

Srovės ir įtampos matavimas

Šiame skyriuje nagrinėjamos srovės ir įtampos matavimo priemonės. Srovė ir įtampa yra vieni iš svarbiausių elektrinių virpesių parametrų. Srovės dažniausiai matuojamos nuolatinės srovės ir pramoninio dažnio kintamosios srovės grandinėse. Elektronikoje dažniausiai matuojama įtampa. Tai sąlygoja srovės matavimo priemonių aukštiems dažniams nebuvimas bei tas faktas, kad srovei matuoti dažniausiai būtina nutraukti elektros grandinę, o to padaryti šiuolaikiškose elektronikos konstrukcijose tiesiog neįmanoma jų nesugadinus.

Srovių matavimas elektronikoje dažniausiai pakeičiamas įtampos kritimo ant grandinės žinomos varžos elemento matavimu.

Todėl apsiribosime tik srovės matavimo priemonių nuolatinei ir pramoninio dažnio kintamajai srovei aptarimu, o pagrindinį dėmesį skirsime įtampos matavimams. Elektronikoje įtampos matuojamos nuo nuolatinės srovės ir infradžėmųjų dažnių iki superaukštųjų dažnių. Virpesių formos yra labai įvairios. Įtampos matuojamos labai plačiame verčių intervale nuo mikrovoltų dalių iki šimtų kilovoltų. Be to, grandinių varžos dažniausia yra didelės, todėl voltmetrų įėjimo varžos turi būti ypač didelės ir elektronikoje įtampai matuoti naudojami elektroniniai metodai ir priemonės.

3. Srovės ir įtampos matavimas

3.1. Bendrosios žinios

Matuojant sroves arba įtampas pirmiausia reikia apytiksliai žinoti koks šio virpesio dažnis, kreivės forma, kokia maždaug gali būti šių parametų vertė, kokia gali būti šių dydžių matavimo paklaida ir kokia yra grandinės varža, kurioje vykdomas matavimas. Šie pradiniai duomenys leidžia pasirinkti tinkamą matavimo metodą ir matavimo priemonę: ampermetrą ir voltmetrą.

Srovė matuojama ampermetrą įjungiant nuosekliai į tiriamą grandinę (nutraukiant grandinės). Kad grandinės elektrinis režimas nepakistų, reikia, kad ampermetro varža R_A būtų žymiai mažesnė už grandinės varžą R_G . Jeigu ši sąlyga neįvykdyta, tai gaunama papildoma metodo paklaida, kurios dydis yra maždaug lygus santykiui R_A/R_G .

Įtampa matuojama voltmetrą jungiant lygiagrečiai tai grandinės daliai, įtampa ant kurios yra matuojama. Kadangi voltmetro varža yra R_V , tai per jį irgi teka srovė ir dėl padidėjusios grandinės srovės pakinta įtampa ant grandinės gnybtų. Taigi voltmetras pakeičia matuojamą įtampą ir sukelia papildomą metodo paklaidą. Šios paklaidos dydis yra maždaug lygus santykiui R_G/R_V . Todėl reikia, kad voltmetro varža būtų žymiai didesnė už grandinės varžą. Elektronikos grandinės yra silpnų srovių, t.y. didelių varžų, todėl nurodytą sąlygą sunku išlaikyti. Naudojami elektroniniai voltmetrai, kurių įėjimo varžos siekia šimtus megaomų.

Nuolatinės srovės ir įtampos yra matuojamos tiksliau nei kintamosios. Augant virpesių dažniui, matavimo paklaidos didėja.

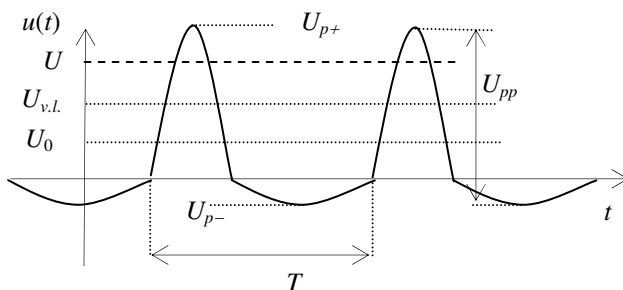
Kaip nustatėme pirmajame skyriuje, tiksliau matuoja palyginimo būdu veikiančios matavimo priemonės. Todėl ir įtampas tiksliau matuoja voltmetrai, kurie veikia palyginimo būdu: **kompensaciniai voltmetrai**. Palyginimo metodai naudojami ir skaitmeniniuose voltmetruose, todėl jų tikslumas irgi yra didesnis.

Elektronikoje įtampos yra matuojamos virpesių, kurių dažnis yra iki maždaug 2 GHz. Vėliau matuojama virpesių galia.

3.2. Įtampų vertės. Amplitudės ir formos koeficientai

Įtampų matavimai elektronikos grandinėse yra ypatingi tuo, kad tenka matuoti ir nuolatines įtampas, o taip pat ir labai žemo ir labai aukšto dažnio kintamąsias įtampas. Matuojamų įtampų intervalas yra labai platus: nuo mikrovolto dalių iki dešimčių ir net šimtų kilovoltų. Matuojamų kintamųjų įtampų formos yra tai pat labai įvairios. Voltmetrų, skirtų matuoti įtampas elektronikos grandinėse, įėjimo varžos turi būti didelės, o įėjimo talpos – mažos.

Voltmetrais matuojamos įtampų vertės yra įvairios.



3.1 pav. Matuojamos įtampos vertės

Paprasčiausiu atveju tai **vidutinė** per stebėjimo laiką T (arba per periodą T , periodiniam virpesiui) įtampos $u(t)$ vertė (3.1 pav.):

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (3.1)$$

Nuolatinės įtampos atveju ši vertė sutampa su nuolatine įtampos verte. Simetrinei įtampai (pvz., harmoninei) ši vertė yra lygi nuliui.

Gali būti matuojamos ir įtampos **pikinės vertės**: didžiausia per stebėjimo laiką T (arba per periodą T , periodiniam virpesiui) įtampos vertė teigiama U_{p+} ir neigiama U_{p-} , o taip pat **pikų suma** (įtampos sklaidos intervalas) $U_{pp} = U_{p+} + U_{p-}$. Harmoniniam virpesiui pikinės vertės vienodos ir sutampa su amplitudės verte U_m , o $U_{pp} = 2U_m$.

3. Srovės ir įtampos matavimas

Įtampos $u(t)$ **vidutinė išlygintoji** per stebėjimo laiką T (arba per periodą T , periodiniam virpesiui) vertė aprašoma taip:

$$U_{v.l.} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt.$$

Įtampos $u(t)$ **vidutinė kvadratinė** (*angl.* RMS, rms – root mean square) per stebėjimo laiką T (arba per periodą T , periodiniam virpesiui) vertė išreiškiama taip:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [u(t)]^2 dt}. \quad (3.2)$$

Dažnai vidutinė kvadratinė vertė yra vadinama **efektine** verte. Šis terminas buvo įvestas, grindžiant šia vertę srovės šiluminiu veikimu.

Nuolatinės įtampos arba srovės visos vertės yra vienodos ir sutampa su vidutine verte.

Kintamosios įtampos impulsiniai voltmetrai graduojami *amplitudinėmis* vertėmis, o *visi kiti voltmetrai – harmoninės įtampos efektinėmis* vertėmis.

Pikinės (arba amplitudės) vertės santykį su vidutine kvadratine verte vadina **įtampos amplitudės koeficientu** (*angl.* crest factor):

$$k_A = \frac{U_m}{U},$$

o efektinės vertės santykį su vidutine išlygintąja verte – **įtampos formos koeficientu** (*angl.* form factor):

$$k_F = \frac{U}{U_{v.l.}}.$$

Harmoninei įtampai $k_A = \sqrt{2}$, o esant šios įtampos dvipusiam išlyginimui $k_F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11$. Kitų formų įtampoms šie dydžiai yra

kitokie ir priklauso nuo įtampos kreivės formos (žr. toliau).

Kadangi kintamosios įtampos voltmetrai, priklausomai nuo veikimo principo ir struktūros, savo funkciniais keitikliais keičia matuojamą įtampą iki tam tikros vertės, o jų rodmenys pritaikyti atvaizduoti sinusinės įtampos efektines vertes, tai dėl šios priežasties

3. Srovės ir įtampos matavimas

kintamosios įtampos voltmetrų rodmenys priklauso nuo matuojamos įtampos kreivės formos.

Matuojant tos pačios amplitudės ir dažnio sinusinio virpesio įtampą voltmetrais su skirtingais funkciniais keitikliais, jų rodmenys bus vienodi. Taip yra dėl minėtos gradavimo sąlygos. Jei tų pačių dažnio ir amplitudės periodinių virpesių forma skirsis nuo sinusinės, tai skirtingų funkcinų keitiklių voltmetrų rodmenys bus skirtingi, nes juose bus skirtingi ryšiai tarp keitiklio teikiamos įtampos vertės ir tos įtampos efektinės vertės – voltmetrai nerodys įtampos efektinės vertės. Teisingas bus tik voltmetro teikiančio efektinę vertę rezultatas: jis visuomet rodys matuojamos įtampos vidutinę kvadratinę vertę.

Tokiu būdu, matuojant skirtingų formų periodinių virpesių įtampą, matuojamų verčių (efektinės, pikinės, vidutinės išlygintos) dažniausia negalima tiesiai nustatyti iš voltmetrų rodmenų. Jas galima tik apskaičiuoti žinant kokį funkcinį keitimą vykdo voltmetras ir kokia matuojamosios įtampos kreivės forma.

Atliekant skaičiavimus reikia atsižvelgti į tokias aplinkybes:

1. Koks *funkcinis keitiklis* (vidutinės išlygintosios, pikinės ar vidutinės kvadratinės vertės) naudojamas voltmetre.
2. Kad visi voltmetrai, išskyrus impulsinius sugraduoti rodyti sinusinės formos įtampos vidutinės kvadratinės (efektinės) vertes.
3. Koks voltmetro įėjimas – *uždaras* ar *atviras* įtampos nuolatinei dedamajai. Tai svarbu nesimetrinių, t.y. turinčių nuolatinę dedamąją, virpesių atveju. Uždaro įėjimo voltmetro funkcinis keitiklis nereaguoja į matuojamos įtampos nuolatinę dalį.
4. Kokios kreivės formos virpesio įtampa matuojama. Koks virpesys – simetrinis ar nesimetrinis. Kokie tos konkrečios įtampos amplitudės ir formos koeficientai. Koks impulsinių virpesių retis. Jei amplitudės ir formos koeficientai nežinomi, reikia pagal virpesio oscilogramą parinkti jo laikinės funkcijos matematinę išraišką ir ją naudoti skaičiuojant.

Išnagrinėkime kintamosios įtampos matavimų konkrečius atvejus. Tarkime, kad periodinio virpesio laikinės funkcijos analizinė

3. Srovės ir įtampos matavimas

išraiška yra žinoma ir aprašoma funkcija $u(t)$, o matavimas vykdomas kintamosios įtampos elektroniniais voltmetrais (ne impulsiniais), kurių įėjimo grandinės visuomet uždaros įtampos nuolatinei dedamajai.

Nagrinėjime *pirmąjį atvejį*, kai matuojame voltmetru turinčiu *vidutinių kvadratinių verčių keitiklį* (angl. true RMS). Tada voltmetro rodmuo U_v sutampa su matuojamosios kintamosios įtampos vidutine kvadratine verte ir yra lygus:

$$U_v = U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [u(t) - U_0]^2 dt}.$$

Kitos įtampos vertės gali būti tik apskaičiuotos: $U_m = k_A U_v$, o $U_{v.l.} = \frac{U_v}{k_F}$.

Antruoju atveju matavimas vyksta voltmetru su *pikiniu* detektoriumi. Tada voltmetro rodmuo yra toks:

$$U_v = \frac{U_m - U_0}{\sqrt{2}}.$$

Kaip matome, iš jo rodmens gali būti nustatyta tik amplitudės vertė:

$$U_m = \sqrt{2} U_v - U_0,$$

o kitos vertės tik apskaičiuotos: $U = \frac{U_m}{k_A}$ ir $U_{v.l.} = \frac{U}{k_F}$.

Trečiuoju atveju, kai naudojamas voltmetras su *vidutinių išlygintų verčių* detektoriumi ir dvipusiu kintamosios įtampos išlyginimu, jo rodmuo gaunamas toks:

$$U_v = 1,11 \frac{1}{T} \int_0^T |u(t) - U_0| dt.$$

Iš tokio voltmetro rodmens tegali būti apskaičiuota virpesio kintamosios įtampos vidutinė išlyginta vertė:

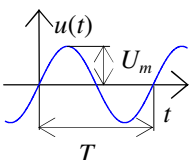
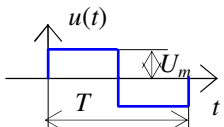
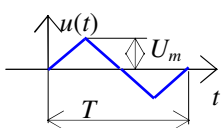
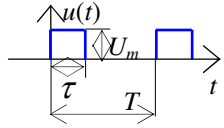
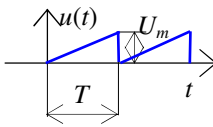
$$U_{v.l.} = \frac{U_v}{1,11}.$$

Kitos įtampos vertės tegali būti apskaičiuotos: $U = k_F U_{v.l.}$ ir $U_m = k_A U$.

3. Srovės ir įtampos matavimas

3.1 lentelėje yra pateiktos kai kurių formų įtampų amplitudės ir formos koeficientų vertės išreikštos per tos formos įtampos parametrus. Kadangi matuojant įtampas kintamosios įtampos voltmetrais jie nereaguoja į įtampų nuolatinės dedamąsias, tai vertinant šiuos koeficientus nesimetrinėms įtampoms *nuolatinės dedamosios yra atmetamos*.

3.1 lentelė. Kai kurių formų įtampų amplitudės ir formos koeficientai

Eil. Nr.	Virpesio forma	Virpesio grafikas	k_A	k_F
1.	Sinusinis virpesys		$\sqrt{2}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11$
2.	Stačiakampis simetrinis virpesys (meandras)		1	1
3.	Trikampis simetrinis virpesys		$\sqrt{3}$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1,16$
4.	Stačiakampių vieno ženklo impulsų periodinė seka		$\frac{Q}{\sqrt{Q-1}}, Q = \frac{T}{\tau}$	$\frac{Q}{2\sqrt{Q-1}}$
5.	Pjūklo dantų formos nesimetrinis virpesys		$2\sqrt{3}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$

3. Srovės ir įtampos matavimas

3.3. Elektromechaniniai rodykliniai matavimo prietaisai

3.3.1. Bendrasis veikimo principas ir dinaminės savybės

Elektromechaniniai prietaisai yra tiesioginio keitimo ir juose matuojamasis dydis yra keičiamas iki rodmenų įtaiso rodmens. Daugiausia naudojami rodmenų įtaisai su rodyklėmis ir brūkšninėmis skalėmis.

Elektromechaninio prietaiso matavimo mechanizme elektros energija imama iš matavimo grandinės ir keičiama į mechaninę energiją, judinančią judančią prietaiso dalį.

Dažniausiai naudojama besisukanti sistema su vienu laisvės laipsniu sukimosi ašies atžvilgiu.

Elektromechaninių prietaisų sukimo momentas aprašomas Lagranžo antros rūšies lygtimi:

$$M = \frac{dW_e}{d\alpha}, \quad (3.3)$$

čia W_e – kurianti sukimo momentą elektromagnetinio lauko energija, α – posūkio kampas.

Pagal sukimo momentą sukeliančios elektromagnetinės energijos keitimo į mechaninę energiją būdą elektromechaniniai prietaisai skirstomi į tokias pagrindines grupes:

- 1) magnetoelektriniai;
- 2) elektromagnetiniai;
- 3) elektrodinaminiai;
- 4) elektrostatiniai;

Priklausomai nuo konstrukcijos, kai kuriose grupėse išskiriami pogrupiai. Pavyzdžiui, magnetoelektriniai prietaisai gali būti su judančiu magnetu ir nejudančiu rėmeliu ir atvirkščiai.

Atskirų grupių prietaisų mechanizmų dinamika aprašoma konkretizuojant (3.3) lygtį.

Kad posūkio kampas α būtų tam tikras ir proporcingas matuojamam dydžiui, prietaise sukuriamas priešpriešos momentas M_{α} , nukreiptas prieš sukimo momentą ir priklausantis nuo posūkio kampo.

3. Srovės ir įtampos matavimas

Pagal priešpriešos momento sudarymo būdą prietaisai skirstomi į dvi grupes:

- 1) su mechaniniu priešpriešos momentu;
- 2) su elektriniu priešpriešos momentu.

Pirmojoje grupėje M_α sukuriamas tamprusis elementais: spiralinėmis spyruoklėmis arba plonais susukamais vielos siūleliais. Tada:

$$M_\alpha = W\alpha, \quad (3.4)$$

čia W priklauso tik nuo tampriojo elemento savybių ir vadinama lyginamuoju priešpriešos momentu.

Antros grupės prietaisuose priešpriešos momentą sukuria elektrinis dydis. Juose judančios dalies pasisukimo kampas gaunamas proporcingas elektrinių dydžių santykiui. Tokius prietaisus vadina **logometrais** (graik. logos – santykis).

Judant prietaiso besisukančiai daliai, be minėtų momentų atsiranda ir kiti. Tai judančios dalies inercijos momentas, proporcingas sukimosi pagreičiui ir specialiai sudaromas stabdantis judėjimą momentas, vadinamas slopinimo momentu, reikalingas, kad greičiau užgestų judančios dalies, išvestos iš pusiausvyros, svytavimai.

Stabdymui naudojamos specialios priemonės – judesio slopintuvai. Dažniausiai naudojami oriniai ir magnetoindukciniai slopintuvai, kurių slopinimo momentas yra proporcingas judančios dalies kampiniam greičiui:

$$M_s = b \frac{d\alpha}{dt},$$

čia b yra slopintuvo slopinimo koeficientas.

Sistemos judesio lygtis gaunama sulyginus sukimo momentą ir sumą momentų besipriešinančių sukimui:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + b \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = \frac{dW_e}{d\alpha}.$$

Nusistovėjusiame režime, kai poveikis nekinta, gauname:

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dW_e}{d\alpha}.$$

Įvedus naujus žymėjimus, judesio lygtis gali būti užrašyta taip:

3. Srovės ir įtampos matavimas

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + 2\omega_0 \beta \frac{d\alpha}{dt} + \omega_0^2 \alpha = C \frac{dW_e}{d\alpha},$$

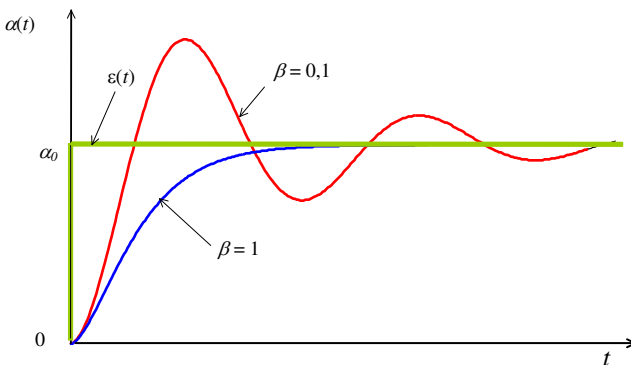
kur $\omega_0^2 = \frac{W}{J}$, ω_0 – sistemos rezonansinių virpesių dažnis;

$$\beta = \frac{b}{2\sqrt{JW}} - \text{sąlyginis slopinimas, } C = \frac{1}{J}.$$

Kai slopinimas mažas sistema turi ryškiai išreikštas rezonansines savybes ir ilgą pereinamųjų procesų trukmę. Kai sąlyginis slopinimas artimas vienetui sistemos savybės yra aperiodinės. Daugumos rodyklinių elektromechaninių matavimo prietaisų rezonansiniai dažniai yra labai maži (hercų eilės dydžiai) ir jų perdavimo koeficientas K_0 nusakomas posūkio kampo dydžiu atitinkančiu vidutinio sukimo momento perdavimą

$$\alpha = K_0 \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt.$$

Elektromechaninio matavimo mechanizmo pereinamoji charakteristika (reakcija į vienetinę funkciją $\varepsilon(t)=1(t)$) yra atvaizduota 3.2 paveiksle ir rodo, kad esant pakankamam slopinimui, procesas yra aperiodinio pobūdžio ir pereinamojo proceso trukmė sumažėja iki 3–4 sekundžių.



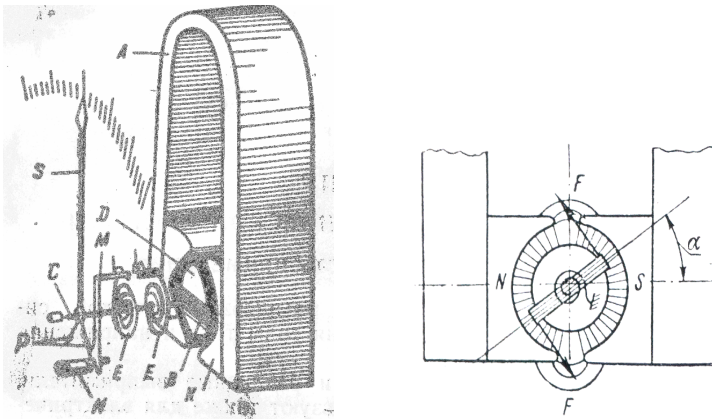
3.2 pav. Elektromechaninio matavimo mechanizmo pereinamosios charakteristikos

Pagal tikslumą elektromechaniniai matavimo prietaisai skirstomi į tikslumo klases nuo 0,05 iki 4,0.

3.3.2. Magnetoelektriniai rodykliniai matavimo prietaisai

Magnetoelektriniuose matavimo prietaisuose sukimo momentas sukuriamas sąveikaujant nuolatinio magneto ir laidininko su srove (rėmelio) magnetiniame lauke.

Labiau paplitę prietaisai su judančia rite ir nejudančiu magnetu (3.3 pav.) nes jų jautris yra didesnis.



3.3 pav. Magnetoelektrinis prietaisas su judriu rėmeliu: kairėje – konstrukcijos schema, dešinėje – magneto ir ritės su srove sąveikos schema. A–pastovus magnetas, K–polių antgaliai, D–nejudantis cilindras iš minkštų magnetinių savybių plieno, B–rėmelio pavidalo judanti ritė su srove, C–ašis, S–rodyklė, E–spiralinės spyruoklės, N–korektorius ir jo svirtelė M, P–balansavimo svareliai

Srovė į rėmelio apviją tiekama per priešveikos spyruokles E. Tekant srovei rėmelio apvija, polių antgalių radialiniame magnetiniame lauke atsiranda jėga F , veikianti rėmelį taip, kad jo plokštuma būtų statmena magnetinių jėgos linijų kryptiai. Kartu pasisuka ir ašis C su rodykle S. Pasiekus sukančiojo ir priešpriešos momentų lygybę judanti dalis sustoja, o rodyklė yra pasukta per eilę padalų kampų α .

Elektromagnetinė energija W_e sudaranti sukimo momentą yra sąlygojama magneto magnetinio lauko sudaromo magnetinio srauto surišto su rėmelio vijomis Φ ir ritės su srove I sąveikos energija $I\Phi$.

Iš (3.3) sukimo momentas yra lygus:

3. Srovės ir įtampos matavimas

$$M = \frac{dW_e}{da} = \frac{d(\Phi I)}{da} \quad (3.5)$$

Dydis Φ randamas sudauginant indukciją B oro tarpelyje, rėmelio vijų skaičių n ir dviejų rėmelio šoninių paviršių, kai rėmelis pasuktas kampu α nuo neutralios padėties, plotą s :

$$\Phi = Bsn\alpha.$$

Rėmelio šonai, esantys statmenoje sukimosi ašiai plokštumoje, judant slysta išilgai magnetinio lauko jėgų linijų ir nekerta jų, dėl to neturi įtakos sukimo momentui.

Kadangi priešpriešos momentas sudaromas spyruoklėmis, tai, įvertinę (3.4) ir (3.5), esant pusiausvyrai, gauname posūkio kampo formulę:

$$\alpha = \frac{Bsn}{W} I = S_i I, \quad (3.6)$$

čia S_i yra prietaiso jautris srovei.

Formulė (3.6) yra magnetoelektrinio prietaiso skalės lygtis. Ji rodo, kad pakeitus srovės tekėjimo kryptį, pasikeičia ir judančios dalies atsilenkimo kampo kryptis. Taigi magnetoelektrinis prietaisas yra nuolatinės srovės matuoklis. Jungiant jį į elektros grandinę reikia vertinti grandinės ir prietaiso gnybtų poliškumą. Kintamosios nesimetrinės srovės grandinėse jis reaguoja tik į nuolatinę srovės dedamąją. Simetrinės srovės grandinėje dėl žymios inercijos ir žemo rezonanso dažnio, jo rodmenys yra lygūs nuliui ir tik kai dažniai yra hercų eilės galimas judančios dalies švytavimas. Jautris nepriklauso nuo atsilenkimo kampo ir yra pastovus skalės ribose, t.y. skalė gaunama tolygi (tiesinė). Tai leidžia gaminti daugelio ribų ir kombinuotus (įtampai, srovei ir kt.) prietaisus.

Tokių prietaisų didžiausias privalumas yra jų didelis jautris srovei (iki 10 nA), aukštas tikslumas (klasės nuo 0,05) ir mažas galios suvartojimas iš elektros grandinės (nuo 1 μ W). Dėl stipraus savojo magnetinio lauko mažai įtakos daro pašaliniai magnetiniai laukai. Taip pat praktiškai jų neveikia išoriniai elektriniai laukai. Pagrindinis paveiklusis dydis yra aplinkos temperatūra, tačiau paklaidos dėl temperatūros kitimo gali būti kompensuojamos specialiomis schemomis.

3. Srovės ir įtampos matavimas

Tokie prietaisai plačiai naudojami kaip galvanometrai (srovės nuo 100 nA), ampermetrai (srovės nuo 1 μ A iki 30 mA, o su gretvaržėmis iki 7,5 kA) ir voltmetrai (įtampoms nuo 1 μ V, o su priešvaržėmis iki 3 kV) nuolatinės srovės grandinėse. Su funkciniais keitikliais magnetoelektriniai prietaisai naudojami kaip rodmenų įtaisai (indikatoriai) elektroninėse analoginėse matavimo priemonėse. Tačiau jie yra sudėtingesni ir todėl brangesni, neatsparūs perkrovimams (gali deformuotis ar net perdegti spyruoklės), be funkcinų keitiklių tinka tik nuolatinės srovės grandinėse.

Kaip minėta, priešpriešos momentas gali būti sukurtas ne tik mechaniniu, bet ir elektriniu būdu. Tai išnaudojama *magnetoelektriniuose logometruose*.

Judrioji dalis juose sudaryta iš dviejų tarpusavyje kryžmai sutvirtintų rėmelių, per kurių apvijas teka srovės I_1 ir I_2 . Priešpriešos spyruoklės čia nenaudojamos, o srovė perduodama į apvijas plonomis netampriomis laidžiomis juostelėmis. Apvijų srovių tekėjimo kryptys parenkamos taip, kad rėmelių srovių sukurti momentai M_1 ir M_2 , veiktų vienas prieš kitą.

Magnetoelektriniai logometrai naudojami nuolatinės srovės ommetruose ir vatmetruose.

3.3.3. Elektromagnetiniai rodykliniai matavimo prietaisai

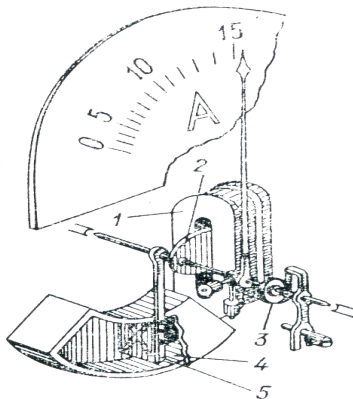
Elektromagnetiniuose matavimo prietaisuose sukimo momentas sukuriamas sąveikaujant rite tekančios matuojamos srovės sukurtam magnetiniam laukui, su viena ar keliomis feromagnetinėmis šerdimis. Paprastai ritės daromos nejudančiomis, o šerdys yra judančios.

Plačiausiai naudojamos yra mechanizmų konstrukcijos su plokščia šerdimi ir plokščia rite.

Ritė 1 su plokščiu tarpeliu viduje (3.4 pav.) suvyniota variniu laidu. Į tarpelį įeina ekscentriškai pritvirtinta prie ašies šerdis 2, pagaminta iš magnetiškai minkštų savybių elektrotechninio plieno ar permalojaus su didele magnetine skvarba. Tai leidžia sumažinti koercityvinės jėgos įtaką ir histerezės sukeltą rodmenų variaciją bei paklaidas, o taip pat gauti didesnę sukimo momentą ir sumažinti

3. Srovės ir įtampos matavimas

šerdies permagnetinimui naudojamą galingumą. Priešpriešą sudaro spyruoklė 3, o švytavimus slopina orinis dempferis, kurį sudaro kanalas 4 ir stūmoklis 5.



3.4 pav. Elektromagnetinis matavimo prietaisas su plokščia šerdimi

Konstruktiviai elektromagnetiniai matavimo mechanizmai yra iš visų grupių paprasčiausi.

Ritės su srove I ir šerdies sistemos elektromagnetinė energija W_e , sukurianti sukimo momentą, priklauso nuo posūkio kampo, nes ritės induktyvumas L priklauso nuo šerdies padėties:

$$W_e = \frac{LI^2}{2};$$

Sukimo momento išraiška yra tokia:

$$M = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}.$$

Jeigu priešpriešos momentas sukuriamas tampriais elementais (spyruoklėmis), tai nusistovėjusiam režimui gauname:

$$\alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (3.7)$$

Iš šios lygties matosi, kad judančios dalies atsilenkimo kampo ženklas nepriklauso nuo srovės ritėje krypties.

Taigi, tokiais prietaisais galima matuoti ir kintamos ir nuolatinės srovės grandinėse. Prietaisas reaguoja į efektingą kintamosios srovės vertę.

3. Srovės ir įtampos matavimas

Elektromagnetinio prietaiso skalė yra netolygi. Jos charakteris priklauso nuo $\frac{dL}{d\alpha}$, t.y. nuo induktyvumo kitimo priklausomai nuo šerdies posūkio kampo ir dėl kampo priklausomybės nuo srovės kvadrato. Praktiškai tolygi skalė pasiekama pradedant (20–25) % nuo ribinės srovės vertės.

Naudojami ir elektromagnetiniai logometrai. Jų šerdys ant ašies pritvirtintos taip, kad sukantis judamai daliai vienos ritės induktyvumas didėja, o kitos mažėja. Todėl sukimo momentai yra nukreipti į priešingas puses.

Elektromagnetiniai matavimo mechanizmai naudojami ampermetruose (srovėms nuo 100 mA, su gretvaržėmis iki 500 A, o su srovės transformatoriais iki 15 kA), voltmetruose (įtampoms nuo 1,5 V iki 600 V su priešvaržėmis ir iki 450 kV su įtampos transformatoriais), o logometrai – fazometruose, vatmetruose ir dažniamačiuose (dažniams nuo 45 Hz iki 55 Hz).

Šie prietaisai yra nerezonansiniai, t.y. savųjų svyravimų dažnis judančioje sistemoje nesuderintas rezonansui su ritės kintamosios srovės dažniu.

Elektromagnetiniai prietaisai yra ne tik paprastos konstrukcijos, pigūs, bet ir išlaiko didelius perkrovimus. Naudojami iki 10 kHz dažnio kintamosios srovės grandinėse.

Tačiau jie mažo tikslumo (klasės nuo 1,0) ir jautrumo, todėl sunaudoja nemažą galingumą iš matavimo grandinės (apie 1 W). Be to, jų savybėms didelės įtakos turi išoriniai magnetiniai laukai. Taip yra dėl jų silpno savojo magnetinio lauko. Išorinių laukų įtaka mažinama mechanizmų ekranavimu ir *astatinių* mechanizmų naudojimu.

Astatiniame mechanizme ant ašies tvirtinamos dvi vienodos šerdelės. Kiekviena iš jų talpinama į vienos iš ričių, sujungtų nuosekliai, magnetinį lauką. Ritės sujungtos taip, kad jų magnetiniai laukai, lygių dydžių ir konfigūracijos būtų nukreipti priešpriešais. Dėl to judamos dalies ašis veikiama dviejų momentų sumos.

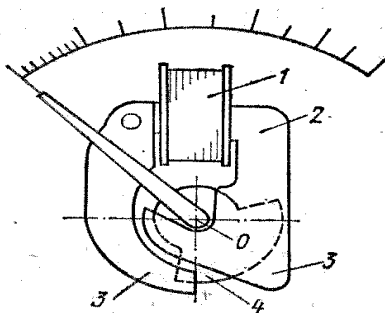
Paveikus išoriniam nuolatiniam magnetiniam laukui, vienas iš momentų, kurio kryptis sutampa su išorinio lauko kryptimi, padidėja, o kitas atitinkamai sumažėja. Suminis momentas nesikeičia.

3. Srovės ir įtampos matavimas

Astatinis matavimo mechanizmas yra brangesnis, be to, apsaugo tik nuo nuolatinių magnetinių laukų.

Ekranuojama uždariais feromagnetinės medžiagos su didele magnetine skvarba (paprastai permalojaus) ekranais. Kartais aukštos kokybės prietaisuose panaudojami keli ekranai.

Jautresni ir mažiau jautrūs išoriniams magnetiniams laukams yra elektromagnetiniai matavimo mechanizmai su uždaru magnetolaidžiu (3.5 pav.). Jis sudarytas iš ritės 1 uždėtos ant magnetolaidžio 2 su antgaliais 3. Judanti šerdis 4, tekant rite srovei, stengiasi pasisukti laikrodžio rodyklės kryptimi pasukdama ašį ir rodyklę.



3.5 pav. Elektromagnetinis matavimo mechanizmas su uždaru magnetolaidžiu

Šiuose mechanizmuose galima pakeisti skalės savybes, keičiant polių antgalių tarpusavio padėtį (3.5 paveiksle kairiojo antgalio padėtis gali būti paderinta).

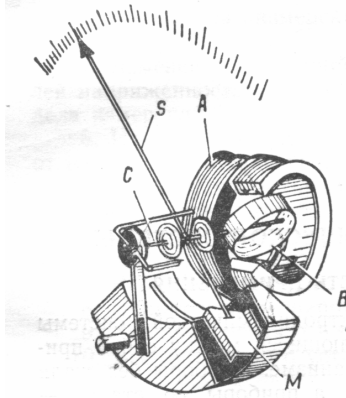
3.3.4. Elektrodinaminiai rodykliniai matavimo prietaisai

Elektrodinaminiuose matavimo mechanizmuose sukimo momentas atsiranda dėl nejudančios A ir judančios B ričių su srovėmis magnetinių laukų sąveikos (3.6 pav.).

Nejudanti ritė susideda iš vienodų dalių atskirtų oro tarpelių. Nuo tarpelio didumo priklauso magnetinio lauko konfigūracija, kuri įtakoja skalės pobūdį. Judama ritė daroma paprastai be karkaso iš

3. Srovės ir įtampos matavimas

varinio ar aliumininio laidininko. Judanti ritė įtvirtinta ant ašies C su rodykle S. Švytavimus slopina orinio dempfierio stūmoklis M.



3.6 pav. Elektrodinaminio matavimo mechanizmo schema

Dviejų ričių su srovėmis elektromagnetine energija:

$$W_e = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M_{1,2} I_1 I_2,$$

čia L_1 ir L_2 nejudančios ir judančios ričių induktyvumai; $M_{1,2}$ – ričių abipusis induktyvumas.

Ričių induktyvumas nepriklauso, o abipusis induktyvumas priklauso nuo posūkio kampo, todėl:

$$M = \frac{dW_e}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}.$$

Jeigu priešpriešos momentas sudaromas tampriais elementais (spyruoklėmis), tai nusistovėjusiame režime gausime tokį judančios sistemos posūkio kampą:

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (3.8)$$

Iš (3.8) lygties išplaukia, kad pakeitus vienu metu I_1 ir I_2 srovių kryptį atsilenkimo kampo ženklas nepasikeis. Taigi, tokiais prietaisais galima matuoti ir kintamos ir nuolatinės srovės grandinėse.

Skalės pobūdis priklauso nuo nejudančios ir judančios ričių abipusio induktyvumo kitimo dėsnio, t.y. nuo ričių formos ir jų

3. Srovės ir įtampos matavimas

tarpusavio padėties. Keičiant $\frac{dM_{1,2}}{d\alpha}$, galima pakoreguoti skalę, bet visiškai ištiesinti skalės nepavyksta.

Jeigu kintamosios harmoninės srovės grandinėje ritėmis teka srovės perstumtos fazės kampu φ :

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \quad \text{ir} \quad i_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \varphi),$$

tai momentinė sukamojo momento vertė yra:

$$M_t = i_1 i_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}.$$

Dėl inercijos judanti mechanizmo dalis reaguoja į vidutinę per periodą momento vertę:

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{T} \int_0^T M_t dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_{1m} I_{2m} \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} dt = \\ &= \frac{I_{1m} I_{2m}}{T} \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \left[\cos \varphi \int_0^T \sin^2 \omega t dt - \sin \varphi \int_0^T \sin \omega t \cos \omega t dt \right]. \end{aligned}$$

Kadangi

$$\begin{aligned} \int_0^T \sin^2 \omega t dt &= \frac{T}{2}, \\ \int_0^T \sin \omega t \cos \omega t dt &= 0, \\ \frac{I_m}{\sqrt{2}} &= I; \end{aligned}$$

tai

$$M = I_1 I_2 \cos \varphi \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (3.9)$$

Iš pastarosios lygties matyti, kad kintamos srovės grandinėje elektrodinaminio mechanizmo sukimo momentas ir atsilenkimo kampas priklauso nuo efektinių srovių verčių ritėse sandaugos ir jų tarpusavio kampo kosinuso. Todėl tokius prietaisus galima naudoti kaip galios koeficiento ir fazių kampo matuoklius

Elektrodinaminiai matavimo prietaisai yra patys tiksliausi (klasės nuo 0,1) iš kintamos srovės elektromechaninių matuoklių.

3. Srovės ir įtampos matavimas

Šiuose mechanizmuose, kuriant sukimo momentą nedalyvauja jokios metalinės dalys, kuriose galėtų atsirasti paklaidos dėl sūkurinių srovių ir histerezės.

Lyginant su magnetoelektriniais prietaisais, elektrodinaminiai matavimo prietaisai mažiau tikslūs, naudoja didesnę galingumą, jautrūs smūgiams ir vibracijoms.

Elektrodinaminiai matuokliai naudojami iki 3 kHz dažnio kintamosios srovės bei nuolatinės srovės grandinėse kaip ampermetrai (nuo 5 mA iki 200 A), voltmetrai (nuo 7,5 V iki 600 V) ir vatmetrai.

Elektrodinaminiai logometrai naudojami kaip fazometrai, dažniamačiai ir faradometrai.

Kadangi magnetinis laukas elektrodinaminiam mechanizme nėra stiprus, išorinių magnetinių laukų įtakos sumažinimui naudojamas ekranavimas ir astatinės matavimo sistemos. Ta pati ekranų konstrukcija paprastai panaudojama ir magnetoindukciniam slopinimui.

Astatinės matavimo sistemos naudojamas aukštesnio dažnio ir didesnio tikslumo prietaisuose kur sūkurinės srovės, naudojant ekranus, gali įtakoti paklaidas.

Jautresni srovei yra vadinami ferodinaminiai matavimo mechanizmai. Tokie prietaisai skiriasi nuo elektrodinaminių tuo, kad juose nejudančios ritės turi feromagnetinės medžiagos (permalojaus) magnetolaidį. Tokie prietaisai yra mažiau jautrūs išorės magnetiniams laukams, tačiau nuolatinės srovės grandinėse jaučiamas histerezės reiškinyje ir su juo susijusi rodmenų variacija, o aukštesnio dažnio grandinėse padidėja nuostoliai magnetolaidyje.

Konstrukcija panaši į magnetoelektrinio matavimo mechanizmo, tik čia nuolatinis magnetas pakeistas elektromagnetu.

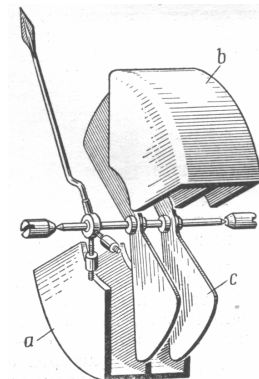
3.3.5. Elektrostatiniai rodykliniai matavimo prietaisai

Elektrostatiniuose matavimo mechanizmuose sukimo momentas gaunamas dėl elektrostatinių jėgų, sąveikaujant dviem įkrautoms elektros krūviais laidininkų sistemoms, viena iš kurių yra judanti. Jie gali matuoti tik įtampą. Judančios dalies atsilenkimas čia susijęs su talpos kitimu. Šiuose mechanizmuose talpa kinta arba kintant aktyviam laidininkų plotui arba atstumui tarp jų. Pirmasis būdas

3. Srovės ir įtampos matavimas

naudojamas mažesnėms įtampoms matuoti, kitas kilovoltmetruose.

3.7 paveiksle parodytas mechanizmo su kintamu aktyviuoju laidininkų plotu sandaros principas. Nejudanti dalis sudaryta iš kelių kamerų a ir b. Nuo kamerų skaičiaus priklauso mechanizmo jautrumas įtampai. Į kamerų ertmes laisvai įeina judančios dalies aliuminio plokštelės c. Prijungus įtampą tarp kamerų ir plokštelių jos pasikrauna priešingais elektros krūviais ir, elektrostatinių jėgų veikiamos, artėja (sukasi) vienos prie kitų. Judančios plokštelės, pritvirtintos prie ašies, įveržia tamprius elementus, tuo sukurdamos priešpriešos momentą. Susilyginus sukimo ir priešpriešos momentams, judanti dalis sustoja ir pagal posūkio kampą galima spręsti apie įtampą.



3.7 pav. Elektrostatinio matavimo mechanizmo sandaros schema

Elektrostatinių prietaisų beveik neveikia matuojamos įtampos dažnis ir išoriniai magnetiniai laukai. Tačiau tokie matuokliai labai jautrūs išoriniams elektriniams laukams. Juose sukimo momentas yra nedidelis. Jų naudojamas galingumas labai mažas, o nuolatinės srovės atveju artėja į nulį.

Jie tinka plačiam dažnių diapazonui (20 Hz – 30 MHz), taip pat aukštomis įtampoms (iki šimtų kilovoltų) be jokių papildomų priešvaržių. Paprastai jų tikslumo klasė yra nuo 0,5.

Elektrostatinio matavimo mechanizmo posūkio kampą galima apskaičiuoti iš elektrinio lauko energijos įkrautų kūnų sistemai:

$$W_e = \frac{CU^2}{2} ;$$

3. Srovės ir įtampos matavimas

čia C – įkrautų kūnų sistemos talpa; U – prie jų prijungta įtampa.

Sukimo momentas:

$$M = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}.$$

Kai priešpriešos momentas sukuriama tampriais elementais, nusistovėjusiam režimui gauname tokį posūkio kampą:

$$\alpha = \frac{1}{2W} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \quad (3.10)$$

Pastaroji lygtis patvirtina, kad kintant įtampos U poliarumui, judančios dalies atsilenkimo kryptis nekinta. Todėl elektrostatiniai voltmetrai gali būti naudojami ir nuolatinės ir kintamos srovės grandinėse.

Kai $\frac{dC}{d\alpha} = \text{const}$, elektrostatinio voltmetro skalė yra kvadratinė.

Siekiant artimesnės tiesinei skalės, apskaičiuojama reikiama judančių ir nejudančių laidininkų forma.

Trūkumai yra mažas jautris įtampai ir galimybė matuoti tik įtampas. Be to, laikui bėgant ir dėl klimatinių poveikių dydžių įtakos gali keistis sistemos talpa ir atsirasti papildomos matavimo paklaidos. Turi įtakos ir išoriniai elektriniai laukai, todėl tenka naudoti elektrostatinis ekranus.

3.4. Srovės ir įtampos mastelio keitikliai

3.4.1. Srovės mastelio keitikliai

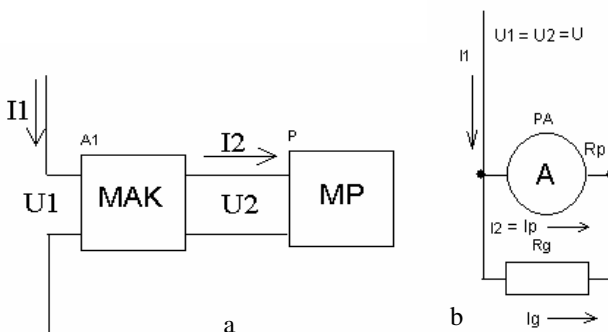
Srovės matavimo priemonės paprastai turi tam tikrą didžiausią leistiną srovę. Pavyzdžiui, elektromechaniniams srovės matavimo prietaisams yra charakteringa vadinamoji pilnojo rodyklės atlenkimo srovė. Didesnė nei ši srovė tokia matavimo priemonė be papildomų matavimo keitiklių negali būti išmatuota. Žymiai mažesnė srovė irgi negali būti išmatuota dėl riboto prietaiso jautrio srovei. Jeigu matuojamoji srovė yra didesnė, ji mažinama srovės mastelio keitikliais, o jeigu mažesnė – didinama. Mastelio keitiklis MAK yra, kaip aptarta 1 skyriuje, matavimo keitiklis, keičiantis tos pačios rūšies fizikinio dydžio didumą. Po jo matavimo grandinėje eina kiti

3. Srovės ir įtampos matavimas

matavimo keitikliai arba matavimo priemonė MP (3.8a pav.). Srovės didumas mažinamas *gretvaržėmis* (šunto varžomis) ir *srovės matavimo transformatoriais*, o didinamas – *srovės matavimo stiprintuvais*.

Srovės, tekančios matavimo grandine, sumažinimui plačiausiai naudojamos gretvaržės (šunto varžos).

Gretvaržė R_g yra srovės mastelio keitiklis nuvedantis I_g dalį matuojamos srovės I_1 per save ir taip sumažinantis srovės matavimo priemonės PA grandinę tekančią srovę I_p (3.8b pav.).



3.8 pav. Mastelio keitiklio bendroji įjungimo schema (a) ir gretvaržės prijungimo schema (b)

Iš esmės gretvaržė yra funkcinis keitiklis, keičiantis didelę srovę I_1 į mažą įtampą U :

$$U = I_1 \left(\frac{R_g R_p}{R_g + R_p} \right) = I_p R_p .$$

Srovės mastelio keitimo koeficientas n parodo kiek kartų sumažinama srovė, o jeigu jis žinomas, galima apskaičiuoti ir gretvaržės varžą:

$$n = \frac{I_1}{I_p} = \frac{R_g + R_p}{R_g}, \quad R_g = \frac{R_p}{n - 1} .$$

Kadangi srovės matavimo priemonių varžos R_p yra mažos, tai, esant nemažiams n , gretvaržių varžos gaunamos labai mažos: ($10^{-2} - 10^{-4}$) Ω . Jos yra gaminamos iš galimai stabilesnės varžos laidininko,

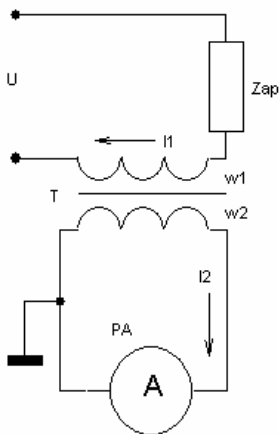
3. Srovės ir įtampos matavimas

dažniausiai manganino. Mažoms srovėms (iki 50 A) gretvaržės montuojamos matavimo prietaiso viduje, o didelėms – iki 10 kA – išorėje.

Gretvaržėms yra nurodoma jų vardinė varža, įtampos kritimas jose (kelios dešimtys milivoltų), išsklaidoma galia ir tikslumo klasė. Tikslumo klasė parodo kiek procentų gretvaržės varža gali skirtis nuo vardinės ir būna nuo 0,02 iki 0,5.

Gretvaržės paprastai naudojamos su magnetoelektriniais matavimo prietaisais. Kintamos srovės grandinėse dėl gretvaržių reaktyvinių varžų įtakos pasireiškia papildomos nuo dažnio priklausomos paklaidos.

Svarbiausi gretvaržių kaip mastelio keitiklių trūkumai yra tokie: padidėja matavimo grandinės sunaudojama galia, sumažėja jautris srovei ir padidėja matavimo paklaida.



3.9 pav. Srovės transformatoriaus įjungimo schema

Srovės matavimo transformatoriai yra iš esmės funkciniai keitikliai, keičiantys dideles sroves į mažas įtampas. Dažniausiai naudojami kintamosios pramoninio dažnio srovės grandinėse. Dar naudingi tuo, kad galvaniškai atskiria matavimo grandinę nuo srovės grandinės, kas ypač yra svarbu aukštų įtampų atveju.

Srovės matavimo transformatoriai sudaryti iš dviejų izoliuotų viena nuo kitos apvijų: pirminės, kurios vijų skaičius w_1 ir antrinės, kurios vijų skaičius yra w_2 , suvyniotų ant feromagnetinės šerdies. Pirminė apvija įjungiama nuosekliai į srovės grandinę, o prie antrinės apvijos jungiamas ampermetras (3.9 pav.).

Srovės transformatoriuose paprastai, pirminė srovė I_1 didesnė už antrinę I_2 , dėl to juose $w_1 < w_2$.

Dydis $k_I = \frac{I_1}{I_2}$ parodo kiek pakeičiamas srovės mastelis ir

vadinamas **srovės transformacijos koeficientu**. Tačiau jis nėra pastovus dydis, o dėl apvijų aktyviųjų ir reaktyviųjų varžų priklauso

3. Srovės ir įtampos matavimas

nuo tekančių per apvijas srovių, t.y. nuo srovės transformatoriaus elektrinio režimo.

Faktinis srovės transformacijos koeficientas kinta, todėl srovės transformatoriai charakterizuojami *vardiniu srovės transformacijos*

koeficientu, norminamu vijų skaičiaus santykiu $k_{Iv} = \frac{w_2}{w_1}$. Srovės

transformatorių tikslumo klasė būna nuo 0,01 iki 1,0. Ji parodo koks gali būti santykinis faktinio ir vardinio transformacijų koeficientų skirtumas procentais:

$$\gamma = \frac{k_{Iv} - k_I}{k_{Iv}} 100 \% .$$

Antrinės srovės I_2 vektorius idealiu atveju būtų pasuktas faze 180° , lyginant su pirminės srovės I_1 vektoriumi. Realiam transformatoriuje dėl kompleksinių varžų ir nuostolių magnetolaidyje, kampas nebus 180° , o skirsis nuo jo kampu δ , vadinamu *transformatoriaus kampo paklaida*. Kampo paklaida irgi priklauso nuo elektrinio režimo ir turi įtaką tokiems matavimo prietaisams, kurių rodmenys priklauso nuo fazių poslinkio tarp srovių jų grandinėse: vatmetrams, energijos skaitikliams, fazometrams. Nuostoliams magnetolaidyje sumažinti, srovės matavimo transformatorių šerdys daromos iš aukštos kokybės transformatorinio plieno plonų lakštų, izoliuotų vienas nuo kito.

Transformacijos koeficiento ir kampo paklaidos ypač išauga didesniuose dažniuose ir esant aukštesnėms įtampoms, kai papildomos įtakos turi grandinių ir transformatoriaus apvijų talpos.

Pirminė srovė būna nuo 0,1 A iki 30 kA. Pirminė transformatoriaus apvija daroma priklausomai nuo pirminės srovės stiprumo iš skirtingo skerspjūvio vielos ir, srovei didesnei už 500 A, daroma iš vienos vijos, t.y. stačiakampio skerspjūvio strypo (šynos), pravertos per transformatoriaus magnetolaidžio langą. Antrinė apvija vyniojama mažo skerspjūvio laidu. Antrinės apvijos srovės yra standartizuojamos, kad mažesnė būtų elektrinio režimo įtaka srovės matavimo tikslumui ir būna dažniausiai 5 A, rečiau 1 A ir 2 A.

Laboratoriniai kilnojami srovės matavimo transformatoriai daromi daugiaribiai. Matavimo ribos keičiamos keičiant pirminės apvijos vijų skaičių.

3. Srovės ir įtampos matavimas

Kilnojamo srovės matavimo transformatoriaus atmaina yra srovės matavimo replės. Srovės matavimo replių magnetolaidžio dalys su rankenomis sujungtos šarnyru ir gali apkabinti laidą su matuojama srove. Paprastai prie srovės replių yra pritvirtintas ampermetras. Matavimo replių tikslumas nėra aukštas, bet pakankamas darbiniais matavimams.

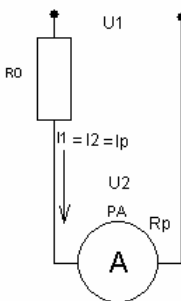
Kadangi antrinio srovės transformatoriaus apvija jungiama prie mažos varžos ampermetro, tai transformatorius dirba artimu trumpajam jungimui režimu. Tačiau tai yra įtampą aukštinantis įtaisas, todėl jo negalima naudoti atjungus matavimo grandinę, nes tuščios eigos režimo antrinė įtampa gali būti didelė ir pavojinga personalui bei transformatoriaus izoliacijai.

Srovės matavimo stiprintuvai naudojami nuolatinės ir kintamos srovės stiprinimui. Jie leidžia padidinti srovės matavimo priemonių jautrį. Naudojami iki šimtų megahercų srovių dažniams. Norminamas stiprinimo koeficientas K_I ir jo kitimas arba stiprintuvo praleidžiamų dažnių juostos plotis standartiniam ± 3 dB stiprinimo netolygumui. Stiprintuvo įėjimo srovių efektinės vertės būna nuo 100 nA, o išėjimo yra dažnai unifikuojamos ir būna 5 mA.

3.4.2. Įtampos mastelio keitikliai

Įtampos didumas dažniausiai mažinamas **priešvaržėmis ir įtampos dalikliais, įtampos matavimo transformatoriais**, o didinamas – **įtampos matavimo stiprintuvais**.

Naudojant srovės matuoklius įtampos matavimui, jų darbo įtampa negali viršyti tokios, kuri sukuria pilnojo rodyklės atlenkimo srovę. Įtampos matavimo ribų praplėtimui naudojami nuoseklieji rezistoriai vadinami papildomosiomis varžomis arba **priešvaržėmis**. Jie jungiami nuosekliai su matuokliais (3.10 pav.). Iš esmės priešvaržė yra funkcinis keitiklis, keičiantis įtampą į srovę:



3.10 pav. Priešvaržės ir srovės matuoklio jungimo schema

3. Srovės ir įtampos matavimas

$$I_p = \frac{U_1}{R_0 + R_p}.$$

Jeigu įtampa, reikalinga matuoklio rodyklės visiškam atlenkimui, yra lygi U_2 , o matuoklis turi būti įjungtas į įtampos U_1 grandinę, tai priešvaržės varža gaunama lygi

$$R_0 = R_p(m-1),$$

čia R_p – matuoklio varža, o $m = \frac{U_1}{U_2}$ yra įtampos mastelio keitimo

koeficientas.

Priešvaržės kaip ir gretvaržės yra charakterizuojamos vardinėmis varžos vertėmis ir tikslumo klase, parodančia kiek faktinė priešvaržės varža gali skirtis nuo vardinės. Gali būti vidinės (įtampoms iki 600 V) ir išorinės (įtampoms iki 30 kV). Naudojamos nuolatinės ir kintamos įtampos grandinėse nuo 10 Hz iki 20 kHz. Didėjant dažniui auga paklaidos dėl grandinių reaktyvinių varžų įtakos. Gaminamos 0,01÷1,0 tikslumo klasių. Taip pat yra norminamos leistinos didžiausios srovės, kad nebūtų viršijama didžiausia leistina išsklaidoma galia.

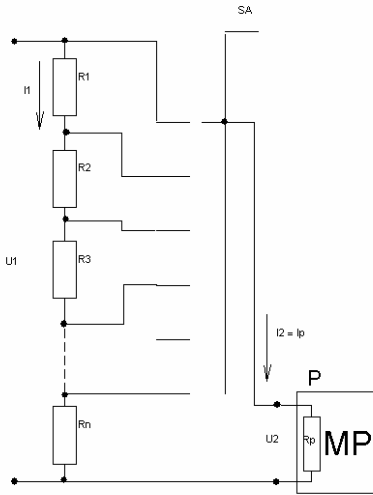
Keičiant įtampos mastelio keitimo koeficientą reikia perjungti kitą priešvaržę. Perjungimo metu yra nutraukiama matavimo grandinė bei kinta įtampos matuoklio įėjimo varža.

Įtampos dalikliai (ateniuatoriai) taip pat leidžia keisti įtampos lygį ir plačiai naudojami kaip įtampos mastelio keitikliai. Dažniausiai naudojami rezistyviniai (varžiniai) įtampos dalikliai sudaryti iš nuosekliai sujungtų rezistorių, prie kurių jungiama daliklio įėjimo įtampa, o įtampos kritimas ant dalies rezistorių yra daliklio išėjimo įtampa. Ji paduodama į matavimo keitiklį arba matavimo priemonę (3.11 pav.).

Didžiausias dalinimo koeficientas k_d gaunamas kai matavimo priemonė prijungiama prie apatinio daliklio rezistoriaus, o mažiausias ir lygus 1, kai ji prijungiama prie daliklio įėjimo gnybtų.

Tarpinėse padėtyse gaunami tarpiniai įtampos dalinimo koeficientai. Jų vertės priklauso nuo daliklio varžų dydžių ir matavimo priemonės įėjimo varžos R_p dydžio.

3. Srovės ir įtampos matavimas



3.11 pav. Įtampos daliklio funkcinė schema

Sąlyginai daliklio grandinės dalijamos matavimo priemonės prijungimo vietos atžvilgiu į dvi dalis vadinamas *daliklio pečiais*. Apatinis petys yra visuma rezistorių nuo kurių nuimama daliklio įtampa, o viršutinis petys yra visuma likusių rezistorių. Bet kurioje perjungėjo SA padėtyje įėjimo įtampa padalinama tarp daliklio pečių. Skaičiuojant daliklį reikia atsižvelgti į tai, kad jis yra apkrautas matavimo priemonės arba kito matavimo keitiklio įėjimo varža. Apskaičiuokime didžiausią dalinimo koeficientą, kai įtampa nuimama nuo apatinio

daliklio rezistoriaus R_n :

$$k_{dn} = \frac{U_1}{U_{2n}} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_i + \dots + R_{n-1} + \frac{R_n R_p}{R_n + R_p}}{\frac{R_n R_p}{R_n + R_p}}$$

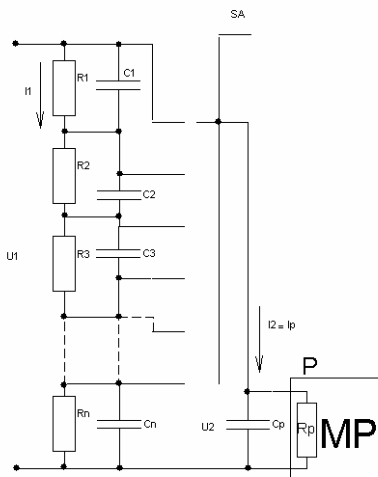
Dalikliai projektuojami taip, kad daliklio srovė I_1 būtų žymiai didesnė už matavimo priemonės srovę I_p . Todėl daliklio rezistorių varžos yra mažesnės už matavimo priemonės varžą ir pastaroji praktiškai daliklio neapkrauna. Tada daliklis gali būti skaičiuojamas kaip neapkrautas daliklis:

$$k_{dn} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{R_n}.$$

Minėta varžų parinkimo sąlyga taip pat garantuoja, kad daliklio įėjimo varža, keičiant dalinimo koeficientą praktiškai nesikeis ir bus lygi daliklio varžų verčių sumai:

3. Srovės ir įtampos matavimas

$$R_{in} = \sum_{i=1}^n R_i .$$



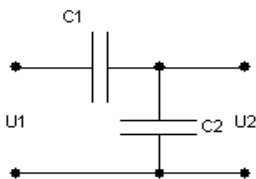
3.12 pav. Kompensuotojo rezistyvinio įtampos daliklio schema

Kintamosios didesnio dažnio įtampos dalinimo atveju daliklio darbui turi įtakos daliklio elementų ir montažo parazitiniai reaktyvumai. Pavojinga yra daliklio apkrovos parazitinė talpa C_p (3.12 pav.), dėl kurios daliklio apatinio peties varža tampa kompleksinė ir dalinimo koeficientas pasidaro priklausomas nuo dažnio.

Siekiant sumažinti šią priklausomybę yra daromi **kompensuotieji** rezistyviniai įtampos dalikliai. Visi daliklio rezistoriai šuntuojami kondensatoriais.

Jie parenkami taip, kad reikiami dalinimo koeficientai būtų nustatomi daliklio pečių kompleksinių varžų *modulių* santykiu. Kadangi kompleksinės varžos yra tos pačios rūšies, tai dažniui kintant jos kinta tuo pačiu dėsniu ir dalinimo koeficientas nesikeičia. Be to, toks daliklis yra universalus, jis dalina ir nuolatinę įtampą.

Įtampos daliklių įtampos dalinimo paklaidos gaunamos dėl faktinių daliklio rezistorių varžų (kompensuotiems dalikliams ir dėl



3.13 pav. Talpinio įtampos daliklio schema

kondensatorių) verčių neatitikimo vadinėms. Todėl priklausomai nuo reikiamo dalinimo tikslumo yra parenkami reikiamo tikslumo rezistoriai ir kondensatoriai. Be to, kompensacija galioja tik iki tam tikro dažnio, nes realiai reiškiasi ir kitų reaktyvumų įtaka.

Kintamosios įtampos sumažini-

3. Srovės ir įtampos matavimas

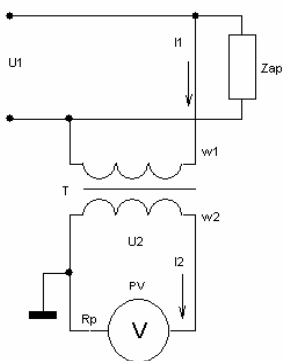
mui naudojami ir ***talpiniai*** įtampos dalikliai. Jie irgi yra diapazoniniai. Paprastai daromi kaip išoriniai fiksuoto dalinimo koeficiento dalikliai iš dviejų kondensatorių (3.13 pav.).

Kai daliklio apkrovos varža yra didelė, jį galima skaičiuoti kaip neapkrautą daliklį:

$$m = \frac{\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2}}{\frac{1}{\omega C_2}} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}.$$

Talpiniai įtampos dalikliai yra mažesnio tikslumo dėl didesnių kondensatorių talpos paklaidų ir dėl to kad talpos laikui bėgant kinta. Tačiau juos galima naudoti esant aukštesnėms įtampoms nei rezistyvinius daliklius.

Įtampos matavimo transformatoriai yra iš esmės funkciniai keitikliai, keičiantys dideles įtampas į mažas sroves. Jie dažniausiai naudojami kintamosios pramoninio dažnio srovės grandinėse. Galvaniškai atskiria matavimo grandinę nuo pirminės grandinės, kas ypač yra svarbu aukštų pirminių įtampų atveju. Jungiami lygiagrečiai apkrovai ir yra žeminantys įtampą (3.14 pav.). Jų $w_1 > w_2$. Esant įvairioms vardinėms įtampoms U_1 nuo 220 V iki 35 kV, įtampos U_2 vardinės vertės paprastai normuojamos ir yra 150 V, 100 V ir $100/\sqrt{3}$ V. Jų konstrukcija yra panaši į jėgos transformatorių konstrukciją.



3.14 pav. Įtampos transformatoriaus jungimo schema

Įtampos transformatoriaus faktinis įtampos transformacijos koeficientas

$$k_u = \frac{U_1}{U_2}$$

skiriasi nuo vardinio, kurį nusako pirminės ir antrinės apvijų vijų skaičių santykis ir priklauso nuo transformatoriaus elektrinio darbo režimo. Kadangi įtampos transformatorius apkrautas voltmetru, tai jo antrinė srovė yra maža ir jis veikia praktiškai tuščios eigos režimu.

Įtampos transformacijos koeficiento santykinė paklaida:

3. Srovės ir įtampos matavimas

$$\gamma_u = \frac{k_{uv} - k_u}{k_{uv}} 100, \quad \%$$

nustato, kaip ir srovės transformatoriams, įtampos transformatoriaus tikslumo klasę, kuri būna nuo 0,05 iki 0,5.

Įtampos matavimo transformatoriuose, taip pat egzistuoja priklausoma nuo jų elektrinio darbo režimo *kampo* paklaida. Šios paklaidos mažinimui stengiamasi sumažinti apvijų aktyvines varžas, todėl apvijos vyniojamos iš didesnio skerspjūvio laido nei to reikėtų pagal leistinąjį srovės tankį ir leistinąjį išilimą, o norint sumažinti reaktyviąsias varžas, kurios priklauso nuo magnetinių sklaidos laukų, indukcija šerdyje imama maža, naudojamas specialus aukštos kokybės plienas, mažinami magnetolaidžio sudūrimų tarpeliai, t.y. stengiamasi sumažinti tuščios eigos srovę ir nuostolius šerdyje. Kampo paklaida turi įtaką tik tokiems matavimo prietaisams, kurių rodmenys priklauso nuo fazių poslinkio: vatmetrams, energijos skaitikliams, fazometrams.

Įtampos matavimo stiprintuvai naudojami nuolatinės ir kintamos įtampos stiprinimui. Jie leidžia padidinti įtampos matavimo priemonių jautrį. Naudojami iki šimtų megahercų dažniams. Norminamas stiprinimo koeficientas K_U ir jo kitimas arba stiprintuvo praleidžiamų dažnių juostos plotis standartiniam ± 3 dB stiprinimo netolygumui. Stiprintuvo įėjimo įtampų efektinės vertės būna nuo 1 μV , o išėjimo įtampos yra unifikuojamos ir būna 10 V.

3.5. Analoginiai funkciniai įtampos keitikliai

3.5.1. Paskirtis ir klasifikavimas

Elektroniniuose voltmetruose plačiausiai naudojami analoginiai funkciniai keitikliai keičiantys kintamąją įtampą į nuolatinę. Toliau nuolatinė įtampa yra keičiama nuolatinės įtampos mastelio keitikliais ir paduodama į magnetoelektrinį rodmenų įtaisą (analoginiuose voltmetruose) arba keičiama su analoginiu–skaitmeniniu keitikliu į skaičių (skaitmeniniuose voltmetruose).

Keitimui į nuolatinę įtampą naudojami *lygintuviniai* (detektoriniai), *termoelektriniai* ir *optoelektroniniai* funkciniai

3. Srovės ir įtampos matavimas

keitikliai. Toks skirstymas atitinka fizikinį principą naudojamą įtampos rūšies keitimui.

Keitiklius galime sugrupuoti ir pagal tai, kokiai įtampos vertei yra proporcinga jų išėjimo nuolatinė įtampa. Pagal šį požymį keitiklius skirsto į *pikinių verčių*, *vidutinių išlygintųjų verčių* ir *vidutinių kvadratinųjų verčių*.

Kartais keitiklius dar skirsto į *tiesinius* ir *netiesinius* (kvadratinčius, logaritmuojančius ir kt.)

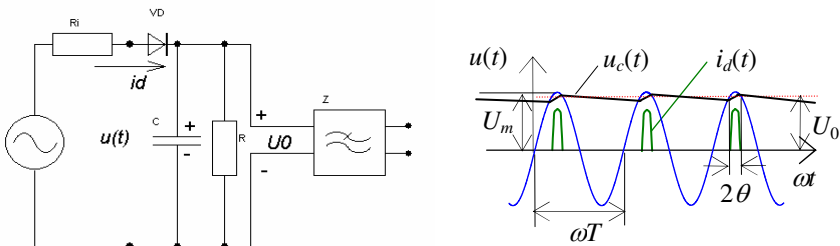
Jeigu keitiklis reaguoja ir į keičiamos įtampos nuolatinę dedamąją, tai jį vadina *atviro įėjimo* keitikliu, o jeigu ne – *uždaro įėjimo*.

3.5.2. Pikinių (amplitudės) verčių keitikliai

Pikinių (amplitudės) verčių keitikliai teikia išėjimo nuolatinę įtampą artimą keičiamos kintamosios įtampos pikinei vertei. Jų sudarymo idėja yra pasiskolinta iš detektorių schemų naudojamų radijo imtuvuose moduluotosios amplitudės virpesių detekcijai. Todėl tokius įtaisus dažniausiai vadina pikiniais arba amplitudės detektoriais.

Žinomos dvi tokių detektorių schemos: *nuoseklus* ir *lygiagretus* detektoriai.

Nagrinėkime *nuoseklaus pikinio detektoriaus* (3.15 pav.) veikimą, kai įėjime veikia iš įtampos šaltinio su vidine varža R_i teikiami harmoniniai dažnio ω ir amplitudės U_m virpesiai. Teigiamojo pusperiodžio metu per mažą įtampos šaltinio vidaus varžą ir mažą atviro diodo varžą įvyksta kondensatoriaus C įkrovimas beveik iki



3.15 pav. Nuoseklaus pikinio detektoriaus schema ir procesų laiko diagrama

3. Srovės ir įtampos matavimas

įtampos amplitudės, o neigiamo pusperiodžio metu, kai diodas uždaras, kondensatorius lėtai išsikrauna per didelę detektoriaus apkrovos varžą R . Tais trumpais fazės kampo intervalais 2θ , kai momentinė įtampa ant kondensatoriaus yra mažesnė už įėjimo įtampą, vyksta kondensatoriaus įkrovimas trumpais diodo srovės i_d impulsais. Vidutinė įtampa U_0 ant detektoriaus apkrovos elementų RC yra artima detektoriaus įėjimo įtampos amplitudei. Po žemų dažnių filtro Z (integruojanti RC grandinė) ji teikiama į detektoriaus išėjimą.

Detektoriaus kondensatoriaus įkrovimo ir iškrovimo grandinių laiko konstantos turi tenkinti tokius reikalavimus:

$$\begin{aligned}\tau_{i\check{s}} &= RC \gg T_{\max} \\ \tau_{i\check{k}} &= (R_i + R_d)C \ll T_{\min}.\end{aligned}\quad (3.11)$$

Jeigu šios sąlygos išlaikytos, tai *srovės tekėjimo kampas* θ gaunamas labai mažas, o vidutinė įtampa artima amplitudei ir detektoriaus įtampos perdavimo koeficientas K_D artimas vienetui.

$$U_0 = K_D U_m = U_m \cos \theta \approx (0,95 - 0,99) U_m.$$

Iš pateikto aptarimo išplaukia, kad apkrovos varža turi būti kiek galima didesnė, o atviro diodo varža R_d ir įtampos šaltinio vidaus varža – kiek galima mažesnės. Praktiškai apkrovos varža negali būti didesnė už (10–20) $M\Omega$, nes ją šuntuoja prie detektoriaus išėjimo prijungtų kitų matavimo grandinės elementų įėjimo varžos ir diodo atbulinė varža R_{atb} . Tokiuose detektoriuose naudojami paprastai vakuuminiai diodai, kurių atbulinės varžos yra labai didelės (šimtai megaomų), o tiesioginės (sąskaita kaitinamo katodo sukuriama stiprios emisijos srovės ir tuo pačiu anodo srovės) – mažos (šimtai omų). Puslaidininkinių diodų šie parametrai būtų žymiai prastesni.

Taigi, pikinis detektorius teikia mažesnę už amplitudę išėjimo nuolatinę įtampą ir jo keitimo santykinė sistemingoji paklaida yra:

$$\delta = \frac{U_0 - U_m}{U_m} = \cos \theta - 1 \approx -\frac{T}{2RC}.\quad (3.12)$$

Kitas svarbus detektoriaus parametras yra jo įėjimo varža. Kadangi įėjimo srovė yra diodo impulsinė srovė, tai skaičiuojant įėjimo varžą įvykdoma šios srovės harmoninė analizė ir surandama srovės pirmosios harmonikos amplitudė. Įėjimo įtampos amplitudės santykis su diodo srovės pirmosios harmonikos amplitude ir leidžia

3. Srovės ir įtampos matavimas

įvertinti detektoriaus įėjimo varžą. Ji gaunama priklausoma nuo srovės tekėjimo kampo (tuo pačiu ir nuo R) ir nuo diodo tiesioginės bei atbulinės varžų. Kai diodo tiesioginė varža yra labai maža ($R_d \rightarrow 0$), gaunama didžiausia galima įėjimo varžos vertė

$$R_{in \max} = \frac{R}{2} \parallel \frac{R_{atb}}{3}.$$

Pastaroji formulė rodo, kad jeigu detektoriaus apkrovos varža yra artima diodo atbulinei varžai, tai pastarosios įtaka įėjimo varžai gali būti netgi didesnė.

Parenkant detektoriaus kondensatoriaus talpos dydį, reikia atsižvelgti į tai, kad ji negali būti labai didelė, nes tada padidėja įkrovimo grandinės laiko konstanta ir aukštesnio dažnio įtampoms bus neįvykdoma (3.11) nelygybė. Didelės talpos kondensatorių dielektrikas paprastai turi didesnius nuostolius ir nuotekio laidumą. Tai mažintų apkrovos varžą. Be to, didelės talpos kondensatorių talpa yra mažiau stabili. Tačiau per maža talpa sumažina iškrovimo grandinės laiko konstantą ir, kaip rodo formulė (3.12) labai padidina keitimo paklaidą. Dėl minėtų priežasčių tenka žemų dažnių įtampų matavimui naudoti didesnės talpos, o aukštų dažnių – mažesnės talpos kondensatorius. Jų talpos būna nuo 100 pF iki 100 nF.

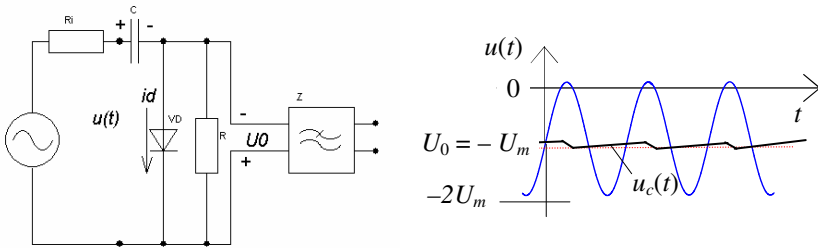
Nuoseklus pikinis detektorius yra jautrus įėjimo įtampos nuolatinei dedamajai, t.y. jis yra atviro įėjimo keitiklis. Teigiama nuolatinė įtampa perduodama per atvirą diodą į detektoriaus išėjimą, o neigiama – papildomai uždaro diodą. Todėl tokie detektoriai nenaudojami kintamosios įtampos voltmetruose. Jie naudojami **impulsiniuose** voltmetruose vieno ženklo impulsų amplitudei matuoti. Teigiamo ženklo impulsams detektoriaus diodas įjungiamas taip kaip yra 3.15 paveikslas schemoje, o neigiamo ženklo impulsams – jo įjungimo kryptis pakeičiama į priešingą.

Kintamosios įtampos voltmetruose naudojami **lygiagrečiai detektoriai**. Lygiagretaus detektoriaus schemoje diodas jungiamas lygiagrečiai apkrovos rezistoriui (3.16 pav.).

Teigiamo įėjimo įtampos pusperiodžio metu per atvirą diodą yra įkraunamas kondensatorius iki įtampos amplitudės vertės, o neigiamo pusperiodžio metu jis išsikrauna per apkrovos rezistorių ir jo įtampa ir įėjimo įtampa sumuojasi ir ant apkrovos pasiekia neigiamą beveik dvigubą amplitudės vertę. Vidutinė išėjimo įtampa

3. Srovės ir įtampos matavimas

yra neigiama ir artima amplitudės vertei.



3.16 pav. Lygiagretaus pikinio detektoriaus schema ir laiko diagramos

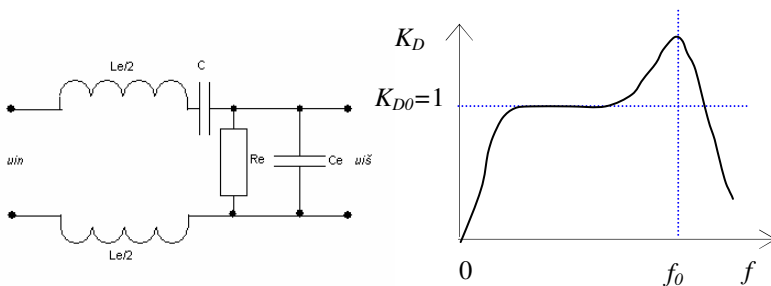
Toks detektorius yra nejautrus įėjimo įtampos nuolatinei dedamajai, nes jos nepraleidžia nuosekliai įjungtas kondensatorius. Tai reikia įvertinti kai keičiama įtampa yra nesimetrinė: detektorius keičia tik kintamąją įtampos dalį (žr. 3.2).

Lygiagretaus detektoriaus savybės panašios į nuoseklų, bet jo įėjimo varža yra mažesnė ir jos didžiausia vertė yra

$$R_{in \max} = \frac{R}{3} \parallel \frac{R_{atb}}{3}.$$

Pikiniai detektoriai yra proporciniai (tiesiniai) keitikliai tik kai įėjimo įtampos amplitudė yra didesnė už 0,5 V. Mažesnėms įtampoms pasireiškia diodo voltamperinės charakteristikos netiesiškumas.

Pikinio detektoriaus dažnines savybes nusako jo kintamosios srovės ekvivalentinė schema (3.17 pav.). Schemos ekvivalentiniai



3.17 pav. Lygiagretaus pikinio detektoriaus kintamosios srovės ekvivalentinė schema ir ADCH

3. Srovės ir įtampos matavimas

induktyvumai L_e sudaryti jungiamųjų laidininkų ir elementų išvadų induktyvumais, o parazitinės talpos C_e – montažo bei diodo tarpelektrodinė talpa. Ekvivalentinę apkrovos varžą kintamajai srovei sudaro lygiagrečiai sujungtos: detektoriaus apkrovos, diodo ir montažo varža kintamai srovei (įskaitant nuotekio laidumus ir nuostolius dielektrikuose) bei filtro įėjimo varžos. Kadangi detektoriaus kondensatoriaus talpa C yra žymiai didesnė už ekvivalentinę parazitinę talpą, tai susidariusio nuosekliojo virpesių kontūro rezonanso dažnis yra nusakomas schemos parazitiniiais induktyvumais ir talpomis, o perdavimo koeficientas dideliuose dažniuose smarkiai mažėja dėl išaugusių nuostolių dielektrikuose.

Siekiant sukurti plačiajuosčius kintamosios įtampos voltmetrus, stengiamasi šiuos detektorius naudoti prieš kitus matavimo grandinės keitiklius ir kiek galima padidinti rezonanso dažnį bei sumažinti nuostolius schemeje. Todėl tokių detektorių konstrukcija daroma kaip savarankiškas voltmetro konstrukcinis elementas vadinamas **detektorine galvute**. Tai ekranuota koaksialinė konstrukcija, neturinti įėjime jungiamųjų laidų. Aukštos kokybės diskinio keraminio kondensatoriaus vienas išvadas sujungiamas su trumpu ir storu pasidabruoto vario strypeliu, kuris naudojamas kaip išorinis signalinis voltmetro išvadas. Kitas kondensatoriaus diskinis elektrodas prispaudžiamas tiesiog prie cilindrinės konstrukcijos vakuuminio diodo (nuvistoriaus) anodo diskinio išvado. Viduje sumontuojamas ir apkrovos rezistorius bei RC filtras ir nuolatinė išėjimo įtampa bei diodo kaitinimo grandinė trigysliu ekranuotu kabeliu sujungiama su pagrindine voltmetro konstrukcija.

Tokia detektoriaus konstrukcija ir aukštos kokybės elementų panaudojimas leidžia žymiai sumažinti parazitinius induktyvumus ir talpas bei nuostolius ir pasiekti (2 – 3) GHz rezonansinius dažnius bei detektoriaus pralaidumo juostą iki (1 – 1,5) GHz. Įėjimo talpa yra apie (1,5 – 2) pF, o įėjimo varža žemųjų ir vidutinių dažnių srityje siekia iki 10 MΩ, tačiau aukštuose dažniuose sumažėja iki šimtų ir net dešimčių kiloomų. Naudojant detektorinę galvutę matuojamos aukštų dažnių virpesių įtampos.

Labai žemiems dažniams detektorinės galvutės diskinio kondensatoriaus nedidelės talpos nepakanka, todėl voltmetro viduje sumontuojami didesnės talpos kondensatoriai ir, atjungus diskinių kondensatorių, detektorinės galvutės diodas sujungiamas su didesnės

3. Srovės ir įtampos matavimas

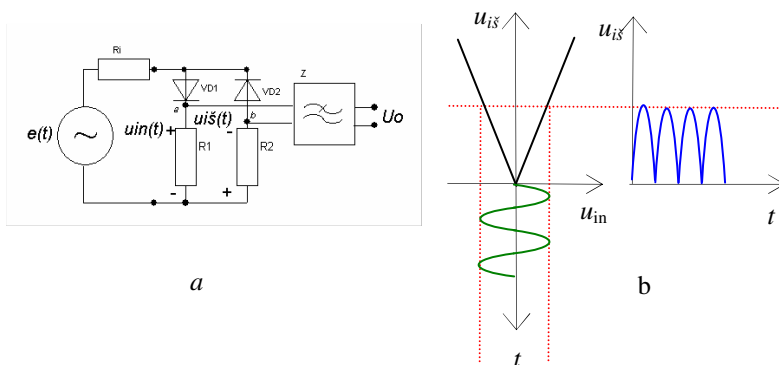
talpos kondensatoriaus išvadu. Matuojama įtampa tada paduodama išoriniais laidais į žemojo dažnio kintamos įtampos prijungimo gnybtus.

Naudojant vakuuminius diodus tenka kompensuoti jų pradinę srovę. Todėl tokiuose keitikliuose yra „0“ nustatymo elementas.

3.5.3. Vidutinių išlygintų verčių keitikliai

Šie keitikliai yra plačiai naudojami, nes yra paprasti, patikimi ir pigūs. Naudojami esant didelėms įtampų amplitudėms (apie 1 V) ir veikia tiesiniu režimu. Tai leidžia sukurti voltmetrus su tolygiomis (tiesinėmis) skalėmis.

Vidutinių išlygintų verčių keitikliai sudaromi naudojant kintamosios srovės lygintuvų schemas. Dažniausiai naudojama dvipusio lyginimo tiltelio schema, kurioje du lygintuviniai diodai pakeisti didelės varžos rezistoriais R_1 ir R_2 (3.18a pav.). Rezistorių varža turi būti žymiai didesnė už lygintuvo diodų tiesioginę vidinę varžą R_d ir įtampos šaltinio vidaus varžą R_i . Tuomet srovė tekanti per diodus nepriklauso nuo jų vidinės varžos ir jos kitimo dėl diodo charakteristikos netiesiškumo ir keitiklio keitimo charakteristika gaunama tiesi (3.18b pav.). Rezistoriai ištiesina keitimo charakteristiką.



3.18 pav. Lygintuvinio vidutinių išlygintų verčių keitiklio schema (a) ir įtampų laiko diagramos (b)

Kai diodai vienodi ir rezistoriai vienodi abiejų diodų srovės ir įtampų kritimai ant rezistorių gaunami vienodi, bet priešingų ženklų.

3. Srovės ir įtampos matavimas

Tiltelio įstrižainės ab įtampa yra keitiklio išėjimo įtampa ir lygi šių įtampų sumai per periodą. Po ŽDF gaunama vidutinė įtampa per periodą U_0 . Kai ŽDF įėjimo varža yra žymiai didesnė už rezistorių R varžas, o rezistorių R varža yra žymiai didesnė už lygintuvo diodų tiesioginę vidinę varžą R_d ir įtampos šaltinio vidaus varžą R_i , keitimo koeficientas gaunamas artimas vienetui

$$K_D = \frac{R}{R + R_i + R_d}.$$

Toks lygintuvinis keitiklis sukuria tarp taškų ab išėjimo įtampą, kuri atitinka periodinės įėjimo įtampos modulį, o po integravimo ŽDF, gaunama nuolatinė įtampa U_0 proporcinga keitiklio įėjimo įtampos vidutinei išlygintai vertei U_{vl} . Kai įėjimo įtampa yra sinusinė, ryšio formulė gaunama tokia:

$$U_0 = K_D \frac{1}{T} \int_0^T |u_{in}(t)| dt = K_D \frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt = K_D \frac{2U_m}{\pi} = U_{vl}.$$

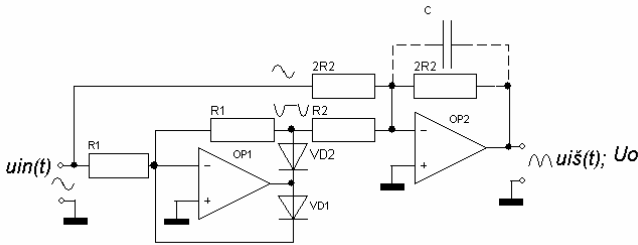
Kaip minėta lygintuviniai tiltelio schemos vidutinių išlygintų verčių keitikliai yra tiesiniai tik kai veikiančios jų įėjime įtampos amplitudės yra didelės. Kai amplitudės mažos, pasireiškia diodų voltamperinių charakteristikų netiesiškumas ir keitikliai veikia netiesiniu režimu. Keitiklių veikimui turi įtakos ir diodų charakteristikų ir parametrų kitimas bei jų sklaida taip pat aukštų dažnių įtampų atveju reiškiasi diodų ir schemos elementų parazitinės talpos ir kinta (sumažėja) perdavimo koeficientas. Veikimo stabilizavimui naudojamos schemos su tiltelio srovės neigiamu grįžtamoju ryšiu (žr. toliau kintamosios įtampos elektroniniai voltmetrai).

Kita keitiklio schema, realizuojanti įtampos modulio formavimą ir jos integravimą yra schema su diodais operacinio stiprintuvo grįžtamojo ryšio grandinėje (3.19 pav.).

Šioje schemoje diodai veikia kaip jungikliai ir jų voltamperinių charakteristikų netiesiškumas turi mažesnės įtakos keitiklio veikimui.

Schemos dalis su operaciniu stiprintuvu A1 veikia kaip invertuojantis kartotuvas išlyginantis įtampą.

3. Srovės ir įtampos matavimas



3.19 pav. Vidutinių išlygintų verčių keitiklio su operaciniais stiprintuvais schema

Teigiamo pusperiodžio metu jo išėjime gaunamas neigiamas įtampos pusperiodis, kuris uždaro diodą VD1 ir per atvirą diodą VD2 yra perduodamas į svertinį invertuojantį sumatorių su operaciniu stiprintuvu A2. Šią įtampą sumatorius perduoda su perdavimo koeficientu 2, sukurdamas dvigubos amplitudės teigiamą įtampos pusperiodį išėjime. Tuo pat metu įėjimo įtampos teigiamas pusperiodis perduodamas per invertuojantį sumatorių, bet su perdavimo koeficientu 1, sukuria išėjime neigiamą amplitudės vertės įtampos pusperiodį. Šių dviejų įtampų suma sudaro teigiamą amplitudės vertės įtampos pusperiodį.

Neigiamas įėjimo įtampos pusperiodis sukelia teigiamą įtampą operacinio stiprintuvo A1 išėjime ir atidaro diodą VD1, todėl išėjimo įtampa tampa lygi praktiškai nuliui. Ji per uždarą šiai įtampai diodą VD2 neperduodama į sumatorių. Todėl keitiklio išėjime yra formuojamas teigiamas įtampos pusperiodis perduotas iš įėjimo per sumatorių su perdavimo koeficientu 1. Taip per periodą yra perduodami du to paties ženklo įtampos pusperiodžiai, t.y. suformuojama įėjimo įtampos modulį per periodą atitinkanti įtampa. Vidutinės šios įtampos vertės gavimui stiprintuvai–sumatoriai yra perduodami į integratoriaus režimą, parinkus reikiamos talpos kondensatorių C jo neigiamo grįžtamojo ryšio grandinėje.

3.5.4. Vidutinių kvadratinių verčių keitikliai

Jie teikia vidutinės kvadratinės (efektinės) įtampos vertes. Šie keitikliai sudaromi dviem būdais: panaudojant elektronikos grandines su atitinkamomis netiesinėmis voltamperinėmis

3. Srovės ir įtampos matavimas

charakteristikomis ir panaudojant elektronikos schemas su analoginiu vidutinės kvadratinės vertės modeliavimu.

Pirmuoju atveju reikia elektronikos grandinės, kurios voltamperinė charakteristika būtų aprašoma tokia priklausomybe:

$$i = au + bu^2. \quad (3.13)$$

Tada, kai paduodama įtampa yra periodinė ir simetrinė, vidutinė grandinės srovė per periodą yra

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T (au + bu^2) \, dt = b \frac{1}{T} \int_0^T u^2 \, dt = bU^2.$$

Keitiklio išėjimo vidutinė srovė (arba įtampa) gaunama proporcinga kintamosios įtampos efektinei vertei ir nepriklauso nuo įtampos laikinės funkcijos, t.y. nuo jos kreivės formos. Tokius keitikius dar vadina tikrosios efektinės vertės (*angl.* true RMS) keitikliais.

Keitiklio realizavimui reikia grandinės su kvadratine voltamperine charakteristika. Todėl kartais tokius keitikius vadina **kvadratiniais detektoriais**. Naudojamos schemas su termoelektriniais ir optoelektriniais keitikliais ir elektronikos grandinės aproksimuojančios kvadratinės voltamperinės charakteristikas, nes nėra tokių elektronikos įtaisų, kurie plačiame srovių intervale tokias charakteristikas turėtų.

Puslaidininkinių diodų voltamperinės charakteristikos pradžia yra artima kvadratinei, tačiau jos intervalas yra labai trumpas. Be to charakteristikų sklaida yra labai didelė ir negarantuotų priimtinių keitimo paklaidų. Buvo bandymų realizuoti tokius keitikius naudojant vakuuminių pentodų anodo–trečio tinklelio voltamperines charakteristikas, kurios gaunamos labai artimos kvadratinėms. Tačiau tokių lempų charakteristikų sklaida irgi labai didelė. Todėl tekdavo specialiai atrinkti tinkamus lempų egzempliorius ir jais komplektuoti elektroninius voltmetrus. Pasibaigus lempų tarnavimo laikui arba žymiai pakitus jų parametrų, tokius voltmetrus tekdavo išimti iš eksploatacijos. Vėliau yra naudoti vienpoliai (lauko) tranzistoriai, kurių santakos srovės priklausomybė nuo užtūros įtampos yra kvadratinė. Galima paduoti į keitiklio įėjimą dideles įtampas, tačiau keitiklių parametų sklaida ir temperatūrinis dreifas yra žymūs.

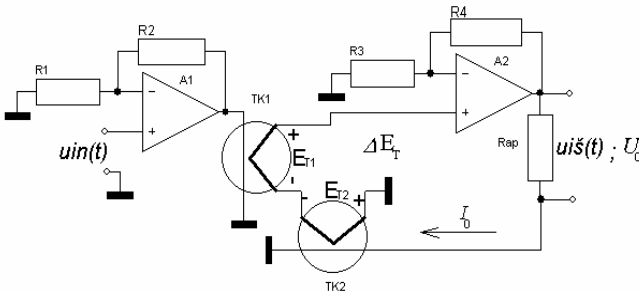
Schemose su termokeitikliais, naudojami termokeitikliai su tiesioginio ir netiesioginio kaitinimo **termoporomis**. Termokeitiklių parametų sklaida nėra žymi ir garantuoja priimtinas keitimo paklaidas. Termoporos termoelektrovara yra proporcinga jos

3. Srovės ir įtampos matavimas

kaitinimo elementu tekančios srovės efektinei vertei ir nepriklauso nuo srovės formos:

$$E_T = kI^2.$$

Dažniausiai naudojamos schemos su srovės grįžtamuju ryšiu, įgalinančios pasiekti stabilesnius keitiklių parametrus ir eliminuojančios išėjimo įtampos kvadratinę priklausomybę nuo įėjimo efektinės įtampos (3.20 pav.). Tiesinio plačiajuosčio stiprintuvo A1 išėjime įjungtas termokeitiklis TK1, kurio elektrovara yra sumuojama su neigiamojo grįžtamojo ryšio grandinės termokeitiklio TK2 elektrovara. Pastarasis yra įjungtas į keitiklio išėjimo srovės grandinę, prijungtą prie didelio stiprinimo plačiajuosčio stiprintuvo A2 išėjimo.



3.20 pav. Vidutinių kvadratinė verčių keitiklio su termokeitikliais funkcinė schema

Pirmo termokeitiklio elektrovara yra proporcinga jo kaitinimo srovės efektinės vertės kvadratui, o pastaroji yra proporcinga stiprintuvo įėjimo įtampos efektinei vertei: $E_{T1} = k_1 I^2 = k_1 K_{A1} U_{in}^2$. Antro termokeitiklio elektrovara yra proporcinga išėjimo srovės efektinės vertės kvadratui: $E_{T2} = k_2 I_0^2$. Kadangi operacinio stiprintuvo stiprinimas gali būti labai didelis, tai antrojo stiprintuvo įėjimo įtampa yra nykstamai maža ir schema susikompensuoja taip, kad abi elektrovaros tampa lygios:

$$\Delta E_T = E_{T1} - E_{T2} \approx 0; \quad k_1 K_{A1} U_{in}^2 \approx k_2 I_0^2 \approx \frac{k_2}{R_{ap}^2} U_0^2.$$

Iš pastarosios lygybės gauname keitiklio keitimo lygtį:

$$U_0 = \sqrt{\frac{k_1 R_{ap}^2 K_{A1}}{k_2}} U_{in} = k_{KD} U_{in}.$$

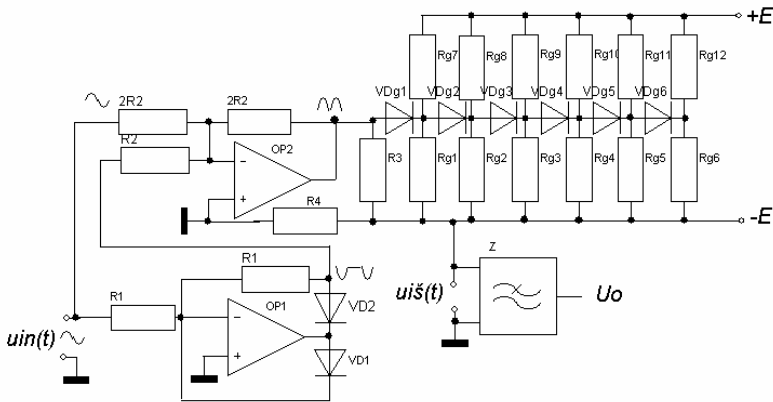
Tokie keitikliai turi tiesinę keitimo charakteristiką, tačiau yra inertiški, bijo perkrovų ir jų keitimo paklaida, dėl termokeitiklių parametrų sklaidos ir jų dreifo senstant keitikliams, gali siekti (2 – 6) %. Darbo dažnių diapazonas gali siekti nuo nuolatinės srovės iki šimto megahercų.

Panašiai veikia ir keitikliai, kuriuose vietoje termokeitiklių naudojami optoelektroniniai keitikliai – *rezistyviniai optronai*. Juose matuojamoji srovė kaitina miniatiūrinę kaitrinę lemputę, kurios skleidžiama šviesa veikia optrono fotorezistorių ir keičia jo varžą, bei per jį iš stabilizuoto nuolatinės srovės maitinimo šaltinio tekančią srovę. Jie yra jautresni, mažesnė jų inercija, bet dėl optronų parametrų sklaidos, o ypač jų parametrų temperatūrinės priklausomybės, gaunamos didesnės keitimo paklaidos.

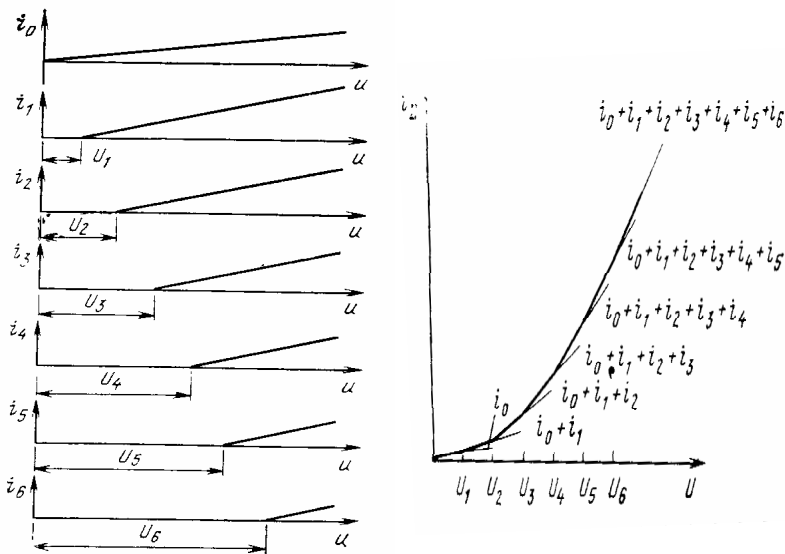
Dar vienas analogiškas keitiklis, kuriame taip pat panaudotas srovės šiluminio veikimo principas yra keitiklis su termorezistoriais. Vienas termorezistorius šildomas įėjimo virpesio srove ir šildo diferencinio stiprintuvo vieną tranzistorių, keisdamas jo išėjimo srovę [8, 164 psl.]. Schemoje yra panaudotas išėjimo srovės grįžtamasis ryšys. Ji kaitina antrą analogišką termorezistorių, kuris šildo kitą diferencinio stiprintuvo tranzistorių. Diferencinio stiprintuvo išėjimo įtampa per integruojantį operacinį stiprintuvą sukuria išėjimo srovę, kuri, tekėdama per minėtą grįžtamo ryšio termorezistorių jį šildo ir sukuria jame išėjimo įtampą. (*schema reikia sudaryti savarankiškai*).

Keitikliuose, kuriuose *kvadratinė keitimo charakteristika aproksimuojama*, dažniausiai naudojamos diodų–rezistorių grandinėlės ir charakteristikos aproksimavimas diodų voltamperinių charakteristikų atkarpomis. Tai netiesinė grandinė, kurios voltamperinė charakteristika atitinka (3.13) lygtį. Tokios grandinėlės veikia esant vieno ženklo įtampai, todėl, prieš paduodant į jas, įtampą reikia pakeisti jos moduliu, naudojant 3.18 arba 3.19 paveikslų keitiklius (be integratorių).

3. Srovės ir įtampos matavimas



3.21 pav. Vidutinių kvadratinų verčių keitiklio su kvadratinės charakteristikos sinteze funkcinė schema



3.22 pav. Kvadratinės charakteristikos aproksimavimas diodų charakteristikų segmentais

3. Srovės ir įtampos matavimas

Tai tiesinis keitiklis su netiesine apkrova. Galimas tokio keitiklio variantas, kuriame panaudotas 3.19 paveikslas tiesinis keitiklis, yra pavaizduotas 3.21 paveiksle. Kol tiesinio keitiklio išėjimo įtampa neviršija dydžio U_1 , visi diodų–rezistorių grandinėlių diodai uždari ir srovė yra proporcinga įtampai. Kai įtampa viršija dydį U_1 , atsidaro diodas VDg1 ir išėjimo srovė išauga. Grandinėlių diodų priešįtampių dalikliai yra parinkti taip, kad jų įtampos didėja ir todėl, didėjant grandinėlių veikiančiai įtampai, diodai atsidaro paeiliui ir grandinėlių laidumas auga. Kvadratinio dėsnio augant išėjimo srovei, tokiu pačiu dėsniu kinta ant rezistoriaus R_4 krentanti įtampa, kuri po integravimo ŽDF perduodama į keitiklio išėjimą. Parinkus pakankamą skaičių grandinėlių elementų su nedideliu priešįtampių skirtumu, galima gana tiksliai aproksimuoti (3.13) pavidalo srovės priklausomybę nuo įtampos (3.22 pav.).

Kadangi išnaudojamos trumpos diodų charakteristikų atkarpos, tai jų parametrų sklaida turi nežymią įtaką ir jau su (6–8) elementų grandinėle galima pasiekti (1–2) % aproksimavimo tikslumą. Keitiklio darbo dažnių diapazonas yra panašus kaip vidutinių išlygintų verčių keitiklių ir siekia dešimtis megahercų.

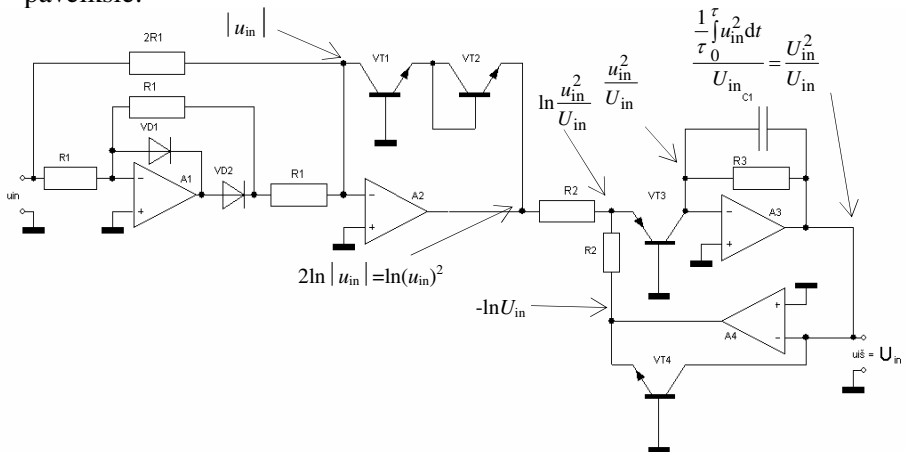
Pagrindinis tokių keitiklių trūkumas yra tas, kad keitiklio charakteristika yra kvadratinė, t.y. nuolatinė įtampa U_0 po integruojančio ŽDF yra kvadratinė keitiklio įėjimo įtampos efektinės vertės funkcija: $U_0 = K_{ND}U_{in}^2$.

Vidutinių kvadratinų verčių *keitikliai su analoginiu vidutinės kvadratinės vertės modeliavimu* naudoja dažniausiai algoritmą su logaritmovimo ir antilogaritmovimo procedūromis. Pirmiausia įėjimo įtampa yra išlyginama dvipusio lyginimo schema analogiška 3.18 ir 3.19 paveiksluose parodytoms schemoms ir teigiama įtampa paduodama į *logaritmuojančio stiprintuvo* įėjimą. Logaritmuojantis stiprintuvas gaunamas sudarius operaciniam stiprintuvui neigiamą grįžtamąjį ryšį per pn sandūrą. Kadangi pn sandūros tiesioginės srovės priklausomybė nuo įtampos yra artima eksponentinei, tai stiprintuvo įtampos perdavimo koeficientas gaunamas proporcingas paduodamos įtampos natūriniam logaritmui. Naudojamos tranzistorių su bendra baze išėjimo grandinės bei tranzistorių sujungtų diodo jungimu pn sandūros, kurių eksponentinės priklausomybės intervalas gaunamas ilgesnis. Tada ir stiprintuvo dinaminis diapazonas yra

3. Srovės ir įtampos matavimas

platesnis. Logaritmavimas turi būti dvigubas, todėl grįžtamojo ryšio grandinėje jungiamos dvi pn sandūros. Antilogaritmovimui panaudojamas operacinis stiprintuvas su pn sandūra įjungta nuosekliai į įėjimo grandinę. Tokio stiprintuvo išėjimo įtampa yra proporcinga paduodamos įtampos eksponentinei funkcijai, t.y. įvykdomas antilogaritmavimas. Antilogaritmuojantis stiprintuvas sykiu veikia ir integratoriaus režimu su laiko konstanta τ , garantuojančia mažiausio dažnio virpesio integravimą ir jo išėjime gaunamas antilogaritmuoto virpesio vidurkis. Tokio kvadratoriaus perdavimo funkcijos linearizavimui sudaromas neigiamas įtampos grįžtamasis ryšys.

Aptartas algoritmas gali būti realizuojamas įvairiomis schemomis. Vienas iš galimų sprendimo variantų yra pateiktas 3.23 paveiksle.



3.23 pav. Įtampos vidutinę kvadratinę vertę modeliuojanti schema

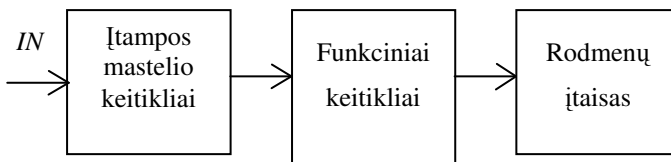
Išnagrinėtoji keitiklio schema pasižymi maža keitimo paklaida (iki 1 %) ir turi žymiai didesnę dinaminį diapazoną nei schema su termokeitikliais, todėl gali keisti virpesių su dideliu amplitudės koeficientu įtampas. Keitiklio dažnių diapazonas siekia dešimtis megahercų.

3.6. Elektroniniai voltmetrai

3.6.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas

Priklausomai nuo paskirties elektroniniai voltmetrai būna: *nuolatinės įtampos, kintamosios įtampos, universalūs, impulsinės įtampos, selektyvūs, jautrūs fazei (vektormetrai), įtampų santykio matuokliai* ir kitokie.

Apibendrinta elektroninio voltmetro struktūrinė schema parodyta 3.24 paveiksle.



3.24 pav. Apibendrinta elektroninio voltmetro struktūrinė schema

Elektroninių voltmetrų mastelio keitikliai tai kalibruoto dalijimo koeficiento įtampos dalikliai (ateniuatoriai) ir kalibruoto stiprinimo koeficiento tiesiniai įtampos stiprintuvai. Jie pakeičia veikiančios voltmetro įėjime įtampos dydį iki reikiamos funkcinio keitiklio veikimui.

Funkciniai keitikliai keičia įtampą tokiu fizikiniu dydžiu, kurio reikia rodmenų įtaiso veikimui.

Pagal rodmenų įtaiso tipą, voltmetrai skirstomi į *analoginius* ir *skaitmeninius*. Analoginiuose voltmetruose rodmenų įtaisais naudojami elektromechaniniai rodykliniai matavimo prietaisai – dažniausiai *magnetoelektrinės* sistemos mikroampermetrai, kadangi šios sistemos elektromechaniniai prietaisai yra tiksliausi ir jautriausi. Skaitmeniniuose voltmetruose naudojami skaitmeniniai rodmenų įtaisai. Juose matuojamoji įtampa keičiama funkciniu keitikliu į nuolatinę įtampą, o pastaroji keičiama į proporcingą jos reikšmei laiko intervalą arba dažnį, kurie po to matuojami skaitmeniniais būdais. Kartais naudojami ir kompensaciniai paskiltinio balansavimo ASK arba tiesioginio keitimo lygiagretieji ASK. Lyginant su analoginiais, skaitmeniniai voltmetrai turi tokių privalumų: patogesnis ir tikslesnis rodmenų nuskaitymas, rodo ne tik išmatuotą

3. Srovės ir įtampos matavimas

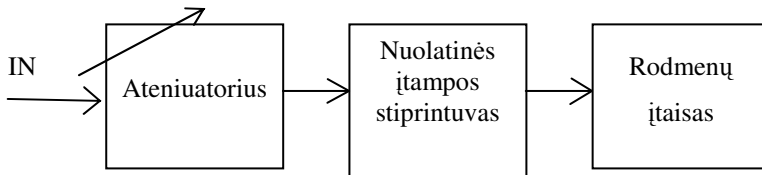
įtampą, bet ir matavimo vienetą, paprasčiau susieti jį į sistemą su kompiuteriu tolimesnei teikiamų matavimo rezultatų analizei bei matavimo proceso valdymui, paklaidų koregavimui bei rezultatų teikimui įvairiais pavidalais: grafikais, diagramomis ir kt.

Elektroniniai voltmetrai pasižymi didele įėjimo varža. Dėl to matuojamos įtampos šaltinis labai mažai apkraunamas. Tačiau jiems reikalingas maitinimo šaltinis. Tai elektroninių voltmetrų trūkumas.

3.6.2. Analoginiai elektroniniai voltmetrai

Nuolatinės įtampos elektroniniai voltmetrai privalo turėti didelę įėjimo varžą ir jautrį įtampai bei platų dinaminį diapazoną. Sudaryti iš įtampos mastelio keitiklių ir magnetoelektrinio rodmenų įtaiso.

Apibendrinta *nuolatinės įtampos* elektroninių voltmetrų struktūrinė schema parodyta 3.25 pav.



3.25 pav. Apibendrinta nuolatinės įtampos voltmetro struktūrinė schema

Kadangi magnetoelektriniam rodmenų įtaisui teikiama nuolatinė įtampa, tai nuolatinės įtampos elektroninio voltmetro elementai, esantys prieš rodmenų įtaisą yra tik mastelio keitikliai: didelės varžos rezistyvus įtampos daliklis ir nuolatinės įtampos stiprintuvas. Nuolatinės įtampos stiprintuvams yra būdingas vadinamasis nulinis dreifas. Todėl naudojami diferenciniai stiprintuvai, kurie yra mažiau jautrūs sinfaziniams poveikiams, sąlygojantiems nulinį dreifą. Tačiau kai stiprintuvo stiprinimas yra didelis nulinis dreifo efektas gali sukelti didelę matavimo paklaidą. Todėl tokie voltmetrai yra nejautrūs. Jų įtampų matavimo ribų diapazonas prasideda nuo 0,5 V. Viršutinė matavimo riba yra sąlygojama atenuatoriaus elektriniu atsparumu ir būna iki 600 V. Matavimo ribai išplėsti naudojami išoriniai aukštos įtampos fiksuoto dalinimo koeficiento (pavyzdžiui, 1:10) varžiniai įtampos dalikliai.

3. Srovės ir įtampos matavimas

Jautresni nuolatinės įtampos elektroniniai voltmetrai sudaromi kai įtampos stiprinimui naudojamos schemos su modulatoriais ir demodulatoriais ir kintamos įtampos stiprintuvais. Juose matuojama įtampa po atenuatoriaus paduodama į amplitudės moduliatorių ir moduliuoja pagalbinio generatoriaus tiekiamo kelių šimtų kilohercų dažnio virpesio amplitudę. Moduluotasis aukšto dažnio virpesys yra stiprinamas didelio stiprinimo koeficiento kintamosios įtampos stiprintuvu, o po to demoduliuojamas balansiniu demodulatoriumi. Tokie voltmetrai gali matuoti pradedant mikrovoltų eilės įtampas, bet yra sudėtingesni ir brangesni.

Be to, voltmetre yra maitinimo šaltinius. Maitinimo šaltinis užtikrina voltmetro stiprintuvo maitinimą reikiamomis įtampomis ir srovėmis.

Kintamosios įtampos elektroniniai voltmetrai privalo turėti funkcinis keitiklius, keičiančius kintamosios įtampos matuojamą vertę į nuolatinę įtampą. Pagal tai, kokią kintamosios įtampos vertę matavimo keitiklis keičia į nuolatinę įtampą, skiriami vidutinės kvadratinės (efektinės) vertės voltmetrai, pikinės (amplitudinės) vertės voltmetrai ir vidutinės išlygintosios vertės voltmetrai. Bet tai dar nereiškia, kad voltmetras rodys būtent tą įtampos vertę, kurią keičia keitiklis – mes jau aptarėme, kad visi elektroniniai voltmetrai, išskyrus impulsinius, graduojami efektinėmis įtampos vertėmis.

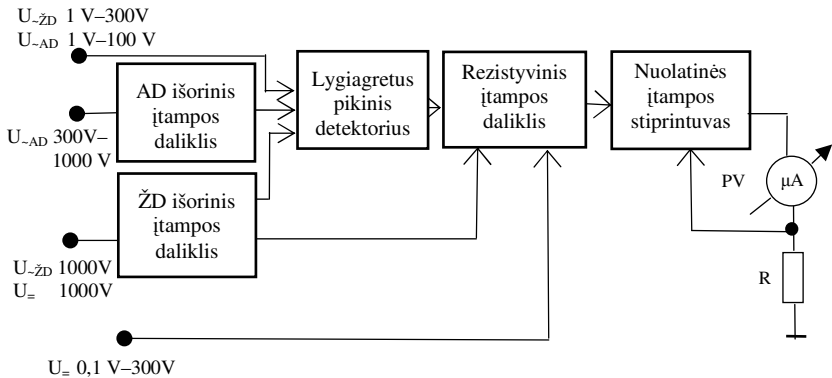
Galimos dvi pagrindinės kintamosios įtampos voltmetrų schemos. Pirmoje kintamoji įtampa funkciniu keitikliu keičiama į nuolatinę ir po to stiprinama nuolatinės įtampos stiprintuvu. Literatūroje tokio tipo schemas vadina „schema detektorius–stiprintuvas“. Antroje scheme kintamoji įtampą iš pradžių stiprinamą kintamosios įtampos stiprintuvo ir tik po to funkciniu keitikliu keičiama į nuolatinę įtampą. Tokias schemas trumpai vadina „stiprintuvo–detektoriaus schemomis“.

Dažniausiai pirmo tipo scheme naudojami lygiagretūs pikiniai detektoriai su uždaru nuolatinei įtampai įėjimu. Tada, kai detektorius padarytas kaip detektorinė galvutė kabeliu sujungiama su likusia schema, gaunamos geriausios dažninės voltmetro savybės – plačiausia dažnių sritis (gali siekti 2 GHz). Atskirto nuo voltmetro detektoriaus panaudojimas leidžia sumažinti iki minimumo jungiamųjų laidų parazitinių parametrų įtaką voltmetro dažninėms savybėms. Žemų dažnių įtampų detektavimui, detektoriaus schemos

3. Srovės ir įtampos matavimas

kondensatorius pakeičiamas didesniu. Tačiau, kaip minėta, pikiniai detektoriai nėra jautrūs ir jų veikimui reikia apie (0,5 – 1) V įtampos. Todėl tokie voltmetrai nėra jautrūs. Įtampos iki kelių šimtų voltų yra paduodamos tiesiog į detektorių, o didesnės yra dalinamos išoriniais įtampos dalikliais. Voltmetrų įėjimo varža gali būti gana didelė (apie 10 MΩ žemuose dažniuose), nes ją, kaip žinome, nustato didelė detektoriaus apkrovos varža.

Tokiuose voltmetruose po detektoriaus matavimo informacijos signalai yra tik nuolatinės įtampos pavidalo. Jų schemų struktūriniai elementai yra tokie patys kaip nuolatinės įtampos elektroninių voltmetrų: rezistyviniai įtampos dalikliai ir nuolatinės įtampos stiprintuvai. Tai leidžia tokius voltmetrus realizuoti kaip universalius: tinkančius matuoti ir kintamas ir nuolatinės įtampas. 3.26 paveiksle kaip iliustracija yra pateikta vieno iš serijinių tokio tipo voltmetrų struktūrinė schema.



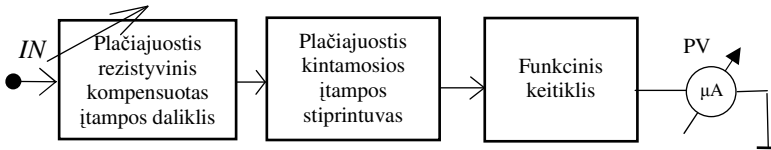
3.26 pav. „Detektorius – stiprintuvas“ universaliojo elektroninio voltmetro struktūrinė schema

Aukšto dažnio (AD) išorinis įtampos daliklis paprastai yra fiksuoto dalinimo koeficiento talpinis įtampos daliklis. Žemo dažnio (ŽD) išorinis įtampos daliklis naudojamas dalinti ir nuolatinę įtampą yra fiksuoto dalinimo koeficiento rezistyvinis įtampos daliklis. Nuolatinės įtampos stiprintuvas yra apimtas išėjimo srovės

3. Srovės ir įtampos matavimas

neigiamąjo grįžtamojo ryšio, kurio įtampa nuimama nuo rezistoriaus R , įjungto nuosekliai su magnetoelektriniu rodmenų įtaisu PV.

Antro tipo schema (3.27 pav) sudaroma tada, kai naudojami vidutinės išlygintosios vertės ir vidutinės kvadratinės vertės keitikliai, kurių veikimui reikia didesnių įtampų. Įtampos stiprinimui naudojami kintamosios įtampos stiprintuvai sustiprina ją iki dydžio, pakankamo normaliam funkcinio keitiklio ir rodmenų įtaiso veikimui.



3.27 pav. Kintamosios įtampos voltmetrų struktūrinė schema „stiprintuvas – detektorius“

Tokiai schemai būdingas didesnis voltmetrų jautris – jie gali matuoti labai mažas (mikrovoltų eilės) įtampas (3.28 pav.). Tačiau,

nepaisant to, kad rezistyviniai įtampos dalikliai daromi kompensuoti talpomis, siekiant jų pastovinio dalijimo koeficiento dažnių diapazone, o stiprintuvai projektuojami plačiajuosčiai ir apgaubiami giliais neigiamais įtampos grįžtamaisiais ryšiais, didelis struktūrinės schemos elementų skaičius, veikiančių esant kintamajai įtampai, neleidžia pasiekti plataus dažnių diapazono ir jo riba yra apie (10 – 20) MHz.



3.28 pav. Paprasčiausio vidutinių išlygintų verčių analoginio kintamosios įtampos voltmetro bendras vaizdas

Antro tipo schemas

3. Srovės ir įtampos matavimas

voltmetrų įėjimo varžą nustato įtampos daliklis. Kadangi jo apatinio peties varža yra šuntuojama stiprintuvo įėjimo varža, tai bendra įėjimo varža nėra didelė ir būna iki 1 MΩ eilės dydžio. Tranzistorinių stiprintuvų su dvipoliais tranzistoriais įėjimo varža gali būti dar mažesnė, todėl jų priekyje būdavo įjungiamas vadinamasis impedanso keitiklis – katodinis įtampos kartotuvas su elektronine lempa. Dabar priekinis stiprintuvas dažnai sudaromas su vienpoliu tranzistoriumi. Naudojami ir operaciniai stiprintuvai.

Voltmetrų įtampos matavimo ribos keičiamos keičiant rezistyvinių įtampos daliklių dalinimo koeficientą.

Kintamosios įtampos voltmetrų funkciniai keitikliai keičia įvairias įtampos vertes, o jų rodmenų įtaisai sugraduoti atvaizduoti sinusinės įtampos efektines vertes, todėl kintamosios įtampos voltmetrų rodmenys priklauso nuo matuojamos įtampos kreivės formos.

Matuojant tos pačios amplitudės ir dažnio sinusinio virpesio įtampą voltmetrais su skirtingais funkciniais keitikliais, jų rodmenys bus beveik vienodi. Taip yra dėl minėtos gradavimo sąlygos. Rodmenys skirsis tik dėl nevienodų matavimo paklaidų. Tačiau, jei tų pačių dažnio ir amplitudės periodinių virpesių forma skirsis nuo sinusinės, tai voltmetrų su skirtingais funkciniais keitikliais rodmenys bus skirtingi, nes juose bus skirtingi ryšiai tarp keitiklio teikiamos įtampos vertės ir tos įtampos efektinės vertės – voltmetrai nerodys matuojamos įtampos efektinės vertės. Teisingas bus tik voltmetro su vidutinių kvadratinių verčių keitikliu rezultatas: jis visuomet rodys matuojamos įtampos vidutinę kvadratinę vertę.

Taigi, matuojant skirtingų formų periodinių virpesių įtampą, matuojamos įtampos verčių (efektinės, pikinės, vidutinės išlygintos) dažniausia negalima tiesiogiai nustatyti iš voltmetrų rodmenų. Jas tegalima apskaičiuoti.

3.6.3. Skaitmeniniai elektroniniai voltmetrai

3.6.3.1. Bendrosios žinios

Skaitmeninių įtampos matavimo metodų taikymas leidžia sukurti automatizuotus aukšto matavimo tikslumo (paklaida iki 0,0001 %) voltmetrus. Be to, jie turi privalumą, kad jų rodmenys yra

3. Srovės ir įtampos matavimas

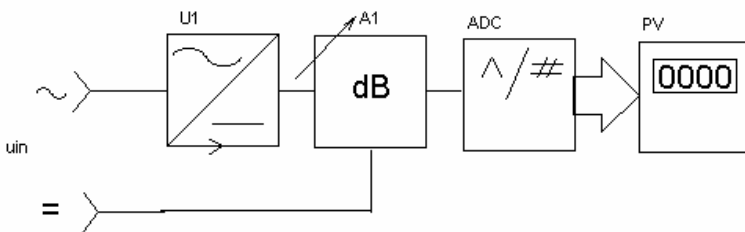
objektyvūs: pateikiami dešimtaine skaitmenine forma prietaiso rodmenų įtaise. Rodmenis lengvai galima registruoti ir perduoti informacijos perdavimo kanalais nemažinant tikslumo, nes jie pateikiami skaitmeninio signalo forma išėjimo jungtyje dvejetainiu arba kitokiu kodu. Skaitmeniniai voltmetrai yra sudėtingesni ir brangesni, tačiau pingant skaitmeniniams įtaisams tampa vis plačiau naudojami.

Pagal funkcijas jie irgi gali būti skirstomi į tokias pačias grupes kaip ir analoginiai voltmetrai. Tačiau dažniausiai jie nėra specializuojami, o gaminami kaip universalieji voltmetrai dar pridėdant jiems papildomų matavimų (srovės, varžos, dažnio, talpos ir kt.) funkcijas. Todėl plačiausiai yra paplitę skaitmeniniai multimetrai, kur įtampos matavimas yra tik viena (dažnai svarbiausia) funkcija.

3.6.3.2. Bendroji struktūrinė schema

Skaitmeniniame voltmetre analoginė įėjimo įtampa analoginiu–skaitmeniniu keitikliu (ASK) yra keičiama į skaitmeninį kodą. Atskiri voltmetrai skiriasi tik ASK rūšimi ir matavimo proceso valdymo principu.

Dažniausia ASK keičia nuolatinę įtampą: vieno ženklo lėtai kintančią įtampą, todėl kai matuojama kintamoji įtampa, ji prieš tai funkciniu keitikliu pakeičiama į nuolatinę. Naudojami visi anksčiau aptarti kintamosios įtampos funkcinių keitiklių tipai. Kadangi įtampa yra analoginis dydis, tai pagrindiniai jos keitimai iki ASK yra analoginiai (3.29 pav.).



3.29 pav. Apibendrinta skaitmeninio elektroninio voltmetro struktūrinė schema

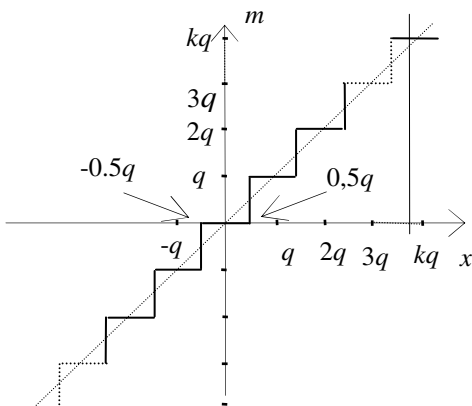
3. Srovės ir įtampos matavimas

Pagal valdymo principą skaitmeninius voltmetrus skirsto į fiksuotos logikos ir programuojamos logikos voltmetrus. Pastarieji visuomet valdymui naudoja mikroprocesorių. Dabartiniu metu dauguma skaitmeninių voltmetrų sudaromi su tokiu valdymu.

3.6.3.3. Skaitmeninių voltmetrų ASK bendrosios savybės

Analoginiam–skaitmeniniam keitimui dažniausiai naudojamos tokios ASK rūšys: *tiesioginio keitimo* arba *tarpinio keitimo* į laiko intervalą ir į dažnį. Pagal skaičiaus kodo sudarymo būdą skiriami nuosekliojo keitimo, lygiagrečiojo keitimo ir mišriojo keitimo ASK.

Analoginio–skaitmeninio keitimo procedūroje egzistuoja **kvantavimo** operacija – analoginiam dydžiui suteikiama skaitinė vertė. Apvalinant matuojamojo (keičiamojo) dydžio vertę iki diskrečiosios vertės atsiranda specifinė paklaida – **kvantavimo** (diskretizavimo) **paklaida**. Dažniausiai apvalinama orientuojantis pagal **kvantavimo žingsnio** q vidurį (3.30 pav.) , t. y. taip pat kaip apvalinama atliekant visus skaičiavimus.



3.30 pav. Tolygusis kvantavimas
pastoviuoju žingsniu q

Kvantavimo paklaida atsiranda visuose ASK, nes juose atliekamas keičiamojo dydžio diskretizavimas – galima begalinė tolydžiojo dydžio x verčių aibė pakeičiama baigtiniu skaičiumi m . ASK įėjimo dydis x yra tolydusis, o jo išėjimo dydis – dydį x atitinkantis baigtinis skaičius m . 3.30 paveikslas vaizduoja ASK statinę keitimo

charakteristiką, kai kvantavimo žingsnis q yra pastovus. Matome, kad, keičiant tolydųjį dydį x diskrečiuoju dydžiu $m=kq$, gaunama kvantavimo paklaida Δ_q :

3. Srovės ir įtampos matavimas

$$m = kq = x + \Delta_q. \quad (3.14)$$

Kaip matyti iš 3.31 paveikslo, kvantavimo paklaidos ribos yra:

$$\Delta_{q \max} = \pm \frac{1}{2} q.$$

Rezultato $m=kq$ tikimybė priklauso nuo keičiamojo dydžio tikimybių skirstinio ir yra lygi:

$$P_m = \int_{kq-q/2}^{kq+q/2} f(x) dx;$$

čia $f(x)$ – keičiamojo dydžio x tikimybės tankio funkcija. Kai keitimo charakteristikos pradžia yra fiksuota ir sutampa su kvantavimo žingsnio pradžia, tai kvantavimo paklaidos tikimybių skirstinys gaunamas artimas tolygiajam skirstiniui su tikimybės tankiu $f(x)=1/q$, jeigu keičiamojo dydžio vidutinis kvadratinis nuokrypis yra gerokai didesnis už kvantavimo žingsnį: $\sigma_x \gg q$.

Jeigu kvantavimo skalės pradžia yra atsitiktinė kvantavimo žingsnio atžvilgiu, tai kvantavimo paklaidą sudaro dviejų paklaidų su tolygiaisiais tikimybių skirstiniais kompozicija: $\Delta_q = \Delta_{q1} + \Delta_{q2}$. Vienos šių paklaidų tolygiojo pasiskirstymo intervalas yra $[-q, 0]$, o kitos – $[0, q]$. Todėl kompozicijos skirstinys gaunamas trikampis (Simpsono skirstinys) su tokiu tikimybės tankiu:

$$f(\Delta_q) = \frac{1 - |\Delta_q|/q}{q}, \quad (-q < \Delta_q < q).$$

Kai įvykdoma sąlyga $\sigma_x \gg q$, kvantavimo paklaidos matematinė viltis (sisteminioji kvantavimo paklaida) yra lygi nuliui, o jos standartinė paklaida pirmuoju atveju:

$$\sigma_q = \frac{\Delta_{q \max}}{\sqrt{3}} = \frac{q}{\sqrt{3}},$$

o antruoju atveju:

$$\sigma_q = \frac{\Delta_{q \max}}{\sqrt{6}} = \frac{q}{\sqrt{6}}.$$

ASK išėjimo dydis – skaičius m vadinamas keičiamojo dydžio x **kodu**. Skaitinis kodas paprastai gaunamas naudojant tam tikrą skaičiavimo sistemą:

3. Srovės ir įtampos matavimas

$$m = \sum_{i=1}^n b_i a^{i-1};$$

čia a – skaičiavimo sistemos pagrindas, n – skilčių skaičius, b_i – skilčių koeficientai.

Paprasčiausia būtų *vienetainė* (unitarinė) skaičiavimo sistema, kurios $a=1$, tačiau ja išreikšti didelius skaičius būtų labai nepatogu. Įprasta *dešimtainė* sistema su $a=10$ techninėmis priemonėmis sunkiai realizuojama. Keitikliuose dažniausiai naudojama *dvejetainė* (binarinė) skaičiavimo sistema su $a = 2$, nes jos skilčių koeficientai yra 0 ir 1, todėl ją lengviausia realizuoti techninėmis priemonėmis. Naudojamos taip pat kombinuotosios skaičiavimo sistemos: dvejetainė – šešioliktainė, dvejetainė – dešimtainė ir kitos. Matavimo rezultatai matavimų priemonių rodmenų įtaisuose visuomet vaizduojami dešimtainės sistemos skaičiais. Todėl naudojami įvairūs perkodavimo įtaisai – **dešifratoriai**. Papildomai koduojama siekiant apsugoti duomenis nuo įvairių trukdžių įtakos. Naudojamas kodavimas Fibonačio, Rydo – Solomono (*angl.* RSC) ir kitais trukdžiams atspariais kodais, ypač kai analoginio-skaitmeninio keitimo rezultatus (duomenis) tenka perduoti duomenų perdavimo kanalais arba saugoti atminties įtaisuose.

Be keitimo paklaidos, kurios didžiąją dalį sudaro aptartoji kvantavimo paklaida, ASK dar charakterizuojami: *keitimo laiku*, *atsparumu trukdžiams*, *datavimo paklaida* ir išėjimo kodo tipu, skilčių skaičiumi ir kodo pavidalu – nuosekliuotu arba lygiagrečiuoju.

Keitimo laikas – laikas, reikalingas vienai analoginio įėjimo dydžio diskretinei vertei pakeisti skaitmenų kodu. Jis turi būti trumpesnis nei keitimo ciklo trukmė. Keitimo laikas ir pereinamųjų procesų trukmė ASK analoginėje dalyje lemia ASK dinamines paklaidas.

ASK gaunama neapibrėžta situacija: kokiai keičiamojo dydžio vertei priskirti išėjimo kodą, kai per keitimo laiką pakinta įėjimo dydis. Tai specifinė dinaminė paklaida vadinama **datavimo paklaida**. Ji mažinama analoginiu atminties įtaisu fiksuojant įėjimo dydžio tam tikrą diskrečiąją vertę per visą keitimo laiką.

Pagal **keitimo laiko trukmę** ASK skirstomi į *mažos keitimo spartos* (keitimo laikas $10^2 \dots 10^5 \mu s$), *vidutinės keitimo spartos* (keitimo laikas $10 \dots 100 \mu s$), *didelės keitimo spartos* (keitimo laikas

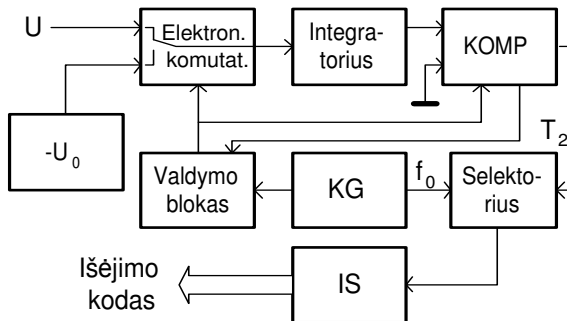
0,1...10 μ s) ir *labai didelės keitimo spartos* (keitimo laikas $\leq 0,01...0,1 \mu$ s).

3.6.3.4. Skaitmeninių voltmetrų ASK schemos ir veikimas

Panagrinėsime keletą labiausiai paplitusių skaitmeninių voltmetrų analoginio–skaitmeninio keitimo būdų.

Dvigubo integravimo (*angl. dual slope*) ASK. Priklauso tarpinio keitimo ASK grupei. Jie keičia įtampą į laiko intervalą, o pastarąjį – į skaitinį kodą (3.31 pav.).

Keitimo ciklo pirmojo takto trukmę T_1 nustato valdymo blokas. Jo metu integruojama keičiamoji nuolatinė teigiama įtampa U ir nuolatinė įtampa integratoriaus išėjime gaunama lygi: $U_{\text{int}} = \frac{UT_1}{\tau}$, τ yra integratoriaus laiko konstanta. Antrojo takto metu integruojama priešingo ženklo atraminė įtampa U_0 ir integratoriaus įtampa po laiko T_2 , proporcingo įėjimo įtampai, sumažėja iki nulio.



3.31 pav. Dvigubo integravimo ASK

Šis laikas yra lygus: $T_2 = \frac{T_1 U}{U_0}$. Laiko T_2 trukmę apskaičiuoja impulsų skaitiklis IS, skaičiuodamas kvarcinio generatoriaus KG

3. Srovės ir įtampos matavimas

periodus T_0 : $T_2 = mT_0$. Laiko intervalas T_1 suformuojamas valdymo bloke iš kvarcinio generatoriaus periodų ir yra lygus: $T_1 = qT_0$. tada gauname, kad skaičiaus kodas yra proporcingas keičiamai įtampai ir nepriklauso nuo integratoriaus laiko konstantos ir nuo kvarcinio generatoriaus virpesių periodo. Taip išvengiama paklaidų, kurias įneštų šių dydžių nestabilumas. Parinkus q ir U_0 gaunamas tiesioginis atskaitymas: $U = \frac{mU_0}{q} = m \cdot 10^{\pm b}$. Tokie ASK yra pakankamai

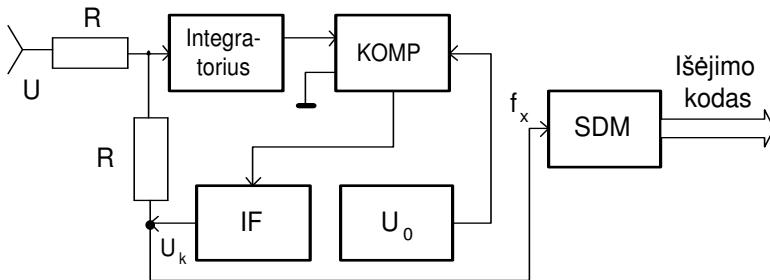
tikslūs (keitimo paklaida apie 0,01 %) ir atsparūs trukdžiams, tačiau jų veikimo greitis nėra didelis (keitimo laikas $\geq 100 \mu s$).

Tarpinio keitimo į dažnį ASK. Juose įėjimo įtampa iš pradžių yra keičiama į jai proporcingą periodinio virpesio dažnį, o paskui dažnis keičiamas skaičių kodu skaitmeniniame dažniamatyje SDM (3.32 pav.).

Integruojant įėjimo teigiamo ženklo nuolatinę įtampą U , auga integratoriaus išėjimo įtampa, kol per laiką T_1 pasiekia to paties ženklo atraminį lygį U_0 , nustatomą atraminės įtampos šaltinio. Paskui impulsų formuotuvas IF formuoja priešingo ženklo didelio lygio U_k ir praktiškai pastovaus ploto ($U_k T_2$) impulsą kuris, per laiką T_2 sumažina integratoriaus išėjimo įtampą iki nulio. Tarp paminėtų įtampų ir laiko intervalų gaunamas toks ryšys (kai $T_1 \gg T_2$):

$$U(T_1 + T_2) = U_k T_2;$$

$$U = \frac{U_k T_2}{T_1 + T_2} = kf_x.$$



3.32 pav. Keitimo į dažnį ASK

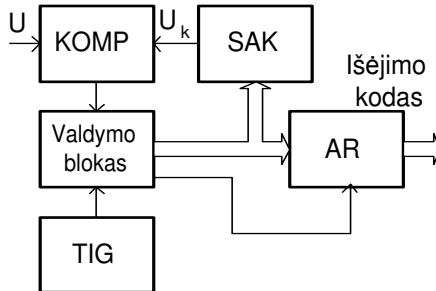
3. Srovės ir įtampos matavimas

Šie ASK yra taip pat tikslūs (paklaida apie 0,01 %) ir labai atsparūs trukdžiams, bet veikia lėtai: matavimo laikas apie 0,1 s.

Aptartieji ASK yra integruojantys. Jų didelį atsparumą kintamos srovės trikdžiams galima paaiškinti tuo, kad sinusinis trikdžio signalas u_t, f_t dažnio, esant matavimo laikui kartotinam trikdžio dažniui $t_m = n/f_t$ ($n=1,2,3,\dots$) visiškai neturi įtakos matavimo

rezultatui, nes $\int_0^{t_m} u_t dt = 0$.

Paskiltnio palyginimo ASK. Juose keičiama nuolatinė vieno ženklų įtampa U lyginama su atramine įtampa U_k , keičiama iš valdymo bloko per SAK (3.33 pav.). Lyginimas pradedamas aukščiausiu SAK kodo skiltimi į ją įrašius vienetą. Jeigu $U_k < U$, tai vienetu padidinama jaunesnė kodo skiltis. Jeigu dar $U_k < U$, tai vienetu didinama sekanti jaunesnė kodo skiltis. Kai gaunama $U_k > U$, palyginimas stabdomas: sumažinama prieš tai buvusios skilties vertė nuo nulio iki vieneto ir įrašomas vienetas į mažiausią skiltį. Taip po m darbo taktų yra peržiūrimos visos m kodo skiltys. Tokie ASK pasižymi mažu keitimo laiku. Tačiau jų keitimo paklaidos siekia iki 0,1 % ir keitimo rezultatui daugiau turi įtakos trukdžiai.

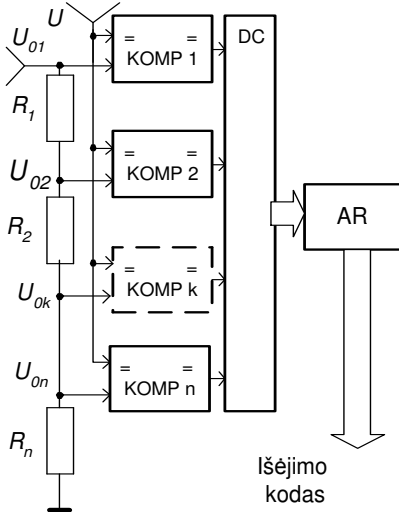


3.33 pav. Paskiltnio palyginimo ASK schema

Tiesioginio palyginimo ASK. Matuojamoji įtampa yra diskretizuojama pastoviu žingsniu T_k ir ši diskreti vertė fiksuojama laikinos analoginės atminties įtaise. Toliau ši įtampos diskrečioji vertė vienu metu yra lyginama komparatoriuose (3.34 pav.) su eile

3. Srovės ir įtampos matavimas

(pavyzdžiui, 256) atraminių įtampų, gaunamų padalijus atraminę įtampą rezistyvinio įtampos dalikliu.



3.34 pav. Tiesioginio palyginimo ASK

Komparatorių išėjimo lygiai, priklausomai nuo palyginimo rezultato, yra 0 arba 1. Gautas dvejetainis kodas yra keičiamas dešifratoriumi DŠ ir per atminties registrą AR išvedamas iš ASK. Tai didelės veikimo spartos, tačiau mažesnio tikslumo ir atsparumo trukdžiams ASK. Jie gali būti naudojami ir kintamajai įtampai keisti. Tuomet reikia lyginti ir teigiamo ženklo ir neigiamo ženklo diskrečias vertes atskiruose palyginimo įtaisuose.

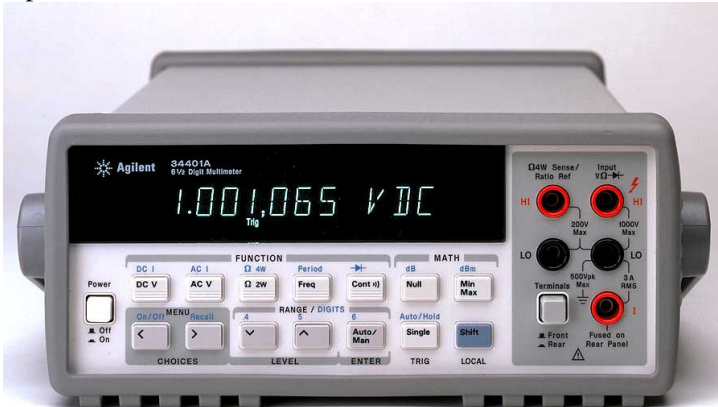
Jeigu įėjimo įtampa yra periodinė su periodu T ir jos dažnių spektras apribotas N eilės harmonika, tai Naikvisto diskretizavimo teorema tenkinama, kai $(2N+1)T_k = T$. Jeigu $u(kT_k)$ yra k -oji diskrečioji įtampos vertė, tai įtampos efektinė vertė yra nustatoma kaip atskirų diskrečiųjų verčių kvadratų vidurkis:

$$U = \sqrt{\frac{1}{2N+1} \sum_{k=0}^{2N} u^2(kT_k)}.$$

Kaip minėta, dažniausiai skaitmeniniai voltmetrai turi ASK su tarpiniu įtampos keitimu į laiko intervalą arba dažnį, todėl jie visuomet gali būti panaudoti ir virpesių laiko parametrų matavimui. Be to jie pritaikomi ir elektronikos grandinių elementų parametrų matavimui: varžų matavimui, o kartais ir kondensatorių talpų bei

3. Srovės ir įtampos matavimas

ričių induktyvumų matavimui. Todėl šiuolaikiški skaitmeniniai įtampos matavimo prietaisai dažniausiai gaminami kaip multimetrai (3.35 pav.).



3.35 pav. Agilent Technology skaitmeninio multimetrio 34401A bendras vaizdas

3.7. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui

1. Užrašykite vidutinės, vidutinės išlygintos ir vidutinės kvadratinės įtampos vertės formules. Kaip parenkamas integravimo laikas?

2. Ką vadiname pikine, amplitudine, efektine, įtampos verte?

3. Ką vadiname įtampos amplitudės ir formos koeficientais?

4. Kokie esminiai reikalavimai keliami voltmetrams?

5. Kaip klasifikuojami elektroniniai voltmetrai?

6. Kokios pagrindinės elektroninių voltmetrų struktūrinės schemos ir jų savybės?

3. Srovės ir įtampos matavimas

7. Kokie funkciniai kintamosios įtampos keitikliai naudojami elektroniniuose voltmetruose?

8. Ką vadiname pikiniu (amplitudės) detektoriumi? Kokios yra šių detektorių schemos ir bendrosios savybės? Kas nustato jų įėjimo varžą ir dažnines savybes?

9. Ką vadiname tiesiniais (vidutinių išlygintųjų verčių) detektoriais? Kokios yra šių detektorių schemos ir savybės?

10. Ką vadiname efektinių verčių (kvadratiniais detektoriais arba keitikliais)? Kokios yra jų schemos ir savybės?

11. Kokie detektoriai naudojami voltmetruose, skirtuose sinusinei įtampai matuoti?

12. Kokie detektoriai naudojami impulsiniuose voltmetruose?

13. Kada naudojami kvadratiniai keitikliai?

14. Kodėl voltmetrų rodmenys priklauso nuo matuojamosios įtampos kreivės formos?

15. Kokie pagrindiniai ASK tipai naudojami skaitmeniniuose elektroniniuose voltmetruose? Kokiais parametrais charakterizuojami ASK? Kas yra kvantavimo paklaida ir nuo ko ji priklauso?

16. Analoginis neimpulsinis voltmetras su pikiniu detektoriumi ir uždaru įėjimu matuoja įtampą schemeje, sudarytoje iš nuosekliai sujungtų diodo ir rezistoriaus. Schemos įėjime veikia įtampa, pavyzdžiui, $u(t)=252\sin\omega t$. Ką rodys voltmetras schemos įėjime ir po diodo?

17. Ką rodys uždaro įėjimo voltmetrai su pikiniu, dvipusio išlyginimo tiesiniu ir kvadratinio detektoriais, jeigu jie graduoti sinusinės įtampos efektinėmis vertėmis kai, pavyzdžiui, įtampa yra vieno ženklo stačiakampių impulsų periodinės sekos formos, $U_m=10\text{ V}$, o impulsų retis $Q=4$?

18. Impulsinis voltmetras su uždaru įėjimu rodo, pavyzdžiui, $U_1 = 20\text{ V}$, o voltmetras su kvadratinio

3. Srovės ir įtampos matavimas

detektoriumi $U_2 = 14,18$ V. Kokia matuojamosios įtampos forma? Kodėl?

19. Matuojant tuo pačiu voltmetru gautos tokios įtampų reikšmės, pavyzdžiui, $U_1 = 20$ V ir $U_2 = 14,18$ V. Koks didesnės ir mažesnės įtampos santykis decibelais?

20. Nubraižykite skaitmeninio elektroninio voltmetro, su dvigubo integravimo ASK, keičiančiu nuolatinę įtampą į jai proporcingą laiko intervalą, struktūrinę schemą ir pagrindines laiko diagramas, iliustruojančias schemos veikimą. Kodėl tokie voltmetrai yra tikslesni?

21. Nubraižykite skaitmeninio elektroninio voltmetro, su ASK, keičiančiu nuolatinę įtampą į jai proporcingą dažnį, struktūrinę schemą ir svarbiausias jo veikimą iliustruojančias laiko diagramas.

22. Nubraižykite skaitmeninio elektroninio voltmetro, su paskiltinio balansavimo ASK struktūrinę schemą.

23. Nubraižykite skaitmeninio elektroninio voltmetro, su lygiagretaus keitimo ASK struktūrinę schemą.