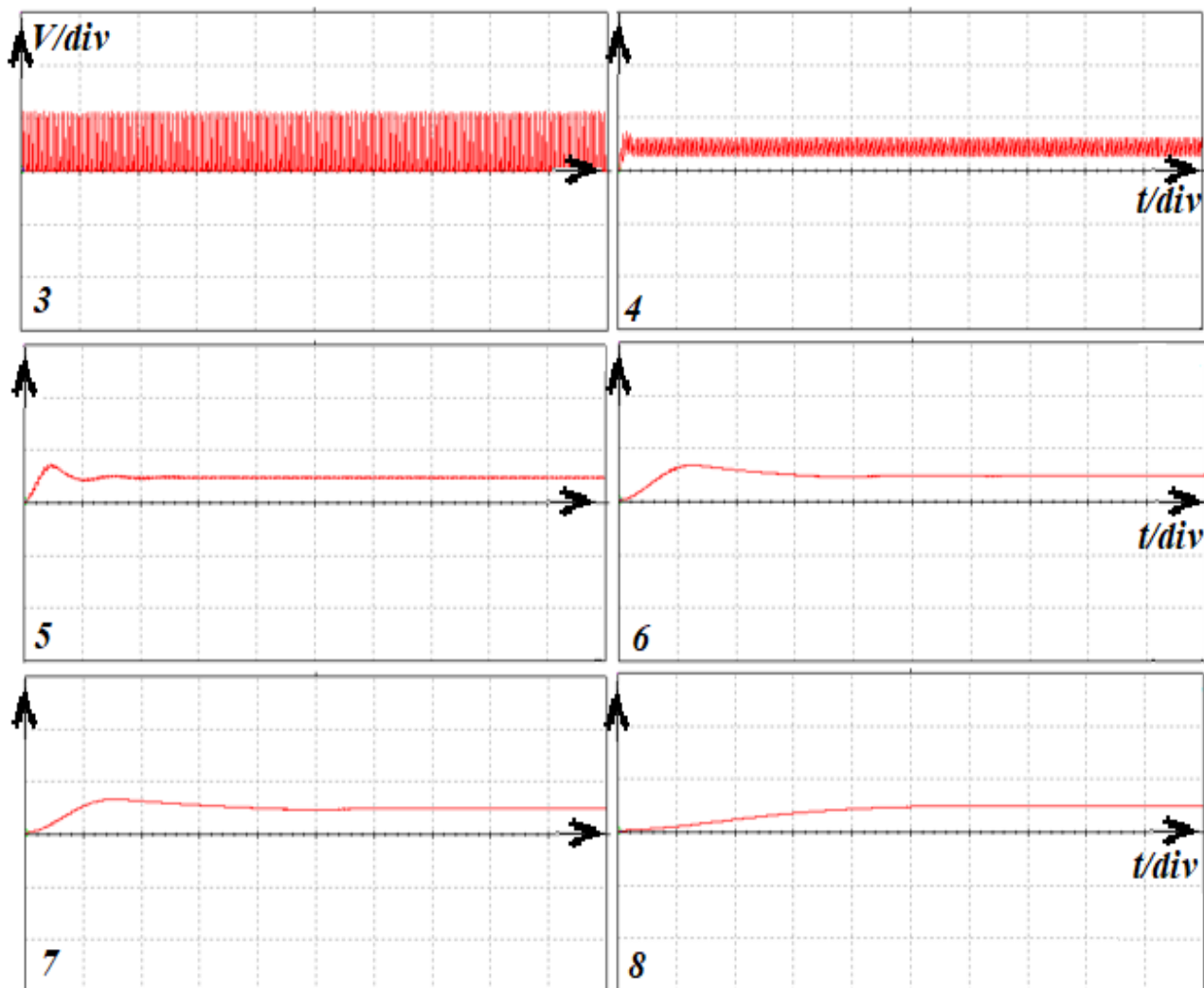
Kondenzator  $C_d$  na izlazu uzlaznog pretvarača služi za glaćenje izlaznog napona i zaslužan je za povišenje napona. Vrijednost kapaciteta mijenjet ćemo kako bi smo dobili uvid o njegovom djelovanju. Postavke osciloskopa postavljene su tako da je vremenska baza 2 ms/podjeljku i amplitudna baza 10 V/podjeljku. Ostali parametri neće se mijenjati, a njihove vrijednosti biti će postavljene na vrijednosti izračunate u poglavlju 4.

| Vrijednost kapaciteta | Vrijednost izlaznog napona | Redni broj dijagrama |
|-----------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 nF                  | 0.85 V                     | 1                    |
| 10 nF                 | 0.87 V                     | 2                    |
| 100 nF                | 1.82 V                     | 3                    |
| 1 $\mu$ F             | 4.33 V                     | 4                    |
| 10 $\mu$ F            | 4.87 V                     | 5                    |
| 68 $\mu$ F            | 4.9 V                      | 6                    |
| 100 $\mu$ F           | 4.85 V                     | 7                    |
| 1 mF                  | 4.9 V                      | 8                    |

Tablica 6. Vrijednosti napona nakon promjene vrijednosti izlaznog kapaciteta  $C_d$

Promjenom kapaciteta kondenzatora  $C_d$  na vrijednost niže od izračunate u poglavlju 4, napon na izlazu je niži i zbog niskog kapaciteta kondenzatora koji se prazni brže. Za vrijednost napona uzeta je srednja vrijednost te se na grafu 1, 2, 3 i 4 može vidjeti izbijanje kondenzatora i u određenom vremenu napon pada na 0. Povećanjem kapaciteta kondenzatora iznad 68  $\mu$ F ne uočavaju se bitnije promjene iznosa izlaznog napona osim što je potrebno neko vrijeme da napon dosegne konačnu vrijednost.





Slika 6. 4. Grafički prikaz izlaznog napona za različite vrijednosti kapaciteta  $C_d$ , gdje je podjela napona 10 V/podjeljku, a vrijeme 2 ms/podjeljku

## 7. Zaključak

U ovom završnom radu izrađen je model uzlaznog pretvarača koji radi s ulaznim naponom do 1V. Napravljen je proračun parametara koji su bitni za rad pretvarača i određene vrijednosti komponenti. U režimima rada postavljene su matematičke jednadžbe koje opisuju vladanje pretvarača te su postavljeni valni oblici napona i struje koji vladaju na zavojnici  $L_E$  i kondenzatoru  $C_d$ , te je postavljena upravljačka karakteristika uzlaznog pretvarača. Ventil  $V_1$  u ovom modelu realiziran je N-kanalnim MOSFET-om koji predstavlja naponom upravljanu sklopku. Kod izbora MOSFET-a bitan je što niži napon praga zbog niskog ulaznog napona. Problem je predstavljala sama izrada oscilatora za upravljanje MOSFET-om čija frekvencija rada bi trebala iznositi 10kHz te bi napon upravljanja trebao biti kvadratnog oblika s mogućnošću promjene duty cycle-a, a napajanje oscilatora bi se vršilo preko izvora E čija vrijednost je niska za korištenje kristalnih oscilatora, oscilatora s komponentom NE555 i astabilnog multivibratora. Ograničenje pri izradi modela predstavljao je korišteni program, koji u svojoj bazi komponenata nije sadržavao komponente koje bi bile praktičnije za korištenje. Vrijednosti izlaznog napona nakon promjene sklopne frekvencije, induktiviteta zavojnice  $L_E$  i izlaznog kapaciteta  $C_d$  prikazane su tablično i grafički. Promjenom sklopne frekvencije pretvarača uočava se karakteristična frekvencija koja daje visok napon na izlazu, napon viši od očekivanog. Mijenjanjem induktiviteta zavojnice  $L_E$  na vrijednosti ispod izračunate uočavamo porast napona, a to se događa zbog velike promjene struje kroz zavojnicu iako je napon na zavojnici proporcionalan induktivitetu. Promjenom kapaciteta kondenzatora  $C_d$  na niže vrijednosti napon na izlazu postaje promjenjiv, dok se povećanjem kapaciteta napon bitnije ne mijenja.

## LITERATURA

- [1] S. Roberts, DC/DC book of knowledge, RECOM Engineering GmbH & Co KG, Austria, 2015.
- [2] B. Hauke, Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage, Texas instruments, 2009.,  
dostupno na:  
<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://www.ti.com/lit/an/slva372c/slva372c.pdf&ved=2ahUKEwiXwur2xp7kAhVBx4sKHXYGBgAQFjAAegQIARAB&usg=AOvVaw0L4CHbLo3ccLQmw3mwwl2N&cshid=1566754434412>
- [3] H. Kovačević, OVISNOST REŽIMA RADA UZLAZNOG PRETVARAČA O SKLOPNOJ FREKVENCiji, Zagreb, rujan 2013.
- [4] G. Simeonov Resonant Boost Converter for Distributed Maximum Power Point Tracking in Grid-Connected Photovoltaic Systems, University of Toronto, 2010.



## SAŽETAK

U ovom završnom radu izrađena je simulacijski model uzlaznog pretvarača za ulazne napone do 1V. Izvršeno je postavljenje jednadžbi za kontinuirani i diskontinuirani režim rada, te je postavljena upravljačka karakteristika. Napravljen je proračun vrijednosti za izbor zavojnice i izlaznog kondenzatora uzlaznog pretvarača. Izvršena su mjerenja promjene napona na izlazu u ovisnosti o promjeni sklopne frekvencije, induktiviteta zavojnice i kapaciteta kondenzatora na izlazu na modelu u programu Multisim.

Ključne riječi: uzlazni pretvarač, ventil, MOSFET, izlazni napon, induktivitet, kapacitet, sklopna frekvencija

## ABSTRACT

In this undergraduate thesis, a simulation model of an inverter for input voltages up to 1V was made. The equations for continuous and discontinuous operation were calculated and solved and a control characteristic was set. A value calculation was made for selection of the coil and output capacitor of the step-up booster. Measurements of the voltage change at the output were made depending on the change in switching frequency, inductance and the capacitance change of the output on the model in the Multisim program were performed.

Keywords: boost converter, valve, MOSFET, output voltage, inductance, capacitance, switching frequency

## **ŽIVOTOPIS**

Rođen 20. studenoga 1997. u Slavonskom Brodu, trenutno prebivalište je u Garčinu, selu u blizini grada Slavnskog Broda. Pohađao je osnovnu školu „Vjekoslav Klaić“ u Garčinu te završio s odličnim uspjehom. Nakon toga upisuje Tehničku Školu Slavonski Brod koju također završava s odličnim uspjehom i stječe znanje za zanimanje elektrotehničar 2016. godine. Iste godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, a 2017. godine se usmjerava na elektroenergetiku. Od stranih jezika priča engleski, trenutno na razini B2. Od računalnih vještina ima dobro poznavanje rada u programu MatLab, AutoCad, MicrosoftOffice alatima.

## **PRILOZI**

Prilog 1. Stranica podatkovne tablice (eng. *data-sheet*) za MOSFET BSH105

Prilog 2. Prva stranica podatkovne tablice (eng. *data-sheet*) za diodu 1N5391

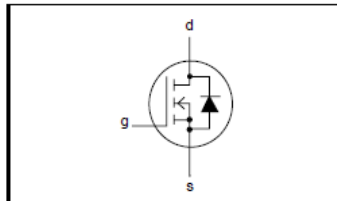
**N-channel enhancement mode  
MOS transistor**

**BSH105**

**FEATURES**

- Very low threshold voltage
- Fast switching
- Logic level compatible
- Subminiature surface mount package

**SYMBOL**



**QUICK REFERENCE DATA**

|  |
|--|
| $V_{DS} = 20 \text{ V}$  |
| $I_D = 1.05 \text{ A}$   |
| $R_{DS(ON)} \leq 250 \text{ m}\Omega (V_{GS} = 2.5 \text{ V})$ |
| $V_{GS(T0)} \geq 0.4 \text{ V}$                                |

**GENERAL DESCRIPTION**

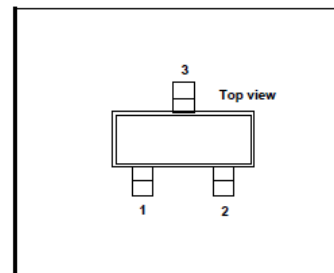
N-channel, enhancement mode, logic level, field-effect power transistor. This device has very low threshold voltage and extremely fast switching making it ideal for battery powered applications and high speed digital interfacing.

The BSH105 is supplied in the SOT23 subminiature surface mounting package.

**PINNING**

| PIN | DESCRIPTION |
|-----|-------------|
| 1   | gate        |
| 2   | source      |
| 3   | drain       |

**SOT23**



**LIMITING VALUES**

Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134)

| SYMBOL         | PARAMETER                        | CONDITIONS                         | MIN. | MAX.    | UNIT             |
|----------------|----------------------------------|------------------------------------|------|---------|------------------|
| $V_{DS}$       | Drain-source voltage             |                                    | -    | 20      | V                |
| $V_{DGR}$      | Drain-gate voltage               | $R_{GS} = 20 \text{ k}\Omega$      | -    | 20      | V                |
| $V_{GS}$       | Gate-source voltage              |                                    | -    | $\pm 8$ | V                |
| $I_D$          | Drain current (DC)               | $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  | -    | 1.05    | A                |
|                |                                  | $T_a = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ | -    | 0.67    | A                |
| $I_{DM}$       | Drain current (pulse peak value) | $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  | -    | 4.2     | A                |
| $P_{tot}$      | Total power dissipation          | $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  | -    | 0.417   | W                |
|                |                                  | $T_a = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ | -    | 0.17    | W                |
| $T_{stg}, T_j$ | Storage & operating temperature  |                                    | - 55 | 150     | $^\circ\text{C}$ |

**THERMAL RESISTANCES**

| SYMBOL      | PARAMETER                              | CONDITIONS                   | TYP. | MAX. | UNIT |
|-------------|--|------------------------------|------|------|------|
| $R_{thj-a}$ | Thermal resistance junction to ambient | FR4 board, minimum footprint | 300  | -    | K/W  |

**1N5391 THRU 1N5399**  
**PLASTIC SILICON RECTIFIER**  
**VOLTAGE - 50 to 1000 Volts CURRENT - 1.5 Amperes**

**FEATURES**

- Low cost
- High current capability
- High reliability
- Plastic package has Underwriters Laboratory Flammability Classification 94V-O utilizing Flame Retardant Epoxy Molding Compound
- 1.5 ampere operation at  $T_L=70^{\circ}\text{C}$  with no thermal runaway
- Exceeds environmental standards of MIL-S-19500/228
- Low leakage

**MECHANICAL DATA**

Case: Molded plastic, DO-15

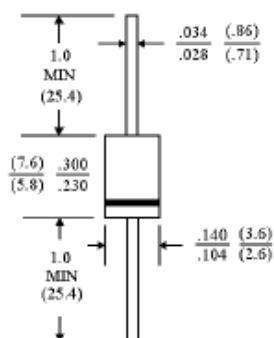
Terminals: Plated axial leads, solderable per MIL-STD-202, Method 208

Polarity: Color band denotes cathode

Mounting Position: Any

Weight: 0.015 ounce, 0.4 gram

**DO-15**



Dimensions in inches and (millimeters)

**MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

Ratings at  $25^{\circ}\text{C}$  ambient temperature unless otherwise specified.

Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.

For capacitive load, derate current by 20%.

|  | 1N5391      | 1N5392 | 1N5393 | 1N5394 | 1N5395 | 1N5396 | 1N5397 | 1N5398 | 1N5399 | UNITS                       |
|--|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------|
| Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage   | 50          | 100    | 200    | 300    | 400    | 500    | 600    | 800    | 1000   | V                           |
| Maximum RMS Voltage  | 35          | 70     | 140    | 210    | 280    | 350    | 420    | 560    | 700    | V                           |
| Maximum DC Blocking Voltage  | 50          | 100    | 200    | 300    | 400    | 500    | 600    | 800    | 1000   | V                           |
| Maximum Average Forward Rectified Current .375"(9.5mm) Lead Length at $T_A=60^{\circ}\text{C}$   | 1.5         |        |        |        |        |        |        |        |        | A                           |
| Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method) | 50          |        |        |        |        |        |        |        |        | A                           |
| Maximum Forward Voltage at 1.5A  | 1.4         |        |        |        |        |        |        |        |        | V                           |
| Maximum Reverse Current Rated $T_A=25^{\circ}\text{C}$   | 5.0         |        |        |        |        |        |        |        |        | $\mu\text{A}$               |
| DC Blocking Voltage $T_A=100^{\circ}\text{C}$  | 500         |        |        |        |        |        |        |        |        | $\mu\text{A}$               |
| Typical Junction capacitance (Note 1)  | 25          |        |        |        |        |        |        |        |        | pF                          |
| Typical Thermal Resistance (Note 2)  | 26.0        |        |        |        |        |        |        |        |        | $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ |
| Operating and Storage Temperature Range $T_J, T_{STG}$   | -55 TO +150 |        |        |        |        |        |        |        |        | $^{\circ}\text{C}$          |

**NOTES:**

1. Measured at 1 MHz and applied reverse voltage of 4.0 VDC.
2. Thermal Resistance Junction to Ambient and from junction to lead at 0.375"(9.5mm) lead length P.C.Board mounted.