

ELEKTRIČNA MERENJA
— laboratorijske vežbe —

Vežba broj 4
Merenje impedanse pomoću osciloskopa

ime i prezime: _____

broj indeksa: _____

grupa: _____

datum: _____

vreme: _____

ocena: _____

dežurni: _____

1 Merenje impedanse pomoću osciloskopa

1.1 Potrebni instrumenti i pribor

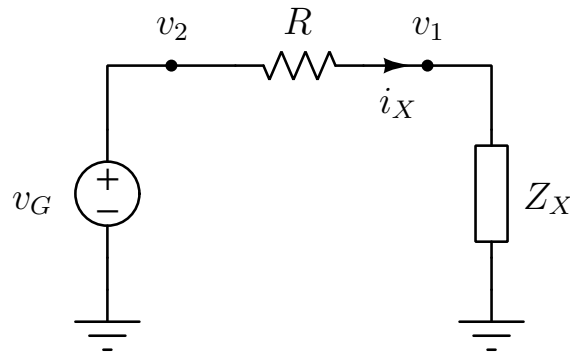
1. generator signala Agilent 33220A sa USB kablom
2. BNC-to-BNC kabl, 1 komad
3. BNC kablovi sa bananskim utikačima, 3 komada
4. osciloskop Tektronix TBS 1052B-EDU sa USB kablom
5. protobord
6. žice za povezivanje na protobordu, 4 komada
7. etalonski otpornik R otpornosti $1\text{ k}\Omega$
8. otpornik R_X otpornosti $\approx 470\ \Omega$
9. kondenzator $C_X = C_1$ kapacitivnosti $\approx 680\text{ nF}$
10. kondenzator C_2 , nepoznate kapacitivnosti
11. kondenzator C_3 , nepoznate kapacitivnosti
12. kondenzator C_4 , nepoznate kapacitivnosti
13. kalem L_1 , nepoznate induktivnosti
14. kalem L_2 , nepoznate induktivnosti
15. kalem L_3 , nepoznate induktivnosti
16. bifilarno motani transformator prenosnog odnosa 1:1, T1
17. transformator prenosnog odnosa 1:1 sa slabom spregom, T2
18. računar sa softverom za vežbu broj 4
19. **studenti treba da imaju USB flash drive kako bi sačuvali rezultate merenja**

1.2 Opis i ciljevi vežbe

U ovoj vežbi vršiće se merenja parametara elemenata električnih kola koja se uglavnom svode na merenje modula impedanse metodom merenja struje i napona. Struja posmatranog elementa će biti određena posredno, merenjem potencijala na krajevima etalonskog otpornika R , prema šemi sa slike 1, gde je nepoznata impedansa označena sa Z_X . Potencijal v_1 , koji se neposredno meri osciloskopom, je napon na nepoznatoj impedansi. Njena struja se određuje posredno, preko izmerenih potencijala v_1 i v_2 kao

$$i_X = \frac{v_2 - v_1}{R}$$

kada je u pitanju trenutna vrednost struje. Primena kola sa slike 1 je uobičajen metod za određivanje trenutnih vrednosti napona i struje porta pomoću osciloskopa. Ako su struje i



Slika 1: Merenje impedanse

naponi u kolu sinusoidalni, sa istom frekvencijom, prethodna jednačina zadržava isti oblik za kompleksne fazore struja i napona

$$\underline{I}_X = \frac{V_2 - V_1}{R}.$$

Kako je nepoznata impedansa

$$\underline{Z}_X = \frac{V_1}{\underline{I}_X}$$

određivanje nepoznate impedanse se svodi na merenje fazora dva napona i poznavanje otpornosti etalonskog otpornika

$$\underline{Z}_X = R \frac{V_1}{V_2 - V_1}$$

Primena gornje jednačine zahteva poznavanje amplitude ili efektivne vrednosti za potencijale v_1 i v_2 , kao i njihovog međusobnog faznog stava. Međutim, ako je nepoznata impedansa rezistivna, $\underline{Z}_X = R_X$, povoljnije je koristiti „razdelnik napona”

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\underline{Z}_X}{R + \underline{Z}_X} = \frac{R_X}{R + R_X}$$

odakle je

$$R_X = R \frac{V_1}{V_2 - V_1}$$

gde V_1 i V_2 predstavljaju efektivne vrednosti ili amplitude (saglasno, za oba potencijala isto) potencijala v_1 i v_2 . Slično, ako je nepoznata impedansa čisto imaginarna, $\underline{Z}_X = jX_X$, korišćenjem razdelnika napona dobijamo

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\underline{Z}_X}{R + \underline{Z}_X} = \frac{jX_X}{R + jX_X}$$

odakle je

$$\frac{|V_1|^2}{|V_2|^2} = \frac{V_1^2}{V_2^2} = \frac{X_X^2}{R^2 + X_X^2}$$

što kao rezultat daje nepoznatu reaktansu

$$X_X = R \frac{V_1}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}.$$

Na ovaj način je moguće meriti otpornost, kapacitivnost, induktivnost i međusobnu induktivnost bez određivanja faznog stava, merenjem samo efektivnih vrednosti ili amplituda napona, jer u navedenim slučajevima posmatrana impedansa je ili čisto realna, ili čisto imaginarna.

Metod se može dopuniti merenjem koje će odrediti fazni stav između posmatranih napona ili merenjem aktivne snage i prividne snage nepoznate impedanse, čime se impedansa posmatranog linearnog elementa određuje u potpunosti.

Primenom totalnog diferencijala u slučaju merenja otpornosti $Z_X = R_X$ za grešku rezultata merenja u funkciji grešaka u poznavanju R , V_1 i V_2 se dobija

$$\Delta R_X \approx \frac{V_1}{V_2 - V_1} \Delta R + R \frac{V_2}{(V_2 - V_1)^2} \Delta V_1 - R \frac{V_1}{(V_2 - V_1)^2} \Delta V_2$$

što se izraženo u formi relativne greške svodi na

$$\frac{\Delta R_X}{R_X} \approx \frac{\Delta R}{R} + \frac{V_2}{V_2 - V_1} \left(\frac{\Delta V_1}{V_1} - \frac{\Delta V_2}{V_2} \right)$$

Iz gornjih jednačina se vidi da nije povoljno da V_1 i V_2 budu bliski, tj. da je potrebno propustiti neku struju kroz element da bi merenje imalo smisla. U granicama mogućnosti, povoljno je da struja elementa prilikom merenja makar po redu veličine odgovara struji za koju se pretpostavlja da će sa njom element uglavnom raditi. Sa druge strane, potrebno je i da napon V_1 bude dovoljno velik da se može meriti sa zadovoljavajućom tačnošću. Dodatna napomena je da je povoljno da podela naponske ose za merenje V_1 i V_2 bude ista, kako bi se efekti konačnog propusnog opsega osciloskopa potirali. Kako će merenja u ovoj vežbi biti na frekvencijama dosta nižim od propusnog opsega osciloskopa, preporuka o istim podelama naponskih osa neće biti poštovana. Slični zaključci se mogu izvesti i u slučaju merenja čisto imaginarne impedanse.

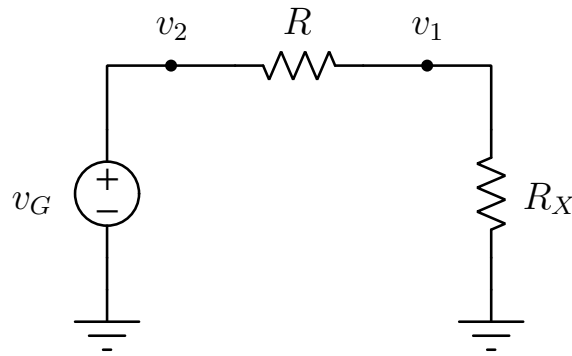
Kroz vežbu studenti treba da ovladaju merenjem struje i napona elementa (grane, porta) pomoću osciloskopa i merenjem impedanse. Takođe, naučićete da procene da li je posmatrani element linearan ili ne. Merenja će omogućiti određivanje otpornosti, kapacitivnosti, induktivnosti, međusobne induktivnosti i koeficijenta sprege. Na kraju vežbe, studenti će naučiti da mere moduo, argument, relani deo i imaginarni deo impedanse. Osim ovoga, studenti će steći dodatno iskustvo u povezivanju kola, analizi linearnih kola, organizovanju eksperimenata i susreće se sa realnim elementima elektronskih uređaja.

Aktivnosti koje daju rezultat koji se dokumentuje naznačene su sa \square , gde treba staviti oznaku kada je aktivnost završena.

1.3 Napomene

Komponente potrebne za vežbu su već postavljene na protobordu i **ne treba ih pomerati**. Takođe, sonde osciloskopa i generator signala su već povezani na etalonski otpornik R , tako da studenti jedino treba da povežu odgovarajući element na odgovarajući način, zavisno od zadatka. Sinhronizacija osciloskopa će biti izvedena prema sinhronizacionom izlazu generatora signala koristeći eksterni ulaz za sinhronizaciju osciloskopa. Od studenata se očekuje da su sposobni da sinhronizuju osciloskop i podese zahtevane parametre za merenja pomoću osciloskopa. **Dakle, jedine promene povezivanja na protobordu su u povezanosti elementa koji se meri, ništa drugo!** U vežbi je podrazumevano da je sprega na oba kanala podešena na DC, *bandwidth limit* da je isključen. Pre početka merenja treba podesiti u meniju MEASURE (obrađeno u prethodnoj vežbi) da se na kanalu 1 mere Frequency, Peak-Peak i Cycle RMS, a da se na kanalu 2 mere Peak-Peak i Cycle RMS. Ovakvo podešavanje treba da ostane tokom većeg dela vežbe, sve do poslednje tačke.

Tokom vežbe, generator signala će uvek generisati sinusoidalni napon, bez ofseta (ofset postavljen na nulu), amplituda generisanog signala će najčešće biti 10 V *peak-to-peak*, a frekvencija će se menjati. **Prilikom povezivanja elemenata u kolu i prilikom menjanja parametara generatora signala, izlaz generatora treba isključiti (deaktivirati)!**



Slika 2: Merenje otpornosti

Elementi su na protobordu raspoređeni tako što je gore levo postavljen etalonski otpornik R , u levoj koloni su postavljeni redom: R_X , potom $C_X = C_1, C_2, C_3, C_4, L_1, L_2$ i L_3 . U desnoj koloni su transformator sa slabom spregom T1 i bifilarno motani transformator T2.

Pre prelaska na merenja potrebno je pokrenuti terminal i postaviti da radni direktorijum bude ~/Desktop/vezba-4.

1.4 Zadatak

1.4.1 Merenje otpornosti

Povezati kolo sa slike 2. Postaviti amplitudu generatora signala na 10 V *peak-to-peak*, frekvenciju na 1 kHz, ofset generatora na nulu. Podesiti podelu naponske ose osciloskopa na 500 mV/div na kanalu 1 i na 2 V/div na kanalu 2, spregu na DC, Bandwidth Limit na OFF, vertikalnu poziciju na nulu (centralna linija graduacije ekrana). Podesiti podelu horizontalne ose na 250 μ s/div, horizontalnu poziciju (trenutak sinhronizacije) na nulu. Aktivirati izlaz generatora i očitati merenja efektivne vrednosti (Cyc RMS) i amplitude (Pk-Pk) na osciloskopu. Dobijene vrednosti uneti u tabelu 1 . Izračunati posredno izmerene vrednosti R_X prema

$$R_X = R \frac{V_1}{V_2 - V_1}$$

i uneti ih u tabelu 1 . Pokrenuti program `getfig.py` sa komandne linije

```
python3 getfig.py
```

što će dokumentovati merenje snimanjem ekrana u pdf formatu .

Pitanja za razmišljanje:

1. Da li se dobijene vrednosti otpornosti R_X razlikuju?
2. Ako se dobijene vrednosti otpornosti razlikuju, zašto se razlikuju kada podaci potiču od istih vremenskih dijagrama?

1.4.2 Snimanje zavisnosti struje otpornika od napona na otporniku i određivanje otpornosti metodom najmanjih kvadrata

Pokrenuti program `r1.py` komandom

```
python3 r1.py
```

Tabela 1: Merenje otpornosti

| tip merenja | V_1 [V] | V_2 [V] | R_X [Ω] |
|-------------|-----------|-----------|--------------------|
| Pk-Pk | | | |
| CycRMS | | | |

Tabela 2: Merenje otpornosti, program

| tip merenja | R_X [Ω] |
|-------------|--------------------|
| LSQ | |
| Pk-Pk | |
| CycRMS | |

koji će postaviti podelu vremenske ose osciloskopa na $100 \mu\text{s}/\text{div}$ i prikupiti odbirke potencijala v_1 i v_2 i na osnovu njih izračunati struju otpornika. Dobijeni odbirci napona i struje na otporniku će biti prikazani na slici `vr-ir_yyyy-mm-dd_hh-mm-ss.pdf`. Na osnovu njih će biti izračunate vrednosti otpornosti dobijene: konstruisanjem optimalne prave kroz dobijeni skup tačaka (metod najmanjih kvadrata), metodom merenja **peak-to-peak** vrednosti napona i struje i metodom merenja efektivne vrednosti napona i struje. Zapisati dobijene vrednosti u tabelu 2 □. Uočiti da je merenje primenom programa sa tačke gledišta korisnika postalo neposredno, on više ne meri napone i ne računa vrednost otpornosti. Suštinski, postupak merenja je ostao posredan, mere se odbirci dva napona, ukupno 5000 odbiraka.

Pitanja za razmišljanje:

1. Zašto su tačke na krajevima snimljene krive gušće raspoređene nego u centru?
2. Šta bi trebalo uraditi kako bi tačke bile uniformno raspoređene?
3. Kako bi trebalo modifikovati program `r1.py` da se dobije dijagram sa uniformno raspoređenim tačkama?
4. Da li se dobijeni rezultati razlikuju? Ako da, zašto se razlikuju kada potiču od istih odbiraka potencijala v_1 i v_2 ?
5. Koji je od razmatranih metoda najbolji, „optimalan” i po čemu, zašto?

1.4.3 Statistička obrada rezultata ponovljenih merenja otpornosti

Dopunom programa `r1.py` dobijen je program `r2.py` koji ponavlja merenje otpornosti n puta po sva tri opisana metoda, određuje srednju vrednost i standardnu devijaciju dobijenih rezultata merenja i crta odgovarajuće histograme. Komandom

```
python3 r2.py
```

pokrenuti program i zadati $n = 10$. Prikupljanje podataka traje oko 7 sekundi po merenju. Po dobijanju rezultata zapisati srednje vrednosti i standardne devijacije u tabelu 3 □.

Pogledati dobijene histograme, tri pojedinačna i jedan združeni. Pitanje za razmišljanje: u koji rezultat imate najviše poverenja?

Tabela 3: Ponovljena merenja otpornosti, spor program, $n = 10$

| tip merenja | $\overline{R_X}$ [Ω] | $\sigma(R_X)$ [Ω] |
|-------------|-------------------------------|----------------------------|
| LSQ | | |
| Pk-Pk | | |
| CycRMS | | |

Tabela 4: Ponovljena merenja otpornosti, spor program, $n = 50$

| tip merenja | $\overline{R_X}$ [Ω] | $\sigma(R_X)$ [Ω] |
|-------------|-------------------------------|----------------------------|
| LSQ | | |
| Pk-Pk | | |
| CycRMS | | |

Ukoliko raspoloživo vreme dopušta (pitati dežurnog za odluku) ponoviti pokretanje programa `r2.py` za $n = 50$. Popuniti tabelu 4 \square . Uporediti rezultate iz tabela 3 i 4. Pitanje za razmišljanje: da li je imalo efekta petostruko uvećanje broja ponovljenih merenja?

U cilju ubrzavanja postupka ponovljenih merenja i izbegavanja dugotrajnog postupka prebacivanja odbiraka sa osciloskopa, program `r2.py` je modifikovan tako da koristi rezultat neposrednog merenja osciloskopa. Time je dobijen program `r3.py` koji ne podržava metod najmanjih kvadrata, ali radi znatno brže. Komandom

```
python3 r3.py
```

pokrenuti program i zadati $n = 100$ ponovljenih merenja. Dobijene rezultate za srednju vrednost i standardnu devijaciju upisati u tabelu 5 \square . Pogledati dobijene histograme.

Pitanja za razmišljanje:

1. Jesu li rezultati programa `r3.py` saglasni sa rezultatima programa `r2.py`?
2. Koji od dva raspoloživa metoda za brzo merenje je bolji i zašto?
3. Da li dobijeni histogrami ukazuju na normalnu raspodelu rezultata merenja?
4. Ako neki od histograma ne ukazuje na normalnu raspodelu rezultata merenja, zašto je to tako?

Ukoliko raspoloživo vreme dopušta (pitati dežurnog za odluku) ponoviti pokretanje programa `r3.py` za $n = 500$. Upisati dobijene rezultate u tabelu 6 \square . Pogledati dobijene histograme.

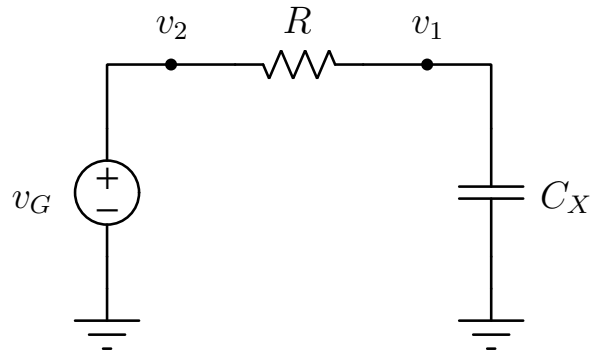
Pitanje za razmišljanje: da li je imalo efekta petostruko uvećanje broja ponovljenih merenja?

Tabela 5: Ponovljena merenja otpornosti, brz program, $n = 100$

| tip merenja | $\overline{R_X}$ [Ω] | $\sigma(R_X)$ [Ω] |
|-------------|-------------------------------|----------------------------|
| Pk-Pk | | |
| CycRMS | | |

Tabela 6: Ponovljena merenja otpornosti, brz program, $n = 500$

| tip merenja | $\overline{R_X}$ [Ω] | $\sigma(R_X)$ [Ω] |
|-------------|-------------------------------|----------------------------|
| Pk-Pk | | |
| CycRMS | | |



Slika 3: Merenje kapacitivnosti

1.4.4 Merenje kapacitivnosti

Reaktansa kondenzatora je data sa

$$X_X = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

pa se na osnovu prethodnog kapacitivnost kondenzatora iz rezultata merenja V_1 i V_2 računa kao

$$C_X = \frac{1}{2\pi f R} \frac{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1}.$$

Kako bi relativna greška merenja kapacitivnosti bila prihvatljiva, analizom preko totalnog diferencijala se i u ovom slučaju može pokazati da V_1 i V_2 ne treba da budu bliski, kao ni da V_1 ne treba da bude blizak nuli. Sugestija za samostalni rad: preko totalnog diferencijala izvedite izraze za apsolutnu i relativnu grešku merenja kapacitivnosti u funkciji grešaka neposredno merenih veličina.

Povezati kondenzator C_1 u šemu sa slike 3. Postaviti frekvenciju generatora signala na 1 kHz, amplitudu na 10 V *peak-to-peak*, ofset na nulu. Podesiti podelu vremenske ose osciloskopa na 250 $\mu\text{s}/\text{div}$ tako da osciloskop „vidi” više od jednog perioda signala, pa može da meri efektivnu vrednost, amplitudu i frekvenciju. Izmeriti napone V_1 i V_2 i uneti ih u tabelu 7 \square . Izmeriti frekvenciju generatora i zapisati je

$f =$ _____ . \square

Izračunati vrednosti kapacitivnosti C_1 i uneti ih u tabelu 7 \square . Pokrenuti program `getfig.py` i dokumentovati merenje snimanjem ekrana \square .

1.4.5 Snimanje dijagrama struje i napona kondenzatora

Uključiti prikazivanje MATH talasnog oblika pritiskom na crveno dugme označeno sa MATH. Primenom multifunkcionalnog dugmeta podesiti da prikazani talasni oblik bude CH2 - CH1. Isključiti prikazivanje talasnog oblika sa kanala 2 osciloskopa. Na dobijenom dijagramu žuti trag predstavlja napon kondenzatora, a crveni trag struju kondenzatora. Podešavanjem horizontalne

Tabela 7: Merenje kapacitivnosti, C_1

| tip merenja | V_1 [V] | V_2 [V] | C_1 [nF] |
|-------------|-----------|-----------|------------|
| Pk-Pk | | | |
| CycRMS | | | |

pozicije postaviti da žuti trag odgovara funkciji sinus. Snimiti dijagram sa ekrana osciloskopa pokretanjem programa `getfig.py` □. Vratiti horizontalnu poziciju pritiskom na dugme za horizontalno pozicioniranje (okreće se, ali i pritisak na dugme ima efekat koji treba da uočite). Isključiti prikazivanje MATH talasnog oblika.

Pitanja za razmišljanje:

1. Da li su dobijeni dijagrami struje i napona očekivani?
2. Da li fazno prednjači struja ili napon?
3. Na osnovu čega ste zaključili koji signal fazno prednjači?

1.4.6 Zavisnost naelektrisanja na kondenzatoru od napona i određivanje parametara kondenzatora obradom odbiraka napona i struje

U direktorijumu `vezba-4` nalazi se program `c1.py` koji uzima odbirke napona v_1 i v_2 i njihovom obradom dobija odbirke struje i_C , čijim se numeričkim integraljenjem i uklanjanjem jednosmerne komponente izračunavaju odbirci naelektrisanja na kondenzatoru prema formula-

$$q_{C0}[k] = \Delta t \sum_0^k i_C[k]$$

za $k \in \{1, \dots, n-1\}$

$$q_0 = \frac{1}{n} \sum_0^{n-1} q_{C0}[k]$$

i konačno

$$q_C[k] = q_{C0}[k] - q_0$$

gde je $n = 2500$ broj odbiraka koje osciloskop prikuplja po slici, a $\Delta t = 1 \text{ ms}/n$ rastojanje između dva odbirka, pošto se na ekranu prikazuje jedan period signala koja u datom slučaju traje 1 ms.

Na osnovu izmerenih i izračunatih odbiraka napona, struje i naelektrisanja kondenzatora, program `c1.py` računa kapacitivnost kondenzatora na pet načina: postavljanjem optimalne prave kroz dijagram odbiraka naelektrisanja kondenzatora u funkciji napona na kondenzatoru, C_{Xlsqq} , računanjem odnosa amplitude naelektrisanja i amplitude napona, $C_{Xpk2pkq}$, računanjem odnosa efektivne vrednosti naelektrisanja i efektivne vrednosti napona, C_{Xrmsq} , i na dva načina preko računanja impedanse kondenzatora: preko amplitude napona i struje, C_{Xpk2pk} i preko efektivne vrednosti napona i struje C_{Xrms} . Osim ovoga, program računa i snagu disipiranu na kondenzatoru, P_{CX} i ekvivalentnu serijsku otpornost kondenzatora $\text{esr}(C_X)$.

U ovom delu vežbe je potrebno pokrenuti program `c1.py` pet puta i zabeležiti rezultate merenja parametara kondenzatora. Popuniti tabele 8 i 9 □. Pitanje za razmišljanje: da li su rezultati merenja ponovljivi?

Pogledati dijagrame zavisnosti naelektrisanja od napona na kondenzatoru □. Pitanje za razmišljanje: da li su zavisnosti u skladu sa očekivanjima?

Tabela 8: Merenje kapacitivnosti preko odbiraka napona, struje i naelektrisanja

| r. br. | $C_{Xl_{sq}} \text{ [nF]}$ | $C_{Xpk2pk} \text{ [nF]}$ | $C_{Xrms} \text{ [nF]}$ | $C_{Xpk2pk} \text{ [nF]}$ | $C_{Xrms} \text{ [nF]}$ |
|--------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

Tabela 9: Merenje disipacije na kondenzatoru i određivanje ekvivalentne serijske otpornosti kondenzatora

| redni broj | $P_{CX} \text{ [\mu W]}$ | $\text{esr}(C_X) \text{ [\Omega]}$ |
|------------|--------------------------|------------------------------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |

1.4.7 Statistička obrada rezultata ponovljenih merenja kapacitivnosti

U cilju ubrzavanja ponovljenih merenja kapacitivnosti, razvijen je program `c2.py` koji koristi neposredna merenja efektivne vrednosti napona i frekvencije dobijena pomoću osciloskopa. Pokrenuti program komandom

```
python3 c2.py
```

i zadati broj ponavljanja od $n = 100$. Upisati dobijene rezultate za srednju vrednost

$\overline{C_1} = \text{_____ nF } \square$

i standardnu devijaciju

$\sigma(C_1) = \text{_____ nF } \square$.

Pogledati dobijeni histogram.

Pitanja za razmišljanje:

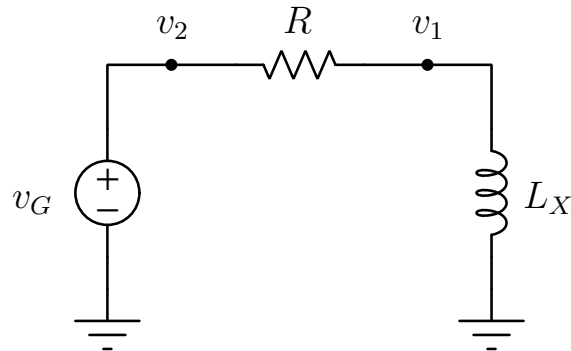
1. Da li su dobijeni rezultati u skladu sa prethodnim rezultatima?
2. Da li histogram ukazuje na normalnu raspodelu?
3. Ako je slaganje sa normalnom raspodelom dobro, zašto je to u ovom slučaju tako?

Ukoliko raspoloživo vreme dopušta (pitati dežurnog za odluku) ponoviti pokretanje programa `c2.py` za $n = 500$. Upisati dobijene rezultate za srednju vrednost

$\overline{C_1} = \text{_____ nF } \square$

Tabela 10: Merenje nepoznatih kapacitivnosti

| kondenzator | f [kHz] | V_1 [V] | V_2 [V] | C_X [nF] |
|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| C_2 | | | | |
| C_3 | | | | |
| C_4 | | | | |



Slika 4: Merenje induktivnosti

i standardnu devijaciju

$$\sigma(C_1) = \text{_____ nF } \square.$$

Uporediti rezultate za $n = 100$ i $n = 500$. Pitanje za razmišljanje: da li je imalo efekta petostruko uvećanje broja ponovljenih merenja?

1.4.8 Merenja nepoznatih kapacitivnosti

U ovom delu vežbe se od studenata očekuje da budu sposobni da sami procene potrebnu frekvenciju generatora signala kako bi uspešno izvršili merenje. Merenje nepoznatih kapacitivnosti treba da bude posredno, neposredno će se meriti efektivne vrednosti napona v_1 i v_2 , kao i frekvencija generatora signala. Amplituda signala sa generatora treba da bude 10 V *peak-to-peak*, ofset treba da bude nula. Potrebno je redom povezati kondenzatore C_2 , C_3 i C_4 u šemu sa slike 3, za svaki od njih proceniti frekvenciju na kojoj treba vršiti merenje, izmeriti efektivne vrednosti V_1 i V_2 i izračunati nepoznatu kapacitivnost. Popuniti tabelu 10. Za svako od merenja pokrenuti program `getfig.py` i dokumentovati merenje snimanjem ekrana u pdf formatu \square .

1.4.9 Merenje induktivnosti

Za merenje induktivnosti potrebno je nepoznatu induktivnost vezati u kolo prema slici 4. Kako je reaktansa kalema

$$X_X = \omega L = 2\pi f L$$

induktivnost L se iz merenja napona V_1 i V_2 izračunava kao

$$L = \frac{R}{2\pi f} \frac{V_1}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}.$$

Povezati u kolo induktivnost L_1 prema šemi sa slike 4. Postaviti frekvenciju generatora signala na 4 kHz, amplitudu na 10 V *peak-to-peak*, ofset na nulu. Postaviti podelu vremenske

Tabela 11: Merenje induktivnosti, L_1

| amplituda Pk-Pk | V_1 [V] | V_2 [V] | L_1 [mH] |
|-----------------|-----------|-----------|------------|
| 10 V | | | |
| 1 V | | | |

ose osciloskopa na $50 \mu\text{s}/\text{div}$. Očitati efektivne vrednosti napona V_1 i V_2 i uneti ih u tabelu 11 □. Za frekvenciju koristiti podatak o zadatoj frekvenciji generatora signala. Pitanje za razmišljanje: koji je podatak o frekvenciji tačniji, sa generatora signala ili sa osciloskopa?

Merenje dokumentovati pokretanjem programa `getfig.py` □. Pogledati oblik napona v_1 . Da li je oblik napona izobličen, ukazuje li na nelinearnost kalema?

Smanjiti amplitudu napona deset puta, na 1 V *peak-to-peak*. Smanjiti podelu naponske ose osciloskopa deset puta na oba kanala. Pokrenuti program `getfig.py` □. Izmeriti efektivne vrednosti napona V_1 i V_2 i popuniti tabelu 11 □.

Pitanja za razmišljanje:

1. Jesu li rezultati merenja pri dve amplitude napona generatora međusobno saglasni?
2. Da li je smanjenje amplitude signala uticalo na smanjenje izobličenja?
3. Jesu li izobličenja posledica zasićenja jezgra ili histerezisa?
4. Na osnovu čega se može dati odgovor na prethodno pitanje?

Vratiti amplitudu generatora na 10 V i povećati podelu naponske ose deset puta na oba kanala.

1.4.10 Snimanje dijagrama struje i napona kalema

Uključiti prikazivanje MATH talasnog oblika pritiskom na crveno dugme označeno sa MATH. Primenom multifunkcionalnog dugmeta podesiti da prikazani talasni oblik bude CH2 - CH1. Isključiti prikazivanje talasnog oblika sa kanala 2 osciloskopa. Na dobijenom dijagramu žuti trag predstavlja napon kalema, a crveni trag struju kalema. Podešavanjem horizontalne pozicije postaviti da žuti trag odgovara funkciji sinus. Snimiti dijagram sa ekrana osciloskopa pokretanjem programa `getfig.py` □. Vratiti horizontalnu poziciju pritiskom na dugme za horizontalno pozicioniranje. Isključiti prikazivanje MATH talasnog oblika.

Pitanja za razmišljanje:

1. Da li su dobijeni dijagrami struje i napona očekivani?
2. Da li fazno prednjači struja ili napon?
3. Da li je dobijena fazna razlika očekivana ili ima malo odstupanje?
4. Šta izaziva odstupanje u fazi od očekivane vrednosti?
5. Kako se uočeno odstupanje uklapa u pretpostavke uvedene tokom izvođenja formule pomoću koje se izračunava induktivnost kalema?

Tabela 12: Merenje induktivnosti preko odbiraka struje, napona i fluksa, program 11.py

| r. br. | L_{Xlsql} [mH] | L_{Xpk2pk} [mH] | L_{Xrmsl} [mH] | L_{Xpk2pk} [mH] | L_{Xrms} [mH] |
|--------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

Tabela 13: Merenje disipacije na kalemu i određivanje ekvivalentne paralelne otpornosti kalema, program 11.py

| redni broj | P_{LX} [μ W] | $epr(L_X)$ [k Ω] |
|------------|---------------------|--------------------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |

1.4.11 Zavisnost fluksa kalema od struje i određivanje parametara kalema obradom odbiraka napona i struje

Analogno programu c1.py napravljen je program 11.py koji prikuplja odbirke napona v_1 i v_2 , računa odbirke struje kalema, integrali napon na kalemu i računa odbirke fluksa kalema. Obradom podataka o struji kalema i fluksu kalema računa induktivnosti L_{Xlsql} metodom najmanjih kvadrata, L_{Xpk2pk} metodom odnosa amplituda i L_{Xrmsl} metodom odnosa efektivnih vrednosti. Obradom podataka o naponu i struji kalema i poznavanjem frekvencije generatora, program računa induktivnosti L_{Xpk2pk} koristeći amplitude i L_{Xrms} koristeći efektivne vrednosti. Takođe, program računa disipaciju na kalemu i na osnovu nje i efektivne vrednosti napona računa ekvivalentnu paralelnu otpornost kalema koja modeluje gubitke u jezgru.

Pokrenuti program 11.py pet puta i dobijene rezultate uneti u tabele 12 i 13 \square .

U cilju analize nelinearnih efekata, modifikovan je program 11.py tako što je pobuda smanjena deset puta, čime je dobijen program 12.py. Pokrenuti program 12.py pet puta i dobijene rezultate uneti u tabele 14 i 15 \square .

Pogledati dobijene zavisnosti napona na kalemu od struje kalema i fluksa kalema od struje kalema.

Pitanja za razmišljanje:

1. Da li model kondenzatora ili model kalema bolje odgovara realnoj komponenti?
2. Da li „petlja” u zavisnosti fluksa od struje kalema potiče od histerezisa ili od vrtložnih struja ili su oba efekta zastupljena?
3. Kojim bi dodatnim eksperimentom moglo da se utvrdi da li vrtložne struje imaju značajan efekat?

Tabela 14: Merenje induktivnosti preko odbiraka struje, napona i fluksa, program 12.py

| r. br. | L_{Xlsql} [mH] | L_{Xpk2pk} [mH] | L_{Xrms} [mH] | L_{Xpk2pk} [mH] | L_{Xrms} [mH] |
|--------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

Tabela 15: Merenje disipacije na kalemu i određivanje ekvivalentne paralelne otpornosti kalema, program 12.py

| redni broj | P_{LX} [μ W] | $epr(L_X)$ [$k\Omega$] |
|------------|---------------------|--------------------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |

1.4.12 Merenje nepoznatih induktivnosti

U ovom delu vežbe se od studenata očekuje da budu sposobni da sami procene potrebnu frekvenciju generatora signala kako bi uspešno izvršili merenje. Zbog gubitaka u jezgru kalema frekvencija treba da bude manja od 100 kHz. Merenje nepoznatih induktivnosti L_2 i L_3 treba svesti na merenje efektivne vrednosti napona v_1 i v_2 i poznavanje frekvencije generatora signala. Amplituda signala sa generatora treba da bude 10 V *peak-to-peak*, ofset treba da bude nula.

Prvo je potrebno povezati kalem L_2 u šemu sa slike 4 i proceniti frekvenciju na kojoj treba vršiti merenje, izmeriti efektivne vrednosti V_1 i V_2 i izračunati nepoznatu induktivnost. Popuniti tabelu 16. Za svako od merenja pokrenuti program `getfig.py` i dokumentovati merenje snimanjem ekrana u pdf formatu .

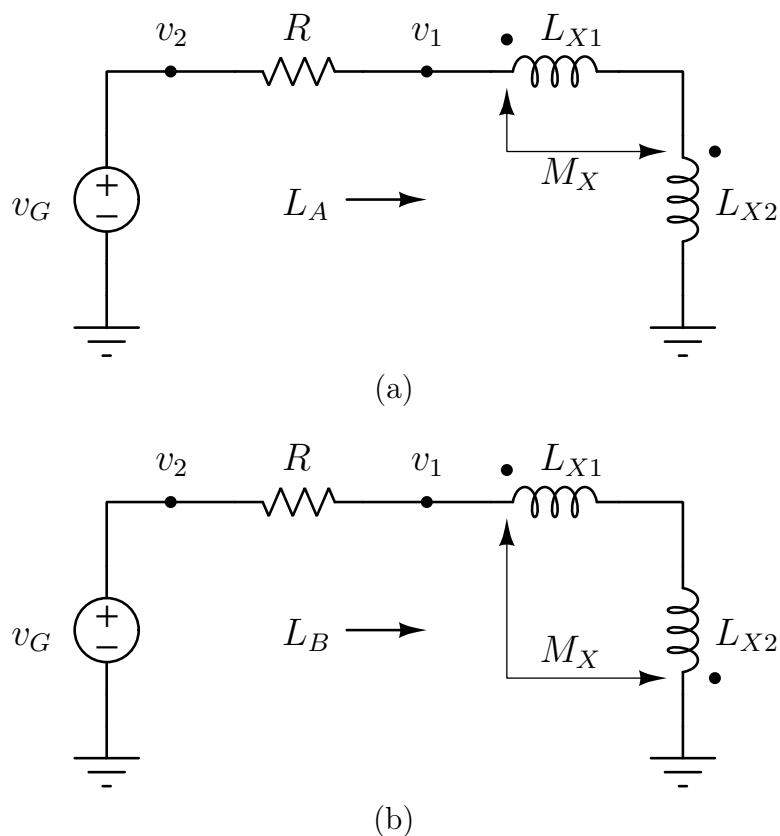
Postupak ponoviti za kalem L_3 .

1.4.13 Merenje međusobne induktivnosti i koeficijenta sprege

Međusobna induktivnost, posledično i koeficijent sprege spregnutih namotaja se mogu odrediti svođenjem na merenje induktivnosti. Prvo treba odrediti induktivnosti namotaja L_{X1} i L_{X2} , na način kako je merena induktivnost u prethodnoj tački. Prilikom merenja induktivnosti jednog

Tabela 16: Merenje nepoznatih induktivnosti

| kalem | f [kHz] | V_1 [V] | V_2 [V] | L_X [mH] |
|-------|-----------|-----------|-----------|------------|
| L_2 | | | | |
| L_3 | | | | |



Slika 5: Merenje međusobne induktivnosti, L_A (a) i L_B (b)

Tabela 17: Merenje međusobne induktivnosti i koeficijenta sprege, L_{X1} , L_{X2} , L_A i L_B , transformator T1

| induktivnost | V_1 [V] | V_2 [V] | rezultat [μH] |
|--------------|-----------|-----------|----------------------------|
| L_{X1} | | | |
| L_{X2} | | | |
| L_A | | | |
| L_B | | | |

namotaja, drugi namotaj treba da bude otvoren. Potom treba izmeriti induktivnost L_A njihove redne veze, slika 5(a) i induktivnost njihove „anti-redne” veze L_B , slika 5(b). **Sva merenja treba vršiti pri istoj frekvenciji signala**, koja zbog karakteristika feromagnetskog jezgra treba da bude manja od 20 kHz, ali i dovoljno velika da reaktansa namotaja bude merljiva. Zapisati izabranu frekvenciju

$f =$ _____ kHz .

Svako merenje treba dokumentovati pokretanjem programa `getfig.py` . Popuniti tabelu 17 .

Na osnovu podataka iz tabele 17 popuniti tabelu 19 koristeći

$$M = \frac{L_A - L_B}{4}$$

i

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_{X1} L_{X2}}}.$$

Tabela 18: Merenje međusobne induktivnosti i koeficijenta sprege, L_{X1} , L_{X2} , L_A i L_B , transformator T2

| induktivnost | V_1 [V] | V_2 [V] | rezultat [μH] |
|--------------|-----------|-----------|----------------------------|
| L_{X1} | | | |
| L_{X2} | | | |
| L_A | | | |
| L_B | | | |

Tabela 19: Izračunavanje međusobne induktivnosti i koeficijenta sprege

| transformator | M [μH] | k |
|---------------|-----------------------|-----|
| T1 | | |
| T2 | | |

Sugestija za samostalni rad: izvesti formulu za računanje međusobne induktivnosti M iz L_A i L_B .

Ponoviti postupak za transformator T2. Zapisati izabranu frekvenciju

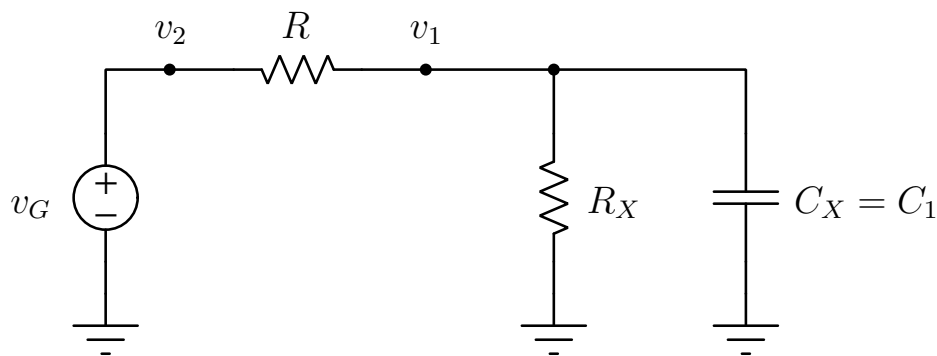
$f =$ _____ kHz .

Svako merenje treba dokumentovati pokretanjem programa `getfig.py` . Popuniti tabele 18 i 19 .

1.4.14 Merenje modula, argumenta, realnog dela i imaginarnog dela impedanse

Koristeći otpornik R_X i kondenzator $C_X = C_1$ povezati kolo sa slike 6. Podesiti amplitudu generatora na 10 V *peak-to-peak*, frekvenciju na 400 Hz. Kod osciloskopa podesiti podelu naponske ose na 1 V/div na kanalu 1, na 2 V/div na kanalu 2, podelu vremenske ose na 500 $\mu\text{s}/\text{div}$. Na ekranu prikazati kanal 1, isključiti prikazivanje kanala 2, prikazati MATH „kanal”, izabrati prikazivanje CH2 - CH1. Sada je napon na CH1 (žuti trag) napon na nepoznatoj impedansi, a napon na MATH „kanalu” (crveni trag) napon na etalonskom otporniku, proporcionalan struji impedanse. Uključiti merenje Cycle RMS na CH1 i na MATH kanalu. Uključiti pokazivače i podesiti da mere vreme od uzlaznog prolaska kroz nulu talasnog oblika napona do uzlaznog prolaska kroz nulu talasnog oblika struje. Dokumentovati merenje pokretanjem programa `getfig.py` . Izmeriti:

1. amplitudu na CH1, $V_Z =$ _____ V
2. amplitudu na MATH $V_R =$ _____ V
3. frekvenciju $f =$ _____ Hz (zapisati podatak sa generatora signala)
4. vreme proteklo od uzlaznog prolaska kroz nulu na CH1 do uzlaznog prolaska kroz nulu MATH $\Delta t =$ _____ μs . Voditi računa o znaku Δt , ako struja prednjači znak Δt je negativan.



Slika 6: Merenje modula, realnog dela, imaginarnog dela i argumenta impedanse

Isključiti prikazivanje MATH talasnog oblika.

Moduo impedanse je dat sa

$$Z_X = R \frac{V_Z}{V_R}$$

argument impedanse je

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = 2\pi f \Delta t$$

realni deo impedanse je

$$R_Z = Z_X \cos \varphi$$

dok je imaginarni deo impedanse

$$X_Z = Z_X \sin \varphi.$$

Odrediti navedene veličine i zapisati ih:

$$Z_X = \underline{\hspace{10em}} \Omega \square$$

$$\varphi = \underline{\hspace{10em}} \text{ rad } \square$$

$$R_Z = \underline{\hspace{10em}} \Omega \square$$

$$X_Z = \underline{\hspace{10em}} \Omega \square.$$

Pitanja za razmišljanje:

1. Zašto je Δt negativno ako struja fazno prednjači?
2. Da li R_Z i X_Z odgovaraju otpornosti R_X i reaktansi kondenzatora $\frac{1}{2\pi f C_X}$?
3. Ako je odgovor na prethodno pitanje negativan, zašto je rezultat takav?

1.4.15 Dokumentovanje rezultata merenja

Direktorijum vezba-4 i njegov sadržaj iskopirati na USB flash drive i sačuvati do polaganja ispita \square .