

Mjerenje nadomjesnih parametara kondenzatora i zavojnice RLC-metrom

Karalić, Adam

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:143157>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**

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 elektrotehnike

**MJERENJE NADOMJESNIH PARAMETARA
KONDENZATORA I ZAVOJNICE RLC-METROM**

Završni rad

Adam Karalić

Osijek, 2017

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

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

Osijek, 20.09.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada

Ime i prezime studenta:	Adam Karalić
Studij, smjer:	Prediplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	3754, 17.10.2016.
OIB studenta:	35173347927
Mentor:	Izv.prof.dr.sc. Kruno Miličević
Sumentor:	Ivan Biondić
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Mjerenje nadomjesnih parametara kondenzatora i zavojnice RLC-metrom
Znanstvena grana rada:	Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)
Predložena ocjena završnog rada:	Vrlo dobar (4)
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: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	20.09.2017.
Datum potvrde ocjene Odbora:	27.09.2017.
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, 27.09.2017.

Ime i prezime studenta:

Adam Karalić

Studij:

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

3754, 17.10.2016.

Ephorus podudaranje [%]:

0

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Mjerenje nadomjesnih parametara kondenzatora i zavojnice RLC-metrom**

izrađen pod vodstvom mentora Izv.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
1.2 Mjerni instrument.....	1
1.3 Kondenzator	2
1.4 Zavojnica.....	3
1.5 Otpornik	4
2. OTPORNICI.....	5
3. KONDENZATORI	8
3.1 Blok kondenzatori	8
3.2 Elektrolitski kondenzator	12
3.3 Dekada.....	14
4. ZAVOJNICE	15
5. ZAKLJUČAK	19
LITERATURA.....	20
SAŽETAK.....	21
ŽIVOTOPIS	21
PRILOG	23

1. UVOD

Često korištene komponente u elektrotehnici su otpornik, kondenzator i zavojnica, a te se komponente prikazuju matematičkim modelima: otpor, kapacitet i induktivitet te su takvi modeli idealne verzije navedenih komponenti. U praksi te komponente nisu idealne pa je potrebno koristiti složenije matematičke modele za njihov prikaz. Takvi nadomjesni modeli obično sadrže dodatne komponente koje predstavljaju parazitske utjecaje na komponenti a ti parazitski utjecaji mogu utjecati na rezultate mjerenja te je potrebno poznavati njihove iznose.

1.1 Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada je prikazati proces mjerenja nadomjesnih parametara kondenzatora i zavojnice koristeći RLC metar i analizirati rezultate. Mjerenja su vršena nad tri blok kondenzatora, tri elektrolitska kondenzatora, jednom dekadom i tri zavojnice različitih nazivnih vrijednosti.

1.2 Mjerni instrument

Mjerenja su se izvodila s pomoću HAMEG HM8018 RLC metra.

Uređaj može mjeriti induktivitet (L), kapacitet (C), otpor (R), fazni kut između struje i napona (θ), faktor dobrote (Q), faktor gubitka (D) i modul impedancije $|Z|$ sa osnovnom točnosti od 2%. Uređaj može koristiti pet mjernih frekvencija: 100Hz, 120Hz, 1kHz, 10kHz i 25kHz.

Maksimalne rezolucije uređaja za dane mjerne vrijednosti iznose: 0.001Ω, 0.001pF, 0.01μH

Točnost instrumenta (A_e) za C , L , R , Z uz uvjet $D < 0.1$ ili $Q > 10$ su izražene preko sljedećih izraza:

$$C: A_e = A_f \left(1 + \frac{C_x}{C_{max}} + \frac{C_{min}}{C_x} \right) \quad (1-1)$$

$$L: A_e = A_f \left(1 + \frac{L_x}{L_{max}} + \frac{L_{min}}{L_x} \right) \quad (1-2)$$

$$Z: A_e = A_f \left(1 + \frac{Z_x}{Z_{max}} + \frac{Z_{min}}{Z_x} \right) \quad (1-3)$$

$$R: A_e = A_f \left(1 + \frac{R_x}{R_{max}} + \frac{R_{min}}{R_x} \right) \quad (1-4)$$

gdje je točnost za frekvencijska područja A_f iznosi:

$A_f = 0.2\%$ za $f = 100\text{Hz}$, 120Hz , 1KHz

$A_f = 0.3\%$ za $f = 10\text{kHz}$

$A_f = 0.4\%$ za $f = 25\text{kHz}$

Točnost za $D > 0.1$ vrijedi:

$$A_e = \sqrt{1 + D_x^2} \quad (1-5)$$

Točnost za D , Q , i θ su izražene preko sljedećih izraza:

$$D_e = \pm \frac{A_e}{100} \quad (1-6)$$

$$Q_e = \pm \frac{Q_x^2 \cdot D_e}{1 \pm Q_x \cdot D_e} \quad (1-7)$$

$$\theta_e = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{A_e}{100} \quad (1-8)$$

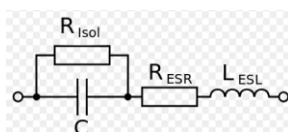
1.3 Kondenzator

Električni kondenzator je komponenta električnog kruga, to je sustav dvaju vodljivih izoliranih tijela s mogućnošću skladištenja energije. [1]

Karakteristična veličina kondenzatora je električni kapacitet koji se izražava u faradima.

Realni kondenzator se ne ponaša samo kao kapacitet, čak ni pri niskim frekvencijama, jer se ne može u svim slučajevima zanemariti ekvivalentni serijski otpor te otpor izolacije. Pri višim frekvencijama ne može se zanemariti rasipni induktivitet. [2]

Za visoki raspon frekvencija korišten u ovim mjerenjima kondenzator se najbolje može prikazati sljedećom ekvivalentnom shemom [2](Sl. 1.1)

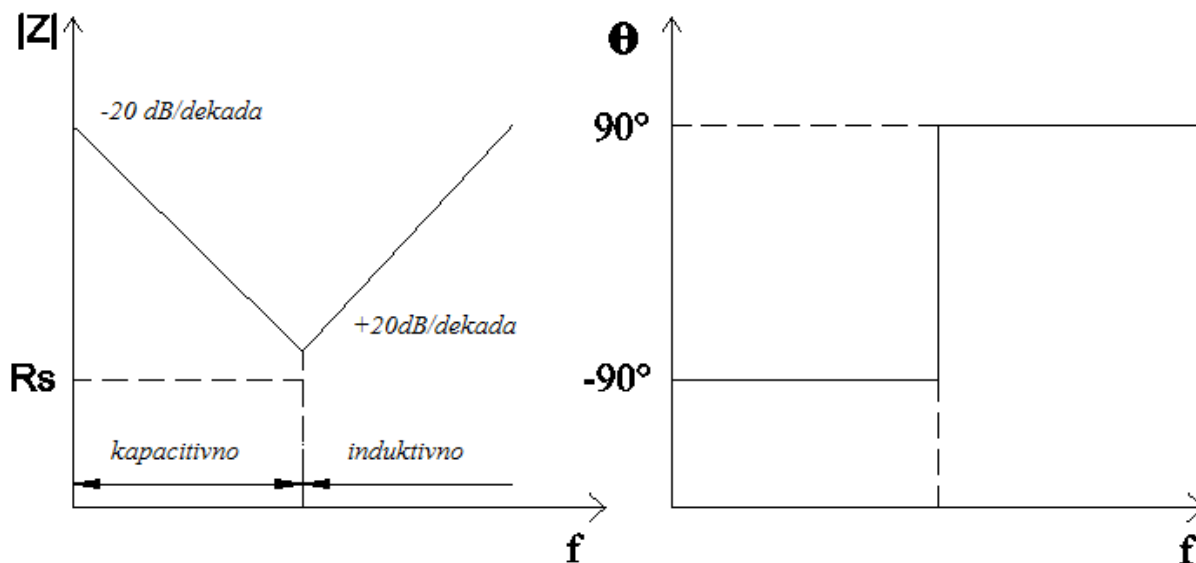


Slika 1.1 Ekvivalentna shema kondenzatora

Impedancija ovakvog kruga se može iskazati sljedećom relacijom[2]:

$$Z_c = R_{ESR} + j\omega L_{ESL} + \frac{R_{isol}}{1 + j\omega R_{isol}C} = \frac{1 + \frac{R_{ESR}}{R_{isol}} - \omega^2 L_{ESL}C}{\frac{1}{R_{isol}} + j\omega L_{ESL}C + j\omega(\frac{L_{ESL}}{R_{isol}} + R_{ESR}C)} \quad (1-9)$$

Na temelju ovih podataka, ponašanje impedancije na visokim frekvencijama se može pokazati sljedećim grafovima:(Slika 1.2)



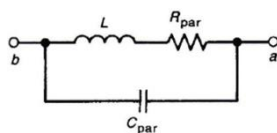
Slika 1.2 Impedancija pri visokim frekvencijama za kondenzator

Povećanjem frekvencije kondenzator će postupno poprimati karakteristike induktiviteta, odnosno trend smanjivanja modula impedancije $|Z|$ će se promijeniti u trend rasta dok će kut između napona i struje θ se promijeniti za 180° , iz -90° u 90° . (Sl. 1.2)

1.4 Zavojnica

Zavojnica je pasivna dvoprilazna komponenta električnog kruga koja pohranjuje električnu energiju u magnetskom polju kada kroz nju protječe struja. [3]

Zbog gubitaka i parazitskih učinaka na višim frekvencijama koji nastaju zbog rasipnog kapaciteta realne zavojnice se ne ponašaju identično induktivitetu[2]. Za raspon frekvencija u kojem mjerimo induktivitet se može najbolje prikazati sljedećom ekvivalentnom shemom:(Sl. 1.3)

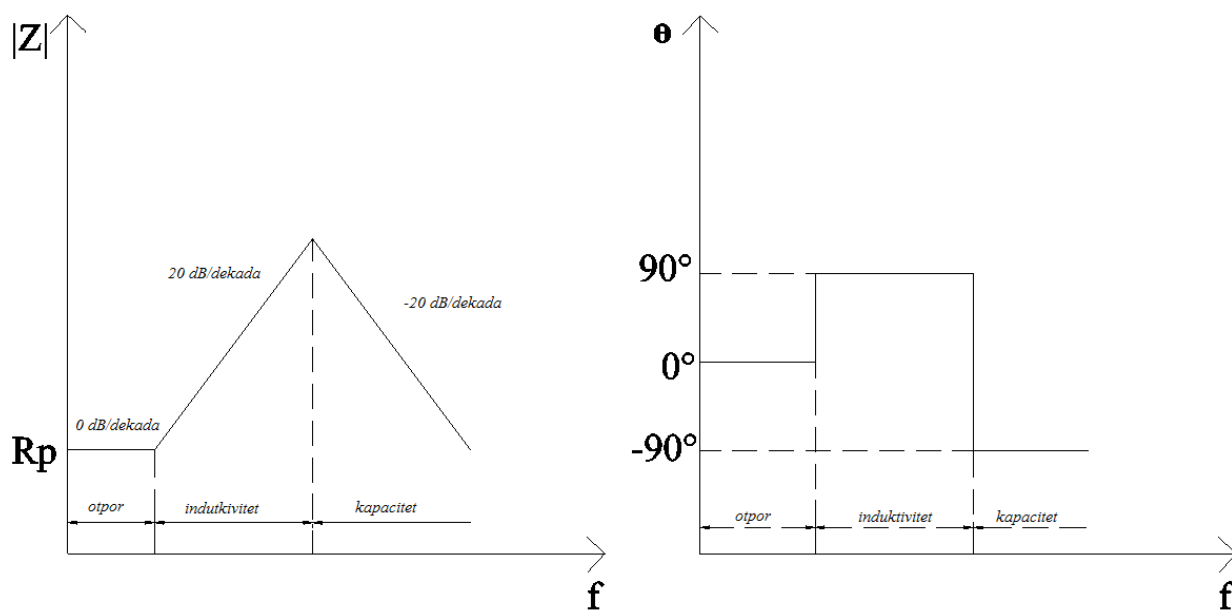


Slika 1.3 Ekvivalentna shema zavojnice.

Impedancija ovakvog kruga se može iskazati sljedećom relacijom:

$$Z_L = \frac{R_{PAR} + j\omega L}{1 - \omega^2 LC_{PAR} + j\omega R_{PAR} C_{PAR}} \quad (1-10)$$

Na temelju ovih podataka, ponašanje impedancije za visoke frekvencije se može iskazati sljedećim grafovima (Sl. 1.4):



Slika 1.4 Impedancija pri visokim frekvencijama za zavojnicu

Povećanjem frekvencije rast $|Z|$ prelazi u pad a zavojnica eventualno poprima karakteristike kapaciteta te će se ponovno pojaviti promjena kuta za 180° , ali ovog puta iz 90° u -90° . (Sl. 1.4). Može se primijetiti da zavojnica i kondenzator praktični prikazuju obrnute trendove jedna drugome.

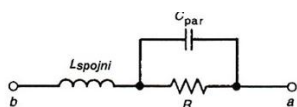
1.5 Otpornik

Otpornik je komponenta električnog kruga, to je naprava koja se sastoji od provodnog tijela i dvije dobro vodljive priključnice [1]

Otpornik pruža otpor struji, pri čemu je odnos između jakosti struje i napona između priključaka u skladu s Ohmovim zakonom. Karakteristična veličina otpornika je električni otpor koji je jednak naponu na otporniku podijeljenom sa strujom koja protječe kroz otpornik.

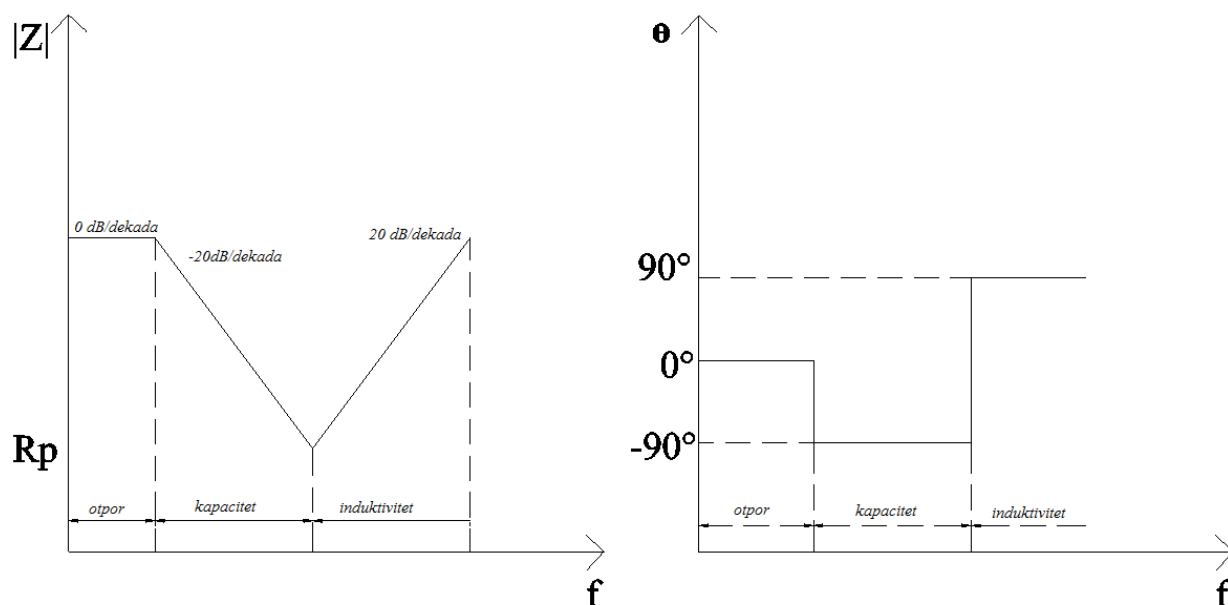
Impedancija je ukupni otpor koji se suprotstavlja izmjeničnoj struji u strujnom krugu i uključuje otpor, ali i reaktanciju koja se javlja na zavojnicama i kondenzatorima.[4]

Ekvivalentna shema otpornika za mjerene frekvencije se može najbolje prikazati kao (Sl. 1.5):



Slika 1.5 Ekvivalentna shema otpornika

Ponašanje na visokim frekvencijama se može prikazati preko sljedećih grafova(Sl. 1.6):



Slika1.6 Otpor pri visokim frekvencijama za otpornik

Otpor povećanjem frekvencije zadržava konstantan modul impedancije $|Z|$ i a kut između napona i struje je jednak 0° . Tek pri visokim frekvencijama može prijeći u kapacitivno odnosno induktivno područje s odgovarajućim promjenama kuta i trendom rasta i pad modula impedancije (Sl. 1.6).

2. OTPORNICI

Mjerene su vrijednosti otpora (R), modula impedancije($|Z|$), omjera faktora dobrote i gubitka (Q/D), faznog kuta između napona i struje (θ) i nadomjesni induktivitet (L) na frekvencijama 0.1, 0.12, 1, 10 i 25 kHz.

Pretpostavka je da će mjerni instrument prikazati vrijednost otpora jednaku nazivnoj na svim frekvencijama te da će $|Z|$ bit jednak izmjerenoj vrijednosti otpora s obzirom na nedostatak reaktancije kod otpora, iz istog razloga će fazni kut (argument impedancije) iznositi 0.

Za otpore od 1, 27, i 125 k Ω izmjerene su sljedeće vrijednosti (Tablice 2.1-2.3):

Tablica 2.1 Rezultati mjerenja za otpornik nazivnog otpora 27k Ω

R:27kΩ					
f[kHz]	R[kΩ]	 Z 	Q/D	θ[°]	L[mH]
0.1	26.96	26.96	0.0001	-0.01	-5.558
0.12	26.97	26.97	0.0001	0.01	-5.318
1	26.97	26.97	0.0006	-0.03	-2.898
10	26.97	26.97	0.0064	-0.37	-2.880
25	26.99	26.99	0.0165	-0.96	-2.901



Slika 2.1 Otpornik nazivnog otpora 27k Ω

Tablica 2.2 Rezultati mjerenja za otpornik nazivnog otpora 1k Ω

R:1kΩ					
f[kHz]	R[kΩ]	 Z 	Q/D	θ[°]	L[μH]
0.1	0.9972	0.9972	0.0001	0	-123
0.12	0.9972	0.9972	0.0001	0	-112
1	0.9973	0.9973	0.0001	0	-8.5
10	0.9972	0.9972	0.0002	-0.01	-2.92
25	0.9973	0.9973	0.0007	-0.04	-4.62



Slika 2.2 Otpornik nazivnog otpora 1k Ω

Tablica 2.3 Rezultati mjerenja za otpornik nazivnog otpora 125k Ω

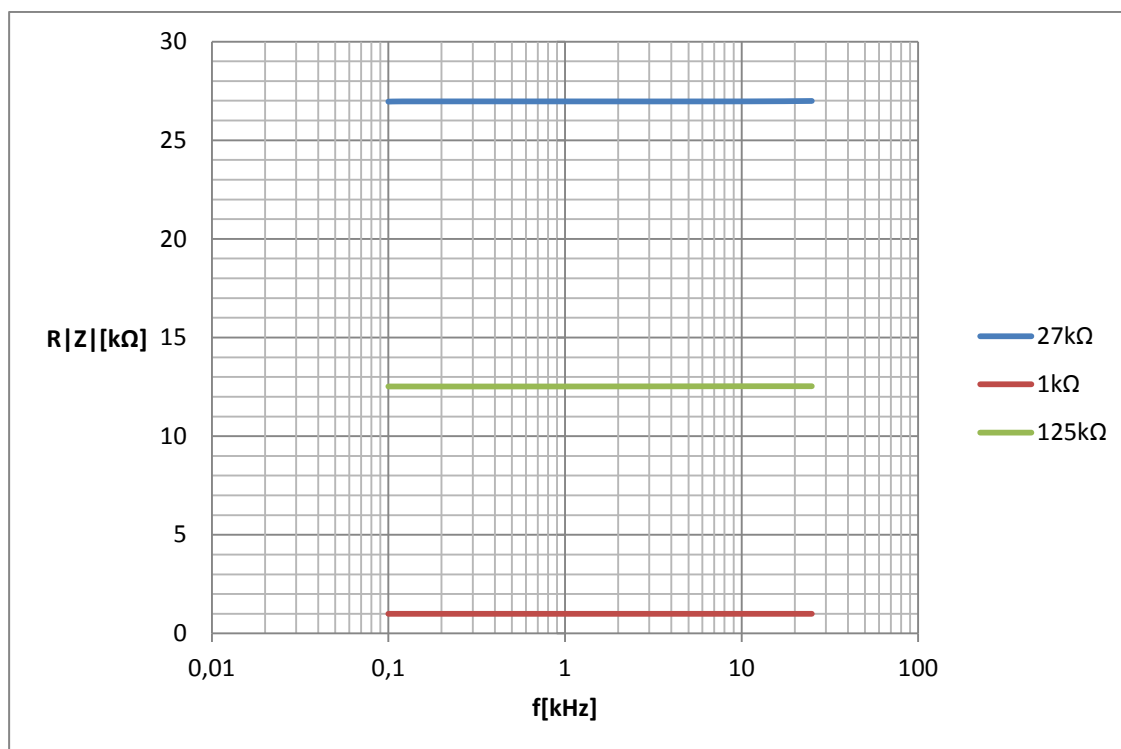
R:125kΩ					
f[kHz]	R[kΩ]	 Z 	Q/D	θ[°]	L[mH]
0.1	12.52	12.52	0.0001	0	-1.222
0.12	12.52	12.52	0.0001	0	-1.506
1	12.52	12.52	0.0002	-0.01	-0.5463
10	12.53	12.53	0.0021	-0.12	-0.4220
25	12.53	12.53	0.0060	-0.34	-0.4701



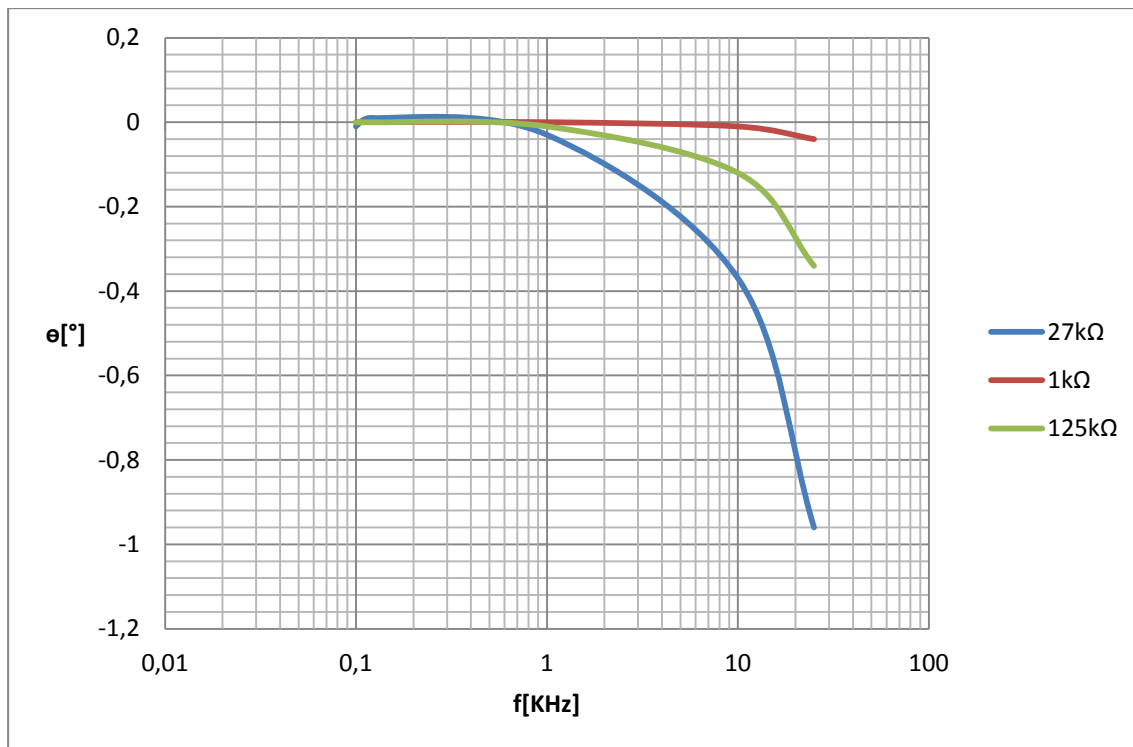
Slika 2.3 Otpornik nazivnog otpora $125\text{k}\Omega$

Rezultati mjerenja (Tablice 2.1-2.3) za sve otpornike na svim frekvencijama se podudaraju s očekivanjima (Sl. 1.6). Modul impedancije ostaje konstantan dok se kod kuta javlja raspon između 0 i 1 stupnja (Sl. 2.4). Odstupanja kod rezultata u odnosu na idealni otpor su minimalna.

Razlog tim odstupanjima su nesavršenost mjerne opreme, mjernog postupka, mjernog postupka te osobne pogreške mjeritelja. [5]



Slika 2.4 Ovisnost $|Z|$ o frekvenciji za Tablice 2.1-2.3



Slika 2.5 Ovisnost kuta ϕ o frekvenciji za Tablice 2.1-2.3

Iz grafova je vidljivo (Slika 2.4. i Slika 2.5) da se s povećanjem frekvencije modul impedancije i fazni kut gotovo i ne mijenjaju.

3. KONDENZATORI

Mjerene su vrijednosti kapaciteta (C), modula impedancije ($|Z|$), omjera faktora dobrote i gubitaka (Q/D), faznog kuta između napona i struje (ϕ) i nadomjesnog serijskog i paralelnog otpora (R_{SER} , R_{PAR}). Pri ovim mjerenjima koristila su se tri blok kondenzatora, tri elektrolitska kondenzatora i jedna dekada.

3.1 Blok kondenzatori

Nazivne vrijednosti blok kondenzatora su 470nF, 0.15 μ F i 2.2 μ F a mjerenja su vršena na frekvencijama 0.1, 0.12, 1, 10 i 25 kHz.

Pretpostavka je da će mjerni instrument pokazati vrijednost kapaciteta jednaku nazivnoj, ali da će zbog reaktancije kondenzatora vrijednost faznog kuta iznositi -90° te da će modul impedancije biti jednak izrazu:

$$Z_c = X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (3-1)$$

Tablica 3.1. Rezultati mjerenja za blok kondenzator nazivnog kapaciteta 470nF

	C:470nF					
f[kHz]	C[nF]	 Z [kΩ]	Q/D	φ[°]	R_{SER}[Ω]	R_{PAR}[MΩ]
0.1	468.4	3.398	0.0017	-89.90	6.913	2.03
0.12	468.3	2.828	0.0013	-89.92	4.073	2.04
1	467.0	0.3408	0.0041	-89.75	1.515	0.7798
10	464.4	0.03427	0.0114	-89.35	0.391	3.006*10 ⁻³
25	468.7	0.01358	0.0154	-89.12	0.209	8.807*10 ⁻⁴



Slika 3.1 Blok kondenzator nazivnog kapaciteta 470nF

Tablica 3.2 Rezultati mjerenja za blok kondenzator nazivnog kapaciteta 0.15μF

	C:0.15μF					
f[kHz]	C[μF]	 Z [kΩ]	Q/D	φ[°]	R_{SER}[Ω]	R_{PAR}[MΩ]
0.1	148.1	10.75	0.0003	-89.98	3.079	26.4
0.12	148.1	8.943	0.0005	-89.97	4.841	20.1
1	148.0	1.075	0.0007	-89.96	0.851	1.59
10	148.1	0.1075	0.0025	-89.86	0.265	0.04356
25	148.9	0.04275	0.0030	-89.83	0.130	0.01405



Slika 3.2 Blok kondenzator nazivnog kapaciteta 0.15μF

Tablica 3.3 Rezultati mjerenja za blok kondenzator nazivnog kapaciteta 2.2μF

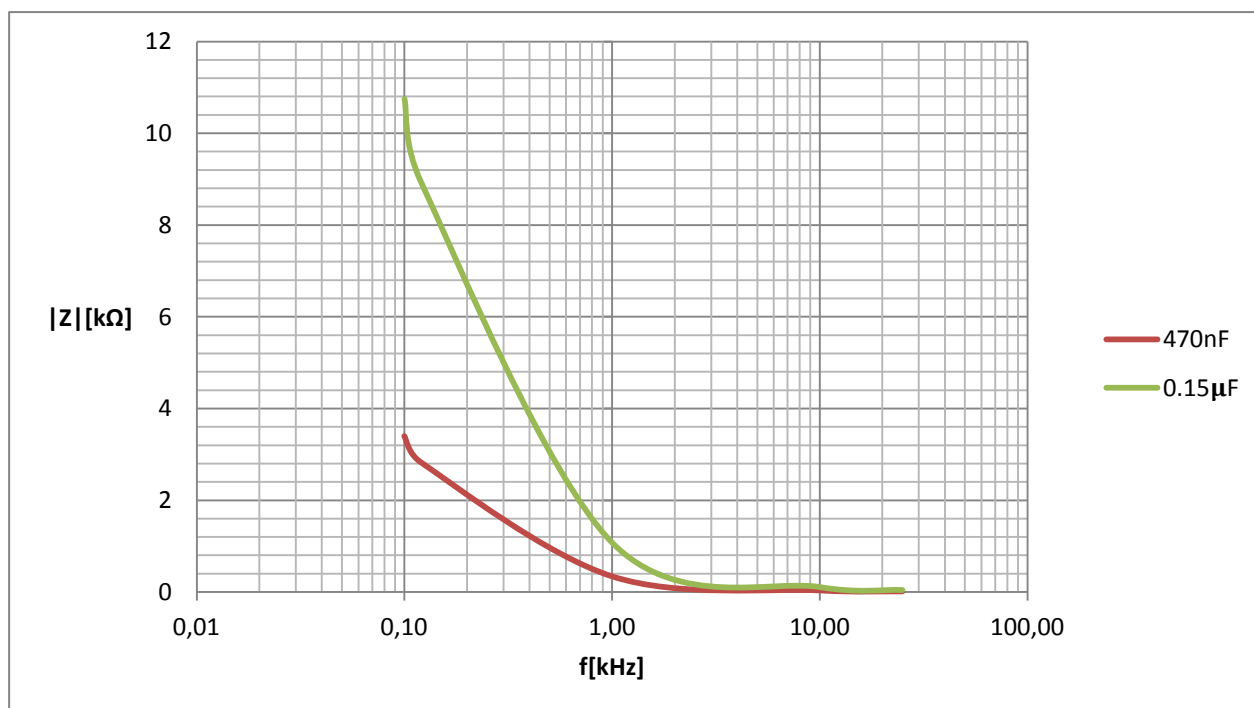
	C:2.2μF					
f[kHz]	C[μF]	 Z [Ω]	Q/D	φ[°]	R_{SER}[Ω]	R_{PAR}[kΩ]
0.1	2.246	708.7	0.0030	-89.85	2.047	242.4
0.12	2.245	589.8	0.0031	-89.82	1.922	185.9
1	2.237	71.15	0.0055	-89.69	0.387	13.08
10	2.253	7.067	0.0172	-89.02	0.121	0.4131
25	2.423	2.628	0.0348	-88.00	0.091	0.07545



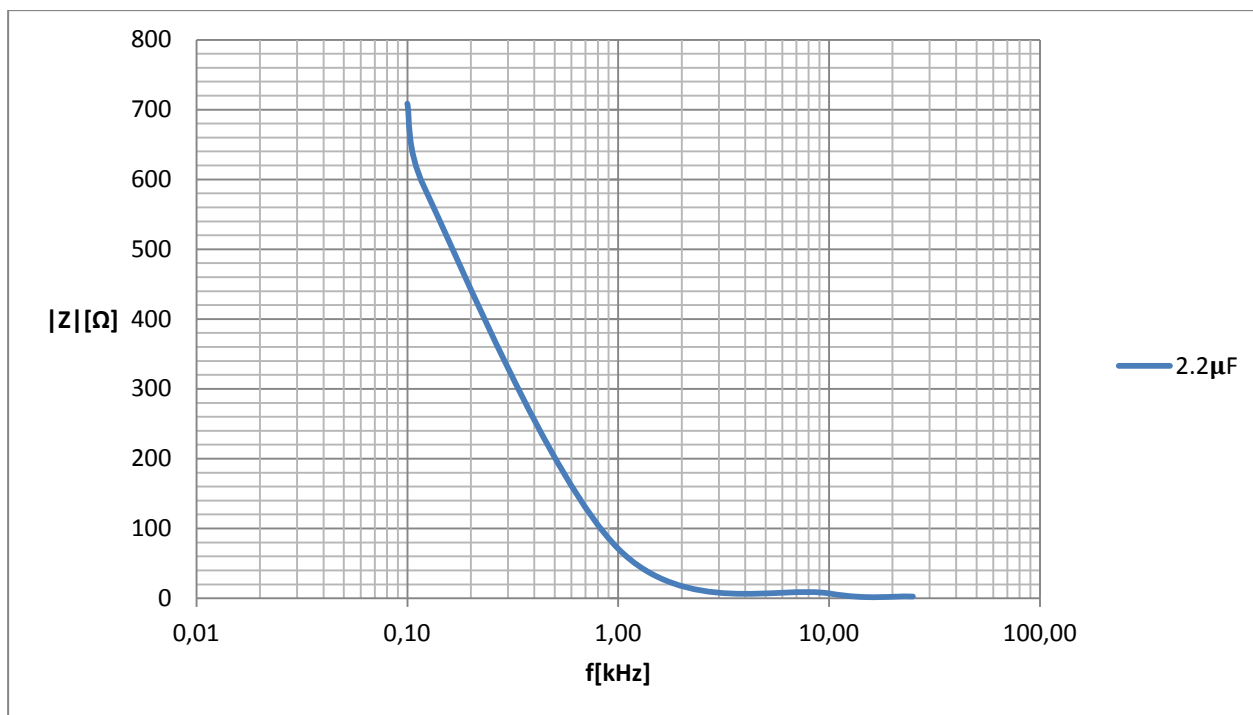
Slika 3.3 Blok kondenzator nazivnog kapaciteta 2.2μF

Rezultati mjerenja za ove kondenzatore (Tablice 3.1.-3.3) se podudaraju s očekivanjima na svim mjernim frekvencijama. Modul impedancije $|Z|$ prikazuje očekivani pad s povećanjem frekvencije dok je kut u rasponu od -90° do -88° što je u skladu s teorijskim vrijednostima. (Sl. 1.2) Odstupanja kod rezultata u odnosu na idealni kapacitet su minimalna. Razlog tim odstupanjima su nesavršenost mjerne opreme, mjernog postupka, mjernog postupka te osobne pogreške mjeritelja. [5]

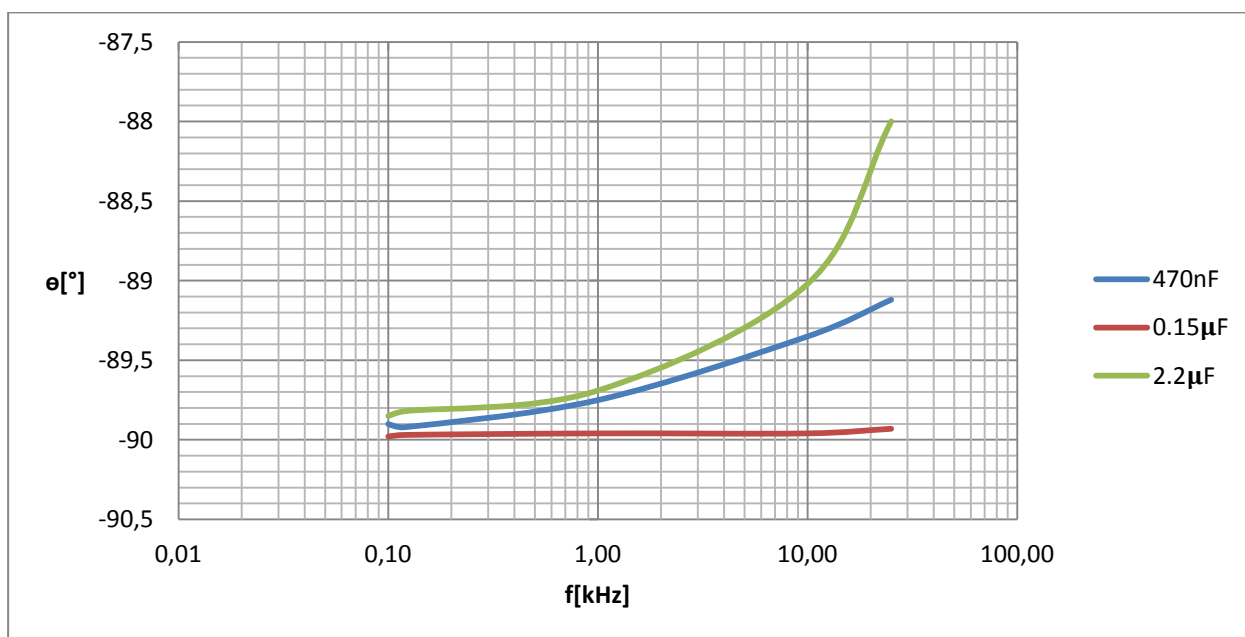
Iz rezultata je vidljivo da se povećanjem frekvencije smanjuje iznos modula impedancije što odgovara teorijskim pretpostavkama (Poglavlje 1.2).



Slika 3.4 Ovisnost $|Z|$ o frekvenciji za tablice 3.1-3.2



Slika 3.5 Ovisnost $|Z|$ o frekvenciji za tablicu 3.3



Slika 3.6 Ovisnost kuta ϕ o frekvenciji za tablice 3.1-3.3

Grafovi (Sl. 3.4 i 3.5) prikazuju pad modula impedancije s povećanjem frekvencije dok Slika 3.6 prikazuje gotovo zanemarive promjene kuta pri većim frekvencijama kod blok kondenzatora.

3.2 Elektrolitski kondenzator

Nazivne vrijednosti elektrolitskih kondenzatora su 10 μ F, 22 μ F i 220 μ F, a mjerenja su vršena na frekvencijama 0.1, 0.12, 1, 10 i 25 kHz.

Pretpostavka je da će mjerni instrument pokazati vrijednost kapaciteta jednaku nazivnoj, ali da će zbog reaktancije kondenzatora vrijednost faznog kuta iznositi -90°, no elektrolitski kondenzatori imaju svojstvo gdje se pri većim frekvencijama kut može znatno izmijeniti tako da se mogu očekivati znatna odstupanja, te da će modul impedancije biti jednak izrazu:

$$Z_c = X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (3-2)$$

Tablica 3.7 Rezultati mjerenja za elektrolitski kondenzator nazivnog kapaciteta 10 μ F

	C:10μF					
f[kHz]	C[μF]	 Z [Ω]	Q/D	θ[°]	R_{SER}[Ω]	R_{PAR}[kΩ]
0.1	9.103	175.1	0.0516	-87.04	9.057	3.380
0.12	9.055	146.5	0.0556	-86.82	8.104	2.644
1	8.652	18.73	0.1924	-79.11	3.545	0.09881
10	8.412	3.565	1.5981	-32.03	3.042	4.223*10 ⁻³
25	9.526	3.049	4.4618	-12.55	2.980	3.130*10 ⁻³



Slika 3.7 Elektrolitski kondenzator nazivnog kapaciteta 10 μ F

Tablica 3.8. Rezultati mjerenja za elektrolitski kondenzator nazivnog kapaciteta 22 μ F

	C:22μF					
f[kHz]	C[μF]	 Z [Ω]	Q/D	θ[°]	R_{SER}[Ω]	R_{PAR}[kΩ]
0.1	22.01	72.37	0.0397	-87.73	2.878	1.810
0.12	21.94	60.41	0.0436	-87.50	2.634	1.383
1	21.03	7.672	0.1651	-80.61	1.255	0.04682
10	22.48	4.240	1.4406	-34.72	1.025	1.518*10 ⁻³
25	62.97	1.002	9.8402	-5.79	1.001	1.018*10 ⁻³



Slika 3.8. Elektrolitski kondenzator nazivnog kapaciteta 22 μ F

Tablica 3.9 Rezultati mjerenja za elektrolitski kondenzator nazivnog kapaciteta 470 μ F

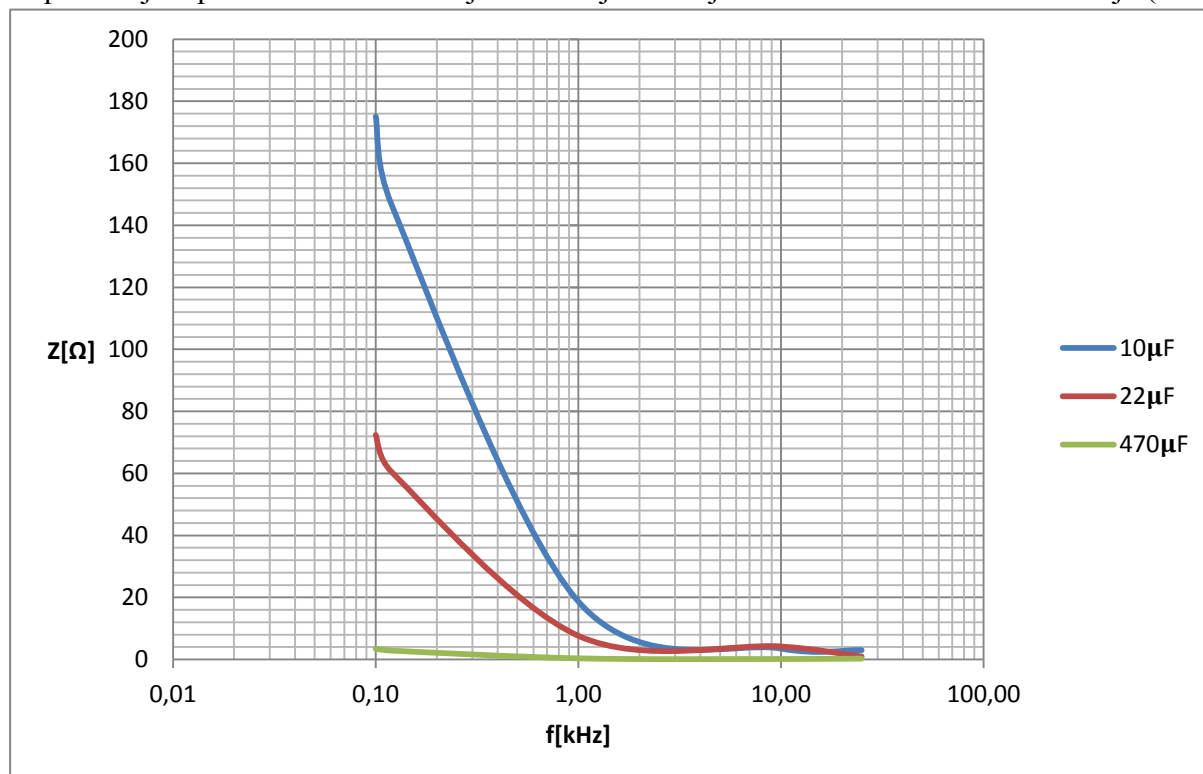
C:470 μ F						
f[kHz]	C[μ F]	Z [Ω]	Q/D	ϕ [$^\circ$]	R _{SER} [Ω]	R _{PAR} [Ω]
0.1	466.0	3.423	0.0031	-86.50	0.207	57.52
0.12	465.1	2.855	0.0726	-86.00	0.193	42.30
1	472.3	0.376	0.4810	-65.28	0.151	0.925
10	-245.2	0.170	2.4612	23.24	0.148	0.174
25	-27.19	0.284	0.6661	56.90	0.149	0.510



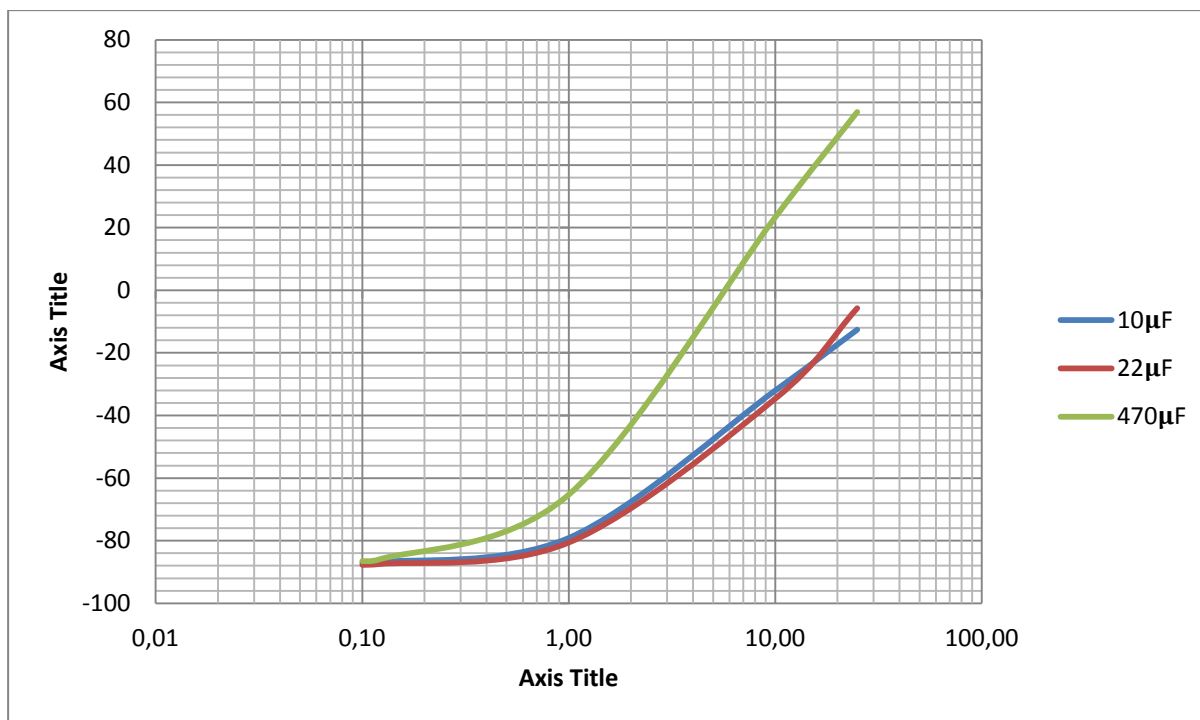
Slika 3.9 Elektrolitski kondenzator nazivnog kapaciteta 470 μ F

Iz mjernih rezultata vidimo da za C:10 μ F(Tablica 3.7) kapacitet približno odgovara nazivnom iako su odstupanja veća u odnosu na blok kondenzatore. Modul impedancije i dalje pokazuje trend smanjivanja s porastom frekvencije što je u skladu s teorijskim očekivanjima (Sl. 1.2), ali s povećanjem frekvencije se znatno mijenja fazni kut, raspon je između -90° i 20°.

Odstupanja od nazivne vrijednosti kondenzatora kao i faznog kuta su također uočljive kod C:22 μ F i C:470 μ F, posebno pri visokim frekvencijama(Sl. 3.10). Trend pada modula impedancije porastom frekvencije i dalje uočljiv i kod ova dva slučaja.(Sl.3.11)



Slika 3.10 Ovisnost |Z| o frekvenciji za tablice 3.7-3.9



Slika 3.11 Ovisnost kuta θ o frekvenciji za tablice 3.7-3.9

3.3 Dekada

Nazivne vrijednosti dekade su bile postavljene na 470nF, 150 nF i 2.2 μ F a mjerenja su vršena na frekvencijama 0.1, 0.12, 1, 10 i 25 kHz.

Pretpostavka je da će mjerni instrument pokazati vrijednost kapaciteta jednaku nazivnoj, ali da će zbog reaktancije kondenzatora vrijednost faznog kuta iznositi -90° te da će modul impedancije biti jednak izrazu:

$$Z_c = X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (3-3)$$

Ovisno o izvedbi kondenzatora unutar dekade moguća je pojava znatne promjene faznog kuta.

Tablica 3.12 Rezultati mjerenja za dekadu postavljenu na nazivni kapacitet od 470nF

	C:470nF					
f[kHz]	C[nF]	Z[k Ω]	Q/D	θ [$^\circ$]	R _{SER} [Ω]	R _{PAR} [M Ω]
0.1	466.8	3.418	0.0024	-89.87	7.792	1.50
0.12	466.6	2.844	0.0016	-89.88	4.611	1.63
1	464.5	0.3426	0.0108	-89.10	4.170	0.02822
10	456.2	0.03450	0.0816	-82.72	3.301	3.704*10 ⁻⁴
25	431.8	0.01393	0.1824	-72.75	3.112	6.677*10 ⁻⁵

Tablica 3.13 Rezultati mjerenja za dekadu postavljenu na nazivni kapacitet od 150nF

	C:150nF					
f[kHz]	C[nF]	Z[kΩ]	Q/D	ϑ[°]	R_{SER}[Ω]	R_{PAR}[MΩ]
0.1	156.0	10.20	0.0009	-89.95	9.412	12.8
0.12	156.0	8.490	0.0012	-89.93	9.503	7.11
1	155.6	1.022	0.0028	-89.84	2.779	0.3716
10	155.0	0.1027	0.0083	-89.53	0.840	0.01268
25	155.4	0.0498	0.0119	-89.34	0.470	3.625*10 ⁻³

Tablica 3.14 Rezultati mjerenja za dekadu postavljenu na nazivni kapacitet od 2.2μF

	C:2.2μF					
f[kHz]	C[μF]	Z[Ω]	Q/D	ϑ[°]	R_{SER}[Ω]	R_{PAR}[kΩ]
0.1	2.222	716.2	0.0016	-89.90	1.258	423.7
0.12	2.222	596.0	0.0020	-89.89	1.194	308.6
1	2.216	71.8	0.0093	-89.69	0.386	13.61
10	2.229	7.137	0.0231	-88.62	0.169	0.2954
25	2.371	2.682	0.0506	-87.00	0.142	0.05108

Iz mjernih rezultata (tablice 3.12-3.14) moguće je zaključiti da se unutar dekade nalaze blok kondenzatori s obzirom da su trendovi podataka sličniji onima iz poglavlja 3.1 nego iz poglavlja 3.2. Trendovi promjena modula impedancije i faznoga kuta su izrazito slični onima iz slika 3.4 i 3.5.

4. ZAVOJNICE

Mjerene su vrijednosti induktiviteta (L), nadomjesnog otpora (R), modula impedancije ($|Z|$), omjera faktora dobrote i gubitaka (Q/D) i faznog kuta između napona i struje (ϑ).

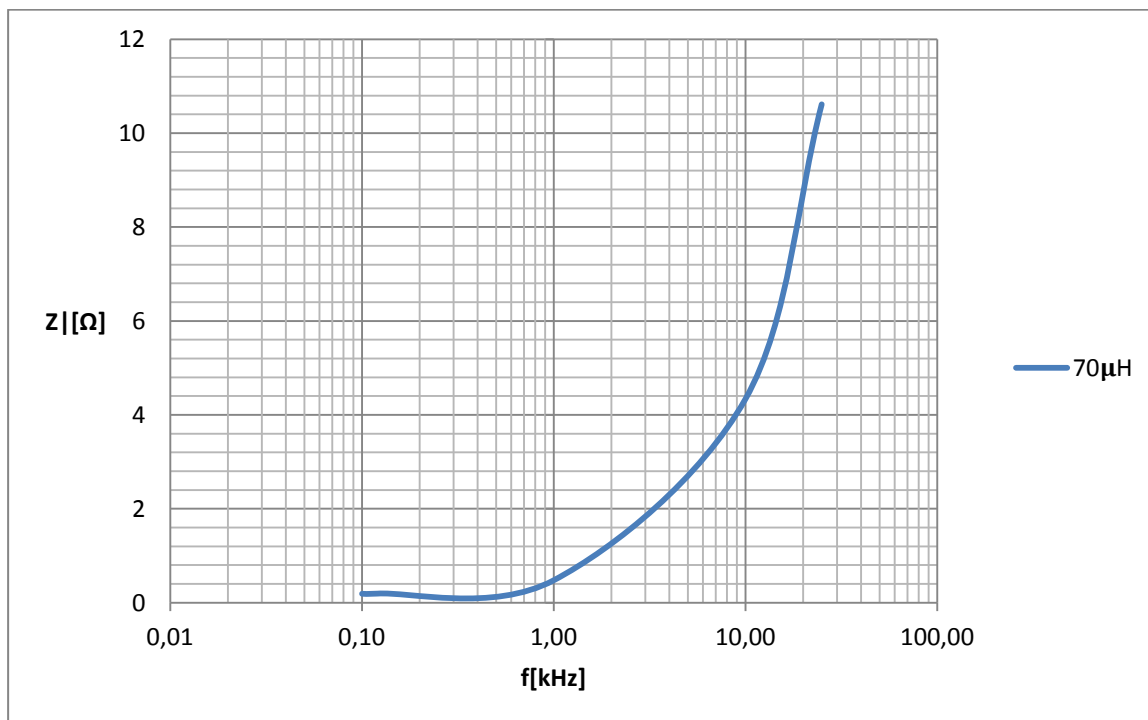
Pri ovim mjerenjima su se koristile tri zavojnice nazivnih impedancija 70μH, 7mH i 260 mH a mjerenja su se vršila na frekvencijama od 0.1, 0.12, 1, 10 i 25 kHz.

Pretpostavka je da će mjerni instrument prikazati vrijednost induktiviteta jednaku nazivnoj na svim frekvencijama, iznos faznog kuta bi trebao iznositi 90° no moguće je da će doći do odstupanja zbog geometrijske izvedbe zavojnice i broja namota. Impedancija idealnog induktiviteta je dana sljedećim izrazom:

$$Z_L = X_L = j\omega L \quad (4-1)$$

Tablica 4.1 Rezultati mjerenja za zavojnicu nazivnog induktiviteta 70 μH

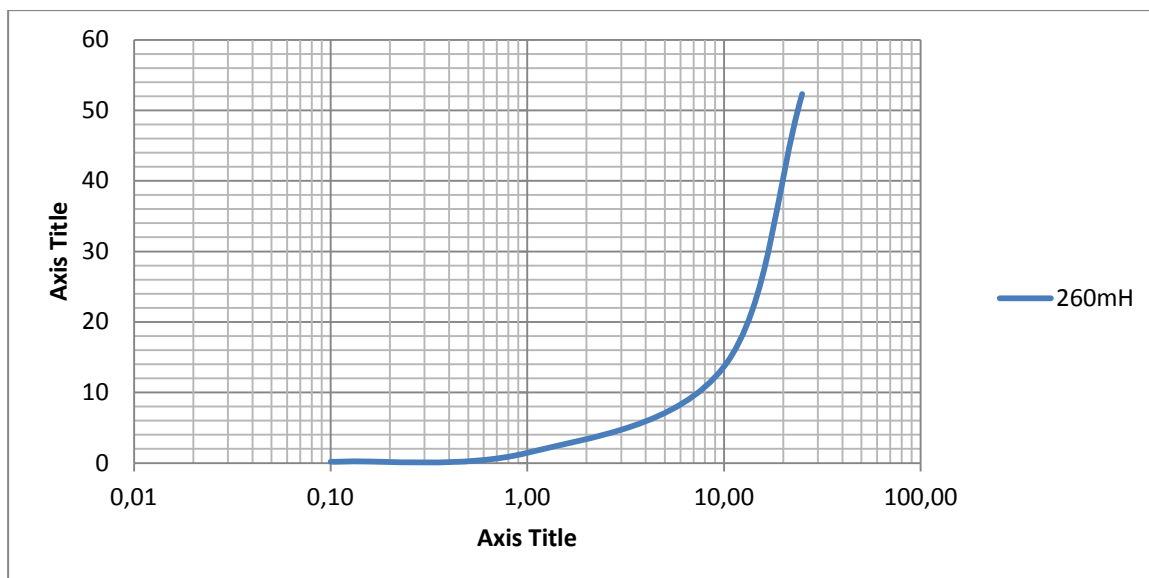
L:70μH					
f[kHz]	L[μH]	R[Ω]	 Z [Ω]	Q/D	ϕ[$^\circ$]
0.1	70	0.185	0.189	0.2408	13.30
0.12	70	0.184	0.192	0.2843	16.17
1	69.9	0.184	0.476	2.38	67.20
10	68.85	0.277	4.334	15.63	86.34
25	67.50	0.483	10.61	21.94	87.39



Slika 4.1 Ovisnost $|Z|$ o frekvenciji za tablicu 4.1

Tablica 4.2 Rezultati mjerenja za zavojnicu nazivnog induktiviteta 260 mH

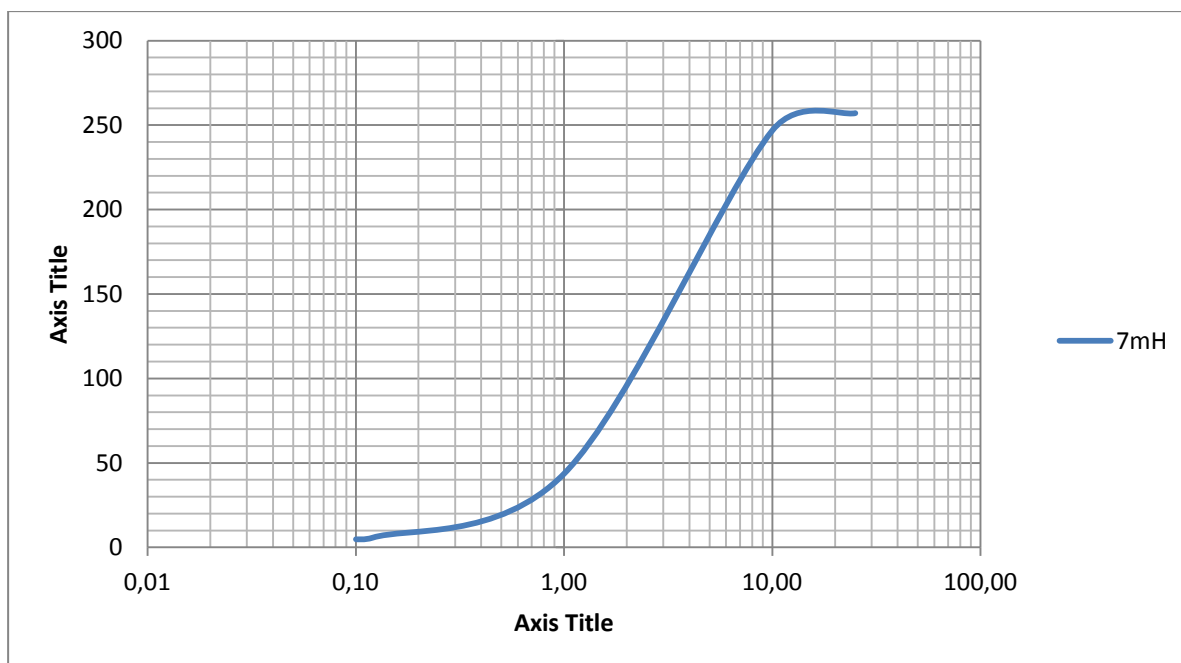
L:260mH					
f[kHz]	L[mH]	R[Ω]	 Z [kΩ]	Q/D	ϕ[$^\circ$]
0.1	259.1	9.309	0.1631	17.44	86.72
0.12	258.0	11.24	0.1951	17.39	86.70
1	226.6	101.5	1.428	13.97	85.92
10	211.6	3054	13.64	4.34	77.05
25	265.8	31540	52.32	1.32	52.93



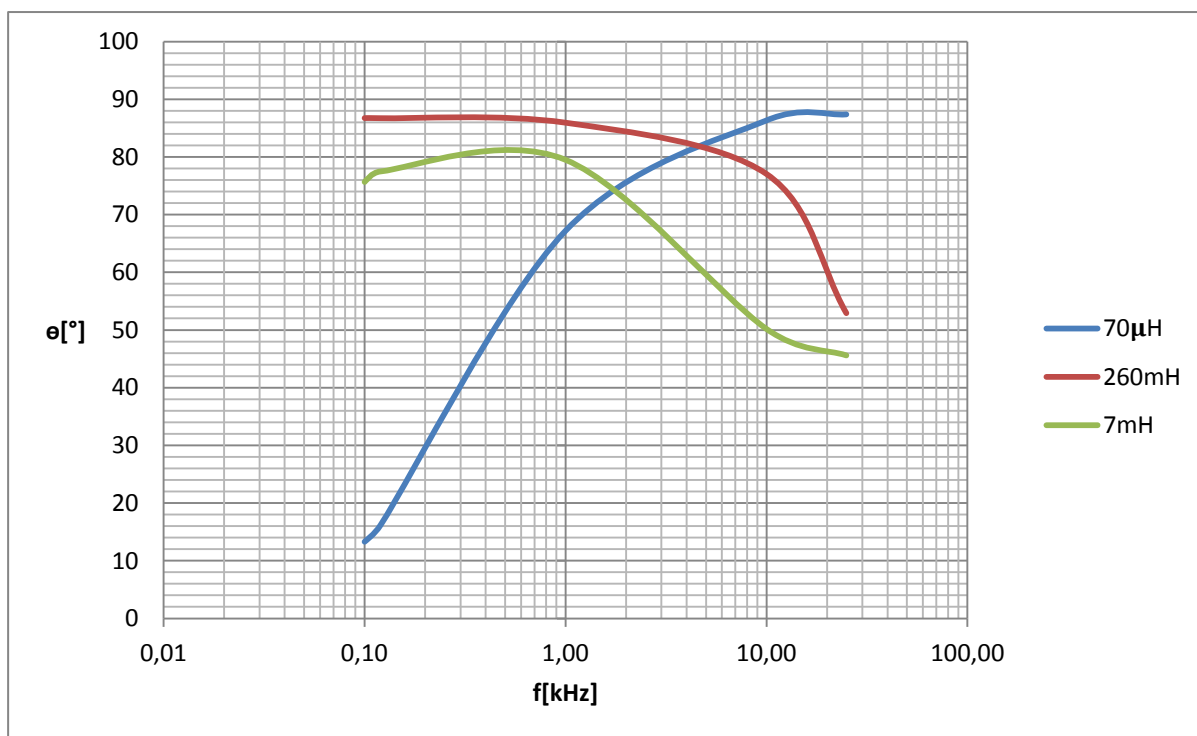
Slika 4.3 Ovisnost $|Z|$ o frekvenciji za tablicu 4.2

Tablica 4.3 Rezultati mjerenja za zavojnicu nazivnog induktiviteta 7 mH

	L:7mH				
f[kHz]	L[mH]	R[Ω]	 Z [Ω]	Q/D	θ[°]
0.1	7.297	1.154	4.716	3.89	75.65
0.12	7.297	1.247	5.613	4.48	77.47
1	6.854	7.984	43.60	5.39	79.49
10	3.014	158	246.8	1.20	50.19
25	1.668	257	167.2	1.02	45.59



Slika 4.5 Ovisnost $|Z|$ o frekvenciji za 4.4



Slika 4.6 Ovisnost kuta ϕ o frekvenciji za tablice 4.1-4.3

Iz mjernih rezultata za 70 μH , 260 mH vidimo da je mjereni induktivitet približno jednak nazivnom te da modul impedancije pokazuje trend rasta s porastom frekvencije (Tablice 4.1 i 4.2), to je u skladu s teorijskim očekivanjem (Sl. 1.4) U oba slučaja se pojavljuje znatno odstupanje od očekivanog faznog kuta (Sl. 1.4). $L:70\mu\text{H}$ postiže očekivanu vrijednost kuta tek pri visokim, a pokazuje značajno odstupanje na niskim dok se kod $L:260\text{mH}$ pojavljuje obrnuti trend. (Tablica 4.2). Raspon kuta je između 90° i 45° za $L:7\text{mH}$ i $L:260\text{mH}$. $L:70\mu\text{H}$ ima najveće odstupanje, odnosno raspon kuta je između 10° i 90° .

$L:7\text{mH}$ se ponaša slično kao $L:260\text{mH}$ kod ovisnosti modula impedancije i faznog kuta o frekvenciji (Sl. 4.5 i 4.6) no pri višim frekvencijama se javlja znatno odstupanje od nazivne vrijednosti. (Tablica 4.3)

5. ZAKLJUČAK

Mjerenja pomoću HM8018 RLC metra se mogu provoditi brzo i efikasno dok je sam instrument dovoljno precizan za mjerenja širokog opsega vrijednosti.

Radom na višim frekvencijama mnoge komponente se ponašaju znatno drugačije nego idealni modeli, kako bi se te razlike mogle predložiti potrebno je te komponente prikazati nadomjesnim shemama koje u obzir uzimaju gubitke i parazitske utjecaje kako bi rezultati mjerenja bili smisleni.

Iz mjernih rezultata za otpornike možemo vidjeti da se ponašaju slično idealnom otporu i da nema velikih odstupanja od očekivanih rezultata unatoč raznim parazitskim utjecajima. Blok kondenzatori su slični idealnom kapacitetu, ali su odstupanja nešto veća nego kod otpornika. Kod elektrolitskih kondenzatora i zavojnica se pojavljuju značajne razlike u odnosu na idealne modele kapaciteta i induktiviteta. Ovdje razni parazitski utjecaji i njihove fizikalne izvedbe mogu imati neočekivane rezultate u odnosu na teoriju.

LITERATURA

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

[2] L.Tihanyi, "*EMC in Power Electronics*", The IEEE Press, New York, NY., U.S.A, 1997

[3] IET Labs, "*LCR Measurement Primer*", New York, NY., U.S.A, 2012

dostupno na:

http://www.ietlabs.com/pdf/application_notes/030122%20IET%20LCR%20PRIMER%201st%20Edition.pdf [Datum zadnjeg pristupa stranici: 15.09.2017]

[4] C. Alexander, M. Sadiku, "*Fundamentals of Electric Circuits*", McGraw-Hill, New York, NY., U.S.A, 1999

[5] V. Bego, "*Mjerenja u elektrotehnici*", Graphis, Zagreb, 2003

SAŽETAK

Nadomjesni parametri kondenzatora i zavojnice mogu se brzo i efikasno izmjeriti RLC metrom. Prije mjerenja potrebno je upoznati se s radom RLC metra i teorijskim vrijednostima koje će nadomjesni parametri poprimiti na idealnim otpornicima, kondenzatorima i zavojnicama. Parametri koji se mjere su otpor, induktivitet, kapacitet, nadomjesni otpor, modul impedancije, faktor dobrote i kut između napona i struje. Mjerenja se izvode na frekvencijama od 0.1, 0.12, 1, 10 i 25 kHz. Sličnost mjernih rezultata i očekivanih, teorijskih, rezultata varira. Ovisno o komponenti, njenoj izvedbi i frekvenciji, rezultati mogu biti iznimno slični teorijskim vrijednostima, ali se mogu pojaviti i velika odstupanja. Odstupanja se učestalije pojavljuju na zavojnicama i kondenzatorima, no ona se mogu pripisati neidealnim uvjetima mjerenja, pojavama raznih parazitskih utjecaja a moguća je i šteta na komponenti.

Ključne riječi: RLC metar, nadomjesni parametri, otpor, impedancija, kapacitet, induktivitet, frekvencija, faktor dobrote, kut između napona i struje, parazitski utjecaji.

Measurements of coil and capacitor equivalent circuits via LCR meter

ABSTRACT

It is possible to quickly and effectively measure the equivalent circuit parameters of coils and capacitors by using an LCR meter. It is necessary to have understanding of the LCR meter's functions as well as knowledge of the theoretical values of these parameters for the ideal equivalent of each component. The measured parameters are: resistance, inductance, capacitance, equivalent resistance, impedance magnitude, quality factor and the phase angle. The measurements are conducted on the frequencies of 0.1, 0.12, 1, 10, 25 kHz. The similarity between the measured and the expected, theoretical values varies. Depending on the measured component, it's architecture and the chosen frequency the results can be almost a perfect match, but significant discrepancies are possible. The discrepancies occur more commonly with coils and capacitors, however some of them can be attributed to non-ideal measuring conditions, parasitic elements and it's also not possible to exclude the possibility of some of the components being damaged.

Key words: LCR meter, equivalent circuit, resistance, inductance, capacitance, frequency, quality factor, phase angle, parasitic elements.

ŽIVOTOPIS

Adam Karalić rođen je 06.03.1994 u Osijeku gdje i živi. Završio je osnovnu školu "Franje Krežme" a potom "I. Gimnaziju Osijek". Upisuje preddiplomski studij elektrotehnike, a na 2. godini bira smjer komunikacije i informatika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.

(potpis)

PRILOG

Predložak za laboratorijsku vježbu:

Mjerenje kapaciteta, induktiviteta i otpora

Teorijski uvod

Stvarne komponente koje se vrlo često koriste u području elektrotehnike su: otpornici, kondenzatori i zavojnice. Najjednostavniji matematički modeli otpornika/kondenzatora/zavojnica su otpornik/kapacitet/induktivitet s pomoć kojih predstavljamo (modeliramo) komponente. Svojstva otpornika/kapaciteta/induktiviteta se nazivaju otpornost/kapacitivnost/induktivnost. Budući da komponente nisu idealne pri matematičkom modeliranju komponenti potrebno je koristiti složenije modele, npr. pri modeliranju otpornika ponekada je potrebno koristiti serijski spoj induktiviteta i otpora, tj. kada je potrebno uvažiti parazitske induktivnosti stvarne komponente. Matematički model otpornika može biti još složeniji ako se uvažavaju parazitske kapacitivnosti i sl.

Kako je u primjeni potrebno prikazati ovisnost impedancije i faznog pomaka u širokom rasponu frekvencija koristi se logaritamsko mjerilo na osi frekvencije. Također je uobičajeno u praksi impedanciju prikazati s pomoću decibela $|Z(\omega)|_{dB}$, dok se fazni pomak prikazuje u linearnom mjerilu. Takav način prikaza naziva se Bodeov dijagram.

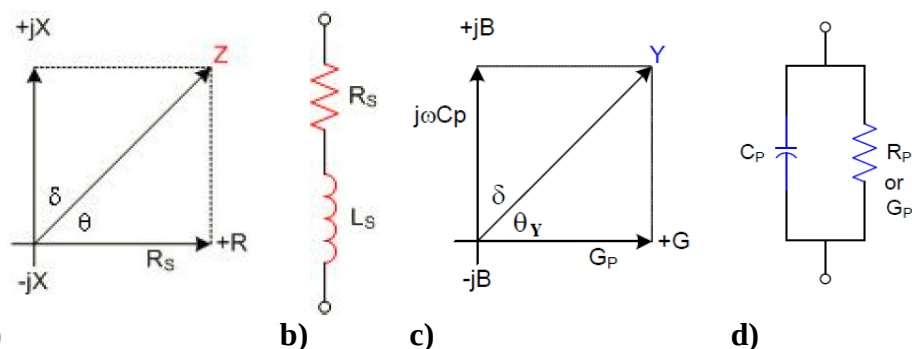
$$|Z(\omega)|_{dB} = 20 \log \frac{|Z(\omega)|[\Omega]}{1[\Omega]} \quad [dB]$$

Vrijednost u nazivniku može biti i neka druga vrijednost, tzv. bazna ili normirajuća vrijednost. Općenito 0 dB odgovara upravo baznoj vrijednosti otpora, u ovom slučaju bazna impedancija je $1[\Omega]$.

U nastavku će se uočiti kako se mogu koristiti iste nadomjesne sheme za modeliranje različitih komponenti. Tako se na primjer pojavljuje ista nadomjesna shema pri modeliranju otpornika i kondenzatora, slike 1.c,d) i 2.c,d). Iako se radi o istim nadomjesnim shemama u modelu otpornika kapacitet se smatra parazitskim utjecajem, dok se kod modela kondenzatora otpor smatra parazitskim utjecajem.

Nadomjesne sheme otpora

Utjecaj parazitskih efekata ovisi o tehnologiji izvedbe otpornika (žični, metal-flim, ...). Na slici 1. su prikazane nadomjesne sheme otpornika s pripadnim fazorskim dijagramom. Kut θ ili φ predstavlja fazni pomak (kut impedancije) a δ kut gubitaka.



Slika 1. Nadomjesna shema otpornika i dijagrami impedancije/admitancije

Tablica 1. Formule za impedanciju nadomjesne sheme otpornika

SERIJA	PARALELA
$Z(\omega) = R + j\omega L$ $\omega = 2\pi f$ $ Z(\omega) = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ $\varphi(\omega) = \theta(\omega) = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$	$Y(\omega) = G + j\omega C$ $ Y(\omega) = \sqrt{G^2 + (\omega C)^2}$ $\theta_Y(\omega) = \tan^{-1} \frac{\omega C}{G}$ $Z(\omega) = \frac{1}{Y(\omega)}$ $ Z(\omega) = \frac{1}{ Y(\omega) }$ $\varphi(\omega) = -\theta_Y(\omega)$

Gdje je:

$Z(\omega)$ – (kompleksna) impedancija ovisna o kružnoj frekvenciji

ω – kružna frekvencija

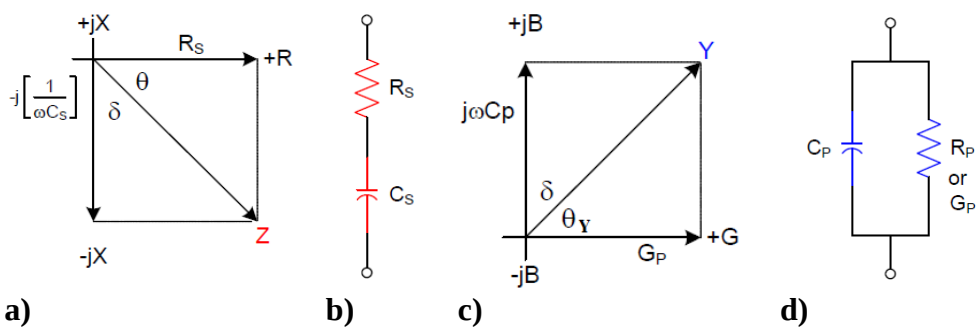
f – frekvencija

$|Z(\omega)|$ – iznos/modul impedancije ovisan o kružnoj frekvenciji (**$0dB = 1\Omega$**)

$\varphi(\omega)$ – fazni pomak ovisan o kružnoj frekvenciji

Nadomjesne sheme kondenzatora

Utjecaj parazitskih efekata ovisi o vrsti dielektrika (keramika, plastika, tantal-oksidi, elektrolitski). Na slici 2. prikazane su dvije najčešće nadomjesne sheme kondenzatora, odnosno slika 2.b) predstavlja serijski nadomjesni spoj s pripadnim fazorskim dijagramom na slici 2.a), dok je na slici 2.d) prikazana paralelna nadomjesna shema s pripadnim fazorskim dijagramom na slici 2.c). Vrlo često se za otpor u serijskoj nadomjesnoj shemi koristi termin ESR (engl. equivalent series resistance). U tablici 2. se nalaze najvažnije formule.



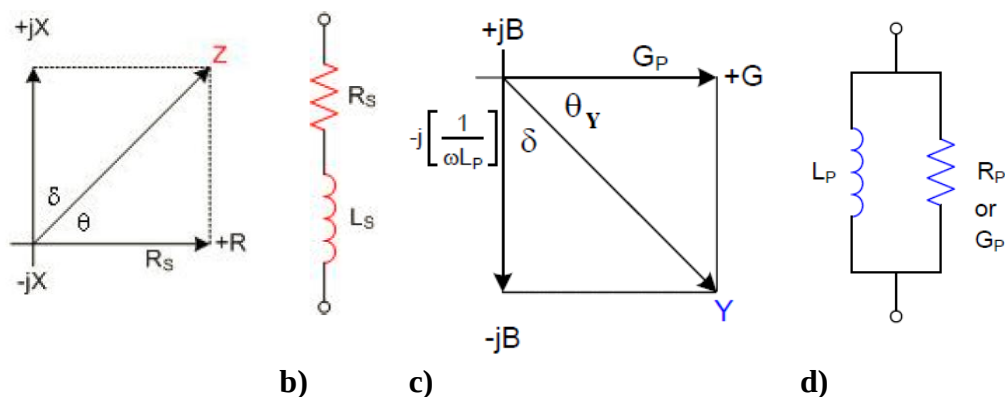
Slika 2. Nadomjesne sheme kondenzatora i dijagrami impedancije/admitancije

Tablica 2. Formule za impedanciju nadomjesnih shema kondenzatora

SERIJA	PARALELA
$Z(\omega) = R - j \frac{1}{\omega C}$ $ Z(\omega) = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ $\varphi(\omega) = \theta(\omega) = \tan^{-1} \frac{-1}{\omega RC}$ $= -\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \omega RC$	$Y(\omega) = G + j\omega C$ $ Y(\omega) = \sqrt{G^2 + (\omega C)^2}$ $\theta_Y(\omega) = \tan^{-1} \frac{\omega C}{G}$ $Z(\omega) = \frac{1}{Y(\omega)}$ $ Z(\omega) = \frac{1}{ Y(\omega) }$ $\varphi(\omega) = -\theta_Y(\omega)$

Nadomjesne sheme zavojnice

Utjecaj parazitskih efekata kod zavojnica ovisni o geometriji zavojnice (udaljenosti između zavoja, višeslojni namoti, promjeru i specifičnoj otpornosti vodiča ...) i vrsti jezgre (zračna jezgra, feromagnetska ...). Model zavojnice s feromagnetskom jezgrom je posebno složen jer treba uvažiti krivulju magnetiziranja jezgre, zato će se razmatrati jezgre bez feromagnetske jezgre ili eventualno s feromagnetskom jezgrom unutar linearnog područja krivulje magnetiziranja.



Slika 3. Nadomjesne sheme zavojnice i dijagrami impedancije/admitancije

Rad na vježbi

1. S pomoću RLC metra izmjeriti nadomjesne parametre otpornika (R_x, L_x, θ) iznosa nazivnog otpora $R_1 \in [1\Omega, 1M\Omega]$. Mjerenja je potrebno napraviti pri svim frekvencijama koje RLC metar omogućava.
2. S pomoću RLC metra izmjeriti nadomjesne parametre kondenzatora ($C_x, R_{SER}, R_{PAR}, \theta$) za:
 - a. Elektrolitske kondenzator nazivne kapacitivnosti $C_1 \in [1nF, 1mF]$. Uključiti opciju BIAS pri mjerenju parametara elektrolitskog kondenzatora, također pri spajanju paziti na polarizaciju kondenzatora.
 - b. Blok kondenzator nazivne kapacitivnosti $C_2 \in [1nF, 1mF]$
3. S pomoću RLC metra izmjeriti nadomjesne parametre zračne zavojnice (R_x, L_x, θ) iznosa nazivnog induktiviteta $L_1 \in [1\mu H, 10mH]$. Mjerenja je potrebno napraviti pri svim frekvencijama koje RLC metar omogućava.

Pitanja za pripremu

1. Objasniti pojmove:
 - a. Otpornik, otpor, otpornost
 - b. Kondenzator, kapacitet, kapacitivnost
 - c. Zavojnica, induktivitet, induktivnost
2. Objasniti pojmove: faktor dobrote, kut gubitaka, kut impedancije, kut admitancije...
3. Neka je otpornik modeliran serijskim spojem otpora 100 Ohma i induktiviteta 10 uH. Odredite izraz koji opisuje ovisnost iznos impedancije i faznog pokaka o frekvenciji. Nacrtati navedene ovisnosti.
4. Neka je kondenzator modeliran:
 - a. Serijskim spojem otpora i kapaciteta
 - b. Paralelnim spojem otpora i kapacitetaOdredite izraz koji opisuje ovisnost iznos impedancije i faznog pokaka o frekvenciji. Nacrtati navedene ovisnosti.
5. Koliko iznosi faktor dobrote, kut gubitaka, kut impedancije i kut admitancije kod:
 - a. Idealnog otpornika (otpora)
 - b. Idealnog kondenzatora (kapaciteta)
 - c. Idealne zavojnice (induktiviteta)

Popis opreme

1. HAMEG HM8018 RLC metar
2. Otpornik nazivnog otpora: $R_1 \in [1\Omega, 1M\Omega]$
3. Blok kondenzator nazivnog kapaciteta: $C_1 \in [1nF, 1mF]$
4. Elektrolitski kondenzator nazivnog kapaciteta: $C_2 \in [1nF, 1mF]$,
5. Zavojnica nazivnog induktiviteta $L_1 \in [1\mu H, 10mH]$

Mjerni postupak

1. Spojite otpornik na stezaljke uređaja. (Slika 4.)



Slika 4. Priključnice za stezaljke

2. Izmjerite (R_x, L_x, θ) i zabilježite rezultate. (Slika 5.)



Slika 5. Tipke za izbor mjerene komponente

3. Promijenite mjernu frekvenciju na 0.12, 1, 10 i 25 kHz te izmjerite iste komponente. (Slika 6.)



Slika 6. Tipka za izbor frekvencije

4. Spojite kondenzator na stezaljke uređaja (Slika 4.)
5. Za elektrolitske kondenzatore OBAVEZNO uključiti opciju BIAS (Slika 7.) i pripaziti na polarizaciju.



Slika 7. Tipka za uključivanje opcije "BIAS"

6. Izmerite (C_x , R_{SER} , R_{PAR} , θ) i zabilježite rezultate. (Slike 5. i 8.)



Slika 8. Tipka za izbor paralelnog/serijskog načina

7. Promijenite mjernu frekvenciju na 0.12, 1, 10 i 25 kHz te izmerite iste komponente (Slika 6.)
8. Spojite zavojnicu na stezaljke uređaja
9. Izmerite (R_x , L_x , θ) i zabilježite rezultate. (Slika 5.)
10. Promijenite mjernu frekvenciju na 0.12, 1, 10 i 25 kHz te izmerite iste komponente (Slika 6.)

Izvještaj

1. Izmerene komponente prikazati u tablicama ovisno o frekvenciji

Tablica 1. Rezultati mjerenja za otpornik

f[kHz]	R	L	θ [°]
0.1			
0.12			
1			
10			
25			

Tablica 2. Rezultati mjerenja za elektrolitski kondenzator

f[kHz]	C	R_{SER}	R_{PAR}	θ[°]
0.1				
0.12				
1				
10				
25				

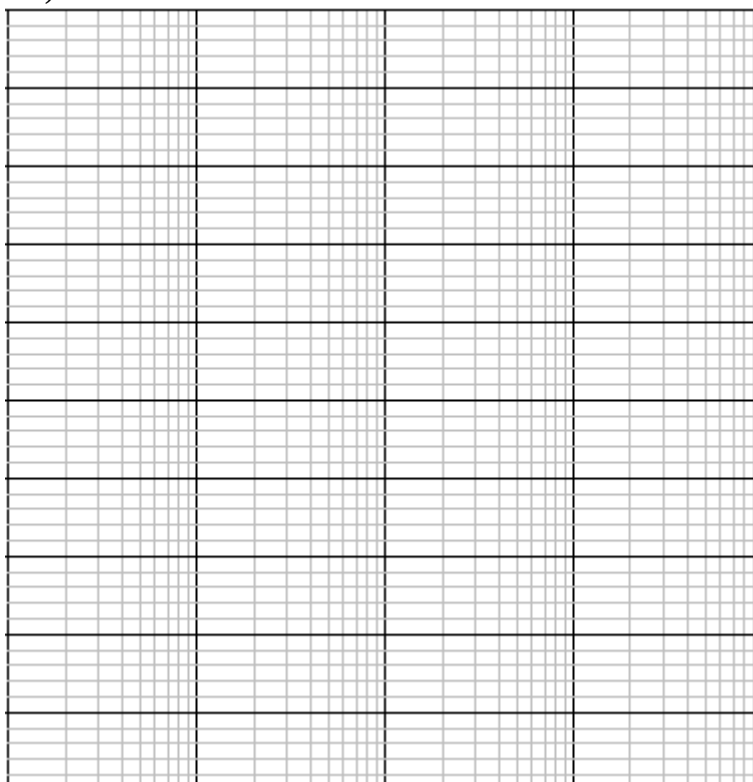
Tablica 3. Rezultati mjerenja za blok kondenzator

f[kHz]	C	R_{SER}	R_{PAR}	θ[°]
0.1				
0.12				
1				
10				
25				

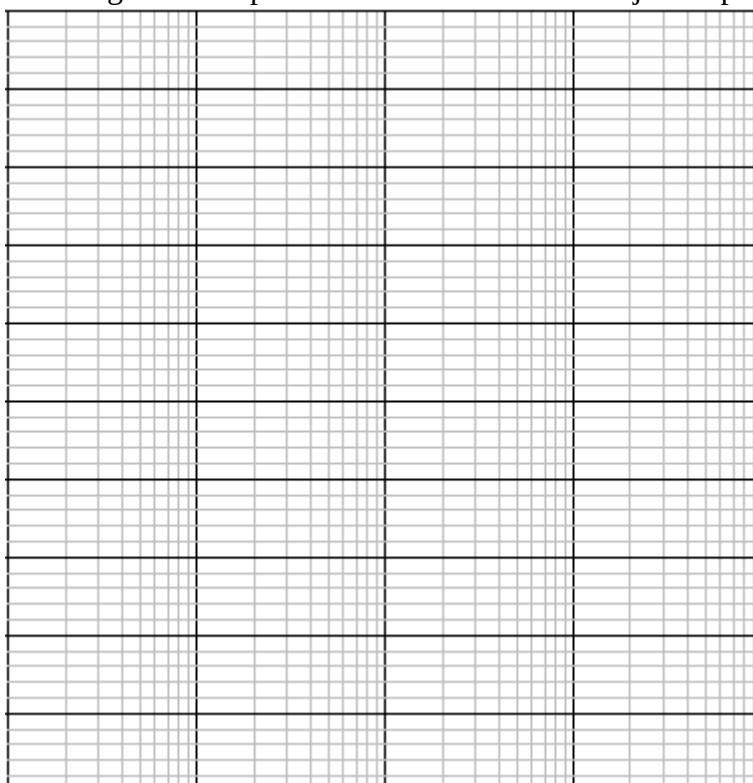
Tablica 4. Rezultati mjerenja za zavojnicu

f[kHz]	L	R	θ[°]
0.1			
0.12			
1			
10			
25			

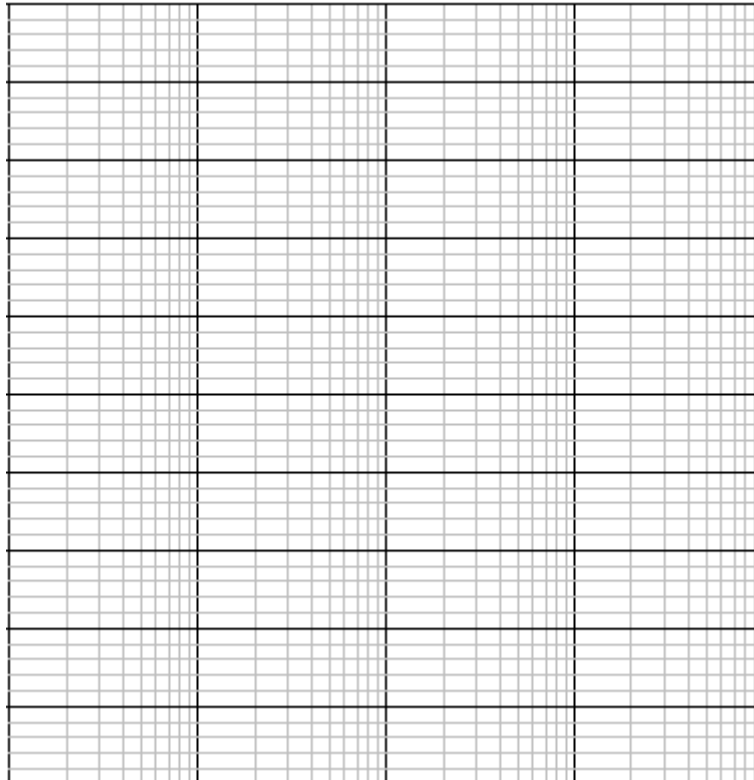
2. Grafički prikazati ovisnost θ o frekvenciji za svaki element u log mjerilu (Slike 8.- 11.)



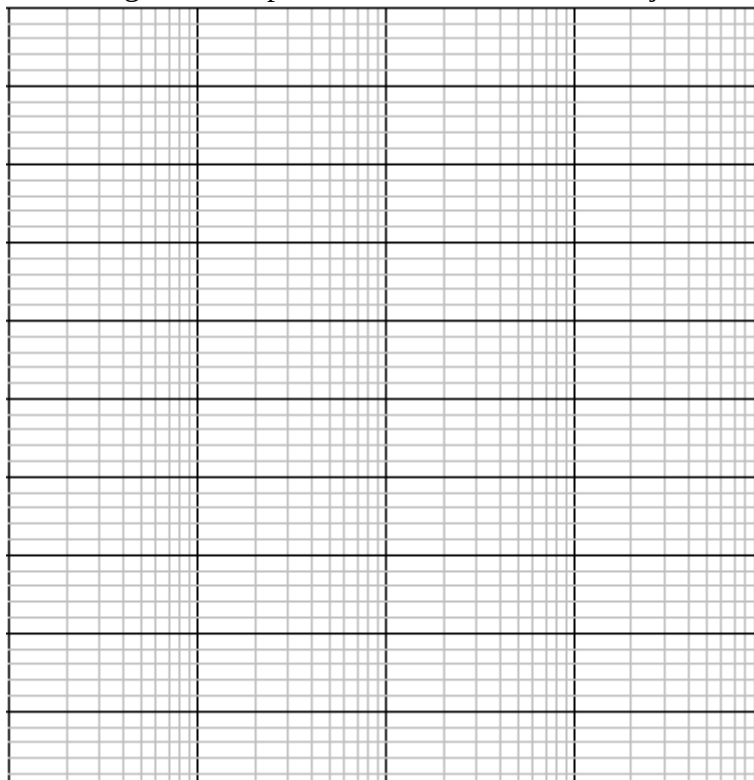
Slika 8. Logaritamski prikaz ovisnosti θ o frekvenciji za otpornik



Slika 9. Logaritamski prikaz ovisnosti θ o frekvenciji za elektrolitski kondenzator



Slika 10. Logaritamski prikaz ovisnosti θ o frekvenciji za blok kondenzator



Slika 11. Logaritamski prikaz ovisnosti θ o frekvenciji za zavojnicu