

4. Merjenje induktivnosti in kapacitivnosti

4.1 Merjenje induktivnosti

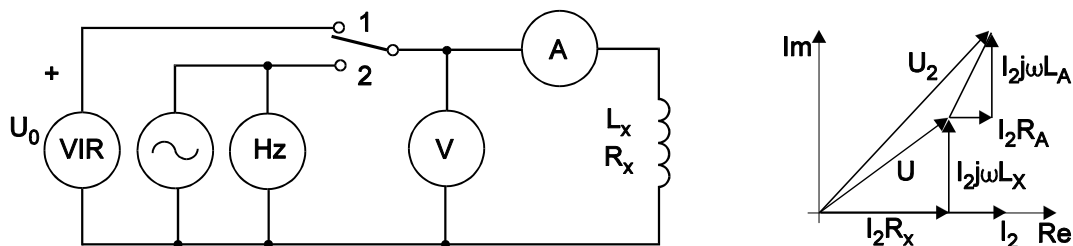
Induktivnost je snovno-geometrijska lastnost prostora, v katerem se sklepa magnetno polje. Za nemagnetne snovi je induktivnost konstantna veličina, za magnetne snovi pa je zaradi spremenljive permeabilnosti $\mu = \mu(I)$ induktivnost funkcija toka magnetenja $L = L(I)$. V tokovni zanki ali tuljavi ima vsaka sprememba električnega toka za posledico spremembo pripadajočega magnetnega pretoka ϕ oziroma magnetnega sklepa ψ . Medsebojno razmerje obeh veličin določa snov v prostoru in oblikovanost prostora, ki ga magnetimo z električnim tokom. Lastna induktivnost tuljave je definirana kot razmerje med magnetnim sklepom ψ in tokom I tuljave. Enota induktivnosti je 1H (henry) = 1 Vs/A.

Induktivnost idealne tuljave je razmerje med napetostjo na tuljavi in odvodom toka po času. Realna tuljava ima poleg induktivnosti še določeno ohmsko upornost (kapacitivnost zanemarimo) in jo predstavljamo z vzporednim ali zaporednim nadomestnim vezjem idealnih elementov, podobno kot realni upor (tabela 3.1). Iz kazalčnega diagrama je razvidno, da lahko v primeru zaporedne nadomestne vezave določimo induktivnost tako, da izmerimo jalovo komponento napetosti, tok in frekvenco. V primeru vzporedne nadomestne vezave pa izmerimo napetost, jalovo komponento toka in frekvenco. V praksi pogosto določamo induktivnost z meritvijo delovne moči, napetosti, toka ter frekvence.

Enačbo za izračun induktivnosti v zaporedni nadomestni vezavi (tabela 3.1.a) pa lahko preoblikujemo v obliko:

$$L_s = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_s^2}, \quad (4.1)$$

torej lahko induktivnost določimo z meritvijo napetosti, toka, frekvence in predhodnim določanjem nadomestne upornosti R_s . Metoda je uporabna v primeru zračnih tuljav brez feromagnetnih jeder, saj je v tem primeru R_s kar enaka ohmski upornosti navitja, ki jo lahko izmerimo z enosmernim tokom, naprimer z U-I metodo. Ta metoda pa ni primerna za določitev L_p , saj R_p ne moremo določiti z enosmernim tokom. V literaturi so ta princip poimenovali *U-I metoda merjenja induktivnosti*. Slika 4.1 prikazuje princip in kazalčni diagram.



Slika 4.1: U-I metoda merjenja induktivnosti in kazalčni diagram

Ko je stikalo v položaju 1, je na tuljavo priključen enosmerni vir in z ampermetrom ter voltmetrom merimo ohmsko upornost navitja tuljave. Z instrumenti izmerjene vrednosti označimo kot U_1 in I_1 . Upornost izračunamo po enačbi:

$$R_x + R_A = \frac{U_1}{I_1} \quad (4.2)$$

V položaju 2 je na tuljavo priključen izmenični vir napetosti sinusne oblike in voltmeter kaže vrednost U_2 , ampermetr pa vrednost I_2 , ki sta narisani v kazalčnem diagramu (Slika 4.1).

Impedanco izračunamo po enačbi:

$$Z = \frac{U_2}{I_2} = \sqrt{(R_x + R_A)^2 + \omega^2 \cdot (L_x + L_A)^2} \quad (4.3)$$

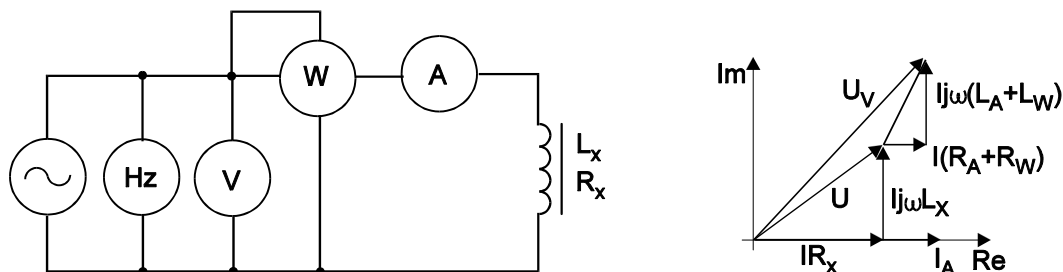
in po kratki izpeljavi induktivnost po enačbi:

$$L_x = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_2}{I_2}\right)^2 - \left(\frac{U_1}{I_1}\right)^2} - L_A \quad (4.4)$$

Pri uporabi U-I metode moramo upoštevati:

- da merimo induktivnost tuljave brez feromagnetnega jedra,
- da instrumenti pravilno merijo enosmerne in izmenične veličine,
- če je induktivnost ampermetra A mnogo manjša od induktivnosti tuljave, lahko zanemarimo induktivnost ampermetra.

Pri merjenju induktivnosti tuljav z železnim jedrom moramo biti pozorni na dodatne ohmske izgube, ki nastanejo pri magnetenju materiala z izmeničnim tokom. Induktivnost izračunamo iz jalove moči, ki jo merimo posredno, z meritvijo navidezne in delovne moči na tuljavi (Slika 4.2).



Slika 4.2: P-U-I metoda merjenja induktivnosti tuljave z železnim jedrom in kazalčni diagram.

Ob upoštevanju vpliva induktivnosti tokovne veje vatmetra L_W in induktivnosti ampermetra L_A je

$$L_x = \frac{\sqrt{(U_V \cdot I_A)^2 - P_W^2}}{\omega \cdot I_A^2} - (L_A + L_W) \quad (4.5)$$

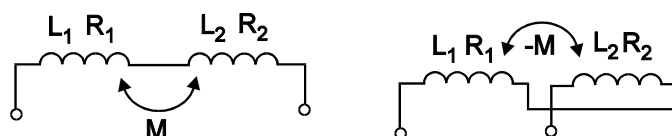
Pri P-U-I metodi moramo upoštevati:

- Nelinearnost zaradi histerezne zanke pri magnetenju materiala. Magnetna gostota B je nelinearno odvisna od jakosti magnetnega polja H in se zato spreminja permeabilnost. To pomeni, da bo induktivnost tuljave z železnim jedrom odvisna od toka pri katerem jo merimo.
- Permeabilnost pa se spreminja tudi z obliko toka magnetenja. Meriti moramo z obliko in velikostjo toka, ki bo enaka toku obratovanja tuljave.
- V primeru male induktivnosti tokovne veje vatmetra in male induktivnosti ampermetra, ju lahko zanemarimo.

Induktivnost merimo tudi z različnimi izmeničnimi mostičnimi vezji, kot so Maxwellov mostič, Maxwell-Wienov mostič, Owenov mostič, Hayov mostič in drugimi, ki jih obravnavamo v poglavju *Merilni mostiči* in v literaturi [1],[2],[5],[6].

4.1.1 Merjenje medsebojne induktivnosti.

Medsebojna induktivnost je razmerje med inducirano napetostjo v enem krogu in časovnim odvodom toka v drugem krogu. Medsebojna induktivnost M je odvisna od vezave tuljav in je lahko pozitivna ali pa negativna. Na osnovi tega lahko določimo medsebojno induktivnost tako, da dvakrat izmerimo skupno induktivnost, vendar drugič obrnemo sponke druge tuljave. Princip je na naslednji sliki.



Slika 4.3: Princip določanja medsebojne induktivnosti M z merjenjem skupne induktivnosti.

V prvem primeru dobimo induktivnost

$$L' = L_1 + L_2 + 2 \cdot M \quad (4.6)$$

v drugem pa

$$L'' = L_1 + L_2 - 2 \cdot M \quad (4.7)$$

in medsebojno induktivnost

$$M = \frac{L' - L''}{4} \quad (4.8)$$

V primeru, da ne moremo obrniti sponk druge tuljave, uporabimo postopke z fluksmetrom, primerjalno metodo in druge, ki jih najdemo v literaturi [1], [3].

4.2 Merjenje kapacitivnosti

Kapacitivnost je snovno-geometrijska lastnost prostora v električnem polju, ki je neodvisna od električnih veličin električnega naboja Q in prenosorazmerne napetosti U med nosilci elektrine (elektrodami) v prostoru. Kapacitivnost se spremeni, če spremenimo geometrijo prostora ali dielektrik med elektrodama. Enota kapacitivnosti je 1F (farad) = 1As/V in predstavlja kapacitivnost, ki bi jo imel kondenzator z elektrino 1As in potencialom 1V med elektrodami.

Kapacitivnost idealnega kondenzatorja je razmerje med tokom in odvodom napetosti na kondenzatorju po času. Realni kondenzator ima zaradi izgub v dielektriku poleg kapacitivnosti še določeno izolacijsko upornost. Zaporedno in vzporedno nadomestno vezje realnega kondenzatorja sta predstavljeni v tabeli 3.1. V nasprotju s tuljavo, kjer razmerje med ohmsko upornostjo in induktivnostjo določa "dobrost" ali faktor kvalitete Q , pa pri kondenzatorju uporabljamo pojem faktor izgub (tudi faktor disipacije d), ki je obratna vrednost faktorja kvalitete Q in jo računamo kot tangens izgubnega kota δ . Za zaporedno nadomestno vezje je

$$\operatorname{tg}\delta = d = \omega \cdot R_s C_s, \quad (4.9)$$

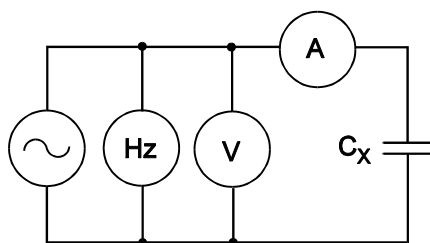
in za vzporedno

$$\operatorname{tg}\delta = d = \frac{1}{\omega \cdot R_p C_p} \quad (4.10)$$

Zaradi odvoda (spremembe) napetosti po času, lahko kapacitivnost merimo z izmeničnim signalom ali pa ob prehodnem pojavu, ko se kondenzator polni ali prazni.

4.2.1 U-I metoda merjenja kapacitivnosti

Slika 4.4 predstavlja princip U-I metode.



Slika 4.4: U-I metoda merjenja kapacitivnosti.

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega \cdot C_x)^2}} = \frac{1}{\omega \cdot C_x} \cdot \sqrt{1 + d^2} \quad (4.11)$$

Pri kvalitetnih kondenzatorjih so izgube zanemarljive in se enačba poenostavi:

$$Z = \frac{1}{\omega \cdot C_x} \quad (4.12)$$

in kapacitivnost izračunamo kot:

$$C_x = \frac{I}{\omega \cdot U} \quad (4.13)$$

Padeč napetosti na ampermetru ni v fazi s padcem napetosti na kondenzatorju in zato prinaša manjši pogrešek kot pri U-I metodi merjenja ohmskih upornosti. Za

razumevanje si narišite kazalčni diagram. Metoda je primerna za merjenje kapacitivnosti z omejeno merilno točnostjo.

Pri večjih zahtevah po točnosti merjenja kapacitivnosti moramo uporabiti mostična vezja (poglavje *Merilni mostiči* in literatura [1],[2],[4]).

4.2.2 Merjenje kapacitivnosti elektrolitskih kondenzatorjev

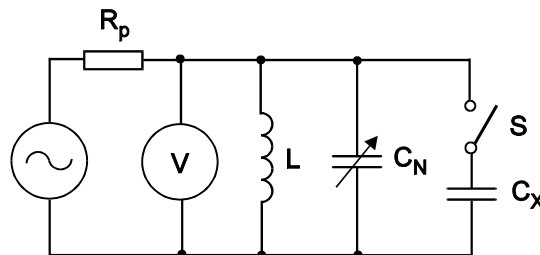
Tudi kapacitivnost elektrolitskih kondenzatorjev merimo z U-I metodo. Pozorni moramo biti le na pravilno napetostno polarizacijo. Ker merimo kapacitivnost z izmeničnim tokom in napetostjo, moramo kondenzator priključiti na enosmerno prednapetost, ki bo večja od amplitude izmeničnega signala. Vsota obeh napetosti ne sme biti večja od nazivne napetosti kondenzatorja.

4.2.3 Resonančna metoda

Za merjenje kapacitivnosti v visokofrekvenčnem področju je zaradi možnega vpliva parazitnih kapacitivnosti najbolj primerna resonančna metoda (Slika 4.5).

Pri odprtem stikalu S poiščemo resonanco nihajnega kroga $L-C_N$. Takrat bo odklon na voltmetru maksimalen. Odčitamo kapacitivnost C_{N1} . Preklopimo stikalo S in s spreminjanjem kapacitivnosti dekade C_N poiščemo resonanco nihajnega kroga $L-C_N | C_X$ in odčitamo kapacitivnost C_{N2} . Neznano kapacitivnost izračunamo po enačbi

$$C_x = C_{N1} - C_{N2} \quad (4.14)$$



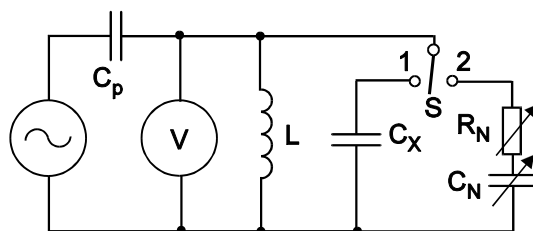
Slika 4.5: Resonančna metoda merjenja kapacitivnosti.

4.2.4 Merjenje izgubnega faktorja kondenzatorja

Izgubni faktor kondenzatorja imenujemo tudi faktor disipacije in ga v primeru zaporednega nadomestnega vezja (tabela 3.1) definiramo kot razmerje padca napetosti zaradi ohmske upornosti kondenzatorja in padca napetosti zaradi kapacitivnosti kondenzatorja. V primeru vzporednega nadomestnega vezja pa definiramo izgubni faktor kot razmerje toka zaradi ohmske upornosti kondenzatorja in toka skozi kapacitivnost.

4.2.5 Resonančna metoda merjenja izgubnega faktorja kondenzatorja

Metoda izhaja iz resonančne metode merjenja kapacitivnosti. Predpostavimo, da imamo realni kondenzator z relativno velikimi izgubami. Vezava je podobna kot na sliki 4.5, le da kapacitivni dekadi, za katero predpostavimo zanemarljive izgube, zaporedno dodamo uporovno dekadno.



Slika 4.6: Resonančna metoda merjenja izgub kondenzatorja

V položaju 1 spreminjamo frekvenco dokler ne dobimo največjega odklona na voltmetru, kar pomeni, da smo poiskali resonančno frekvenco nihajnega kroga L - C_x . V položaju 2, pri nespremenjeni frekvenci, poiščemo resonanco s spreminjanjem kapacitivne in uporovne dekad. Pri tem mora voltmeter pokazati enak odklon. Takrat zaporedna vezava R_N in C_N ustreza zaporedni nadomestni vezavi C_x in R_x s pomočjo katerih lahko izračunamo izgubni faktor:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega_0 \cdot R_x \cdot C_x = \omega_0 \cdot R_N \cdot C_N \quad (4.15)$$

4.2.6 Merjenje izgubnega faktorja kapacitivnega bremena z osciloskopom

Na zaslonu osciloskopa, ki je v x - y načinu delovanja in ko sta na odklonskih ploščah osciloskopa dve fazno premaknjeni napetosti različnih frekvenc, dobimo eno od Lissajousovih krivulj. Oblika krivulje je odvisna od razmerja frekvenc obeh napetosti in faznega kota med njima. Ta princip izkoriščamo za merjenje frekvenc z osciloskopom in za merjenje fazne premaknitve med signali. Pri merjenju izgubnega faktorja vežemo zaporedno k merjencu (neznani impedanci) kapacitivno normalo z zanemarljivim izgubnim kotom. Na y odklonske plošče osciloskopa priključimo napetost na kapacitivni normalo na x odklonske plošče pa negativno napetost na merjencu. Frekvenca obeh padcev napetosti je enaka, le med seboj sta fazno premaknjena. Na zaslonu se pojavi elipsa. Čim večji je fazni kot, tem večja je ploščina elipse. V primeru fazne premaknitve 90° (in enakih napetosti ter ojačenj na osciloskopu), bi dobili na zaslonu krog. Izgubni faktor izračunamo iz ploščine elipse.