

O MJERENJU IMPEDANCIJE

Dr. sc. Dušan Vujević, Zagreb

UDK 621.3.011.21:621.317
PREGLEDNI ČLANAK

U svakom izmjeničnom sklopu, uređaju ili mreži impedancije su osnovne sastavnice. Vrijednosti impedancija i njihovih sastavnica određuju se mjerenjem. Postoji više mjernih metoda na kojima se zasnivaju laboratorijski i komercijalni mjerni uređaji i instrumenti.

Ključne riječi: impedancija, mjerenje impedancije.

1. UVOD

Mjerenje impedancija osim u elektrotehnici obavlja se u elektrokemiji (npr. baterije, elektrokemijski kondenzatori), biologiji i medicini (npr. tkivo), akustici (npr. medij ili površina) itd. I frekvencijski raspon pri kojima se mjere impedancije je vrlo širok, od reda veličine miliherca do reda veličine gigaherca. Razvidno je da se za različite mjerne objekte i frekvencijske opsege trebaju rabiti različite mjerne metode. Takvih metoda ima veliki broj. Stoga će ovdje biti opisane samo metode mjerenja impedancija u elektrotehnici pretežito pri relativno niskim frekvencijama.

U elektrotehnici se impedancijom (prividni otpor), koja se iskazuje u omima (Ω), naziva serijska i/ili paralelna kombinacija realnih ili djelatnih (otpor R) i imaginarnih ili jalovih (reaktancija X) sastavnica (komponenti). Reaktancija X može biti induktivna ($X_L = \omega L$) ili kapacitivna ($X_C = 1/\omega C$), gdje je ω kružna frekvencija. Impedancija se, kao kompleksna veličina, može prikazati u kompleksnoj ravnini vektorom $\underline{Z} = R + jX$ (sl. 1.), ili *modulom* (apsolutni iznos) $Z = |\underline{Z}|$ i *argumentom* φ u obliku: $\underline{Z} = Z \angle \varphi$, $\underline{Z} = Z e^{j\varphi}$, ili rjeđe kao $\underline{Z} = Z \parallel \varphi$, gdje je φ kut vektora \underline{Z} prema realnoj osi. Taj kut je pozitivan ako je reaktancija induktivna, a negativan ako je kapacitivna. Za impedanciju i njezine sastavnice može se pisati: $R = Z \cos \varphi$, $X = Z \sin \varphi$, $Z = (R^2 + X^2)^{1/2}$ i $\varphi = \arctg(X/R)$. Ne valja zaboraviti da je $\underline{Z} = U/I$.

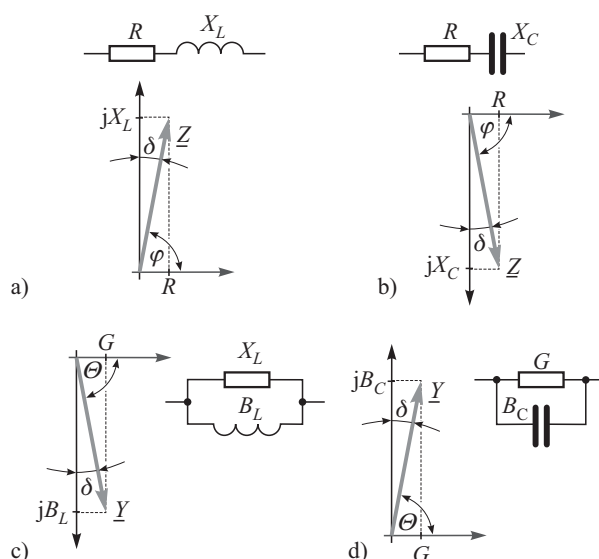
Valja napomenuti da se kompleksne veličine, iskazane vektorima, u literaturi različito označuju. Najčešće se označuju "masnim" (bold) slovima, zatim crticom, točkom, kružićem ili strjelicom iznad, te crticom ispod simbola, a u starijoj literaturi i pisanim velikim slovima [1]. Međunarodna elektrotehnička komisija (IEC) normirala je označivanje crticom ispod simbola [2].

Kada impedanciju čini paralelna kombinacija sastavnica R i X , izraz za \underline{Z} je složeniji, pa se često rabi njezina

recipročna vrijednost, *admitancija* ili *prividna vodljiva vrijednost*, čiji se vektor označuje s \underline{Y} . Admitancija ima dvije sastavnice, *radnu vodljivu vrijednost* ili *konduktanciju* G i *jalovu vodljivu vrijednost* ili *susceptanciju* B , pa je: $\underline{Y} = 1/\underline{Z} = 1/(R + jX) = R/(R^2 + X^2) - jX/(R^2 + X^2) = G + jB = Y \angle \Theta$, odnosno: $G = R/(R^2 + X^2)$, $B = X/(R^2 + X^2)$ i $\Theta = -\varphi$, ili: $G = Y \cos \Theta$, $B = Y \sin \Theta$, $Y = |\underline{Y}| = (G^2 + B^2)^{1/2}$ i $\Theta = \arctg(B/G)$. Također je $\underline{Y} = I/U$.

Admitancija se iskazuje u simensima (S). U anglosaksonskoj literaturi, posebice starijoj, admitancija se iskazuje i u mho (obratno od ohm). Kut Θ je pozitivan ako je susceptancija kapacitivna, a negativan ako je induktivna. Na sl. 1. prikazane su veze između parametara impedancije i admitancije.

Bezdimenzijski *činitelj* (faktor) *dobrote* Q mjera je "čistoće" reaktancije. Činitelj dobrote za svitke je: $Q = X_L/R = B_L/G$.

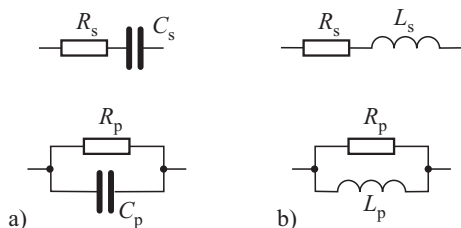


Slika 1. Serijski i paralelni spojevi realnih i imaginarnih sastavnica impedancije i njihovi vektorski prikazi: a) serijski; b) paralelni

Za kondenzatore se definira *činitelj disipacije*: $D = 1/Q$. Simbol D (ili rjeđe DF) najčešće se rabi u anglosaksonskoj literaturi, dok je u europskoj uobičajen naziv *tanges kuta gubitaka* ($\text{tg } \delta$), ili kraće *činitelj gubitaka*, jer je tanges maloga kuta približno jednak tom kutu iskazanom u radijanima. Kut δ komplementaran je kutu φ , odnosno Θ (sl. 1), a vrijede odnosi: $\text{tg } \delta = R/X_L = R/X_C = G/B_L = G/B_C$.

Poželjno je da svici imaju što veći Q , a kondenzatori što manji D , odnosno $\text{tg } \delta$. Npr. etalonski kondenzatori s kremenom (kvarcom) kao dielektrikom imaju činitelj gubitaka približno 10^{-5} pri 1 kHz, a kondenzatori s drugim dielektrikima od 10^{-4} do 10^{-2} . Danas je malo kondenzatora s činiteljem gubitaka većim od $5 \cdot 10^{-2}$.

Pri raščlambi (analizi) sklopova s kondenzatorima često se, za određenu frekvenciju, rabi serijska ili paralelna nadomjesna shema idealnih sastavnica [1][3][4]. Ako se s R_s i C_s označe nadomjesni serijski otpor i kapacitet, a s R_p i C_p paralelni nadomjesni otpor i kapacitet (sl. 2.a), između njih postoje ovi odnosi: $C_s = (1 + \text{tg}^2 \delta) C_p$; $R_s = R_p \text{tg}^2 \delta / (1 + \text{tg}^2 \delta)$; $C_p = C_s / (1 + \text{tg}^2 \delta)$; $R_p = R_s (1 + \text{tg}^2 \delta) / \text{tg}^2 \delta$, gdje je $\text{tg } \delta = \omega R_s C_s = 1/(\omega R_p C_p)$.



Slika 2. Serijski i paralelni nadomjesni spojevi kondenzatora i svitka s gubicima: a) kondenzatora; b) svitka

Isti se postupak primjenjuje i za svitke, kad se s L označuje induktivitet, a s R djelatni otpor. Rabeći iste indekse za serijski i paralelni nadomjesni spoj kao i kod kondenzatora (sl. 2.b), tada između njih vrijede sljedeći odnosi: $L_s = L_p Q^2 / (1 + Q^2)$; $R_s = R_p / (1 + Q^2)$; $L_p = L_s (1 + Q^2) / Q^2$; $R_p = (1 + Q^2) / R_s$, gdje je $Q = \omega L_s / R_s = R_p / \omega L_p$.

U praksi se rabi ona nadomjesna shema koja omogućuje jednostavniju raščlambu mjerne sheme.

2. ZNAČAJKE SASTAVNICA IMPEDANCIJE

Niti jedna sastavnica impedancije nije posve "čista", nego je kombinacija neželjenih djelatnih i reaktivnih dodatnih (parazitskih) sastavnica. To znači da žičani otpornici imaju neželjeni induktivitet namota otporne žice i kapacitete između zavoja te žice i prema okolišu. Kondenzatori pak imaju otpor i induktivitet dovoda i obloga, a svici otpor žice kojom su namotani i kapacitet između zavoja i slojeva žice. Svakoj se sastavnici impedancije može pridijeliti *prava, djelatna* (efektivna) i *mjerena* vrijednost.

2.1. Prava vrijednost

Prava vrijednost sastavnice impedancije najčešće je definirana matematičkim izrazom i u njoj nisu uključene parazitske sastavnice. Tako je npr. prava (elektrostatika ili istosmjerna) vrijednost kapaciteta kondenzatora određena izrazom: $C_0 = \epsilon A/d$, gdje je ϵ dielektrička (permitivna) stalnica (konstanta), A ploština obloga kondenzatora a d razmak između obloga, tj. debljina dielektrika (izolatora). Dielektrička stalnica ϵ umnožak je *apsolutne* dielektričke stalnice (vakuuma) $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m i *relativne* (bezdimenzionalne) dielektričke stalnice ϵ_r . Relativna dielektrička stalnica se može iskazati i omjerom kapaciteta C i C_0 , tj. $\epsilon_r = C/C_0$, gdje je C_0 kapacitet kondenzatora s vakuumom kao dielektrikom, dok je C kapacitet istog kondenzatora s drugim dielektrikom.

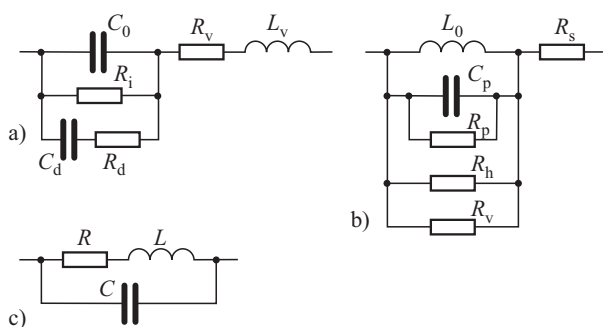
Relativna dielektrička stalnica vakuuma i zraka je 1,00. U suvremenim se kondenzatorima najčešće rabe dielektrici čija je relativna dielektrička stalnica ϵ_r između 2 (npr. teflon) i 11 (npr. tantalov oksid), a neke keramike imaju ϵ_r čak nekoliko tisuća. Valja spomenuti, da stalnica za isti dielektrik može imati vrijednosti u širem ili užem rasponu, npr. od 3,2 do 4,3.

Relativna dielektrička stalnica ϵ_r može se iskazati i u kompleksnom obliku: $\epsilon_r = \epsilon' + j\epsilon''$, gdje realna sastavnica ϵ' pokazuje sposobnost dielektrika da pohrani naboj, a imaginarna sastavnica ϵ'' je mjera (toplinskih) gubitaka u dielektriku. Omjer imaginarne i realne sastavnice je tanges kuta gubitaka, tj. $\text{tg } \delta = \epsilon'' / \epsilon'$. Dielektrička stalnica pokazuje sposobnost tvari da neutralizira dio primijenjenog statičkog električnog polja. To se postiže pomakom naboja u pravcu narinutog polja, tzv. polarizacijom u dielektriku. Polarizacijski mehanizam, kao i relativna dielektrička stalnica, su vremenski, tj. frekvencijski (nelinearno), ovisni. Ukupna polarizacija je rezultat zbroja četiriju vrsta pomaka: orijentacijski (stalni dipoli), ionski, elektronički i interfacijalni (prostorni naboj).

2.2. Djelatna vrijednost

U djelatnoj vrijednosti uključene su i *frekvencijski ovisne* parazitske sastavnice. Na sl. 3.a prikazana je potpuna nadomjesna shema kondenzatora sa svim parazitskim sastavnicama. Elektrostatski ili istosmjerni kapacitet označen je s C_0 . Otpor R_v predočava, redovito vrlo male, otpore dovoda i elektroda kondenzatora, a L_v njihov induktivitet. Pri frekvencijama nižim od 1 kHz utjecaj induktiviteta dovoda do elektroda, pa i samih elektroda, može se zanemariti. Struja I kondenzatora prouzročit će na tom otporu gubitke $I^2 R_v$, koje možemo predočiti kao jednu od sastavnica tangesa kuta gubitaka $\text{tg } \delta_1 = \omega R_v C_0$.

Otpor R_i je izolacijski otpor dielektrika, tj. otpor za istosmjernu struju. Taj otpor, za isti materijal, opada s ploštinom dielektrika, pa ga proizvođači kondenzatora često ne iskazuju izravno nego, prema preporukama



Slika 3. Nadomjesna shema kondenzatora, svitka i otpornika s parazitskim sastavnicama: a) kondenzatora; b) svitka; c) otpornika

EIA (Electronic Industries Association, američka udruga koja izdaje tzv. preporučene norme), kao umnožak kapaciteta C_0 i R_i , tj. u omfaradima (ΩF), npr. 50 000 ΩF . Tako bi kondenzator iskazan s 50 000 ΩF i kapaciteta 2 μF imao izolacijski otpor 25 $G\Omega$, a onaj kapaciteta 1 μF izolacijski otpor 50 $G\Omega$. Granična vrijednost tako izračunatog otpora obično je 100 $G\Omega$. Međutim, kondenzatori s propilenskim dielektrikom mogu imati izolacijski otpor i $10^3 G\Omega$. Gubici u izolacijskom otporu jednaki su U^2/R_i , gdje je U efektivna vrijednost izmjeničnog napona koji je priključen na kondenzator, pa je druga sastavnica tangensa kuta gubitaka: $\text{tg } \delta_2 = 1/(\omega R_i C_0)$. Ti su gubici, u usporedbi s ostalima, vrlo mali.

Dielektrični gubici, čija je teorija prilično složena, treća su sastavnica tangensa kuta gubitaka. Predočuju se serijskom kombinacijom, obično frekvencijski ovisnog, otpora R_d i kapaciteta malog iznosa C_d , odnosno vremenskom stalnicom $R_d C_d$. Vrijednost vremenske stalnice $R_d C_d$ može biti iskazivana u sekundama, satima čak i danima. Približna vrijednost te sastavnice je: $\text{tg } \delta_3 = 1/(\omega R_d C_d)$. Ti su gubici prouzročeni dvjema pojavama: molekularnom polarizacijom i dielektričkom apsorpcijom (interfacijalna polarizacija), koje su izrazitije kod nehomogenih dielektrika.

Dielektrička apsorpcija (dielektrična relaksacija) je pojava zaostalog naboja i s njim povezanog napona na kondenzatoru nakon njegova izboja. Ta je pojava poznata više od sto godina, tijekom kojih se nastojalo prikazati je različitim modelima radi pouzdane raščlambe [5][6][7][8]. Obnova napona na kondenzatoru ovisi o vrsti dielektrika i trajanju izboja, a iskazuje se u postotcima napona nabijanja. Obnovljeni napon mjeri se elektrometrom (ulazni otpor najmanje $10^{10} \Omega$) ili sličnim sklopovima, kroz koje su struje manje od reda veličine 10^{-10} A, a njihova dielektrička apsorpcija, kao i priključnog kabela, zanemariva ili poznata. Tipične vrijednosti obnovljenog napona, ovisno o vrsti dielektrika, u rasponu su od nekoliko promila do nekoliko postotaka napona nabijanja. Tako, npr. nakon izboja kondenzatora s dielektrikom od mylara tijekom 10 sekundi, na njemu se pojavljuje napon čija je

konačna vrijednost približno 0,5 % njegova napona prije izboja, dok kod tinjčevih kondenzatora vrijednost tog napona može biti i do nekoliko postotaka [4].

Pojava zaostalog naboja uzrokuje poteškoće u integritetima, sklopovima za uzorkovanje i pamćenje (sample and hold), U/f pretvornicima itd.

Ukupni činitelj gubitaka je: $\text{tg } \delta = \text{tg } \delta_1 + \text{tg } \delta_2 + \text{tg } \delta_3$. Nadomjesni serijski otpor kondenzatora, koji se kod određene frekvencije može izmjeriti ili izračunati je: $R_s = \text{tg } \delta / \omega C_0$.

Etalonski kondenzatori obično su smješteni u metalna kućišta. Stoga se, osim već spomenutih parazitskih sastavnica, pojavljuju i parazitski kapaciteti između elektroda kondenzatora i kućišta.

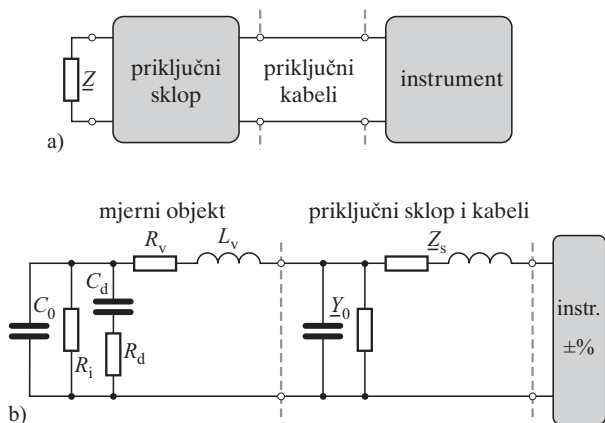
Nadomjesna shema svitka sa i bez feromagnetske jezgre prikazana je na sl. 3.b. S L_0 je označena prava vrijednost induktiviteta svitka, a otpor R_s predočava djelatni otpor svitka. Parazitski kapaciteti između zavoja svitka predočeni su kapacitetom C_p , a gubici u njima otporom R_p . Gubici zbog histereze u feromagnetskoj jezgri predočeni su otporom R_h , a oni od vrtložnih struja (kako u feromagnetskoj jezgri, tako i oni u žici svitka zbog skin efekta i efekta blizine kod visokih frekvencija) otporom R_v . Zbog parazitskih kapaciteta pojavljuje se, kod određenih frekvencija, rezonancija, a zbog otpora R_p i smanjenje činitelja dobrote Q zračnog svitka kod viših frekvencija.

Veći dio preciznih otpornika izrađuje se namatanjem otporne žice na izolacijsko tijelo. Manje precizni otpornici izrađuju se s helikoidnim otpornim slojem na izolacijskom tijelu. Nadomjesna shema takvih otpornika prikazana je na sl. 3.c. Sa L je označen induktivitet namota otpornika, a sa C parazitski kapaciteti između zavoja namota i prema okolišu. Kakvoću otpornika označuje i vremenska stalnica, koja za frekvencije do 20 kHz približno iznosi $\tau = L/R - RC$. Bolji otpornici imaju vremensku stalnicu reda veličine 10^{-7} ili manju.

Iz navedenog slijedi da je u stvarnosti svaka od sastavnica impedancije (R, L, C) sama za sebe impedancija.

2.3. Mjerena vrijednost

Mjerena vrijednost impedancije je ona dobivena mjernim sklopom, instrumentom ili uređajem koji, u pravilu, ima neku pogrešku. Mjereni objekt se obično spaja na mjerilo (mjerni sklop, instrument) prikladnim priključnicama koje se nalaze na samom mjerilu. Priključnice mogu biti i kabelom povezane s mjerilom (sl. 4.a). Za različita frekvencijska područja postoje odgovarajuće vrste priključnica. Tako npr. prikladnom priključnicom-sondom na kabelu mogu se mjeriti parametri elemenata koji su zalemljeni na tiskanoj pločici. Priključnice, bez obzira na vrstu, također imaju parazitske sastavnice, pa one s pogreškom mjernog sklopa bitno utječu na nesigurnost izmjerene vrijednosti. Na sl. 4.b prikazana je nadomjesna shema sklopa pri mjerenju kapaciteta kondenzatora.



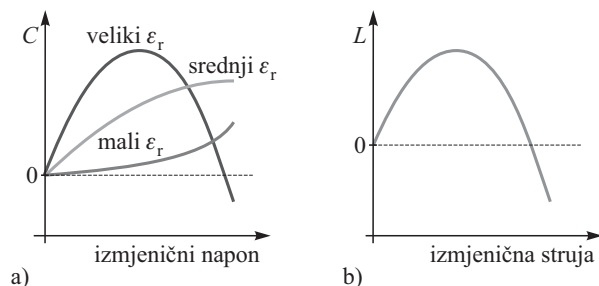
Slika 4. Spoj mjerene impedancije i instrumenta: a) blok shema mjernog sklopa; b) nadomjesna shema mjernog sklopa za mjerenje kapaciteta

Pri mjerenju valja smanjiti ili posve otkloniti utjecaj parazitskih sastavnica i stranih magnetskih polja. Parazitski kapaciteti se otklanjaju, smanjuju ili određuju prikladnim razmještajem sastavnica mjernog sklopa i oklapanjem neferomagnetskim metalom. Zaštitu od stranih magnetskih polja pružaju jednoslojni ili višeslojni oklopi od mekih feromagnetskih materijala, npr. permaloja. Pritom se mora paziti da oklop ne utječe na parametre mjerene impedancije.

2.4. Utjecajne veličine

Na mjerenu vrijednost impedancije utječu frekvencija, razina mjernog signala, temperatura itd. Stoga se o tome mora pri mjerenju voditi računa. Tako, npr. kod visokoomskih otpornika, zbog utjecaja parazitskog kapaciteta koji je paralelan otporu, impedancija te kombinacije opada s porastom frekvencije priključenog napona, dok zbog parazitskog induktiviteta impedancija kombinacije raste.

Pri mjerenju se na impedanciju mora priključiti neki izmjenični signal (napon ili struja). Mjerni rezultat može ovisiti i o razini signala. Npr. kod keramičkih kondenzatora vrijednost njihova kapaciteta se mijenja s veličinom



Slika 5. Ovisnost vrijednosti impedancije o raznim parametrima: a) ovisnost kapaciteta keramičkih kondenzatora o vrijednosti priključenog izmjeničnog napona; b) ovisnost induktiviteta svitka s feromagnetskom jezgrom o struji kroz svitak

priključenog izmjeničnog napona, ovisno o dielektričkoj stalnici keramike (sl. 5. a). Kapaciteti tih kondenzatora ovisni su i o istosmjernom prednaponu ako je on priključen. Induktivitet svitka s feromagnetskom jezgrom ovisan je o veličini struje kroz svitak (sl. 5. b).

Temperaturnu ovisnost pokazuju sve impedancije (npr. temperaturna ovisnost kapaciteta kondenzatora je, najčešće, razmjerna vrijednosti ϵ_r), a neke od njih i ovisnost o vlazi, magnetskim poljima, vibracijama ili vremenu (starosti) itd. Ovisnost može biti linerana ili nelinearna. Stoga se pri njihovoj uporabi, a i mjerenju mora tome posvetiti posebna pozornost.

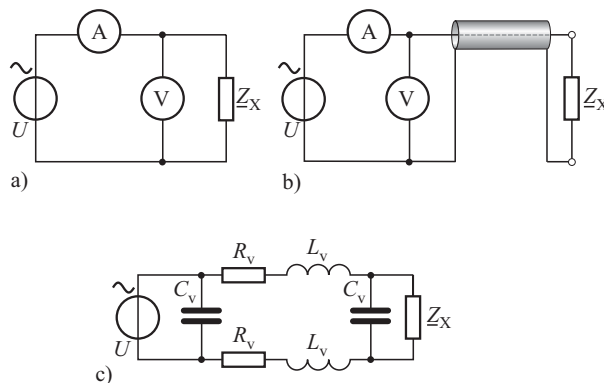
3. METODE ZA MJERENJE IMPEDANCIJE

Za mjerenje impedancije odabiru se obično one metode kojima se mogu odrediti obje sastavnice, realna i imaginarna. U mjeriteljskim i drugim laboratorijama u tu su se svrhu desetljećima rabile i još uvijek rabe različite metode, kao npr. *UI*, usporedbeno, one temeljene na već stoljetnom Wheatstoneovom mostu itd. Pojedine od ovih metoda imaju složene inačice za određeni mjerni opseg i mjernu nesigurnost. Zbog obilja tih metoda bit će spomenute samo osnove onih koji se najčešće rabe u prosječnim laboratorijama i u komercijalnim izvedbama mjerila [4][9][10], jer one koje se rabe u vrhunskim mjeriteljskim laboratorijama često su unikatne.

3.1. UI metoda

Najjednostavniji način određivanja nepoznate impedancije je mjerenje struje kroz impedanciju prikladnim ampermetrom i pada napona, koji ta struja na njoj izaziva, prikladnim voltmetrom (sl. 6. a). Na toj osnovi rade i mnogi komercijalni instrumenti. Modul mjerene impedancije je: $Z_x = U/I$. Sigurne postotne granice pogrešaka mjerene impedancije određuju se iz zbroja pogrešaka upotrijebljenih instrumenata.

Na nesigurnost mjerenja utječu i parazitske sastavnice mjernog spoja. Ako se rabe neoklopljeni vodiči parazitski kapaciteti između njih su promjenljivi i ovisi o međusobnom položaju tih vodiča, pa i samog mje-



Slika 6. UI metoda: a) shema mjernog sklopa; b) spoj mjerene impedancije suosnim kabelom; c) nadomjesna shema

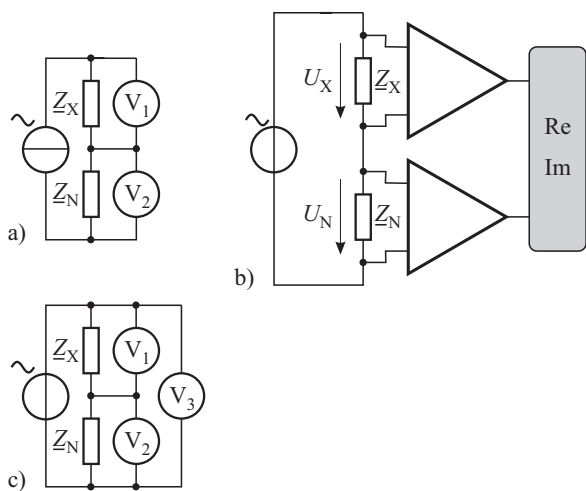
ritelja. Rabe li se suosni (koaksijalni) kabeli za spajanje mjerene impedancije i sklopa (sl. 6.b), dobiva se nadomjesna shema s praktički nepromjenljivim sastavnicama (sl. 6. c). Otpori $R_v = IR/2$, kapaciteti $C_v = IC/2$, induktiviteti $L_v = IL/2$ mogu se izračunati iz podataka za R, L i C kabela iskazani po metru njegove duljine l . Redovi veličina sastavnica za kabel, npr. valne impedancije 50Ω , su: $R = 10 \text{ m}\Omega/\text{m}$, $L = 100 \text{ nH}/\text{m}$ i $C = 0,1 \text{ nF}/\text{m}$. Parazitske sastavnice utječu na frekvencijsku ovisnost kapaciteta i činitelja gubitaka.

Rabe se trožični i peterožični spojevi sa suosnim kablama. Njihove nadomjesne sheme su složenije.

3.2. Usporedbena metoda

Ova se metoda zasniva na mjerenju padova napona U_1 i U_2 , voltmetrima V_1 i V_2 koje stalna struja I stvara na serijski spojenim impedancijama Z_N i Z_x (sl. 7. a). Iz tih podataka može se odrediti impedancija: $Z_x = Z_N(U_1/U_2)$.

Sastavnice mjerene impedancije ne mogu se izravno odrediti. Međutim ako se upotrijebe prikladni elektronički sklopovi ili mikroprocesor mogu se dobiti realne i imaginarne sastavnice mjerene impedancije. Načelna blok shema jednog takvog sklopa prikazana je na sl. 7. b.



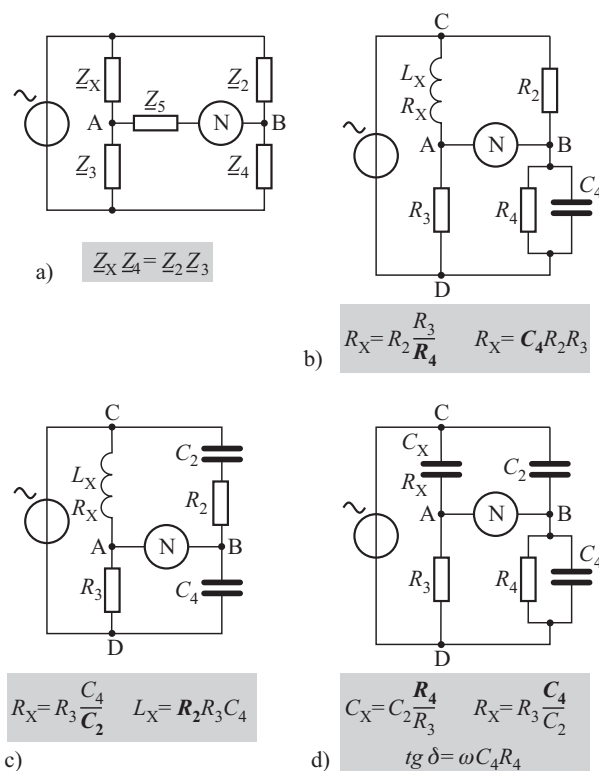
Slika 7. Usporedbena metoda: a) načelna shema; b) shema s elektroničkim sklopovima; c) metoda triju voltmetara

Jedna od inačica te metode je ona triju voltmetara (sl. 7. c). Mjerenjem padova napona U_1, U_2 i U_3 , voltmetrima V_1, V_2 i V_3 velikog unutarnjeg otpora, može se osim modula impedancije $Z_x = R_N U_1/U_2$ odrediti i fazni kut: $\cos \varphi = (U_3^2 - U_1^2 - U_2^2)/(2U_1 U_2)$. S prikladnim digitalnim voltmetrima ovom se metodom postiže, pri nižim frekvencijama, relativna mjerna nesigurnost reda veličine 10^{-6} .

3.3. Mosne metode

Wheatstoneovim mostom naziva se električni sklop s četiri grane (sl. 8. a). U jednoj je grani mjerena, a u ostale tri grane su poznate impedancije. U jednu od tzv.

dijagonala spaja se izvor napona, npr. oscilator, a u drugu osjetljivi instrument, tzv. nulinstrument N impedancije Z_5 . Nulinstrument je u pravilu analogni i najčešće elektronički. Elementi u granama s poznatim impedancijama ručno se ugađaju dok se ne izjednače potencijali točaka A i B, tj. dok nulinstrument ne pokaže minimum (ako nisu uklonjene smetnje) odnosno ništicu. To se naziva ravnotežom mosta. Tada je zadovoljen uvjet ravnoteže: $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$. Ako se u ovu jednadžbu uvrsti $Z_1 = R_1 + jX_1$ itd. i odvoje realni dijelovi od imaginarnih dobit će se dvije jednadžbe: $R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3$ i $R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2$. Napišu li se impedancije u obliku: $Z = Z e^{j\varphi}$ i uvrste u jednadžbu ravnoteže mosta, dobivaju se opet dvije jednadžbe: $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ i $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$, gdje su $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ i φ_4 fazni kutovi impedancija u odgovarajućim granama mosta. Stoga u izmjeničnim mostovima valja ugađati najmanje dva elementa. Ako je mjerena impedancija u prvoj grani tada je $Z_1 = Z_2 Z_3 / Z_4$. Zamijene li se mjesta nulinstrumenta i izvora uvjeti ravnoteže mosta ostaju nepromijenjeni.



Slika 8. Mosne metode: a) izmjenični Wheatstoneov most; b) Maxwellov most; c) Owenov most; d) Scheringov most

Ugađanje ravnoteže mosta može potrajati deset i više minuta, ako ono nije neovisno. Neovisno se može ugađati, ako se pri naizmjeničnom ugađanju dvaju elemenata mosta radi postizanja ravnoteže, ugađanjem jednog elementa mosta ne razugodi stanje u mostu dostignuto ugađanjem drugog elementa. Koje elemente valja ugađati da se postigne neovisnost vidi se iz jednadžbi uvjeta ravnoteže za svaki most. Naime, valja

ugađati onaj element čija se veličina nalazi u izrazu za realnu sastavnicu impedancije, a ne nalazi se u izrazu za imaginarnu sastavnicu i obratno. U jednadžbama ravnoteže mostova ovdje su, uz pripadne sheme, simboli tih elemenata označeni "masno" (bold). Uz posebne uvjete, neovisno ugađanje može se postići i drugim elementima u mostu.

Fazno osjetljivim nulinstrumentima može se ugoditi ravnoteža mosta u vrlo kratkom vremenu, praktički u dva koraka, jer se na njima može pratiti tijek ugađanja, tj. ugađanje koje od sastavnica (realna ili imaginarna) približava most ravnoteži. Poželjno je da nulinstrument bude osjetljiv samo na frekvenciju izvora napajanja mosta (frekvencijski selektivni nulinstrument), jer se njime može ugoditi ravnoteža unatoč utjecaja stranih polja čija je frekvencija različita od frekvencije napajanja.

Iz poznatih vrijedosti elemenata mosta određuju se realna i imaginarna sastavnica mjerene impedancije. Od desetak različitih izmjeničnih mostova na sl. 8. prikazani su Maxwellov (sl. 8.b) i Owenov most (sl. 8.c) za mjerenje induktiviteta (međuinduktivitet se određuje iz dva mjerenja induktiviteta serijski spojenih svitaka, jednom da im se tokovi potpomažu a drugi puta da su suprotni, pa je $M = (L_1 - L_2)/4$) te Scheringov most (sl. 8.d) za mjerenje kapaciteta i činitelja gubitaka. Potonji je naročito prikladan za mjerenje na elektroenergetskoj opremi i ispitivanje izolacijskih materijala pri naponima čak do 1 MV, frekvencije 50 Hz ili 60 Hz.

Pri naponima višim od 2 kV, elementi prve i druge grane Scheringova mosta prostorno su udaljeni od donjih grana i povezani s njima oklopljenim kabelima čije duljine, razmjerno visini napona napajanja, dosežu i 20 m. U drugoj grani, pri naponima napajanja do uključivo 2 kV, rabe se zračni etalonski kondenzatori kapaciteta od 100 pF do 10 nF, a pri višim naponima tlačni etalonski kondenzatori kapaciteta 50 pF, 100 pF ili 1 nF. S velikim reaktancijama u prvoj i drugoj grani (C_x i C_2), unatoč visokom naponu napajanja mosta, točke A i B su na relativno niskom potencijalu prema Zemlji, pa je za mjeritelja bezopasno ručno ugađanje elemenata u trećoj i četvrtoj grani mosta. Kapaciteti kabela koji povezuju gornje grane s donjima utječu na uvjete ravnoteže, pa ih valja uzeti u obzir pri određivanju činitelja gubitaka.

Važno je napomenuti da ravnoteže ovih, ali i nekih drugih mostova, *ne ovise* o frekvenciji izvora napajanja, što čini izvedbu mosta jednostavnijom i jeftinijom.

Na ravnotežu mosta utječu parazitski kapaciteti između elemenata mosta te između njih i okolnih predmeta te Zemlje, kao i strana magnetska polja. Prikladnim oklapanjima elemenata mosta i njihovim prostornim razmještanjem te drugim zahvatima, mogu se parazitski kapaciteti između elemenata mosta i oklopa odrediti i uzeti ih u račun, ili otkloniti njihov utje-

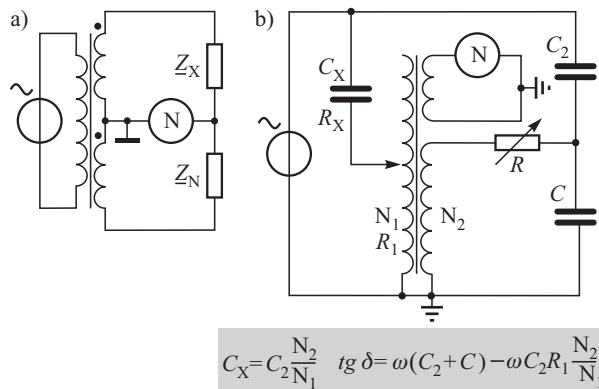
čaj tako da su spojeni paralelno izvoru napajanja. To vrijedi ako je uzemljena jedna od točaka A, B ili D. Oklapanje može biti potpuno, što je rijetko, ili djelomično.

Granice pogrešaka mjerenja nepoznate impedancije ovise o granicama pogrešaka poznatih elemenata u mostu, te osjetljivosti mosta (nesigurnost zbog neosjetljivosti mosta). Osjetljivost mosta je funkcija osjetljivosti nulinstrumenta, napona na mostu i vrijednosti elemenata mosta. Uz optimalno poduzete mjere zaštite od parazitskih veličina, mostovima se mogu postići relativne mjerne nesigurnosti reda veličina do 10^{-7} .

3.4. Transformatorski mostovi

Uporaba transformatorskih mostova počela je početkom pedesetih godina dvadesetog stoljeća. Osnovica tih mostova je induktivni transformator s dva ili više namota na toroidnoj, visoko permeabilnoj jezgri. Načelna shema transformatorskog mosta prikazana je na sl. 9. a. Namoti transformatora čine dvije grane mosta, a u ostale dvije grane nalaze se poznata impedancija Z_N i mjerena impedancija Z_x . Ravnoteža mosta postiže se ugađanjem broja zavoja N_1 i/ili N_2 , pa je: $Z_x = Z_N N_1 / N_2$.

Postoji vrlo veliki broj inačica transformatorskih mostova. Jedna od poznatijih je Glynnov most (sl. 9. b), koji se često rabio umjesto Scheringova mosta.



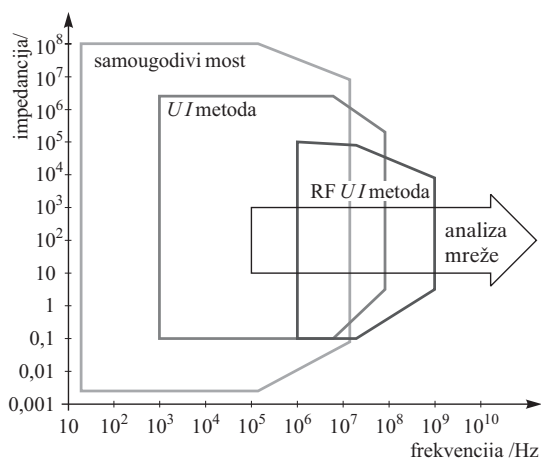
Slika 9. Transformatorski mostovi:
a) načelna shema; b) Glynnov most

Osnovni uzroci pogrešaka kod ovih mostova su djelatni otpori i rasipne reaktancije namota transformatora, te parazitski kapaciteti između zavoja i slojeva namota. Vrlo pažljivom izvedbom transformatora i prikladnim oklapanjima, može se ovim mostovima, pri mjerenju kapaciteta, u vrhunskim mjeriteljskim laboratorijima, postići relativna mjerna nesigurnost reda veličine 10^{-7} . Nesigurnost određivanja činitelja gubitaka u svim mostovima reda su veličine od 10^{-2} do 10^{-4} . U pravilu, svim metodama, nesigurnost određivanja činitelja gubitaka (i činitelja dobrote) je veća, što je on manji.

4. KOMERCIJALNI SUVREMENI MJERNI INSTRUMENTI

Suvremenih instrumenata za mjerenje impedancije ima veliki broj, od onih jednostavnih za npr. mjerenje impedancije voda za par stotina US\$ do vrlo složenih za više tisuća US\$. Mogu se podijeliti na one s ručnim ugađanjem tzv. klasični instrumenti, najčešće mostovi, zatim na one s ručnim ugađanjem i ugrađenim mikroprocesorom koji izračunava pojedine sastavnice mjerene impedancije te automatske. Automatska mjerila, unutar nekoliko sekundi, desetinki sekundi ili čak kraće, pri odabranoj frekvenciji i razini napona na mjerenom objektu, određuju dvije ili više veličina mjerene impedancije: $Z, \varphi, Y, R, X, B, G, Q, D, C_s, C_p$,

L_s, L_p itd. Ti i drugi podaci (npr. napon i frekvencija priključeni na ispitivani objekt) pojavljuju se na digitalnom prikazniku (zaslonu, displeju) instrumenta, a granice su im pogrješaka, ovisno o frekvenciji i vrsti instrumenta, većinom od $\pm 0,01\%$ do $\pm 10\%$. U nekima se može programirati i do nekoliko tisuća različitih ispitnih frekvencija, a preko serijskog pristupnog sklopa (RS-232) može se priključiti računalo s tiskaljkom za ispis mjernih rezultata. U tim se, suvremenim, mjerilima, koja se ovisno o radnom frekventijskom opsegu, nazivaju mjerilima impedancije, analizatorima mreže i LCR ili C mjerilima, danas najčešće rabe: samougodivi most, UI metoda, radiofrekvencijska UI metoda (RF UI) i analiza mreža. Rabi se i metoda rezonancije, iako je ona prvenstveno predviđena za određivanje činitelja dobrote Q . Koji će se instrument rabiti ovisi o frekventijskom pojasu i opsegu vrijednosti mjenjenih impedancija te granicama pogrješaka. U jednim mjerilima se rabi samo jedna frekvencija, u drugima više stalnih frekvencija ili relativno široki pojas frekvencija koje se mogu ugađati. Na sl. 10. grafički je, prema dostupnim podacima proizvođača mjerila, prikazano približno područje uporabe pojedinih metoda [10]. Izvedbe instrumenata pojedinih proizvođača međusobno se razlikuju, pa će se opisti samo načela.

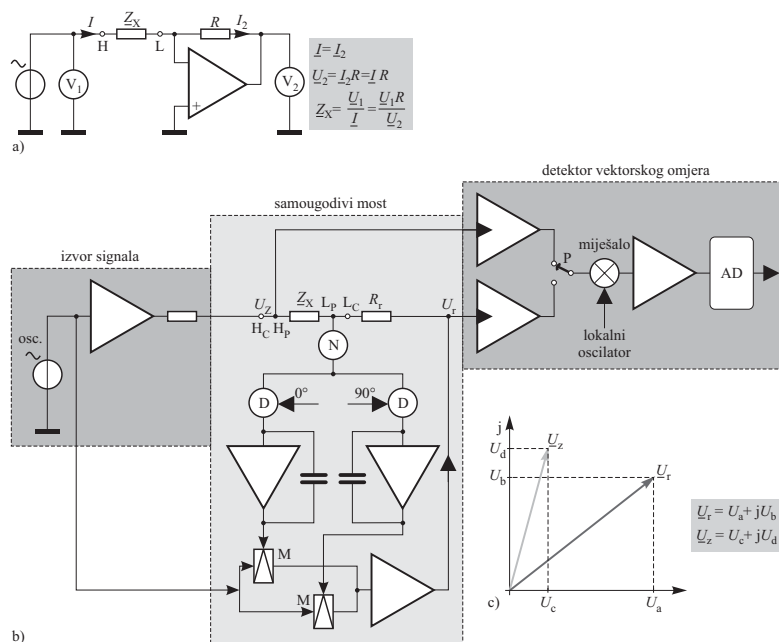


Slika 10. Grafički prikaz mjernih opsega raznih metoda u komercijalnim mjerilima impedancije

4.1. Samougodivi most

Načelna blok shema analognog dijela samougodiva mosta prikazana je na sl. 11.a. Valja spomenuti da se sheme pojedinih izvedbi tih mostova razlikuju.

Struja I iz oscilatora koji je nadziran kremenom (kvarcom), čiji se napon U_1 na priključnici H (high) mjeri voltmetrom V_1 , teče mjerenom impedancijom Z_x i pre-



Slika 11. Samougodivi most: a) načelna blok shema analognog dijela; b) pojednostavljena blok shema analognog dijela; c) vektorski prikaz napona

ciznim otporom R u povratnoj vezi *idealnog* operacijskog pojačala. Stezaljka L (low) je na potencijalu Zemlje (prividna zemlja), pa se pad napona $\underline{U}_2 = IR$ na otporu R mjeri voltmetrom V_2 . Dakle, operacijsko pojačalo služi kao pretvornik struje u napon. Iz pokazivanja obaju voltmetara možemo odrediti mjerenu impedanciju: $Z_x = \underline{U}_1/I = R\underline{U}_1/\underline{U}_2$. Mjerni se opsezi mijenjaju nizom različitih vrijednosti otpora R koji se mogu birati prikladnom preklopkom.

Vrlo pojednostavljena blok shema analognog dijela jedne izvedbe samougodiva mosta prikazana je na sl. 11.b. Taj dio čine tri sklopa: izvor mjernog signala, samougodiv most i detektor vektorskog omjera.

Mjerena impedancija napaja se signalom iz mikroprocesorski upravljanoj sintesajzera, čija se frekvencija može ugađati s razlučivanjem od 1 mHz. Razina signala može se djelilom ugađati od 5 mV do 1 V.

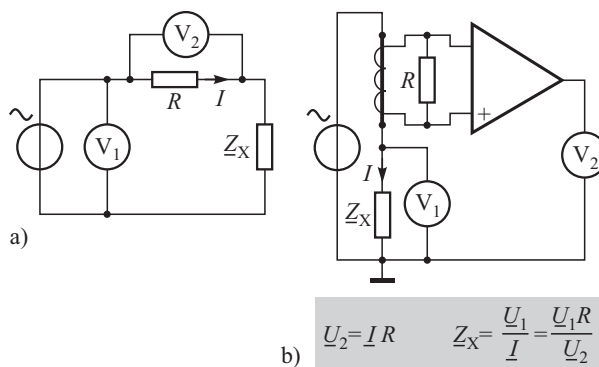
Taj se signal dovodi na strujnu stezaljku (H_c) priključnice za mjerenu impedanciju. Elektronički nulinstrument N mjeri potencijal naponske stezaljke L_p i upravlja razinom i fazom izlaznog napona posebnog oscilatora (nije prikazan na shemi) sve dok potencijal stezaljke ne dosegne ničticu. Kad most nije uravnotežen, struja kroz nulinstrument u detektorima faze razdvaja se u dvije sastavnice (0° i 90°), koje se zatim integriraju i dovode u modulatore M . Izlazni signali iz modulatora pojačavaju se i povratnom vezom dovode preko otpora R_r , kojim se odabiru mjerni opsezi, do strujne stezaljke (L_c) mjerene impedancije, sve dok struja kroz nulinstrument nije jednaka ničtici. Dakle, dok se ne postigne: $(\underline{U}_z/Z_x) + (\underline{U}_r/R_r) = 0$.

U sklopu detektora vektorskog omjera mjere se vektori napona \underline{U}_z (s realnom U_c i imaginarnom U_d sastavnicom) na naponskoj stezaljci (H_p) impedancije Z_x i \underline{U}_r (s realnom U_a i imaginarnom U_b sastavnicom) na otporu R_r (sl. 11.c). Kako je vrijednost otpora R_r poznata, iz mjerenih napona \underline{U}_z i \underline{U}_r može se odrediti vektor Z_x . On je jednostavno: $Z_x = R_r \underline{U}_z/\underline{U}_r$. Preklopkom P signali se naizmjenično *istim putem* vode prema digitalnom sklopu otklanjajući time moguće pogreške koje bi nastale kad bi se putovi razlikovali. U digitalnom se dijelu, nakon analogno-digitalne (AD) pretvorbe, obradom signala (DSP – Digital Signal Processing) razlučuju sastavnice svakog od izmjerenih vektora i dovode na središnju jedinku za obradu signala (CPU – Central Processing Unit).

4.2. UI metoda

Načelna shema ove metode prikazana je na sl. 6.a i 12.a. Umjesto izravnog mjerenja struje I kroz mjerenu impedanciju Z_x , voltmetrom V_2 mjeri se pad napona \underline{U}_2 kojeg ona stvara na malom djelatnom otporu R . Iz napona oscilatora \underline{U}_1 koji se mjeri voltmetrom V_1 dobije se: $Z_x = \underline{U}/I = (\underline{U}_1/\underline{U}_2)R$.

U stvarnosti se umjesto otpora R najčešće rabi strujni transformator čija sekundarna struja stvara pad napona na otporu R . Taj se napon dalje pojačava opera-



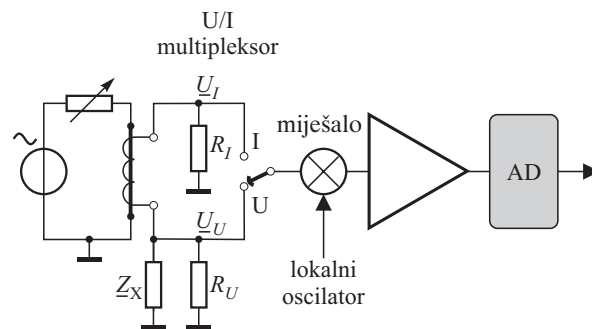
Slika 12. UI metoda: a) načelna shema; b) načelna shema sa strujnim transformatorom

cijskim pojačalom na čiji je izlaz priključen voltmetar V_2 . Umjesto napona oscilatora mjeri se pad napona \underline{U}_1 kojeg stvara struja I na mjerenoj impedanciji (sl. 12.b). Izraz za mjerenu impedanciju ostaje nepromijenjen. Tako dobiveni podaci pretvaraju se u digitalne veličine koje se dalje obrađuju u DSP-u.

4.3. RF UI metoda

Za više (radio)frekvencije rabi se radiofrekvencijska UI metoda koja se temelji na prije opisanoj, a od nje se razlikuje uporabom prikladne priključnice prilagođene za karakterističnu impedanciju 50Ω . Načelno se rabe poznate sheme za mjerenje malih i velikih impedancija UI metodom, s time da se struja mjeri padom napona na poznatom otporu. Umjesto otpornika često se rabi strujni mjerni transformator.

Pojednostavljena blok shema ove metode prikazana je na sl. 13. Mjerni sklop se napaja iz oscilatora (sintesajzera) frekvencije od 1 MHz do 3 GHz. Sintesajzer je prikladan jer se s velikom razlučivostiu može odabrati željena frekvencija. Amplituda signala na traženu razinu ugađa se djelilom (atenuatorom). U seriju sa sekundarom transformatora spojena je mjerena impedancija. Struja kroz mjerenu impedanciju razmjerna je padu napona \underline{U}_I na otporu R_I , a pad napona \underline{U}_U na impedanciji razmjeran je naponu na otporu R_U . Multiplikatorom se naizmjenično odabiru ti naponi i iz njihova omjera može se odrediti mjerena impedancija: $Z_x = f(\underline{U}_U/\underline{U}_I)$. Kako je frekvencija obaju napona vi-



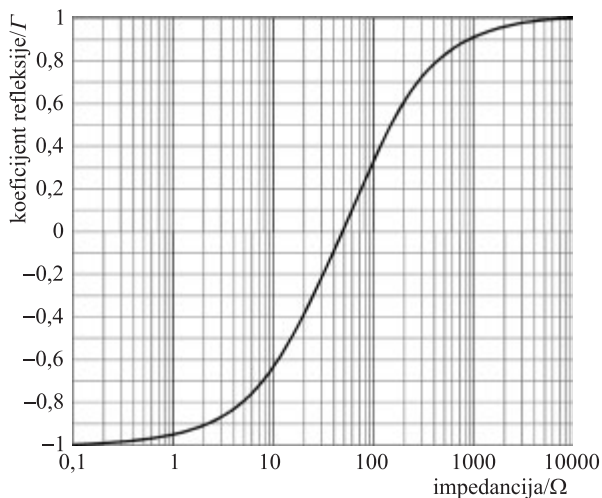
Slika 13. Pojednostavljena blok shema RF UI metode

soka i neprikladna za analogno-digitalni (AD) pretvornik, mješalom M_j (u više stupnjeva) se dobiva niža međufrekvencija. Nakon analogno-digitalne pretvorbe digitalno se odvajaju sastavnice vektora.

Prije mjerenja uz promijenjenu frekvenciju potrebno je instrument kalibrirati, tj. provesti kompenzaciju postupkom kratkog spoja i praznog hoda.

4.4. Metoda analize mreže

Ova se metoda zasniva na mjerenjima koeficijenta refleksije Γ_x elektromagnetskog vala na mjerenoj impedanciji. Veza između koeficijenta refleksije i mjerene impedancije dana je jednačbom: $\Gamma_x = (Z_x - Z_0)/(Z_x + Z_0)$, gdje je Z_0 karakteristična impedancija mjernog kruga (50Ω), a Z_x mjerena impedancija. Koeficijent refleksije mijenja se u granicama od -1 do $+1$. Njegova ovisnost o impedanciji, s pretežito djelatnom sastavnicom, grafički je prikazana na sl. 14. Najveće promjene Γ_x su u blizini ništice, tj. jednakosti impedancija Z_x i Z_0 (prilagođenje). U tom području je najveća osjetljivost, pa se postižu i najuže granice pogrešaka. Granice pogrešaka bitno rastu u području malih i velikih impedancija. Iz toga slijedi da, u mjerenju šireg raspona impedancija, prednost ima RF UI metoda, jer se njena osjetljivost na čitavom mjernom opsegu manje mijenja. Razlika postoji i u mjernim opsezima impedancija. Mjerni opseg metode analize mreže je uži, a radiofrekvencijske UI metode širi.



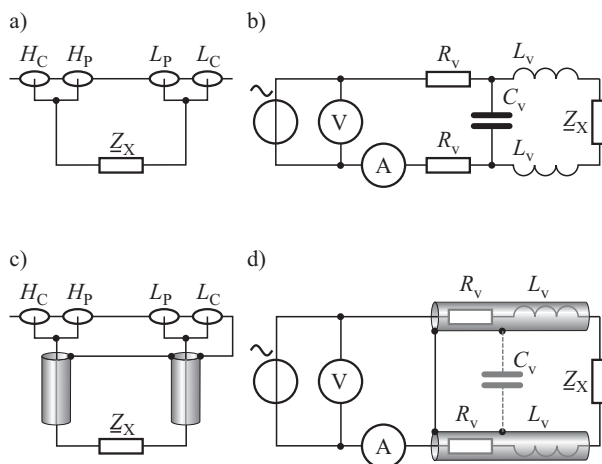
Slika 14. Grafički prikaz ovisnosti koeficijenta refleksije o impedanciji pri mjerenju metodom analize mreže

5. UTJECAJ NAČINA PRIKLJUČIVANJA MJERENE IMPEDANCIJE

Proizvođači suvremene mjerne opreme uz mjerila impedancije nude na desetke različitih priključnih sklopova. Oni se rabe za priključak mjerene impedancije ovisno o tome je li ugrađena u neki sklop (npr. tiskana pločica) ili nije, te o frekvencijskom opsegu.

Kako utječe način priključka mjerene impedancije razmotrimo na instrumentu sa samougodivim mostom.

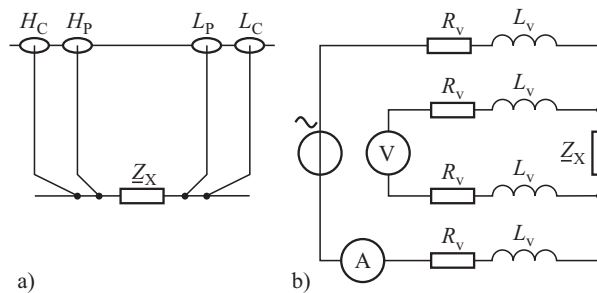
Na njegovoj prednjoj ploči nalaze se četiri BNC priključnice, dvije strujne (H_c i L_c) i dvije naponske (H_p i L_p). Mjerena impedancija može se na te priključnice spojiti na različite načine izravno ili pomoću prikladnih pločica koje isporučuje proizvođač. Svaki od tih načina ima dobre i loše strane, ovisno o vrijednosti impedancije i zahtijevanih granica pogrešaka. Ovdje se mogu primijeniti razmatranja i nadomjesne sheme iste ili slične onima koje su opisane u točki 3.1.



Slika 15. Načini priključivanja mjerene impedancije na mjerilo: a) dvožično neoklopljenim vodičima; b) nadomjesna shema; c) dvožično suosnim kabelima; d) nadomjesna shema spoja suosnim kabelima

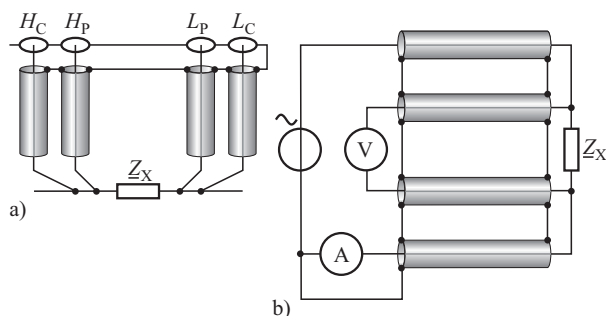
Najjednostavniji način priključivanja je uporaba dviju stezaljki i neoklopljenih vodiča (sl. 15.a). Međutim, on ima i mnoge nedostatke. Iz nadomjesne sheme (sl. 15. b) može se vidjeti da se otpori R_v i induktiviteti L_v vodiča te parazitski kapaciteti C_v između njih dodaju mjerenoj impedanciji i uzrokuju pogrešku. Na taj se način, bez kompenzacije, mogu mjeriti impedancije od 100Ω do $10 \text{ k}\Omega$. Uporabom suosnih kabela (sl. 15. c) parazitski kapacitet C_v (sl. 15. d) ne djeluje na vrijednost mjerene impedancije. Gornja granica mjernog opsega pomiče se iznad $10 \text{ k}\Omega$ sve do $10 \text{ M}\Omega$, dok donja granica ostaje, jer otpori i induktiviteti vodova utjecu na nju.

Spojem četiriju stezaljki (sl. 16.a) s neoklopljenim vodičima smanjuje se, kao što je poznato, utjecaj njihovih



Slika 16. Načini priključivanja mjerene impedancije na mjerilo: a) četverožično neoklopljenim vodičima; b) nadomjesna shema

impedancija, pa se donja granica vrijednosti mjerene impedancije spušta na 1Ω . Kod mjerenja malih otpora, zbog većih struja koje tom prilikom teku, dolazi do izražaja međuinaktivna veza između strujnih i naponskih vodiča (sl. 16.b). Istim spojem, ali sa suosnim kabelima, čiji su oklopi međusobno spojeni, dobiva se spoj s pet stezaljki (sl. 17), pa je izbjegnuta utjecaj međuinaktivnih veza što snižava donju granicu na $10 m\Omega$ ili čak $1 m\Omega$.



Slika 17. Načini priključivanja mjerene impedancije na mjerilo: a) peterožično suosnim kabelima; b) nadomjesna shema

Granice pogrešaka mjernog instrumenta, a time i mjerna nesigurnost određivanja impedancije smanjuje se umjeravanjem instrumenta i kompenzacijom utjecaja parazitskih sastavnica priključnog sklopa i vodova. Općenito se kompenzacija obavlja tako da se, prije priključka mjerene impedancije Z_x , obave mjerenja s otvorenim i kratkospojenim stezaljkama na koje se mjerena impedancija treba priključiti. Pri otvorenim stezaljkama mjeri se parazitska admitancija Y_o , jer je parazitska impedancija Z_s u tom spoju zanemariva (sl. 4.b), a pri kratkospojenim stezaljkama Y_o je kratko spojena pa se određuje samo Z_s . Ako se pri priključku Z_x instrumentom izmjeri impedancija Z_m , tada je: $Z_x = (Z_m - Z_s) / [1 - (Z_m - Z_s)Y_o]$.

Ostvarena kompenzacija najbolje se provjerava mjerenjem impedancije čiji su podaci dobro poznati. Pritom valja voditi računa da su vrijednost i geometrijske izmjere te impedancije približno jednake nepoznatoj impedanciji. Naime, i o izmjerama objekta, kao i o načinu priključka mogu ovisiti i pojedine parazitske sastavnice, pa time i mjerni rezultat.

Pri mjerenju induktiviteta svitaka, posebice onih čije magnetske silnice nisu potpuno zatvorene feromagnetnim materijalom, valja voditi računa da rasipne silnice mogu inducirati vrtložne struje u bližim metalnim dijelovima, npr. priključnicama. Te struje mogu, pri preciznim mjerenjima, utjecati na mjerne rezultate i njihovu nesigurnost.

6. ZAKLJUČAK

Za ispravan rad izmjeničnih sustava važno je da imedancije, kao njihove osnovne sastavnice, imaju potrebnu vrijednost. Mjerenje impedancija obavlja se

mnogim metodama, jer je raspon mjerenih vrijednosti i frekvencija vrlo širok. Danas se u tu svrhu osim klasičnih laboratorijskih metoda i sklopova sve više rabe automatski mjerni uređaji koji, samostalno ili povezani sa računalom, olakšavaju i ubrzavaju mjerenje, pohranu i raščlambu mjernih podataka.

Zahvala Ivici Kunštu, dipl. ing. zahvaljujem na uloženom trudu pri izradi slika za ovaj članak.

LITERATURA

- [1] J. LONČAR: "Osnove elektrotehnike", peto izdanje, Zagreb, 1964.
- [2] "Slovni simboli", Zajednica JEK u suradnji sa Saveznim Zavodom za standardizaciju, Beograd, 1983.
- [3] B. OLIVER, J. CAGE: "Electronic Measurements and Instrumentation", McGraw-Hill, 1971.
- [4] V. BEGO: "Mjerenja u elektrotehnici", deveto izdanje, Graphis, Zagreb, 2003.
- [5] K. KUNDERT: "Modeling Dielectric Absorption in Capacitors", The Designer's Guide, web stranice designers-guide.com
- [6] J. KUENEN, G. MEJIER: "Measurement of Dielectric Absorption of Capacitors and Analysis of its Effects on VCO's", IEEE Transactions on IM, Vol. 45, No. 1, February 1996, str. 89-96.
- [7] K. IORGA: "Compartmental Analysis of Dielectric Absorption in Capacitors", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No.2, April 2000.
- [8] "Equivalent Series Resistance (ESR) of Capacitors", web stranica tvrtke QuadTech.
- [9] L. SCHNELL: "Technology of Electrical Measurements", John Wiley, 1993.
- [10] Web stranice tvrtki: Agilent Technologies, Hewlett Packard, Tettex Instruments

IMPEDANCE MEASUREMENT

In each a.c. system switch, appliance or network impedances are basic components. Impedance values and their components are determined by measurement. There are numerous measurement methods that are a basis for laboratory and commercial measurement devices and instruments.

ÜBER DIE IMPEDANZMESSUNGEN

In allen Bauteilen, Anlagen oder Netzen stellen in der Wechselstromtechnik Impedanzen Grundangaben dar. Die Beträge dieser Impedanzen werden mittels Messungen bestimmt. Meßeinrichtungen in Laboratorien und kommerzielle Meßeinrichtungen beruhen auf mehreren Meßmethoden.

Naslov pisca:

Dr. sc. Dušan Vujević, dipl. ing.
Cankareva 2a
10000 Zagreb, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
2003 – 09 – 30.