

# Metoda mjerenja remanentnog magnetskog toka zavojnice sa željeznom jezgrom

---

Vukadin, Bernarda

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:200:984874>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**METODA MJERENJA REMANENTNOG  
MAGNETSKOG TOKA ZAVOJNICE  
SA ŽELJEZONOM JEZGROM**

**Završni rad**

**Bernarda Vukadin**

**Osijek, 2018.**

## Sadržaj

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
<b>2. REMANENTNI MAGNETSKI TOK .....</b>	<b>2</b>
<b>3. ODREĐIVANJE REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA.....</b>	<b>6</b>
3.1. Metoda mjerenja .....	7
3.2. Rezultati mjerenja.....	9
3.3. Analiza rezultata mjerenja .....	24
<b>4. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>25</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>26</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>27</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>28</b>

# 1. UVOD

Zavojnice, a pogotovo transformatori imaju važnu ulogu u elektroenergetskom sustavu. Bez obzira na velike prednosti koje nastaju njihovim korištenjem, postoje i određeni nedostaci. Prilikom uklopa zavojnice ili neopterećenog energetskog transformatora, javljaju se udarne struje koje dovode do raznih problema kao što su nepravilan rad zaštite, što može uzrokovati ispad transformatora u prijenosnom i distribucijskom sustavu, velika termička i mehanička naprezanja uslijed velike struje, te nestabilnost rada sustava u cjelini. Naravno, prethodno navedene pojave potrebno je svesti na minimum. Jedan od načina rješavanja problema je poznavanje remanentnog ili zaostalog magnetskog toka u feromagnetskoj jezgri. Poznavanjem remanentnog toka učinkovito se smanjuje struja uklopa koja može doseći vrijednosti deseterostrukog iznosa nazivne struje.

U svrhu određivanja optimalnog trenutka uklopa prekidača preko kojega se napaja zavojnica ili primar transformatora, u ovom radu prezentirana je metoda mjerenja remanentnog magnetskog toka uz pomoć mjerenja napona i struje zavojnice sa željeznom jezgrom za različite trenutke isklopa sklopke te obrade dobivenih mjernih veličina u programskom paketu MATLAB.

U drugom poglavlju ovoga rada definiran je magnetski tok kao fizikalna veličina, kao i pojam remanentnog magnetskog toka. U trećem poglavlju opisan je način određivanja remanentnog toka, predstavljena metoda mjerenja, te su prikazani i analizirani rezultati mjerenja. U četvrtom poglavlju izveden je zaključak ovoga rada.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada je definirati remanentni magnetski tok te navesti primjere iz prakse u kojima je važan utjecaj remanentnog magnetskog toka. Nadalje, detaljno opisati metodu mjerenja remanentnog magnetskog toka te izvršiti mjerenja remanentnog magnetskog toka na zavojnici sa željeznom jezgrom, odnosno neopterećenom transformatoru.

## 2. REMANENTNI MAGNETSKI TOK

Magnetski tok je ukupni broj magnetskih silnica koje prolaze kroz neku površinu. Označava se grčkim slovom  $\varphi$ , a jedinica za njegovo mjerenje je veber (Wb) [1]. Tok homogenog magnetskog polja kroz neku površinu koja je okomita na magnetske silnice je:

$$\varphi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS}, \quad (2-1)$$

gdje je:

$\varphi$  – magnetski tok [Wb],

$B$  – magnetska indukcija [T],

$S$  – površina presjeka [ $m^2$ ].

Općenito, magnetski tok računa se kao:

$$\varphi = \int_0^t \frac{1}{N} u_L(\tau) d\tau + \varphi(0), \quad (2-2)$$

gdje je:

$\varphi$  – magnetski tok [Wb],

$N$  – broj zavoja,

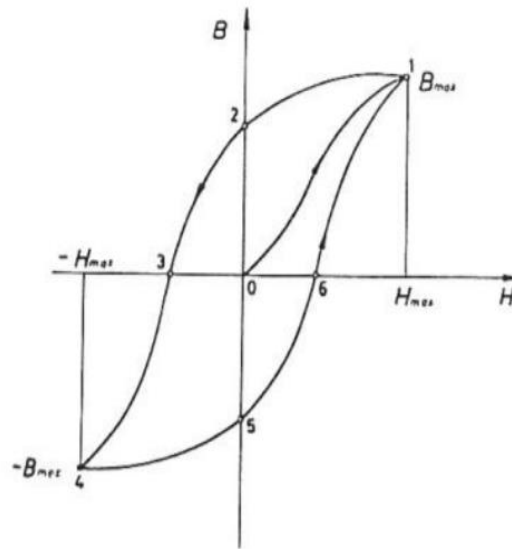
$u_L$  – napon induktiviteta [V].

Određeni feromagnetski materijali imaju svojstvo da nakon isključenja napajanja u njima ostaje određeni istosmjerni magnetski tok koji se naziva remanentnim ili zaostalim magnetskim tokom.

Remanentni magnetski tok je konstantan i nemoguće ga je mjeriti uobičajenim metodama za mjerenje toka. Na njega utječu brojni faktori kao što su tip jezgre, magnetski materijal od kojeg je jezgra izrađena te paraziti kapaciteti i eventualni kapaciteti u blizini transformatora. Neki od materijala koji se koriste pri izradi jezgre su dinamo lim te meki i tvrdi čelik.

U praksi, remanentni magnetski tok najveće probleme može stvoriti prilikom uklopa neopterećenog transformatora. U normalnom radu neopterećenog transformatora, magnetski tok mijenja se ovisno o naponu napajanja prema (2-1). Nadalje, struja magnetiziranja mijenja se u

ovisnosti o magnetskom toku po magnetskoj karakteristici materijala od kojeg je načinjena jezgra. Ova magnetska karakteristika naziva se još i petlja histereze,  $\varphi$ - $i$  karakteristika, odnosno  $B$ - $H$  karakteristika, ovisno o tome koje fizikalne veličine se nalaze na osima. Međutim, neovisno o tome, sama karakteristika uvijek ima isti oblik, bez obzira bila ona  $\varphi$ - $i$  ili  $B$ - $H$  karakteristika.

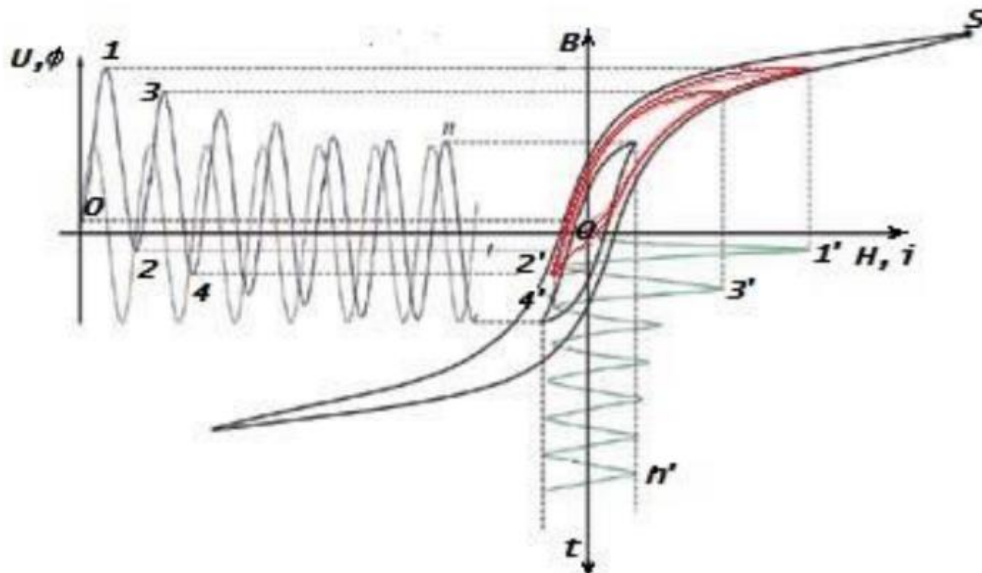


**Sl. 2.1.**  $B$ - $H$  karakteristika željezne jezgre [3].

Na slici 2.1. prikazana je  $B$ - $H$  karakteristika željezne jezgre koja zapravo izgleda isto kao i prethodno spomenuta  $\varphi$ - $i$  karakteristika. Dakle, zamijeni li se magnetski tok ( $\varphi$ ) s magnetskom indukcijom ( $B$ ) te jakost struje ( $i$ ) s jakošću magnetskog polja ( $H$ ), uz pripadajuće konstante proporcionalnosti, dobije se karakteristika prikazana na slici 2.1.

Uklopi li se transformator u trenutku kada je remanentni magnetski tok jednak nuli, odvija se prvo magnetiziranje koje je na slici 2.1. prikazano krivuljom od točke 0 do točke 1. Nadalje, dovođenjem negativnih voltsekundi, odnosno pri narinutom negativnom naponu, magnetski tok u jezgri se smanjuje. Taj proces odvija se od točke 1 do točke 4 na slici 2.1. Međutim, zbog svojstva histereznosti same karakteristike, pri prolasku struje kroz nulu, magnetski tok nije jednak nuli (točka 2), odnosno kada je magnetski tok jednak nuli, struja nije jednaka nuli (točka 3) [3]. Isklapanjem transformatora napon i struja padnu na nulu dok se magnetski tok ne smanjuje na nulu. Spomenuti magnetizam u jezgri naziva se remanentni ili zaostali magnetizam.

Na slici 2.2. prikazana je ovisnost električnih i magnetskih veličina u nelinearnom magnetskom krugu te nekoliko ciklusa unutarnje putanje radne točke koji su označeni crvenom bojom.



**Sl. 2.2.** Načelni prikaz formiranja unutarnje putanje radne točke i prikaz ovisnosti električnih i magnetskih veličina u nelinearnom magnetskom krugu [2].

Kada je zaostali magnetizam jednak nuli i fazni kut napona prilikom uklopa transformatora također jednak nuli, putanja radne točke kreće iz ishodišta  $B$ - $H$  karakteristike. Budući da je prirast magnetske indukcije pozitivan, krivulja magnetiziranja formira se tako da se približava uzlaznoj grani petlje histereze potpunog zasićenja. U točki 1 promijeni se predznak prirasta magnetske indukcije. Pripadajuća struja magnetiziranja prikazana je točkom 1'. Promjenom predznaka prirasta magnetske indukcije mijenja se i smjer krivulje magnetiziranja. Nakon toga se krivulja počinje formirati približavanjem silaznoj grani petlje histereze potpunog zasićenja u točki 2 gdje opet mijenja predznak prirasta magnetske indukcije i smjer krivulje magnetiziranja. Proces se nastavlja i na kraju se formira trajna krivulja magnetiziranja. Petlja histereze za nazivni magnetski tok u ustaljenom stanju nalazi se unutar petlje potpunog zasićenja i simetrična je s obzirom na ishodište koordinatnog sustava [2].

Fazni kut napona za optimalan uklop transformatora, što podrazumijeva uklop bez udarne struje, jednak je faznom kutu napona pri kojemu je transformator isklopljen. Naravno, ovo vrijedi ako se pretpostavi da se remanentni magnetski tok nije promijenio od trenutka isklopa transformatora do njegovog ponovnog uklopa, što ne mora uvijek biti točno. No, ono što sigurno uvijek vrijedi je to da je optimalno uklopiti transformator pri faznom kutu napona koji odgovara vrijednosti

remanentnog magnetskog toka kada se pretpostavi ustaljeno stanje. Optimalan trenutak uklopa prikazan je na slici 2.3. [2].



**Sl. 2.3.** Optimalni trenutak uklopa jednofaznog transformatora uz zaostali magnetski tok [2].

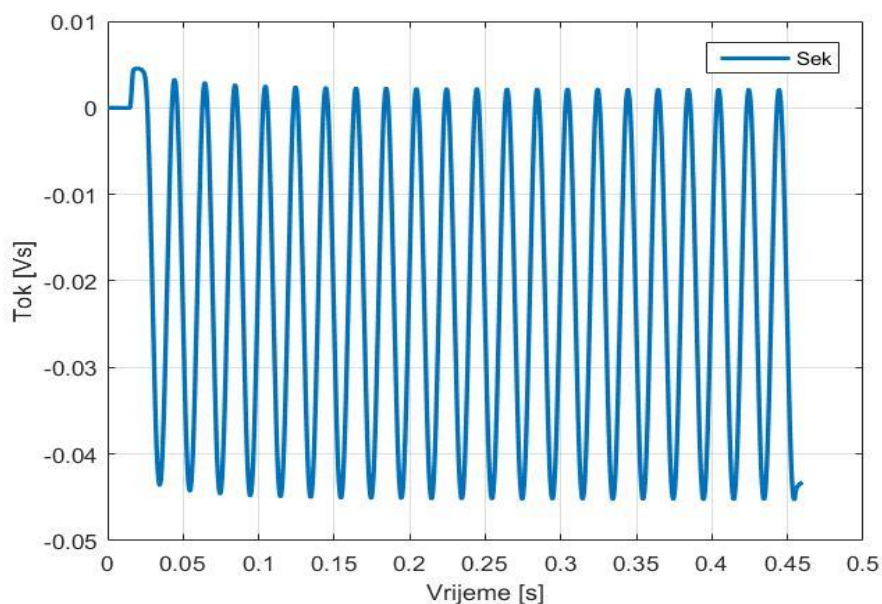
Iz slike 2.3. vidi se da u slučaju optimalnog uklopa transformatora nema prijelaznih pojava, već transformator odmah ulazi u ustaljeno stanje, što je i poželjan slučaj.



### 3. ODREĐIVANJE REMANENTNOG MAGNETSKOG TOKA

Remanentni magnetski tok određuje se iz snimljenih valnih oblika napona i struje primara transformatora, kao i napona otvorenog sekundara transformatora. Prije svega, valni oblik magnetskog toka može se dobiti integriranjem napona otvorenog sekundara ili integriranjem napona induktiviteta na primaru. Međutim, da bi se dobio valni oblik napona induktiviteta primara, potrebno je od snimljenog valnog oblika napona primara oduzeti pad napona na djelatnom otporu. Valni oblik pada napona na otporu može se dobiti kao umnožak valnog oblika struje primara s vrijednošću djelatnog otpora primara koji se može jednostavno odrediti izravnim mjerenjem.

Nakon dobivenog valnog oblika magnetskog toka primjer kojega je prikazan na slici 3.1., potrebno je odrediti početnu vrijednost magnetskog toka, odnosno remanentni tok.

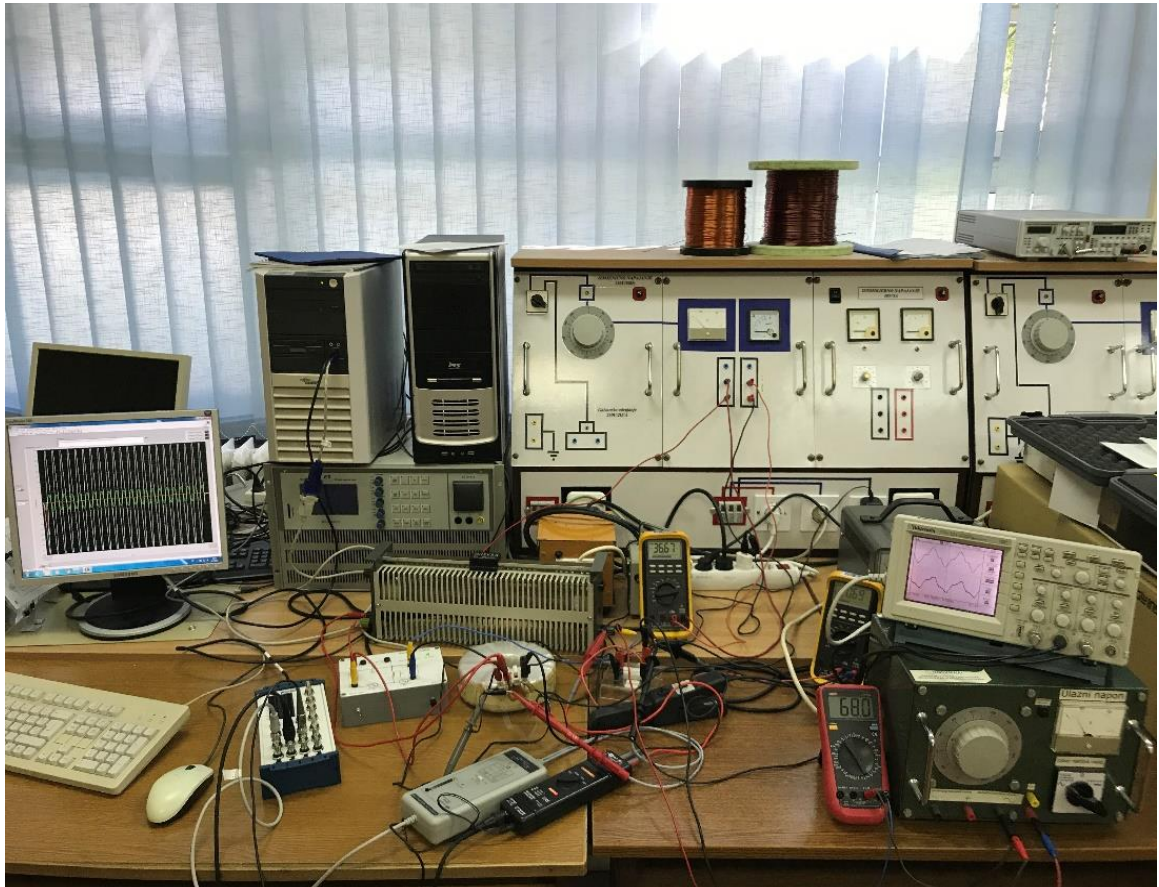


**Sl. 3.1.** *Magnetski tok pri  $U_m = 36$  V i  $\alpha = 0^\circ$ .*

Srednja vrijednost magnetskog toka u ustaljenom stanju mora biti jednaka nuli. Valni oblik prikazan na slici 3.1. počinje od vrijednosti toka jednake nuli jer je upravo početna vrijednost toka ono što se treba odrediti, a to je remanentni tok. Prema tome, uzimajući u obzir prethodno navedeno, upravo je negativna vrijednost srednje vrijednosti magnetskog toka u ustaljenom stanju jednaka traženom remanentnom toku. Dakle, kada se za početnu vrijednost postavi izračunati remanentni tok, valni oblik magnetskog toka poprima prave vrijednosti, odnosno tada će njegova srednja vrijednost u ustaljenom stanju zaista biti jednaka nuli, a što odgovara stvarnom stanju.

### 3.1. Metoda mjerenja

Mjerni krug prikazan je na slici 3.2. Sastoji se od ispitivanog transformatora s torusnom jezgrom, tri promjenjiva izmjenična izvora napajanja, elektronički upravljane sklopke, računala s pripadajućom DAQ karticom i sondama, osciloskopa, te univerzalnih mjernih instrumenata.



Sl. 3.2. Mjerni krug.

Odrađeno je sveukupno 15 pojedinačnih mjerenja u kojima su snimani valni oblici napona i struje primara transformatora u praznom hodu, te napona sekundara. Nadalje, s pomoću programskog paketa MATLAB, iz snimljenih valnih oblika određen je valni oblik magnetskog toka jezgre transformatora integriranjem valnog oblika napona sekundara. Pripadajući kod u MATLAB-u prikazan je na slici 3.3.

```

clear all;close all;clc;

R1=1.4; %Iznos djelatnog otpora primara transformatora [Ohm]

file_name = 'r0m36.mat'; %Mjerenje pri faznom kutu napona uklopa od 0 stupnjeva te pri
postavljenom maksimalnom negativnom remanentnom toku

load(['C:\Users\Bernarda\Desktop\Bernarda Vukadin\FinalnaMjerenja_Matlab\'
file_name]);

t = data(:,1);
u1 = data(:,2);
iL = data(:,4);
u2 = data(:,6);

flux1 = cumtrapz(t,u1-R1*iL); %Magnetski tok izračunat kao integral napona
induktiviteta dobivenog na način da je ukupni napon zavojnice umanjen za pad napona na
djelatnom otporu
flux2 = cumtrapz(t,u2); %Magnetski tok izračunat kao integral napona sekundara
transformatora koji je proporcionalan iznosu toka u jezgri

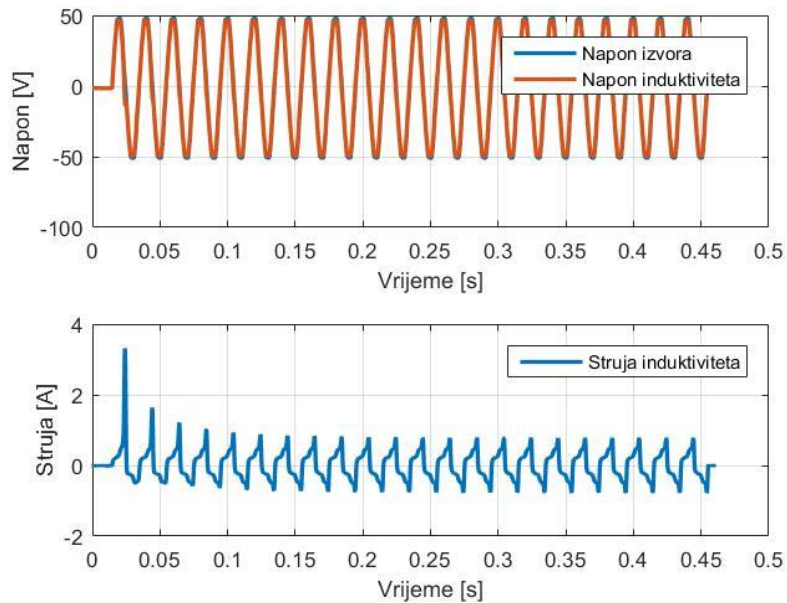
```

**Sl. 3.3.** Kod u MATLAB-u za računanje magnetskog toka u jezgri.

Na početku svakog pojedinačnog mjerenja remanentni magnetski tok u jezgri postavljen je na nulu na način da je napon promjenjivog izmjeničnog izvora s nazivne vrijednosti napona primara transformatora (36 V) postupno snižavan na nultu vrijednost. Pri tome se petlja histereze smanjuje iz periode u periodu sve dok radna točka ne bude postavljena u ishodište  $\varphi$ - $i$  karakteristike. Nakon toga, s pomoću elektroničke sklopke postavljen je remanentni tok na željenu vrijednost. Za magnetiziranje je korišten drugi promjenjivi izmjenični izvor. Elektronička sklopka programirana je tako da isklopi pri prolasku struje primara transformatora kroz nulu. Ako isklopi pri prolasku struje kroz nulu dok je magnetski tok pozitivan, u jezgri će ostati pozitivan remanentni tok. U suprotnom, u jezgri će ostati negativan magnetski tok čija vrijednost ovisi o iznosu napona promjenjivog izmjeničnog izvora kojim se magnetizira jezgra. U konačnici, primar transformatora uklapa se na treći promjenjivi izmjenični izvor pri nazivnom naponu primara, uz kontrolu faznog kuta uklopa s pomoću elektroničke sklopke.

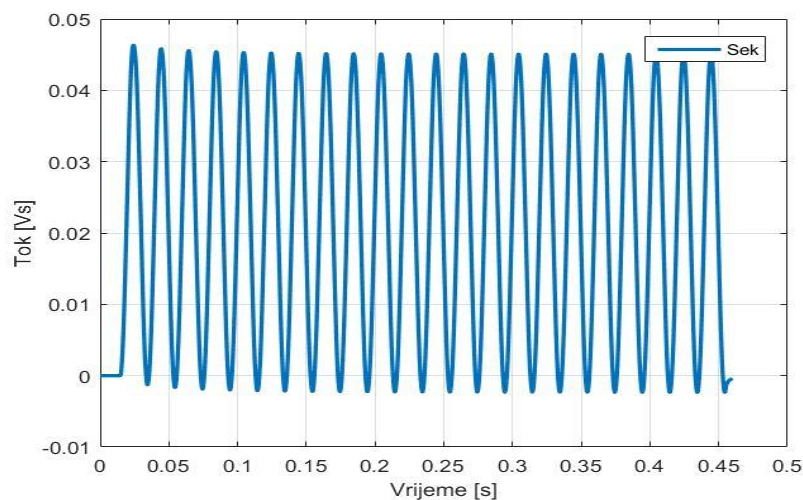
## 3.2. Rezultati mjerenja

Na slici 3.4. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od -36 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $0^\circ$ .



Sl. 3.4. Snimljeni valni oblici pri  $U_m = -36$  V i  $\alpha = 0^\circ$ .

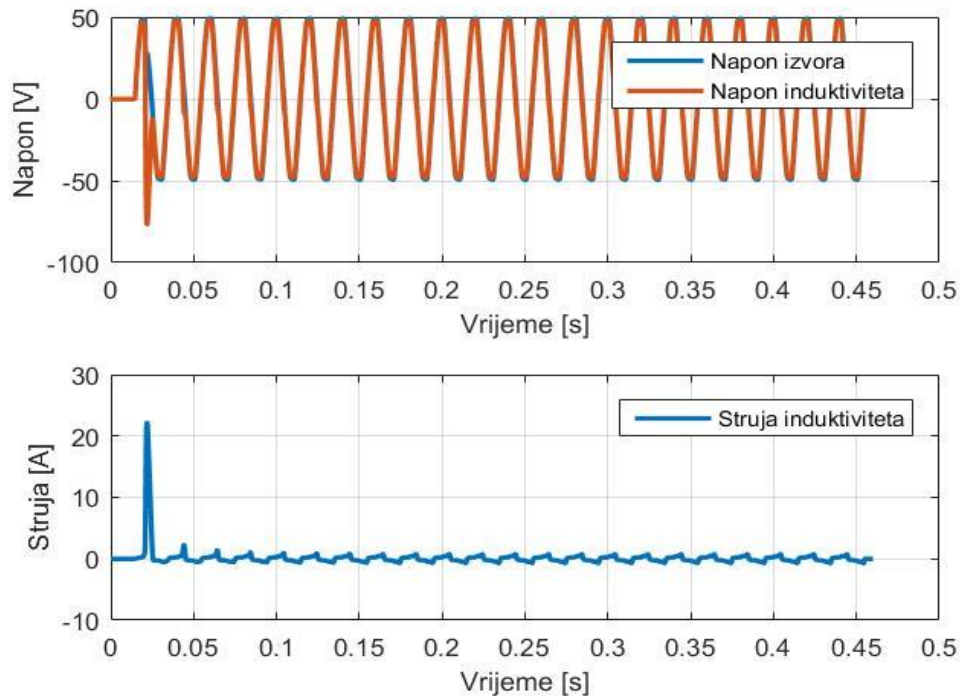
Na slici 3.5. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi 21,4 mWb, što znači da je remanentni tok jednak -21,4 mWb.



Sl. 3.5. Magnetski tok pri  $U_m = -36$  V i  $\alpha = 0^\circ$ .

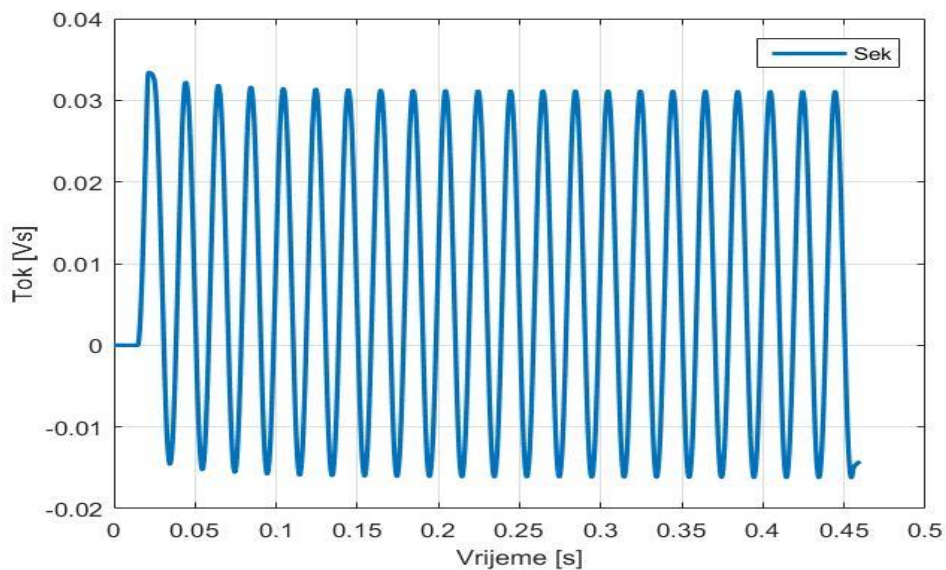


Na slici 3.6. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od -18 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $0^\circ$ .



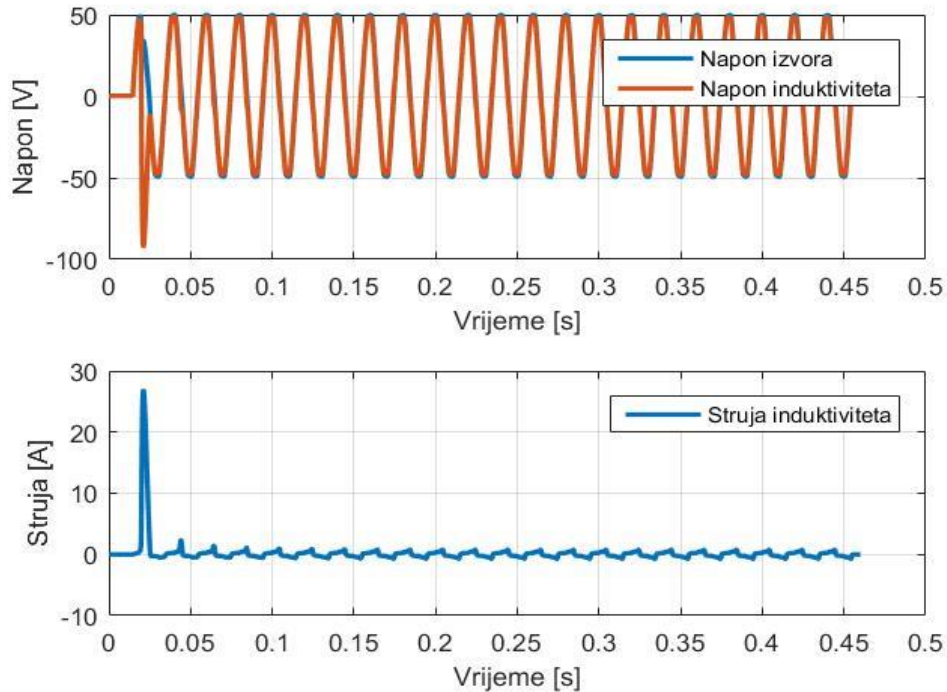
**Sl. 3.6.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = -18$  V i  $\alpha = 0^\circ$ .

Na slici 3.7. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi 7,5 mWb, što znači da je remanentni tok jednak -7,5 mWb.



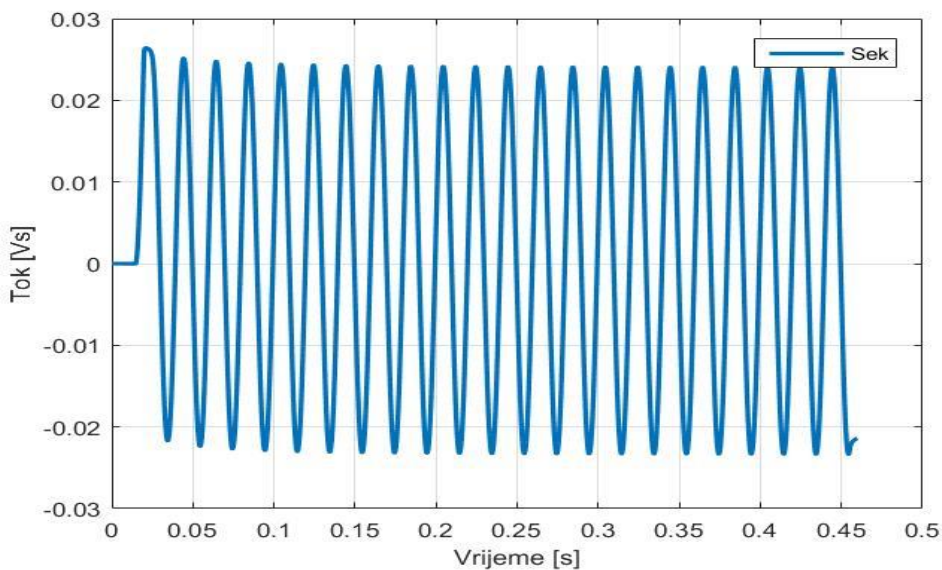
**Sl. 3.7.** Magnetski tok pri  $U_m = -18$  V i  $\alpha = 0^\circ$ .

Na slici 3.8. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od 0 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $0^\circ$ .



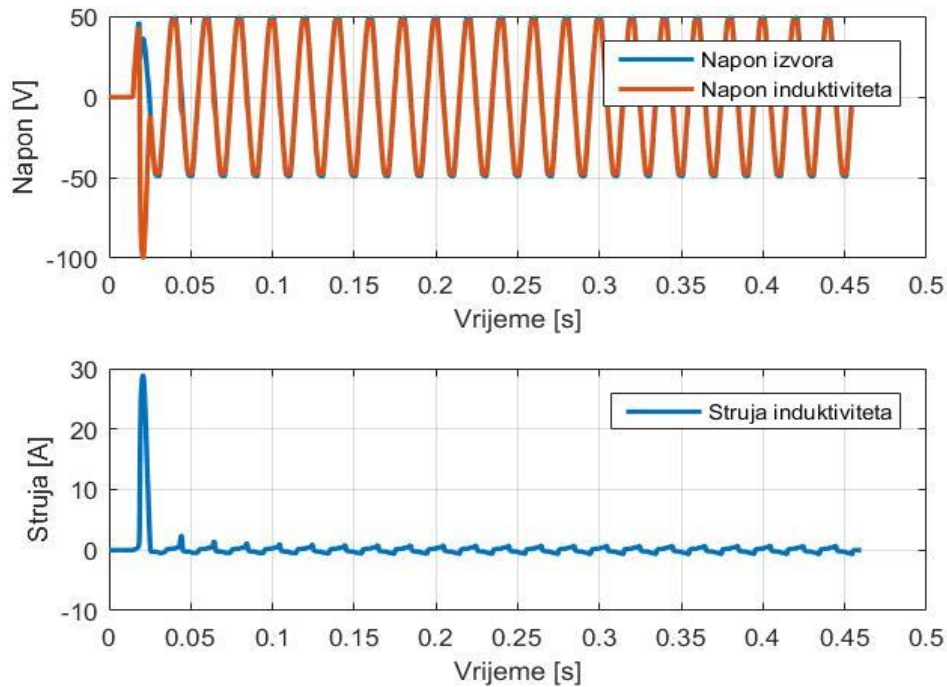
**Sl. 3.8.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = 0$  V i  $\alpha = 0^\circ$ .

Na slici 3.9. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi 0,34 mWb, što znači da je remanentni tok jednak -0,34 mWb.



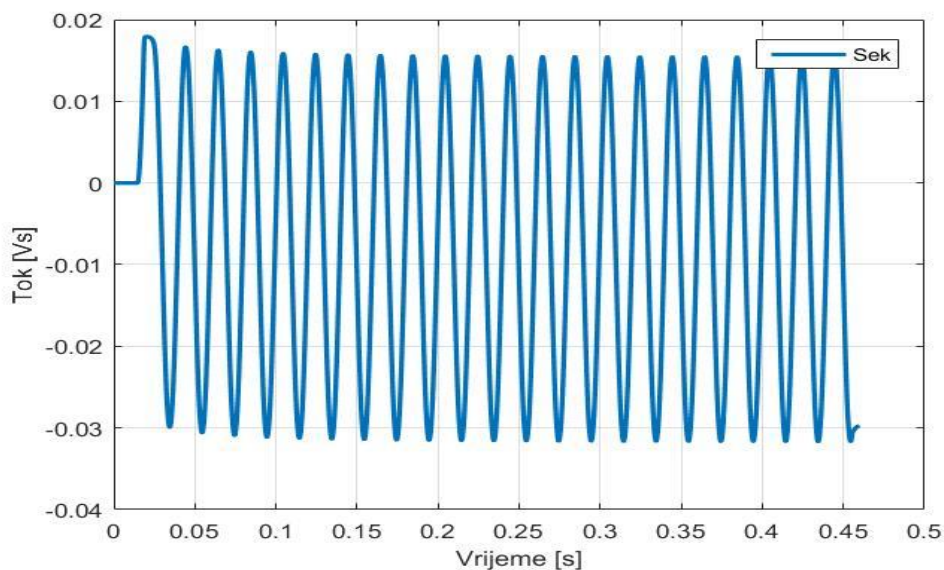
**Sl. 3.9.** Magnetski tok pri  $U_m = 0$  V i  $\alpha = 0^\circ$ .

Na slici 3.10. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od 18 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $0^\circ$ .



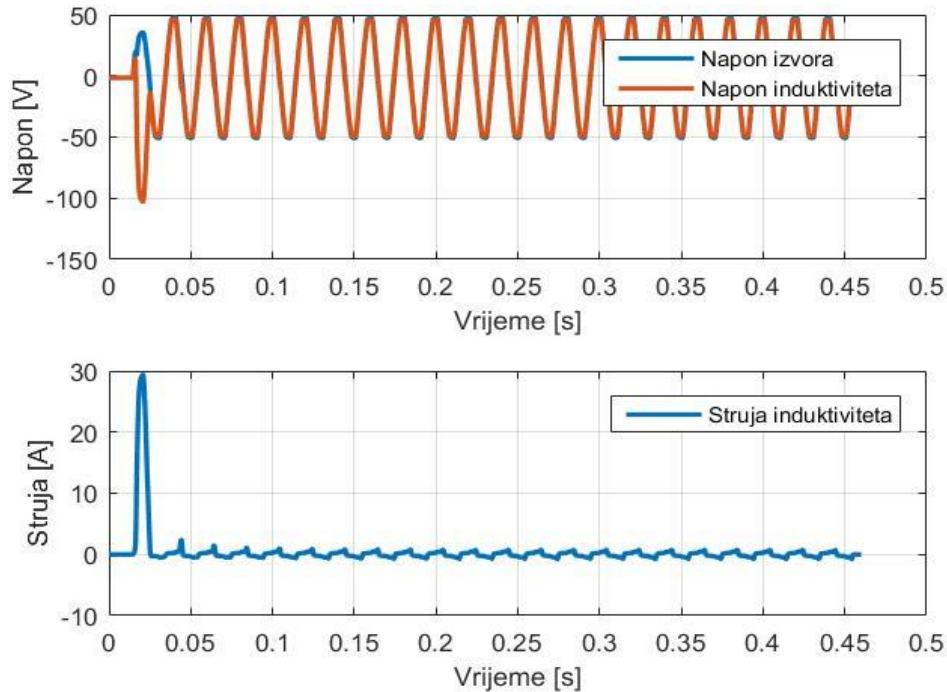
**Sl. 3.10.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = 18 \text{ V}$  i  $\alpha = 0^\circ$ .

Na slici 3.11. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi  $-8,1 \text{ mWb}$ , što znači da je remanentni tok jednak  $8,1 \text{ mWb}$ .



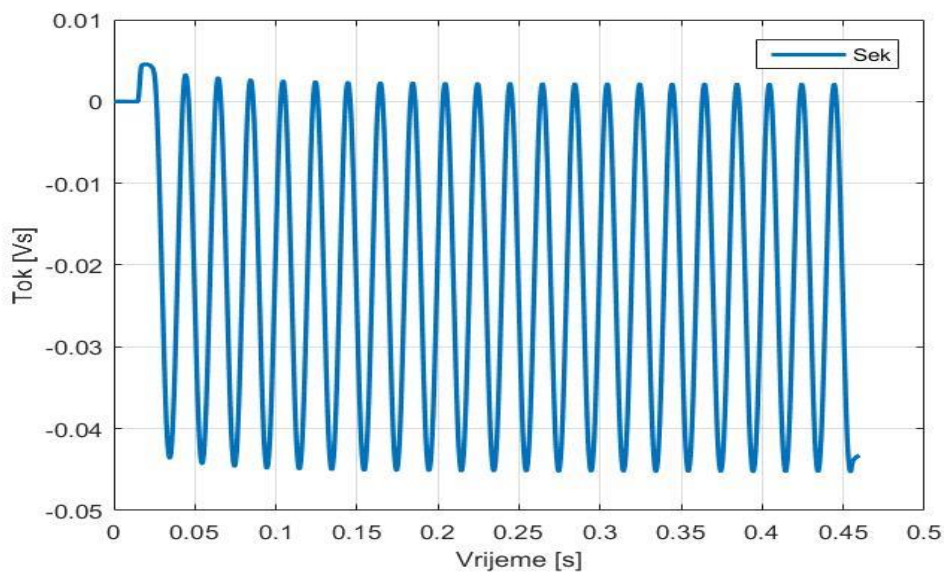
**Sl. 3.11.** Magnetski tok pri  $U_m = 18 \text{ V}$  i  $\alpha = 0^\circ$ .

Na slici 3.12. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od 36 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $0^\circ$ .



**Sl. 3.12.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = 36 \text{ V}$  i  $\alpha = 0^\circ$ .

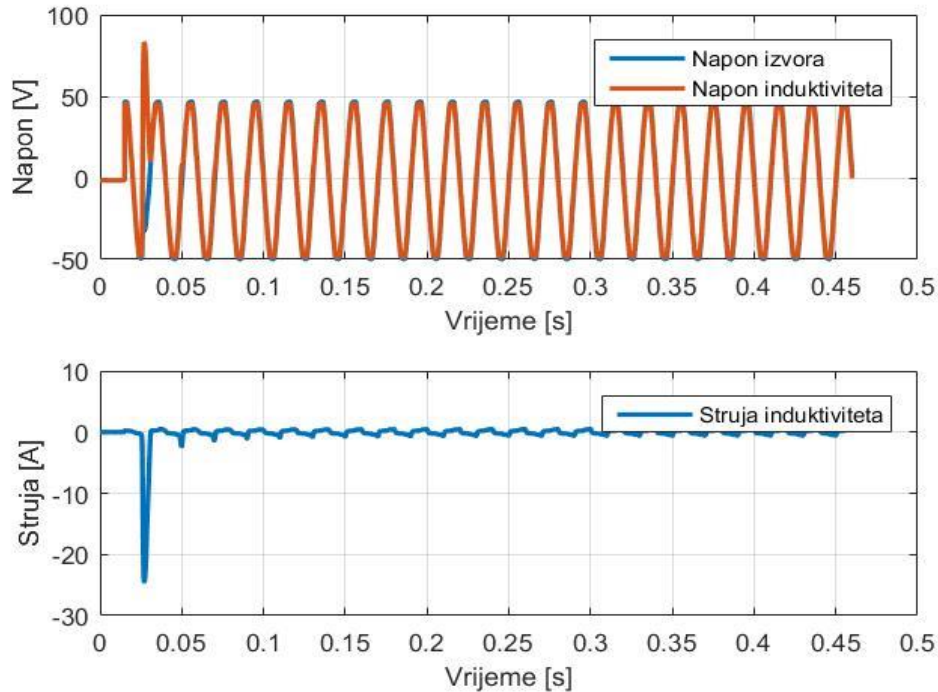
Na slici 3.13. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi -21,6 mWb, što znači da je remanentni tok jednak 21,6 mWb.



**Sl. 3.13.** Magnetski tok pri  $U_m = 36 \text{ V}$  i  $\alpha = 0^\circ$ .

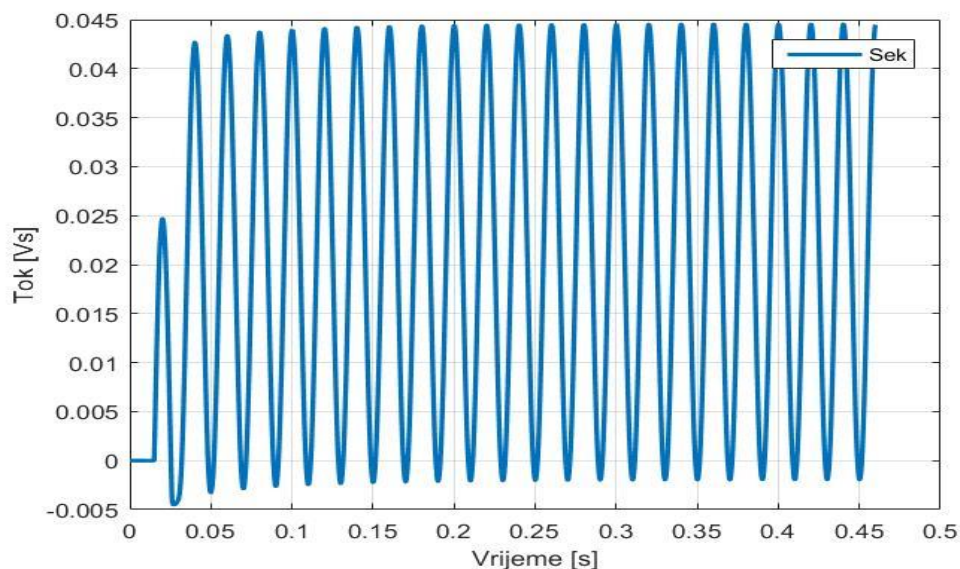


Na slici 3.14. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od -36 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $90^\circ$ .



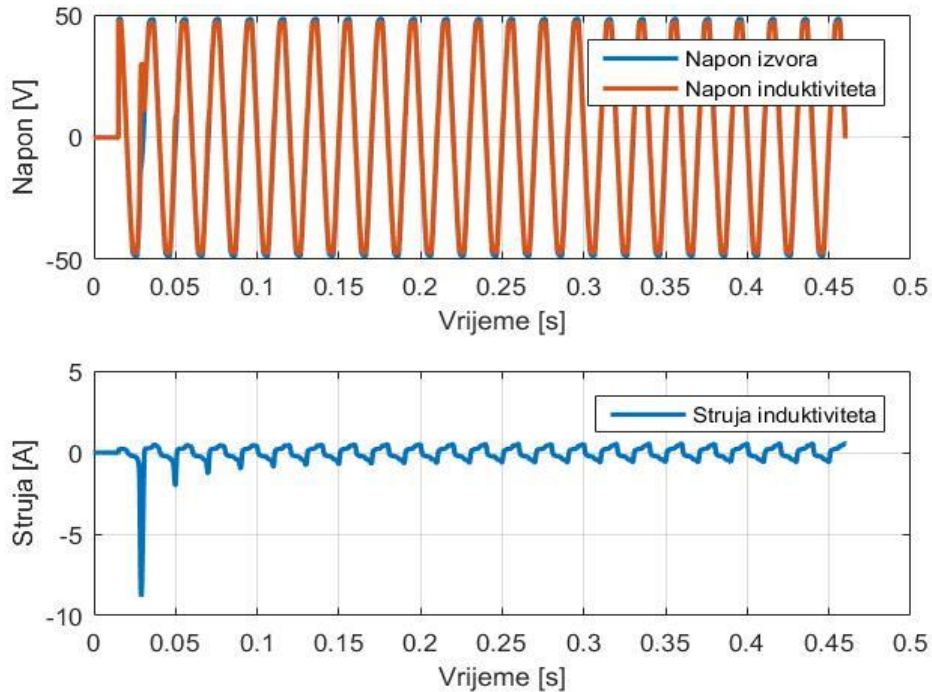
**Sl. 3.14.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = -36$  V i  $\alpha = 90^\circ$ .

Na slici 3.15. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi 21,3 mWb, što znači da je remanentni tok jednak -21,3 mWb.



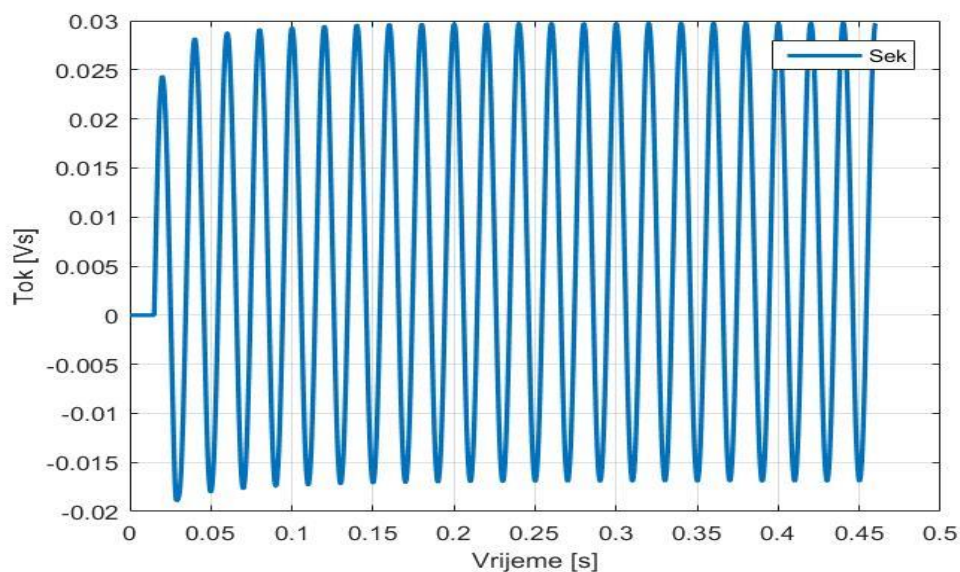
**Sl. 3.15.** Magnetski tok pri  $U_m = -36$  V i  $\alpha = 90^\circ$ .

Na slici 3.16. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od -18 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $90^\circ$ .



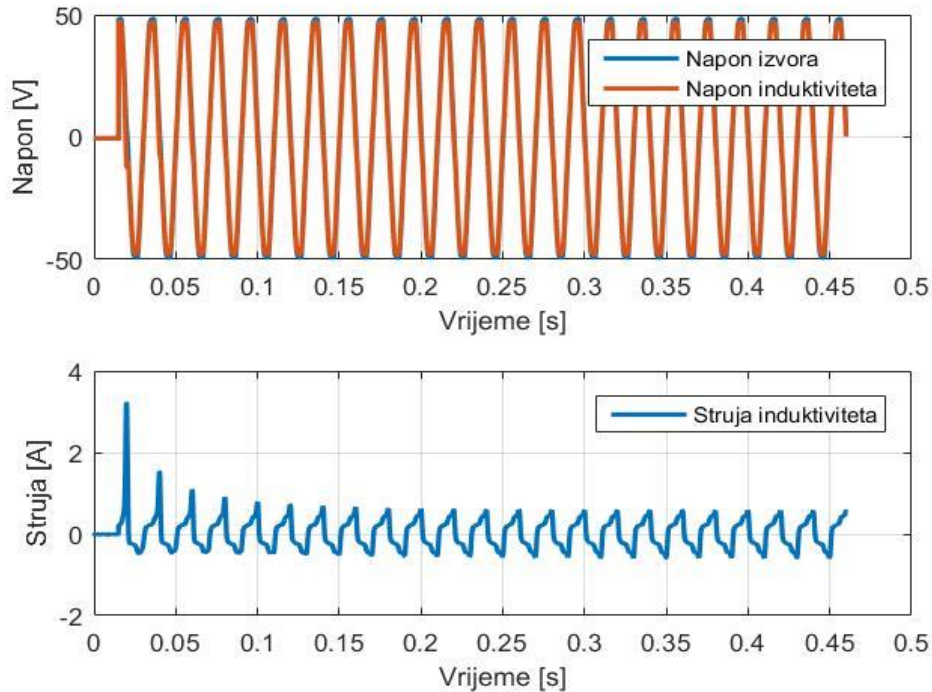
**Sl. 3.16.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = -18$  V i  $\alpha = 90^\circ$ .

Na slici 3.17. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi 6,4 mWb, što znači da je remanentni tok jednak -6,4 mWb.



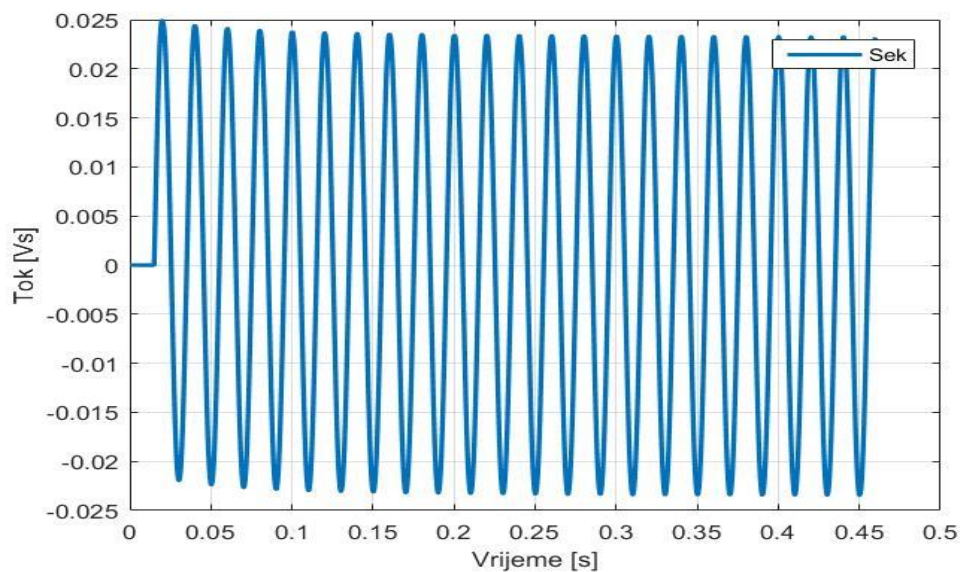
**Sl. 3.17.** Magnetski tok pri  $U_m = -18$  V i  $\alpha = 90^\circ$ .

Na slici 3.18. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od 0 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $90^\circ$ .



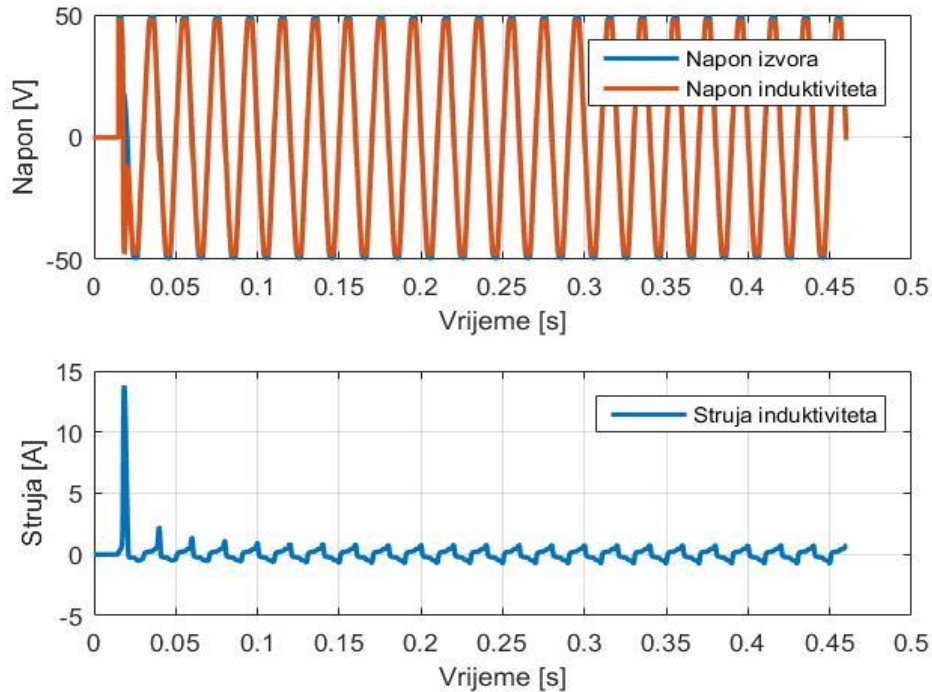
**Sl. 3.18.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = 0$  V i  $\alpha = 90^\circ$ .

Na slici 3.19. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi  $-0,09$  mWb, što znači da je remanentni tok jednak  $0,09$  mWb.



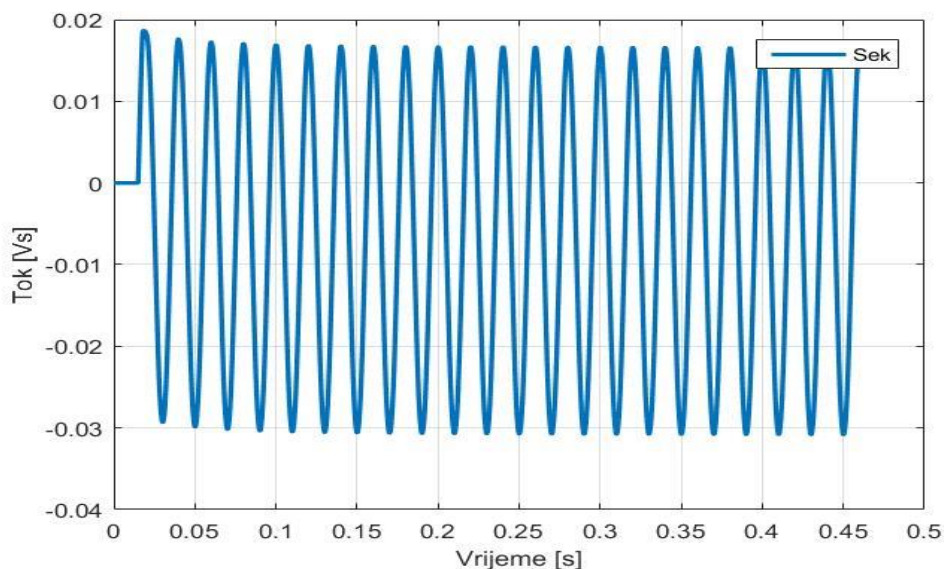
**Sl. 3.19.** Magnetski tok pri  $U_m = 0$  V i  $\alpha = 90^\circ$ .

Na slici 3.20. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od 18 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $90^\circ$ .



**Sl. 3.20.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = 18$  V i  $\alpha = 90^\circ$ .

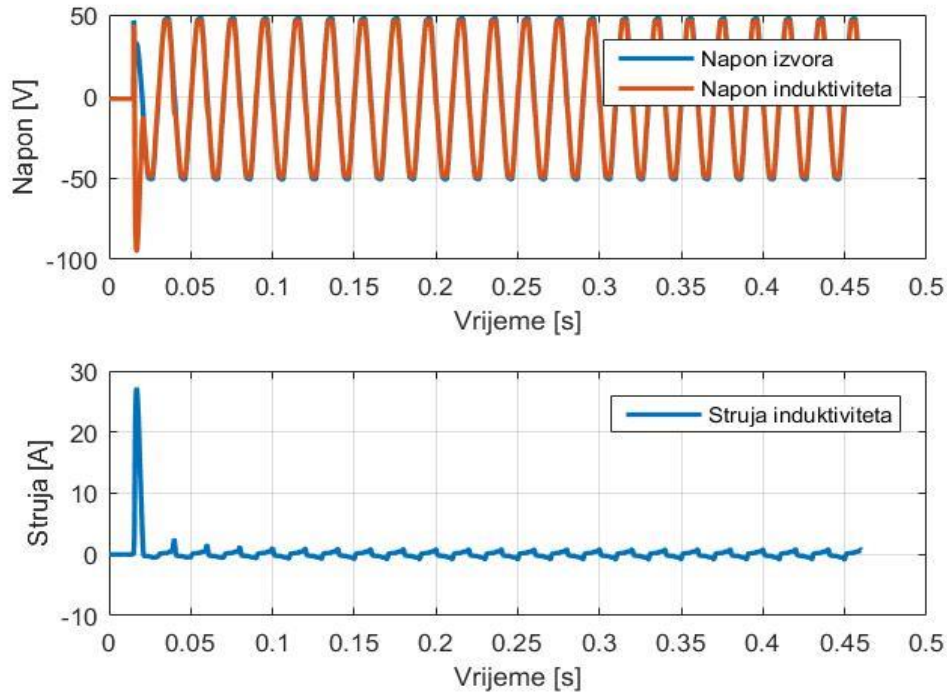
Na slici 3.21. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi -7,1 mWb, što znači da je remanentni tok jednak 7,1 mWb.



**Sl. 3.21.** Magnetski tok pri  $U_m = 18$  V i  $\alpha = 90^\circ$ .

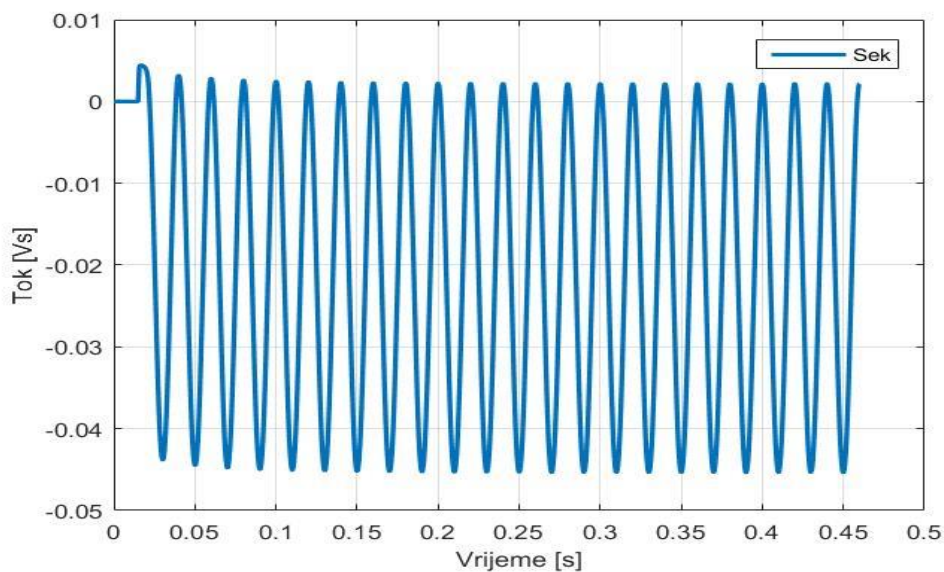


Na slici 3.22. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od 36 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $90^\circ$ .



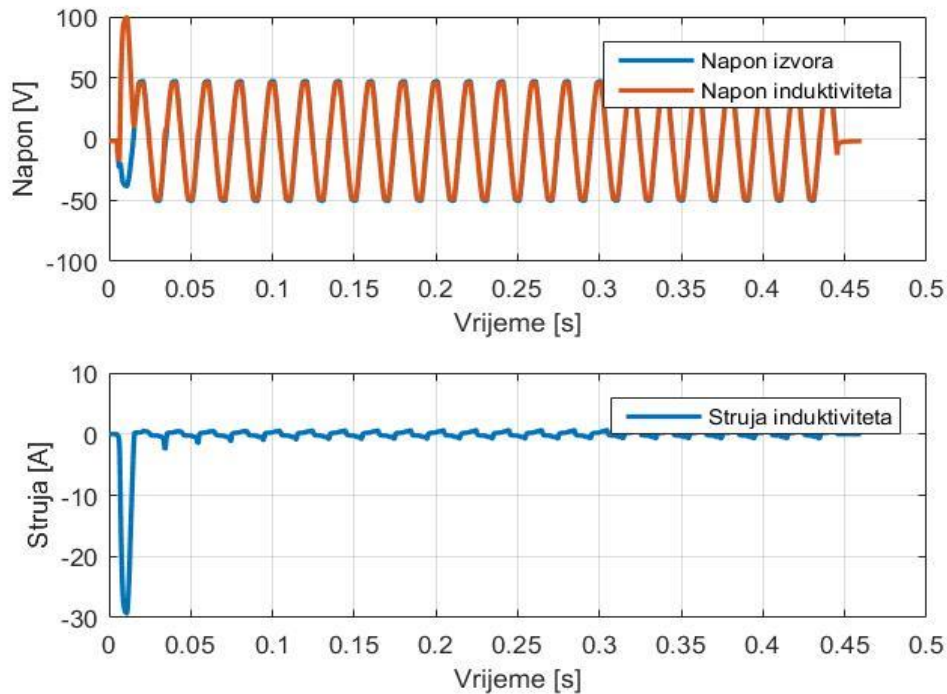
**Sl. 3.22.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = 36$  V i  $\alpha = 90^\circ$ .

Na slici 3.23. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi -21,6 mWb, što znači da je remanentni tok jednak 21,6 mWb.



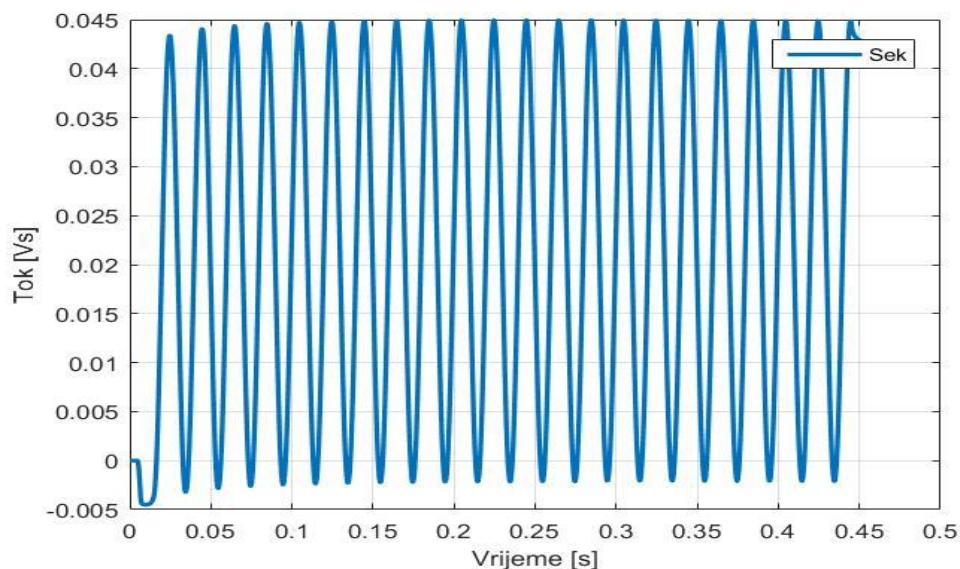
**Sl. 3.23.** Magnetski tok pri  $U_m = 36$  V i  $\alpha = 90^\circ$ .

Na slici 3.24. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od -36 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $180^\circ$ .



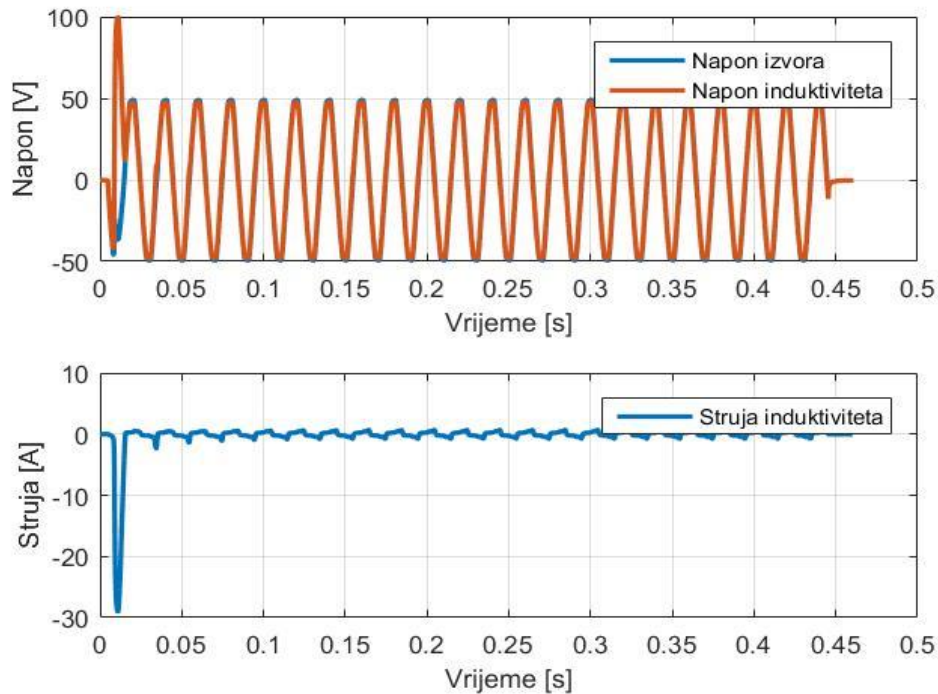
**Sl. 3.24.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = -36$  V i  $\alpha = 180^\circ$ .

Na slici 3.25. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi 21,4 mWb, što znači da je remanentni tok jednak -21,4 mWb.



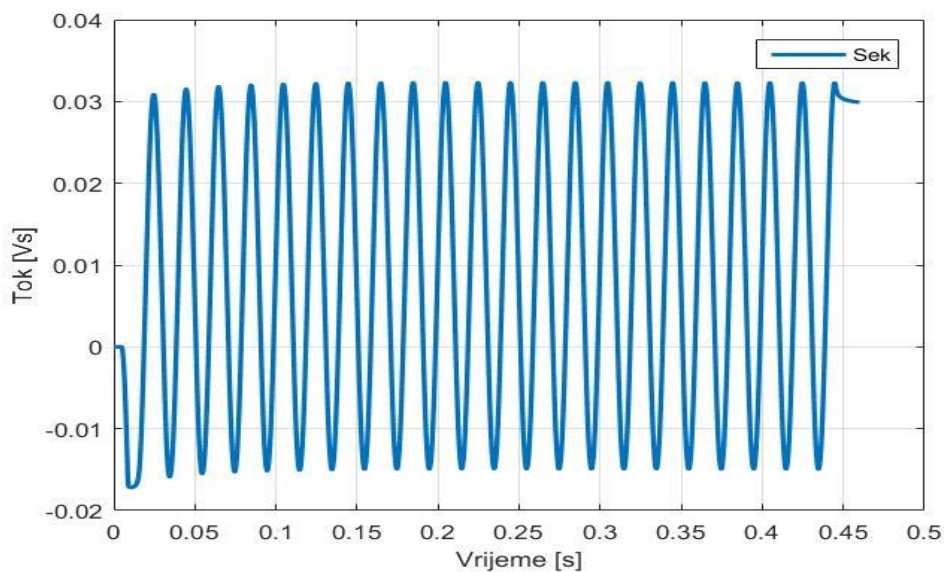
**Sl. 3.25.** Magnetski tok pri  $U_m = -36$  V i  $\alpha = 180^\circ$ .

Na slici 3.26. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od -18 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $180^\circ$ .



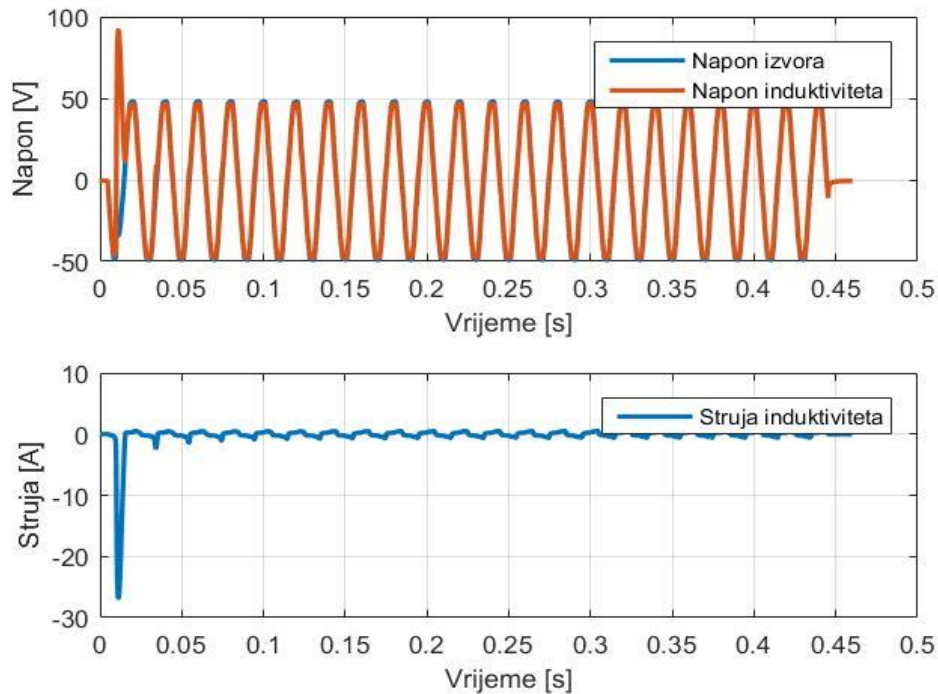
**Sl. 3.26.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = -18$  V i  $\alpha = 180^\circ$ .

Na slici 3.27. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi 8,7 mWb, što znači da je remanentni tok jednak -8,7 mWb.



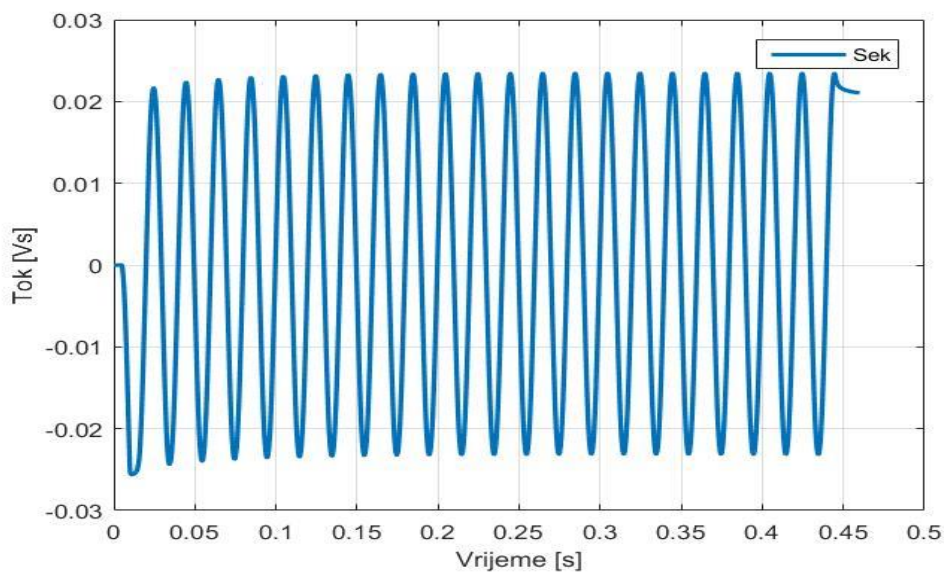
**Sl. 3.27.** Magnetski tok pri  $U_m = -18$  V i  $\alpha = 180^\circ$ .

Na slici 3.28. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od 0 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $180^\circ$ .



**Sl. 3.28.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = 0$  V i  $\alpha = 180^\circ$ .

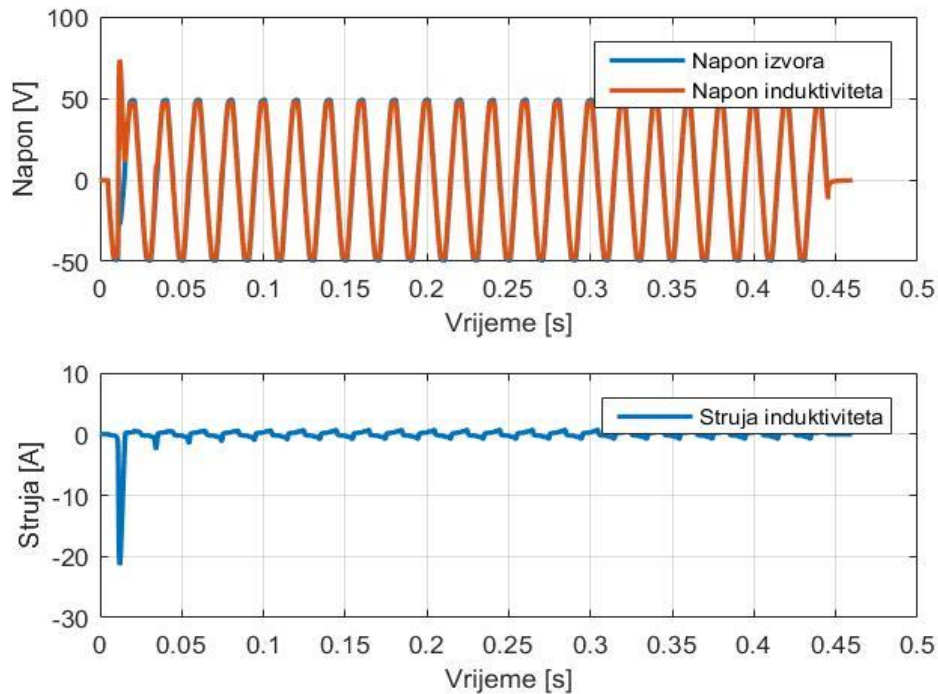
Na slici 3.29. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi 0,16 mWb, što znači da je remanentni tok jednak -0,16 mWb.



**Sl. 3.29.** Magnetski tok pri  $U_m = 0$  V i  $\alpha = 180^\circ$ .

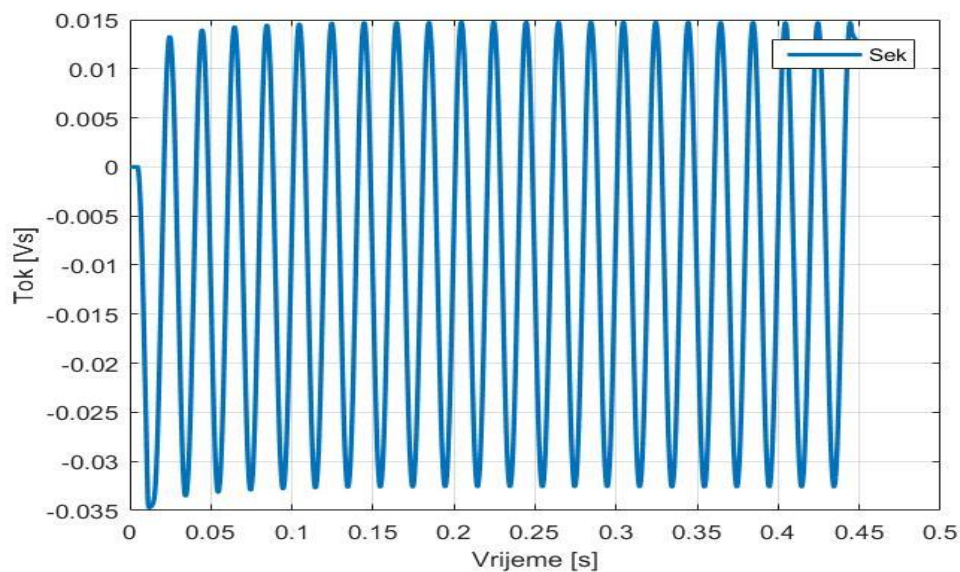


Na slici 3.30. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od 18 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $180^\circ$ .



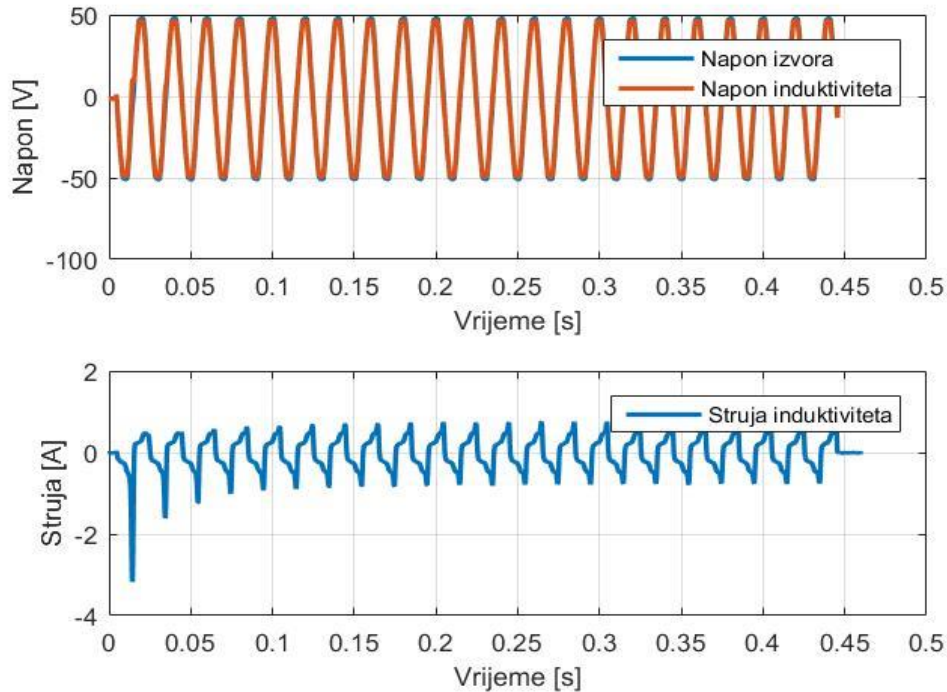
**Sl. 3.30.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = 18 \text{ V}$  i  $\alpha = 180^\circ$ .

Na slici 3.31. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi  $-9,0 \text{ mWb}$ , što znači da je remanentni tok jednak  $9,0 \text{ mWb}$ .



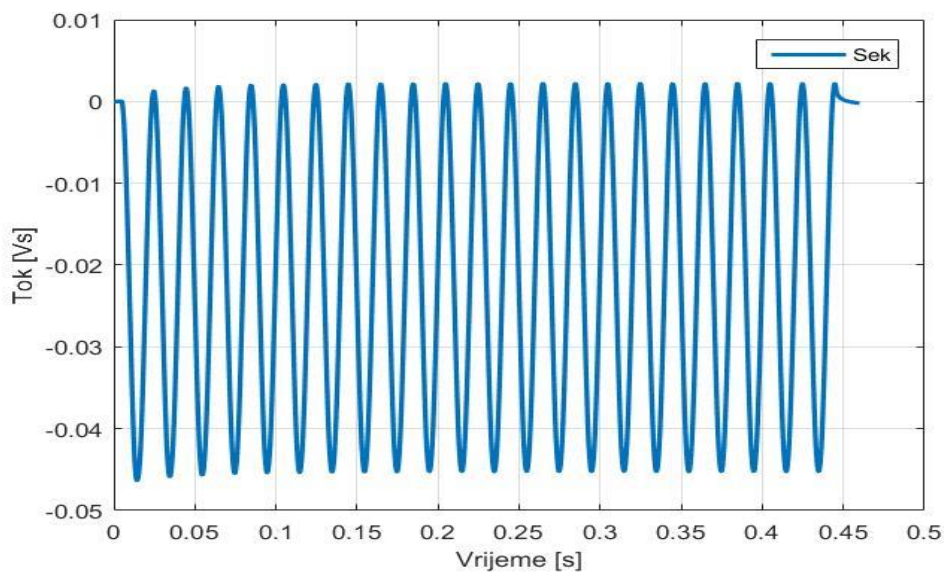
**Sl. 3.31.** Magnetski tok pri  $U_m = 18 \text{ V}$  i  $\alpha = 180^\circ$ .

Na slici 3.32. prikazani su snimljeni valni oblici struje i napona induktiviteta te napona izvora pri nazivnoj vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od 36 V te faznom kutu napona ( $\alpha$ ) pri uklopu transformatora od  $180^\circ$ .



**Sl. 3.32.** Snimljeni valni oblici pri  $U_m = 36$  V i  $\alpha = 180^\circ$ .

Na slici 3.33. prikazan je valni oblik magnetskog toka zavojnice dobiven integriranjem napona sekundara. Srednja vrijednost remanentnog toka u ustaljenom stanju iznosi  $-21,5$  mWb, što znači da je remanentni tok jednak  $21,5$  mWb.



**Sl. 3.33.** Magnetski tok pri  $U_m = 36$  V i  $\alpha = 180^\circ$ .

### 3.3. Analiza rezultata mjerenja

Izračunate vrijednosti remanentnog toka pri istom naponu magnetiziranja bi trebale biti približno jednake neovisno o kutu napona pri uklopu. Naravno, to vrijedi i za napone magnetiziranja iste apsolutne vrijednosti, ali suprotnog predznaka, pri čemu bi, naravno, i vrijednosti remanentnog toka trebale imati približno jednaku apsolutnu vrijednost, ali suprotni predznak.

Tablica 3.1. prikazuje izračunate vrijednosti remanentnog magnetskog toka pri naponima magnetiziranja primara transformatora od -36 V, -18 V, 0 V, 18 V i 36 V, te kutovima uklopa od 0°, 90° i 180°.

**Tab. 3.1.** Vrijednosti remanentnog magnetskog toka ( $\phi_r$ ) za različite napone magnetiziranja ( $U_m$ ) i kutove uklopa ( $\alpha$ ).

Napon magnetiziranja ( $U_m$ )	Kut uklopa ( $\alpha$ )		
	0°	90°	180°
-36 V	-21,4 mWb	-21,3 mWb	-21,4 mWb
-18 V	-7,5 mWb	-6,4 mWb	-8,7 mWb
0 V	-0,34 mWb	0,09 mWb	-0,16 mWb
18 V	8,1 mWb	7,1 mWb	9,0 mWb
36 V	21,6 mWb	21,6 mWb	21,5 mWb

Iz tablice 3.1. može se primijetiti kako su dobivene vrijednosti remanentnog magnetskog toka za svaki pojedini napon magnetiziranja, pri različitim kutovima, približno jednake. Za iste vrijednosti napona magnetiziranja, ali suprotnog predznaka, razlika među dobivenim vrijednostima remanentnog magnetskog toka gotovo je neznatna.

## 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je problem određivanja optimalnog trenutka uklopa zavojnice ili neopterećenog energetskog transformatora. Opisani su pojam i metoda mjerenja remanentnog magnetskog toka s pomoću koje se smanjuju udarne struje prilikom uklopa.

Za postupak određivanja remanentnog magnetskog toka potrebno je snimiti valne oblike napona i struje primara transformatora u praznom hodu te napona sekundara. Integriranjem valnog oblika napona sekundara dobije se valni oblik magnetskog toka jezgre transformatora. Remanentni tok odgovara negativnoj vrijednosti srednje vrijednosti magnetskog toka u ustaljenom stanju nakon uklopa. Važno je napomenuti kako nakon određivanja remanentnog toka ovom metodom, isti taj remanentni tok biva promijenjen, odnosno izračunata vrijednost ne može se primijeniti za određivanje optimalnog trenutka uklopa zavojnice ili neopterećenog transformatora. Međutim, vrijednost ove metode je u tome da može služiti kao pouzdana metoda određivanja remanentnog toka za usporedbu, odnosno provjeru drugih metoda. Također, ova metoda može se koristiti u nizu drugih primjena u kojima je važno odrediti remanentni tok.

Provedbom mjerenja te usporedbom dobivenih rezultata za nazivne vrijednosti napona magnetiziranja primara transformatora od -36 V, -18 V, 0 V, 18 V i 36 V pri uklopu transformatora od 0°, 90° i 180° može se zaključiti kako iznos remanentnog magnetskog toka ima očekivane vrijednosti. To znači da su dobivene vrijednosti remanentnog magnetskog toka za svaki pojedini napon magnetiziranja, pri različitim kutovima, približno jednake. Za iste vrijednosti napona magnetiziranja, ali suprotnog predznaka, izračunati remanentni tok, uvažavajući suprotni predznak, gotovo je jednak.

Iz svega navedenoga može se zaključiti da su rezultati mjerenja očekivani, što znači da je metoda mjerenja remanentnog magnetskog toka dobro koncipirana i da daje točne rezultate.

## LITERATURA

- [1] E. Stanić, Osnove elektrotehnike, Školska knjiga, Zagreb, 2001.
- [2] O. Bego, G. Petrović, T. Kilić, Smanjenje udarnih struja uklopa trofaznog energetskeg transformatora, Energija, god. 57(2008), br. 3., str. 350-367, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, R. Boškovića bb 21000 Split Hrvatska, Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb  
<http://journalofenergy.com/archive/0803.pdf>  
(Pristupljeno 26. kolovoza 2018.)
- [3] E. Stanić, Osnove elektroenergetike, Školska knjiga, Zagreb, 1992.

## SAŽETAK

U ovom radu opisana je pojava udarnih struja prilikom uklopa zavojnice s feromagnetskom jezgrom ili neopterećenog transformatora. Udarne struje mogu se izbjeći određivanjem remanentnog magnetskog toka. Valni oblik magnetskog toka dobije se integriranjem napona sekundarnog namota u praznom hodu. Iznos remanentnog magnetskog toka jednak je negativnoj vrijednosti srednje vrijednosti toka u ustaljenom stanju nakon uklopa.

**Ključne riječi:** remanentni magnetski tok, udarna struja, uklop neopterećenog transformatora

## Method of Measuring The Remanent Magnetic Flux of The Iron Core Coil

### ABSTRACT

Inrush current that occur during the energization of a magnetic core coil or a transformer is described in this paper. Inrush current can be avoided by determining remanent magnetic flux. The waveform of the magnetic flux is obtained by integrating voltage waveform of secondary winding of the unloaded transformer. The value of the remanent magnetic flux is equal to negative value of the mean value of magnetic flux in the steady state.

**Keywords:** remanent magnetic flux, inrush current, energization of an unloaded transformer

## **ŽIVOTOPIS**

Bernarda Vukadin rođena je 28. ožujka 1997. godine u Slavonskom Brodu. Nakon završetka Osnovne škole „Matija Gubec“ u Piškorevcima, upisuje Jezičnu gimnaziju Antuna Gustava Matoša u Đakovu. Godine 2015. upisuje sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijek, danas Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Na drugoj godini studija opredjeljuje se za izborni blok elektroenergetika.

---