

11. Mjerenje kapaciteta, induktiviteta i otpora

1. 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 pomoću 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 uvažava parazitske kapacitivnosti, skin-efekt i sl.

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

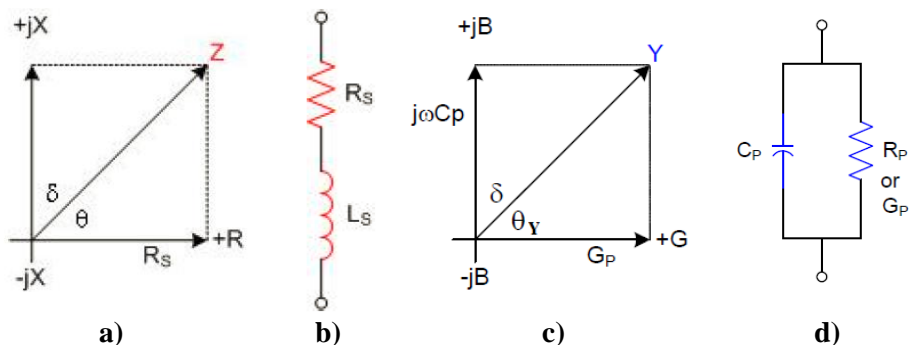
$$|Z(\omega)|_{dB} = 20 \log \frac{|Z(\omega)|[\Omega]}{|Z_B|[\Omega]} \quad [dB] \quad (1)$$

Gdje je $|Z_B|$ bazna ili normirajuća vrijednost. Općenito 0 [dB] odgovara upravo baznoj vrijednosti otpora u $[\Omega]$. U vježbi se koristi bazna impedancija od 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.

1.1. Nadomjesne sheme otpornika

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. U tablici 1. nalaze se pripadne formule za serijsku i paralelnu nadomjesnu shemu otpornika.



Slika 1. Nadomjesna shema otpornika i dijagrami impedancije/admitancije

Tablica 1. Formule za impedanciju nadomjesne sheme otpornika

SERIJA	PARALELA
$Z(\omega) = R_s + j\omega L_s$ $\omega = 2\pi f$	$Y(\omega) = G_p + j\omega C_p$ $ Y(\omega) = \sqrt{G_p^2 + (\omega C_p)^2}$

$ Z(\omega) = \sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2}$ $\varphi(\omega) = \theta(\omega) = \tan^{-1} \frac{\omega L_s}{R_s}$	$\theta_Y(\omega) = \tan^{-1} \frac{\omega C_P}{G_P}$ $Z(\omega) = \frac{1}{Y(\omega)}$ $ Z(\omega) = \frac{1}{ Y(\omega) }$ $\varphi(\omega) = -\theta_Y(\omega)$
---	---

Gdje je:

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

ω – kružna frekvencija ili kutna brzina

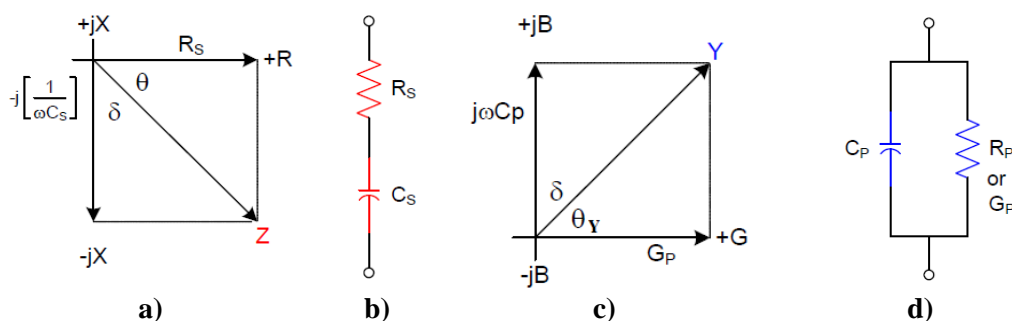
f – frekvencija

$|Z(\omega)|$ – iznos/modul impedancije ovisan o kružnoj frekvenciji

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

1.2. 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 slike 2.a,b) predstavljaju fazorski dijagram i serijsku nadomjesnu shemu, dok su na slikama 2.c,d) prikazani fazorski dijagram i paralelna nadomjesna shema. Vrlo često se za otpor u serijskoj nadomjesnoj shemi koristi termin ESR (engl. equivalent series resistance). U tablici 2. se nalaze se najvažnije formule za serijsku nadomjesnu shemu, dok se formule za paralelnu mogu pronaći u tablici 1.



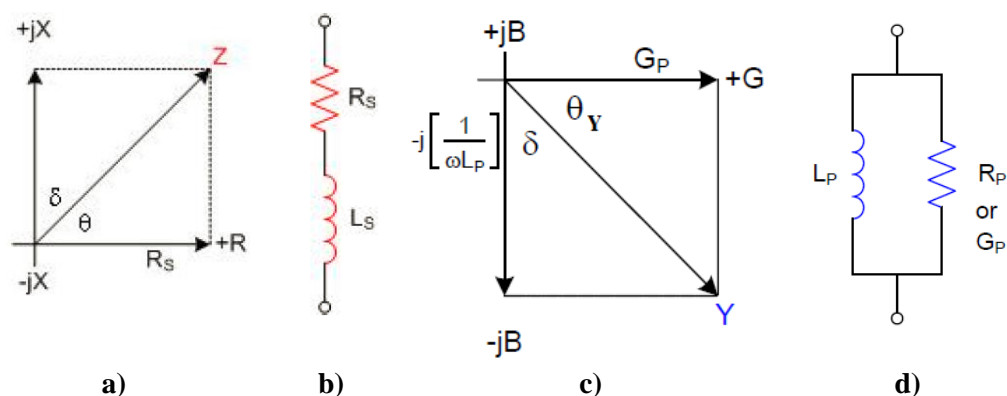
Slika 2. Nadomjesne sheme kondenzatora i dijagrami impedancije/admitancije

Tablica 2. Formule za impedanciju nadomjesnih shema kondenzatora

SERIJA
$Z(\omega) = R_s - j \frac{1}{\omega C_s}$ $ Z(\omega) = \sqrt{R_s^2 + \left(\frac{1}{\omega C_s}\right)^2}$ $\varphi(\omega) = \theta(\omega) = \tan^{-1} \frac{-1}{\omega R_s C_s}$ $= -\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \omega R_s C_s$

1.3. 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 zavojnice bez feromagnetske jezgre ili eventualno s feromagnetskom jezgrom unutar linearnog područja krivulje magnetiziranja. Na slici 3. prikazane su dvije najčešće nadomjesne sheme zavojnica, odnosno slike 3.a,b) predstavljaju fazorski dijagram i serijsku nadomjesnu shemu, dok su na slikama 3.c,d) prikazani fazorski dijagram i paralelna nadomjesna shema. U tablici 3. se nalaze se najvažnije formule za paralelnu nadomjesnu shemu, dok se formule za seriju mogu pronaći u tablici 1.



Slika 3. Nadomjesne sheme zavojnice i dijagrami impedancije/admitancije

Tablica 3. Formule za impedanciju nadomjesnih shema zavojnica

Paralela
$Y(\omega) = G_p - j(\omega L_p)^{-1}$ $ Y(\omega) = \sqrt{G_p^2 + (\omega L_p)^{-2}}$ $\theta_Y(\omega) = \tan^{-1} \frac{-1}{\omega L_p G_p} = -\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \omega L_p G_p$ $Z(\omega) = \frac{1}{Y(\omega)}$ $ Z(\omega) = \frac{1}{ Y(\omega) }$ $\varphi(\omega) = -\theta_Y(\omega)$

2. Pitanja za pripremu

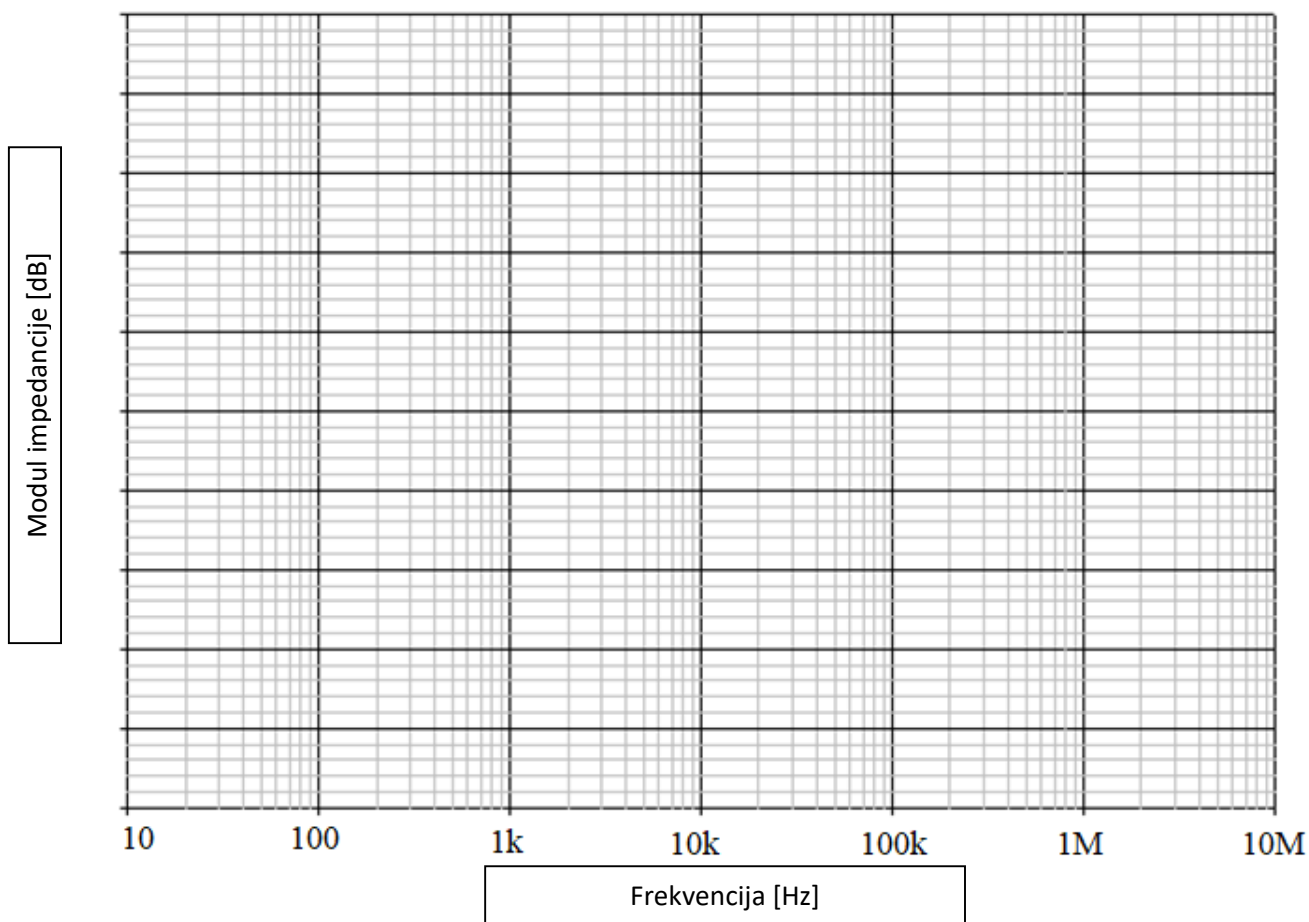
1. Objasniti pojmove:
 - a. Otpornik, otpor, otpornost
 - b. Kondenzator, kapacitet, kapacitivnost
 - c. Zavojnica, induktivitet, induktivnost

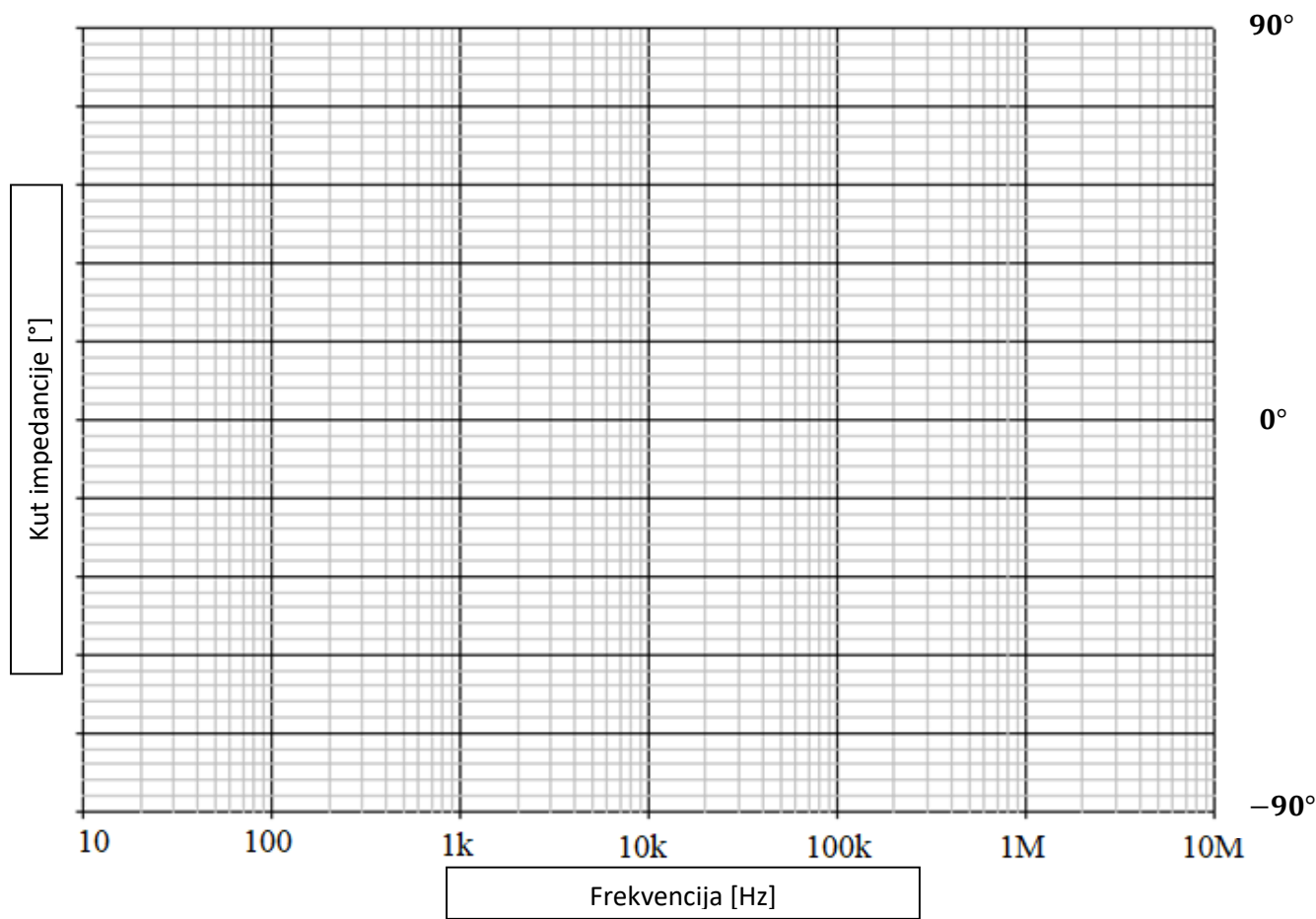
2. Objasniti pojmove: faktor dobrote, kut gubitaka, kut impedancije, kut admitancije...

3. Koliko iznosi faktor dobrote, kut gubitaka, kut impedancije i kut admitancije kod:

- Idealnog otpornika (otpora)
- Idealnog kondenzatora (kapaciteta)
- Idealne zavojnice (induktiviteta)

4. Nacrtajte ovisnost $|Z(\omega)|_{dB}$ i $\varphi(\omega)$ za slučaj serijskog RL spoja, pri čemu je $R = 100 [\Omega]$, $L = 1 [mH]$ i raspon frekvencija od 10 [Hz] do 10 [MHz]. Neka je bazna impedancija 1 $[\Omega]$.





f [Hz]	10	20	100	300	1k	4k	10k	50k	100k	1M	10M
$ Z $ [Ω]											
θ [°]											

(prostor za računanje)

3. Popis opreme

- RLC metar (HAMEG HM8018 RLC), otpornik, blok kondenzator, elektrolitski kondenzator, zavojnica, spojni vodiči

4. Rad na vježbi

Izmjeriti nadomjesne parametre otpornika, kondenzatora i zavojnice pri različitim frekvencijama s pomoću funkcijskog generatora.

4.1. Postupak mjerenja nadomjesnih parametara otpornika

S pomoću RLC metra izmjeriti nadomjesne parametre otpornika ($R_x, L_x, |Z|, \theta$) iznosa nazivnog otpora $R_1 \in [1\Omega, 1M\Omega]$, točnu vrijednost pitati demonstratora/laboranta/nastavnika. Mjerenja je potrebno napraviti pri svim frekvencijama koje RLC metar omogućava.

Tablica 4. Rezultati mjerenja za otpornik

f[kHz]	R_s [_____]	L_s [_____]	R_p [_____]	C_p [_____]	$ Z $ [_____]	θ [°]
0.1						
0.12						
1						
10						
25						

4.2. Postupak mjerenja nadomjesnih parametara kondenzatora

S pomoću RLC metra izmjeriti nadomjesne parametre kondenzatora ($C_x, R_x, |Z|, \theta$) za:

- Elektrolitski kondenzator nazivne kapacitivnosti $C_1 \in [1\mu F, 1mF]$. Uključiti opciju BIAS pri mjerenju parametara elektrolitskog kondenzatora, također pri spajanju paziti na polarizaciju kondenzatora.

Tablica 5. Rezultati mjerenja za elektrolitski kondenzator

f[kHz]	C_s [_____]	R_s [_____]	C_p [_____]	R_p [_____]	$ Z $ [_____]	θ [°]
0.1						
0.12						
1						
10						
25						

- Blok kondenzator nazivne kapacitivnosti $C_2 \in [1nF, 1\mu F]$. Pri mjerenju kapaciteta blok kondenzatora opcija BIAS nije potrebna.

Tablica 6. Rezultati mjerenja za blok kondenzator

f[kHz]	C_s [_____]	R_s [_____]	C_p [_____]	R_p [_____]	$ Z $ [_____]	θ [°]
0.1						
0.12						
1						
10						
25						

4.3. Mjerenje nadomjesnih parametara zavojnice

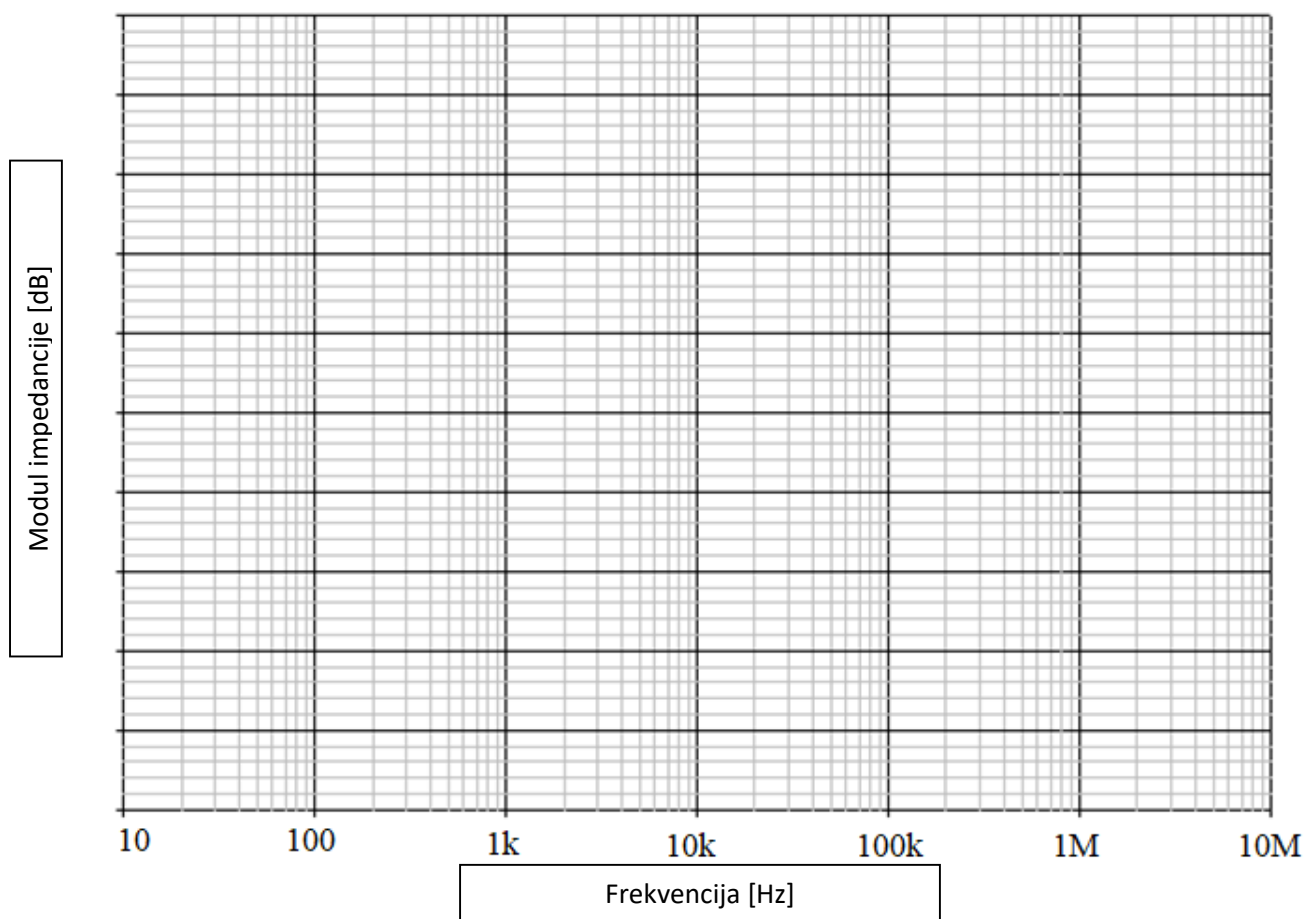
S pomoću RLC metra izmjeriti nadomjesne parametre zračne zavojnice ($R_x, L_x, |Z|, \theta$) iznosa nazivnog induktiviteta $L_1 \in [1\mu H, 10mH]$. Mjerenja je potrebno napraviti pri svim frekvencijama koje RLC metar omogućava.

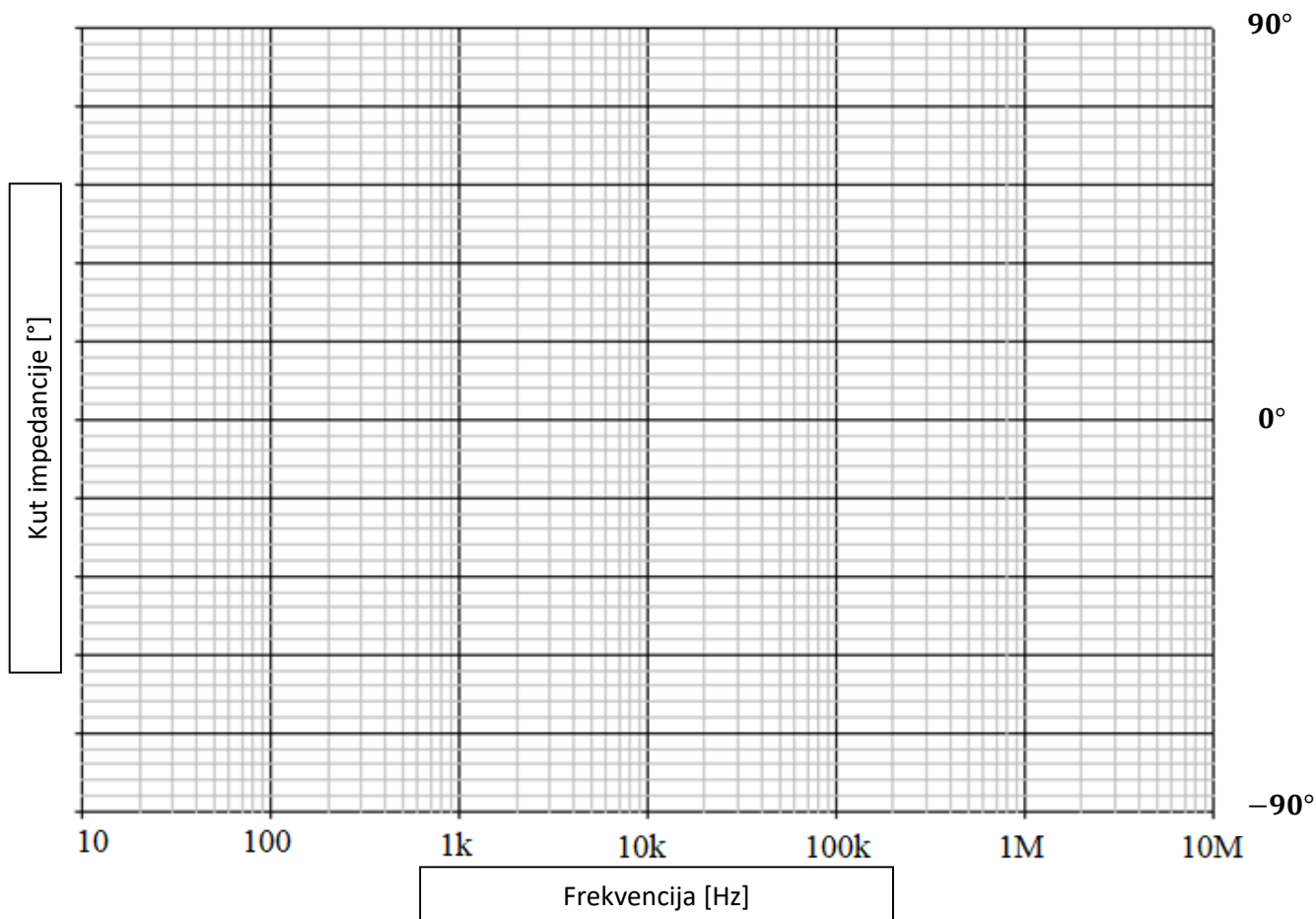
Tablica 7. Rezultati mjerenja za blok kondenzator

f[kHz]	R_s [_____]	L_s [_____]	R_p [_____]	L_p [_____]	$ Z $ [_____]	θ [°]
0.1						
0.12						
1						
10						
25						

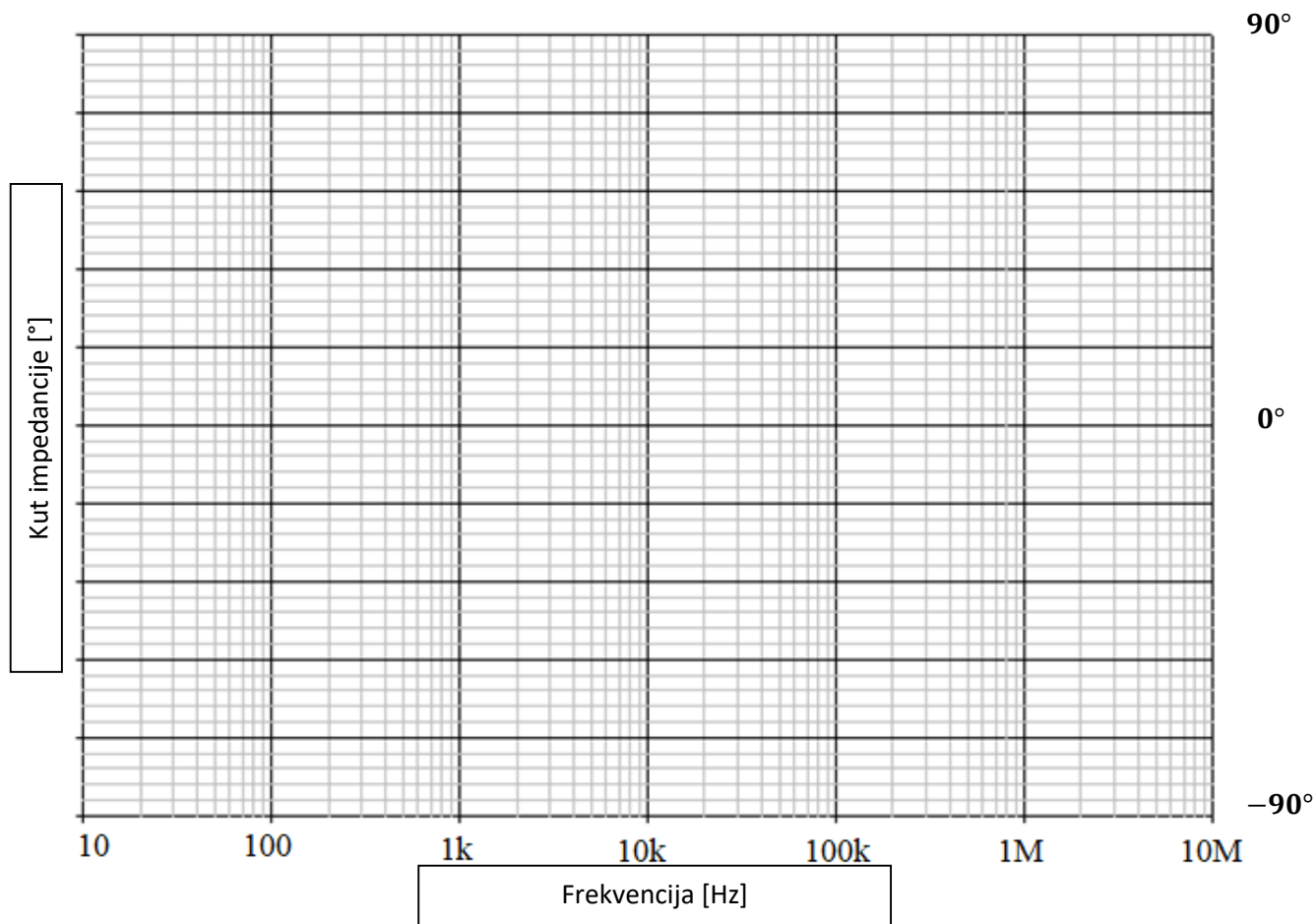
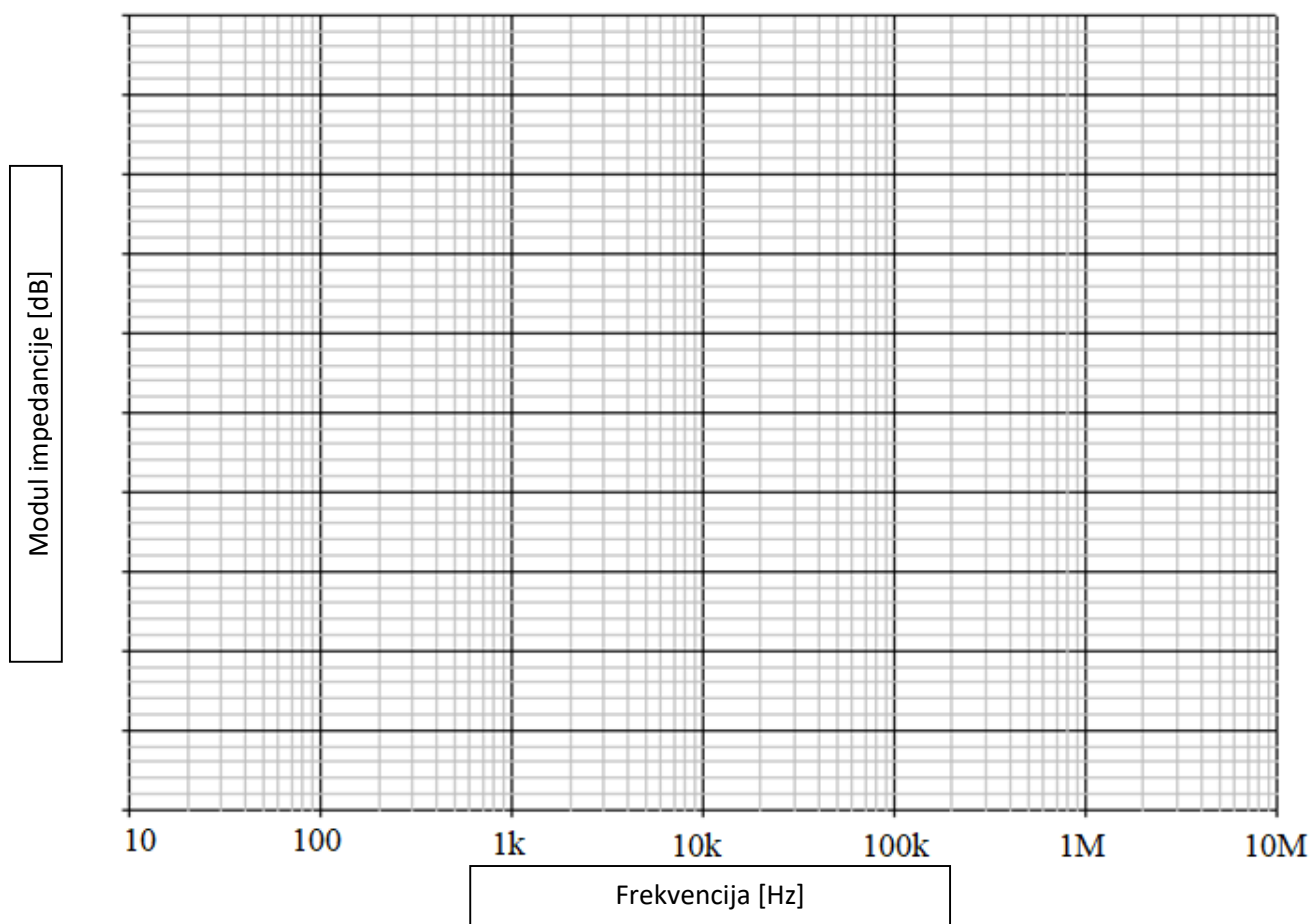
5. Pitanja za izvještaj

- Na temelju izmjerenih vrijednosti nadomjesnih parametara otpornika (tablica 4.) nacrtajte ovisnost modula impedancije $|Z|$ i kuta impedancije θ o frekvenciji. Objasniti kako bi trebale izgledati karakteristike modula i kuta impedancije idealnog otpornika i navesti u kojem rasponu frekvencija dolazi do odstupanja izmjerene karakteristike od idealne.

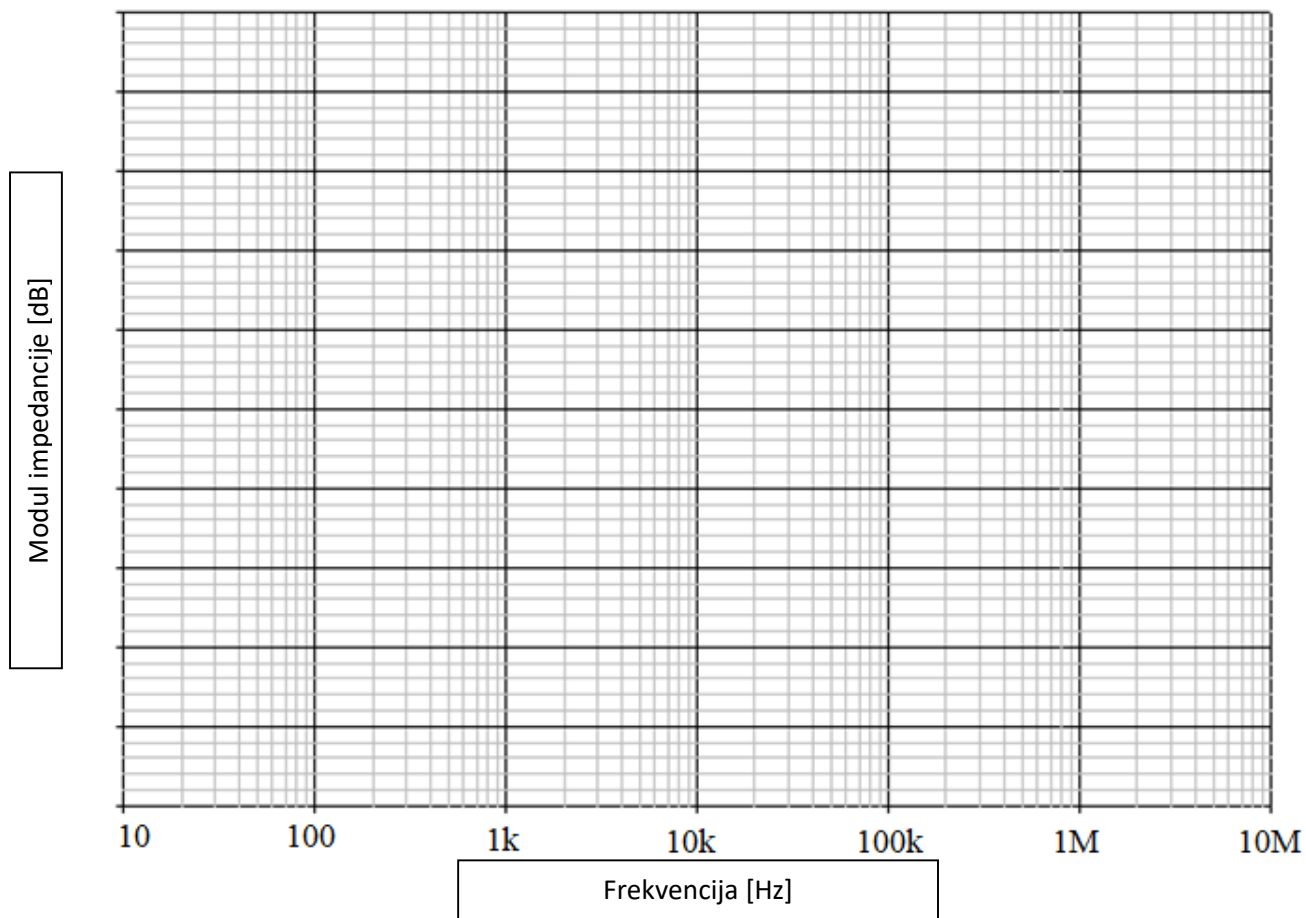


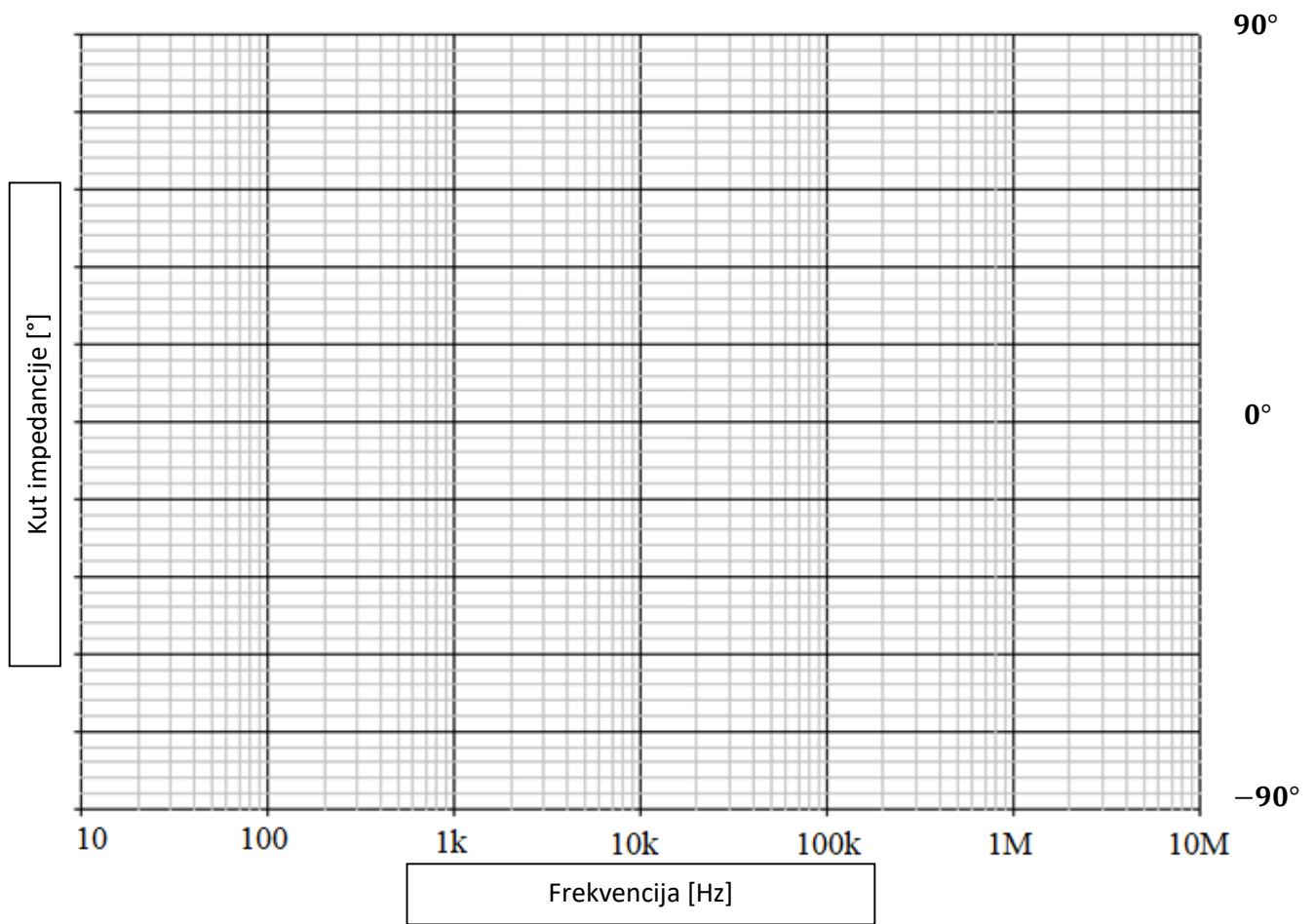


2. Na temelju izmjerenih vrijednosti nadomjesnih parametara elektrolitskog kondenzatora (tablica 5.) nacrtajte ovisnost modula impedancije $|Z|$ i kuta impedancije θ o frekvenciji. Objasniti kako bi trebale izgledati karakteristike modula i kuta impedancije idealnog kondenzatora i navesti u kojem rasponu frekvencija dolazi do odstupanja izmjerene karakteristike od idealne.



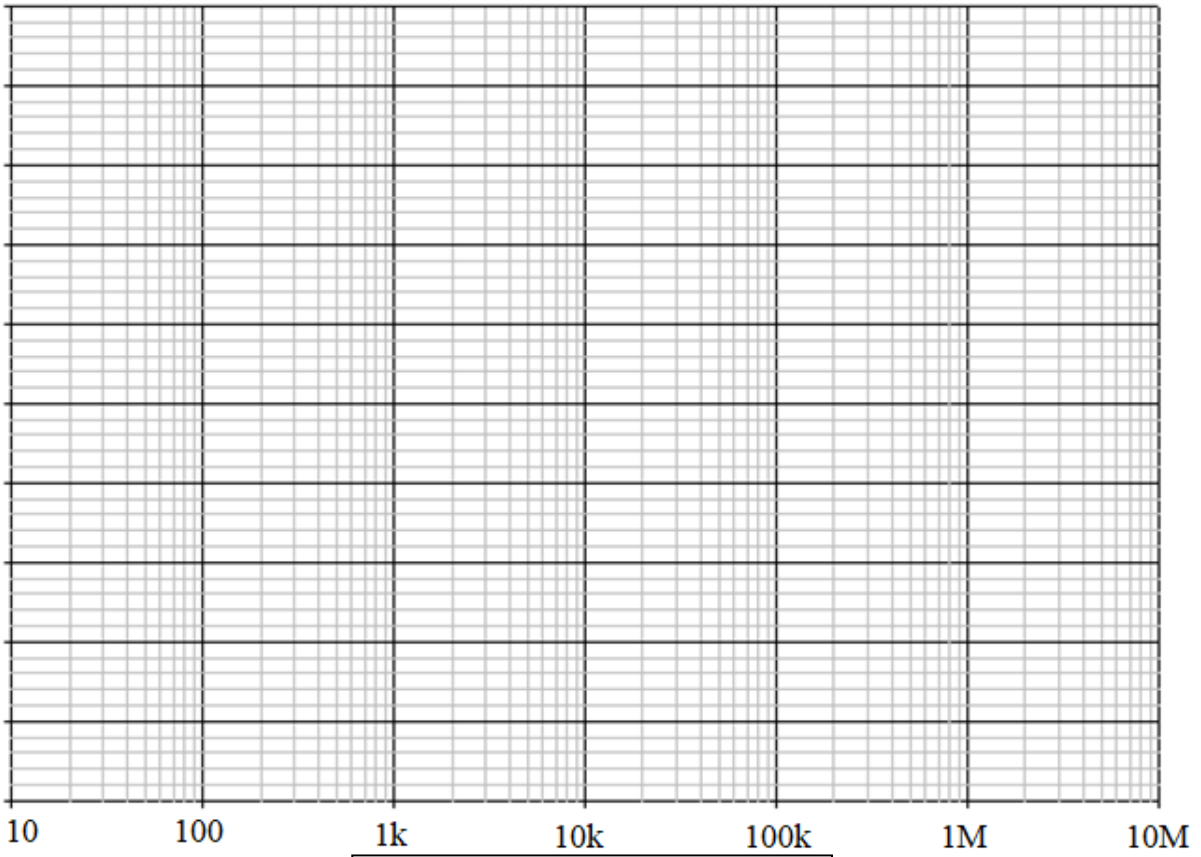
3. Na temelju izmjerenih vrijednosti nadomjesnih parametara blok kondenzatora (tablica 6.) nacrtajte ovisnost modula impedancije $|Z|$ i kuta impedancije θ o frekvenciji. Objasniti kako bi trebale izgledati karakteristike modula i kuta impedancije idealnog otpornika i navesti u kojem rasponu frekvencija dolazi do odstupanja izmjerene karakteristike od idealne.



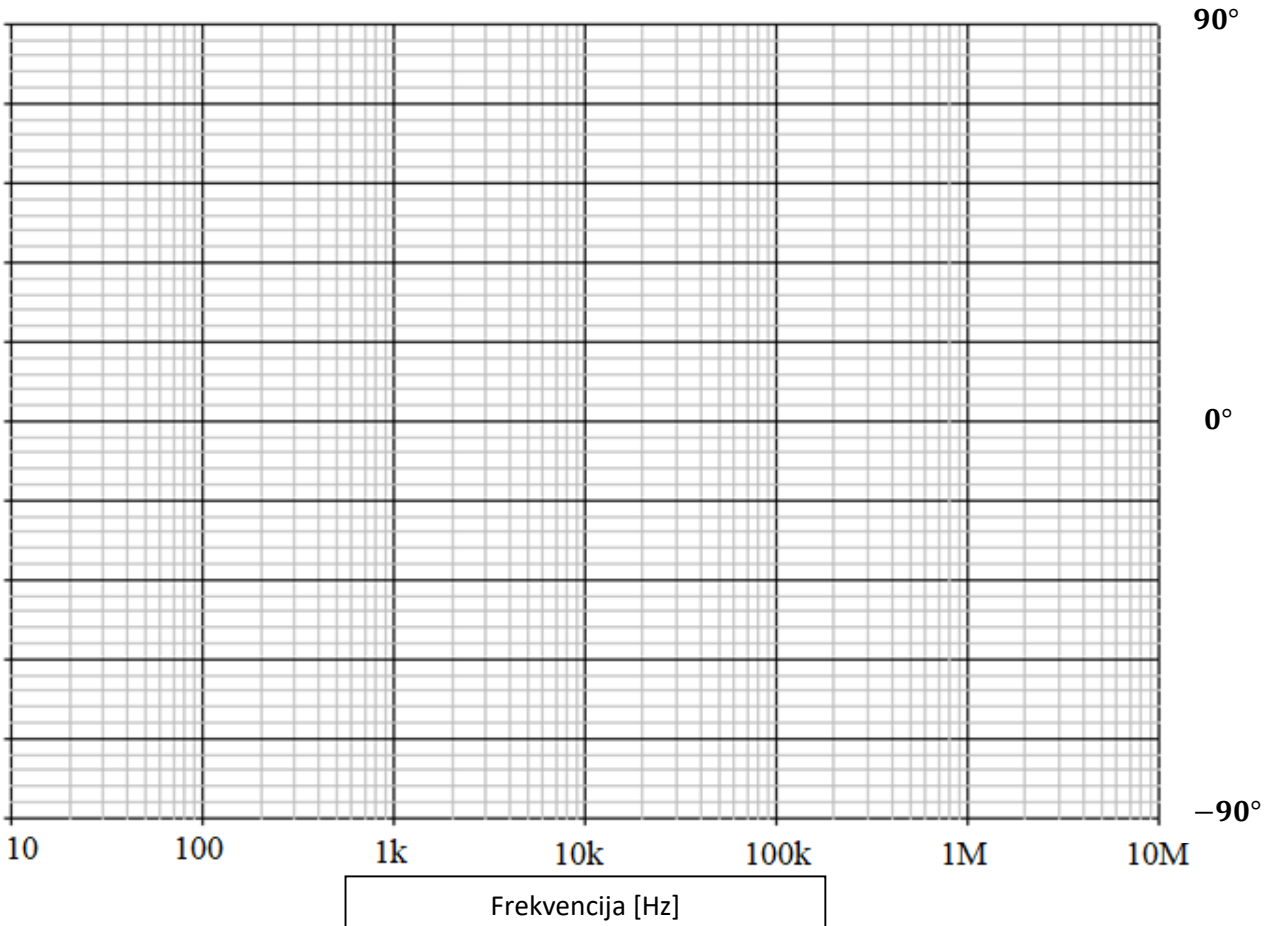


4. Na temelju izmjerenih vrijednosti nadomjesnih parametara zavojnice (tablica 7.) nacrtajte ovisnost modula impedancije $|Z|$ i kuta impedancije θ o frekvenciji. Objasniti kako bi trebale izgledati karakteristike modula i kuta impedancije idealne zavojnice i navesti u kojem rasponu frekvencija dolazi do odstupanja izmjerene karakteristike od idealne.

Modul impedancije [dB]



Kut impedancije [°]



6. Komentari i prijedlozi za poboljšanje vježbi