Mjerenje nadomjesnih parametara osnovnih elektroničkih komponenti RLC metrom LCR-800

Pleskalt, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:219801

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

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

Mjerenje nadomjesnih parametara osnovnih elektroničkih komponenti RLC metrom LCR-800

Završni rad

Martin Pleskalt

Osijek, 2020

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 05.09.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime studenta:	Martin Pleskalt
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4415, 27.09.2019.
OIB studenta:	40400477133
Mentor:	Prof. dr. sc. Kruno Miličević
Sumentor:	Ivan Biondić
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Mjerenje nadomjesnih parametara osnovnih elektroničkih komponenti RLC metrom LCR-800
Znanstvena grana rada:	**Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)**
Predložena ocjena završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	05.09.2020.
Datum potvrde ocjene Odbora:	09.09.2020.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 10.09.2020.

Ime i prezime studenta:	Martin Pleskalt
Studij:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4415, 27.09.2019.
Turnitin podudaranje [%]:	3

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Mjerenje nadomjesnih parametara osnovnih elektroničkih komponenti RLC metrom LCR-800**

izrađen pod vodstvom mentora Prof. dr. sc. Kruno Miličević

i sumentora Ivan Biondić

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD ... 1

1.1. Zadatak završnog rada ... 1

2. PREGLED PODRUČJA TEME ... 2

2.1. Definicija mjerenih veličina u frekvencijskom području ... 2

2.2. Mjerni instrument ... 3

3. OSNOVNE ELEKTRONIČKE KOMPONENTE ... 5

3.1. Otpornik ... 5

3.1.1 Nadomjesna shema realnog otpornika ... 5

3.1.2. Serijska nadomjesna shema realnog otpornika ... 7

3.1.3. Paralelna nadomjesna shema realnog otpornika ... 9

3.2. Kondenzator ... 11

3.2.1. Nadomjesna shema realnog kondenzatora ... 12

3.2.2. Serijska nadomjesna shema realnog kondenzatora ... 14

3.2.3. Paralelna nadomjesna shema realnog kondenzatora ... 16

3.3. Zavojnica ... 17

3.3.1. Nadomjesna shema realne zavojnice ... 18

3.3.2. Serijska nadomjesna shema realne zavojnice ... 20

3.3.3. Paralelna nadomjesna shema realne zavojnice ... 22

4. MJERENJE PARAMETARA ELEKTRONIČKIH KOMPONENTI ... 24

4.1. Mjerenje parametara otpornika ... 24

4.2 Mjerenje parametara zavojnice ... 29

4.3. Mjerenje parametara kondenzatora ... 35

4.3.1. Mjerenje parametara blok kondenzatora ... 35

4.3.2. Mjerenje parametara elektrolitskog kondenzatora ... 41

5. ZAKLJUČAK ... 47

LITERATURA ... 48

SAŽETAK ... 49

PRILOZI ... 50

1. UVOD

Najčešće korištene komponente u elektrotehnici su otpornik, zavojnica i kondenzator, mogu se pronaći u gotovo svakom električnom krugu. Za prikazivanje idealnih komponenti koriste se matematički modeli, a to su: otpor, induktivitet i kapacitet. U praksi komponente nisu idealne te ih prikazujemo s pomoću nadomjesnih shema u kojima koristimo matematičke modele. Komponente u nadomjesnim shemama se sastoje od osnovnog svojstva i ostalih parazitskih. Iako su parazitska svojstva mala u odnosu na osnovno, ona ipak imaju utjecaj koji se pri određenim frekvencijama ne smije zanemariti te prije samog mjerenja je potrebno približno poznavati red veličine nadomjesnih parametara na temelju nazivnih vrijednosti glavnog svojstva komponente, geometrije komponente te materijala izrade same komponente.

1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada je prikazati proces mjerenja nadomjesnih parametara osnovnih elektroničkih komponenti (otpornik, kondenzator i zavojnica) s pomoću RLC-metra te analiza izmjerenih veličina. U radu su mjereni parametri: otpor, kapacitet, induktivitet i faktor dobrote.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

A Karalić u svom radu [1] potvrđuje da vrlo visoke frekvencije do reda veličine 25kHz imaju sve veći utjecaj na promjenu parametara osnovnih elektroničkih komponenti, a osobito je ta promjena izražena za reaktivne elemente kondenzator i zavojnicu kojima pri frekvenciji od 25 kHz dolazi do promjene faznog kuta za približno 90°.

I. Tolić u laboratorijskoj vježni [2] opisuje kako kako pri matematičkom modeliranju komponenti je potrebno koristiti složenije od idealnih komponenti, te se moraju uvažiti parazitske komponente, kao na primjer za otpor se moraju uvažiti iduktivitet, parazitske kapacitivnosti, skin-efekt i slično.

2.1. Definicija mjerenih veličina u frekvencijskom području

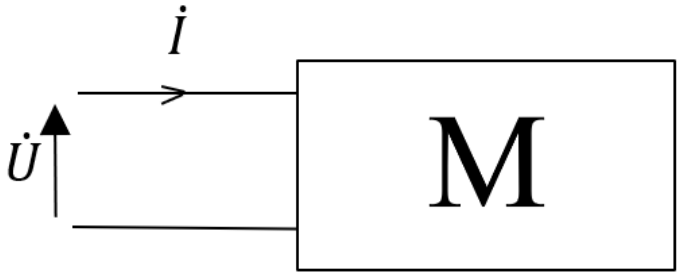
Kod svih nadomjesnih shema u nastavku promatrat će se funkcija mreže jednoprilaza (Slika 2.1.), koja odgovara impedanciji mreže prema izrazu (2-1).[3]

Gdje su:

$|Z(j\omega)|$ iznos impedancije ovisan o frekvenciji (amplitudno-frekvencijska karakteristika),

$\varphi(j\omega)$ kut impedancije ovisan o frekvenciji (fazno-frekvencijska karakteristika).

$$Z(j\omega) = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = |Z(j\omega)| \angle \varphi(j\omega) \tag{2-1}$$



Slika 2. 1. *Nadmojesna blok shema jednoprilazne mreže*.

U članku [4] opisano je kako se osnovne elektroničke komponente ponašaju ovisno o promjeni frekvencije. U članku su prikazani također i grafovi promjene parametara komponenti u odnosu na promjenu frekvencije, koji su u nastavku rada na primjerima stvarnih komponenti prikazani u

programskom paketu MATLAB pomoću amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika.

2.2. Mjerni instrument

Mjerni instrumenti koji se koriste za mjerenje parametara osnovnih elektroničkih komponenti se nazivaju RLC metri. U nastavku je opisan RLC metar koji je korišten pri mjerenju parametara u ovom radu.

Mjerni instrument koji se koristio za mjerenja je GW instek LCR-816 LCR meter. Instrument te njegov izgled, mjesto uključenja za napajanje, te način priključivanja priključaka na instrument prikazano je na slikama (Slika 2.2. i Slika 2.3.).[5]

Slika 2. 2. *Izgled prednje strane mjernog instrumenta.*

Slika 2. 3. *Izgled stražnje strane mjernog instrumenta.*

Instrumentom se može mjeriti induktivitet (L), kapacitet (C), otpor (R) te faktor dobrote kruga (Q). Na samom uređaju ne može se istovremeno ispitivati svaki parametar nego ima četiri

načina ispitivanja parametara komponenti a to su: C/R, C/Q, R/Q i L/Q. Također instrument ima mogućnost mjerenja prema serijskom ili paralelnom nadomjesnom krugu. Sam instrument u sebi ima mogućnost provedbe više mjerenja te na ekranu prikazati srednju vrijednost mjerenja. U svim mjerenjima u ovom radu korišteno je ta mogućnost tako da je instrument napravio deset mjerenja te nakon obavljenih mjerenja prikazao srednju vrijednost izmjerenih rezultata. Iz tablice (Tablica 2.1.) mogu se vidjeti specifikacije mjernog instrumenta.

Tablica 2. 1. *Prikaz specifikacija mjernog instrumenta.*

Ispitna frekvencija	100Hz – 2kHz / 245 koraka
Granična pogreška	0,1 %
Brzina ispitivanja	68 ms
Raspon ispitnog napona	0,1V – 1,275V / 5mV korak
Raspon mjerenih parametara: Otpor (R) Kapacitet (C) Induktivitet (L) Faktor dobrote (Q)	 0,00001Ω - 99,999MΩ 0,00001pF – 99,999mF 0,00001mH – 99,999kH 0,00001 - 9999
Napajanje	100V – 240V, 47-63/400 Hz
Dimenzije i težina	322 (W) x 149 (H) x 433(D)mm, ≈5,5kg

3. OSNOVNE ELEKTRONIČKE KOMPONENTE

3.1. Otpornik

Otpornik je elektronička komponenta koja se sastoji od dvije priključnice (jednoprilaz) tj. priključka koji su vrlo dobri vodiči električne struje te provodnog tijela koje kada kroz njega prolazi struja on tu energiju pretvara u toplinu koju predaje okolini.

Fizikalna veličina koja opisuje otpornik je otpor te mjerna jedinica za otpor je Ohm u počast fizičaru Georg Simon Ohmu i iskazuje je s velikim slovom omega [Ω].

„Otpor od 1 [Ω] mogao bi se realizirati ovako: to je otpor što ga električnoj struji pruža stupac žive dug 106.25 cm, poprečnog presjeka 1 mm^2, na temperaturi od 0°C.“[3]

Najjednostavniji matematički model koji se koristi u električnim krugovima za modeliranje otpornika je otpor u kojem zanemarujemo sve ostale (parazitske) veličine osim otpora, jednadžba koja opisuje otpor u vremenskoj domeni je:

$$R = \frac{u(t)}{i(t)} \tag{3-1}$$

Također na veličinu otpora utjecaj ima i visina temperature, tako da pri višim temperaturama raste i otpor po jednadžbi:

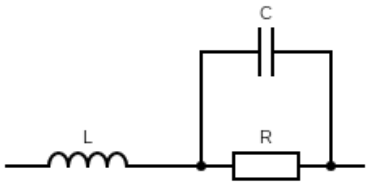
$$R = R_{20}[1 + \alpha(T - 20)] \tag{3-2}$$

R_{20} → predstavlja otpor otpornika pri temperaturi od 20°C

α → predstavlja koeficijent promjene otpora ako se temperatura poveća za 1°C

T → predstavlja temperaturu pri kojoj želimo izračunti otpor otpornika

3.1.1 Nadomjesna shema realnog otpornika



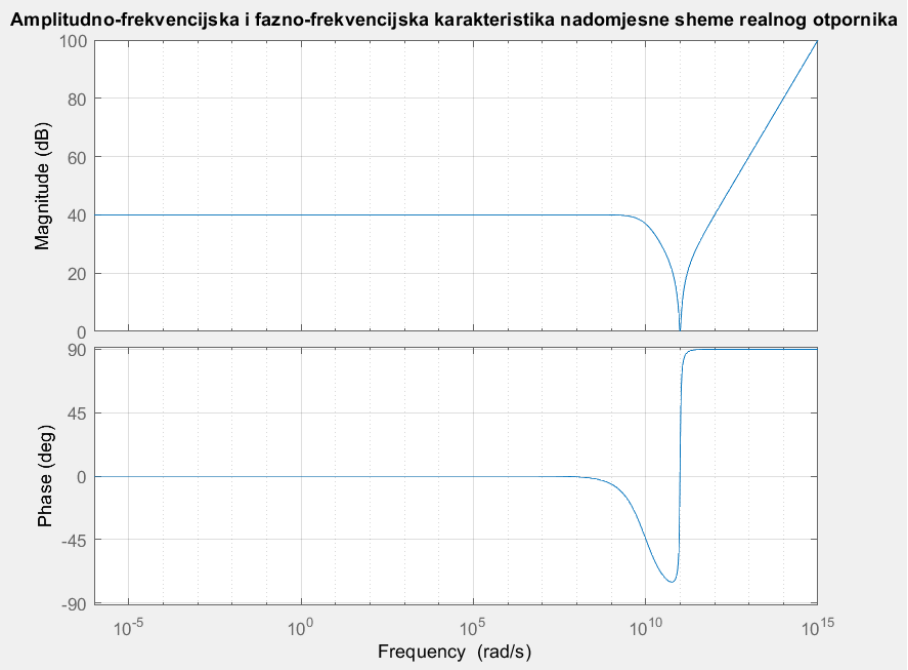
Slika 3. 1. *Nadomjesna shema realnog otpornika.*

Ukupna impedancija nadomjesne sheme sa slike (Slika 3.1.) može se prikazati izrazom (3-3). Pomoću izraza (3-3) može se prikazati amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesnog kruga mjernog otpornika (Slika 3.2.). Frekvencijska karakteristika prikazana je u programu MATLAB s pomoću koda prikazanog na slici (Slika 3.3.). Koristit će se relativno širok raspon kružnih frekvencija, tj. od 10^{-5}[rad/s] do 10^{15} [rad/s]. Za prikaz frekvencijskih karakteristika koristi se numerički postupak gdje se moraju pretpostaviti vrijednosti parametara otpornika, to jest koriste se vrijednosti parametara nekog realnog otpornika kako bi se na primjeru stvarnog otpornika prikazala frekvencijska karakteristika. Kod pretpostavljanja iznosa parazitskih parametara nastojao se odabrati iznos koji odgovara redu veličine stvarne vrijednosti parazitskog parametra. Vrijednosti parametara prikazane su unutar koda u MATLAB-u (Slika 3.3.) i u tablici (Tablica 3.1.).

$$Z = j\omega L + \frac{R*\frac{1}{j\omega C}}{R+\frac{1}{j\omega C}} = R\,\frac{LC(j\omega)^2+\frac{L}{R}j\omega+1}{j\omega RC+1} \qquad (3\text{-}3)$$

Tablica 3. 1. *Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realnog otpornika.*

Parametar	Iznos
R	100 [Ω]
L	100 [pH]
C	1 [pF]

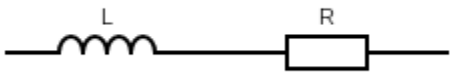


Slika 3. 2. *Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesne sheme realnog otpornika.*

```
clear all; close all; clc;

s = sym('s');

%%otpornik
R_otpor = sym('R_otpor');
L_otpor = sym('L_otpor');
C_otpor = sym('C_otpor');

Z_otpor=s*L_otpor+R_otpor/(R_otpor*C_otpor*s + 1);

% numeričke vrijednosti
R_otpor = 100; %[ohm]
L_otpor = 1e-10;%[H]
C_otpor = 1e-12;%[F]

[num_Z_otpor,den_Z_otpor] = numden(Z_otpor);
Z_tf_otpor = tf(sym2poly(subs(num_Z_otpor)) , sym2poly(subs(den_Z_otpor)));

figure(1);
bode(Z_tf_otpor,{1e-6,1e15}); grid on;
title ('Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesne sheme realnog otpornika');
```

Slika 3. 3. *Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realnog otpornika.*

3.1.2. Serijska nadomjesna shema realnog otpornika



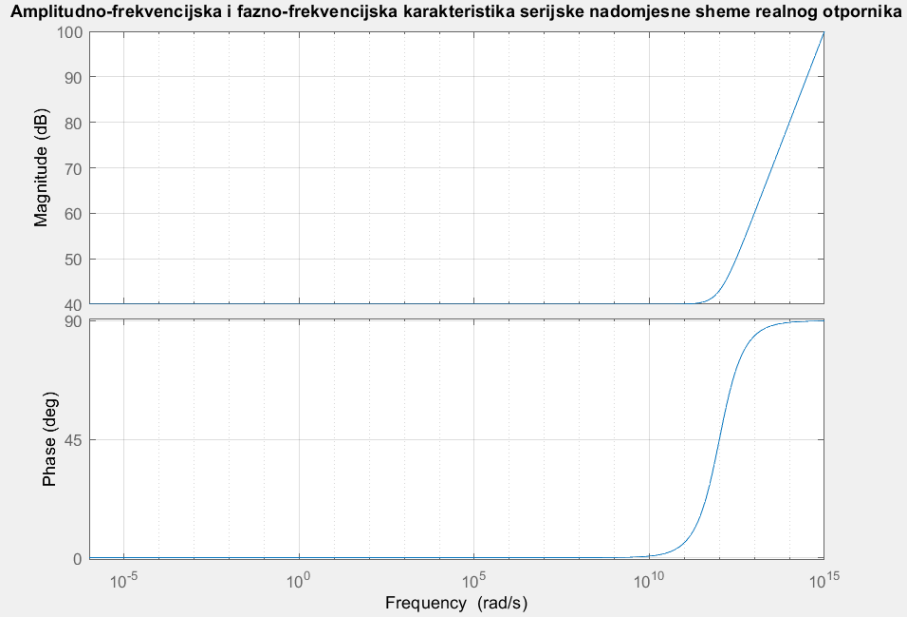
Slika 3. 4. *Serijska nadomjesna shema realnog otpornika.*

Ukupna impedancija nadomjesne sheme sa slike (Slika 3.4.) može se prikazati izrazom (3-4). Pomoću izraza (3-4) može se prikazati amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesnog kruga mjernog otpornika (Slika 3.5.). Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika prikazana je u programu MATLAB s pomoću koda prikazanog na slici (Slika 3.6.). Koristit će se relativno širok raspon kružnih frekvencija, tj. od 10^{-5}[rad/s] do 10^{15} [rad/s]. Za prikaz frekvencijskih karakteristika koristi se numerički postupak gdje se moraju pretpostaviti vrijednosti parametara otpornika, to jest koriste se vrijednosti parametara nekog realnog otpornika kako bi se na primjeru stvarnog otpornika prikazala frekvencijska karakteristika. Kod pretpostavljanja iznosa parazitskih parametara nastojao se odabrati iznos koji odgovara redu veličine stvarne vrijednosti parazitskog parametra. Vrijednosti parametara prikazane su unutar koda u MATLAB-u (Slika 3.6.) i u tablici (Tablica 3.2.).

$$Z = j\omega L + R = R(\frac{j\omega L}{R+1}) \quad (3\text{-}4)$$

Tablica 3. 2. *Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog otpornika.*

Parametar	Iznos
R	100 [Ω]
L	100 [pH]

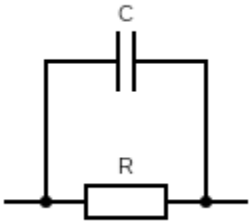


Slika 3. 5. *Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog otpornika.*

```
clear all; close all; clc;

s = sym('s');

%%otpornik
R_otpor = sym('R_otpor');
L_otpor = sym('L_otpor');

Z_otpor=s*L_otpor + R_otpor;

% numeričke vrijednosti
R_otpor = 100; %[ohm]
L_otpor = 1e-10;%[H]

[num_Z_otpor,den_Z_otpor] = numden(Z_otpor);
Z_tf_otpor = tf(sym2poly(subs(num_Z_otpor)) , sym2poly(subs(den_Z_otpor)));

figure(1);
bode(Z_tf_otpor,{1e-6,1e15}); grid on;
title ('Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog otpornika');
```

Slika 3. 6. *Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog otpornika.*

3.1.3. Paralelna nadomjesna shema realnog otpornika



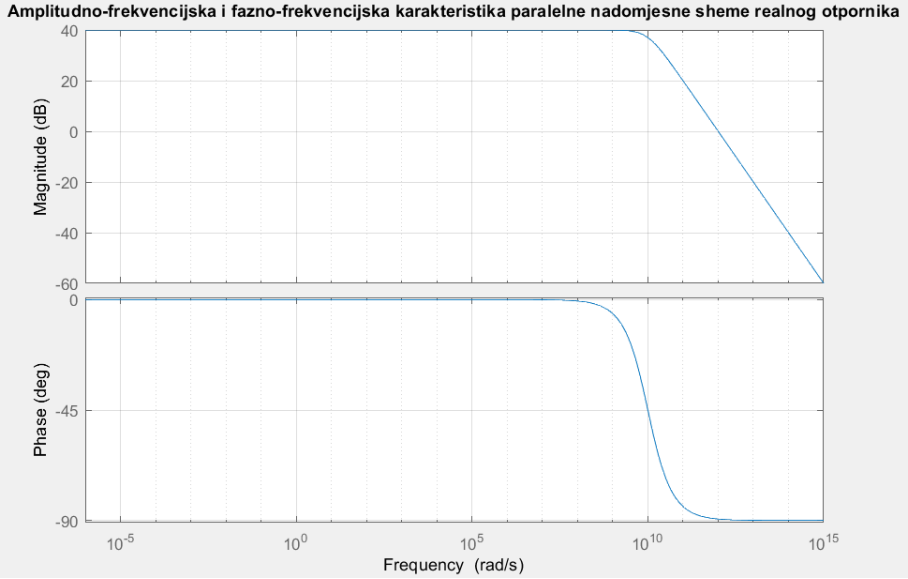
Slika 3. 7. *Paralelna nadomjesna shema realnog otpornika.*

Ukupna impedancija nadomjesne sheme sa slike (Slika 3.7.) može se prikazati izrazom (3-5). Pomoću izraza (3-5) može se prikazati amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesnog kruga mjernog otpornika (Slika 3.8.). Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika prikazana je u programu MATLAB s pomoću koda prikazanog na slici (Slika 3.9.). Koristit će se relativno širok raspon kružnih frekvencija, tj. od 10^{-5}[rad/s] do 10^{15} [rad/s]. Za prikaz frekvencijskih karakteristika koristi se numerički postupak gdje se moraju pretpostaviti vrijednosti parametara otpornika, kako bi se na primjeru stvarnog otpornika prikazala frekvencijska karakteristika. Kod pretpostavljanja iznosa parazitskih parametara nastojao se odabrati iznos koji odgovara redu veličine stvarne vrijednosti parazitskog parametra. Vrijednosti parametara prikazane unutar koda u MATLAB-u (Slika 3.9.) i u tablici (Tablica 3.3.).

$$Z = \frac{R*\frac{1}{j\omega C}}{R+\frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{j\omega RC+1} \tag{3-5}$$

Tablica 3. 3. *Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog otpornika.*

Parametri	Iznos
R	100 [Ω]
C	1 [pF]



Slika 3. 8. *Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog otpornika.*

```
clear all; close all; clc;

s = sym('s');

%%otpornik
R_otpor = sym('R_otpor');
C_otpor = sym('C_otpor');

Z_otpor= R_otpor/(s*C_otpor*R_otpor +1);

% numeričke vrijednosti
R_otpor = 100; %[ohm]
C_otpor = 1e-12;%[F]

[num_Z_otpor,den_Z_otpor] = numden(Z_otpor);
Z_tf_otpor = tf(sym2poly(subs(num_Z_otpor)) , sym2poly(subs(den_Z_otpor)));

figure(1);
bode(Z_tf_otpor,{1e-6,1e15}); grid on;
title ('Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog otpornika');
```

Slika 3. 9. *Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog otpornika.*

3.2. Kondenzator

Električni kondenzator kao komponenta električnog kruga se sastoji oddvaju vodljivih izoliranih tijela s mogućnošću skladištenja elektrostatske energije. [4]

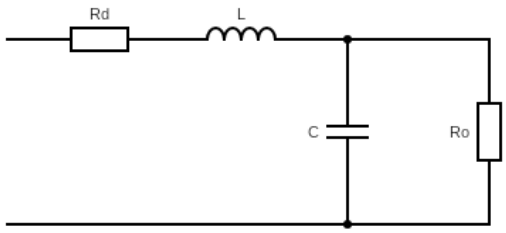
Veličina kojom se mjeri električni kapacitet kondenzatora je Farad [F].

Najjednostavniji matematički model koji se koristi u električnim krugovima za modeliranje kondenzatora je kapacitet u kojem zanemarujemo sve ostale (parazitske) veličine osim kapaciteta, jednadžba koja opisuje kapacitet u vremenskoj domeni je:

$$i_c = C\frac{du_c}{dt} \tag{3-6}$$

Iz izraza (3-6) vidljivo je kako u kapacitetu ne možemo imati trenutnu promjenu napona, jer to dovodi do derivacije napona koja za taj slučaj iznosi beskonačno te dolazi do uništenja kapaciteta.

3.2.1. Nadomjesna shema realnog kondenzatora



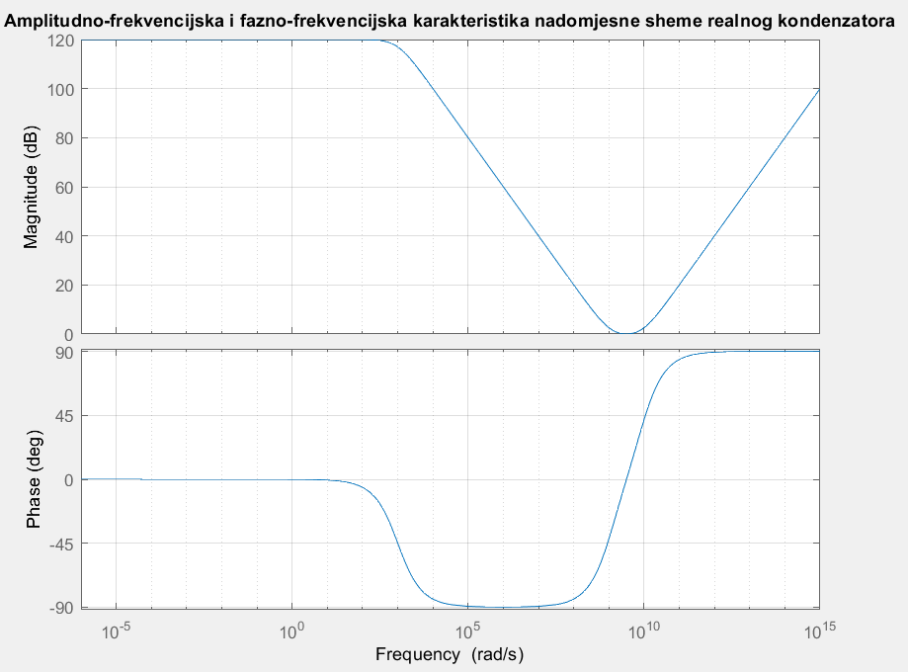
Slika 3. 10. *Nadomjesna shema realnog kondenzatora.*

Ukupna impedancija nadomjesne sheme sa slike (Slika 3.10.) može se prikazati izrazom (3-7). Prvi dio izraza (3-7) je prikazan da se lakše poveže s nadomjesnom shemom, drugi dio izraza je racionalna funkcija s varijablom jω, dok je treći oblik izraza zapis s istaknutim vremenskim konstantama. Pomoću izraza (3-7) može se prikazati amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesnog kruga mjernog kondenzatora (Slika 3.11.). Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika prikazana je u programu MATLAB s pomoću koda prikazanog na slici (Slika 3.12.). Koristit će se relativno širok raspon kružnih frekvencija, tj. od 10^{-5}[rad/s] do 10^{15} [rad/s]. Za prikaz frekvencijskih karakteristika koristi se numerički postupak gdje se moraju pretpostaviti vrijednosti parametara kondenzatora, kako bi se na primjeru stvarnog kondenzatora prikazala frekvencijska karakteristika. Kod pretpostavljanja iznosa parazitskih parametara nastojao se odabrati iznos koji odgovara redu veličine stvarne vrijednosti parazitskog parametra. Vrijednosti parametara prikazane su unutar koda u MATLAB-u (Slika 3.12.) i u tablici (Tablica 3.4.).

$$Z = R_d + j\omega L + \frac{R_0}{1+j\omega CR_0} = \frac{(j\omega)^2 R_0 LC + j\omega(CR_dR_0+L)+R_0+R_d}{1+j\omega CR_0} = (R_0+R_d)\frac{\frac{R_0}{R_0+R_d}LC(j\omega)^2+\frac{CR_dR_0+L}{R_0+R_d}j\omega+1}{1+j\omega CR_0} \tag{3-7}$$

Tablica 3. 4. *Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realnog kondenzatora.*

Parametar	Iznos
Rd	1 [Ω]
R0	1 [MΩ]
L	100 [pH]
C	1 [nF]

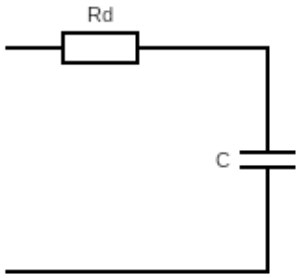


Slika 3. 11. *Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesne sheme realnog kondenzatora.*

```
clear all; close all; clc;

s = sym('s');

%%kondenzator
Rd_kondenzator = sym('Rd_kondenzator');
R0_kondenzator = sym('R0_kondenzator');
L_kondenzator = sym('L_kondenzator');
C_kondenzator = sym('C_kondenzator');

Z_kondenzator = Rd_kondenzator + s*L_kondenzator + R0_kondenzator/(R0_kondenzator*C_kondenzator*s + 1);

% numeričke vrijednosti
Rd_kondenzator = 1; %[ohm]
R0_kondenzator = 1e6; %[Ohm]
L_kondenzator = 1e-10;%[H]
C_kondenzator = 1e-9;%[F]

[num_Z_kondenzator,den_Z_kondenzator] = numden(Z_kondenzator);
Z_tf_kondenzator = tf(sym2poly(subs(num_Z_kondenzator)) , sym2poly(subs(den_Z_kondenzator)));

figure(1);
bode(Z_tf_kondenzator,{1e-6,1e15}); grid on;
title ('Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesne sheme realnog kondenzatora');
```

Slika 3. 12. *Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realnog kondenzatora.*

3.2.2. Serijska nadomjesna shema realnog kondenzatora



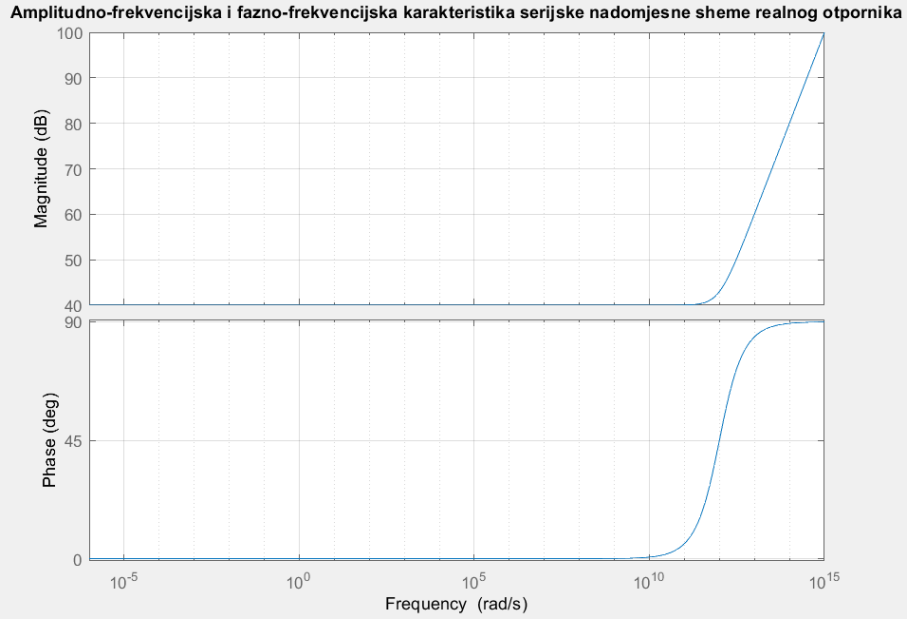
Slika 3. 13. *Serijska nadomjesna shema realnog kondenzatora.*

Ukupna impedancija nadomjesne sheme sa slike (Slika 3.13.) može se prikazati izrazom (3-8). Pomoću izraza (3-8) može se prikazati amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesnog kruga mjernog kondenzatora (Slika 3.14.). Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika prikazana je u programu MATLAB s pomoću koda prikazanog na slici (Slika 3.15.). Koristit će se relativno širok raspon kružnih frekvencija, tj. od 10^{-5}[rad/s] do 10^{15} [rad/s]. Za prikaz frekvencijskih karakteristika koristi se numerički postupak gdje se moraju pretpostaviti vrijednosti parametara kondenzatora, kako bi se na primjeru stvarnog kondenzatora prikazala frekvencijska karakteristika. Kod pretpostavljanja iznosa parazitskih parametara nastojao se odabrati iznos koji odgovara redu veličine stvarne vrijednosti parazitskog parametra. Vrijednosti parametara prikazane su unutar koda u MATLAB-u (Slika 3.15.) i u tablici (Tablica 3.5.).

$$Z = R_d + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1+j\omega C R_d}{j\omega C} = R_d \frac{1+j\omega C R_d}{j\omega C R_d} \quad (3\text{-}8)$$

Tablica 3. 5. *Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog kondenzatora.*

Parametar	Iznos
Rd	1 [Ω]
C	1 [nF]

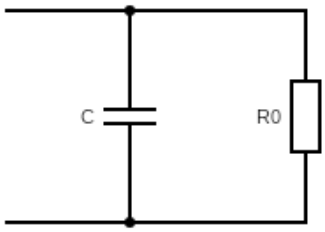


Slika 3. 14. *Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog kondenzatora.*

```
clear all; close all; clc;

s = sym('s');

%%kondenzator
Rd_kondenzator = sym('Rd_kondenzator');
C_kondenzator = sym('C_kondenzator');

Z_serijski_kondenzator = Rd_kondenzator + 1/(C_kondenzator*s );

% numeričke vrijednosti
Rd_kondenzator = 1; %[ohm]
C_kondenzator = 1e-9;%[F]

[num_Z_serijski_kondenzator,den_Z_serijski_kondenzator] = numden(Z_serijski_kondenzator);
Z_tf_serijski_kondenzator = tf(sym2poly(subs(num_Z_serijski_kondenzator)) , sym2poly(subs(den_Z_serijski_kondenzator)));

figure(3);
bode(Z_tf_serijski_kondenzator,{1e-6,1e15}); grid on;
title ('Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog kondenzatora');
```

Slika 3. 15. *Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog kondenzatora.*

3.2.3. Paralelna nadomjesna shema realnog kondenzatora



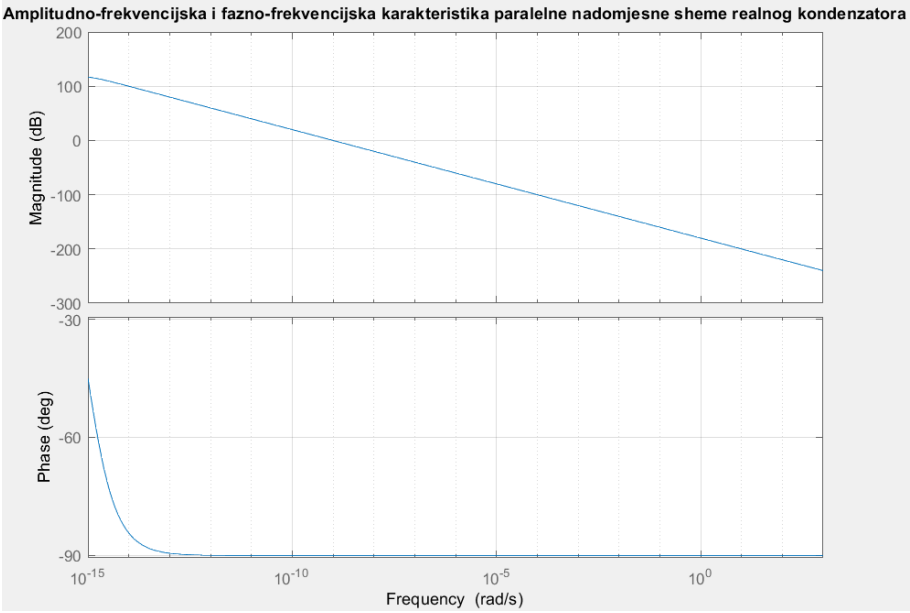
Slika 3. 16. *Paralelna nadomjesna shema realnog kondenzatora.*

Ukupna impedancija nadomjesne sheme sa slike (Slika 3.16.) može se prikazati izrazom (3-9). Pomoću izraza (3-9) može se prikazati amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesnog kruga mjernog kondenzatora (Slika 3.17.). Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika prikazana je u programu MATLAB s pomoću koda prikazanog na slici (Slika 3.18.). Koristit će se relativno širok raspon kružnih frekvencija, tj. od 10^{-15}[rad/s] do 10^{5} [rad/s]. Za prikaz frekvencijskih karakteristika koristi se numerički postupak gdje se moraju pretpostaviti vrijednosti parametara kondenzatora, kako bi se na primjeru stvarnog kondenzatora prikazala frekvencijska karakteristika. Kod pretpostavljanja iznosa parazitskih parametara nastojao se odabrati iznos koji odgovara redu veličine stvarne vrijednosti parazitskog parametra. Vrijednosti parametara prikazane su unutar koda u MATLAB-u (Slika 3.18.) i u tablici (Tablica 3.6.).

$$Z = \frac{R_0 * \frac{1}{j\omega C}}{R_0 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R_0}{1 + j\omega C R_0} \tag{3-9}$$

Tablica 3. 6. *Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog kondenzatora.*

Parametar	Iznos
Ro	1 [MΩ]
C	1 [nF]



Slika 3. 17. *Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog kondenzatora.*

```
clear all; close all; clc;

s = sym('s');

%%kondenzator
R0_kondenzator = sym('R0_kondenzator');
C_kondenzator = sym('C_kondenzator');

Z_paralelni_kondenzator = (R0_kondenzator*(1/s*C_kondenzator))/(R0_kondenzator+1/s*C_kondenzator);

% numeričke vrijednosti
R0_kondenzator = 1e6; %[Ohm]
C_kondenzator = 1e-9;%[F]

[num_Z_paralelni_kondenzator,den_Z_paralelni_kondenzator] = numden(Z_paralelni_kondenzator);
Z_tf_paralelni_kondenzator = tf(sym2poly(subs(num_Z_paralelni_kondenzator)) , sym2poly(subs(den_Z_paralelni_kondenzator)));

figure(4);
bode(Z_tf_paralelni_kondenzator); grid on;
title ('Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog kondenzatora');
```

Slika 3. 18. *Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog kondenzatora.*

3.3. Zavojnica

Zavojnica je elektronička komponenta koja se sastoji od dva prilaza (priključaka) i vodiča koji se nalazi između njih, koja služi kao spremnik magnetske energije.[5]

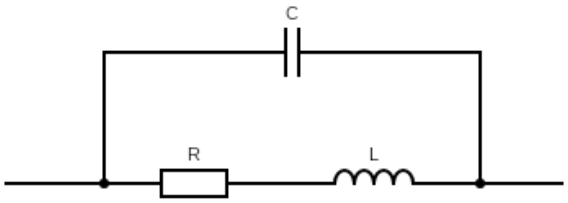
Veličina za mjerenja induktiviteta zavojnice je Henri [H].

Najjednostavniji matematički model koji se koristi u električnim krugovima za modeliranje zavojnice je induktivitet u kojem zanemarujemo sve ostale (parazitske) veličine osim induktiviteta, jednadžba koja opisuje induktivitet u vremenskoj domeni je:

$$u_L = L\frac{di_L}{dt} \tag{3-10}$$

Iz izraza (3-1) vidljivo je kako u induktivitetu ne možemo imati trenutnu promjenu struje, jer to dovodi do derivacije struja koja za taj slučaj iznosi beskonačno te dolazi do uništenja induktiviteta.

3.3.1. Nadomjesna shema realne zavojnice



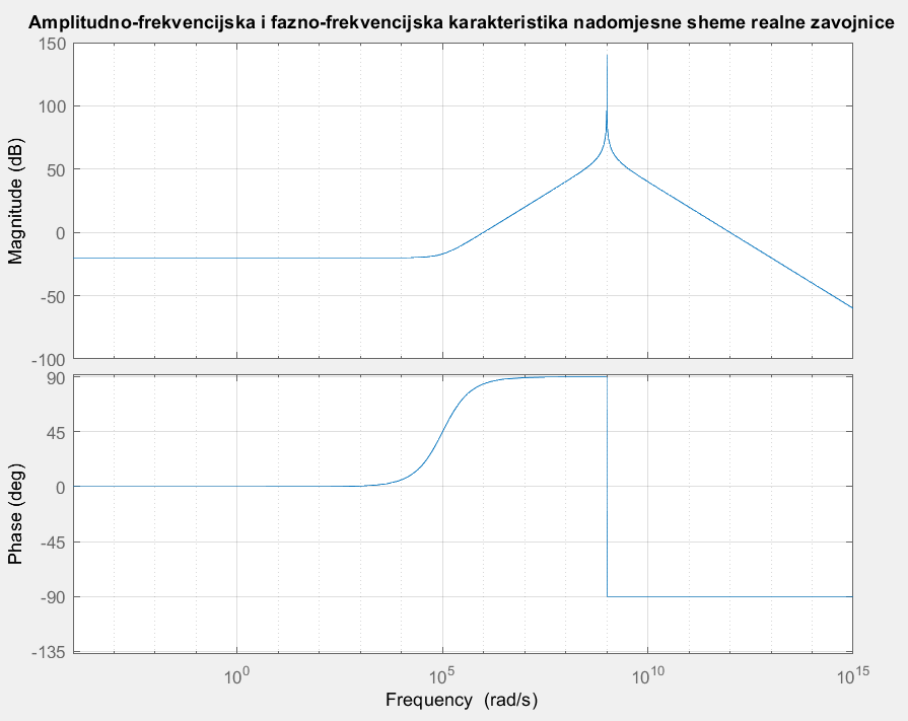
Slika 3. 19. *Nadomjesna shema realne zavojnice.*

Ukupna impedancija nadomjesne sheme sa slike (Slika 3.19.) može se prikazati izrazom (3-11). Pomoću izraza (3-11) može se prikazati amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesnog kruga mjerne zavojnice (Slika 3.20.). Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika prikazana je u programu MATLAB s pomoću koda prikazanog na slici (Slika 3.21.). Koristit će se relativno širok raspon kružnih frekvencija, tj. od 10^{-5}[rad/s] do 10^{15} [rad/s]. Za prikaz frekvencijskih karakteristika koristi se numerički postupak gdje se moraju pretpostaviti vrijednosti parametara zavojnice, kako bi se na primjeru stvarne zavojnice prikazala frekvencijska karakteristika. Kod pretpostavljanja iznosa parazitskih parametara nastojao se odabrati iznos koji odgovara redu veličine stvarne vrijednosti parazitskog parametra. Vrijednosti parametara prikazane su unutar koda u MATLAB-u (Slika 3.21.) i u tablici (Tablica 3.7.).

$$Z = \frac{(R+j\omega L)*\frac{1}{j\omega C}}{(R+j\omega L)+\frac{1}{j\omega C}} = \frac{R+j\omega L}{(j\omega)^2LC+j\omega RC+1} = R\frac{j\omega L/R+1}{(j\omega)^2LC+j\omega RC+1} \tag{3-11}$$

Tablica 3. 7. *Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realne zavojnice.*

Parametar	Iznos
R	100 [mΩ]
L	1 [μF]
C	1 [pF]

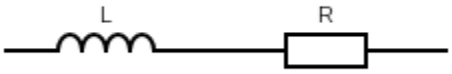


Slika 3. 20. *Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesne sheme realne zavojnice.*

```
clear all; close all; clc;

s = sym('s');

%%zavojnica
R_zavojnica = sym('R_zavojnica');
L_zavojnica = sym('L_zavojnica');
C_zavojnica = sym('C_zavojnica');

Z_zavojnica = (R_zavojnica + s*L_zavojnica)/(s*R_zavojnica*C_zavojnica + power(s,2)*L_zavojnica*C_zavojnica+1);

% numeričke vrijednosti
R_zavojnica = 100e-3; %[ohm]
L_zavojnica = 1e-6; %[H]
C_zavojnica = 1e-12; %[F]

[num_Z_zavojnica,den_Z_zavojnica] = numden(Z_zavojnica);
Z_tf_zavojnica = tf(sym2poly(subs(num_Z_zavojnica)) , sym2poly(subs(den_Z_zavojnica)));

figure(5);
bode(Z_tf_zavojnica,{1e-4,1e15}); grid on;
title ('Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesne sheme realne zavojnice');
```

Slika 3. 21. *Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realne zavojnice.*

3.3.2. Serijska nadomjesna shema realne zavojnice



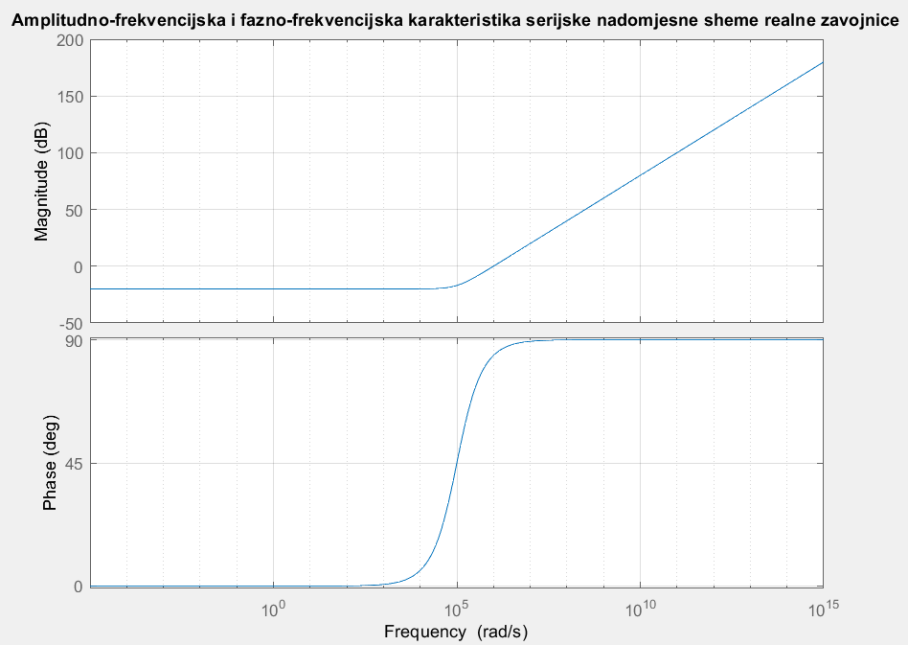
Slika 3. 22. *Serijska nadomjesna shema realne zavojnice.*

Ukupna impedancija nadomjesne sheme sa slike (Slika 3.22.) može se prikazati izrazom (3-12). Pomoću izraza (3-12) može se prikazati amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesnog kruga mjerne zavojnice (Slika 3.23.). Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika prikazana je u programu MATLAB s pomoću koda prikazanog na slici (Slika 3.24.). Koristit će se relativno širok raspon kružnih frekvencija, tj. od 10^{-5}[rad/s] do 10^{15} [rad/s]. Za prikaz frekvencijskih karakteristika koristi se numerički postupak gdje se moraju pretpostaviti vrijednosti parametara zavojnice, kako bi se na primjeru stvarne zavojnice prikazala frekvencijska karakteristika. Kod pretpostavljanja iznosa parazitskih parametara nastojao se odabrati iznos koji odgovara redu veličine stvarne vrijednosti parazitskog parametra. Vrijednosti parametara prikazane su unutar koda u MATLAB-u (Slika 3.24.) i u tablici (Tablica 3.8.).

$$Z = j\omega L + R \tag{3-12}$$

Tablica 3. 8. *Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realne zavojnice.*

Parametar	Iznos
R	100 [mΩ]
L	1 [μF]

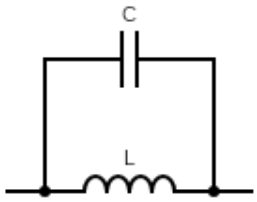


Slika 3. 23. *Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika serijske nadomjesne sheme realne zavojnice.*

```
clear all; close all; clc;

s = sym('s');

%%zavojnica
R_zavojnica = sym('R_zavojnica');
L_zavojnica = sym('L_zavojnica');

Z_serijska_zavojnica = R_zavojnica + s*L_zavojnica;

% numeričke vrijednosti
R_zavojnica = 100e-3; %[ohm]
L_zavojnica = 1e-6; %[H]

[num_Z_serijska_zavojnica,den_Z_serijska_zavojnica] = numden(Z_serijska_zavojnica);
Z_tf_serijska_zavojnica = tf(sym2poly(subs(num_Z_serijska_zavojnica)) , sym2poly(subs(den_Z_serijska_zavojnica)));

figure(6);
bode(Z_tf_serijska_zavojnica,{1e-5,1e15}); grid on;
title ('Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika serijske nadomjesne sheme realne zavojnice');
```

Slika 3. 24. *Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realne zavojnice.*

3.3.3. Paralelna nadomjesna shema realne zavojnice



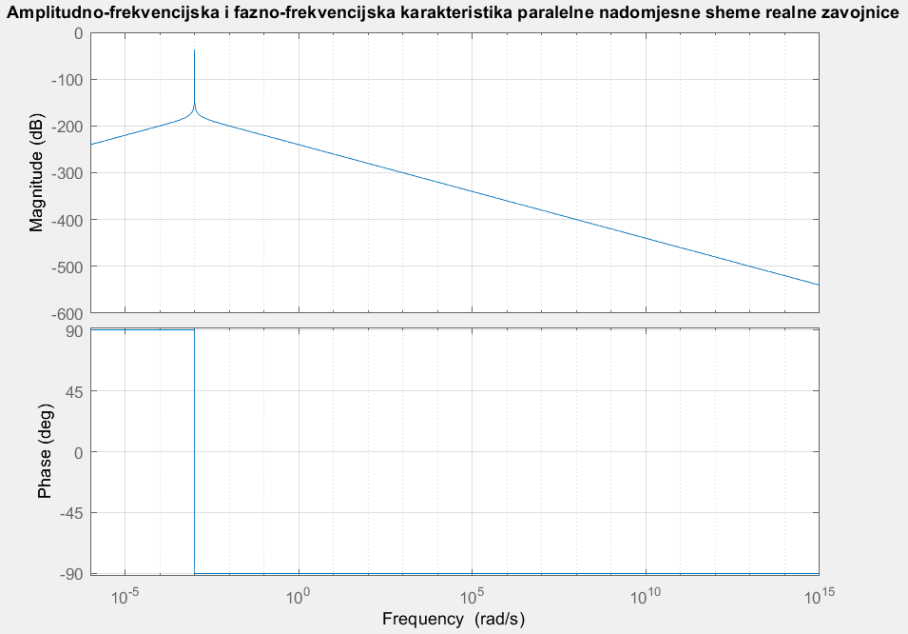
Slika 3. 25. *Paralelna nadomjesna shema realne zavojnice.*

Ukupna impedancija nadomjesne sheme sa slike (Slika 3.25.) može se prikazati izrazom (3-13). Pomoću izraza (3-13) može se prikazati amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesnog kruga mjerne zavojnice (Slika 3.26.). Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika prikazana je u programu MATLAB s pomoću koda prikazanog na slici (Slika 3.27.). Koristit će se relativno širok raspon kružnih frekvencija, tj. od 10^{-5}[rad/s] do 10^{15} [rad/s]. Za prikaz frekvencijskih karakteristika koristi se numerički postupak gdje se moraju pretpostaviti vrijednosti parametara zavojnice, kako bi se na primjeru stvarne zavojnice prikazala frekvencijska karakteristika. Kod pretpostavljanja iznosa parazitskih parametara nastojao se odabrati iznos koji odgovara redu veličine stvarne vrijednosti parazitskog parametra. Vrijednosti parametara prikazane su unutar koda u MATLAB-u (Slika 3.27.) i u tablici (Tablica 3.9.).

$$Z = \frac{j\omega L * \frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega L}{(j\omega)^2 LC + 1} \tag{3-4}$$

Tablica 3. 9. *Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika paralelne nadomjesne sheme realne zavojnice.*

Parametar	Iznos
C	1 [pF]
L	1 [µF]



Slika 3. 26. *Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika paralelne nadomjesne sheme realne zavojnice.*

```
clear all; close all; clc;

s = sym('s');

%%zavojnica
L_zavojnica = sym('L_zavojnica');
C_zavojnica = sym('C_zavojnica');

Z_paralelna_zavojnica = (s*L_zavojnica * (1/s*C_zavojnica))/(s*L_zavojnica + (1/s*C_zavojnica));

% numeričke vrijednosti
L_zavojnica = 1e-6; %[H]
C_zavojnica = 1e-12; %[F]

[num_Z_paralelna_zavojnica,den_Z_paralelna_zavojnica] = numden(Z_paralelna_zavojnica);
Z_tf_paralelna_zavojnica = tf(sym2poly(subs(num_Z_paralelna_zavojnica)) , sym2poly(subs(den_Z_paralelna_zavojnica)));

figure(7);
bode(Z_tf_paralelna_zavojnica,{1e-6,1e15}); grid on;
title ('Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika paralelne nadomjesne sheme realne zavojnice');
```

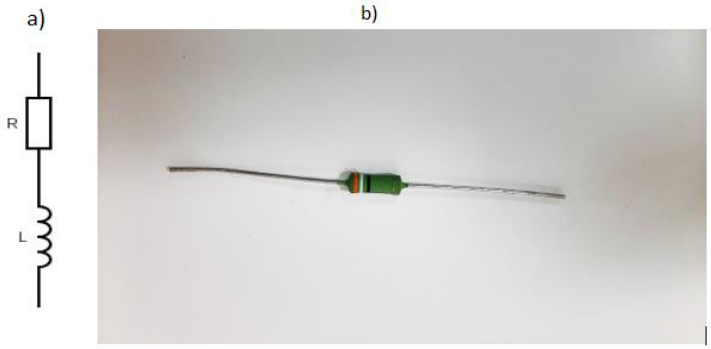
Slika 3. 27. *Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika paralelne nadomjesne sheme realne zavojnice.*

4. MJERENJE PARAMETARA ELEKTRONIČKIH KOMPONENTI

4.1. Mjerenje parametara otpornika

Parametri koji su mjereni kod otpornika su otpor (R) i faktor dobrote (Q). Pretpostavka je da će instrument mjeriti vrijednost otpora koja je približna nazivnoj vrijednosti, također se pretpostavlja da će izmjereni faktor dobrote biti približno nula.

Pri mjerenju parametara otpornika korištena je nadomjesna shema (Slika 4.1. pod a), što je pojednostavljena shema u usporedi s onom prikazanom u teorijskom dijelu rada, razlog tomu je što instrument s pomoću kojeg je izvršeno mjerenje ima u sebi mogućnost mjerenja parametara preko nadomjesne sheme kao što je na slici. Za proces mjerenja korišten je jedan otpornik nazivnog otpora 39Ω kao što je prikazano na slici (Slika 4.1. pod b).



Slika 4. 1. *a) Nadomjesna shema otpornika korištena pri mjerenju s mjernim uređajem, b) Otpornik korišten pri mjerenju nazivnog otpora 39 [Ω].*

Tablica 4. 1. *Rezultati mjerenja otpornika 39[Ω].*

f [kHZ]	R [Ω]	Q	X_L [H]	|Z| [Ω]	φ [°]
0,1	38,842	0,0002	0,007768	38,842	0,011459
0,2	38,842	0,0002	0,007768	38,842	0,011459
0,3	38,842	0,0003	0,011653	38,842	0,017189
0,4	38,843	0,0004	0,015537	38,843	0,022918
0,5	38,843	0,0006	0,023306	38,84301	0,034377
0,6	38,842	0,0006	0,023305	38,84201	0,034377
0,7	38,842	0,0008	0,031074	38,84201	0,045837
0,8	38,843	0,0009	0,034959	38,84302	0,051566
0,9	38,844	0,001	0,038844	38,84402	0,057296
1,0	38,844	0,0011	0,042728	38,84402	0,063025
1,1	38,843	0,0012	0,046612	38,84303	0,068755
1,2	38,844	0,0013	0,050497	38,84403	0,074484
1,3	38,843	0,0015	0,058265	38,84304	0,085944
1,4	38,843	0,0016	0,062149	38,84305	0,091673
1,5	38,843	0,0017	0,066033	38,84306	0,097403
1,6	38,842	0,0017	0,066031	38,84206	0,097403
1,7	38,842	0,0019	0,0738	38,84207	0,108862
1,8	38,843	0,002	0,077686	38,84308	0,114591
1,9	38,843	0,0021	0,08157	38,84309	0,120321
2,0	38,844	0,0022	0,085458	38,84449	0,126051

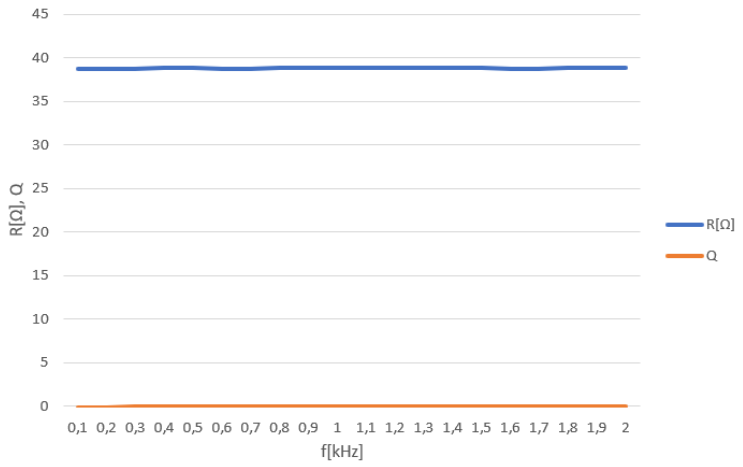
Iz tablice (Tablica 4.1.) vidljivo je kako se mjerenja poklapaju sa pretpostavkom, to jest otpor je približno 39[Ω] pri svakoj ispitnoj frekvenciji. Također se iz tablice može iščitati kako je porastom ispitne frekvencije rastao i faktor dobrote, ali on je i dalje ostao približno nula što se

poklapa s pretpostavkom. Na slici (Slika 4.3.) može se vidjeti graf koji prikazuje kako su se mijenjali izmjereni parametri s promjenom ispitne frekvencije, to jest iz grafa se može također uočiti kako se otpor gotovo nije mijenjao kao ni faktor dobrote, to jest ostali su približno konstantni pri mjerenju što se poklapa sa pretpostavkom prije mjerenja. U tablici (Tablica 4.1.) se također nalaze vrijednosti reaktancije (X_L), modula impedancije (|Z|) te faznog kuta (φ). Te vrijednosti su dobivene računskim putem s pomoću ispod navedenih izraza. Vrijednost reaktancije izračunata je izrazom (4-1), modul impedancije je izračunat je izrazom (4-2), dok vrijednost faznog kuta izračunata je izrazom (4-3).

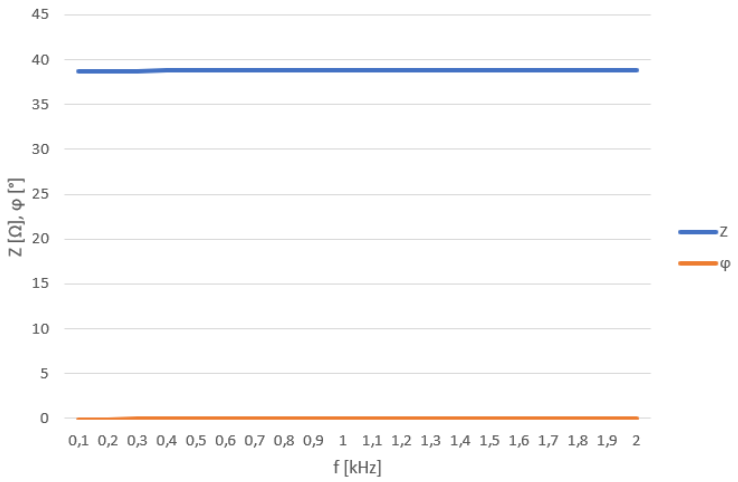
$$X_L = R * Q \tag{4-1}$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + {X_L}^2} \tag{4-2}$$

$$\varphi = \text{atan}\left(\frac{X_L}{R}\right) \tag{4-3}$$



Slika 4. 2. *Graf promjene parametara otpornika u odnosu na promjenu frekvencije.*



Slika 4. 3. *Graf promjene impedancije i faznog kuta u odnosu na frekvenciju.*

Iz grafa sa slike (Slika 4.3.) može se uočiti kako se impedancija otpornika i fazni kut otpornika ponašaju približno jednako kao i na slici (Slika 4.2.) unutar frekvencijskog spektra (od 0,1 kHz do 2 kHz), to jest impedancija i fazni kut ostaju približno konstantni.

Na sljedećim slikama (Slika 4.4. i Slika 4.5.) može se vidjeti koje su sve opcije bile odabrane na instrumentu pri svakom mjerenju parametara otpornika te se vidi kako je instrument spojen s pomoću priključnica na mjereni otpornik.

Slika 4. 4. *Postavke korištene pri mjerenju parametara.*

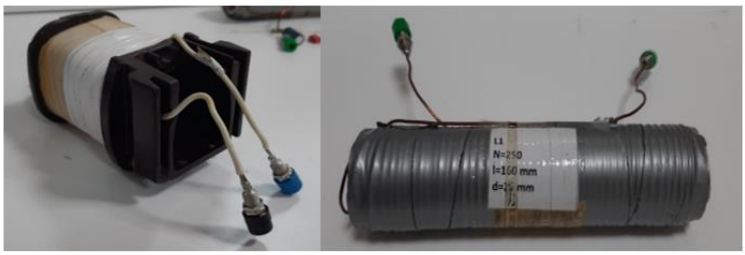
Slika 4. 5. *Način priključenja otpornika na stezaljke instrumenta.*

4.2. Mjerenje parametara zavojnice

Parametri koji su mjereni kod zavojnice su induktivitet (L) i faktor dobrote (Q). Pretpostavka je da će instrument mjeriti vrijednost induktiviteta koja je približna nazivnoj vrijednosti, također pretpostavlja se da iznos faktora dobrote rasti s porastom frekvencije.

Pri mjerenju parametara zavojnice korištena je nadomjesna shema (Slika 4.6.), što je pojednostavljena shema u usporedi s onom prikazanom u teorijskom dijelu rada, razlog tomu je što instrument s pomoću kojeg je izvršeno mjerenje ima u sebi mogućnost mjerenja parametara preko nadomjesne sheme kao što je na slici. Za proces mjerenja korištene su dvije zavojnice prikazane na slici (Slika 4.7.) s različitim nazivnim vrijednostima.

Slika 4. 6. *Nadomjesna shema zavojnice korištena pri mjerenju.*



Slika 4. 7. *a) Zavojnica nazivnog induktiviteta 45 [mH] korištena pri mjerenju, b) Zavojnica nazivnog induktiviteta 0,45 [mH] korištena pri mjerenju.*

U tablici (Tablica 4.2.) korišteni su indeksi kako bi se razlikovalo na koju se zavojnicu odnose koja mjerenja (indeks 1 predstavlja mjerenja s prvom zavojnicom, slika 4.7. pod a, indeks 2 predstavlja mjerenja s drugom zavojnicom, slika 4.7. pod b).

Tablica 4. 2. *Rezultati mjerenja obje zavojnice.*

f [kHz]	L_1[mH]	Q_1	Z_1 [Ω]	φ_1 [°]	L_2[mH]	Q_2	Z_2 [Ω]	φ_2 [°]
0,1	43,407	1,281	34,59963	52,02	0,43679	0,4817	0,632394	25,72
0,2	43,404	2,560	58,55671	68,66	0,43644	0,7781	0,893092	37,89
0,3	43,388	3,838	84,51495	75,40	0,43602	1,208	1,066948	50,38
0,4	43,376	5,112	111,082	78,93	0,43612	1,607	1,290981	58,11
0,5	43,356	6,382	137,8688	81,09	0,43609	2,003	1,531267	63,47
0,6	43,332	7,644	164,7497	82,55	0,43610	2,398	1,781283	67,36
0,7	43,303	8,873	191,6623	83,57	0,43607	2,781	2,038162	70,22
0,8	43,269	10,16	218,5447	84,38	0,43601	3,178	2,297565	72,53
0,9	43,237	11,36	245,445	84,97	0,43594	3,545	2,561387	74,25
1,0	43,193	12,66	272,2349	85,48	0,43598	3,970	2,82491	75,86
1,1	43,146	13,79	298,9868	85,85	0,43589	4,311	3,092645	76,94
1,2	43,09	15,15	325,5979	86,22	0,43586	4,123	3,381587	76,37
1,3	43,035	16,37	352,1712	86,50	0,43582	5,105	3,627494	78,92
1,4	42,988	17,47	378,7612	86,72	0,43576	5,434	3,897511	79,57
1,5	42,904	18,67	404,9403	86,93	0,43572	5,811	4,166927	80,24
1,6	42,851	19,60	431,3456	87,08	0,43571	6,090	4,438894	80,68
1,7	42,753	21,16	457,1722	87,29	0,43565	6,563	4,707066	81,34
1,8	42,672	22,34	483,0922	87,44	0,43557	6,922	4,977322	81,78
1,9	42,626	22,98	509,353	87,51	0,43555	7,111	5,250781	82,00
2,0	42,52	24,38	534,7714	87,65	0,43552	7,523	5,521045	82,43

Iz tablice (Tablica 4.2.) može se jasno iščitati kako se rezultati poklapaju s pretpostavkama, to jest vidljivo je kako mjereni induktivitet obje zavojnice je približan nazivnom induktivitetu zavojnica. Također se može iščitati kako s porastom ispitne frekvencije raste i faktor dobrote. Kod zavojnice nazivnog induktiviteta 45[mH] vidimo kako je faktor dobrote veći u odnosu na zavojnicu nazivnog induktiviteta 0,45[mH] i iz toga možemo zaključiti da je prva zavojnica nazivnog induktiviteta 45[mH] mnogo kvalitetnije izrađena. Također u tablici (Tablica 4.2.) se nalaze izračunati podaci, a to su impedancija svake zavojnice posebno (Z_1 i Z_2), te fazni kut (φ_1 i φ_2) svake zavojnice.

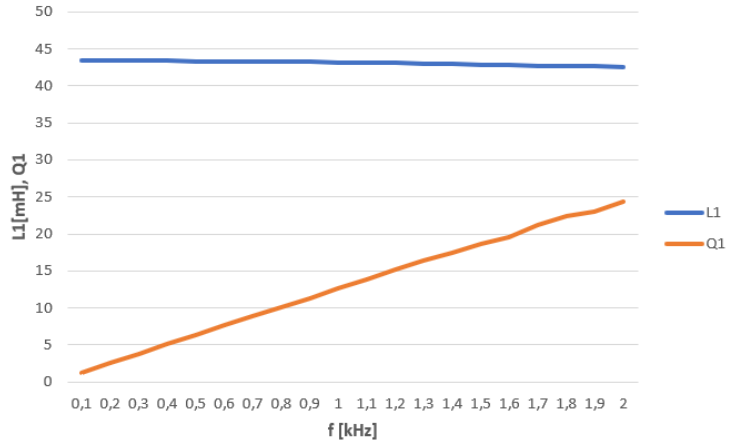
Impedancija se izračunava tako da se prvo dobije reaktivni otpor zavojnice izrazom (4-4), zatim se izrazom (4-5) dobije radni otpor zavojnice, te se nakon toga izrazom (4-6) izračuna vrijednost modula impedancije zavojnice, i zatim se izrazom (4-7) izračuna vrijednost faznog kuta zavojnice.

$$X_L = \omega L = 2\pi f * L \tag{4-4}$$

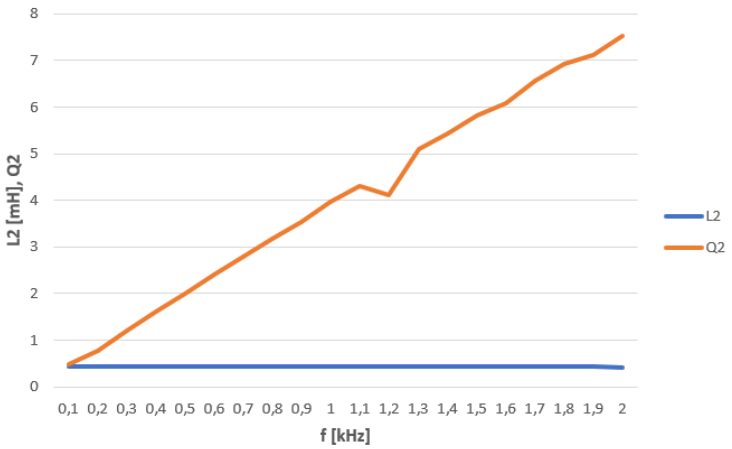
$$R = \frac{X_L}{Q} \tag{4-5}$$

$$|Z| = \sqrt{{X_L}^2 + R^2} \tag{4-6}$$

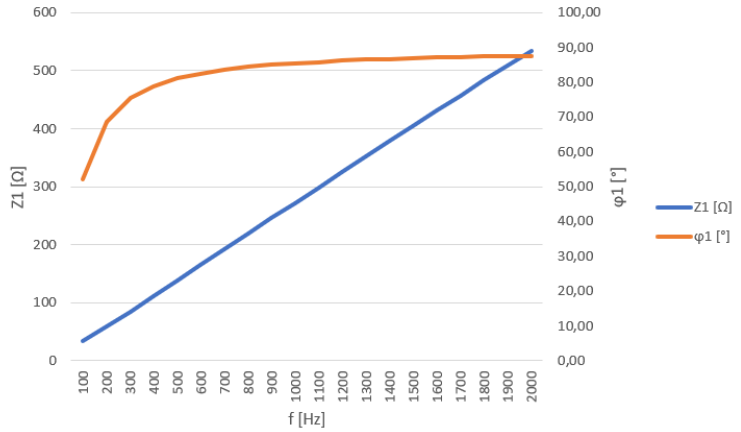
$$\varphi = \text{atan}\left(\frac{X_L}{R}\right) \tag{4-7}$$



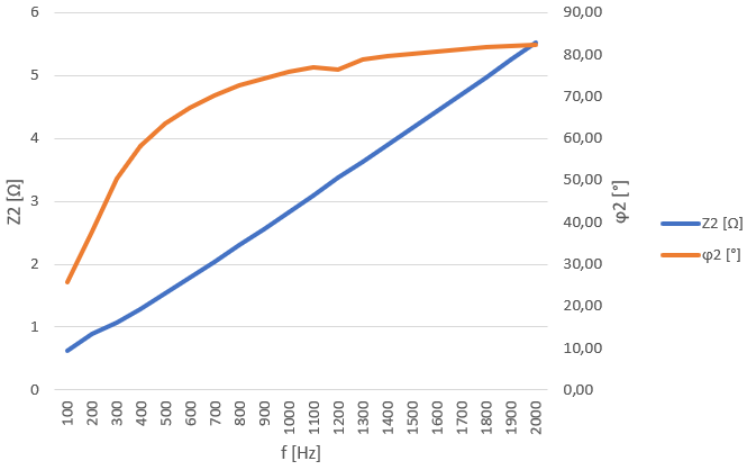
Slika 4. 8. *Graf promjene parametara zavojnice (45[mH]) u odnosu na promjenu frekvencije.*



Slika 4. 9. *Graf promjene parametara zavojnice (0,45[mH]) u odnosu na promjenu frekvencije.*



Slika 4. 10. *Graf promjene impedancije i faznog kuta prve zavojnice (45 [mH]) u odnosu na frekvenciju.*



Slika 4. 11. *Graf promjene impedancije i faznog kuta prve zavojnice (0,45 [mH]) u odnosu na frekvenciju.*

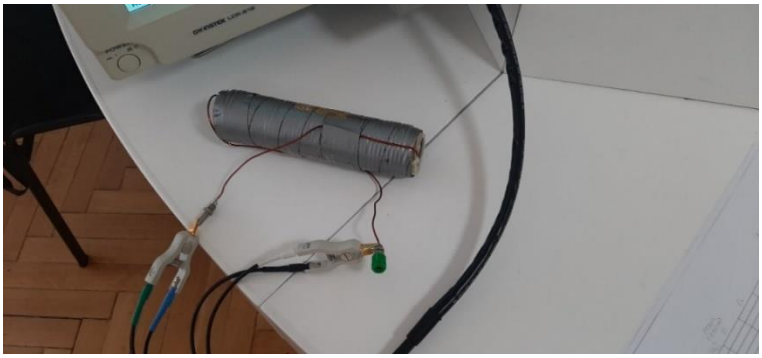
Na prethodnim slikama (Slika 4.8. i Slika 4.9.) može se vidjeti i grafički prikaz promjene parametara. Na grafovima se također može vidjeti kako se promjena parametara poklapa s pretpostavkom, to jest da se vrijednost induktiviteta nešto značajno ne mijenja tokom mjerenja te da vrijednost faktora dobrote raste s porastom ispitne frekvencije. Također na prethodnim slikama (Slika 4.10. i Slika 4.11.) mogu se vidjeti grafovi koji prikazuju kako se ponašaju impedancije i fazni kutovi zavojnica te se može vidjeti kako se zavojnice ponašaju kao što je i prikazano u teorijskom djelu rada na slici (Slika 3.23.) da pri frekvencijskom području između 100 Hz i 2 kHz dolazi do porasta faznog kuta prema +90° te da dolazi do linearnog rasta impedancije s porastom frekvencije.

Na sljedećim slikama (od Slika 4.12. do Slika 4.15.) može se vidjeti koje su sve postavke bile odabrane na instrumentu pri svakom mjerenju parametara induktiviteta te se vidi kako je instrument spojen s pomoću priključaka na ispitivane zavojnice.

Slika 4. 12. *Postavke instrumenta pri mjerenju zavojnice nazivnog induktiviteta 45[mH].*

Slika 4. 13. *Način spajanja priključaka instrumenta na zavojnicu nazivnog induktiviteta 45[mH].*

Slika 4. 14. *Postavke instrumenta pri mjerenju zavojnice nazivnog induktiviteta 0,45[mH].*



Slika 4. 15. *Način spajanja priključaka instrumenta na zavojnicu nazivnog induktiviteta 0,45[mH].*

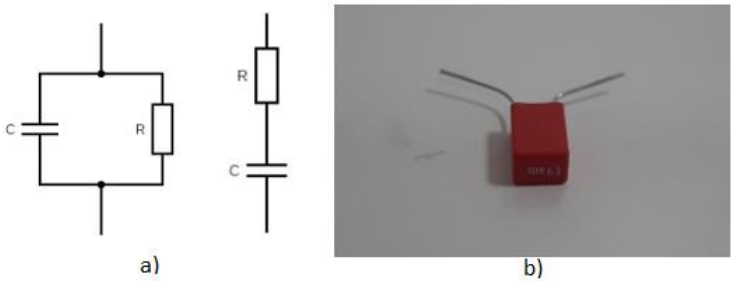
4.3. Mjerenje parametara kondenzatora

Za mjerenje parametara kondenzatora korištena su dva različita kondenzatora od kojih je jedan blok kondenzatorom a drugi je elektrolitski kondenzator. Za razliku od prethodne dvije komponente gdje je mjerenje izvršeno samo na serijskoj nadomjesnoj shemi za kondenzatore su mjerenja izvršena na serijskoj i paralelnoj nadomjesnoj shemi.

4.3.1. Mjerenje parametara blok kondenzatora

Parametri koji su mjereni kod blok kondenzatora su kapacitet (C) i otpor (R). Mjerenja su izvršena kako je i ranije navedeno u dva slučaja, prvo za serijsko spojenu nadomjesnu shemu, a drugo za paralelno spojenu nadomjesnu shemu. Pretpostavka je da će instrument mjeriti vrijednost kapaciteta koja je približna nazivnoj vrijednosti u oba slučaja, dok će u prvom slučaju vrijednost otpora padati s rastom frekvencije, a u drugom slučaju pretpostavka je da će otpor biti iznimno velik s porastom frekvencije.

Pri mjerenju parametara kondenzatora korištene su nadomjesne sheme (Slika 4.16. pod a), što su pojednostavljenje sheme u odnosu na sheme prikazane u teorijskom djelu rada, razlog toga je što mjerni instrument korišten pri mjerenju ima mogućnost mjeriti parametre samo preko tih nadomjesnih shema. Za proces mjerenja korišten je blok kondenzator nazivnog kapaciteta 1μF kao što je prikazano na slici (Slika 4.16. pod b).



Slika 4. 16. *a) Nadomjesne sheme korištene pri mjerenju parametara blok kondenzatora s mjernim uređajem, b) Blok kondenzator nazivnog kapaciteta 1[μF] korišten pri mjerenju.*

Tablica 4. 3. *Rezultati mjerenja parametara blok kondenzatora.*

	SERIJSKI SPOJ				PARALELNI SPOJ			
f [kHz]	**C [nF]**	**R [Ω]**	**$\|Z_s\|$ [Ω]**	**φ_s [°]**	**C [nF]**	**R [kΩ]**	**$\|Z_p\|$ [MΩ]**	**φ_p [°]**
0,1	968,34	11,7	1643,627	-88,44	968,28	228,7	0,228706	-88,4
0,2	967,59	4,1	822,4399	-88,43	967,56	165,1	0,165102	-88,4
0,3	967,05	2,4	548,5979	-88,43	967,02	122,8	0,122801	-88,4
0,4	966,65	1,8	411,6186	-88,43	966,63	95,02	0,095021	-88,4
0,5	966,62	1,411	329,305	-88,43	966,56	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
0,6	966,43	1,175	274,4748	-88,43	966,38	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
0,7	966,08	1,046	235,3495	-88,43	966,06	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
0,8	965,79	0,9331	205,9927	-88,43	965,78	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
0,9	965,5	0,8587	183,1598	-88,43	965,49	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
1,0	965,23	0,795	164,89	-88,43	965,21	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
1,1	965,07	0,7397	149,925	-88,43	965,02	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
1,2	964,79	0,6885	137,4711	-88,43	964,79	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
1,3	964,66	0,6718	126,9137	-88,43	964,64	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
1,4	964,48	0,6379	117,8705	-88,43	964,44	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
1,5	964,29	0,6101	110,0342	-88,43	964,26	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
1,6	964,18	0,5924	103,169	-88,43	964,17	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
1,7	963,96	0,5614	97,12241	-88,43	963,94	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
1,8	963,82	0,5382	91,74009	-88,44	963,78	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
1,9	963,74	0,5282	86,91899	-88,44	963,71	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0
2,0	963,57	0,5066	82,58764	-88,44	963,53	Over (>100MΩ)	99,999	-90,0

Iz tablice (Tablica 4.3.) može se iščitati kako se mjerenja podudaraju s pretpostavkama spomenutim ranije. Pri mjerenju u serijskoj nadomjesnoj shemi može se iščitati kako kapacitet kondenzatora ostaje približno konstantan s malim padom vrijednosti, a taj pad je zbog spomenutog svojstva u teorijskom djelu kako kondenzator pri višim frekvencijama se počinje sve više ponašati kao induktivitet. Otpor pri mjerenju u serijskom nadomjesnom spoju ponaša se očekivano, to jest

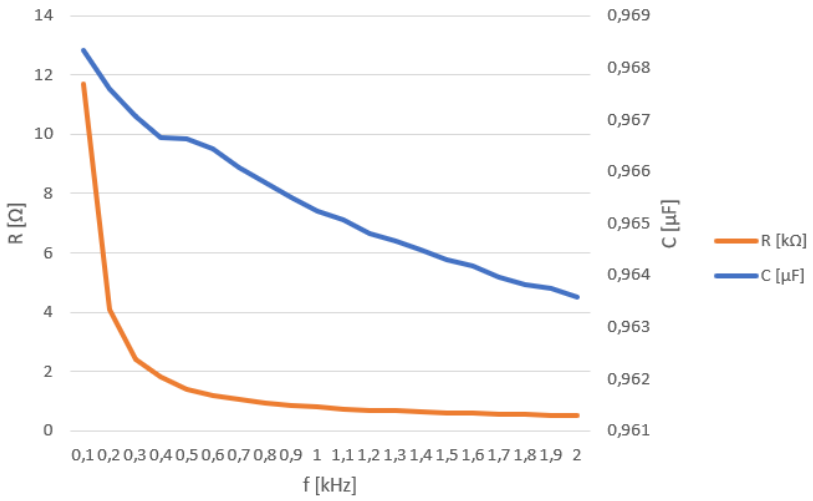
smanjuje se s porastom frekvencije i to tako da na početku ima nagli pad vrijednosti dok pri višim frekvencijama smanjuje se za manje vrijednosti, dok u paralelnom nadomjesnom spoju se otpor kondenzatora ponaša tako da raste s porastom frekvencije te se iz tablice može iščitati kao pri frekvenciji f=0,5 [kHz] naraste toliko da instrument više ne može prikazati niti izmjeriti tu vrijednost zbog svojih ograničenja. Također u istoj tablici su prikazane vrijednosti modula impedancije serijskog i paralelnog spoja te fazni kut za oba spoja. Te vrijednosti su dobivene s pomoću navedenih izraza, to jest modul impedancije dobiven je izrazom (4-9), dok je fazni kut dobiven izrazom (4-10). Za potrebe računanja navedenih vrijednosti također potrebna je vrijednosti reaktivnog otpora koja je izračunata pomoću izraza (4-8).

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \tag{4-8}$$

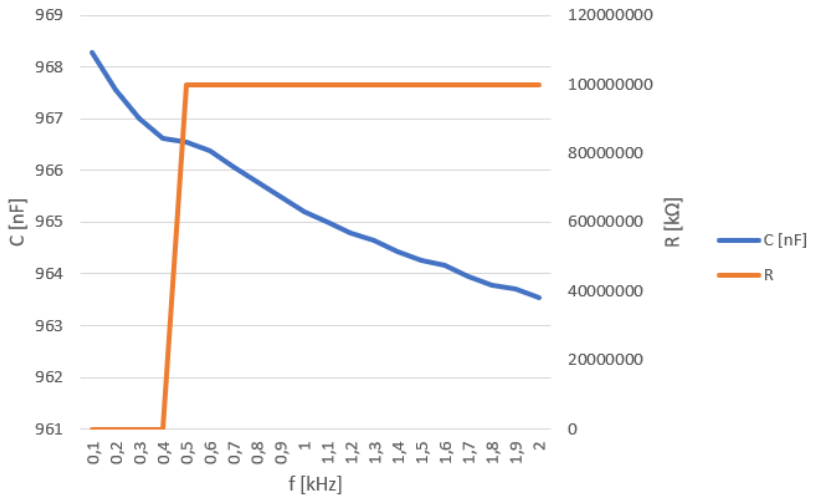
$$|Z| = \sqrt{{X_C}^2 + R^2} \tag{4-9}$$

$$\varphi = -\text{atan}\left(\frac{X_C}{R}\right) \tag{4-10}$$

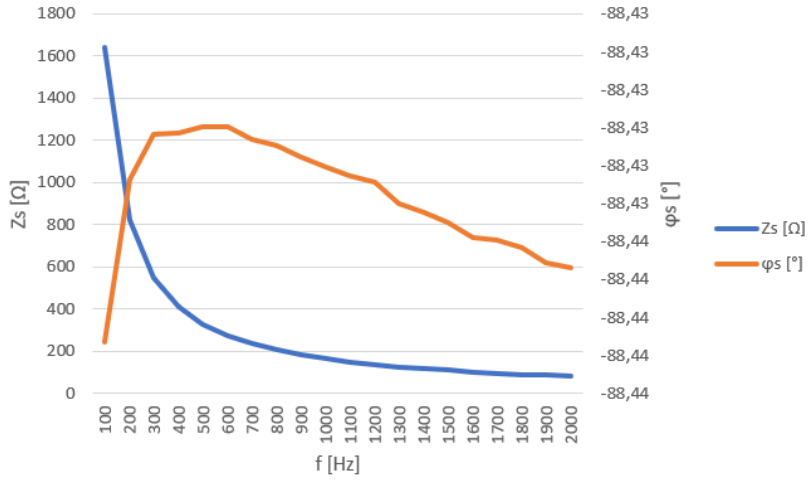
Na sljedećim slikama (Slika 4.17. i Slika 4.18.) mogu se vidjeti grafovi koji prikazuju kako se mjereni parametri mijenjaju s obzirom na promjenu frekvencije. Također grafovi na slikama (Slika 4.19. i Slika 4.20.) prikazuju ovisnost faznog kuta i impedancije o promjeni frekvencije i na tim grafovi se vidi vrlo slično ponašanje impedancije i faznog kuta za frekvencijsko područje od 100 Hz do 2kHz kao što je prikazano u teorijskom djelu na slikama (Slika 3.14. i Slika 3.17.).



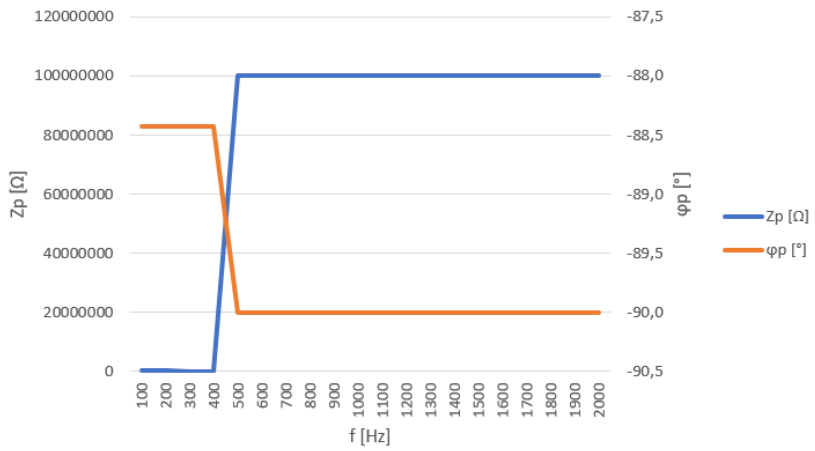
Slika 4. 17. *Graf promjene parametara blok kondenzatora u odnosu na promjenu frekvencije u serijskom nadomjesnom spoju.*



Slika 4. 18. *Graf promjene parametara blok kondenzatora u odnosu na promjenu frekvencije u paralelnom nadomjesnom spoju.*



Slika 4. 19. *Graf promjene impedancije i faznog kuta blok kondenzatora u serijskom spoju nadomjesne sheme mjerenja.*

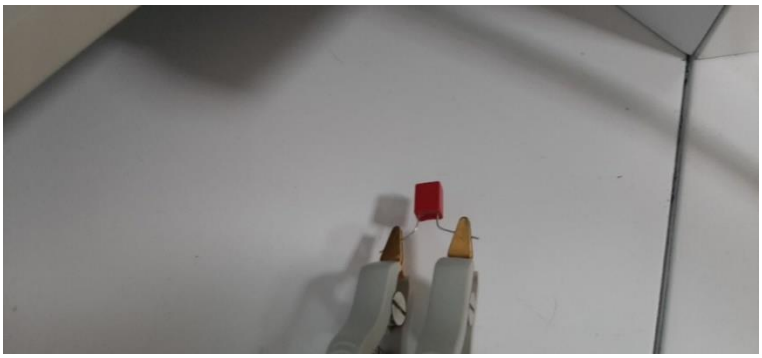


Slika 4. 20. *Graf promjene impedancije i faznog kuta blok kondenzatora u paralelnom spoju nadomjesne sheme mjerenja.*

Na sljedećim slikama (od Slika 4.21. do Slika 4.23.) prikazano je kako je spojen kondenzator na priključke mjernog instrumenta te je također prikazano koje su sve postavke bile odabrane pri svakom mjerenju parametara blok kondenzatora.

Slika 4. 21. *Prikaz odabranih postavki pri mjerenju parametara u serijskom nadomjesnom spoju.*

Slika 4. 22. *Prikaz odabranih postavki pri mjerenju parametara u paralelnom nadomjesnom spoju.*

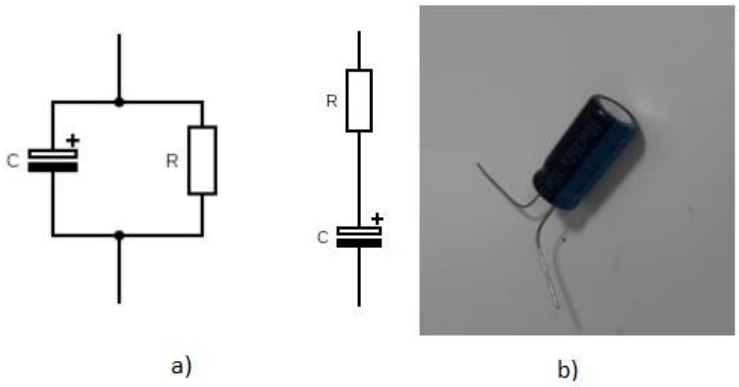


Slika 4. 23. *Prikaz načina spajanja blok kondenzatora na priključke mjernog instrumenta*.

4.3.2. Mjerenje parametara elektrolitskog kondenzatora

Parametri koji su mjereni kod elektrolitskog kondenzatora su isti kao i kod blok kondenzatora a to su: kapacitet (C) i otpor (R). Mjerenja su izvršena u dva slučaja, prvo za serijsko spojenu nadomjesnu shemu, a drugo mjerenje je izvršeno za paralelno spojenu nadomjesnu shemu. Pretpostavka je da će instrument mjeriti vrijednost kapaciteta koja je približna nazivnoj vrijednosti u oba slučaja, dok će u prvom i drugom slučaju vrijednost otpora padati s porastom frekvencije.

Pri mjerenju parametara kondenzatora korištene su nadomjesne sheme (Slika 4.24. pod a), što su pojednostavljenje sheme u odnosu na sheme prikazane u teorijskom djelu rada, razlog toga je što je mjerni instrument korišten pri mjerenju ima mogućnost mjeriti parametre samo preko tih nadomjesnih shema. Za proces mjerenja korišten je elektrolitski kondenzator nazivnog kapaciteta 10μF kao što je prikazano na slici (Slika 4.24. pod b).



Slika 4. 24. *a) Nadomjesne sheme korištene pri mjerenju parametara elektrolitskog kondenzatora, b) Elektrolitski kondenzator nazivnog kapaciteta 10 [μF] korišten pri mjerenju.*

Tablica 4. 4. *Rezultati mjerenja parametara elektrolitskog kondenzatora.*

	SERIJSKI SPOJ				PARALELNI SPOJ			
f [kHz]	**C [μF]**	**R [Ω]**	**$\|Z_s\|$ [Ω]**	**φ_s[°]**	**C [μF]**	**R [Ω]**	**$\|Z_p\|$ [Ω]**	**φ_p[°]**
0,1	9,1519	8,830	174,1277	-88,48	9,1304	3438	3442,416	-89,95
0,2	9,0348	5,707	88,26354	-88,49	8,9984	1368	1370,855	-89,94
0,3	8,9815	4,825	59,26443	-88,51	8,9252	733,3	735,7051	-89,92
0,4	8,9465	4,423	44,69348	-88,53	8,8654	457,5	459,6961	-89,90
0,5	8,9197	4,194	35,93177	-88,55	8,8044	311,3	313,3924	-89,88
0,6	8,8975	4,084	30,0911	-88,57	8,7422	225,6	227,6313	-89,87
0,7	8,8784	3,948	25,91123	-88,58	8,680	172,6	174,5763	-89,85
0,8	8,8606	3,870	22,7837	-88,60	8,6119	135,2	137,1594	-89,83
0,9	8,8456	3,813	20,3521	-88,62	8,5454	110,5	112,4211	-89,81
1,0	8,8304	3,763	18,41216	-88,64	8,4694	90,72	92,64582	-89,80
1,1	8,8181	3,726	16,82562	-88,65	8,4007	77,7	79,58597	-89,78
1,2	8,8043	3,689	15,50925	-88,67	8,3150	65,61	67,52106	-89,76
1,3	8,7932	3,657	14,39517	-88,69	8,2311	56,62	58,54102	-89,74
1,4	8,7834	3,633	13,44305	-88,70	8,1545	50,29	52,18655	-89,73
1,5	8,7733	3,601	12,61861	-88,72	8,0642	44,34	46,25095	-89,71
1,6	8,7649	3,588	11,90256	-88,74	7,9942	40,57	42,43528	-89,70
1,7	8,7522	3,568	11,27618	-88,75	7,8706	35,22	37,17444	-89,67
1,8	8,7438	3,545	10,71562	-88,77	7,7738	31,87	33,83881	-89,66
1,9	8,7390	3,536	10,2167	-88,78	7,7205	30,26	32,14631	-89,66
2,0	8,7290	3,518	9,771691	-88,80	7,6004	27,16	29,10825	-89,63

Na sljedećoj tablici (Tablica 4.4.) može se jednostavno vidjeti kako se dobiveni rezultati izvršenih mjerenja poklapaju sa pretpostavkama. U oba slučaja vidi se smanjenje kapaciteta kondenzatora s porastom frekvencije, ali to je vrlo zanemariv pad. Također se može iščitati kako pri paralelnom spoju kapacitet kondenzatora ima nagliji pad. Za iznos otpora može se vidjeti kako je u oba nadomjesna spoja u očekivanom padu, s time da nagliji pad ima pri paralelnom spoju. Također iz iste tablice mogu se vidjeti vrijednosti dobivene računskim postupkom a to su modul impedancije i serijskog i paralelnog nadomjesnog kruga, također i za fazni kuta tih istih

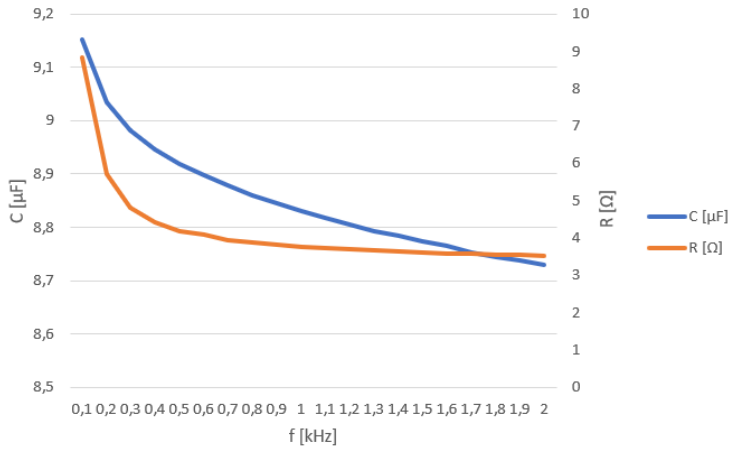
nadomjesnih krugova. Parametar impedancija izračunata je s pomoću izraza (4-12), fazni kut dobiven je iz izraza (4-13). Također za izračun je bilo potrebno odrediti i reaktanciju kondenzatora, ta se vrijednost dobila s pomoću izraza (4-11).

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \tag{4-11}$$

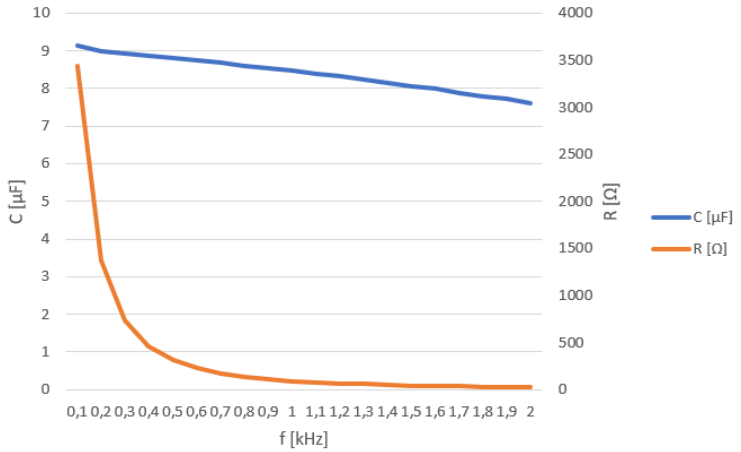
$$|Z| = \sqrt{{X_C}^2 + R^2} \tag{4-12}$$

$$\varphi = -\operatorname{atan}\left(\frac{X_C}{R}\right) \tag{4-13}$$

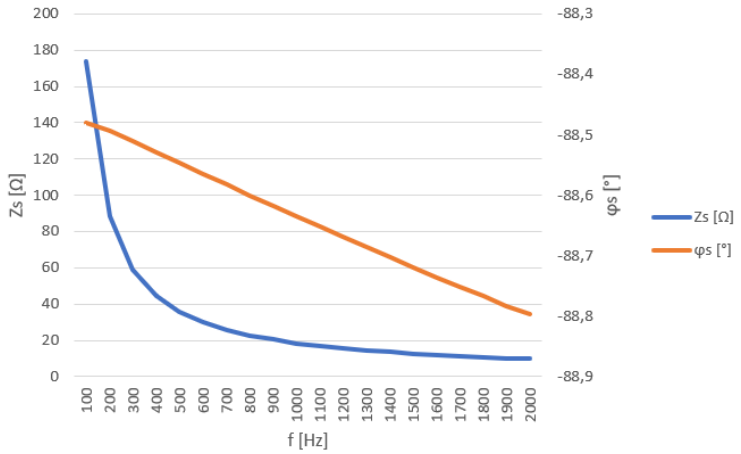
Na sljedećim slikama (Slika 4.25. i Slika 4.26.) prikazano je grafički kako se ponašaju izmjereni parametri elektrolitskog kondenzatora u odnosu na promjenu frekvencije. Također na slikama (Slika 4.27. i Slika 4.28.) prikazano je ponašanje faznog kuta te impedancije u odnosu na promjenu frekvencije te iz tih grafova se vidi kako se impedancija i fazni kut ponašaju jednako kao i u teorijskom djelu na frekvencijskom području od 100 Hz do 2kHz, to jest može se vidjeti kako fazni kut ostaje približno konstantan te kako ukupna impedancija pada s porastom frekvencije.



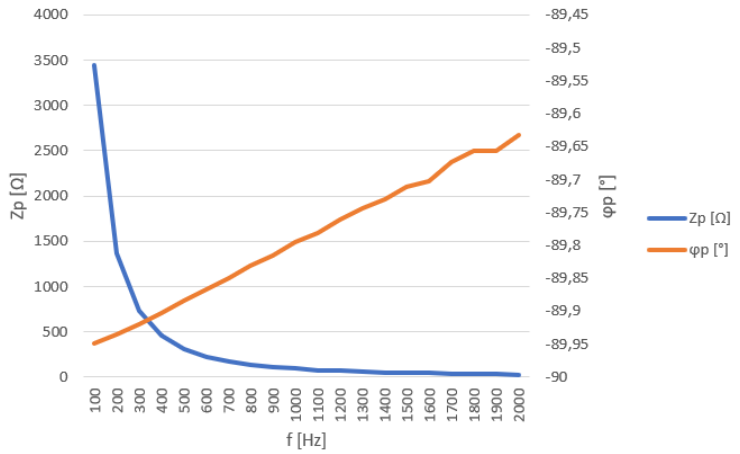
Slika 4. 25. *Graf promjene parametara elektrolitskog kondenzatora u odnosu na promjenu frekvencije u serijskom nadomjesnom spoju.*



Slika 4. 26. *Graf promjene parametara elektrolitskog kondenzatora u odnosu na promjenu frekvencije u paralelnom nadomjesnom spoju.*



Slika 4. 27. *Graf promjene impedancije i faznog kuta elektrolitskog kondenzatora u odnosu na frekvenciju u serijskom nadomjesnom spoju pri mjerenju.*

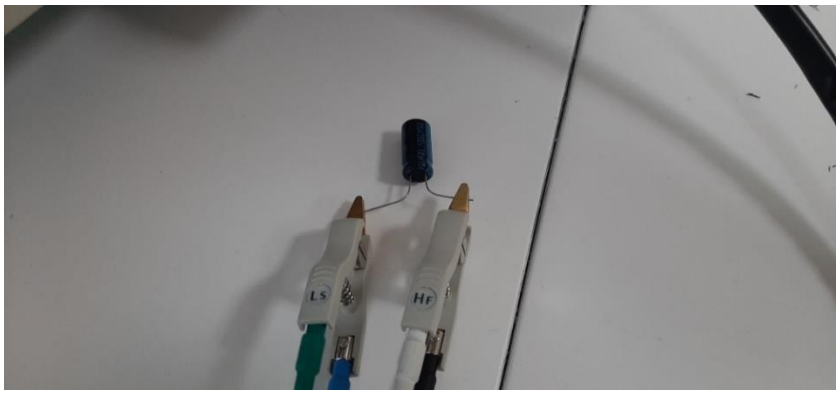


Slika 4. 28. *Graf promjene imepdancije i faznog kuta elektrolitskog kondenzatora u odnosu na frekvenciju u paralelnom nadomjesnom krugu pri mjerenju.*

Na sljedećim slikama (od Slika 4.29. do Slika 4.31.) prikazano je koje su postavke odabrane tokom izvršavanja svakog mjerenja parametara kondenzatora te način na koji je komponenta priključenja na mjerni instrument za vrijeme mjerenja.

Slika 4. 29. *Prikaz postavljenih postavki pri mjerenju parametara kondenzatora u serijskom nadomjesnom spoju.*

Slika 4. 30. *Prikaz postavljenih postavki pri mjerenju parametara kondenzatora u paralelnom nadomjesnom spoju.*



Slika 4. 31. *Prikaz načina spajanja priključaka mjernog instrumenta na komponentu.*

5. ZAKLJUČAK

Mjerenje parametara elektroničkih komponenti pomoću mjernog instrumenta LCR – 800 (serija 816) je vrlo precizno za frekvencijski opseg pri kojem mjeri (100 Hz – 2kHz).

Na višim frekvencijama elektroničke komponente se ponašaju značajno drugačije nego na nižim. Te razlike ponašanja komponenti se ne mogu prikazati korištenjem najjednostavnijeg modela komponenti, već se komponente moraju prikazati s pomoću nadomjesnih shema iz kojih se proračunom može prikazati ponašanje komponente pri različitim frekvencijama. U samim proračunima ne smiju se izostaviti parazitski utjecaji već se oni moraju uračunati u dobiveno rješenje kako bi se dobio što točniji rezultat i što bliži rezultat stvarnome.

Iz mjerenih rezultata prikazanih za otpornik može se vidjeti kako se otpor ponaša gotovo kao idealna komponenta otpor, to jest nema velikih odstupanja od nazivne vrijednosti unatoč parazitskim utjecajima. Iz toga se može zaključiti kako parazitski utjecaji su za otpornik zanemarivi te da se on u većini slučajeva i većini krugova može prikazati s pomoću najjednostavnijeg matematičkog modela. Iz mjernih rezultata se također može zaključiti kako se elektrolitski i blok kondenzatori ponašaju slično i u skladu s pretpostavkama, osim što je elektrolitski kondenzator osjetljiviji na promjene frekvencije, što se vidi iz mjernih rezultata, jer mu se znatnije mijenja kapacitet promjenom frekvencije. Iz mjernih rezultata za dvije različite zavojnice može se uočiti kako se njihov induktivitet smanjuje s porastom frekvencije i to se brže smanjuje kod zavojnice s višim induktivitetom. Također pri mjerenju parametara zavojnice može se uočiti kako faktor dobrote ovisi o izradi same zavojnice te o njenom induktivitetu.

LITERATURA

[1] A.Karalić, „Mjerenje nadomjesnih parametara kondenzatora i zavojnice RLC-metrom“, dostupno na: https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:1531/preview [06.09.2020]

[2] I. Tolić, „11.Mjerenje kapaciteta, induktiviteta i otpora“, laboratorijska vježba, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku

[3] I. Flegar, Teorija mreža, Sveučilište u Osijeku, Osijek 2001

[4] R. Thottappillil, „High frequency behaviour of electrical components“, dostupno na: https://www.eeupdate.com/2019/03/module-32-high-frequency-behaviour-of.html [06.09.2020]

[5] GW instek LCR – 816 datasheet, dostupno na: https://www.globaltestsupply.com/pdfs/cache/www.globaltestsupply.com/instek/lcr_meter/lcr_816/datasheet/instek_lcr_816_lcr_meter_datasheet.pdf [03.09.2020]

[6] V. Pinter, Osnove elektrotehnike, Tehnička knjiga d.d., Zagreb, 1994.

[7] B. Kuzmanović, "Osnove Elektrotehnike I", Tehničko Veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012

[8] V. Bego, „Mjerenja u elektrotehnici“, Graphis, Zagreb, 2003

SAŽETAK

Nadomjesni parametri osnovnih elektroničkih komponenti mogu se izmjeriti efikasno i brzo s pomoću RLC-metra. Prije samih mjerenja potrebno je proučiti mogućnosti mjernog instrumenta, to jest dobro proučiti kako se s mjernim instrumentom rukuje te koje su njegove specifikacije. Nadomjesni parametri komponenata koji se mjere su: otpor, kapacitet, induktivitet i faktor dobrote. Mjerenja se provode na frekvenciji od 100Hz do 2kHz u 20 koraka. Rezultati dobiveni mjerenjem i očekivani rezultati mjerenja su slični kod otpornika, dok se kod kondenzatora i zavojnice u mjerenju se pojavljuju i veća odstupanja, zato što parazitska svojstva imaju veći utjecaj pri odabranom rasponu frekvencija.

Ključne riječi: RLC metar, nadomjesni parametri, otpor, kapacitet, induktivitet, faktor dobrote, impedancija.

Measurements of basic electronic components equivalent circuits with RLC-meter

ABSTRACT

Equivalent circuits of basic electronic components can be easily and quickly measured with RLC-meter. Before measuring it is necessary to have an understanding of the RLC-meter's functions and specifications. It is also necessary to know the theoretical values of electronic components and how they behave at different frequencies. Measured parameters are resistance, capacitance, inductance, and quality factor. Measurements are performed on the frequency range from 100Hz to 2kHz in 20 steps. Results of measurements on resistor values slightly differ from expected values, while with capacitors and coils there are larger deviations of measurements, that is because parasitic effects have a larger impact on those components under specified frequency range.

Key words: RLC-meter, equivelent circuit, resistor, capacitance, inductance, quality factor, impedance.

PRILOZI

POPIS SLIKA

Pregled područja teme:

Slika 2. 1. Nadmojesna blok shema jednoprilazne mreže. 2
Slika 2. 2. Izgled prednje strane mjernog instrumenta. 3
Slika 2. 3. Izgled stražnje strane mjernog instrumenta. 3

Osnovne elektroničke komponent:

Slika 3. 1. Nadomjesna shema realnog otpornika. 5
Slika 3. 2. Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesne sheme realnog otpornika. 7
Slika 3. 3. Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realnog otpornika. 7
Slika 3. 4. Serijska nadomjesna shema realnog otpornika. 7
Slika 3. 5. Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog otpornika. 9
Slika 3. 6. Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog otpornika. 9
Slika 3. 7. Paralelna nadomjesna shema realnog otpornika. 9
Slika 3. 8. Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog otpornika. 11
Slika 3. 9. Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog otpornika. 11
Slika 3. 10. Nadomjesna shema realnog kondenzatora. 12
Slika 3. 11. Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesne sheme realnog kondenzatora. 13
Slika 3. 12. Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realnog kondenzatora. 14
Slika 3. 13. Serijska nadomjesna shema realnog kondenzatora. 14
Slika 3. 14. Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog kondenzatora. 15
Slika 3. 15. Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog kondenzatora. 15
Slika 3. 16. Paralelna nadomjesna shema realnog kondenzatora. 16
Slika 3. 17. Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog kondenzatora. 17
Slika 3. 18. Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog kondenzatora. 17
Slika 3. 19. Nadomjesna shema realne zavojnice. 18

Slika 3. 20. Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika nadomjesne sheme realne zavojnice. 19
Slika 3. 21. Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realne zavojnice. 20
Slika 3. 22. Serijska nadomjesna shema realne zavojnice. 20
Slika 3. 23. Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika serijske nadomjesne sheme realne zavojnice. 21
Slika 3. 24. Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realne zavojnice. 21
Slika 3. 25. Paralelna nadomjesna shema realne zavojnice. 22
Slika 3. 26. Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika paralelne nadomjesne sheme realne zavojnice. 23
Slika 3. 27. Prikaz koda u MATLAB-u za ispis frekvencijskih karakteristika paralelne nadomjesne sheme realne zavojnice. 23

Mjerenje parametara elektroničkih komponenti:

Slika 4. 1. a) Nadomjesna shema otpornika korištena pri mjerenju s mjernim uređajem, b) Otpornik korišten pri mjerenju nazivnog otpora 39 [Ω]. 24
Slika 4. 2. Graf promjene parametara otpornika u odnosu na promjenu frekvencije. 26
Slika 4. 3. Graf promjene impedancije i faznog kuta u odnosu na frekvenciju. 27
Slika 4. 4. Postavke korištene pri mjerenju parametara. 28
Slika 4. 5. Način priključenja otpornika na stezaljke instrumenta. 28
Slika 4. 6. Nadomjesna shema zavojnice korištena pri mjerenju. 29
Slika 4. 7. a) Zavojnica nazivnog induktiviteta 45 [mH] korištena pri mjerenju, b) Zavojnica nazivnog induktiviteta 0,45 [mH] korištena pri mjerenju. 29
Slika 4. 8. Graf promjene parametara zavojnice (45[mH]) u odnosu na promjenu frekvencije. 31
Slika 4. 9. Graf promjene parametara zavojnice (0,45[mH]) u odnosu na promjenu frekvencije. 31
Slika 4. 10. Graf promjene impedancije i faznog kuta prve zavojnice (45 [mH]) u odnosu na frekvenciju. 32
Slika 4. 11. Graf promjene impedancije i faznog kuta prve zavojnice (0,45 [mH]) u odnosu na frekvenciju. 32
Slika 4. 12. Postavke instrumenta pri mjerenju zavojnice nazivnog induktiviteta 45[mH]. 33
Slika 4. 13. Način spajanja priključaka instrumenta na zavojnicu nazivnog induktiviteta 45[mH]. 33
Slika 4. 14. Postavke instrumenta pri mjerenju zavojnice nazivnog induktiviteta 0,45[mH]. 33
Slika 4. 15. Način spajanja priključaka instrumenta na zavojnicu nazivnog induktiviteta 0,45[mH]. 34
Slika 4. 16. a) Nadomjesne sheme korištene pri mjerenju parametara blok kondenzatora s mjernim uređajem, b) Blok kondenzator nazivnog kapaciteta 1[μF] korišten pri mjerenju. 35
Slika 4. 17. Graf promjene parametara blok kondenzatora u odnosu na promjenu frekvencije u serijskom nadomjesnom spoju. 37
Slika 4. 18. Graf promjene parametara blok kondenzatora u odnosu na promjenu frekvencije u paralelnom nadomjesnom spoju. 38
Slika 4. 19. Graf promjene impedancije i faznog kuta blok kondenzatora u serijskom spoju nadomjesne sheme mjerenja. 38

Slika 4. 20. Graf promjene impedancije i faznog kuta blok kondenzatora u paralelnom spoju nadomjesne sheme mjerenja. 39
Slika 4. 21. Prikaz odabranih postavki pri mjerenju parametara u serijskom nadomjesnom spoju. 39
Slika 4. 22. Prikaz odabranih postavki pri mjerenju parametara u paralelnom nadomjesnom spoju. 40
Slika 4. 23. Prikaz načina spajanja blok kondenzatora na priključke mjernog instrumenta. 40
Slika 4. 24. a) Nadomjesne sheme korištene pri mjerenju parametara elektrolitskog kondenzatora, b) Elektrolitski kondenzator nazivnog kapaciteta 10 [μF] korišten pri mjerenju. 41
Slika 4. 25. Graf promjene parametara elektrolitskog kondenzatora u odnosu na promjenu frekvencije u serijskom nadomjesnom spoju. 43
Slika 4. 26. Graf promjene parametara elektrolitskog kondenzatora u odnosu na promjenu frekvencije u paralelnom nadomjesnom spoju. 44
Slika 4. 27. Graf promjene impedancije i faznog kuta elektrolitskog kondenzatora u odnosu na frekvenciju u serijskom nadomjesnom spoju pri mjerenju. 44
Slika 4. 28. Graf promjene imepdancije i faznog kuta elektrolitskog kondenzatora u odnosu na frekvenciju u paralelnom nadomjesnom krugu pri mjerenju. 45
Slika 4. 29. Prikaz postavljenih postavki pri mjerenju parametara kondenzatora u serijskom nadomjesnom spoju. 45
Slika 4. 30. Prikaz postavljenih postavki pri mjerenju parametara kondenzatora u paralelnom nadomjesnom spoju. 46
Slika 4. 31. Prikaz načina spajanja priključaka mjernog instrumenta na komponentu. 46

POPIS TABLICA

Pregled područja teme:

Tablica 2. 1. Prikaz specifikacija mjernog instrumenta. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Osnovne elektroničke komponente:

Tablica 3. 1. Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realnog otpornika. 6
Tablica 3. 2. Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog otpornika. 8
Tablica 3. 3. Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog otpornika. 10
Tablica 3. 4. Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realnog kondenzatora. 13
Tablica 3. 5. Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realnog kondenzatora. 15
Tablica 3. 6. Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika paralelne nadomjesne sheme realnog kondenzatora. 16
Tablica 3. 7. Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika nadomjesne sheme realne zavojnice. 19
Tablica 3. 8. Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika serijske nadomjesne sheme realne zavojnice. 21

Tablica 3. 9. Iznosi nadomjesnih parametara korištenih za crtanje amplitudno-frekvencijskih i fazno-frekvencijskih karakteristika paralelne nadomjesne sheme realne zavojnice. 22

Mjerenje parametara elektroničkih komponenti:

Tablica 4. 1. Rezultati mjerenja otpornika 39[Ω]. 25
Tablica 4. 2. Rezultati mjerenja obje zavojnice. 30
Tablica 4. 3. Rezultati mjerenja parametara blok kondenzatora. 36
Tablica 4. 4. Rezultati mjerenja parametara elektrolitskog kondenzatora. 42