

# Harmonijska analiza snage pretvaračkih komponentata istosmjernog uzlaznog pretvarača

---

Jakobović, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

*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:200:680389>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**

*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**

**Harmonijska analiza snage pretvaračkih komponenata istosmjernog uzlaznog  
pretvarača**

**Završni rad**

**Tomislav Jakobović**

## Sadržaj

<b>1.Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.Zadatak završnog rada .....</b>	<b>1</b>
<b>2.Pretvorba snage na frekvenciji .....</b>	<b>2</b>
<b>3.Analiza rada .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1.Kontinuirani režim rada .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1.1.Interval A .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1.2.Interval B .....</b>	<b>12</b>
<b>3.2.Diskontinuirani režim rada .....</b>	<b>13</b>
<b>4.Mjerenje na uzlaznom pretvaraču napona .....</b>	<b>14</b>
<b>5.Analiza rezultata mjerenja u MATLAB-u.....</b>	<b>16</b>
<b>5.1.Istosmjerna snaga i snaga prvog harmonika za diodu .....</b>	<b>20</b>
<b>5.2.Istosmjerna snaga i snaga prvog harmonika za tranzistor .....</b>	<b>21</b>
<b>5.3.Istosmjerna snaga i prvi harmonik izmjenične snage.....</b>	<b>22</b>
<b>6.Zaključak .....</b>	<b>24</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>25</b>
<b>Životopis.....</b>	<b>26</b>
<b>Sažetak.....</b>	<b>27</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>28</b>
<b>Prilog .....</b>	<b>29</b>

## 1.Uvod

Osnovni razlozi stalnog povećanja elektroničkih energetske pretvarača kao i sve šira njihova primjena su težnja za postizanjem što bolje tehničke karakteristike energetskih i elektroničkih trošila kao i sve izraženija potreba za štednjom električne energije.

Primjenu elektroničkih energetskih pretvarača pronalazimo primjerice u punjačima akumulatorskih baterija mobilnih telefona snage od nekoliko vata pa do nekoliko tisuća megavata, također, koriste se u regulaciji istosmjernih i izmjeničnih elektromotornih pogona, u elektrokemiji, računalnoj opremi, rasvjeti, sustavima klimatizacije itd.

Tema ovog rada je harmonijska analiza snage za istosmjerni uzlazni pretvarač. Istosmjerni uzlazni pretvarač ima dvije pretvaračke komponente, pri tome, sklopka  $V_1$  može biti realizirana bilo kojim punoupravlјivim poluvodičkim ventilom, dok sklopka  $V_2$  može biti realizirana diodom. Sklopke  $V_1$  i  $V_2$  sklapaju protutaktno. Uzlazni istosmjerni pretvarač upotrebljava se za napajanje elektroničkih sklopova. Uz harmonijsku analizu snage, također će se analizirati napon i struja tranzistora i diode na pojedinim harmonicima.

### 1.1. Zadatak završnog rada

Za osnovno periodičko rješenje jednog, odabranog istosmjernog uzlaznog pretvarača izmjeriti harmonijski sadržaj struje i napona pretvaračkih komponenata s pomoću MATLAB. Za odabrane mjerne točke odrediti istosmjernu i izmjeničnu snagu pretvaračkih komponenata (BT, dioda). Komentirati dobivene rezultate s obzirom na očekivane.

## 2. Pretvorba snage na frekvenciji

Ako se element mreže  $\alpha$  nalazi u periodički ustaljenom stanju te ako je u sustavu neke višeharmonijske mreže može mu se odrediti djelatnu snagu, a struje i napone prikazati u Fourierov red:

$$u_a = U_a(0) + \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \quad (2-1)$$

gdje je  $\omega = 2\pi/T$ ,  $T$  jest perioda rada [1]

$$i_a = I_a(0) + \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{I}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{J}_a(n) \sin(n\omega t)] \quad (2-2)$$

$U_a(0)$  je srednja vrijednost napona [2]:

$$U_a(0) = \frac{1}{T} \int_0^T u_a(t) dt \quad (2-3)$$

$I_a(0)$  je srednja vrijednost struje [2]:

$$I_a(0) = \frac{1}{T} \int_0^T i_a(t) dt \quad (2-4)$$

$\hat{U}_a(n)$  i  $\hat{V}_a(n)$  su amplitude ortogonalnih komponenata  $n$ -tog harmonijskog člana napona:

$$\hat{U}_a(n) = \frac{2}{T} \int_0^T u_a(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2-5)$$

$$\hat{V}_a(n) = \frac{2}{T} \int_0^T u_a(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2-6)$$

$\hat{I}_a(n)$  i  $\hat{J}_a(n)$  su amplitude ortogonalnih komponenta n-tog harmonijskog člana struje te se opisuju preko izraza (2-7) i (2-8) [2]:

$$\hat{I}_a(n) = \frac{2}{T} \int_0^T i_a(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2-7)$$

$$\hat{J}_a(n) = \frac{2}{T} \int_0^T i_a(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2-8)$$

Djelatna snaga računa se prema izrazu:

$$P_\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T u_\alpha i_\alpha dt \quad (2-9)$$

Izrazi (2-1) i (2-2) se uvrštavaju u izraz (2-9) kako bi se djelatna snaga prikazala pomoću Fourierovog reda.

$$P_\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ U_a(0) + \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \right\} \\ \cdot \left\{ I_a(0) + \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{I}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{J}_a(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt$$

$$\begin{aligned}
P_\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T & \left\{ U_a(0) \cdot I_a(0) + U_a(0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{I}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{J}_a(n) \sin(n\omega t)] \right. \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \cdot I_a(0) \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \\
& \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{I}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{J}_a(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt
\end{aligned}$$

Daljnijm sređivanjem jednadžbe, slijedi :

$$\begin{aligned}
P_\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T & U_a(0) \cdot I_a(0) dt \\
& + \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ U_a(0) \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt \\
& + \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ I_a(0) \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt \\
& + \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \right. \\
& \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{I}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{J}_a(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt
\end{aligned}$$

Istosmjernu snagu elementa mreže  $\alpha$  predstavlja prvi član u izrazu. Izvod je prikazan s izrazom (2-10). [2]

$$P_\alpha(0) = \frac{1}{T} \int_0^T U_a(0) \cdot I_a(0) dt$$

$$P_\alpha(0) = \frac{1}{T} U_a(0) \cdot I_a(0) \cdot T$$

$$P_\alpha(0) = U_a(0) \cdot I_a(0) \quad (2-10)$$

Ukupna snaga dobije se sređivanjem:

$$\begin{aligned}
P_\alpha &= P_\alpha(0) + \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ U_\alpha(0) \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_\alpha(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_\alpha(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt \\
&+ \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ I_\alpha(0) \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_\alpha(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_\alpha(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt \\
&+ \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_\alpha(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_\alpha(n) \sin(n\omega t)] \right. \\
&\quad \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{I}_\alpha(n) \cos(n\omega t) + \hat{J}_\alpha(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt
\end{aligned}$$

Za sređivanje prethodnog izraza potrebno je koristiti svojstva ortogonalnosti, a za to će poslužiti izrazi (2-11), (2-12), (2-13)

(2-11)

$$\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(n\omega t) \cos(m\omega t) dt = \begin{cases} 1, n = m \neq 0 \\ 0, n \neq m \\ \frac{1}{2}, n = m = 0 \end{cases}$$

$n=0, m=0$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(n\omega t) \cos(m\omega t) dt &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(0\omega t) \cos(0\omega t) dt = \frac{1}{\omega T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(0\omega t) \cos(0\omega t) dt \\
&= \frac{1}{T} \cdot \left( \frac{T}{2} - \left( -\frac{T}{2} \right) \right) = \frac{1}{T} \left( \frac{T}{2} + \frac{T}{2} \right) = \frac{1}{T} \cdot T = 1
\end{aligned}$$



n=1, m=0

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(n\omega t) \cos(m\omega t) dt &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(1\omega t) \cos(0\omega t) dt = \frac{1}{\omega T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(1\omega t) dt = \\ &= \frac{1}{\omega T} \cdot \left( \sin\left(\omega \frac{T}{2}\right) - \sin\left(-\omega \frac{T}{2}\right) \right) = \frac{1}{\omega T} 2\sin\left(\omega \frac{T}{2}\right) = \frac{1}{2\pi} 2\sin\left(2\frac{\pi}{2}\right) \\ &= \frac{1}{2\pi} 2\sin\pi = 0 \end{aligned}$$

n=1, m=1

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(n\omega t) \cos(m\omega t) dt &= \frac{1}{T} \frac{1}{2} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(1\omega t) \cos(1\omega t) dt = \frac{1}{2T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} 1 + \cos(1\omega t) dt = \\ &= \frac{1}{2\omega T} \cdot \left( t + \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right) = \frac{1}{4\omega T} \cdot \left( 2\omega \frac{T}{2} - \sin\left(-2\omega \frac{T}{2}\right) - \left( 2\omega \frac{T}{2} - \sin\left(-2\omega \frac{T}{2}\right) \right) \right) = \\ &= \frac{1}{4\omega T} \left( 4\omega \frac{T}{2} + 2\sin\omega \frac{T}{2} \right) = \frac{1}{8\pi} \left( 4\frac{2\pi}{2} + 2\sin\frac{2\pi}{2} \right) = \frac{1}{8\pi} (4\pi) = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(n\omega t) \sin(m\omega t) dt \tag{2-12}$$

Rješenje jednačbe (2-12) je uvijek 0.

Ta tvrdnja će se prikazati kroz 2 primjera.

n=0, m=0

$$\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(n\omega t) \sin(m\omega t) dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(0\omega t) \sin(0\omega t) dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} 1 \cdot 0 dt = 0$$

n=1, m=0

$$\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(n\omega t) \sin(m\omega t) dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos(1\omega t) \sin(0\omega t) dt = 0$$

$$\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin(n\omega t) \sin(m\omega t) dt = \begin{cases} \frac{1}{2}, & n = m \neq 0 \\ 0, & n \neq m \end{cases} \quad (2-13)$$

n= 1, m=1

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin(n\omega t) \sin(m\omega t) dt &= \frac{1}{T} \frac{1}{2} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin(0\omega t) \sin(2\omega t) dt = \frac{1}{2T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} 1 - \cos(2\omega t) dt = \\ &= \frac{1}{2\omega T} \cdot \left( t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right) \\ &= \frac{1}{4\omega T} \cdot \left( 2\omega \frac{T}{2} - \sin \left( 2\omega \frac{T}{2} \right) - \left( -2\omega \frac{T}{2} - \sin \left( -2\omega \frac{T}{2} \right) \right) \right) \\ &= \frac{1}{4\omega T} \left( 4\omega \frac{T}{2} - 2\sin \omega \frac{T}{2} \right) = \frac{1}{8\pi} \left( 4 \frac{2\pi}{2} - 2\sin \frac{2\pi}{2} \right) = \frac{1}{8\pi} (4\pi) = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

n=1, m= 0

$$\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin(n\omega t) \sin(m\omega t) dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin(1\omega t) \sin(0\omega t) dt = 0$$

Prva dva člana prethodnog izraza za ukupnu snagu jednaka su 0 zbog navedenih izraza ortogonalnosti.

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ U_a(0) \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt = 0$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ I_a(0) \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt = 0$$

Djelatna snaga ima oblik :

$$P_\alpha = P_\alpha(0) + \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{I}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{J}_a(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt$$

Izmjeničnu snagu predstavlja drugi dio izraza:

$$\tilde{P}_\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{I}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{J}_a(n) \sin(n\omega t)] \right\} dt$$

Radi lakšeg razlikovanja suma, jedna će biti označena indeksom  $n$ , a druga indeksom  $k$ .

$$\tilde{P}_\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t)] \cdot \sum_{k=1}^{\infty} [\hat{I}_a(k) \cos(k\omega t) + \hat{J}_a(k) \sin(k\omega t)] \right\} dt$$

$$\tilde{P}_\alpha = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^T [\hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) \cdot \hat{I}_a(k) \cos(k\omega t) + \hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) \cdot \hat{J}_a(k) \sin(k\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t) \cdot \hat{I}_a(k) \cos(k\omega t) + \hat{V}_a(n) \sin(n\omega t) \cdot \hat{J}_a(k) \sin(k\omega t)] dt$$

$$\tilde{P}_\alpha = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) \cdot \hat{I}_a(k) \cos(k\omega t) dt \right. \\ \left. + \frac{1}{T} \int_0^T \hat{U}_a(n) \cos(n\omega t) \cdot \hat{J}_a(k) \sin(k\omega t) dt + \frac{1}{T} dt \right\}$$

$$\tilde{P}_\alpha = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{T} \hat{U}_a(n) \cdot \hat{I}_a(k) \int_0^T \cos(n\omega t) \cdot \cos(k\omega t) dt + \frac{1}{T} \hat{U}_a(n) \right. \\ \left. \cdot \hat{J}_a(k) \int_0^T \cos(n\omega t) \sin(k\omega t) dt + \frac{1}{T} \hat{V}_a(n) \cdot \hat{I}_a(k) \int_0^T \sin(n\omega t) \cos(k\omega t) dt \right. \\ \left. + \frac{1}{T} \hat{V}_a(n) \cdot \hat{J}_a(k) \int_0^T \sin(n\omega t) \sin(k\omega t) dt \right\}$$

Za rješavanje izraza koristit će se izrazi ortogonalnosti (2-11), (2-12) i (2-13).

Izraz za izmjeničnu snagu preuređen je kako bi se mogla koristiti ortogonalnost. Promijenjene su granice integrala [5] :

$$\tilde{P}_\alpha = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{1/2}{T/2} \hat{U}_a(n) \cdot \hat{I}_a(k) \int_{-T/2}^{T/2} \cos(n\omega t) \cdot \cos(k\omega t) dt + \frac{1/2}{T/2} \hat{U}_a(n) \right. \\ \left. \cdot \hat{J}_a(k) \int_{-T/2}^{T/2} \cos(n\omega t) \sin(k\omega t) dt + \frac{1/2}{T/2} \hat{V}_a(n) \right. \\ \left. \cdot \hat{I}_a(k) \int_{-T/2}^{T/2} \sin(n\omega t) \cos(k\omega t) dt + \frac{1/2}{T/2} \hat{V}_a(n) \right. \\ \left. \cdot \hat{J}_a(k) \int_{-T/2}^{T/2} \sin(n\omega t) \sin(k\omega t) dt \right\}$$

Izraz za izmjeničnu snagu poprima oblik (2-14) nakon korištenja izraza za ortogonalnost.

$$\tilde{P}_\alpha = \sum_{n=1}^{\infty} P_\alpha(n) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} [\hat{U}_\alpha(n) \cdot \hat{I}_\alpha(n) + \hat{V}_\alpha(n) \cdot \hat{J}_\alpha(n)] \quad (2-14)$$

S  $P_\alpha(n)$  je označena djelatna snaga elementa mreže  $\alpha$  na frekvenciji  $\omega_n = n\omega$  [2].

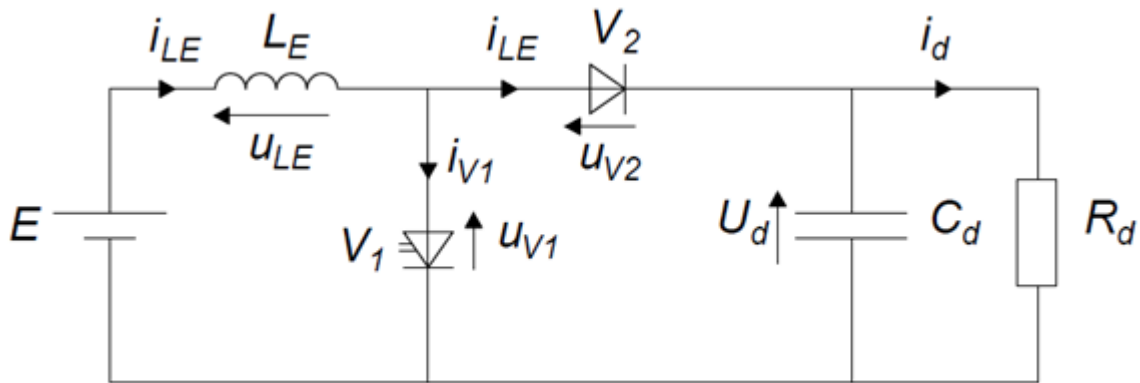
Djelatna snaga elementa mreže  $\alpha$  je:

$$P_\alpha = P_\alpha(0) + \tilde{P}_\alpha \quad (2-15)$$

Djelatna snaga  $P_\alpha$  je rastavljena na dvije temeljne komponente, a to su: istosmjerna snaga  $P_\alpha(0)$  elementa mreže  $\alpha$  (2-10) i izmjenična snaga  $\tilde{P}_\alpha$  elementa mreže  $\alpha$  (2-14).

### 3. Analiza rada

Istosmjerni uzlazni pretvarač sadrži dvije sklopke (dioda i tranzistor). Na slici 3.1. prikazana je shema pretvarača. Ventil  $V_1$  je upravljiv, dok je  $V_2$  idealna dioda.



Slika 3.1. Nadomjesna shema spoja uzlaznog pretvarača [3]

Kod uzlaznog pretvarača razlikujemo dva načina rada. To su: kontinuirani i diskontinuirani načini rada. U kontinuiranom načinu rada struja induktiviteta je uvijek veća od nule, dok u diskontinuiranom načinu rada struja induktiviteta pada na nulu i jedan dio vremenskog perioda je jednaka nuli [3].

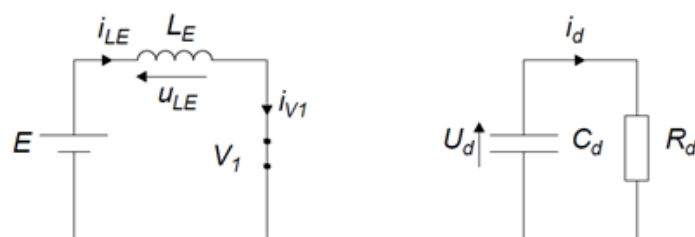
#### 3.1. Kontinuirani način rada uzlaznog pretvarača

U kontinuiranom načinu rada postoje dva intervala u analizi rada. U prvom intervalu, interval A, vodi ventil  $V_1$ , a ne vodi ventil  $V_2$ . U drugom intervalu, interval B, vodi ventil  $V_2$ , a ne vodi ventil  $V_1$  [3].

##### 3.1.1 Interval A

Kada je dan impuls za uklapanje ventila  $V_1$  tada započinje interval A. Kada vodi  $V_1$  ne vodi  $V_2$ .

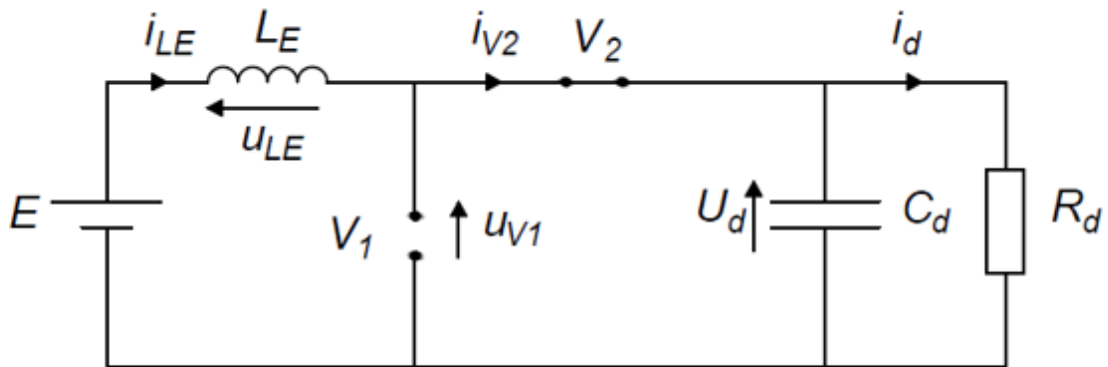
Slika 3.2. sadrži prikaz nadomjesne sheme za taj interval.



Slika 3.2. Nadomjesna shema spoja uzlaznog pretvarača za interval A [3]

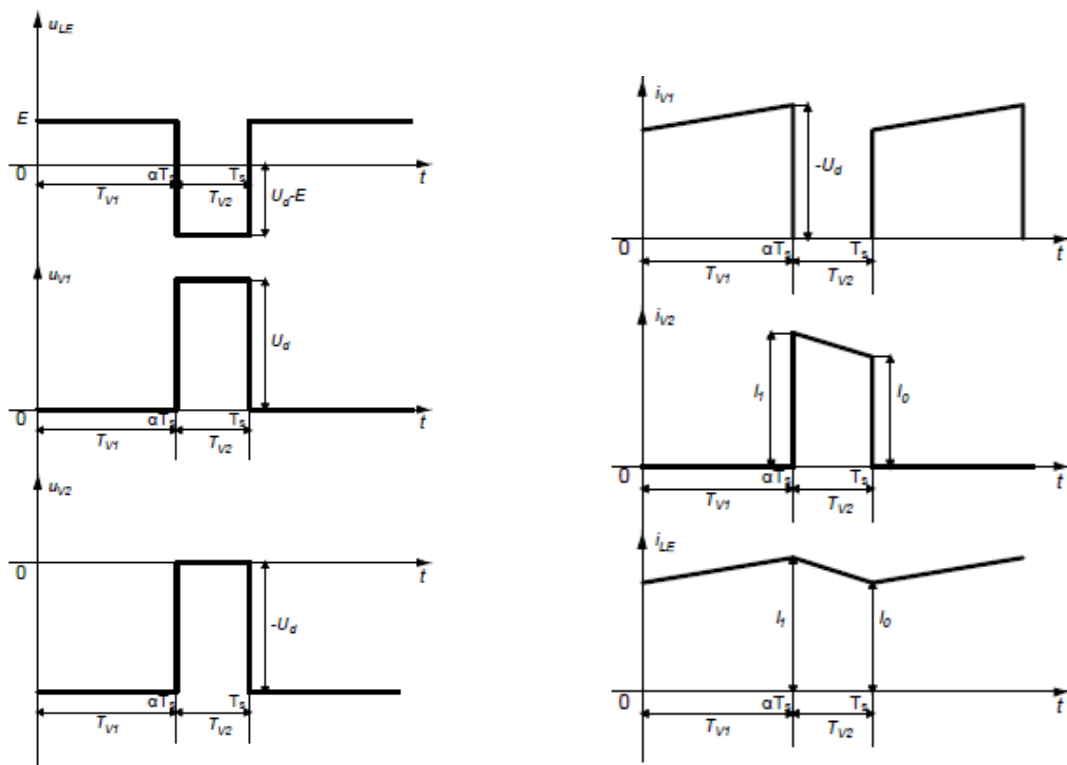
### 3.1.2. Interval B

Kada vodi ventil  $V_2$ , ne vodi ventil  $V_1$ . Slika 3.3. sadrži prikaz nadomjesne sheme za taj interval.



Slika 3.3. Nadomjesna shema spoja uzlaznog pretvarača za interval B [3]

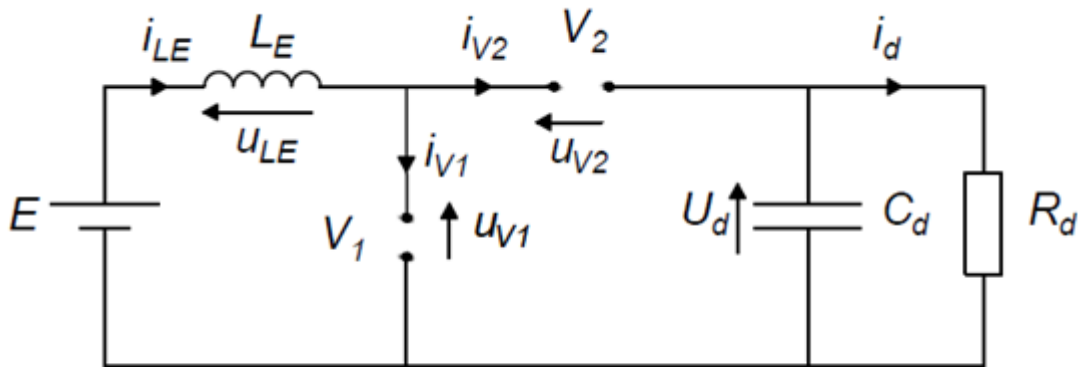
Na slici 3.4. prikazani su valni oblici u kontinuiranom režimu rada.



Slika 3.4. Karakteristični valni oblici uzlaznog pretvarača u kontinuiranom načinu rada [3]

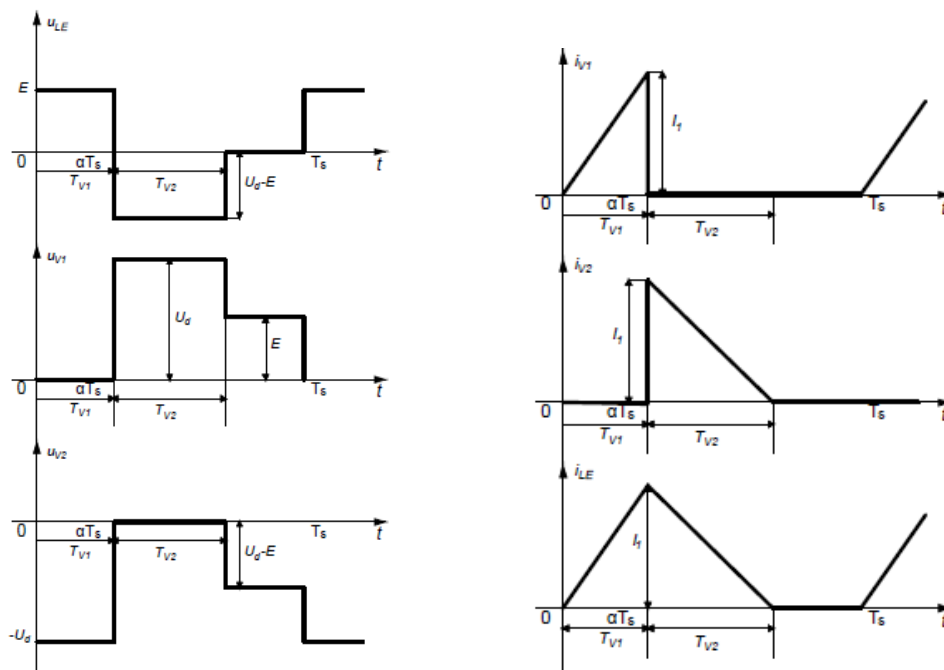
### 3.2. Diskontinuirani režim rada

Nadomjesna shema nalazi se na slici 3.5. u diskontinuiranom režimu rada pojavljuje se interval kod kojeg je struja induktiviteta nula. Taj interval može se nazvati interval C. Interval C započinje kada na ventilu  $V_2$  struja padne na nulu, a završava kada se ventil  $V_1$  uključi.



Slika 3.5. Nadomjesna shema spoja uzlaznog pretvarača za interval C[3]

Valni oblici za diskontinuiran režim rada prikazani su slikom 3.6.

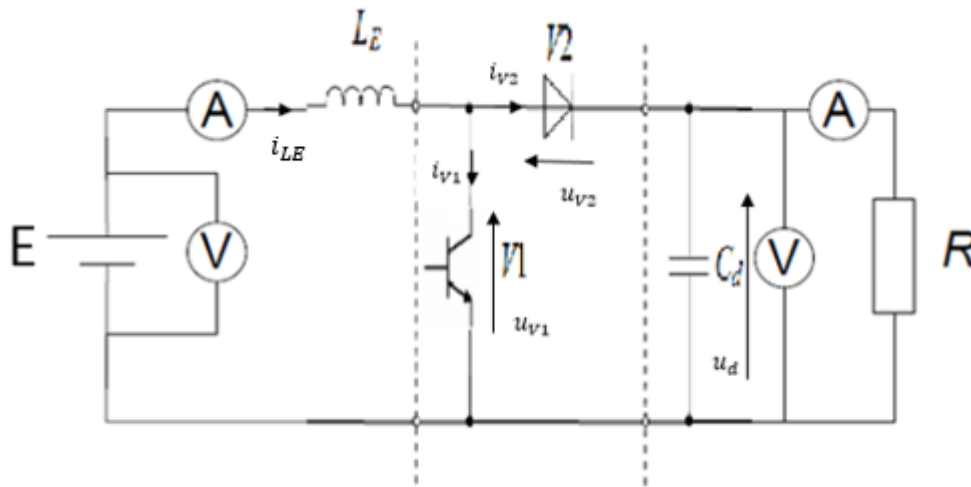


Slika 3.6. Karakteristični valni oblici uzlaznog pretvarača u diskontinuiranom načinu rada[3]



#### 4. Mjerenje na uzlaznom pretvaraču napona

Maketa korištena za mjerenje je napravljena kroz diplomski rad „Način rada istosmjernog uzlaznog pretvarača napona 27 V/1 A“ [6]. Uzlazni pretvarač opisan je u „Priručniku za praktikum iz osnova energetske elektronike“ [3]. Mjerenja su obavljena tako da su snimljene karakteristične veličine u 3 radne točke u kontinuiranom režimu rada i 3 radne točke u diskontinuiranom režimu rada uzlaznog pretvarača [4]. Tablicom 4.1. prikazani su rezultati mjerenja.



Slika 4.1. Shema mjerenja za uzlazni pretvarač

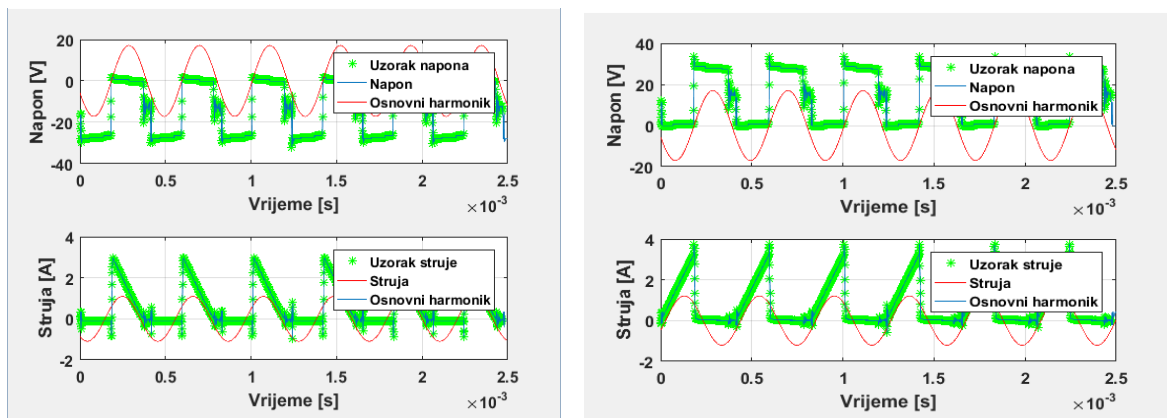
Tablica 4.1. Radne točke korištene za mjerenje [4]

Broj mjerenja	1.	2.	3.	4.	5.	6.
E[V]	20,00 V	14,77 V	13,27 V	21,85 V	16,12 V	18,46 V
$U_{D(0)}$	27,38 V	27,01 V	26,81 V	27,55 V	27,2 V	27,34 V
$I_{DI(0)}$	0,693 A	0,684 A	0,678 A	0,698 A	0,688 A	0,692 A
$I_{TR(0)}$	0,405 A	0,909 A	1,355 A	0,375 A	0,822 A	0,658 A
$I_{LE(0)}$	1,06 A	1,57 A	2,03 A	1,04 A	1,5 A	1,25 A
$U_{DI(0)}$	-8,1 V	-13,3 V	-15,8 V	-7,0 V	-12,5 V	-10,2 V
$U_{TR(0)}$	19,4 V	13,8 V	11,3 V	20,4 V	14,5 V	17,1 V
Frekvencija	6500 Hz	6500 Hz	6500 Hz	2400 Hz	2400 Hz	2400 Hz
	Kontinuirani režim			Diskontinuirani režim		

Kao što je u tablici 4.1. vidljivo mjereni su: napon izvora ( $E[V]$ ), srednja vrijednost napona trošila ( $U_{D(0)}$ ), srednja vrijednost struje diode ( $I_{DI(0)}$ ), srednja vrijednost struje tranzistora ( $I_{TR(0)}$ ), srednja vrijednost struje izvora ( $I_{LE(0)}$ ), srednja vrijednost napona diode ( $U_{DI(0)}$ ), srednja vrijednost napon tranzistora ( $U_{TR(0)}$ ) te frekvenciju. Za svaku radnu točku napravljeno je ukupno šest mjerenja koja se još dijele u dvije grupe mjerenja za kontinuirani i diskontinuirani režim rada. Važno je napomenuti da pretvarač pri frekvenciji od 6500 Hz radi u kontinuiranom režimu rada, a pri 2400 Hz radi u diskontinuiranom režimu rada. Također, mjerenja su odrađena u 2 serije iz razloga što valni analizator ima samo tri ulaza za napone, a bilo je potrebno mjeriti 4 karakteristične veličine napona.

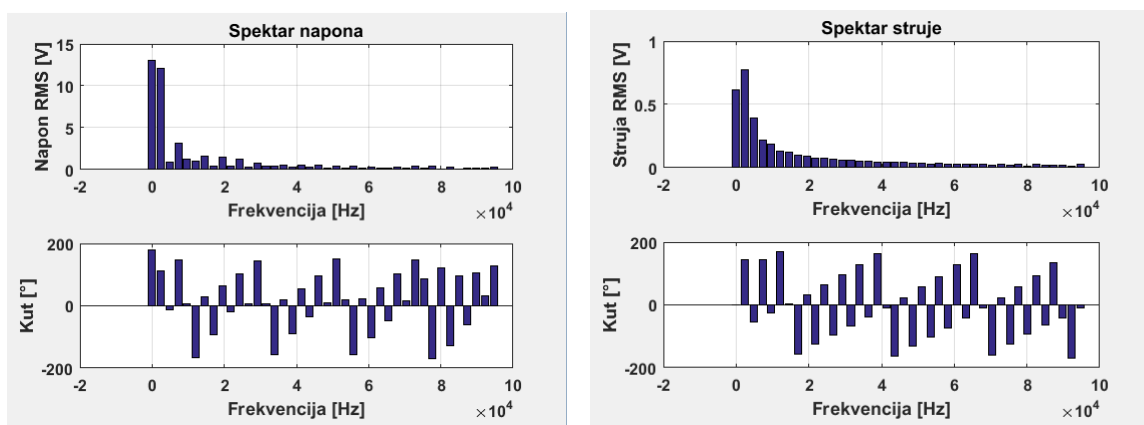
## 5. Analiza rezultata mjerenja u MATLAB-u

Mjerenja karakterističnih veličina izvršena su na osciloskopu te su s osciloskopa spremana s pomoću *Wavestar*-a na računalo, u obliku csv.datoteke. *Wavestar* je softver koji može raditi harmonijsku analizu. Takva datoteka otvara se u MATLAB-u i dalje obrađuje. Analiza će biti rađena preko *MATLAB*-a jer *Wavestar* ne može odrediti kut snage za više harmonike u odnosu na prvi harmonik, te tako ne može dati informaciju o kutevima prvog harmonika. Obrada podataka u *MATLAB*-u izvršena je putem programskog koda.[p1]



*Slika 5.1. Rezultati mjerenja na ventilima a) Napon diode  $u_{v2}$ , struja diode  $i_{v2}$ , b) Napon tranzistora  $u_{v1}$ , Struja tranzistora  $i_{v1}$*

S pomoću slika 5.2. a) i 5.2. b) očitane su vrijednosti i unesene u tablicu 5.1.



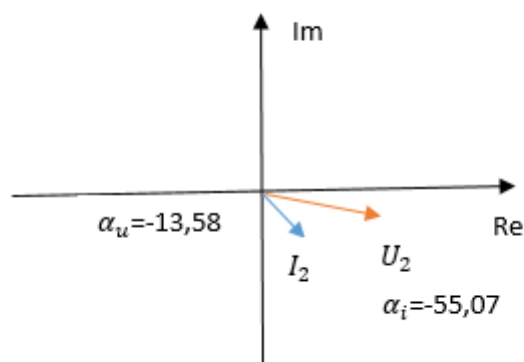
*Slika 5.2. Rezultati mjerenja na ventilima ,a) Spektar napona diode  $u_{v2}$ , b) Spektar struje diode  $i_{v2}$*

**Tablica 5.1.** Harmonici napona, struja, kuteva i snage diode

n	$U_n$	$I_n$	$\alpha_u$	$\alpha_i$	$P_n$
0	13,06	0,6157	180	0	-8,04
1	12,13	0,7724	110,5	143,2	7,79
2	0,8805	0,3899	-13,58	-55,07	0,2572
3	3,14	0,2189	145,9	145,3	0,6873
4	1,227	0,1899	5,591	-24,73	0,2011
5	0,9928	0,1328	-166,2	170,8	0,1206
6	1,557	0,1238	28,54	4,293	0,1758
7	0,3783	0,09677	-91,66	-158	0,0147
8	1,43	0,09207	62,8	33,4	0,1147
9	0,362	0,07847	-20,5	-126,4	-0,00778
10	1,206	0,07318	102,3	62,65	0,06797

Na sljedećem primjeru za drugi harmonik (n=2) bit će prikazano računanje snage i bit će fazorski prikazan slikom 5.3.

$$P(2) = U(2) \cdot I(2) \cdot \cos(\alpha_u - \alpha_i) = 0,8805 \cdot 0,3899 \cdot \cos(-13,58 - (-55,07)) = 0,2572W$$



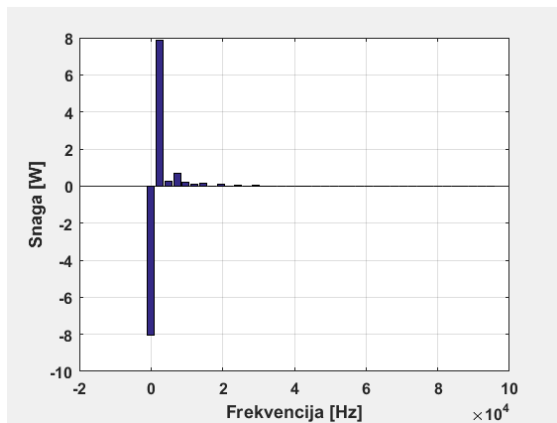
**Slika 5.3.** Fazorski prikaz struje i napona diode za drugi harmonik

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{V2} &= P(1) + P(2) + P(3) + P(4) + P(5) + P(6) + P(7) + P(8) + P(9) + P(10) \\ &= 7,79 + 0,2572 + 0,6873 + 0,2011 + 0,1206 + 0,1758 + 0,0147 + 0,1147 \\ &\quad + (-0,00778) + 0,06797 = 9,42W \end{aligned}$$

Sa slike 5.4. očitana su karakteristične snage koja se nalaze i u tablici 5.1. Snage su potvrđene i analitičkim postupkom, a uspoređivanjem istosmjernje i izmjenične snage dobiva se:

$$P_{V2} = P_{V2}(0) + \tilde{P}_{V2}$$

Djelatna snaga diode predstavlja njene gubitke koji iznose 1,38 W.



Slika 5.4. Snaga na frekvenciji diode

U Tablici 5.2. prikazana su odstupanja viših harmonika od prvog harmonika diode i tranzistora.

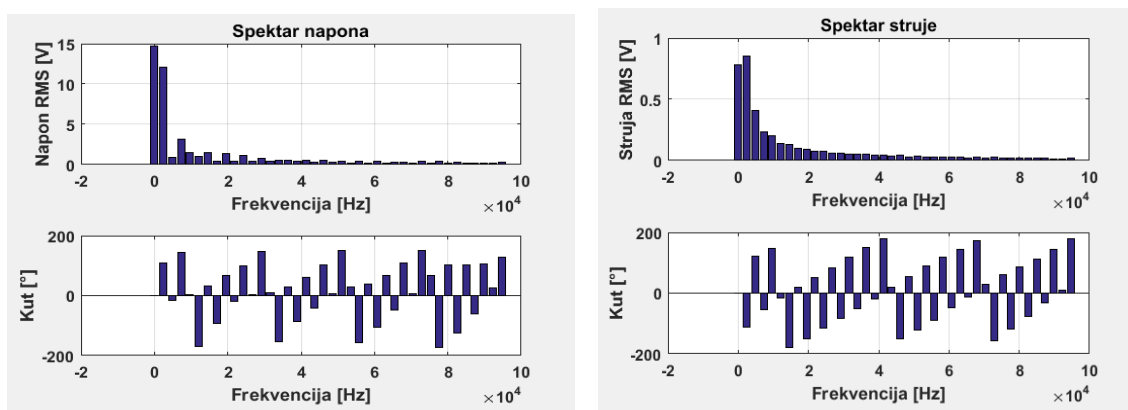
Tablica 5.2. Odstupanja snaga na višim harmonicima u odnosu na snagu za diodu i tranzistor

n	P(1)
P(2)	3,3%
P(3)	8,82%
P(4)	2,58%
P(5)	1,55%
P(6)	2,26%
P(7)	0,00189%
P(8)	0,0147%
P(9)	0,00099%
P(10)	0,0087%

n	P(1)
P(2)	3,3%
P(3)	8,82%
P(4)	2,58%
P(5)	1,55%
P(6)	2,26%
P(7)	0,00189%
P(8)	0,0147%
P(9)	0,00099%
P(10)	0,0087%

Promatrat će se u analizi istosmjerna snaga i prvi harmonik, a ostale komponente će se zanemariti.

S pomoću slika 5.5. a) i 5.5. b) očitane su vrijednosti i unesene u tablicu 5.3.



Slika 5.5. a)Spektar napona tranzistora  $u_{v1}$ , b)Spektar struje tranzistora  $i_{v1}$

**Tablica 5.3.** Harmonici napona, struje, kuteva i snage tranzistora

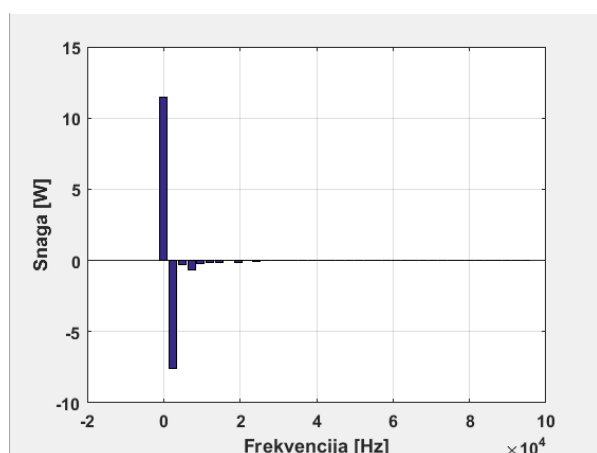
N	$U_n$	$I_n$	$\alpha_u$	$\alpha_i$	$P_n$
0	14,73	0,778	0	0	11,46
1	12,04	0,8543	110,1	-112,5	-7,57
2	0,9477	0,4052	-15,08	120,1	-0,2762
3	3,158	0,2316	145,5	-54,03	-0,6893
4	1,472	0,1991	2,872	148,3	-0,2567
5	1,023	0,1391	-170,5	-16,49	-0,1279
6	1,472	0,1278	31,9	-179,8	-0,1614
7	0,4235	0,102	-92,48	17,83	-0,01499
8	1,393	0,0943	56,87	-148,9	-0,1079
9	0,4278	0,07707	-19,19	50,72	0,01133
10	1,151	0,07723	100,6	-116,4	-0,071

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{V1} &= P(1) + P(2) + P(3) + P(4) + P(5) + P(6) + P(7) + P(8) + P(9) + P(10) \\ &= -7,57 - 0,2762 - 0,6893 - 0,2567 - 0,1279 - 0,1614 - 0,01499 \\ &\quad - 0,1079 + 0,01133 - 0,071 = -9,26W \end{aligned}$$

Sa slike 5.6. očitane su karakteristične snage koje se nalaze i u tablici 5.3. Snage su potvrđene i analitičkim postupkom, a uspoređivanjem istosmjerne i izmjenične snage dobiva se:

$$P_{V1} = P_{V1}(0) + \tilde{P}_{V1}$$

Djelatna snaga diode predstavlja njene gubitke koji iznose 2,2 W.



**Slika 5.6.** Snaga na frekvenciji tranzistora

## 5.1. Istosmjerna snaga i snaga na prvom harmoniku za diodu

Slika 5.7. prikazuje fazorski prikaz istosmjerne snage i prvog harmonika napona i struje diode. Vrijednosti harmonika iz tablice 5.4. su očitani pomoću MATLAB-a i nalaze se na slikama 5.2. a) i 5.2.b)

**Tablica 5.4.** Harmonici napona, struja, kuteva te istosmjerne snage i snage na prvom harmoniku diode

n	$U_D$	$I_D$	$\alpha_u$	$\alpha_i$	$\alpha_p$	-/+	$P_n$
0	13,06	0,6157	180	0	180	-	8,04
1	12,13	0,7724	110,5	143,2	32,7	+	7,79

Uvjet za određivanje predznaka snaga:  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$  ili  $-\pi \leq \alpha \leq -\frac{\pi}{2}$ . Ako  $\alpha$  zadovoljava taj uvjet snaga je negativna.

$$|\alpha_u - \alpha_i| \leq 90^\circ \rightarrow P_n > 0$$

$$|\alpha_u - \alpha_i| \leq 90^\circ \rightarrow P_n > 0$$

$$|180^\circ - 0^\circ| \leq 90^\circ$$

$$|110.5^\circ - 143.2^\circ| \leq 90^\circ$$

$$180^\circ > 90^\circ$$

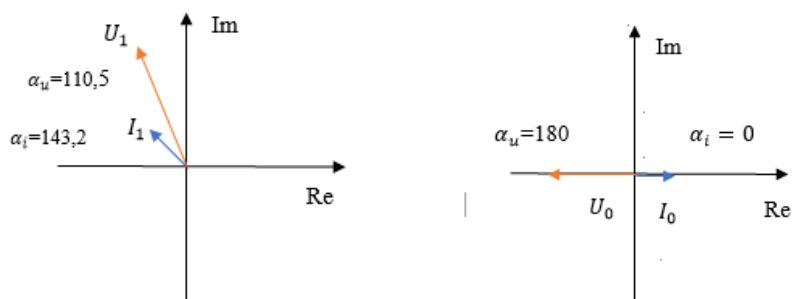
$$32.7^\circ < 90^\circ$$

$P(0) < 0$  – istosmjerna snaga je negativna

$P(1) > 0$  – izmjenična snaga je pozitivna

na prvom harmoniku

Prema izračunu dioda se ponaša kao izvor istosmjerne snage i trošilo izmjenične snage na osnovnom harmoniku.



**Slika 5.7.** Fazorski prikaz struje i napona diode za istosmjernu snagu i nulti harmonik

S pomoću očitanih vrijednosti harmonika iz tablice 5.4. moguće je izračunati istosmjernu snagu i snagu na prvom harmoniku.

$$P(0) = U(0) \cdot I(0) \cdot \cos(\alpha_u - \alpha_i) = 13,06 \cdot 0,6157 \cdot \cos(180 - 0) = -8,04W$$

$$P(1) = U(1) \cdot I(1) \cdot \cos(\alpha_u - \alpha_i) = 12,13 \cdot 0,7724 \cdot \cos(110,5 - 143,2) = 7,79W$$

## 5.2. Istosmjerna snaga i snaga prvog harmonika za tranzistor

Slika 5.8. prikazuje fazorski prikaz istosmjerne snage i prvog harmonika napona i struje tranzistora. Vrijednosti harmonika iz tablice 5.5. su očitane pomoću MATLAB-a i nalaze se na slikama 5.5. a) i 5.5. b)

**Tablica 5.5.** Harmonici napona, struja, kuteva te istosmjerne snage i snage na prvom harmoniku tranzistora

n	$U_{TR}$	$I_{TR}$	$\alpha_u$	$\alpha_i$	$\alpha_p$	-/+	$P_n$
0	14,73	0,778	0	0	0	+	14,46
1	12,04	0,8543	110,1	-112,5	223	-	7,57

Uvjet za određivanje predznaka snaga:  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$  ili  $-\pi \leq \alpha \leq -\frac{\pi}{2}$ . Ako  $\alpha$  zadovoljava taj uvjet snaga je negativna.

$$|\alpha_u - \alpha_i| \leq 90^\circ \rightarrow P_n > 0$$

$$|\alpha_u - \alpha_i| \leq 90^\circ \rightarrow P_n > 0$$

$$|0^\circ - 0^\circ| \leq 90^\circ$$

$$|110,1^\circ - (-112,5^\circ)| \leq 90^\circ$$

$$0^\circ < 90^\circ$$

$$222,6^\circ > 90^\circ$$

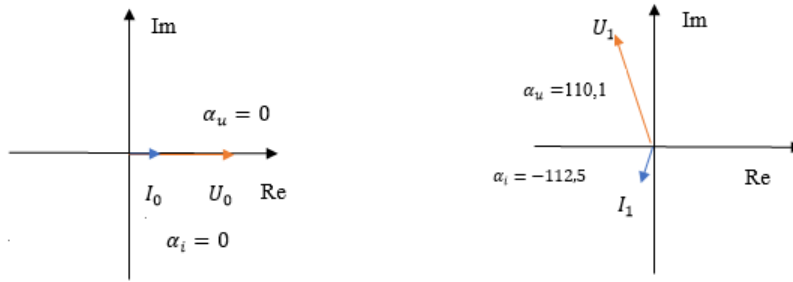
$P(0) > 0$  – istosmjerna snaga je pozitivna

$P(1) < 0$  – izmjenična snaga je negativna na

prvom harmoniku

Prema izračunu tranzistor se ponaša kao izvor izmjenične snage i trošilo istosmjerne snage na osnovnom harmoniku.





**Slika 5.8.** Fazorski prikaz struje i napona tranzistora za istosmjernu snagu i nulti harmonik

S pomoću očitanih vrijednosti harmonika iz tablice 5.5. moguće je izračunati istosmjernu snagu i snagu na prvom harmoniku.

$$P(0) = U(0) \cdot I(0) \cdot \cos(\alpha_u - \alpha_i) = 14,73 \cdot 0,778 \cdot \cos(0 - 0) = 11,46W$$

$$P(1) = U(1) \cdot I(1) \cdot \cos(\alpha_u - \alpha_i) = 12,04 \cdot 0,8543 \cdot \cos(110,1 - (-112,5)) = -7,57W$$

### 5.3. Istosmjerna snaga i prvi harmonik izmjenične snage

Analiza za istosmjernu snagu

S pomoću tablice 4.1. mogu se izračunati snage izvora i trošila za prvu radnu točku.

Snaga izvora dobije se sljedećim izrazom:

$$P_E = U_E \cdot I_E = 20 \cdot 1,06 = 21,2W$$

Snaga trošila dobije se sljedećim izrazom:

$$P_D = U_D \cdot I_D = 27,38 \cdot 0,405 = 11,09W$$

Element	P(0)
Dioda	-8,04
Tranzistor	11,46
Izvor	21,2
Trošilo	11,09

**Tablica 5.6.** Pojedini elementi i njihove istosmjerne snage

S pomoću vrijednosti iz tablice 5.3.1. možemo prikazati zakon o očuvanju snage koji je dan izrazom  $P_E(0) = P_D(0) + P_{V2}(0) + P_{V1}(0)$ , gdje su:  $P_E(0)$  istosmjerna snaga na izvoru,  $P_D(0)$  istosmjerna snaga trošila,  $P_{V1}(0)$  istosmjerna snaga tranzistora, te  $P_{V2}(0)$  istosmjerna snaga diode.

S obzirom na to da se dioda ponaša kao izvor (što je vidljivo u tablici 5.6.) jer ima negativan predznak izraz za zakon o očuvanju snage poprima sljedeći oblik:

$P_E(0) + P_{V2}(0) = P_{V1}(0) + P_D(0)$  gdje se daljnjim uvrštavanjem vrijednosti istosmjernih snaga iz tablice 5.6. dobije:

$$-21,2 - 8,04 = 11,09 + 11,46$$

$$-29,24 = 22,55 \text{ W}$$

Prema zakonu o očuvanja istosmjerne snage mogu se procijeniti gubici na nadomjesnim otporima reaktivnih komponenata ( prigušnice I kondenzatora) koji iznose oko 6, 7 W!

Analiza rada za prvi harmonik izmjenične snage

Element	P(1)
Dioda	7,79
Tranzistor	-7,57

**Tablica 5.7.** Snaga na prvom harmoniku na diodi i tranzistoru

Ako se izjednače snage tranzistora i diode iz tablice 5.7., odnosno uvrste se u izraz:

$$|P_{V1}(1)| = P_{V2}(1)$$

$$7,57 \approx 7,79$$

time je potvrđen uvjet opstojnosti izravnih istosmjernih pretvarača [1] koji definira da je

$$|P_{V2}(f_s)| = |P_{V1}(f_s)|.$$

## 6. Zaključak

Dioda proizvodi istosmjernu snagu, a troši izmjeničnu jer je istosmjerna snaga diode negativna, a osnovni harmonik snage diode je pozitivan. Tranzistor proizvodi izmjeničnu snagu, a troši istosmjernu snagu jer je nulti harmonik snage tranzistora pozitivan.

Predznak snage se određuje iz provođenja harmonijske analize za harmonike, poznavajući amplitude harmonika struje ( $I_n$ ) i amplitude harmonike napona ( $U_n$ ) te uspoređujući kutove na pojedinom harmonijskom članu. Tako je pokazano da ako se kut između fazora struje i napona kreće:  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$  ili  $-\pi \leq \alpha \leq -\frac{\pi}{2}$  tada je snaga na tom harmoniku negativna.

S pomoću napisanog programa za obradu prenesenih valnih oblika koji su učitani s osciloskopa na računalo u MATLAB je za valne oblike napravljena brza Fourierova transformacija (eng. Fast Fourier Transform)

Procijenjeni su gubici za jednu radnu točku mjerenja, te je dobiveno da su gubici diode 1,38 W, a gubici tranzistora 2,2 W.

Procijenjeni su gubici na nadomjesnim otporima ulazne prigušnice i izlaznog kondenzatora, gubici nastaju zbog ulaznog otpora izvora kao i otpora spojnih vodiča i oni iznose 6,69 W.

Provjeren je uvjet opstojnosti uzlaznog pretvarača te je snaga na sklopnoj frekvenciji 6500 Hz obje pretvaračke komponente po apsolutnom iznosu približno jednaka:

$$|P_{D(0)}| = 7,79 \approx |P_{TR(0)}| = 7,57$$

## Literatura

- [1] Elektronički energetske pretvarači, Dr.sc. Ivan Flegar, Kigen d.o.o., Zagreb, 2010. god
- [2] Teorija mreža-Bilješke s predavanja, Dr.sc. Ivan Flegar, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2001. god
- [3] Priručnik za praktikum iz osnova energetske elektronike 2.izdanje, D.Pelin, K.Miličević, D.Vulin,Osijek,2013.
- [4] „Verificiranje koncepta pretvorbe snage na frekvenciji istosmjernih uzlaznih pretvarača“, diplomski rad, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku , Osijek, 2017.
- [5] [https://ocw.mit.edu/courses/mathematics/18-03sc-differential-equations-fall-2011/unit-iii-fourier-series-and-laplace-transform/fourier-series-basics/MIT18\\_03SCF11\\_s21\\_7text.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/mathematics/18-03sc-differential-equations-fall-2011/unit-iii-fourier-series-and-laplace-transform/fourier-series-basics/MIT18_03SCF11_s21_7text.pdf)
- [6] „Način rada istosmjernog uzlaznog pretvarača napona 27V/1A“, diplomski rad, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2010.

## **Životopis**

TOMISLAV JAKOBOVIĆ

Rođen je u Đakovu 22. svibnja 1995. godine. U Đakovu, 2010. završava osnovnu školu „OŠ Ivan Goran Kovačić“ te upisuje opću gimnaziju Antun Gustav Matoš u Đakovu.

Završava srednju školu 2014. godine te upisuje preddiplomski studij elektrotehnike u Osijeku.

Započinje školovanje 2014. godine na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.

---

## **Sažetak**

Završni rad sadrži detaljan izvod snage na frekvenciji. U izvodu formula djelatna snaga je rastavljiva na dvije komponente, istosmjernu i izmjeničnu. Odrađeno je mjerenje na uzlaznom pretvaraču napona i rezultati mjerenja prikazani su tablično.

Odrađena su mjerenja za 3 radne točke u kontinuiranom režimu rada i određena su mjerenja za 3 radne točke u diskontinuiranom režimu rada uzlaznog pretvarača.

Analiza rezultata mjerenja obrađena je u MATLAB-u. Pokazana su pretvaračka svojstva tranzistora i diode uzlaznog pretvarača.

**Ključne riječi:** snaga na frekvenciji, uzlazni pretvarač

## **Abstract**

The final work contains detailed output of the power of harmonics. When it comes to formula excerpt it is visible that active power can be divided onto two components; direct current (DC) power and alternating current (AC) power. Furthermore, the measuring was done for boost converter and results of it are shown in table. There were measurement done for 3 working points in continuous mode and 3 working points in discontinuous mode. Analysis result was processed in MATLAB. It is shown conversion properties by transistor and diode of boost converter.

**Key words:** power of harmonics, boost converter

## Prilog:

### [p1] Programski kod u MATLAB-u

```
podatci=importdata('C:\Users\TomislavJakobović\Desktop\ZR\Dajana
26.06\ventili\diskontinuirani_16,12.csv',' ',1);%      prigusnica-invert      ;
25ms-otpornik ; 25ms;
data=podatci.data;
n=length(data);
delta_t=data(2,1)-data(1,1);
% data(:,1)=(0:pi/1000:2*pi)';
% data(:,2)=cos(data(:,1))+cos(2*data(:,1))+cos(3*data(:,1));
% data(:,3)=data(:,2);
% data(:,4)=data(:,2).^2;
n=length(data);
% data(:,1)=delta_t*(0:n-1);
fs=1/(data(2,1)-data(1,1));
k=0.02*fs;
br_harm=40;% broj prikazanih harmonika
a=1;%pocetni uzorak (NE Mjenjaj!)
b=n;%zadnji uzorak
auto_period=1;%automatsk traženje perioda -1, rucno -0
mjerenje=1

S.FontSize=12;
S.FontWeight='bold';

%      data(:,(mjerenje-1)*6+2)=filtriraj([data(:,(mjerenje-1)*6+1)
data(:,(mjerenje-1)*6+2)]);
%      data(:,(mjerenje-1)*6+4)=filtriraj([data(:,(mjerenje-1)*6+3)
data(:,(mjerenje-1)*6+4)]);

% subplot(2,1,1);
% plot(data(:,1)-min(data(:,1)),data(:,(mjerenje-1)*6+2),'linewidth',2);
% subplot(2,1,2);
% plot(data(:,1)-min(data(:,1)),data(:,(mjerenje-1)*6+4),'linewidth',2);

if(auto_period==1)

[estimirano_best,estimiranoAll,gof]=OdrediPeriod_v1([1:n].',data(:,(mjerenje-
1)*4+2),b);
    b=round(2*pi/estimirano_best);
end

Br_perioda=floor(n/b);
b=b*Br_perioda;

figure(1);
subplot(2,1,1);
plot(data(a:b,1)-min(data(:,1)),data(a:b,(mjerenje-1)*4+2),'*g');
hold on;grid on;
plot(data(:,1)-min(data(:,1)),data(:,(mjerenje-1)*4+2));
```

Ovo je prva stranica koda od tri stranice koda, a ostatak koda nalazi se na CD-u.