

Elektronikos grandinių parametrų matavimas

Šiame skyriuje nagrinėjamos matavimo priemonės ir metodai naudojami elektronikos grandinių su sutelktais parametrais elementų parametrų matavimams. Labai plačiai naudojant mikroschemas, tokių matavimų apimtis sumažėjo, tačiau ir toliau išliko poreikis matuoti elektronikos grandinių rezistorių varžas, kondensatorių talpas, ričių induktyvumus bei antrinius tokių elementų bei dvipolių ir keturpolių parametrus. Analizuojant rezonansinių virpesių keturpolių ir filtrų savybes, bei derinant tokias grandines, plačiai naudojami panoraminiai amplitudės–dažnių charakteristikų charakterografai. Tokie matavimai vykdomi projektuojant, eksploatuojant ir gaminant elektronikos įtaisus ir sistemas. Matuojant neelektrinius dydžius, tokius kaip temperatūra, drėgmė, slėgis, pagreitis ir kitus taip pat dažnai naudojami rezistyviniai, talpiniai ir induktyviniai pirminiai matavimo keitikliai. Šiais atvejais, matuojant R , L ir C yra nustatomos tokių matavimo keitiklių keitimo charakteristikos.

Elektronikos grandinių parametrų matavimams naudojami labai įvairūs būdai ir priemonės. Mikroprocesorių ir skaitmeninių matavimo metodų panaudojimas leido iš esmės pagerinti parametrų matavimo priemonių metrologines ir ypač eksploatacines savybes.

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

6.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas

Nuolatinės srovės grandinėse matuojama grandinės dalies arba rezistorių varža nuolatinei srovei R . Kintamosios srovės grandinėse matuojamos grandinės dalių ar rezistorių varžos kintamajai srovei R , kondensatorių talpos C ir ričių induktyvumai L . Kadangi minėti elementai be savųjų turi ir parazitinius parametrus, tai juos galima dar charakterizuoti pilnutinėmis varžomis Z , bei antriniais parametrais. Ritėms dažnai matuojama jų kokybė Q , o kondensatoriams – dielektrinių nuostolių kampas $\tan \delta$.

Induktyvumo ričių ir kondensatorių ekvivalentinės schemos ir ekvivalentinių parametų ryšys su savaisiais parametrais yra aptartas pirmame skyriuje, nagrinėjant elektrinių dydžių etalonus, ir čia nekartojamas.

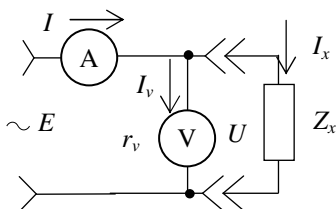
Parametrus matuoti dažniausiai naudojami *netiesioginio matavimo* ir *palyginimo metodai*.

Iš netiesioginių matavimo metodų reikia paminėti dažnai naudojamą *ampermetro–voltmetro metodą* ir jo modifikacijas bei parametų matavimą pagal jų sukeliama *pereinamojo proceso trukmę*.

Palyginimo būdus sudaro trys pagrindinės grupės: *tiltelio* būdai, *rezonansiniai kontūriniai* ir *rezonansiniai generatoriniai* būdai.

6.2. Ampermetro–voltmetro metodas ir ommetrai

Ampermetro–voltmetro metodas gali būti naudojamas nuolatinės



6.1 pav. Mažų varžų matavimo schema

srovės grandinės ar rezistoriaus varžai nuolatinei srovei matuoti, o kintamosios srovės grandinėse – grandinės dalies ar jos elemento pilnutinei varžai kintamai srovei matuoti. Nagrinėsime bendresnį atvejį, kai matavimas vyksta

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

kintamosios srovės grandinėje.

Galimos dvi prietaisų jungimo schemos.

6.1 paveikslo schemoje voltmetru matuojamas įtampos kritimas ant matuojamojo elemento, o ampermetru matuojama bendroji grandinės srovė sudaryta iš srovių, tekančių per voltmetrą ir matuojamąjį elementą, sumos.

Elemento ar grandinės pilnutinė varža apskaičiuojama pagal Omo dėsnį:

$$Z_x = \frac{U}{I_x} = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - U/r_v} = \frac{U}{I - I_x Z_x / r_v}.$$

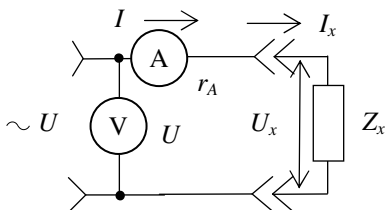
Jeigu *matuojamos varžos yra mažos*, tai voltmetro varža gaunama žymiai didesnė ir per ją tekančios srovės galime nepaisyti. Tada matuojamojo elemento varža apskaičiuojama tik iš voltmetro ir ampermetro rodmenų:

$$Z_x \approx \frac{U}{I}.$$

Išmatuotos varžos vertė gaunama tik apytikslė: mažesnė nei elemento varža. Sistemingosios santykinės metodo paklaidos dydis gaunamas toks:

$$\delta = -\frac{1}{1 + \frac{r_v}{Z_x}} 100, \%$$

Kai $\frac{r_v}{Z_x} > 100$, tai $|\delta| < 1 \%$.



6.2 pav. Didelių varžų matavimo schema

6.2 paveikslo schemoje voltmetru matuojamas įtampos kritimas ant ampermetro ir matuojamojo elemento, o ampermetru matuojama srovė tekanti per matuojamąjį elementą.

Elemento ar grandinės pilnutinė varža apskaičiuojama pagal Omo dėsnį:

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

$$Z_x = \frac{U_x}{I} = \frac{U - I r_A}{I} = \frac{U}{I} - r_A.$$

Jeigu *matuojamos varžos yra didelės*, tai ampermetro varža gaunama žymiai mažesnė ir jos galime nepaisyti. Tada matuojamojo elemento varža apskaičiuojama tik iš voltmetro ir ampermetro rodmenų: $Z_x \approx U/I$.

Išmatuotos varžos vertė gaunama tik apytikslė: didesnė nei elemento varža. Sistemos santykinės metodo paklaidos dydis gaunamas toks:

$$\delta = \frac{r_A}{Z_x} 100, \%. \quad$$

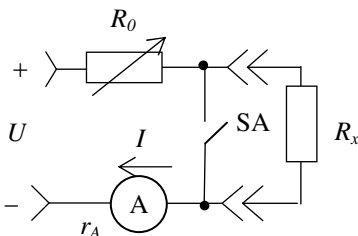
$$\text{Kai } \frac{r_A}{Z_x} < \frac{1}{100}, \text{ tai } \delta < 1 \%. \quad$$

Ampermetro–voltmetro metodo instrumentinės paklaidos priklauso nuo U ir I matavimo tikslumo, t.y. nuo ampermetro ir voltmetro tikslumo klasių.

Kai tiriamas elementas yra didelio induktyvumo ritė, tai jos pilnutinė varža yra beveik lygi induktyvinei varžai: $Z_x \approx \omega L$. Žinant kintamosios srovės dažnį, galime apskaičiuoti ritės induktyvumą.

Analogiškai gali būti išmatuota ir kondensatorių talpa: $Z_x \approx \frac{1}{\omega C}$.

Varžų matavimams nuolatinės srovės grandinėse naudojamas modifikuotas ampermetro–voltmetro metodas. Varžos nustatomos pagal per jas tekančios srovės stiprį. 6.3 paveikslo schemoje



6.3 pav. Nuosekliojo ommetro schema

ampermetru yra matuojama srovė tekanti per matuojamą varžos elementą:

$$I = \frac{U}{R_0 + R_x + r_A}.$$

Kadangi srovė priklauso ir nuo prijungtos įtampos, tai prieš matavimą reguliuojamu rezistoriumi R_0 yra nustatoma ampermetro ribinė srovė, jungikliu SA šuntuojant

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

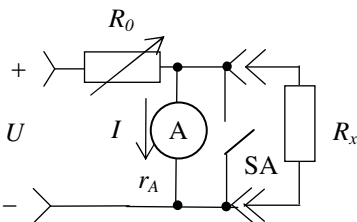
matuojamą varžą:

$$R_x = 0, I_{\max} = \frac{U}{R_0 + r_A}.$$

Ampermetro skalėje ties šia rodyklės padėtimi pažymima varžos nulinė vertė.

Toliau atjungiamas jungiklis SA ir atjungiamą matuojamą varžą. Grandinės srovė tampa lygi nuliui ir tai atitinka varžos dydį lygų begalybei $R_x = \infty$. Tai ir pažymima skalėje.

Naudojant etalonines varžas yra atliekamas skalės gradavimas varžos vienetais intervalui tarp ribinių verčių. Gautas matavimo prietaisas tiesiogiai matuoja varžas ir yra vadinamas **nuosekliuoju elektromechaniniu ommetru**. Jo skalė gaunama netolygi ir atvirkštinė.



6.4 pav. Lygiagrečiojo ommetro schema

Kita galima ommetro schema yra pavaizduota 6.4 paveiksle.

Joje ampermetro srovė yra lygi:

$$I = \frac{U}{R_0 + r_A + R_0 r_A / R_x}.$$

Kai $R_x = 0$, $I = 0$.

Kai $R_x = \infty$, $I = I_{\max} = \frac{U}{R_0 + r_A}.$

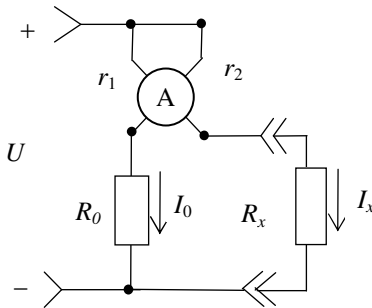
Tarpinės varžų vertės sugraduojamos naudojant etalonines varžas. Skalė irgi gaunama netolygi, bet tiesioginė.

Matavimo paklaidos priklauso nuo ampermetro tikslumo klasės ir gradavimo paklaidų.

Nuosekleji ommetrai naudojami didesnėms varžoms matuoti, o lygiagretieji – mažesnėms. Tada gaunamos mažesnės ampermetrų srovės ir galia naudojama iš nuolatinės įtampos šaltinio.

Paprastai tokie ommetrai yra nešiojami nedidelio tikslumo (1,5 – 2,5) klasės prietaisai su vidine baterija. Kadangi baterijos įtampa laikui bėgant keičiasi, tai prieš matuojant varžas, reikia patikrinti ir rezistoriumi R_0 sureguliuoti varžos nulį ir begalybę atitinkančias sroves.

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas



6.5 pav. Logometrinio ommetro schema

Naudojami ir elektromechaniniai ommetrai (6.5 pav.) su magnetoelektriniais logometrais, sugraduotais varžos vienetais.

Logometro rėmelių 1 ir 2 varžos yra r_1 ir r_2 , o jų srovės:

$$I_x = \frac{U}{r_1 + R_x}, \quad I_0 = \frac{U}{r_2 + R_0}.$$

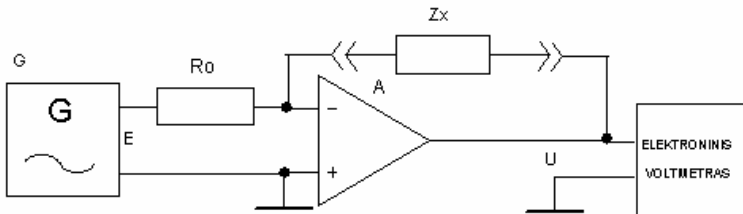
Rodyklės pasisukimo kampas:

$$\alpha = F\left(\frac{I_0}{I_x}\right) = F_1\left(\frac{r_1 + R_x}{r_2 + R_0}\right) = F_2(R_x).$$

Matome, kad tokio ommetro rodmenys nepriklauso nuo maitinančios įtampos U .

Nešiojamuose logometriniuose ommetruose, skirtuose didelių varžų (izoliacijos varžų) matavimui, vadinamuose **megommetruose**, naudojami kelių šimtų voltų maitinimo šaltiniai. Paprastai sausų elementų baterijos arba akumuliatoriaus įtampa tranzistorinių keitiklių keičiama į aukštesnę įtampą arba naudojamas ranka sukamas nuolatinės srovės generatorius.

Naudojami ir elektroniniai ommetrai, kurių funkcinė schema yra parodyta 6.6 paveiksle. Tai yra lygiagrečiojo ommetro elektroninė versija.



6.6 pav. Elektroninio ommetro funkcinė schema

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

Schemoje naudojamas operacinis stiprintuvas, todėl jo įėjimo varža gali būti laikoma labai didelė, o įėjimo įtampa artima nuliui. Tokio stiprintuvo išėjimo įtampa U , kai generatoriaus įtampa yra E , yra proporcinga neigiamojo grįžtamojo ryšio grandinės pilnutinei varžai, t.y. matuojamojo elemento pilnutinei varžai Z_x :

$$U = -\frac{E}{R_0} Z_x.$$

Elektroninio voltmetro skalė gali būti graduojama varžos vienetais. Tokia schema leidžia matuoti net *teraomų* eilės varžas. Tam tikrai generatoriaus įtampai ir dažniui, voltmetro skalė gali būti graduojama taip pat ir induktyvumo arba talpos vienetais. Gali būti naudojami analoginiai arba skaitmeniniai elektroniniai voltmetrai. Tokių prietaisų matavimų paklaidos yra nuo $\pm 1\%$ iki $\pm 10\%$.

6.3. Parametų matavimas pagal pereinamojo proceso trukmę

Metodas yra grindžiamas analoginiu matuojamojo parametro keitimu į jam proporcingą laiko intervalą arba dažnį ir pastarųjų dydžių matavimą skaitmeniniais metodais. Gaunamas skaitmeninis parametų matuoklis.

Keitimo principas yra toks: sudaroma aperiodinė RC arba RL grandinė ir nustatoma jos laiko konstanta. Kai vienas iš grandinės elementų yra etaloninis, kito elemento vertė surandama iš etaloninio elemento ir grandinės laiko konstantos. Taip gali būti matuojami R , L ir C parametrai.

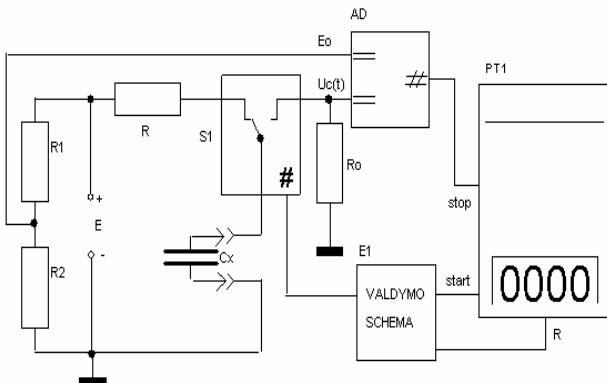
Skaitmeninio talpos matuoklio funkcinė schema yra pavaizduota 6.7 paveiksle. Schema sudaryta iš dviejų pagrindinių dalių: keitiklio, keičiančio talpos C_x dydį į jai proporcingą laiko intervalą lygų RC grandinės su etaloniniu rezistoriumi R_0 laiko konstantai ir skaitmeninio laiko intervalų matuoklio PT1.

Pradinėje būklėje, elektroninis raktas $S1$ yra kairėje padėtyje ir kondensatorius C_x yra iškrautas iki stabilios įtamos šaltinio įtamos E . Laiko momentu t_1 valdymo schema perjungia raktą $S1$ į dešinę padėtį, nustato laiko intervalų matuoklio PT1 nulinius rodmenis ir jį

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

paleidžia laiko intervalo matavimui. Kondensatorius C_x išsikrauna per etaloninį rezistorių R_0 eksponentiniu dėsniu:

$$u_c(t) = Ee^{-\frac{t-t_1}{R_0 C_x}}. \quad (6.1)$$



6.7 pav. Skaitmeninio talpos matuoklio funkcinė schema

Laiko momentu t_2 kondensatoriaus įtampa susilygina su atramine įtampa E_0 ir komparatorius AD sukuria laiko intervalų matuoklio stabdymo impulsą. Iš (6.1) formulės išplaukia toks ryšys tarp laiko intervalo ($t_2 - t_1$) ir kitų schemos parametru:

$$C_x = \frac{t_2 - t_1}{R_0 \ln \frac{E}{E_0}}.$$

Parinkus $E_0 = \frac{E}{e}$, gauname, kad išmatuotas laiko intervalas yra

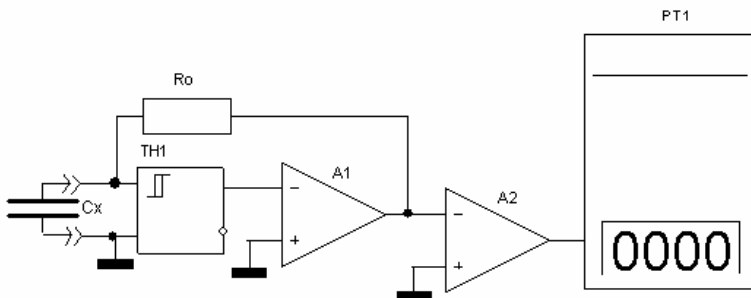
proporcingas matuojamos talpos vertei: $C_x = \frac{t_2 - t_1}{R_0}$.

Matavimo paklaidos susideda iš atraminės įtamos E_0 paklaidos, etaloninio rezistoriaus R_0 paklaidos, komparatoriaus nejautos zonos sukuriamos palyginimo paklaidos ir laiko intervalų matuoklio paklaidos. Tokiu matuokliu kondensatorių talpos yra matuojamos

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

intervale nuo 100 pF iki 10000 μ F, o induktyvumą – nuo 100 μ H iki 100 mH su apie $\pm 0,1$ % paklaida.

Kitas skaitmeninio matuoklio variantas sudaromas panaudojus iš 2 skyriaus žinomą autovirpesių schemą su integratoriumi ir Šmito trigeriu (6.8 pav.).



6.8 pav. Skaitmeninis matuoklis su autovirpesių schema

Tokioje schemoje susižadina stačiakampės formos periodiniai virpesiai, kurių periodas yra lygus integruojančios RC grandinės laiko konstantai: $T = R_0 C_x$. Virpesių periodas yra matuojamas skaitmeniniu laiko intervalų matuokliu PT1. Matuoklio parametrai yra analogiškai ankstesnės schemos parametrams.

Išnagrinėtų skaitmeninių matuoklių esminis pranašumas yra jų schemų paprastumas, platus matuojamų parametų diapazonas ir aukštas tikslumas, tačiau jų esminis trūkumas yra tas, kad jie matuoja talpas ir induktyvumus beveik nuolatinės srovės režime, o ne tuose dažniuose, kuriuose elementai bus naudojami.

6.4. Elementų parametų matavimas tilteliais

6.4.1. Bendrosios žinios apie tiltelius

Tilteliais vadina elementų parametų matavimo prietaisus, kuriuose elementų parametrai matuojami juos palyginant su etaloninių elementų parametrais. Palyginimas vykdomas arba nulinio arba diferencialinio palyginimo metodais. Pirmuoju atveju naudojami *subalansuoti tilteliai*, antruoju atveju – išbalansuoti arba

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

procentiniai tilteliai. Procentiniai tilteliai yra naudojami rezistorių, kondensatorių ir ričių verčių nuokrypiams nuo vardinių verčių nustatyti šių elementų serijinės gamybos metu. Elementų parametru vertėms matuoti naudojami subalansuoti tilteliai.

Pagal tiltelį maitinančios srovės rūšį tiltelius skirsto į **nuolatinės** ir **kintamosios** srovės tiltelius. Naudojami ir **universalieji** tilteliai, kuriuose yra ir nuolatinės ir kintamosios srovės maitinimo šaltiniai.

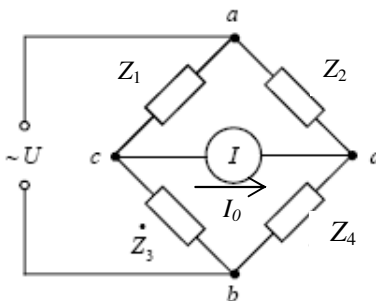
Tilteliai gali būti balansuojami rankiniu arba automatinio būdais. Pastarieji yra patogesni. Juose balansavimo elementai komutuojami tranzistoriniais raktais, valdomais skaitmeninėmis schemomis, o matavimo rezultatai atvaizduojami skaitmeniniuose rodmenų įtaisuose. Tokius tiltelius dažniausia vadina **skaitmeniniais** tilteliais.

Pagal tiltelio elektrinės schemos pobūdį yra skiriami keturių pečių viengubi ir dvigubi tilteliai, T–pavidalo schemos tilteliai ir kiti.

Nuolatinės srovės tilteliais matuojama elementų varža, o kintamosios srovės tilteliais – varža, induktyvumas, talpa ir kondensatorių nuostolių kampas bei ričių kokybė.

Tiltelių schemos pasižymi dideliu tikslumu ir jautrumu.

Plačiausiai naudojami klasikiniai viengubi keturių pečių tilteliai vadinami jų išradėjo Vinstono (Ch. Wheatstone, 1802 –1875 m.) vardu. Viengubo **kintamosios srovės tiltelio** schema pateikta 6.9 paveiksle. Tiltelio pečiai Z_1 , Z_2 , Z_3 ir Z_4 yra kompleksinės varžos ir gali būti sudaryti iš aktyviosios varžos, talpos ar induktyvumo



6.9 pav. Keturių pečių kintamosios srovės tiltelio schema

elementų. Tiltelis yra balansuojamas keičiant pečių kompleksines varžas, kad indikatoriaus I srovė I_0 arba potencialų skirtumas tarp taškų C ir D taptų lygus nuliui.

Srovės I_0 priklausomybė nuo tiltelio parametru ir maitinimo įtampos U , kai indikatoriaus varža yra Z_0 , gaunama tokia:

$$I_0 = U \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{Z_0 (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4) + Z_1 Z_2 (Z_3 + Z_4) + Z_3 Z_4 (Z_1 + Z_2)},$$

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

o įtampa tarp taškų C ir D yra lygi:

$$U_{CD} = U \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)}.$$

Kaip išplaukia iš indikatoriaus srovės ir įtampos formulių, tiltelis pusiausvyra bus subalansuotas, kai:

$$\frac{Z_1}{Z_3} = \frac{Z_2}{Z_4},$$

arba

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3. \quad (6.2)$$

Formulė (6.2) yra vadinama tiltelio balanso sąlyga.

Užrašius pečių kompleksines varžas algebriniu pavidalu

$$Z_1 = R_1 + jX_1,$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2,$$

$$Z_3 = R_3 + jX_3,$$

$$Z_4 = R_4 + jX_4.$$

ir įstačius jų vertes į (6.2) lygtį, bei sudvinę realias ir menamas dalis, gauname dvi lygybes:

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3,$$

$$R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2.$$

Dviejų lygčių buvimas reiškia, kad kintamosios srovės tiltelio balansas galimas tik pakaitomis keičiant ne mažiau kaip du jo pečių elementų parametrus.

Tiltelio balanso sąlygos gali būti užrašytos ir rodikline forma:

$$Z_1 = Z_1 e^{j\varphi_1},$$

$$Z_2 = Z_2 e^{j\varphi_2},$$

$$Z_3 = Z_3 e^{j\varphi_3},$$

$$Z_4 = Z_4 e^{j\varphi_4};$$

čia $Z_1 \div Z_4$ – pečių pilnutinės varžos; $\varphi_1 \div \varphi_4$ – pečių srovių fazių skirtumas pečių įtampų atžvilgiu.

Balanso sąlyga:

$$Z_1 Z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = Z_2 Z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)}.$$

Iš čia gauname taip pat dvi tiltelio balanso sąlygas:

6. Elektronikos grandinių parametrų matavimas

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3,$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Sąlyga $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$ parodo, koks turi būti pečių išsidėstymas priklausomai nuo jų varžų charakterio, kad būtų pasiekta tiltelio pusiausvyra. Jeigu gretimuose pečiuose, pavyzdžiui, trečiame ir ketvirtame, įjungtos grynai aktyviosios varžos R_3 ir R_4 , t.y. $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$, tai kitų dviejų gretimų pečių varžos galės būti arba induktyvinio arba talpinio charakterio. Jeigu priešinguose pečiuose yra grynai aktyviosios varžos, tai vienas iš kitų dviejų priešingų pečių turi būti induktyvinio, o antrasis – talpinio charakterio.

Taigi, norint subalansuoti kintamos srovės tiltelį, reikia jį subalansuoti pagal modulį ir fazę. Kintamos srovės tilteliai balansuojami nuoseklaus priartėjimo būdu keičiant jų elementų parametrus.

Matuojamasis elementas yra įjungiamas kaip vienas iš tiltelio pečių, o kitais elementais yra balansuojamas tiltelis. Elemento parametrai bus išreiškiami per kitų elementų parametrus, įvertinus tiltelio schemą ir jo balanso sąlygą. Todėl kiti tiltelio elementai turi būti etaloniniai. Kaip etaloniniai elementai naudojami etaloniniai rezistoriai ir etaloniniai kondensatoriai. Etalonišės induktyvumo ritės nenaudojamos, nes jų tikslumas yra mažesnis.

6.4.2. Varžų matavimo tilteliai

Matuojant aktyvias varžas kintamai srovei, visi tiltelio etaloniniai elementai yra etaloniniai rezistoriai.

Nuolatinės srovės tiltelio schema nesisiskiria nuo anksčiau parodytos. Tačiau jo pečių rezistorių varžos yra aktyviosios (R_1, R_2, R_3, R_4), o balanso indikatorius – nuolatinės srovės matavimo prietaisas, pavyzdžiui, magnetoelektrinis galvanometras, kurio varža yra R_0 .

Nuolatinės srovės tiltelio (taip pat ir kintamosios srovės varžų matavimo tiltelio) balanso sąlyga yra:

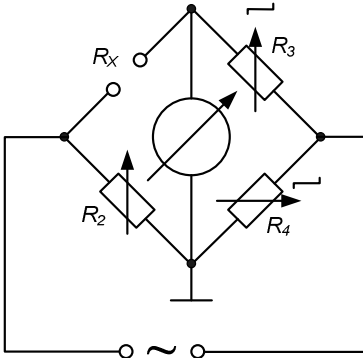
$$R_1 R_4 = R_2 R_3.$$

Iš šios lygties matyti, kad matuojamasis rezistorius gali būti įjungtas į bet kurį tiltelio petį, o jo varža surandama iš kitų trijų pečių

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

varžų.

Norint varžų matavimo tilteliu išmatuoti nežinomą varžą R_x , ji įjungiama į vieną iš pečių, pavyzdžiui, vietoje R_1 (6.10 pav.) ir, keičiant kitas pečių varžas, pasiekama, kad indikatoriumi netekėtų srovė.



6.10 pav. Varžų matavimo tiltelio schema

Ieškomosios varžos vertė išreiškiama per etaloninių elementų varžų vertes:

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}.$$

Elementų R_3 ir R_4 verčių santykis nustato proporcingumo koeficientą ir jie vadinami santykio pečiais, o su elemento R_2 verte yra palyginama matuojamoji varža. Todėl jį vadina palyginimo petimi. Balansuojant tiltelį, elementų R_3 ir R_4 vertės keičiamos suderintai šuoliais, o tolygiai

keičiant elemento R_2 vertę užbaigiamas tiltelio balansavimas.

Kintamosios srovės tiltelio santykinis jautris, balansuojant pagal įtampą yra

$$S_{TU} = \frac{U_{CD}}{\frac{\Delta Z_x}{Z_x}}.$$

Jeigu formulėje skaitiklį ir vardiklį padalintume iš $\frac{Z_x}{Z_4}$ ir įstatytume U_{BD} , tai gautume:

$$S_{TU} = \frac{U}{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_x}\right) \left(1 + \frac{Z_3}{Z_4}\right)}.$$

Pažymėjus $\frac{Z_2}{Z_1} = k$ ir, įvykdžius balanso sąlygą $Z_x Z_4 = Z_2 Z_3$,

gauname:

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

$$S_{TU} = \frac{U}{(1+k)\left(1+\frac{1}{k}\right)} = U \frac{k}{(1+k)^2} = UA.$$

Tegul $k = a+jb$. Pažymėję $a = m\cos\theta$ ir $b = m\sin\theta$, gausime tokią formulę dydžio A moduliui:

$$|A| = \frac{m}{1+2m\cos\theta+m^2}.$$

Kai $m = 1$ ir $\theta = \pi$, dešinioji $|A|$ lygybės dalis tampa lygi begalybei, t.y. ir tiltelio jautrumas taps lygus begalybei. Sąlygos $m = 1$ ir $\theta = \pi$ rodo, kad tiltelis turi būti simetrinis ($Z_1 = Z_2$ ir $Z_3 = Z_4$), o pečių, einančių į abi puses nuo indikatoriaus prijungimo taškų, srovių fazių poslinkiai lygūs $\pm\pi$.

Praktiškai sąlyga $\theta = \pi$ dėl nuostolių reaktyviniuose elementuose nėra įvykdoma.

Viengubų tiltelių varžų matavimo ribos yra nuo $10\ \Omega$ iki $10^{10}\ \Omega$, o mažiausia santykinė neapibrėžtis apie 10^{-5} .

Matuojant mažas varžas viengubu tilteliu, gaunamos gana didelės paklaidos dėl jungiamųjų laidų ir kontaktų varžų įtakos. Šiuo atveju naudojamas dvigubas Tomsono (W. Thomson 1824 – 1907 m.) tiltelis (6.11 pav.). Nagrinėjimo supaprastinimui, priimate, kad jungiamųjų laidų ir kontaktų varžos įeina į varžas schemoje su atitinkamais indeksais.

Kai tiltelis subalansuotas gauname tokias įtampų kritimų lygtis:

$$I_x R_x + I_3 R_3 = I_1 R_1,$$

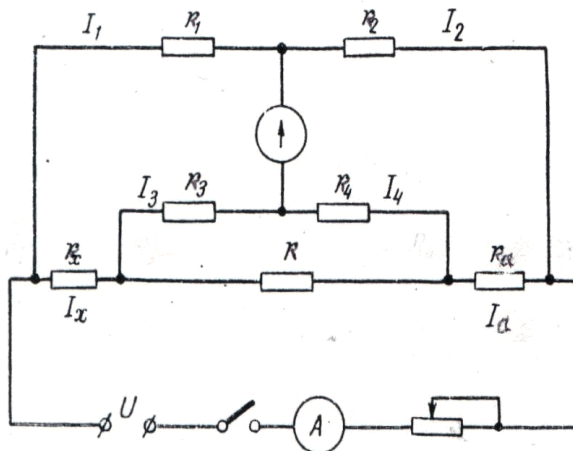
$$I_x R_a + I_3 R_4 = I_1 R_2,$$

$$I_3 (R_3 + R_4) = (I_x - I_3) R,$$

nes $I_1 = I_2$; $I_3 = I_4$ ir $I_x = I_a$.

Išsprendus R_x atžvilgiu, gauname:

$$R_x = R_a \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_4 R}{R_1 + R_2 + R_3} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right).$$



6.11 pav. Dvigubo tiltelio schema

Iš čia išplaukia, kad jeigu:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4},$$

tai matuojamoji varža yra lygi

$$R_x = R_a \frac{R_1}{R_2}.$$

Varža R turi būti kuo mažesnė, kad $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ sąlyga būtų kuo tikslesnė. Dėl to jungiamasis laidas R turi būti pakankamo skerspjuvio ir trumpas.

Rezistorių R_1 , R_2 , R_3 ir R_4 varžos neturi būti mažesnės už $10 \, \Omega$, kad jungiamųjų laidų ir kontaktų varžų įtaka būtų nedidelė.

Dvigubų tiltelių skiriamoji geba siekia $0,1 \, \mu\Omega$, o maksimali varžų matavimo riba yra apie $100 \, \Omega$. Mažiausia santykinė neapibrėžtis apie $\pm 10^{-5}$.

6.4.3. Talpų matavimo tilteliai

Pirmame skyriuje aptarėme, kad realūs kondensatoriai gali būti atvaizduoti ekvivalentine schema, sudaryta iš nuosekliai arba

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

lygiagrečiai sujungtų idealios talpos ir aktyvinės varžos elementų. Aktyvi varža arba laidumas įvertina ekvivalentinius aktyvinius nuostolius kondensatoriuje. Nuostoliai dažniausiai išreiškiami nuostolių kampu.

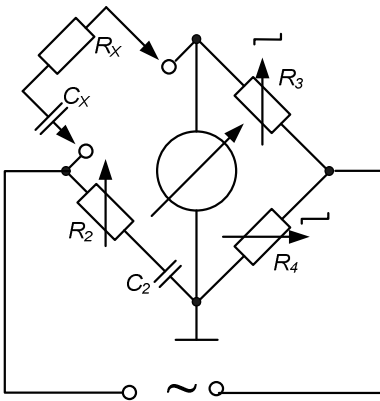
Nuosekliai schemai nuostolių kampo tangensas:

$$\tan \delta = \omega RC,$$

o lygiagrečiai schemai:

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega RC}.$$

Matuojant kondensatorių su mažais nuostoliais talpą, naudojama nuosekli nuostolių schema. Tokio tiltelio schema pavaizduota 6.12 pav.



6.12 pav. Mažų nuostolių kondensatorių talpos matavimo tiltelis

Kompleksinės pečių varžos:

$$Z_1 = R_x + \frac{1}{j\omega C_x},$$

$$Z_2 = R_2 + \frac{1}{j\omega C_2},$$

$$Z_3 = R_3,$$

$$Z_4 = R_4.$$

Tiltelio balanso sąlygos:

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) R_4 = \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) R_3,$$

$$C_x = \frac{C_2 R_4}{R_3},$$

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}.$$

Nuostolių kampas δ surandamas taip:

$$\tan \delta = \omega C_x R_x = \omega C_2 R_2.$$

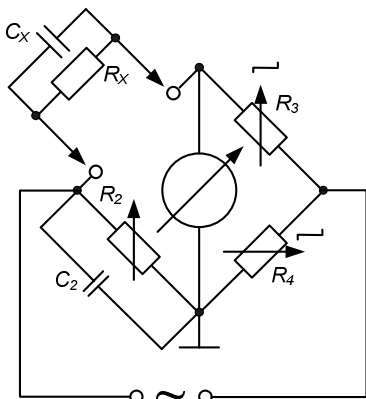
Tiltelis balansuojamas tokiu nuoseklumu: pradžioje R_2 ir C_2 nustatomos lygios nuliui ir keičiamas pečių santykis R_3/R_4 tol, kol nulinio indikatorius rodys mažiausią įtampos vertę. Toliau keičiamos

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

R_2 ir C_2 vertės taip, kad indikatorius rodytų minimumą, o po to viskas kartojama iš naujo iki pilno balansavimo.

Matuojant talpas kondensatorių su dideliais nuostoliais yra naudojamas tiltelis su lygiagrečiąja ekvivalentine nuostolių schema

(6.13 pav.).



6.13 pav. Didelių nuostolių kondensatorių talpos matavimo tiltelis

Tiltelio pečių kompleksinės varžos:

$$Z_1 = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x},$$

$$Z_3 = R_3,$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2},$$

$$Z_4 = R_4.$$

Kai tiltelis subalansuotas:

$$\frac{R_x R_4}{1 + j\omega C_x R_x} = \frac{R_2 R_3}{1 + j\omega C_2 R_2}.$$

Remiantis šia lygtimi nustatomi elementų parametų dydžiai:

$$C_x = \frac{C_2 R_4}{R_3},$$

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}.$$

Nuostolių kampas:

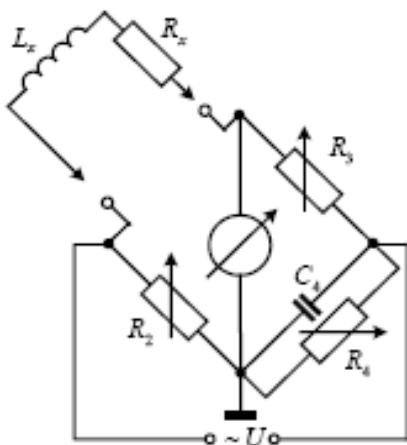
$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_x R_x} = \frac{1}{\omega C_2 R_2}.$$

6.4.4. Induktyvumų matavimo tilteliai

Tiltelio skirtu nuoseklos nuostolių schemas induktyvumui matuoti schema parodyta 6.14 pav. Jame reaktyvumo balansavimui panaudotas etaloninis kondensatorius C_4 su lygiagrečiai prijungtu etaloniniu rezistoriumi R_4 , balansuojančiu ritės nuostolių varžą.

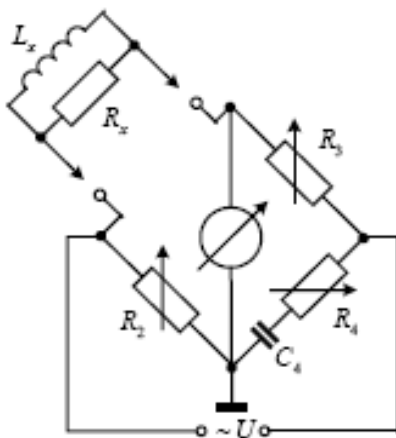
Etaloniniai elementai yra įjungti į priešingą induktyvumui

6. Elektronikos grandinių parametrų matavimas



6.14 pav. Nuosekliojo induktyvumo ekvivalento matavimo tiltelis su etaloniniu kondensatoriumi

$$\text{ir } L_x = C_4 R_3 R_2.$$



6.15 pav. Lygiagrečiojo induktyvumo ekvivalento matavimo tiltelis

tiltelio pečių.

Į kitus pečius įjungti varžynai R_3 ir R_2 .

Kompleksinės tiltelio pečių varžos:

$$Z_1 = R_x + j\omega L_x,$$

$$Z_2 = R_2,$$

$$Z_3 = R_3,$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}.$$

Esant pusiausvyrai:

$$\frac{(R_x + j\omega L_x)R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} = R_3 R_2$$

arba

$$R_x = \frac{R_3 R_2}{R_4}$$

Jeigu $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, tai L_x išreikštą henriais atitinka C_4 išreikštą mikrofaradais.

Ritės kokybė nustatoma taip:

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C_4 R_4.$$

Skiriamoji geba tokiuose tilteliuose siekia $0,1 \text{ }\mu\text{H}$, o maksimali matavimo riba yra iki 100 H .

Tilteliu, kurio schema parodyta 6.15 paveiksle yra matuojamas induktyvumas

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

lygiagrečioje nuostolių schemeje:

$$L_x = R_2 R_3 C_4 \quad \text{ir} \quad R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}.$$

Ritės kokybė:

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C_4 R_4.$$

Šio tiltelio parametrai tokie pat kaip ir aukščiau aprašytojo.

Paprastai visos kintamos srovės matavimo schemas ir nuolatinės srovės matavimo schema konstruktyviai sujungiamos viename universaliame matavimo tiltelyje. Reikalinga matavimo schema (tame tarpe ir nuolatinės srovės tiltelio) sujungiama perjungėjais.

Kintamosios srovės tiltelių maitinimo šaltinio srovės dažnis yra 100 Hz ir 1000 Hz. Kai naudojami aukštesni dažniai, labai padaugėja paklaidų, susidarantių dėl parazitinių talpinių ryšių tarp schemas elementų. Kruopštus atskirų elementų elektrostatinis ekranavimas praplečia universalių tiltelių maitinimo dažnį tik iki kelių dešimčių kilohercų.

Transformatoriniai diferencialiniai (su diferencialiniais transformatoriais) tilteliai yra didelio jautrumo ir matavimo tikslumo (matavimo paklaida gali būti iki $\pm 0,1\%$) ir plačiai naudojami kompleksinėms varžoms ir neelektriniams dydžiams matuoti.

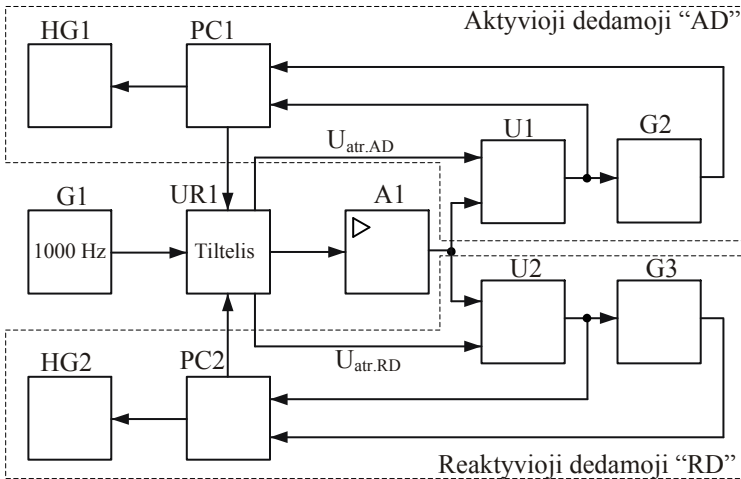
Aukštesnių dažnių (iki 250 MHz) grandinių parametrams matuoti naudojami T-tipo nesimetriniai tilteliai, tačiau jų tikslumas yra mažesnis.

6.4.5. Skaitmeniniai tilteliai

Skaitmeninio tiltelio struktūrinė schema parodyta 6.16 paveiksle. Tiltelis UR1 maitinamas generatoriumi G1, kurio signalo dažnis yra 1000 Hz. Tiltelio išbalansavimo įtampa, sustiprinta stiprintuvu A1, yra paduodama į aktyviosios dedamosios (AD) fazinį detektorių U1 ir reaktyviosios dedamosios (RD) fazinį detektorių U2. Į juos paduodamos ir atraminės įtampos. Tiltelio išbalansavimo įtampos iš fazinių detektorių yra paduodamos į reversinius skaitiklius PC1 ir PC2 bei impulsų generatorius G2 ir G3. Skaitikliai valdo tiltelio balansavimo elementus, o impulsų generatoriai nustato

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

reversinių skaitiklių PC1 ir PC2 skaičiavimo spartą.



6.16 pav. Struktūrinė skaitmeninio tiltelio schema:

G1 – tiltelio maitinimo generatorius; UR1 – tiltelis; HG1 ir HG2 – skaitmeniniai indikatoriai, rodantys atitinkamai aktyviąją ir reaktyviąją matuojamo elemento impedanso dedamąją; A1 – išbalansavimo signalo stiprintuvas; U1 ir U2 – faziniai detektoriai; G2 ir G3 – impulsų generatoriai; PC1 ir PC2 – reversiniai skaitikliai.

Reversinių skaitiklių skaičiavimo kryptis nustatoma fazinio detektoriaus teikiamos įtampos ženklu, o skaičiavimo sparta – šios įtampos dydžiu. Kuo tiltelis labiau išbalansuotas – t.y. kuo didesnė nesubalansavimo įtampa – tuo didesnis generatorių G2 ir G3 impulsų pasikartojimo dažnis ir kaip pasekmė – tuo aukštesnis reversinių skaitiklių skaičiavimo greitis. Todėl pradžioje tiltelio balansavimo procesas vyksta sparčiau. Artėjant balansui, išbalansavimo įtampa mažėja, todėl sulėtėja tiltelio balansavimo sparta. Pasiekus balansą, schemos darbas sustabdomas ir išmatuotos elementų parametru vertės atvaizduojamos indikatoriuose HG1 ir HG2.

Skaitmeninių tiltelių schemose naudojami transformatoriniai diferencialiniai tilteliai. Jų varžų matavimo ribos yra nuo 0,001 Ω iki 10 M Ω , talpos matavimo ribos nuo 0,1 μF iki 100 μF , o induktyvumo nuo 0,1 μH iki 1000 H. Elementų parametru matavimo

6. Elektronikos grandinių parametrų matavimas

santykinė paklaida yra apie $\pm 0,1\%$. Šiuo metu gaminama labai daug įvairių skaitmeninių RLC matavimo tiltelių. Vieno iš jų vaizdas yra pateiktas 6.17 paveiksle.

Esminis tiltelių metodo trūkumas yra tai, kad juose elementų parametrai matuojami esant žemam virpesių dažniui. Tuo tarpu elemento darbo dažnis gali būti didelis ir jo parametrai esant darbo dažniui bus jau kitokie.



6.17 pav. Skaitmeninio R,L,C tiltelio E7–8 vaizdas.

6.5. Rezonansiniai metodai

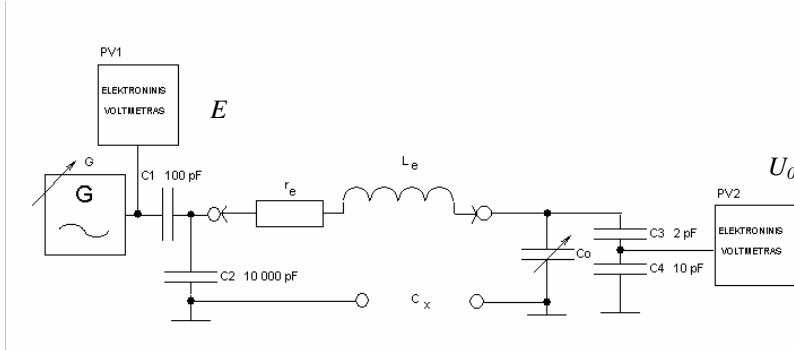
6.5.1. Rezonansinis kontūrinis metodas

Naudojant rezonansinį kontūrinį metodą, matuojamas elemento parametras surandamas pagal tai kaip jis keičia rezonansinių virpesių kontūro savybes. Kadangi rezonansinių virpesių kontūrai naudojami aukštų dažnių virpesių grandinėse, tai naudojant šį metodą parametrai matuojami aukštuose dažniuose. Tinka, kai elementai bus naudojami, pavyzdžiui, radijo dažnių elektronikos įtaisuose.

Šis metodas dažniausiai realizuojamas specialiuose matuokliuose – **kumetruose**, skirtuose R, L, C, Q ir $\tan \delta$ matavimams aukštuose dažniuose. Kumetrai gali būti sudaryti naudojant įvairias schemas. Plačiausiai naudojama kumetro funkcinė schema yra parodyta 6.18 paveiksle.

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

Schemą sudaro aukštojo dažnio generatorius G , kurio išėjimo įtampa yra matuojama elektroniniu voltmetru PV1. Generatoriaus įtampa per talpinį įtampos daliklį C_1 ir C_2 , sumažinantį schemos išėjimo varžą, yra prijungta prie nuosekliojo rezonansinių virpesių kontūro. Virpesių kontūras yra sudarytas iš matuojamos arba darbinės induktyvumo ritės ir etaloninių didesnės talpos pagrindinio C_0 ir mažesnės talpos papildomo C_p kondensatorių. Kaip aptarta 1 skyriuje, ritės savieji parametrai yra jos induktyvumas L , nuosekli nuostolių varža r_L ir ritės talpa C_L . Kumetre ritės tikroji grandinė yra pakeičiama ekvivalentine nuoseklia grandine sudaryta iš ekvivalentinio induktyvumo L_e ir ekvivalentinės nuoseklios nuostolių varžos r_e . Virpesių įtampa yra matuojama ant kontūro kondensatorių antru elektroniniu voltmetru PV2, prijungtu per papildomą įtampos daliklį C_3 ir C_4 , sumažinantį voltmetro įėjimo varžos ir įėjimo talpos įtaką.



6.18 pav. Kumetro funkcinė schema

Kontūro elementų ekvivalentinių ir savųjų parametru ryšys surandamas pareikalavus, kad rezonansinio dažnio srovei abiejų schemų kompleksinės varžos būtų lygios:

$$\frac{1}{r_L + j\omega_0 L} + j\omega_0 C_L = \frac{1}{r_e + j\omega_0 L_e},$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_e C}}, \quad C = \frac{C_0 C_2}{C_0 + C_2} \approx C_0.$$

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

Iš pateiktų formulių gauname tokias elementų savųjų ir ekvivalentinių parametų ryšio formules:

$$r_e \approx r_L \left(\frac{C_0 + C_L}{C_0} \right)^2, \quad L_e \approx L \left(\frac{C_0 + C_L}{C_0} \right), \quad Q_e \approx Q \left(\frac{C_0}{C_0 + C_L} \right).$$

Kai naudojamų ričių savoji talpa yra maža lyginant su kumetro etalonine talpa rezonanso metu, tai savieji ir ekvivalentiniai parametrai yra vienodi.

Matuojant ritės kokybę, ji prijungiama prie kumetro, nustatomas reikiamas generatoriaus dažnis ir, keičiant kondensatoriaus C_0 talpą, pasiekiamas kontūro įtampų rezonansas pagal PV2 voltmetro maksimalius rodmenis.

Kontūro su tiriamą rite kokybę nustato ritės kokybė, nes kumetro etaloninis kondensatorius yra orinis ir jo kokybė labai aukšta. Kontūro kokybės matavimo principą sudaro žinomas efektas, kad įtampa ant nuoseklaus virpesių kontūro reaktyvinių elementų rezonanso metu yra Q kartų didesnė už paduodamą į kontūrą įtampą:

$$U_0 = Q_e E, \quad Q_e = \frac{U_0}{E},$$

čia U_0 – kondensatoriaus C_0 įtampa, išmatuota voltmetru PV2 rezonanso metu; E – paduodama į kontūrą įtampa, išmatuota voltmetru PV1.

Kai voltmetro PV1 rodmuo E yra fiksuotas, voltmetro PV2 skalė gali būti graduojama kokybės Q vienetais. Naudojant kelias E vertes, gaunamas prietaisas su keliomis kokybės matavimo ribomis. Taigi toks prietaisas tiesiogiai matuoja kontūro ekvivalentinę kokybę, todėl ir pavadintas kumetru.

Kontūro kokybė yra atvirkščias dydis jo nuostolių kampo tangentui:

$$\tan \delta_e = \frac{1}{Q_e}.$$

Ričių induktyvumas ir nuostolių varža nustatoma netiesiogiai iš rezonanso dažnio ir kokybės:

$$L_e = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_0}, \quad r_e = \frac{1}{2\pi f_0 C_0 Q_e}.$$

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

Kondensatorių parametrai matuojami pakeitimo būdu. Naudojama darbinė ritė iš kumetro komplekto, kuri didžiausiai etaloninei talpai esant leidžia gauti rezonansą reikiamam dažniui.

Nustatoma didžiausia kumetro etaloninė talpa C_1 ir generatoriaus dažnio derinimo elementu kumetras suderinamas rezonansui be matuojamo kondensatoriaus. Gaunami tokie matavimų rezultatai:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_e C_1}}, \quad Q_{e1} = \frac{\omega_0 L_e}{r_{e1}}.$$

Po to prijungiama matuojama talpa C_x ir, sumažinus etaloninę talpą iki dydžio C_2 , kontūras vėl suderinamas rezonansui tam pačiam generatoriaus dažniui. Gaunami tokie rezultatai:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_e (C_2 + C_x)}}, \quad Q_{e2} = \frac{\omega_0 L_e}{r_{e2}}.$$

Kondensatoriaus talpa nustatoma kaip etaloninės talpos skirtumas, o kondensatoriaus nuostolių kampo tangentas lygiagrečiai nuostolių ekvivalentinei schemai surandamas iš kokybių skirtumo:

$$C_x = C_1 - C_2, \quad \tan \delta = \frac{1}{\omega_0 C_x r_x} = \frac{C_1(Q_{e1} - Q_{e2})}{Q_{e1} Q_{e2} (C_1 - C_2)}.$$

Kai ritės yra daugiasluoksnės, tai jų savoji talpa gali būti žymi. Tada ją tenka išmatuoti. Matavimas susideda iš dviejų etapų. Prijungiama ritė, kurios savoji talpa matuojama ir, nustačius didelę etaloninę talpą C_1 , kontūras suderinamas rezonansui keičiant generatoriaus dažnį. Rezonanso dažnio vertė, išreikšta per ritės savuosius parametrus, gaunama tokia:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{1}{\sqrt{L(C_1 + C_L)}}.$$

Po to generatoriaus dažnis padidinamas iki ω_2 ir kontūras vėl suderinamas rezonansui, keičiant etaloninio kondensatoriaus talpą iki mažesnio dydžio C_2 . Gaunamas toks rezonansinio dažnio ir ritės savųjų parametru ryšys:

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = \frac{1}{\sqrt{L(C_2 + C_L)}}.$$

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

Padalinus didesnę dažnį iš mažesnės ir eliminavus L , galime surasti ritės savąją talpą:

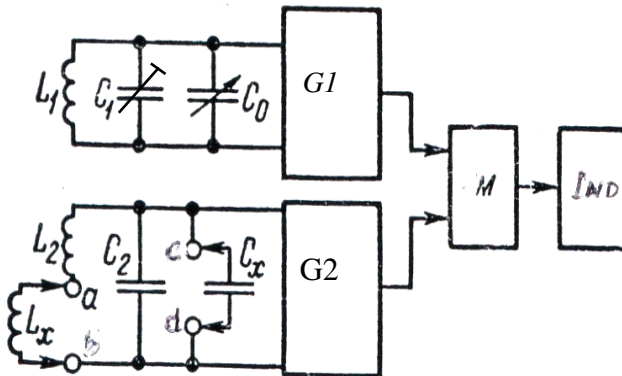
$$C_L = \frac{f_1^2 C_1 - f_2^2 C_2}{f_2^2 - f_1^2}.$$

Dažniausiai imama $f_2 = 2f_1$, tada $C_L = \frac{C_1 - 4C_2}{3}$. Galima

naudoti antrą dažnį ir dvigubai mažesnę. Formulę talpos skaičiavimui šiam atvejui siūlome išvesti patiems skaičiuojant.

6.5.2. Rezonansinis generatorinis metodas

Talpa ir induktyvumas gali būti išmatuoti ir dviejų aukšto dažnio generatorių dažnių palyginimo metodu (6.19 pav.). Metodas vadinamas rezonansiniu generatoriniu metodu. Šioje schemoje $G2$ – aukšto dažnio generatorius, prie kurio virpesių kontūro gali būti prijungta matuojamoji ritė arba kondensatorius. M – dažnių maišiklis su žemojo dažnio filtru, t.y. įtaisas, kurio išėjimo signalas yra lygus generatorių $G1$ ir $G2$ dažnių skirtumui; IND – indikatorius, rodantis kada dažnių skirtumas artimas nuliui. Tai gali būti dažniamatis, akustinis indikatorius arba kintamosios įtampos voltmestas.



6.19 pav. L ir C matavimas dviejų generatorių dažnių palyginimo metodu

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

Prieš matuojant, prietaisas kalibruojamas. Esant sujungtiems gnybtams ab ir atjungtiems – bc, bei nuliniam C_0 rodmeniui, generatorius $G1$ dažnis nustatomas paderinamu kondensatoriumi C_1 lygus generatoriaus $G2$ dažniui. Maišiklio išėjime gaunamas nulinis dažnis.

Dažnių lygybė rodo kontūrų LC sandaugų lygybę:

$$L_1 C_1 = L_2 C_2 .$$

Prijungus prie generatoriaus G_2 kontūro kondensatorių su matuojamąja talpa C_x , generatorių dažnių lygybė yra pažeidžiama.

Dažnių lygybė atstatoma, keičiant etaloninio kondensatoriaus talpą iki dydžio C_0 . Tada LC lygybė išreiškiama taip:

$$L_1 (C_1 + C_0) = L_2 (C_2 + C_x).$$

Iš šių dviejų lygybių gaunamas ryšys tarp matuojamosios talpos ir etaloninės talpos: $C_x = C_0$.

L_x matavimo procedūra yra analogiška C_x matavimui. Kalibravimas atliekamas taip pat. Po to gnybtai ab atjungiami ir prie jų prijungiama matuojamojo induktyvumo ritė. Dažnių lygybė pasiekama didinant etaloninio kondensatoriaus talpą iki C_0 :

$$(C_0 + C_1)L_1 = C_2(L_2 + L_x),$$

iš kur nustatomas ryšys tarp matuojamojo induktyvumo ir etaloninės talpos:

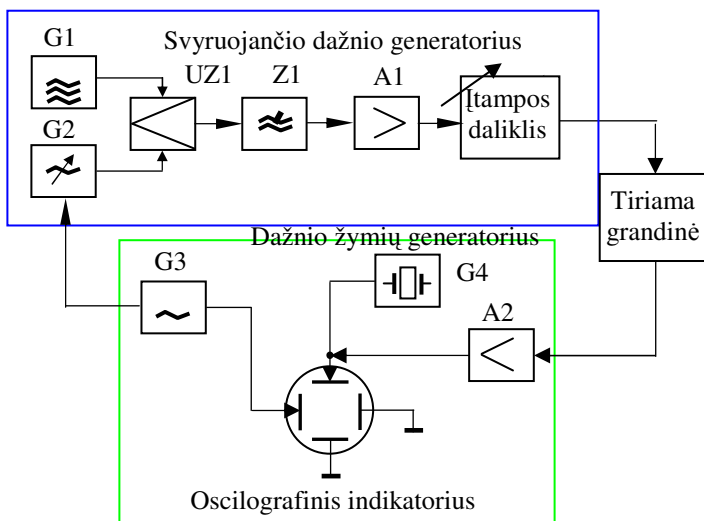
$$L_x = \frac{L_1 C_0}{C_2} = k C_0.$$

Kondensatoriaus skalė gali būti sugraduota taip pat ir induktyvumo vienetais. Generatoriniai rezonansiniai matuokliai matuoja netiesioginiu būdu, tačiau leidžia gauti tiesioginius matavimų rezultatus. Tokių matuoklių induktyvumo matavimo ribos yra nuo 0,05 μH iki 100 mH su apie ± 3 % santykinė paklaida ir talpos matavimo ribos nuo 1 pF iki 5000 pF su apie ± 5 % santykinė paklaida.

6.6. Amplitudės dažninių charakteristikų matuokliai

Elektroninių matavimų praktikoje tenka matuoti ir įvairių keturpolių, pavyzdžiui, stiprintuvų, filtrų dažnines charakteristikas. Matuojamos amplitudės dažninės, fazės dažninės ir grupinio vėlinimo laiko dažninės charakteristikos. Dažniausiai matuojamos amplitudės dažninės charakteristikos. Jų stebėjimui ir parametų matavimams yra sukurti panoraminiai amplitudės dažninių charakteristikų (ADCH) charakterografai.

ADCH charakterografo su oscilografiniu indikatoriumi struktūrinė schema yra pavaizduota 6.20 paveiksle.



6.20 pav. ADCH charakterografo su oscilografiniu indikatoriumi struktūrinė schema

Į tiriamo keturpolio įėjimą yra paduodamas pastovaus lygio signalas iš svyruojančio dažnio generatoriaus. Tai žinomo iš 2 skyriaus interferencinio generatoriaus variantas. Šį generatorių sudaro pastovaus dažnio aukšto dažnio generatorius G1 ir valdomo dažnio aukšto dažnio generatorius G2. Jų virpesiai dažnių maišiklyje UZ1 sumaišomi ir po žemo dažnio filtro Z1 gaunamas jų dažnių

6. Elektronikos grandinių parametrų matavimas

skirtumas. Dažnių skirtumo signalas stiprinamas stiprintuvu A1 ir jo išėjimo lygis nustatomas įtampos dalikliu.

Tiriamos grandinės išėjimo įtampa per stiprintuvą A2 yra paduodama į oscilografinio indikatorius vertikalios kreipimo kanalą.

Valdomo dažnio generatoriaus dažnis ir oscilografo horizontali skleistinė yra valdoma skleistinės generatoriaus G3 pjūklo dantų pavidalo įtampa.

Svyruojančio dažnio generatoriaus dažnio kitimo dėsnis sutampa su skleistinės įtampos kitimu, todėl skleistinės taško padėtis yra susieta su tam tikra dažnio verte, o oscilogramos taško nuokrypis pagal vertikalę yra proporcingas grandinės įtampos perdavimo koeficientui.

Dažnių nustatymo tikslumui padidinti yra naudojamas dažnio žymių generatorius. Tai kvarcinis generatorius G4, kurio virpesio harmonikos sumaišomos su vertikalios kreipimo įtampa ir sukuria amplitudines dažnio žymes.

ADCH charakterografai gaminami įvairiems dažnių diapazonams nuo žemųjų dažnių iki superaukštųjų dažnių. Šiuo metu yra gaminami ir skaitmeniniai ADCH charakterografai su dažnio sintezatorium ir mikroprocesoriniu valdymu, leidžiantys tiksliau nustatyti signalo lygius ir dažnio vertes.

6.7. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui

1. Kokie sutelktų parametrų grandinių elementų parametrai yra matuojami?

2. Kaip sujungiami matavimo prietaisai, matuojant mažas varžas ampermetro—voltmetro metodu?

3. Kaip sujungiami matavimo prietaisai, matuojant dideles varžas ampermetro—voltmetro metodu?

4. Kokia nuosekliojo ommetro schema ir skalės savybės?

5. Kokia lygiagrečiojo ommetro schema ir skalės savybės?

6. Kaip sudarytas Logometrinis ommetras?

7. Kokia yra elektroninio ommetro funkcinė schema ir veikimo principas?

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

8. Koks bendrasis parametų matavimo pagal pereinamojo proceso trukmę principas?

9. Nubraižykite skaitmeninio talpos matuoklio, matuojančio talpą pagal pereinamojo proceso trukmę struktūrinę schemą ir paaiškinkite jos veikimą? Kokius elementų parametrus dar galima matuoti naudojant tokią schemą?

10. Nubraižykite skaitmeninio talpos matuoklio, matuojančio talpą pagal autovirpesių periodą struktūrinę schemą ir paaiškinkite jos veikimą? Kokius elementų parametrus dar galima matuoti naudojant tokią schemą?

11. Kokias elementų parametų matavimo schemas vadina tilteliais ir kokie jie būna?

12. Nubraižykite klasikinio keturių pečių kintamosios srovės tiltelio schemą ir užrašykite jos balanso sąlygas.

13. Kodėl tiltelyje stengiamasi turėti kuo mažiau reaktyvinių varžų?

14. Kaip į tiltelį įjungiamos vienos rūšies reaktyvinės varžos ir kaip – skirtingų rūšių?

15. Kokie matavimo prietaisai naudojami tiltelių pusiausvyrai stebėti?

16. Nubraižykite tiltelio schemą mažų nuostolių talpos matavimui ir užrašykite jos parametų matavimo lygtis.

17. Kokie yra rezonansiniai R , L , C matavimo metodai ir jų panaudojimo sritys?

18. Kaip sudarytas ir veikia kumetras? Kaip nustatoma kokybė?

19. Kodėl kumetras matuoja ekvivalentinius, o ne savuosius elementų parametrus?

20. Kaip matuojama talpa kumetru?

21. Kaip matuojamas induktyvumas kumetru?

22. Kaip sudaryti ir veikia generatoriniai L ir C matuokliai?

23. Atlikite 16 užduotį ričių induktyvumo matavimui nuosekliai jų nuostolių schemai.

24. Kaip galima išmatuoti dvejų ričių tarpusavio induktyvumą?

25. Kodėl paprastu simetriniu tilteliu negalima išmatuoti mažų varžų ir tenka naudoti dvigubą tiltelį?

26. Nuo kuo priklauso tiltelių matavimo paklaidos?

27. Kokias žinote tiltelių rūšis?

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

28. Koks subalansuoto tiltelio varžos R_1 dydis, jeigu likusių pečių varžos, pavyzdžiui, yra tokios: $R_2=100\ \Omega$, $R_3=2000\ \Omega$, $R_4=524\ \Omega$? Atsakymas: $R_1=26.6\ \Omega$.

29. Koks ritės induktyvumas, nuostolių varža ir kokybė (nuosekli nuostolių atstojamoji schema), jei subalansuoto tiltelio su lygiagrečiai sujungtais RC etaloniniais elementais parametrai, pavyzdžiui, yra tokie: $R_2=100\ \Omega$, $R_3=1000\ \Omega$, $C_3=1\ \mu\text{F}$, $R_4=100\ \Omega$, $f=1000\ \text{Hz}$? Atsakymas: $L_1=10\ \text{mH}$, $R_1=10\ \Omega$, $Q=6.3$.

30. Kokia kondensatoriaus talpa ir koks nuostolių kampo tangentas, jeigu matuojant nuoseklioje nuostolių atstojamojoje schemoje subalansuoto tiltelio parametrai, pavyzdžiui, yra tokie: $R_2=1\ \text{k}\Omega$, $R_3=500\ \Omega$, $C_4=0,1\ \mu\text{F}$, $R_4=10\ \Omega$, $f=1000\ \text{Hz}$? Atsakymas: $C_1=0,05\ \mu\text{F}$, $\tan\delta=0.006$.

31. Kaip sudarytas skaitmeninis tiltelis?

32. Kaip sudaryti ir veikia ADCH charakterografai?