



KURKIME ATEITĮ DRAUGE!

Europos Sąjungos struktūrinių fondų paramos
projektas
**„MOKYMO IR STUDIJŲ PROGRAMOS
MECHANIKOS IR ELEKTRONIKOS
SEKTORIAUS POREIKIAMS TENKINTI
SUKŪRIMAS“**

Sutarties Nr. ESF/2004/2.4.0-03-299/BPD-124

**MATAVIMAI IR
METROLOGIJOS
PAGRINDAI**

AUTORIUS ALGIRDAS SEILIUS

Vilnius, 2007

Algirdas Seilius. MATAVIMAI IR METROLOGIJOS PAGRINDAI.
Mokomoji medžiaga. Vilnius: XXXXXXXX, 2007, 378 p., 170 iliustr.,
6 lent., 3 priedai, bibliogr. 11

Mokomojoje medžiagoje pateikiamos pagrindinės žinios apie matavimų mokslą – metrologiją ir aprašomi dažniausiai elektronikoje naudojamų dydžių matavimo būdai ir matavimo priemonės.

Mokomosios medžiagos teorinę dalį sudaro septyni skyriai, kurių medžiaga apima visas studijų dalyko Matavimai ir metrologijos pagrindai temas. Pirmame skyriuje pristatomi svarbiausi metrologijos terminai ir apibrėžimai, aptariama SI matavimo vienetų sistema, pateikiamos matavimų paklaidų teorijos ir matavimų rezultatų tvarkymo pradinės žinios. Šiame skyriuje taip pat trumpai aptariami pagrindinių SI sistemos vienetų pirminių etalonų, plačiausiai naudojamų elektrinių dydžių darbo etalonų ir kitų matavimo priemonių bendrieji sudarymo principai. Supažindinama su pagrindinėmis teisinės metrologijos problemomis.

Kituose skyriuose yra aprašomi matavimo signalų šaltinių sudarymo principai ir jų pavyzdžiai, aptariami srovės ir įtampos matavimo metodai ir priemonės, analizuojami analoginių bei skaitmeninių elektroninių oscilografų sudarymo principai, aptariami jų svarbiausi parametrai ir pateikiami signalų parametrų matavimo oscilografais pavyzdžiai. Mokomosios medžiagos teorinėje dalyje taip pat pristatyti dažnio ir laiko intervalų matavimo metodai ir priemonės, aptariami elektronikos grandinių parametrų matavimo klausimai ir analizuojami signalų parametrų matavimo prietaisai.

Atskiroje dalyje pateikiami praktinių darbų aprašymai ir metodiniai nurodymai jiems atlikti.

Pabaigoje yra pateikiamas trumpas terminų žodynelis.

Mokomoji medžiaga skiriama kolegijų studentams, studijuojantiems elektroninių matavimų su metrologijos pagrindais dalykus. Medžiaga gali būti naudinga ir kitų matavimų disciplinas studijuojantiems studentams bei kitiems specialistams, besidomintiems matavimų klausimais.

© Algirdas Seilius, 2007

Turiny

Pratarmė	1
Pirma dalis. Teorinė medžiaga	3
Metrologijos pagrindai	4
1.1. Svarbiausios žinios apie matavimus ir jų tikslumo vertinimą.....	4
1.1.1. Pradinės sąvokos.....	4
1.1.2. Matavimų vienetai.....	5
1.1.3. Matavimų klasifikavimas.....	12
1.1.4. Matavimų paklaidų klasifikavimas.....	14
1.1.5. Paklaidų aprašymo būdai.....	17
1.1.6. Paklaidų tolygusis tikimybių skirstinys.....	22
1.1.7. Paklaidų normalusis tikimybių skirstinys	24
1.1.8. Atsitiktinių paklaidų sumavimas.....	26
1.1.9. Netiesioginių matavimų paklaidos.....	30
1.1.10. Sistemingųjų paklaidų sumavimas.....	34
1.1.11. Sistemingųjų ir atsitiktinių paklaidų parametrų tarpusavio sumavimas.....	35
1.2. Matavimo rezultatų tvarkymas ir analizė	36
1.2.1. Tiesioginių matavimų parametrų įverčiai	36
1.2.2. Matavimo rezultatų tikimybių skirstinio vertinimas	38
1.2.3. Matavimo parametrų įverčio tikslumas.....	40
1.2.4. Netiesioginių matavimų rezultatų tvarkymas.....	45
1.2.5. Matavimo rezultatų pateikimas. Matavimo rezultato neapibrėžtis	47
1.3. Bendrosios žinios apie matavimo priemones	50
1.3.1. Etalonai	50
1.3.1.1. Matavimo priemonių ir etalonų klasifikavimas.....	50
1.3.1.2. Pagrindinių SI vienetų etalonai.....	54
<i>Ilgio vieneto – metro etalonas.....</i>	<i>54</i>
<i>Masės vieneto – kilogramo etalonas.....</i>	<i>54</i>
<i>Dažnio ir laiko etalonas.....</i>	<i>55</i>
<i>Srovės stiprio – ampero etalonas.....</i>	<i>55</i>

<i>Termodinaminės temperatūros vieneto – kelvino etalonas</i>	57
<i>Šviesos stiprio vieneto – kandelos etalonas..</i>	58
1.3.1.3. Svarbiausių elektrinių ir magnetinių dydžių etalonai	59
<i>Elektrinės įtampos etalonai</i>	59
<i>Elektrinės varžos etalonai</i>	61
<i>Induktyvumo etalonai</i>	63
<i>Elektrinės talpos etalonai</i>	65
<i>Magnetinių dydžių etalonai</i>	67
1.3.2. Matavimo keitikliai	69
1.3.3. Matavimo prietaisai.....	77
1.3.4. Matavimo priemonių tikslumo klasės	80
1.4. Teisinės metrologijos pagrindai	82
1.4.1. Tarptautinės ir nacionalinės metrologijos įstaigos	82
1.4.2. Lietuvos Respublikos metrologinės įstaigos	84
1.4.3. Matavimų sistės metrologijoje.....	87
1.5. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui.....	92
Matavimo signalų šaltiniai	96
2.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas	96
2.1.1. Klasifikavimas	96
2.1.2. Apibendrintoji struktūrinė schema.....	97
2.2. Harmoninių signalų generatoriai	99
2.2.1. Klasifikavimas ir parametrai	99
2.2.2. Žemųjų ir infržemųjų dažnių generatoriai	102
2.2.3. Aukštųjų dažnių generatoriai	111
2.2.4. Superaukštųjų dažnių (SAD) generatoriai.....	116
2.2. Impulsų generatoriai	117
2.3. Funkcijų ir pasirenkamos kreivės formos generatoriai	121
2.4. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui.....	128
Srovės ir įtampos matavimas	131
3.1. Bendrosios žinios	132
3.2. Įtampų vertės. Amplitudės ir formos koeficientai	133
3.3. Elektromechaniniai rodykliniai matavimo prietaisai	138
3.3.1. Bendrasis veikimo principas ir dinaminės savybės.....	138
3.3.2. Magnetoelektriniai rodykliniai matavimo prietaisai	141
3.3.3. Elektromagnetiniai rodykliniai matavimo prietaisai	143
3.3.4. Elektrodinaminiai rodykliniai matavimo prietaisai	146
3.3.5. Elektrostatiniai rodykliniai matavimo prietaisai	149
3.4. Srovės ir įtampos mastelio keitikliai	151
3.4.1. Srovės mastelio keitikliai	151

3.4.2. Įtampos mastelio keitikliai	155
3.5. Analoginiai funkciniai įtampos keitikliai	160
3.5.1. Paskirtis ir klasifikavimas	160
3.5.2. Pikinių (amplitudės) verčių keitikliai	161
3.5.3. Vidutinių išlygintų verčių keitikliai	166
3.5.4. Vidutinių kvadratinų verčių keitikliai	168
3.6. Elektroniniai voltmetrai	175
3.6.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas	175
3.6.2. Analoginiai elektroniniai voltmetrai	176
3.6.3. Skaitmeniniai elektroniniai voltmetrai	180
3.6.3.1. Bendrosios žinios.....	180
3.6.3.2. Bendroji struktūrinė schema.....	181
3.6.3.3. Skaitmeninių voltmetrų ASK bendrosios savybės.....	82
3.6.3.4. Skaitmeninių voltmetrų ASK schemos ir veikimas...	185
3.7. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui.....	189
Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas	192
4.1. Bendroji struktūra ir veikimo principas	192
4.2. Bendros paskirties (universaliojo) analoginio oscilografo struktūrinė schema ir savybės	195
4.2.1. Schemos sudėtis ir bendrasis veikimo principas	195
4.2.2. Skleistinių rūšys ir parametrai.....	197
4.2.3. Vertikalaus kreipimo kanalas ir jo savybės.....	200
4.2.4. Svarbiausios oscilografų savybės.....	204
4.3. Stroboskopiniai oscilografai.....	206
4.4. Analoginiai oscilografai su skaitmenine atmintimi	210
4.5. Skaitmeniniai oscilografai.....	214
4.6. Matavimai oscilografais.....	230
4.6.1. Įtampos matavimas	230
4.6.2. Laiko intervalų matavimas.....	232
4.6.3. Dažnio matavimas oscilografu XY režime	235
4.6.4. Fazių skirtumo matavimas oscilografu	235
4.6.5. Amplitudinės moduliacijos gylio matavimas oscilografu	238
4.7. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui.....	239
Dažnio ir laiko intervalų matavimas	242
5.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas	242
5.2. Oscilografiniai dažnio ir laiko intervalų matavimo būdai	245
5.2.1. Tiesinės kalibruotos skleistinės būdas.....	245
5.2.2. Harmoninės skleistinės arba Lisažu figūrų metodas	246
5.2.3. Apskritiminės skleistinės metodas	247
5.3. Rezonansiniai dažnio matavimo būdai.....	249

5.4. Heterodininiai dažnio matavimo būdai	252
5.5. Kondensatoriniai dažnių matavimo būdai	253
5.6. Skaitmeniniai dažnio ir laiko intervalų matavimo metodai	254
5.6.1. Skaitmeninis dažnio matavimas	255
5.6.2. Skaitmeninis periodo matavimas	256
5.6.3. Skaitmeninio dažnio ir periodo matavimo paklaidų priežastys	257
5.6.4. Dažnio matavimo paklaida.....	258
5.6.5. Periodo matavimo paklaida.....	259
5.6.6. Dažnio ir periodo skaitmeninio matavimo paklaidų mažinimo būdai.....	260
5.6.7. Matuojamo dažnio sumažinimo būdai	261
5.6.8. Skaitmeninis laiko intervalų matavimas	264
5.7. Kontroliniai klausimai ir užduotys savarankiškam darbui	267
Elektronikos grandinių parametrų matavimas	269
6.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas	270
6.2. Ampermetro–voltmetro metodas ir ommetrai	270
6.3. Parametrų matavimas pagal pereinamojo proceso trukmę	275
6.4. Elementų parametrų matavimas tilteliais	277
6.4.1. Bendrosios žinios apie tiltelius.....	277
6.4.2. Varžų matavimo tilteliai	280
6.4.3. Talpų matavimo tilteliai	283
6.4.4. Induktyvumų matavimo tilteliai	285
6.4.5. Skaitmeniniai tilteliai	287
6.5. Rezonansiniai metodai	289
6.5.1. Rezonansinis kontūrinis metodas	289
6.5.2. Rezonansinis generatorinis metodas	293
6.6. Amplitudės dažninių charakteristikų matuokliai.....	295
6.7. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui.....	296
Signalų parametrų matuokliai	299
7.1. Spektro analizatoriai	300
7.1.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas	300
7.1.2. Analoginiai filtriniai lygiagrečios analizės spektro analizatoriai	301
7.1.3. Analoginiai filtriniai nuoseklios analizės spektro analizatoriai.....	303
7.1.4. Skaitmeniniai spektro analizatoriai	306
7.2. Netiesinių iškraipymų matuokliai	309
7.3. Moduliacijos parametrų matuokliai	313
7.4. Loginiai analizatoriai	316
7.5. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui.....	322

Antra dalis. Praktiniai darbai	324
Ivadas	325
Pirmas darbas	
Susipažinimas su laboratorijos matavimo prietaisais ir darbų atlikimo tvarka	331
Antras darbas	
Matavimo generatoriaus tyrimas	332
Trečias darbas	
Elektromechaninių rodyklinių matavimo prietaisų tyrimas ir tikrinimas	335
Ketvirtas darbas	
Įtampų matavimas elektroniniais voltmetrais	340
Penktas darbas	
Matavimai elektroniniu oscilografu .	346
Šeštas darbas	
Dažnio matavimas .	349
Septintas darbas	
Elektronikos grandinių elementų parametrų matavimas	351
Literatūra	353
Priedai	354
1 priedas. Integralinės Laplaso funkcijos reikšmės.....	354
2 priedas. Stjudento koeficiento t_q reikšmės	356
3 priedas. χ^2 (Pirsono) pasiskirstymo kritiniai taškai	358
Trečia dalis. Terminų žodynėlis	361

Pratarmė

Praktinėje žmonių veikloje svarbią vietą užima matavimai. Netgi buityje mes dažnai atliekame matavimus: matuojame laiką, temperatūrą, suvartotą šiluminę ir elektros energiją, suvartotą vandenį ir kitus dydžius. Juolab be matavimų neįmanoma jokia gamyba, nes reikia kontroliuoti įvairių technologinių procesų ir gaminamų produktų parametrus. Matavimai atliekami ir eksploatuojant įvairius techninius įrenginius, mašinas, mechanizmus, kontroliuojant gamtinę aplinką, medicinoje, prekyboje, karyboje ir kitur.

Plėtojantis mokslui ir technikai, tobulėja ir matavimai. Jiems panaudojamos modernesnės priemonės, jų rezultatai yra tikslesni ir greičiau gaunami. Šiuolaikiniai matavimai neatsiejami nuo elektronikos mokslo. Netgi tose visuomenės veiklos srityse, kurios yra tolimesnės elektronikai, plačiai taikomi elektroniniai matavimų metodai ir priemonės, tarp jų ir mikroprocesoriais bei kompiuteriais valdomos matavimo priemonės ir jų sistemos.

Matavimų svarbą lemia tai, kad jie sudaro didelę dalį visuomenės darbinės veiklos, kiekvieną dieną jų atliekama labai daug. Europos Sąjungoje išlaidos matavimams sudaro keletą procentų nuo BVP. Jeigu jie atliekami nekokybiškai, tai neišvengiamai lemia nekokybiškų produktų gamybą, gali sukelti avarines situacijas, neteisingas diagnozes medicinoje, vartotojų

Pratarmė

interesų pažeidimus prekyboje ir gyventojų aptarnavimo sferoje bei kitur.

Visa tai rodo, kad kiekvienas technikos srities specialistas turi gerai išmanyti matavimų metodus ir priemones, mokėti jomis teisingai naudotis ir tinkamai pateikti matavimų rezultatus.

Ypač tai svarbu elektronikos srities specialistams, kadangi, gaminant ir eksploatuojant elektronikos pramonės gaminius, reikia atlikti daug ir labai įvairių matavimų.

Techninių mokslų studijų programose numatytos tam tikros srities matavimų disciplinos: techninių matavimų, technologinių matavimų, elektros matavimų, elektroninių matavimų ir kitos. Šios medžiagos tikslas yra supažindinti skaitytoją su svarbiausiomis metrologijos sąvokomis, SI matavimo vienetų sistema, SI pirminių ir elektros ir elektronikos matavimų darbo etalonų sudarymo principais, pagrindinėmis žiniomis iš matavimų paklaidų teorijos, aptarti bendruosius matavimų prietaisų sudarymo principus ir savybes, matavimų rezultatų tvarkymo ir pateikimo būdus ir pagrindinius teisinės metrologijos klausimus. Joje taip pat yra pateikiamos žinios apie svarbiausių elektronikoje sutinkamų dydžių matavimo metodus ir priemones: matavimo signalų šaltinius, įtampos ir srovės matavimo metodus ir priemones, elektroninius oscilografus ir matavimus su jais, dažnių ir laiko intervalų matavimą, elektronikos grandinių elementų parametrų matavimą ir signalų parametrų matavimo priemones. Kadangi ši medžiaga buvo rengiama kaip konkretaus studijų modulio studijų priemonė, tai ji nepretenduoja į visišką ir išsamų visų elektroninių matavimų problemų išdėstymą, o apsiriboja klausimais numatytais studijų modulio programoje.

Rengdamas šią medžiagą, autorius pasinaudojo patirtimi, sukaupia dėstant „Techninių matavimų ir pakeičiamumo pagrindų“, „Matavimų technikos“, „Elektrinių matavimų“, „Radijo matavimų“ ir „Elektroninių matavimų“ disciplinas elektronikos specialybių studentams Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Algirdas Seilius

Pirma dalis

TEORINĖ MEDŽIAGA

Metrologijos pagrindai

1.1. Svarbiausios žinios apie matavimus ir jų tikslumo vertinimą

1.1.1. Pradinės sąvokos

Fizikinių reiškinių ir objektų savybės dažniausiai vertinamos kiekybiškai. Tokias savybes vadina fizikiniais dydžiais.

Fizikinių dydžių pavyzdžiais gali būti detalės ilgis, elektros srovės stipris, elektros grandinės varža ir kitos.

Matavimas – tai eksperimentinis fizikinio dydžio vertės radimas, naudojant specialiai tam tikslui skirtas technines **matavimų priemones**.

Matavimų sietimi (vienove) vadinama tokia matavimų savybė, kai matavimai atliekami įteisintomis matavimų priemonėmis, kurių metrologinės savybės susietos su atitinkamomis etalonų savybėmis, o matavimų rezultatai išreiškiami įteisintais matavimų vienetais su įteisintomis matavimo rezultatų neapibrėžtimis.

Matavimų tikslumas yra matavimų kokybės charakteristika, netiesiogiai nusakanti matavimų rezultatų artumą tikrajai matuojamojo fizikinio dydžio vertei.

Bendruosius matavimų klausimus nagrinėja **metrologija** – mokslas apie matavimus.

1. Metrologijos pagrindai

Atsižvelgiant į nagrinėjamų klausimų pobūdį yra skiriamos kelios metrologijos šakos. **Teorinė metrologija** tiria matavimų vienetų ir jų sistemas, matavimų rezultatų tvarkymo ir pateikimo būdus. **Taikomoji metrologija** tiria praktinius matavimų klausimus. **Teisinė metrologija** įteisina ir normina matavimų metodus ir priemones, kuria teisinius aktus ir kitus dokumentus, reikalingus matavimų vienovei palaikyti.

Matavimo metu gaunamas matavimo rezultatas išreiškiamas tam tikru pasirinktų **matavimo vienetų** skaičiumi.

Matavimo vienetas – fizikinis dydis, kurio vertę susitarta laikyti lygia vienetui.

Matuojant tokios pačios rūšies fizikiniai dydžiai lyginami su matavimo vienetu ir gaunama tokio palyginimo kiekybinė charakteristika – matuojamojo dydžio **skaitinė vertė**. Taigi matavimo rezultatas visuomet sudarytas iš skaitinės vertės ir matavimo vieneto.

Nepriklausomai nuo to, koks yra matavimo rezultatas, egzistuoja *tikroji matuojamojo dydžio vertė*. Tai dydis, *idealiausiai išreiškiantis tiriamojo objekto arba proceso savybes, tačiau dėl pažinimo proceso ribotumo jis mums nepasiekiamas*. Matuodami galime rasti tik *sutartinę tikrąją matuojamojo dydžio vertę* – vertę, pakankamai artimą tikrajai, kurią konkrečiam matavimui galima naudoti vietoje tikrosios. Tokias tikslesnes matuojamojo dydžio vertes gauna naudodami geresnių metrologinių savybių matavimų priemones – **etalonus** (pranc. *étalon* – kriterijus, palyginimo pavyzdys).

Informacija apie matuojamųjų dydžių vertes vadinama **matavimo informacija**, o signalai, funkcinio ryšio susieti su matuojamojo dydžio vertėmis, – **matavimo informacijos signalais**.

1.1.2. Matavimo vienetai

Matavimo vienetų visuma, sudaryta tam tikru įteisintu principu, vadinama matavimo vienetų sistema.

Ilgą laiką tokių sistemų nebuvo. Tai kliudė plėtotis prekybai, mokslui ir technikai, tarptautiniams ryšiams. Todėl buvo siekiama suvienodinti matavimo vienetų, sujungti juos į sistemą.

1872 m. tarptautine sutartimi buvo susitarta atsisakyti įvairių natūralių etalonų ir sukurti sąlyginius dirbtinius etalonus. 1875 m. tokie svarbiausių matavimo vienetų etalonai buvo pagaminti ir 17 valstybių pasirašė **Metro konvenciją**. Buvo priimti metro ir kilogramo prototipai ir sudarytas

1. Metrologijos pagrindai

Tarptautinis svarsčių ir matų biuras (*pranc. BIPM – Bureau International des Poids et Mesures*) – etalonų saugojimo ir priežiūros mokslo įstaiga, derinanti fizikinius matavimus tarptautiniu mastu bei **Tarptautinis svarsčių ir matų komitetas** (*pranc. CIPM – Comité International des Poids et Mesures*) – vadovaujantis ir koordinuojantis mokslo organas. Vyriausioji valdžia – kas šešeri metai šaukiama **Generalinė svarsčių ir matų konferencija** (*pranc. CGPM – Conférence Generale des Poids et Mesures*). Pirmoji Generalinė konferencija buvo sušaukta 1889 m. Paryžiuje. Taip prasidėjo perėjimas prie *metrinės sistemos*, kuris vyko ilgą laiką ir praktiškai dar tęsiasi.

Matavimų vienetų sistemai priklausantys vienetai skirstomi į **pagrindinius ir išvestinius**.

Pagrindiniu matavimo vienetų sistemos vienetu laikomas laisvai pasirinktas sudarant šią vienetų sistemą vienetas. Tuo tarpu **išvestinis** vienetas gaunamas pagal jį nustatančią matematinę priklausomybę iš kitų į sistemą įeinančių vienetų. Paprastai stengiamasi turėti minimalų pagrindinių vienetų skaičių. Be to, pageidautina, kad išvestiniai vienetai būtų **koherentiški**, t. y. jie turi būti gauti iš kitų sistemos vienetų panaudojus skaitmeninį koeficientą, lygų vienetui.

1948 m. IX Generalinėje konferencijoje buvo nutarta sukurti universalią praktinę fizikinių dydžių matavimų vienetų sistemą. X Generalinė konferencija 1954 m. aprobo tokius pagrindinius naujos sistemos vienetus ir jų simbolius: ilgio – **metras** (m), masės – **kilogramas** (kg), laiko – **sekundė** (s), elektros srovės stiprio – **amperas** (A), termodinaminės temperatūros – **kelvinas** (K), šviesos stiprio – **kandela** (cd). 1960 m. XI Generalinė konferencija priėmė naują vienetų sistemą ir pavadino ją **SI** (*pranc. Systeme International d'Unités*) sistema. Šią vienetų sistemą pradėjo naudoti ir kitos šalys, ilgą laiką naudojusios nacionalines nemetrines vienetų sistemas (Anglija, Kanada, JAV ir kitos).

1971 m. XIV Generalinė konferencija priėmė septintą pagrindinį SI sistemos vienetą – medžiagos kiekio vienetą **molį** (mol).

Pagrindinių sistemos vienetų apibrėžimai kinta pagal naudojamą vieneto materialaus atkūrimo būdą. Šiuo metu pagrindinių SI sistemos vienetų apibrėžimai ir jų simboliai yra tokie:

1. Metrologijos pagrindai

Metras (m) – atstumas, kurį vakuume nusklinda šviesa per $1/299\,792\,458$ sekundės dalį;

Kilogramas (kg) – masė, lygi kilogramo tarptautinio etalono masei;

Sekundė (s) – laikas, lygus spinduliavimo, atitinkančio kvantinį šuolį tarp cezio-133 atomo pagrindinės būsenos dviejų hipersmulkiosios sandaros (diskretinių energijų) lygmenų, $9\,192\,631\,770$ periodų trukmei;

Amperas (A) – stiprumas nuolatinės elektros srovės, kuri tekėdama dviem tiesiais, lygiagrečiais, nykstamai mažo apvalaus skerspjūvio laidininkais, esančiais vakuume $1\,m$ atstumu vienas nuo kito, sukelia tarp jų $2 \cdot 10^{-7}$ niutono jėgą kiekvienam laidininkų ilgio metrui;

Kelvinas (K) – vandens trigubojo taško termodinaminės temperatūros $1/273,16$ dalis. Leidžiama naudoti ir Celsijaus laipsnius ($^{\circ}C$):

$\vartheta = \Theta - 273,16$, kur ϑ – temperatūra $^{\circ}C$, Θ – temperatūra kelvinais;

Kandela (cd) – šviesos stiprumas tokio šaltinio, kuris tam tikra kryptimi skleidžia vienspalvę $540 \cdot 10^{12}$ hercų dažnio $1/683$ vato steradianui stiprio spinduliuotę;

Molis (mol) – sistemos, sudarytos iš tiek vienodų dalelių, kiek atomų yra $0,012\,kg$ masės nuklide ^{12}C , medžiagos kiekis.

Šeši pirmieji vienetai yra atkuriami tarptautiniais ir nacionaliniais etalonais.

Ruošiamasi keisti molio, kelvino, ampero bei kilogramo apibrėžimus (24-toje CGPM 2011 m.). Kilogramo apibrėžimą numatoma susieti su Planko konstanta, amperą išreikšti per elementaraus krūvio elektros kiekį, kelviną – per Bolcmano konstantą ir molį – per Avogadro konstantą. Taip pagrindiniai SI vienetai būtų susieti su kartinėmis matematinėmis ir fizikinėmis konstantomis.

Išvestinių SI sistemos vienetų yra daug ir jie yra suskirstyti į tokias grupes: **erdvės ir laiko vienetai, mechaniniai vienetai, šilumos vienetai, elektriniai ir magnetiniai vienetai, optiniai ir šviesos vienetai, akustiniai vienetai, fizikinės chemijos ir molekulinės fizikos vienetai, atomo ir branduolio fizikos vienetai,**

1. Metrologijos pagrindai

branduolinių reakcijų ir jonizuojančiosios spinduliuotės vienetai bei kietojo kūno fizikos vienetai.

Išvestinio vieneto *dimensija* – tai ryšio su pagrindiniais vienetais formulė. Bendruoju atveju tokia formulė užrašoma pagrindinių vienetų simbolių, pakeltų atitinkamais laipsniais, sandauga:

$$\dim Q = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\epsilon} \Theta^{\eta} J^{\mu} N^{\lambda};$$

čia L – ilgio, M – masės, T – laiko, I – srovės stiprio, Θ – termodinaminės temperatūros, J – šviesos stiprio ir N – medžiagos kiekio simboliai.

Pavyzdžiui, įtampos vienetas yra voltas: $1 \text{ V} = 1 \text{ W} / 1 \text{ A} = 1 \text{ J} / (1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}) = \text{N} \cdot \text{m} / (\text{A} \cdot \text{s}) = \text{m}^2 \cdot \text{kg} / (\text{s}^3 \cdot \text{A})$. Taigi įtampos dimensija yra tokia: $\dim U = L^2 M T^{-3} I^{-1}$.

Svarbiausių išvestinių vienetų yra 24. Jie turi savo pavadinimus ir kartu su pagrindiniais sistemos vienetais naudojami kitiems išvestiniams sistemos vienetais sudaryti. Dauguma jų pavadinti žymių mokslo ir technikos veikėjų vardais ir jų simboliai prasideda didžiosiomis raidėmis. Tokie svarbiausieji išvestiniai SI sistemos vienetai ir jų simboliai yra: dažnio – **hercas** (Hz), pavadintas vokiečių fiziko H.Hertz (1857–1894) vardu, jėgos – **niutonas** (N), pavadintas anglų fiziko ir matematiko I.Newton (1643–1727) vardu, slėgio – **paskalis** (Pa), pavadintas prancūzų fiziko ir matematiko B.Pascal (1623–1662) vardu, energijos – **džaulis** (J), pavadintas anglų fiziko D.Joule (1818–1889) vardu, galios – **vatas** (W), pavadintas anglų inžinieriaus D.Watt (1736–1819) vardu, elektros krūvio – **kulonai** (C), pavadintas prancūzų fiziko Ch.Coulomb (1736–1806) vardu, elektros įtampos – **voltas** (V), pavadintas italų fiziko ir fiziologo A.Volta (1745–1827) vardu, elektrinės talpos – **faradas** (F), pavadintas anglų fiziko ir chemiko M.Faraday (1791–1867) vardu, elektrinės varžos – **omas** (Ω), pavadintas vokiečių fiziko G.Ohm (1787–1854) vardu, elektrinio laidžio – **simensas** (S), pavadintas vokiečių elektrotechniko E.V. fon Siemens (1816–1892) vardu, magnetinės indukcijos srauto – **vėberis** (Wb), pavadintas vokiečių fiziko V.E. Weber (1804–1891) vardu, magnetinės indukcijos – **tesla** (T), pavadintas serbų elektrotechniko N.Tesla (1856–1943) vardu, induktyvumo – **henris** (H), pavadintas JAV fiziko D.Henry (1797–1878) vardu, Celsijaus temperatūros –

1. Metrologijos pagrindai

Celsijaus laipsnis ($^{\circ}\text{C}$), pavadintas švedų astronomo ir fiziko A.Celsius (1704–1744) vardu, šviesos srauto – **liumenas** (lm); (*lot.* lumen – šviesa), apšviestumo – **liuksas** (lx); (*lot.* lux – šviesa), radionuklidų aktyvumo – **bekerelis** (Bq), pavadintas prancūzų fiziko A.Becquerel (1852–1908) vardu, absorbuotos jonizuojančiosios spinduliuotės dozės – **grėjus** (Gy), pavadintas anglų fiziko L.H.Gray vardu, lygiavertės jonizuojančiosios spinduliuotės dozės – **sivertas** (Sv), pavadintas švedų fiziko R.M.Sievert vardu, katalizės aktyvumo – **katal** (kat); (kat = mol/s).

Specifiniai išvestiniai vienetai yra: **radianas** (rad) – plokščiasis kampas tarp dviejų apskritimo spindulių, kai lanko ilgis tarp jų galų lygus šio apskritimo spinduliui ir **steradianas** (sr) – erdvinis kūgio kampas (su viršūne sferos centre), išpjaunantis sferos paviršiuje figūrą, lygiaplotę kvadratui, kurio kraštinė lygi šios sferos spinduliui.

Šie vienetai yra bedimensiniai, jų dimensija yra vienetas: $\text{rad}=\text{m}\cdot\text{m}^{-1}=1$ ir $\text{sr}=\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}=1$.

Didesniems ir mažesniems už SI sistemos vienetus dydžiams nusakyti naudojami dešimtainiai **daliniai** ir **kartotiniai** vienetai, sudaromi dauginant SI sistemos vienetą iš $10^{\pm N}$. Elektrotechnikoje ir elektronikoje naudojami tokie daugikliai ir jiems atitinkantys priešdėliai, pridedami prie matavimo vieneto pavadinimo:

$$\begin{aligned}10^{12} & - \text{T (tera)} \\10^9 & - \text{G (giga)} \\10^6 & - \text{M (mega)} \\10^3 & - \text{k (kilo)} \\10^{-3} & - \text{m (mili)} \\10^{-6} & - \mu \text{ (mikro)} \\10^{-9} & - \text{n (nano)} \\10^{-12} & - \text{p (piko)}\end{aligned}$$

Neleidžiama naudoti šių priešdėlių su nesisteminiais vienetais. Taip pat negalima vartoti kelių iš eilės priešdėlių, pvz., nevertotina $\mu\mu\text{F}$, turi būti pF. Dauginant vienetus, priešdėlis taikomas tik pirmajam vienetui, pvz., $10^3 \text{ N}\cdot\text{m}=\text{kN}\cdot\text{m}$, bet ne $\text{N}\cdot\text{km}$! Be to, ploto ir tūrio vienetų priešdėliai susiejami tik su išeities ilgio vienetais, todėl, pavyzdžiui, 1 kv. km yra:

1. Metrologijos pagrindai

$1 \text{ km}^2 = (10^3 \text{ m})^2 = 10^6 \text{ m}^2$ (bet ne 10^3 m^2 !).

Užrašant išvestinių vienetų, neturinčių savo pavadinimų, simbolių, reikia juos atskirti taškais vidurio linijos lygiu, o dalybai naudoti įstrižą liniją ir vardiklio dydžius apskliausti apvaliais skliaustais arba naudoti horizontalią dalybos liniją. Patogu vardiklio dydžiams naudoti neigiamus laipsnių rodiklius. Pavyzdžiui:

$$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}), \text{ arba } \frac{J}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \text{ arba } \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Kai kuriuos SI sistemos vienetus praktikoje yra nepatogu vartoti dėl jų mažų ar didelių verčių. Taip pat yra vienetų, pavyzdžiui, radianas, kurie neišreiškiami baigtiniu skaičiumi. Neverta atsisakyti ir kai kurių tradiciškai vartojamų vienetų. Todėl greta SI sistemos vienetų naudojami ir nepriklausantys SI sistemai – **nesisteminiai** vienetai.

Lygia greta su SI sistemos vienetais leidžiama naudoti tokius vienetus: **toną** (t) = 10^3 kg, **minutę** (min) = 60 s, **valandą** (h) = 3600 s, **parą** (d) = 86400 s bei **savaitę**, **mėnesį** ir **metus** (Lietuvoje žymimi atitinkamai sav., mėn., m.), **kampo laipsnį** ($^\circ$) = $(\pi/180)$ rad $\approx 0,0174533$ rad, **kampo minutę** ($'$) = $(1/60)^\circ = (\pi/10\ 800)$ rad, **kampo sekundę** ($''$) = $(1/60)'$ = $(\pi/648\ 000)$ rad, **litrą** (l) = 10^{-3} m^3 .

Tik specialiose veiklos srityse leidžiama vartoti tokius vienetus:

astronomijoje: **astronominį vieneta** (UA) – atstumą, lygų vidutiniam Žemės nuotoliui nuo Saulės $\approx 1,495\ 978\ 7 \cdot 10^{11}$ m, **šviesmetį** (ly) $\approx 9,460\ 730 \cdot 10^{15}$ m, **parseką** (pc) – atstumą, lygų nuotoliui taško, iš kurio žiūrint, Žemės orbitos aplink Saulę didysis pusašis būtų matomas vienos lanko sekundės kampu ($1 \text{ pc} \approx 3,2615 \text{ ly} \approx 3,085\ 678 \cdot 10^{16} \text{ m}$);

optikoje: **dioptriją** (dpt) = 1 m^{-1} ;

žemės ūkyje: **hektarą** (ha) = 10^4 m^2 ;

atomo fizikoje: **atominės masės vieneta** (u) $\approx 1,660\ 540 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;

geodezijoje: **goną** (gon arba g) = $(\pi/200)$ rad $\approx 0,015\ 707\ 96$ rad;

fizikoje: **elektronvoltą** (eV) $\approx 1,602\ 177 \cdot 10^{-19} \text{ J}$;

elektrotechnikoje: **voltamperą** (V·A) ir **varą** (var).

Vienetų ir priešdėlių simboliai rašomi romėniškuoju (stačiuoju) šriftu, po jų taškas nededamas (išskyrus atvejį, kai simbolis yra sakinio gale ir simbolių santrumpas: sav., mėn., m.). Vieneto ir priešdėlio simboliai tarpeliu neatskiriami. Tarp dydžio skaitinės vertės (visada rašomos stačiuoju šriftu) ir vieneto simbolio paliekamas tarpelis, išskyrus nesisteminius plokščiojo kampo vienetus: laipsniui, minutei ir sekundei tarp skaičiaus bei vieneto simbolio tarpelio palikti nereikia. Kai fizikinis dydis yra dydžių suma

1. Metrologijos pagrindai

arba skirtumas, tai reikia susieti dydžių skaitines vertes ir nurodyti bendrąjį vieneto simbolį, pavyzdžiui:

$$\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ arba } \theta = (20 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ bet ne } \theta = (20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C})!$$

Matavimuose be fizikinių dydžių vienetų plačiai naudojami ir vienetai skirti dviejų vienaarūšių matuojamųjų dydžių santykiui įvertinti. Taip dažnai nurodomas vieno fizikinio dydžio pasikeitimas kito dydžio atžvilgiu: stiprinimas, slopinimas, priklausomybė nuo dažnio ir kt. Tarkime, kad reikia nurodyti dydžių X_2 ir X_1 santykį. Bendruoju atveju jį galima įvertinti bet kokia šių dydžių santykio funkcija:

$$D = f\left(\frac{X_2}{X_1}\right).$$

Jeigu naudojama tiesinė funkcija, tai tuomet gauname:

$$D = k \frac{X_2}{X_1}.$$

Kai $k=100$, santykio matas yra **procentas** (%) = 10^{-2} , kai $k=1000$ – **promilė** (‰) = 10^{-3} (šį vienetą vartoti nerekomenduojama) ir kai $k=1\,000\,000$ – **milijoninė dalis** = 10^{-6} (tekstuose anglų kalba šis dydis dažnai žymimas santrumpa ppm, tačiau tokia santrumpa nėra įteisinta tarptautiniu mastu).

Santykiui išreikšti naudojamos ir logaritminės funkcijos. Jeigu santykis išreiškiamas dešimtainiu logaritmu,

$$D = \lg \frac{X_2}{X_1},$$

tai santykio vienetas yra **belas** (B), pavadintas JAV išradėjo A.Bell (1847–1922) vardu.

$$1\text{ B} = \lg(X_2/X_1), \text{ kai } X_2/X_1 = 10 \text{ ir}$$

$$1\text{ B} = 2\lg(X_2/X_1), \text{ kai } X_2/X_1 = \sqrt{10}.$$

Pirmasis apibrėžimas naudojamas, kai X_1 ir X_2 yra energijos ar galios vertės, o antrasis – kai X_1 ir X_2 yra srovės ar įtampos vertės.

Dažniau nei belas yra naudojamas **decibelas** (dB). Jis, kaip išplaukia iš belo apibrėžimo, yra lygus: $1\text{ dB} = 10\lg(X_2/X_1)$, kai X_1 ir X_2 yra energijos ar galios vertės, ir $1\text{ dB} = 20\lg(X_2/X_1)$, kai X_1 ir X_2 yra srovės ar įtampos vertės.

Santykio vienetų rašymo taisyklės yra analogiškos matavimo vienetų rašymo taisyklėms.

1. Metrologijos pagrindai

1.1.3. Matavimų klasifikavimas

Atsižvelgiant į matuojamojo dydžio prigimtį ir į tai, kokios naudojamos matavimo priemonės ir matavimo principai, bei kokio tikslumo siekiama, matavimas gali būti atliktas įvairiai.

***Matavimo principas** suprantamas kaip visuma fizikinių reiškinių, kuriais grindžiamas matavimas (tai matavimo fizikinis modelis).*

*Matavimui naudojamų matavimo principų ir matavimo priemonių visumą priimta vadinti **matavimo metodu** (būdu).*

Kiekvieno matavimo rezultatas gaunamas susiejant jį su matavimo metu stebimais dydžiais. Juos tarpusavyje sieja tam tikra analizinė išraiška, vadinama **matavimo lygtimi**. Tai matavimo matematinis modelis. Pagal matavimo lygties pobūdį matavimai skirstomi į **tiesioginius** ir **netiesioginius**.

***Tiesioginio matavimo** atveju, matuojamo dydžio vertė nustatoma betarpiškai iš stebėjimo rezultatų. Tiriamasis objektas sąveikauja su matavimo priemone ir iš jos rodmenų įtaiso rodmenų nustatoma matuojamojo dydžio vertė. Tai įtampos matavimas voltmetru, srovės – ampermetru, dažnio – dažniamačiu, slėgio – manometru ir t.t. Tiesioginio matavimo lygtis yra:*

$$Y = cX ; \quad (1.1)$$

čia Y – matavimo rezultatas, X – matavimo priemonės rodmenų įtaise stebimas skaičius (rodmuo), c – daugiklis, išreikštas skaičiumi ir matavimo vienetais. Matavimo priemonių, turinčių brūkšninės skalės, šis daugiklis dažnai vadinamas matavimo priemonės **skalės padalos verte**. Skaitinė c vertė gali būti įvairi.

***Netiesioginiu** vadinamas toks matavimas, kai matuojamojo dydžio vertė randama pagal determinuotą ryšį tarp jos ir kitų tiesiogiai arba netiesiogiai išmatuotų fizikinių dydžių. Taip elgiamės tuomet, kai neturime tiesiogiai matuojančių matavimo priemonių arba kai jų tikslumas nepakankamas. Netiesioginio matavimo lygtis yra tokia:*

$$Y = f(X, Z, T, \dots, a, b, c, \dots) \quad (1.2)$$

Čia $X, Z, T, \dots$ – anksčiau išmatuoti dydžiai, $a, b, c, \dots$ – žinomos fizikinės ir matematinės konstantos, f – determinuota funkcija.

1. Metrologijos pagrindai

Netiesioginio matavimo rezultatas dažniausiai gaunamas apskaičiuojant. Tai yra esminis netiesioginio matavimo požymis.

Netiesioginio matavimo pavyzdžiu gali būti kintamosios srovės aktyviosios galios P matavimas, kai tiesiogiai išmatuojama grandinės srovė I , įtampa U , fazių skirtumas tarp jų φ ir galia nustatoma pagal formulę, t. y. netiesioginio matavimo lygtį: $P=UI\cos\varphi$. Netiesioginis matavimas yra ir laidininko skerspjūvio ploto S radimas, išmatavus jo skersmenį d ir taikant lygtį $S = \pi d^2/4$.

Pagal bandymų skaičių, iš kurių nustatomas matavimo rezultatas, matavimai skirstomi į **vienkartinius** ir **daugkartinius** (statistinius). Daugkartiniai matavimai (matavimų skaičius paprastai yra 3 ir daugiau) atliekami, siekiant gauti tikslesnius rezultatus.

Pagal svarbiausią matavimų kokybės požymį – tikslumą, matavimai skirstomi į **metrologinius**, **laboratorinius** ir **techninius**. Pastarieji kartais dar vadinami **darbiniais** matavimais.

***Metrologiniai** matavimai atliekami naudojant tiksliausias matavimų priemones ir būdus, laiduojančius didžiausią tikslumą, galimą esant šiam mokslo ir technikos išsivystymo lygiui. Tokie matavimai atliekami tiriant ir kuriant etalonus, nustatant fizikinių konstančių reikšmes.*

***Laboratoriniai** matavimai garantuoja, kad matavimų paklaidos neviršys reikiamų (t. y. leistinų) dydžių. Taigi ir metrologinių ir laboratorinių matavimų metu nustatomos ir įvertinamos paklaidos. Prie laboratorinių matavimų priskiriami kontroliniai, atestaciniai, mokslinio tyrimo ir panašūs matavimai.*

Prie **techninių** (darbinių) matavimų priskiriami tokie matavimai, kai matavimo paklaidos nenustatomos, o tiesiog pasitikima, kad matavimo metu jos neviršys matavimo priemonės ribinės (didžiausios galimos) paklaidos dydžio. Tokie yra gamybiniai, priėmimo-perdavimo, profilaktiniai, avariniai, montažiniai ir panašūs matavimai.

Matavimai taip pat skirstomi į **statinius** (kai matuojamasis dydis nekinta arba per matavimo laiką pakinta labai nežymiai) ir **dinaminius** – kai matuojamas kintantis laike dydis. Pvz., kintamosios įtampos matavimas priskirtinas prie dinaminių matavimų, nors įtampos amplitudė arba efektinė vertė ir nekinta. Tą patį būtų galima pasakyti ir apie oscilografinius matavimus. Dinaminių matavimų atveju matavimo paklaidos gali išaugti dėl nepakankamų matavimo priemonių dinaminių savybių, į kurias reikia atsižvelgti šias priemones pasirenkant matavimų atlikimui. Dinaminės matavimo priemonių savybės dažniausiai nusakomos šių

1. Metrologijos pagrindai

priemonių **dažninėmis** arba **laikinėmis** charakteristikomis (žr. toliau).

Metrologijoje naudojamas ir matavimo **metodikos** terminas, ypač svarbus atliekant matavimo priemonių etalonavimą: patikrą ir kalibravimą. **Metodika** yra *matavimo proceso reglamentas*. Joje detalieji aptariami konkrečiam matavimui taikomi matavimo metodai, techninės matavimų priemonės, matavimų skaičius, matavimų sąlygos, paklaidų nustatymo, rezultatų ir jų neapibrėžčių pateikimo būdai ir kiti klausimai.

1.1.4. Matavimų paklaidų klasifikavimas

Kaip jau anksčiau minėta, matavimų kokybei nusakyti dažnai naudojamas terminas matavimų tikslumas. Deja, kol kas nėra bendrai priimto būdo, kaip šį dydį kiekybiškai įvertinti.

Kiekybiškai matavimų priemonių ir matavimų būdų kokybė ir jų teikiamų matavimų rezultatų artumas tikrajai matuojamojo dydžio vertei apibūdinama ne tikslumu, o **matavimų paklaidomis**.

Matavimo paklaida – tai matavimo rezultato X ir tikrosios matuojamojo dydžio vertės A_x skirtumas:

$$\Delta_x = X - A_x.$$

Taip apibrėžta paklaida vadinama **tikrąja matavimų paklaida**. Ji išlieka nežinoma, kadangi tikroji matuojamojo dydžio vertė A_x yra nežinoma.

Praktikoje tenkinamasi šios paklaidos įverčiu Δ , vietoje A_x įrašius sutartinę tikrąją matuojamojo dydžio vertę A :

$$\Delta = X - A. \quad (1.3)$$

Matavimų paklaidos atsiranda dėl matavimų metodų ir priemonių bei mūsų jutimų netobulumo. Tobulėjant matavimų metodams ir priemonėms, matavimų paklaidos mažėja ir matavimo rezultatas gaunamas artimesnis tikrajai matuojamojo dydžio vertei. Taigi, vykstant mokslo ir technikos pažangai, matavimų tikslumas auga.

Skaičiuojant paklaidas pagal (1.3) formulę, jos išreiškiamos matuojamo fizikinio dydžio vienetais (V, mA, H ir t.t.). Todėl tokia paklaida vadinama **absoliutine matavimo paklaida**. Toks paklaidos išraiškos būdas nėra labai geras, nes jis neparodo, ar paklaida didelė

1. Metrologijos pagrindai

ar maža, lyginant ją su matuojamojo fizikinio dydžio verte. Pvz., paklaida $\Delta = 0,5 \text{ V}$, esant $x = 100 \text{ V}$ – maža paklaida, tuo tarpu kai $x = 1 \text{ V}$, tokia paklaida yra jau labai didelė.

Todėl praktikoje dažniau naudojamos **santykinės matavimo paklaidos**. Dažniausiai jos gaunamos absoliutinę paklaidą lyginant su matavimo rezultatu:

$$\delta = \frac{\Delta}{X} = \frac{X - A}{X}. \quad (1.4)$$

Taip pat naudojama **normuotoji (redukuotoji)** santykinė paklaida

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} = \frac{X - A}{X_N}. \quad (1.5)$$

Čia x_N – normuojantis tos pačios rūšies dydis, su kuriuo lyginama paklaida. Tai gali būti, pvz., prietaiso skalės riba matuojamojo dydžio vienetais.

Kadangi matuojant taikomas tam tikras matavimo metodas ir matavimų priemonės, o matavimas vyksta tam tikromis sąlygomis ir stebint bei dalyvaujant operatoriui, tai visos šios **matavimo proceso grandys** turi įtakos matavimo rezultatui, taip pat ir matavimo paklaidai. Skiriamos tokios matavimų paklaidų komponentės: **metodo** (teorinės) paklaidos, **matavimų priemonių** (aparatinės arba instrumentinės) paklaidos, **papildomos** paklaidos, kurias sukelia pakitusios matavimo sąlygos, ir **subjektyviosios** paklaidos.

Metodo (teorinės) paklaidos gaunamos todėl, kad nepakankamai tiksliai įvertinami visi matavimo metu vykstantys reiškiniai.

Matavimo priemonių paklaidos gaunamos dėl matavimo priemonių netobulumo. Išskiriamos dvi situacijos. Jeigu matavimų priemonė naudojama esant tam tikroms iš anksto aptartoms sąlygoms, kurios vadinamos **norminėmis**, tai tokios matavimų priemonių paklaidos priskiriamos **pagrindinių** matavimų priemonių paklaidų grupei. Norminės matavimo priemonės darbo sąlygos paprastai fiksuojamos jos techninėse sąlygose, standarte arba atestate. Juose nurodomi visi **paveikieji dydžiai**, t. y. *visi išoriniai poveikiai, išskyrus šia priemone matuojamą dydį, galintys pakeisti matavimo rezultatą*. Pavyzdžiui, matuojant įtampą elektroniniu voltmetru, tai gali būti: aplinkos temperatūra, voltmetro maitinimo įtampos dydis, siunčiamo į jo įėjimą signalo forma (pvz., netiesinių iškraipymų dydis), įtampos kitimo dažnis ir kiti dydžiai, bet ne pati matuojamoji įtampa.

1. Metrologijos pagrindai

Dažniausiai prie norminių sąlygų priskiriamos tokios: aplinkos temperatūra $293\text{ K} \pm 5\text{ K}$; santykinė drėgmė $65\% \pm 15\%$; atmosferos slėgis $101,3\text{ kPa} \pm 4\text{ kPa}$ ($750\text{ mmHg} \pm 30\text{ mmHg}$); maitinančio kintamosios srovės tinklo įtampa $220\text{ V} \pm 2\%$, dažnis $50\text{ Hz} \pm 0,4\%$ ir harmonikų koeficientas iki 5% .

Jeigu matavimo sąlygos skiriasi nuo norminių, tai matavimų priemonės paklaida padidėja **papildomos matavimo paklaidos** dydžiu. ***Matavimo priemonės papildoma paklaida** – tai matavimo rezultato pokytis, nukrypęs nuo norminės vertės bent vienam iš paveikiųjų dydžių.*

Kartais papildomos paklaidos neaptiriamos ir nurodomos matavimų priemonės **darbo sąlygos**, kuriomis yra garantuojamos matavimų priemonės metrologinės charakteristikos, tarp jų ir leistinoji paklaida.

Subjektyviosios (individualiosios) paklaidos gaunamos dėl operatoriaus darbo arba jutimų trūkumų: dėl netikslaus rodmenų atskaitymo, neteisingų matavimų sąlygų įvertinimo ir kitų priežasčių.

Kartais, neįvertinus netinkamų matavimo sąlygų įtakos (pvz., matavimo priemonę ir matavimo objektą jungiančio kabelio talpos, dėl pašalinių trukdžių įtakos ar kitų priežasčių), arba dėl klaidingų operatoriaus veiksmų (pvz., naudojant neatestuotą arba sugedusį matavimo prietaisą, rodmenį dauginant ne iš tos daugiaskalio prietaiso skalės padalos vertės) galima gauti **labai dideles (grubias) matavimo paklaidas**. Šios paklaidos gerokai viršija galimas šios matavimo priemonės paklaidas esamomis matavimų sąlygomis ir *matavimo rezultatai su tokiomis paklaidomis negali būti naudojami.*

Pagal būdingąsias savybes paklaidos skirstomos į **sistemingąsias ir atsitiktines**.

***Sistemosios paklaidos**, kartojant pastovaus fizikinio dydžio matavimus nekintančiomis matavimų sąlygomis, nesikeičia arba kinta determinuotai.*

Jeigu kartojant matavimus rezultatai gaunami įvairūs ir atskiri rezultatai negali būti prognozuojami, tai reiškia, kad jie gauti veikiant ***atsitiktinėms paklaidoms***.

Toks paklaidų suskirstymas yra sąlyginis, tačiau patogus tuo, kad skirtingai pasireiškiančias paklaidas galima nagrinėti atskirai.

Taigi matavimo metu gautą atskiuro rezultato paklaidą galime išreikšti suma

$$\Delta_i = \Delta_c \pm \xi_i, \quad (1.6)$$

čia Δ – matavimo paklaida, Δ_c – matavimo sisteminioji paklaida, ξ – matavimo atsitiktinė paklaida.

1. Metrologijos pagrindai

Kartais (taip pat sąlygiškai) paklaidų dedamosioms priskiriamos tokios savybės: tariama, kad sistemingoji paklaida lemia matavimų **teisingumą**, o atsitiktinės paklaidos – rezultatų sklaidą – **variaciją**.

Paklaidos taip pat skirstomos į **statines**, kai matuojamasis dydis nekinta arba kai jis kinta lėtai, ir **dinamines**, kai matuojamasis dydis kinta ir pasireiškia matavimų priemonės inertiškumas matuojamojo kintančio fizikinio dydžio atžvilgiu. Taigi **dinaminės** paklaidos gaunamos tuomet, jeigu konkrečiam greitai kintančiam fizikiniam dydžiui matuoti pasirinkta nevisai tinkama matavimo priemonė. Todėl nors jos gaunamos dėl matavimo priemonės įtakos, bet priskiriamos prie metodo paklaidų.

Tiriant paklaidų priklausomybę nuo matavimo rezultato, išskiriamos **adityviosios** (lot. *additivus* – *pridėtasis*) paklaidos – nepriklausančios nuo rezultato skaitinės vertės ir **multiplikatyviosios** (lot. *multiplicato* – *daugyba*) – priklausančios nuo jos. Dažnai abi šios paklaidos pasireiškia vienu metu.

Jeigu matuojamas **tolydusis** fizikinis dydis matavimo metu yra diskretizuojamas laike arba (ir) kvantuojamas pagal jo lygį, tai atsiranda **diskretizacijos** ir **kvantavimo** paklaidos.

1.1.5. Paklaidų aprašymo būdai

Sistemosios paklaidos nusako determinuotą paklaidų dalį. Jos gali būti nekintančios arba kisti determinuotu dėsniu (periodiniu, tiesiniu, hiperboliniu ir kt.). Sistemingąją paklaidą galima apibrėžti kaip matavimų paklaidos Δ matematinę viltį (vidurkį) $E[\Delta]$:

$$\Delta_c = E[\Delta] = E[X - A] = E[X] - A. \quad (1.7)$$

Jeigu X ir Δ yra tolydieji atsitiktiniai dydžiai, tai iš (1.7) išplaukia:

$$\Delta_c = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx - A = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta f(\Delta) d\Delta; \quad (1.8)$$

čia $f(\Delta)$ ir $f(x)$ – yra tolydžių atsitiktinių dydžių Δ ir X tikimybės tankio funkcijos.*

* Graikų abėcėlės raidėmis žymimus atsitiktinius dydžius ir jų determinuotųjų pasiskirstymo funkcijų argumentus žymėsime tomis pačiomis raidėmis. Tai leis sumažinti ir taip gausų įvairių simbolių skaičių, o simbolių prasmė visuomet yra aiški iš konteksto.

1. Metrologijos pagrindai

Diskretiesiems matavimų rezultatams x ir paklaidoms Δ atitinkamai gautume:

$$\Delta_c = \sum_1^N x_i p_i - A = \sum_1^N \Delta_i p_i ; \quad (1.9)$$

čia p_i – tikimybė, su kuria atsitiktiniai dydžiai X ir Δ atitinkamai įgyja vertes x_i ir Δ_i .

Sistemosios paklaidos aptinkamos tik atliekant matavimo priemonių **kalibravimą**, t. y. palyginant jų teikiamus matavimų rezultatus su etalonų teikiamais rezultatais. Lyginama imtinai iki pirminių etalonų pagal įteisintą **kalibravimo schemą**. Dažniausiai sistemosios paklaidos pašalinamos, įvedant į matavimo rezultatą **pataisais**, arba **pašalinant sistemingųjų paklaidų atsiradimo priežastis**.

Pataisų įvedimas galimas, jeigu matavimo priemonė yra patikrinta pagal etaloną. ***Pataisa** – tai sistemingoji paklaida su priešingu ženklu:*

$$C = -\Delta_c \quad (1.10)$$

Prie matavimo rezultato pridėta pataisa kompensuoja sistemingąją paklaidą ir lieka tik tokia nekompensuota sistemosios paklaidos dalis, kokią turi etalonas. *Ši likusi sistemosios paklaidos dalis vadinama **nepanaikintąja sistemingąja paklaida**. Rezultatas su pridėta pataisa vadinamas **ištaisytoju matavimo rezultatu**.*

Iš to, kas pasakyta išplaukia, kad sistemosios paklaidos gali būti aptiktos tik naudojant etalonus.

Tyrimai rodo, kad kartojant matavimus **vienodomis** sąlygomis, daugybė įvairių galimų priežasčių pasireiškia vis kitaip (arba iš viso nepasireiškia) ir pakeičia matavimo rezultatą. Gali turėti įtakos ir neįvertinamas atsitiktinis matuojamojo dydžio pasikeitimas, kurį atskirti nuo kitų priežasčių yra neįmanoma. Todėl atskirų matavimų rezultatai negali būti nusakyti nei dydžiu nei ženklu. Jie yra atsitiktiniai dydžiai. Kaip matyti iš (1.7), atsitiktiniai dydžiai yra ir matavimų paklaidos Δ . Jeigu šios paklaidos yra žymios, tai negalima tenkintis vienu rezultatu, tenka daug kartų kartoti matavimus ir rezultatus tvarkyti **statistikos metodais**.

Nagrinėjimo patogumui toliau analizuosime ištaisytuosius

1. Metrologijos pagrindai

matavimų rezultatus, t. y. sistemingąją paklaidos dalį atmesime (laikysime, kad $\Delta_c = 0$) ir nagrinėsime tik atsitiktines paklaidas, analizuodami jas kaip **centruotus atsitiktinius dydžius** ξ . Tada gausime:

$$\xi = X - A = X - \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx, \quad (1.11)$$

$$\text{ir} \quad \xi = x_i - A = x_i - \sum_1^N x_i p_i. \quad (1.12)$$

Atsitiktinėms paklaidoms aprašyti naudojami tikimybių teorijos metodai.

Radikaliausia yra nurodyti paklaidų **tikimybių skirstinį**. Naudojama **skirstinio funkcija**, kuri apibrėžiama taip:

$$F(\Delta) = P(\Delta_i < \Delta) = P(-\infty < \Delta_i < \Delta). \quad (1.13)$$

Taip pat naudojama skirstinio funkcijos išvestinė arba **tikimybės tankio funkcija**:

$$f(\Delta) = \frac{dF(\Delta)}{d\Delta}. \quad (1.14)$$

Panaudoję (1.15) ir (1.16), gauname:

$$F(\Delta) = \int_{-\infty}^{\Delta} f(\Delta) d\Delta \quad (1.15)$$

$$\text{ir} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta) d\Delta = 1.$$

Deja, toks paklaidų aprašymo būdas naudojamas labiau abstrakčiam matematiniam nei realiam konkrečių paklaidų aprašymui. Mat taip aprašant paklaidas, reikia žinoti ne tik konkrečią skirstinio funkciją, bet ir tiksliai jos skaitines charakteristikas. Dažniausiai nežinomos ne tik skaitinės charakteristikos, bet ir dėsnio pobūdis. Be to, jeigu naudotume šį paklaidų aprašymo būdą, tai būtų sunku palyginti paklaidas, ypač priklausančias skirtingiems tikimybių skirstiniams.

Čia verta prisiminti, kad, pvz., elektrotechnikoje ir elektronikoje irgi retai nustatinėjamos įtampų ar srovių momentinės funkcijos, o tuo labiau – jomis naudojantis lyginami tarpusavyje srovių ar įtampų dydžiai.

Atsitiktinėms paklaidoms aprašyti dažniau naudojami įvairūs skaitiniai parametrai, kuriuos lengviau tarpusavyje palyginti.

1. Metrologijos pagrindai

Pavyzdžiui, naudojant (1.14), (1.15), galima rasti tikimybę, kad atsitiktinės paklaidos ξ sutilps intervale nuo α_1 iki α_2

$$P(\alpha_1 \leq \xi \leq \alpha_2) = F(\alpha_2) - F(\alpha_1) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} f(\xi) d\xi. \quad (1.16)$$

Kadangi dažniausiai tikimybės tankio funkcija yra **simetrinė**, tai nurodomas **simetrinis intervalas** $\pm\alpha$. Šio intervalo visas plotis yra lygus 2α , o jo pusė (pusplotis) – α surandama iš lygybės

$$P(-\alpha \leq \xi \leq +\alpha) = 2 \int_0^{\alpha} f(\xi) d\xi. \quad (1.17)$$

Šitaip aprašant paklaidas, užtenka nurodyti tik du skaičius: paklaidų intervalą ir tikimybę. Toks paklaidų aprašymas vadinamas **paklaidų intervalų (rėžių) aprašymu**. Tačiau ir toks paklaidų aprašymo būdas nėra patogus, ypač lyginant skirtingų tikimybių paklaidas arba paklaidas priklausančias skirtingiems tikimybių skirstiniams.

Patogiau būtų paklaidas aprašyti vienu parametru. Toks paklaidų aprašymas vadinamas **paklaidų taškinio aprašymu**. Dažniausiai taškiniam aprašymui naudojami **tikimybių skirstinio momentai**.

Pradinis pirmos eilės momentas teikia, kaip anksčiau nurodyta, sistemingąją paklaidos dalį. Grynai atsitiktinei paklaidai šis dydis lygus nuliui ($E[\xi]=0$) ir negali būti naudojamas atsitiktinėms paklaidoms vertinti.

Naudojami aukštesnės nei pirmos eilės centriniai tikimybių skirstinio momentai:

$$\mu_s = E[\xi^s] = \int_{-\infty}^{+\infty} \xi^s f(\xi) d\xi.$$

Ypač plačiai naudojamas centrinis antros eilės momentas

$$\mu_2 = E[\xi^2] = V[\xi] = 2 \int_0^{\infty} \xi^2 f(\xi) d\xi, \quad (1.18)$$

vadinamas atsitiktinių **paklaidų dispersija** ($V[\xi]$). Jis nusako matavimo rezultatų sklaidą apie jų vidurkį. Kadangi šio dydžio dimensija yra matuojamojo fizikinio dydžio antras laipsnis, tai dažniau naudojamas dydis su teigiamu ženklu, gautas ištraukus kvadratinę šaknį iš dispersijos:

$$\sigma = +\sqrt{E[\xi^2]} = +\sqrt{2 \int_0^{\infty} \xi^2 f(\xi) d\xi}. \quad (1.19)$$

Šis dydis vadinamas **standartine paklaida**. Jis yra patogus, nes šias paklaidų vertes geometriškai sumuojant gaunama sumos standartinė paklaida. *Todėl šis parametras labai plačiai naudojamas atsitiktinėms paklaidoms ir rezultatų neapibrėžtims aprašyti.*

Jeigu nagrinėjamos diskrečiosios atsitiktinės paklaidos, tai standartinė paklaidos vertė randama taip:

$$\sigma = +\sqrt{\sum_{i=1}^N \xi_i^2 p_i}. \quad (1.20)$$

Aukštesnės eilės centriniai momentai naudojami ne paklaidų didumui, o skirstinio formai vertinti. Paklaidų tikimybių skirstinio simetrijai aprašyti naudojamas centrinis 3-čios eilės momentas – **asimetrija**:

$$\mu_3 = E[\xi^3] = 2 \int_0^{\infty} \xi^3 f(\xi) d\xi.$$

Šis parametras turi matuojamo fizikinio dydžio 3-čio laipsnio dimensiją ir todėl dažniau naudojamas normuotas dydis, gautas padalijus asimetriją iš σ^3 . Šis bedimensinis parametras vadinamas tikimybių skirstinio **asimetrijos koeficientu**:

$$As = \frac{E[\xi^3]}{\sigma^3}. \quad (1.21)$$

Pasiskirstymo tankio funkcijos kreivės aštrumas (plokštumas) apibūdinamas pagal centrinį 4-tos eilės momentą. Naudojamas normuotasis, be to dar ir paslinktasis dydis (lyginama su normaliojo tikimybių skirstinio ekscesu), vadinamas **eksceso koeficientu**:

$$Ek = \frac{E[\xi^4]}{\sigma^4} - 3. \quad (1.22)$$

Be išvardintų parametų, metrologijoje plačiai vartojama ir **ribinės (didžiausios)** atsitiktinės paklaidos vertės sąvoka. Ši vertė apibrėžiama kaip *atsitiktinių paklaidų intervalo pločio pusė* (žymėsime $\xi_{\max}$), *sutilpimo kuriame tikimybė yra būtino įvykio*

1. Metrologijos pagrindai

tikimybė, t. y. lygi 1. Šią paklaidos vertę galima surasti iš integralinės lygties:

$$P = \int_{-\xi_{\max}}^{\xi_{\max}} f(\xi) d\xi = 1. \quad (1.23)$$

Simetrinių tikimybių skirstinių:

$$P = 2 \int_0^{\xi_{\max}} f(\xi) d\xi = 1.$$

Šis parametras būtų labiausiai priimtinas atsitiktinėms paklaidoms vertinti, nes nurodo galimą atsitiktinių paklaidų didumo ribą, t. y. didžiausias galimas atsitiktinių paklaidų vertės. Tačiau dauguma tikimybių skirstinių yra asimptotiniai ir paklaidos neturi baigtinės ribos, t. y. jų $\xi_{\max} = \infty$.

Ryšį tarp $\xi_{\max}$ ir σ galima aprašyti paklaidų tikimybinės **ribos koeficientu**:

$$K_{\max} = \frac{\xi_{\max}}{\sigma}.$$

Pailiustruokime atsitiktinių paklaidų vertinimą, išnagrinėdami keletą konkrečių tikimybių skirstinių.

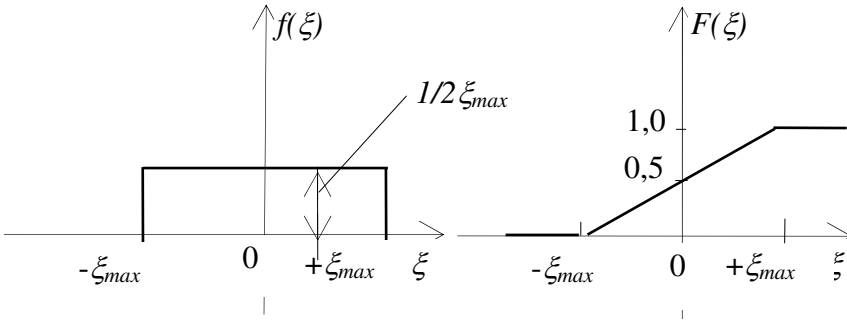
1.1.6. Paklaidų tolygusis tikimybių skirstinys

Tokios paklaidos dažnai pasitaiko atliekant matavimus. Tokių tikimybių skirstinį turi įvairiausių apvalinimų paklaidos, pvz., rodmenų atskaitymų paklaidos, diskretizacijos paklaidos, įvairių nejautrumo zonų pasireiškimo sukuriamos paklaidos, t. y. tokios, kurios tarp tam tikrų ribų gali įgyti bet kokias vertes su vienoda tikimybe. Nagrinėdami šio dėsnio atsitiktines paklaidas, gautume tokias tankio funkcijos ir skirstinio funkcijos formules:

$$\begin{cases} f(\xi) = \frac{1}{2\xi_{\max}}, & \text{ kai } |\xi| \leq \xi_{\max}; \\ f(\xi) = 0, & \text{ kai } |\xi| > \xi_{\max}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} F(\xi) = \frac{\xi + \xi_{\max}}{2\xi_{\max}}, \text{ kai } |\xi| < \xi_{\max}; \\ F(\xi) = 0, \text{ kai } \xi < -\xi_{\max}; F(\xi) = 1, \text{ kai } \xi > +\xi_{\max}. \end{cases} \quad (1.24)$$

Kaip matyti iš (1.24), šį dėsnį visiškai nusako vienintelė skaitinė charakteristika $\xi_{\max}$, t. y. **ribinė atsitiktinės paklaidos vertė**. Šio dėsnio tikimybės tankio ir skirstinio funkcijų grafikai parodyti 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Atsitiktinių paklaidų tolygusis tikimybių skirstinys

Ryšys tarp paklaidų sutilpimo intervalo ir šio intervalo tikimybės šiam dėsnui, gaunamas pagal bendrą formulę (1.16), yra išreiškiamas taip:

$$p = P(-\alpha < \xi < +\alpha) = 2 \int_0^{\alpha} \frac{1}{2\xi_{\max}} d\xi = \frac{\alpha}{\xi_{\max}}.$$

Tolygiojo tikimybių skirstinio atsitiktinių paklaidų dispersija yra lygi:

$$E[\xi^2] = V[\xi] = 2 \int_0^{\xi_{\max}} \xi^2 \frac{1}{2\xi_{\max}} d\xi = \frac{(\xi_{\max})^2}{3}.$$

Iš pastarosios formulės gauname standartinės paklaidos ir paklaidų ribos koeficiento formules:

$$\sigma = \frac{\xi_{\max}}{\sqrt{3}} \quad \text{ir} \quad K_{\max} = \frac{\xi_{\max}}{\sigma} = \sqrt{3}.$$

1. Metrologijos pagrindai

Šio paklaidų tikimybių skirstinio asimetrijos koeficientas yra lygus nuliui ($As = 0$), nes skirstinys yra simetrinis. Eksceso koeficientas nėra lygus nuliui:

$$Ek = \frac{2 \int_0^{\xi_{\max}} \xi^4 \frac{1}{2\xi_{\max}} d\xi}{\left(\xi_{\max} / \sqrt{3}\right)^4} - 3 = \frac{9}{5} - 3 \approx -1,2.$$

Neigiama eksceso koeficiento vertė rodo, kad šio skirstinio tankio funkcijos kreivė yra plokštesnė už normaliojo skirstinio tankio funkcijos kreivę.

1.1.7. Paklaidų normalusis tikimybių skirstinys

Stebėjimai rodo, kad atsitiktinės paklaidos dažniausiai paklūsta tokiems bendriesiems dėsningumams:

1) **vienodo didumo (modulio) paklaidos pasitaiko tokiu pačiu dažnumu**, todėl galima apibendrinti, kad paklaidų tikimybės tankio funkcija yra lyginė, t. y. $f(\xi) = f(-\xi)$;

2) **mažo didumo paklaidos pasitaiko dažniau nei didelės**. Taigi funkcija $f(\xi)$ yra mažėjanti, kai $\xi \rightarrow \pm\infty$;

3) **paklaidų, viršijančių modulių tam tikrą dydį E , pasitaikymo tikimybė yra labai maža**, t. y., kai $|\xi| \geq E$, tai $f(\xi) \rightarrow 0$. Taigi, galima teigti, kad egzistuoja paklaidų didumo riba E .

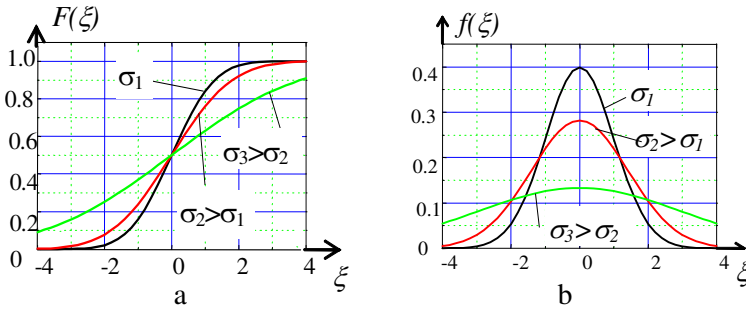
Šias savybes aptiko vokiečių matematikas, astronomas, geodezininkas ir fizikas Gausas (K.F. Gauss 1777–1855). Paklaidos, turinčios tokias savybes, dažniausiai priklauso **normaliajam** arba **Laplaso–Gauso** tikimybių skirstiniui.

Šio paklaidų tikimybių skirstinio reikšmė ypatinga tuo, kad matavimų atsitiktinės paklaidos dažniausiai susidaro iš daugelio dalinių atsitiktinių dedamųjų, o iš centrinės ribinės tikimybių teorijos teoremos išplaukia, kad tokiu atveju paklaidų tikimybių skirstinys bus normalusis. Taip yra net ir tuo atveju, kai dalinių dedamųjų tikimybių skirstiniai nėra normalieji, svarbu tik kad nebūtų ypač išsiskiriančių (dominuojančių) dedamųjų. Dalinių dedamųjų turi būti ne mažiau kaip trys – keturios.

1. Metrologijos pagrindai

Šiam tikimybių skirstiniui aprašyti užtenka vienos skaitinės charakteristikos (jeigu nagrinėjamos grynai atsitiktinės paklaidos) – **standartinės paklaidos** vertės σ :

$$f(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}} \text{ ir } F(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}} d\xi. \quad (1.25)$$



1.2 pav. Paklaidų normaliojo tikimybių skirstinio funkcija (a) ir tikimybės tankio funkcija (b)

Šio dėsnio atsitiktinių paklaidų sutilpimo intervalo ir šio intervalo tikimybės ryšys, nustatomas pagal (1.16) formulę, įgauna tokį pavidalą:

$$p = P(-\alpha < \xi < +\alpha) = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\alpha} e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}} d\xi.$$

Šios formulės dešinėsios pusės integralas negali būti išreikštas elementariomis funkcijomis. Gali būti nustatytos tik apytikslės jo reikšmės, taikant apytikslio integravimo metodus. Pakeitus kintamąjį $t = \xi/\sigma$ ir laikant viršutinį integravimo rėžį $y = \alpha/\sigma$, gautume integralą, vadinamą **integraline Laplaso funkcija** (prancūzų matematikas, fizikas ir astronomas P. S. Laplace 1749–1827):

$$p = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \Phi(y), \quad (1.26)$$

kurios reikšmės pateikiamos lentelėse (žiūr. 1 priedą).

Kartais yra naudojamas ir kitoks šio integralo normavimas ir kitos to normavimo pagrindu gaunamos funkcijos bei jų lentelės [1].

1. Metrologijos pagrindai

Kaip pavyzdžius pateikiame keletą būdingų y ir $p=\Phi(y)$ reikšmių:

$\alpha=0,5\sigma$,	$y=0,5$,	$p=\Phi(0,5) = 0,3829$,
$\alpha=\sigma$,	$y=1,0$	$p=\Phi(1,0) = 0,6827$,
$\alpha=2\sigma$,	$y=2,0$	$p=\Phi(2,0) = 0,9545$,
$\alpha=3\sigma$,	$y=3,0$	$p=\Phi(3,0) = 0,9973$,
$\alpha=4\sigma$,	$y=4,0$	$p=\Phi(4,0) = 0,999937$.

Normaliojo tikimybių skirstinio atveju $p \rightarrow 1$, kai $\alpha \rightarrow \infty$, nes šis dėsnis priklauso asimptotinių pasiskirstymų grupei ir griežtos paklaidų ribos neturi.

Šiam tikimybių skirstiniui gauname tokias trečios ir ketvirtos eilės centrinių momentų bei asimetrijos ir eksceso koeficientų reikšmes:

$$\mu_3 = E(\xi^3) = 0; \quad As = 0; \quad \mu_4 = E(\xi^4) = 3\sigma^4; \quad Ek = 0.$$

Toks tikimybių skirstinys, kaip jau buvo minėta, neturi griežtų paklaidų ribų, bet, kaip matyti iš anksčiau pateiktų paklaidų intervalų ir jų tikimybių reikšmių, esant šiam paklaidų dėsningumui, ribine paklaidos verte gali būti laikoma $\alpha=3\sigma$ vertė. Todėl šiam dėsniui sutarta laikytis vadinamosios "**trijų sigma**" taisyklės ir laikoma, kad $\xi_{\max} = 3\sigma$. Kaip matėme iš anksčiau pateiktų pavyzdžių, tokio paklaidų intervalo tikimybė yra 0,9973 ir tik apie 3 paklaidos iš 1000 gali nesutilti į šią ribą. Taigi $\pm 3\sigma$ vertė yra praktiškai **ribinis normaliojo tikimybių skirstinio paklaidų intervalas**.

1.1.8. Atsitiktinių paklaidų sumavimas

Kaip jau yra minėta, atsitiktines paklaidas sukelia daugybė dalinių priežasčių ir jų sukeliamos paklaidos sumuojasi. Todėl atsitiktinę paklaidą galime traktuoti kaip dalinių atsitiktinių paklaidų sumą. Nagrinėkime, pavyzdžiui, dviejų tolydžių atsitiktinių paklaidų sumą:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2.$$

Sumos tikimybių skirstinio skaitinės charakteristikos surandamos gana paprastai, tam nereikia žinoti paklaidų sumos pasiskirstymo dėsnio. Pavyzdžiui, atsitiktinių paklaidų sumos dispersija randama taip:

$$\sigma^2 = V[\xi_1 + \xi_2] = E[(\xi_1 + \xi_2)^2] = E[\xi_1^2] + E[\xi_2^2] +$$

$$+ 2E[\xi_1 \times \xi_2] = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2K_{12} = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2r_{12}\sigma_1\sigma_2;$$

čia K_{12} – dalinių paklaidų koreliacijos (kovariacijos) (*lot. correlatio*

– *santykiavimas*) momentas ir $r_{12} = \frac{K_{12}}{\sigma_1\sigma_2}$ – dalinių paklaidų

koreliacijos koeficientas.

Šią išvadą galime taikyti ir bet kokiai baigtinei paklaidų sumai:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 + 2 \sum_{i \neq j}^N r_{ij} \sigma_i \sigma_j,$$

kur ženklas $i \neq j$ rodo, kad sumuojama visiems galimiems atsitiktinių paklaidų nuo ξ_1 iki ξ_N deriniams. Jeigu sumuojamos nepriklausomos arba nekoreliuotos atsitiktinės paklaidos, tai $r_{ij}=0$ ir

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_i^2.$$

Jeigu tarp paklaidų dedamųjų yra funkcinė priklausomybė, tai $r_{ij}=\pm 1$ ir paklaidų sumos dispersija išreiškiama algebrinės sumos formule:

$$\sigma = \sum_{i=1}^N \sigma_i.$$

Sudėtingiau nustatomas atsitiktinių paklaidų sumos tikimybių skirstinys. Šis uždavinys čia nenagrinėjamas. Pabrėšime tik, kad **sumos skirstinys gali žymiai skirtis nuo sumuojamų paklaidų tikimybių skirstinių.**

Pateikiame keletą pavyzdžių.

1. Kai sumuojamos dvi nepriklausomos atsitiktinės paklaidos, kurių tikimybių skirstiniai yra tolygieji, o ribinės paklaidos $\xi_{1\max}$ ir $\xi_{2\max}$, gaunamas **trapecinis** tikimybių skirstinys.

Jo standartinės paklaidos vertė yra:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{\xi_{1\max}^2}{3} + \frac{\xi_{2\max}^2}{3}} = \frac{\sqrt{\xi_{1\max}^2 + \xi_{2\max}^2}}{\sqrt{3}}.$$

Ribinė paklaidos vertė: $\xi_{\max} = \xi_{1\max} + \xi_{2\max}.$

1. Metrologijos pagrindai

2. Kai sumuojami du vienodi tolygieji tikimybių skirstiniai, t. y. kai $\xi_{1\max} = \xi_{2\max}$, gaunamas trikampis arba **Simpsono** (anglų matematikas T. Simpson 1710–1761) tikimybių skirstinys. Šio tikimybių skirstinio skaitinės charakteristikos yra tokios: ribinė paklaidos vertė – $\xi_{\max} = 2\xi_{1\max}$, o standartinė paklaidos vertė:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\xi_{1\max}^2}{3} + \frac{\xi_{1\max}^2}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \xi_{1\max}.$$

3. Sumuodami tris nepriklausomas paklaidas, kurių kiekvienos tikimybių skirstinys yra tolygusis ir su vienodomis ribinėmis paklaidomis, lygiomis $\xi_{1\max}$, gautume 1.3 paveiksle parodytą tokios sumos tikimybės tankio funkciją.

Šio skirstinio pagrindinė skaitinė charakteristika yra ribinė paklaida, kuri lygi $\xi_{\max} = 3\xi_{1\max}$. Standartinė paklaida:

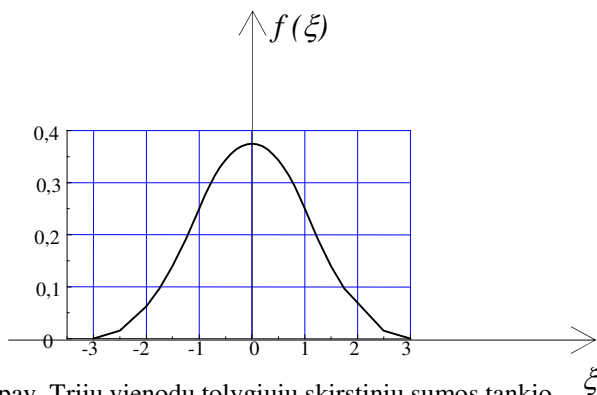
$$\sigma = \sqrt{\frac{\xi_{1\max}^2}{3} + \frac{\xi_{1\max}^2}{3} + \frac{\xi_{1\max}^2}{3}} = \xi_{1\max}.$$

Ribinė paklaida per standartinę paklaidą būtų išreikšta taip:

$$\xi_{\max} = 3\sigma.$$

Taigi gauname taip pat "trijų sigma" taisyklę, tačiau šiuo atveju ji jau griežtai apibrėžta, t. y. šios ribos $p = P(|\xi| \leq 3\sigma) = 1$.

Pats tikimybių skirstinys yra labai panašus į normalųjį tikimybių skirstinį, kurio dispersija yra tokia pati, tačiau jis turi paklaidų ribą.



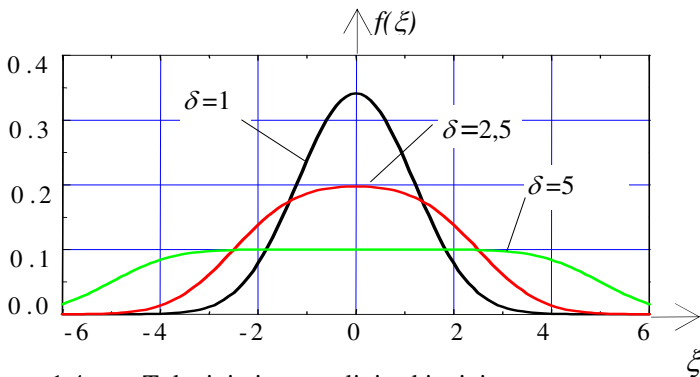
1.3 pav. Trijų vienodų tolygiųjų skirstinių sumos tankio funkcijos grafikas

4. Nagrinėjime nepriklausomų tolygiojo ir normaliojo tikimybių skirstinių sumą.

Pažymėkime $\delta = \frac{\xi_{\max}}{\sigma}$, čia $\xi_{\max}$ yra tolygiojo tikimybių

skirstinio ribinė paklaida, o σ – normaliojo skirstinio standartinė paklaida. Šio skirstinio tikimybės tankio funkcijų grafikai pavaizduoti 1.4. paveiksle. Kai δ mažas, sumos skirstinys mažai skiriasi nuo normaliojo skirstinio. Šiam santykiui augant, sumos skirstinys artėja prie tolygiojo skirstinio.

Kaip matyti iš aptartųjų pavyzdžių, tolygiojo tikimybių skirstinio suma su juo pačiu ir kitais skirstiniais jau yra kitokie dėsniai. Todėl sakoma, kad tolygusis tikimybių skirstinys yra *nestabilus*.



1.4 pav. Tolygiojo ir normaliojo skirstinių sumos tikimybės tankio funkcijų grafikai

5. Panagrinėjime, koks bus normaliųjų skirstinių paklaidų sumos skirstinys.

Sumuokime dvi nepriklausomas paklaidas, kurių tikimybių skirstiniai aprašomi normaliosiomis tankio funkcijomis:

$$f_1(\xi_1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi_1^2}{2\sigma_1^2}}; \quad f_2(\xi_2) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi_2^2}{2\sigma_2^2}}.$$

Susumavę paklaidų dispersijas, gautume:

1. Metrologijos pagrindai

$$f(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}},$$

kur $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$. Taigi gauname taip pat normalųjį skirstinį, kurio dispersija lygi sumuojamų paklaidų dispersijų sumai.

Sumuodami bet kokių skaičių paklaidų su normaliaisiais tikimybių skirstiniais gautume taip pat normalųjį sumos skirstinį.

Jeigu dedamosios priklausančios, tai irgi gaunamas sumos normalusis skirstinys, tik pagal dispersijų sumos formulę reikia įvertinti sumuojamų priklausančių paklaidų koreliacijos koeficientus.

Šis tyrimas rodo, kad normalusis skirstinys yra *stabilus*.

Kaip jau yra pastebėta anksčiau, iš **kelių netgi nenormaliųjų skirstinių gaunamos sumos skirstinys, jeigu nėra žymiai išsiskiriančių dedamųjų, yra taip pat normalusis skirstinys**. Praktiškai tai leidžia teigti, kad gerai suprojektuotos ir pagamintos matavimo priemonės paklaidų tikimybių skirstinys yra normalusis.

1.1.9. Netiesioginių matavimų paklaidos

Jau minėjome, kad dažnai negalime atlikti tiesioginių matavimų, nes nėra tam tikslui skirtų matavimo priemonių arba jų matavimo tikslumas yra nepakankamas. Atestuojant naujai sukurtas matavimo priemones, jeigu analogiškų nėra, taip pat tenka jas tikrinti taikant netiesioginius matavimo metodus. Analizuojant matavimo priemonių paklaidas, pagal jų struktūrinę schemą ir veikimą reikia nustatyti matavimo lygtį ir iš pastarosios apskaičiuoti matavimo priemonės struktūrinės schemos kiekvieno elemento įtaką matavimo priemonės paklaidai. Kaip nustatomos paklaidos tokiais atvejais?

Tarkime, kad netiesioginio matavimo (arba matavimo priemonės) lygtis yra (žr. 12 psl.) $Y = f(X, Z, T, \dots)$. Čia $X, Z, T, \dots$ – ankstesnių matavimų rezultatai arba matavimo priemonės struktūrinės schemos elemento (matavimo keitiklio) išėjime gaunami dydžiai. Tarkime, jog taip pat yra žinomos šių dydžių tikrosios vertės $A_x, A_z, A_t, \dots$ ir atitinkamos rezultatų paklaidos:

$$\Delta X = X - A_x, \Delta Z = Z - A_z, \Delta T = T - A_t \cdot$$

Tada matavimo lygtį galime perrašyti taip:

$$Y = f(A_x + \Delta X, A_z + \Delta Z, A_t + \Delta T, \dots).$$

Kadangi matavimo paklaidos visuomet yra dydžiai, gerokai mažesni už matuojamuosius dydžius, tai matavimo lygties funkciją galime išskleisti **Teiloro** (anglų matematikas B. Taylor 1685–1731) eilute:

$$Y = f(A_x, A_z, A_t, \dots) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(\frac{\partial f}{\partial X} \right)_{X=A_x} \cdot \Delta X + \left(\frac{\partial f}{\partial Z} \right)_{Z=A_z} \cdot \Delta Z + \dots)^k.$$

Šioje formulėje dalinių išvestinių indeksai rodo, kad jos turi būti apskaičiuotos įstatant tikrąsias matuojamųjų dydžių vertes. Toliau, paprastumo dėlei, indeksų nerašysime. Be to, šios formulės tikrųjų matuojamųjų dydžių funkcija yra lygi (skaičiavimų tikslumo ribose) tikrajai netiesiogiai matuojamo dydžio vertei, t. y:

$$f(A_x, A_z, A_t, \dots) = A_y.$$

Teiloro eilutė gali būti apribota, paliekant tik jos pirmąjį narį ir narius su tiesioginių matavimų paklaidų pirmaisiais laipsniais, nes matavimų paklaidos yra mažos:

$$Y \approx f(A_x, A_z, A_t, \dots) + \left(\frac{\partial f}{\partial X} \right) \cdot \Delta X + \left(\frac{\partial f}{\partial Z} \right) \cdot \Delta Z + \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \cdot \Delta T + \dots$$

Narių su aukštesniais laipsniais atmetimas sukelia paklaidą, kurios absoliutus didumas lygus atmetamų narių sumai. Nesunku įsitikinti, kad jei paklaidos dydžiai yra maži, tai tokio eilutės apribojimo sukelta paklaida taip pat yra maža.

Matavimo lygtyje perkėlę tikrąją netiesiogiai matuojamą dydį į kairę lygybės pusę, gauname **netiesiogiai matuojamo dydžio Y paklaidą**:

$$\Delta Y = Y - A_y \approx \left(\frac{\partial f}{\partial X} \right) \cdot \Delta X + \left(\frac{\partial f}{\partial Z} \right) \cdot \Delta Z + \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \cdot \Delta T + \dots \quad (1.27)$$

Šioje formulėje esančios dalinės išvestinės rodo tiesioginių matavimų paklaidų (arba matavimo priemonės atskirų elementų paklaidų) įtaką netiesioginio matavimo (arba matavimo priemonės) paklaidai. Todėl jos vadinamos dalinių paklaidų **įtakos** arba **svorio koeficientais**. Įvedę žymėjimus

$$g_J = \left(\frac{\partial f}{\partial J} \right)_{J=A_j}, \quad \text{gauname}$$

1. Metrologijos pagrindai

netiesioginio matavimo paklaidą kaip dalinių paklaidų svertinę sumą:

$$\Delta Y \approx g_x \cdot \Delta X + g_z \cdot \Delta Z + g_t \cdot \Delta T + \dots \quad (1.28)$$

Jeigu į šią formulę įeinančių paklaidų ženklai nėra žinomi, o žinomas tik paklaidų didumas, pvz., jeigu paklaidos surastos iš matavimo priemonių tikslumo klasių, tai įtakos koeficientai imami su pliuso ženklu, t. y. imami tik jų moduliai.

Analogiška yra ir **sistemos** paklaidos formulė.

Panagrinėkime tokį pavyzdį. Tarkim, kad elektrinės grandinės galia nustatoma, išmatavus įtampą jos gnybtuose ir tos grandinės varžą. Tarkim, jog šių tiesioginių matavimų sistemos santykinės paklaidos bus tokios: $\delta_{cR} = +0,5\%$ ir $\delta_{cU} = -2\%$. Nustatykime netiesioginio galios matavimo sistemos santykinę paklaidą δ_{cP} . Tokio netiesioginio galios matavimo lygtis yra $P = U^2/R$, todėl pagal (1.27) galime užrašyti

$$\Delta_{cP} = -\frac{U^2}{R^2} \Delta_{cR} + \frac{2U}{R} \Delta_{cU};$$

$$\delta_{cP} = \frac{\Delta P}{P} = -\frac{\Delta R}{R} + \frac{2\Delta U}{U} = 2\delta_{cU} - \delta_{cR} = 2(-2) - 0,5 = -4,5 \, \%.$$

Jeigu aptartuoju atveju būtų pateiktos ne sistemos paklaidos, o jos būtų apskaičiuotos pagal matavimo priemonių tikslumo klases, pvz., $\delta_U = \pm 2 \, \%$, $\delta_R = \pm 0,5 \, \%$, tai tuomet galėtume surasti tik ribinę santykinę galios matavimo paklaidą:

$$\delta_P = 2\delta_U + \delta_R = \pm(4 + 0,5) = \pm 4,5 \, \%.$$

Nagrinėkime **netiesioginių matavimų atsitiktines paklaidas**. Netiesioginio matavimo atsitiktinei paklaidai nustatyti galime taikyti tą pačią (1.28) formulę ir atsitiktinę paklaidą išreikšti kaip dalinių atsitiktinių paklaidų sumą:

$$\xi_y = g_x \xi_x + g_z \xi_z + g_t \xi_t + \dots$$

Nustatykime šios atsitiktinės paklaidos dispersiją. Kadangi tiesiogiai matuojamų dydžių paklaidos (dalinės) gali būti priklausomos, tai reikia įvertinti jų koreliacijos koeficientus:

$$V[\xi] = E[(\xi_y)^2] = E[(g_x \xi_x + g_z \xi_z + g_t \xi_t + \dots)^2] =$$

$$\begin{aligned}
 &= E[g_x^2 \xi_x^2 + g_z^2 \xi_z^2 + g_t^2 \xi_t^2 + \dots + 2g_x g_z \xi_x \xi_z + 2g_x g_t \xi_x \xi_t + \\
 &+ 2g_z g_t \xi_z \xi_t + \dots] = g_x^2 E[\xi_x^2] + g_z^2 E[\xi_z^2] + g_t^2 E[\xi_t^2] + \dots + \\
 &+ 2g_x g_z E[\xi_x \xi_z] + 2g_x g_t E[\xi_x \xi_t] + 2g_z g_t E[\xi_z \xi_t] + \dots = \\
 &= \sum_{k=1}^N g_k^2 \sigma_k^2 + 2g_k g_j \sum_{k \neq j}^N K_{kj} = \sum_{k=1}^N g_k^2 \sigma_k^2 + 2 \sum_{k \neq j}^N g_k g_j r_{kj} \sigma_k \sigma_j.
 \end{aligned}$$

Šiose formulėse, kaip ir ankstesnėse, indeksai rodo matavimo lygties argumento eilės numerį, o sumuojant koreliacijos momentus ir koreliacijos koeficientus, įvertinamos visos galimos paklaidų poros.

Tolydžiosioms atsitiktinėms dalinėms paklaidoms koreliacijos momentai apskaičiuojami taip:

$$K_{kj} = \iint_{-\infty}^{\infty} \xi_k \xi_j f(\xi_k, \xi_j) d\xi_k d\xi_j;$$

čia $f(\xi_k, \xi_j)$ - dvimatė atsitiktinių paklaidų tikimybės tankio funkcija.

Diskrečiosioms atsitiktinėms paklaidoms koreliacijos momentas nustatomas taip:

$$K_{kj} = \sum_k \sum_j \xi_k \xi_j p_{kj};$$

čia p_{kj} – tikimybė, kad dalinių paklaidų sistema įgyja reikšmes (ξ_k, ξ_j) .

Koreliacijos koeficientai randami koreliacijos momentus padalijus iš dalinių standartinių paklaidų:

$$r_{kj} = \frac{K_{kj}}{\sigma_k \sigma_j}; \quad |r_{kj}| \leq 1.$$

Netiesioginio matavimo standartinės paklaidos vertė gaunama tokia:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{k=1}^N g_k^2 \sigma_k^2 + 2 \sum_{k < j}^N g_k g_j r_{kj} \sigma_k \sigma_j}. \quad (1.29)$$

Jeigu dalinės paklaidos nepriklausomos arba jų koreliacijos koeficientai lygūs nuliui, tai gaunama paprastesnė formulė:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{k=1}^N g_k^2 \sigma_k^2}.$$

1. Metrologijos pagrindai

Primename, kad nurodytoji netiesioginių matavimų paklaidų nustatymo metodika taikoma ir analizuojant matavimo priemonių paklaidas.

1.1.10. Sistemingųjų paklaidų sumavimas

Sistemosioms paklaidoms nagrinėti neegzistuoja gatavų algoritmų, todėl, kaip minėta anksčiau, geriau šių paklaidų išvengti, nustatant jų atsiradimo priežastis ir jas pašalinant arba išmatavus paveikiųjų fizikinių dydžių vertes ir suradus jų sudaromų papildomų sistemingųjų paklaidų dydžius, įvesti į matavimo rezultatus pataisais.

Tačiau visiškai išvengti sistemingųjų paklaidų nepavyksta. *Todėl sistemosios paklaidos dalis visuomet lieka nepašalinta.* Jos tikslus dydis ir ženklas paprastai nėra žinomas, o aiškios tik galimos ribos. Todėl, jeigu nėra kitokios informacijos, tokios paklaidos vertinamos kaip atsitiktinės paklaidos su tolygiuoju tikimybių skirstiniu.

Nagrinėjant matavimo priemonių ir matavimo metodų sistemingąsias paklaidas, kaip galutinė nepanaikintoji sistemosios paklaidos vertė imama dalinių nepanaikintųjų sistemingųjų paklaidų svertinė suma:

$$\Delta_c = \pm g_1 \Delta_{c1} \pm g_2 \Delta_{c2} \pm g_3 \Delta_{c3} \pm \dots = \pm \sum_{i=1}^N g_i \Delta_{ci}.$$

Šioje formulėje sumuojamos sistemosios paklaidos yra pateiktos ribinėmis vertėmis ir laikoma, kad jų tikimybių skirstiniai yra tolygieji. Nepašalintos sistemosios paklaidos dispersija apskaičiuojama taip:

$$\sigma_c^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{g_i \Delta_{ci}}{\sqrt{3}} \right)^2.$$

Nustatant tokios paklaidų sumos skirstinio dėsnį, tenka nagrinėti tolygiųjų skirstinių kompoziciją. Jeigu sistemingąsias paklaidas sukeliančių priežasčių yra daug, tai daug ir paklaidos dalinių dedamųjų ir tada galima teigti, kad sumos skirstinys bus normalusis. Pasirinkę tikimybę P , galime surasti nepašalintos sistemosios paklaidos intervalo ribas

$$\Delta_c = \pm t \cdot \sigma_c,$$

čia t – normaliojo skirstinio koeficientas (kvantilis), atitinkantis pasirinktą pasiklovimo tikimybę P .

1.1.11. Sistemingųjų ir atsitiktinių paklaidų parametrų tarpusavio sumavimas

Iš to, kas anksčiau išdėstyta, matyti, kad sistemingosios ir atsitiktinės paklaidos dažniausiai nagrinėjamos atskirai ir tik vėliau tenka nustatyti šių paklaidų bendrąją sumą. Pastebėsime, kad visuotinai priimto ir vienareikšmiško šio klausimo sprendimo nėra. Laikoma, kad dažniausiai reikia nustatyti suminės matavimų paklaidos ribinę vertę arba paklaidos intervalo ribas. Paklaidas galima sumuoti aritmetiškai: imant nepašalintos sistemingosios paklaidos ir atsitiktinės paklaidos intervalų ribas, nustatytas tai pačiai tikimybei P :

$$\Delta = \pm(\Delta_c + t_p \cdot \sigma),$$

kur t_p – koeficientas, pagal kurį nustatoma atsitiktinių paklaidų tikimybinių intervalo riba, gaunamas pagal paklaidų sumos pasiskirstymo dėsnį ir pasirinktą tikimybę P . Tačiau akivaizdu, kad taip gautume padidintą rezultatą, nes tikimybė, jog abi paklaidos dalys – nepanaikintoji sistemingoji ir atsitiktinė – vienu metu bus ribinės, yra labai maža.

Todėl, atliekant sumavimą, pirmiausia vadovaujamasi vadinamuoju **paneigtinų paklaidų kriterijumi**. Kaip aptarsime vėliau, praktiškai paklaidų vertės nustatomos ne didesniu kaip $\pm 10\%$ tikslumu. Sumuojant atsitiktinių ir sistemingųjų paklaidų dedamąsias dažniausiai naudojama geometrinė suma. Todėl, jeigu sumuojama paklaidos dedamoji sudaro $1/3$ likusiųjų, tai bendrą sumą tepakeičia apie 5% ir todėl gali būti atmesta. *Tai ir yra paneigtinų paklaidų kriterijus.*

Panašiai siūloma elgtis ir sumuojant atsitiktinių bei sistemingųjų paklaidų parametrus. Pirmiausia nustatoma, kuri paklaida ir kiek yra didesnė bei ar galima ją atmesti.

Jeigu $\Delta/\sigma < 0,8$, tai sistemingoji paklaida atmetama ir paklaidų intervalo riba laikoma lygi atsitiktinių paklaidų intervalo ribai:

1. Metrologijos pagrindai

$$\Delta = \pm t_p \cdot \sigma.$$

Ir atvirkščiai, jeigu $\Delta_c/\sigma > 8$, tai paneigiamos atsitiktinės paklaidos ir kaip suminė paklaida naudojama sistemingoji paklaida

$$\Delta = \pm \Delta_c.$$

Jeigu paklaidų santykis yra tarp 0,8 ir 8, tai siūloma jas sumuoti aritmetiškai, bet su pataisos koeficientu K :

$$\Delta = \pm K(\Delta_c + t_p \cdot \sigma).$$

Koeficiento K reikšmės priklauso nuo sumuojamų paklaidų santykio ir numatytos tikimybės P . Tikimybė turi būti imama tokia pati, kaip ir skaičiuojant atsitiktinių paklaidų intervalo ribas.

Tačiau koeficiento K reikšmės labai mažai priklauso nuo paklaidų dedamųjų santykio, todėl galima laikyti, kad $K=0,8$, kai $P=0,95$ ir $K=0,85$, kai $P=0,99$.

Galima paklaidas sumuoti nustatant ne sumos tikimybinių intervalo ribą, o **sumos standartinės paklaidos ekvivalentą**:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{g_i \Delta_{ci}}{\sqrt{3}} \right)^2 + \sum_{j=1}^M g_j^2 \sigma_j^2} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma^2}.$$

1.2. Matavimo rezultatų tvarkymas ir analizė

1.2.1. Tiesioginių matavimų parametrų įverčiai

Praktikoje iš matavimų rezultatų tenka nustatyti ne tik matuojamojo fizikinio dydžio vertę, bet ir visus anksčiau aptartus paklaidų parametrus. Kartais iš matavimų rezultatų tenka vertinti ir paklaidų tikimybių skirstinį. Tam atliekami **daugkartiniai** matavimai. Daugkartiniai matavimai vadinami **vienodo tikslumo**, jeigu rezultatai gaunami naudojant tas pačias matavimo priemones, esant nekintančioms matavimo sąlygoms ir matavimus atliekant tam pačiam operatoriui. Priešingu atveju matavimai yra **nevienodo tikslumo**.

Nagrinėsime vienodo tikslumo ištaisytuosius matavimų rezultatus – rezultatus be sistemingųjų paklaidų.

1. Metrologijos pagrindai

Kai atlikta n vienodo tikslumo tiesioginių matavimų yra gauta baigtinė matavimų rezultatų visuma:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n.$$

Ši rezultatų aibė priklauso galimai begalinei rezultatų visumai, būdingai atliekamiems matavimams – vadinamajai **generalinei aibei**. Matuojant gauta ribota rezultatų aibė yra n dydžio **imtis** iš generalinės aibės arba **statistinė aibė**.

Bet kokia imties funkcija vadinama statistika. Parametrai, gaunami iš konkrečios imties, vadinami įverčiais. Matavimo rezultatų tvarkymo tikslas yra rasti labiausiai artimą tikrajai matuojamo dydžio vertei A matavimo rezultatą ir įvertinti matavimų paklaidas bei matavimo rezultato neapibrėžtį. Kaip jau minėta, kartais iš rezultatų taip pat tenka spręsti ir apie paklaidų tikimybių skirstinį. Visus šiuos uždavinius sprendžia specialioji matematikos sritis – matematinė statistika.

Pradžioje tarkime, kad matavimo rezultatai yra **nepriklausomi**. Kadangi imtis yra ribota, o atskirų matavimų rezultatai turi matavimų paklaidas, tai mus dominančių tikrųjų dydžių A , σ ir kt. negalime nustatyti. Galime nustatyti tik šių dydžių statistinius įverčius ir prognozuoti, koks yra generalinės aibės paklaidų tikimybių skirstinys. Įverčiai yra taip pat atsitiktiniai dydžiai (statistiniai atsitiktiniai dydžiai), todėl juos žymėsime su indeksais n .

Dažniausiai įverčiai nustatomi pagal empirinio skirstinio momentus, t. y. atitinkamos eilės vidutinius statistinius dydžius.

Pavyzdžiui, **tikrosios matuojamojo dydžio vertės** A (t. y. galutinio matavimų rezultato) įverčiu laikomas matavimų rezultatų **aritmetinis (statistinis) vidurkis**. Kai matavimai yra vienodo tikslumo, tai aritmetinis vidurkis surandamas taip:

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Čia n – matavimų skaičius, x_i – i -tojo matavimo metu gauta matuojamojo dydžio vertė.

Kai vietoje tikrojo dydžio A naudojamas jo įvertis – aritmetinis vidurkis, tai paklaidų dispersijos įvertis turi būti pakoreguotas daugikliu $n/(n-1)$:

1. Metrologijos pagrindai

$$s_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2$$

Praktikoje dažniau tenka naudoti ne paklaidų dispersijos, o **standartinės matavimų paklaidos įvertį**, gaunamą ištraukus kvadratinę šaknį iš s_n^2 :

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}{n-1}}. \quad (1.39)$$

Tikimybių skirstinių pradinių ir centrinių aukštesnės eilės ($s > 2$) momentų įverčiai gali būti surasti taikant tokias formules:

$$m_{sn} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^s}{n} \quad \text{ir} \quad \mu_{sn} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^s}{n}.$$

1.2.2. Matavimo rezultatų tikimybių skirstinio vertinimas

Kartais paklaidų tikimybių skirstinio nustatyti nereikia, nes jis žinomas iš apriorinių tyrimų (pvz., teorinių). Tada pakanka tik tikimybių skirstinio skaitinių charakteristikų radimo. Tačiau būna atvejų, kai reikia prognozuoti ir paklaidų tikimybių skirstinį.

Nustatant paklaidų tikimybių skirstinį, tenka irgi naudoti imtį. Tokio tyrimo eiga susideda iš šių svarbiausių etapų: matavimo rezultatai grupuojami į klases ir iš sugrupuotos imties sprendžiama, koks galėtų būti hipotetinis (teorinis) tikimybių skirstinys. Toliau randami to skirstinio reikiami skaitiniai parametrai.

Tam pirmiausia nustatomas **imties plotis** – skirtumas tarp didžiausio ir mažiausio matavimų rezultatų:

$$R = x_{\max} - x_{\min}.$$

Toliau parenkamas klasių, į kurias suskaidoma imtis, skaičius L (žr. toliau) ir surandamas **klasės plotis** h :

$$h = \frac{R}{L},$$

1. Metrologijos pagrindai

kuris suapvalinamas iki reikiamo ženklų skaičiaus. Nustatomos kiekvienos **klasės ribos** ir **klasės vidurio taškas** – klasės viršutinės ribos ir apatinės ribos aritmetinis vidurkis $\bar{x}_j$. Toliau skaičiuojama, koks imties elementų skaičius m_j patenka į atitinkamą klasę ir nustatomas pataikymo į klasės santykinis dažnis (empirinė tikimybė) p_j^* :

$$p_j^* = \frac{m_j}{n},$$

o pagal ją ir klasės vidutinis empirinis tikimybės tankis $f^*(x)$:

$$f^*(x) = \frac{p_j^*}{h} = \frac{m_j}{nh}.$$

Jeigu, grupuojant imties elementas pataiko į klasės ribą, tai jis įvertinamas abiejose klasėse, priskaičiuojant, kad į jas pateko po 1/2 imties elemento.

Imties grupavimo rezultatai surašomi į lentelę (žr. 1.1 lentelę). Iš šios lentelės duomenų yra braižomas dažnių skirstinio grafikas – **histograma** (1.5 pav.), kurios abscisių ašyje atidedamos klasių ribos, o ordinačių ašyje – stačiakampiai, kurių plotas lygus klasės santykiniam dažniui, o aukštis – atitinkamos klasės vidutiniam empiriniam tikimybės tankiui. Visos histogramos stačiakampių plotas pagal tikimybės tankio normavimo sąlygą yra lygus vienetui. Iš apriorinės informacijos bei histogramos pobūdžio sprendžiama, kokį teorinį dėsni galima taikyti tiriamajam atsitiktinių paklaidų tikimybių skirstiniui.

Kai teorinis dėsnis yra pasirinktas, nustatomi jo skaitinių parametrų statistiniai įverčiai ir surandama jo tikimybės tankio funkcija $f(x)$.

Teorinės tikimybės tankio funkcijos reikšmės skaičiuojamos klasės vidurio argumento reikšmėms $\bar{x}_j$. Teorinio skaičiavimo rezultatai taip pat surašomi į lentelę, o teorinės tikimybės tankio funkcijos grafikas atvaizduojamas kartu su histograma tame pačiame grafike.

Klasių skaičius L parenkamas taip samprotaujant. Šis skaičius neturėtų būti labai didelis, nes tuomet pataikymų į klasę skaičius m_j bus nedidelis ir atsiras daug klasių, kur pataikymų skaičius bus net lygus nuliui, o dėl to histograma taps labai netolygia.

1. Metrologijos pagrindai

1.1 lentelė. Duomenys histogramos sudarymui

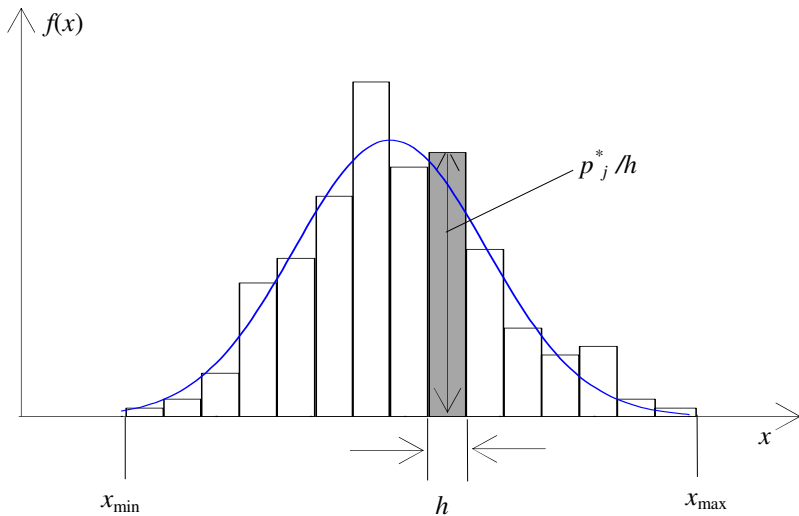
Klasės numeris j	1	2	3	j	L
Klasės ribos	$x_{\min};$ $x_{\min} + h$	$x_{\min} + h;$ $x_{\min} + 2h$	$x_{\min} + 2h;$ $x_{\min} + 3h$	$x_{\min} +$ $(j-1)h;$ $x_{\min} + jh$	$x_{\min} +$ $(L-1)h;$ $x_{\max}$
Klasės vidurkis	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$\bar{x}_3$	$\bar{x}_j$	$\bar{x}_L$
Pataikymų skaičius	m_1	m_2	m_3	m_j	m_L
Empirinė tikimybė	p_1^*	p_2^*	p_3^*	p_j^*	p_L^*
Empirinis tikimybės tankis	$f^*(x_1) =$ $= \frac{p_1^*}{h}$	$f^*(x_2) =$ $= \frac{p_2^*}{h}$	$f^*(x_3) =$ $= \frac{p_3^*}{h}$	$f^*(x_j) =$ $= \frac{p_j^*}{h}$	$f^*(x_L) =$ $= \frac{p_L^*}{h}$
Teorinis tikimybės tankis	$f(\bar{x}_1)$	$f(\bar{x}_2)$	$f(\bar{x}_3)$	$f(\bar{x}_j)$	$f(\bar{x}_L)$

Antra, klasių skaičius turi būti pakankamas, kad histograma atvaizduotų empirinės tikimybės tankio kitimą.

Suprantama, kad klasių skaičius gali būti didesnis tuo atveju, kai didesnis imties elementų skaičius n . Klasių pločiai gali būti vienodi ir nevienodi. Patogiau, kai jie yra vienodi. Paprastai laikoma, kad klasių skaičius turi būti ne mažesnis kaip 7, o didžiausias klasių skaičius nustatomas pagal n , skaičiuojant, kad vidutinis pataikymų į klasę skaičius m_j būtų ne mažesnis kaip 12–16.

1.2.3. Matavimo parametrų įverčių tikslumas

Nustatant matavimo paklaidų parametrus iš matavimų rezultatų, labai svarbu nustatyti šių parametrų įverčių tikslumą. Svarbus ir aritmetinio vidurkio, kaip daugkartinių matavimų galutinio rezultato tikslumas. Taigi tenka spręsti statistinių įverčių tikslumo nustatymo uždavinį.



1.5 pav. Pasiskirstymo histograma ir teorinė tankio funkcija

Suraskime **aritmetinio vidurkio standartinę paklaidą**, kai matavimų rezultatai yra nepriklausomi. Užrašykime jo formulę išskleistu pavidalu

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} x_1 + \frac{1}{n} x_2 + \frac{1}{n} x_3 + \dots + \frac{1}{n} x_n.$$

Tuomet, pritaikę sumos dispersijos teoremą, gauname:

$$V[\bar{x}_n] = \sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{n^2} \sigma_1^2 + \frac{1}{n^2} \sigma_2^2 + \frac{1}{n^2} \sigma_3^2 + \dots + \frac{1}{n^2} \sigma_n^2.$$

Jeigu matavimai yra vienodo tikslumo, tai

$$\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \dots = \sigma_i^2 = \dots = \sigma_n^2 = \sigma^2,$$

kur σ^2 yra generalinės aibės dispersija. Tada gauname tokį rezultatą:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma^2}{n} \quad \text{ir} \quad \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Taigi, jeigu matavimų standartinė paklaida yra žinoma ir lygi σ , tai **aritmetinio vidurkio standartinė paklaida yra $\sqrt{n}$ kartų**

1. Metrologijos pagrindai

mažesnė. Ši svarbi išvada rodo, kad daugkartiniai matavimai leidžia gauti tikslesnį rezultatą nei vienkartinio matavimo rezultatas, tačiau tam, be abejonės, reikia ir didesnių laiko sąnaudų.

Jeigu žinomas tik σ įvertis s_n , tai nustatomas tik **aritmetinio vidurkio standartinės paklaidos įvertis**

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_n}{\sqrt{n}}. \quad (1.40)$$

Tačiau toks "taškinis" aritmetinio vidurkio tikslumo vertinimas neparodo, kiek aritmetinis vidurkis skiriasi nuo tikrosios matuojamojo dydžio vertės (matematinės vilties) A .

Todėl dažniau yra taikomas statistinių įverčių tikslumo intervalinis vertinimas. Tam dažniausiai vartojama **pasikliovimo intervalo** sąvoka. Jo esmę sudaro tai, kad pasirenkama pakankamai didelė tikimybė q tiek artima vienetui, kad ją būtų galima laikyti būtino įvykio tikimybe (dažniausiai naudojama reikšmė yra 0,95, rečiau – 0,9 ir 0,99), ir surandamas ją atitinkantis tikimybinių intervalas su šia tikimybe apimantis skaičių ašyje tikrąją vertinamojo parametro vertę. Toks intervalas ir vadinamas pasikliovimo intervalu. Tikimybė q vadinama **pasikliovimo tikimybe**.

Suprantama, kad, norint nustatyti ryšį tarp pasikliovimo intervalo ir pasikliovimo tikimybės reikia žinoti įverčio skirstinio dėsnį. Jis, be abejo, priklauso ir nuo matavimo rezultatų x_i pasiskirstymo dėsnio, kurį privalu žinoti. Panagrinėkime kai kuriuos svarbius praktikai dalinius atvejus.

Kadangi dažniausiai matavimų dispersija σ nėra žinoma, jos statistinis įvertis s_n nustatomas iš tos pačios rezultatų aibės. Tada, jeigu x_i priklauso normaliajai generalinei aibei, tenka nagrinėti tokį normuotąjį atsitiktinį dydį, vertinantį aritmetinio vidurkio ir tikrojo matuojamojo dydžio skirtumą:

$$T = \frac{(\bar{x}_n - A)\sqrt{n}}{s_n}.$$

Atsitiktinis dydis T priklauso **Stjudento** ir **Fišerio** tikimybių skirstiniui (Stjudentas – anglų statistiko V. Gosset (1876–1937) slapyvardis; anglų statistikas R. Fisher (1890–1968)). Šis skirstinys nepriklauso nuo generalinės aibės parametru, o tik nuo imties dydžio n .

1. Metrologijos pagrindai

Parametras $k = n-1$ yra šio skirstinio laisvės laipsnių skaičius. Kai $n \rightarrow \infty$, Stjudento ir Fišerio skirstinys artėja prie normaliojo skirstinio.

Ieškomasis pasikliaujamas intervalas tikrajai matuojamo dydžio vertei nustatomas iš lygybės:

$$q = P(|\bar{x}_n - A| \leq \varepsilon) = P(-t_q \leq T \leq t_q) = 2 \int_0^{t_q} f(t, k) dt,$$

kur $t_q = \frac{\varepsilon \sqrt{n}}{s_n}$. Integralo reikšmės yra pateikiamos lentelėse (2 priedas). Iš jų, pasirinkus q ir k , randamas Stjudento pasiskirstymo koeficientas t_q . Tada $\varepsilon = t_q s_n / \sqrt{n}$ ir tikrosios matuojamojo dydžio vertės pasikliaujamas intervalas gaunamas toks:

$$(\bar{x}_n - \frac{t_q s_n}{\sqrt{n}}, \bar{x}_n + \frac{t_q s_n}{\sqrt{n}}).$$

Panašiai vertinamas ir matavimų atsitiktinės paklaidos dispersijos (arba matavimų atsitiktinės paklaidos standartinės vertės) įvertio tikslumas.

Kai matavimo rezultatai priklauso normaliajai generalinei aibei, vertinamas toks santykinis atsitiktinis dydis:

$$Z = \frac{(n-1)s_n^2}{\sigma^2} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}_n}{\sigma} \right)^2 = \sum_{i=1}^{n-1} t_i^2,$$

čia t_i – atsitiktiniai dydžiai, priklausantys standartiniam normaliajam tikimybių skirstiniui. Dydis Z priklauso K. Pirsono χ^2 skirstiniui su $n-1$ laisvės laipsnių (3 priedas). Tada generalinės dispersijos pasiklovimo intervalo ir jo tikimybės ryšys gaunamas toks:

$$\begin{aligned} q &= P\left(s_n^2 - \sigma^2 \mid \leq \varepsilon\right) = P\left(s_n^2 \left|1 - \frac{n-1}{Z}\right| \leq \varepsilon\right) = \\ &= P\left(\frac{n-1}{1 + \frac{\varepsilon^2}{s_n^2}} \leq Z \leq \frac{n-1}{1 - \frac{\varepsilon^2}{s_n^2}}\right) = \int_{\chi_1^2}^{\chi_2^2} f(z) dz, \end{aligned}$$

1. Metrologijos pagrindai

čia $\frac{n-1}{1+\frac{\varepsilon}{s_n^2}} = \chi_1^2$ ir $\frac{n-1}{1-\frac{\varepsilon}{s_n^2}} = \chi_2^2$, o $f(z) - \chi^2$ pasiskirstymo su $n-1$

laisvės laipsnių tikimybės tankio funkcija. Šiuo atveju gaunamos nevienodos intervalo ribų tikimybės, todėl imama

$\beta_1 = \frac{1+q}{2}$, $\beta_2 = \frac{1-q}{2}$ ir pagal jas bei $n-1$ surandami χ_1^2, χ_2^2 ir

nustatomas matavimų generalinės dispersijos pasiklivimo intervalas

$$\left(\frac{(n-1)s_n^2}{\chi_2^2} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1)s_n^2}{\chi_1^2} \right).$$

Dažniau nei dispersija mus domina matavimų standartinė paklaida. Ištraukus kvadratinę šaknį iš intervalo ribų, galima nustatyti **matavimų standartinės paklaidos pasiklivimo intervalą**

$$\left(s_n \sqrt{\frac{n-1}{\chi_2^2}} \leq \sigma \leq s_n \sqrt{\frac{n-1}{\chi_1^2}} \right).$$

Analizuojant daugkartinių vienodo tikslumo matavimų rezultatus dažnai yra pastebima, kad kai kurie imties nariai labai skiriasi nuo kitų jos narių. Kyla klausimas, ar tai ne matavimų rezultatai su grubiomis klaidomis? Jeigu taip, tai tokius rezultatus reikėtų atmesti ir nenaudoti. Tačiau vadovautis vien nuo jauts negalima, nes esant asimptotiniams tikimybių skirstiniams teoriškai gali egzistuoti rezultatai su kiek norima dideliais nuokrypiais nuo vidurkio. Taigi, labai išsiskiriančių rezultatų tyrimas ir atmetimas turi būti atliekamas taikant objektyvius kriterijus, o ne vadovaujantis nuo jauts. Visų pirma turi būti patikrinta matavimams naudojama aparatūra, matavimų sąlygos ir visa matavimų metodika. Jeigu matavimų teisingumas abejonių nekelia, tai tokie išsiskiriantys rezultatai gali būti gauti dėl grynai atsitiktinių priežasčių. Tiksliam tyrimui reikia žinoti generalinės aibės pasiskirstymo dėsnį. Kadangi dažniausiai susiduriame su matavimų rezultatų normaliuoju tikimybių skirstiniu, nagrinėsime, kaip nustatyti nenormalius rezultatus.

Jeigu matavimų skaičius yra didelis ($n > 30$), tai galima taikyti

tokį kriterijų: kai $(x_i - \bar{x}_n) \geq 3s_n$, tai toks statistinės aibės elementas x_i gali būti atmetas kaip nenormalus, t. y. kaip gautas dėl grubios matavimo klaidos, nes tokio rezultato tikimybė yra labai maža – vos 0,0027.

Atmetus abejotinus matavimų rezultatus, toliau rezultatai tvarkomi iš naujo.

1.2.4. Netiesioginių matavimų rezultatų tvarkymas

Esame nustatę ryšį tarp tiesiogiai ir netiesiogiai matuojamų dydžių bei jų paklaidų. Tačiau ten pateiktos formulės galioja tikriesiems (teoriniams) dydžiams. Nustatykime netiesiogiai matuojamo dydžio ir jo matavimo paklaidos statistinius įverčius.

Šie įverčiai gali būti nustatyti, jeigu yra atlikti daugkartiniai pradiniai matavimai ir žinomi jų rezultatų bei matavimų paklaidų įverčiai. Tarkim, jog vieno matuojamo dydžio X įvertis yra jo

aritmetinis vidurkis $\bar{x}_n$, o jo matavimų standartinės paklaidos įvertis

– s_{xn} ; kito matuojamo dydžio Z įvertis yra $\bar{z}_n$, o jo matavimo standartinės paklaidos įvertis – s_{zn} ir t.t. Be to, turi būti žinomos matavimų sistemingosios paklaidos arba jų nepanaikintųjų verčių ribos.

Netiesiogiai matuojamojo dydžio tikrosios vertės įvertis yra gaunamas, įstatant į matavimo lygtį pradinių matuojamų dydžių tikrųjų verčių įverčius, t.y. jų daugkartinių matavimų rezultatų aritmetinius vidurkius:

$$\bar{y}_n = f(\bar{x}_n, \bar{z}_n, \bar{t}_n, \dots)$$

Kad būtų galima nustatyti netiesioginio matavimo paklaidos įvertį, pirmiausia turi būti nustatyti pradinių matavimų įtakos koeficientų įverčiai:

$$g_{jn} = \left. \frac{\partial f}{\partial J} \right|_{J=\bar{j}_n}$$

Dar reikia ištirti, ar pradinių matavimų rezultatai yra priklausomi ar ne. Tam gali būti panaudota ir apriorinė informacija apie

1. Metrologijos pagrindai

matavimo eksperimentą. Jeigu pradiniai matavimai atliekami vienu metu, tai galima įtarti, kad įtakos faktoriai – temperatūra, drėgmė, atmosferos slėgis, maitinančio pramoninio tinklo įtampa ir kt.– gali juos veikti vienu metu ir sudaryti jų priklausomybę. Jeigu matavimai nėra vienalaikiai, tai toks pavojus yra mažesnis. Jeigu keli dydžiai matuojami tuo pačiu prietaisu (pavyzdžiui, ir įtampa, ir srovė yra nustatoma tuo pačiu voltmetru), tai taipogi gali sukelti šių dydžių koreliaciją. Tačiau dažniausiai matuojamų dydžių X , Z , T , ..., J tarpusavio koreliaciją tenka nustatyti iš matavimų rezultatų. Bendroju atveju šis tyrimas apima vieno iš pradinių matuojamų dydžių vidurkio priklausomybės nuo antrojo dydžio reikšmių tyrimą – vadinamosios **regresijos** (lot. *regressio* – atsitraukimas) tyrimą. Tvarkant netiesioginių matavimų rezultatus, ieškoma paprastai X ir Y , X ir Z ir kitų dydžių koreliacijos koeficientų. Patikimu koreliacijos koeficiento įverčiu imamas dydis:

$$r_{nxy} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \bar{x}_n \right) \left(y_i - \bar{y}_n \right)}{(n-1)s_{nx}s_{ny}},$$

kuris vadinamas **empiriniu koreliacijos koeficientu**.

Dėl pirminių matavimų rezultatų sklaidos, net ir nepriklausomų X ir Y dydžių empirinis koreliacijos koeficientas gali būti nelygus nuliui. Todėl, esant abejonėms, yra tikrinamas empirinio koreliacijos koeficiento **reikšmingumas** [1].

Kai empiriniai koreliacijos koeficientai surasti ir pripažinti reikšmingais, o pirminių matavimų standartinių paklaidų ir įtakos koeficientų įverčiai taip pat nustatyti, tai netiesioginio matavimo standartinė paklaida apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$s_{ny} = \sqrt{\sum_{k=1}^n g_{nk}^2 s_{nk}^2 + 2 \sum_{k \neq j} g_{nk} g_{nj} r_{nkj} s_{nk} s_{nj}}. \quad (1.41)$$

Daugkartinių netiesioginių matavimų galutinio rezultato

neapibrėžčiai įvertinti reikia, kad be $\bar{y}_n$ ir s_{ny} , būtų žinomas ir Y tikimybių skirstinys. Tarus, kad jis yra normalusis, daugkartinių netiesioginių matavimų rezultato atsitiktinė paklaida gali būti įvertinta pasiklovimo intervalu, nustatomu iš Stjudento

1. Metrologijos pagrindai

pasiskirstymo. Jeigu įvairių tiesiogiai matuojamų dydžių matavimų skaičiai n buvo nevienodi, tai laisvės laipsnių skaičius, reikalingas nustatant Stjudento pasiskirstymo koeficientą t_q , surandamas pagal mažiausią atliktų matavimų skaičių.* Atsitiktinių paklaidų sukeltas tikrosios netiesiogiai matuojamojo dydžio vertės neapibrėžties intervalas tuomet būtų toks:

$$(\bar{y}_n - \frac{t_q s_{ny}}{\sqrt{n}}, \bar{y}_n + \frac{t_q s_{ny}}{\sqrt{n}}).$$

1.2.5. Matavimo rezultatų pateikimas. Matavimo rezultato neapibrėžtis

Kaip matavimo rezultatas turi būti pateikiamas dydis, artimiausias tikrajai matuojamojo dydžio vertei. Toks dydis, kaip jau esame aptarę, yra aritmetinis vidurkis $\bar{x}_n$, jeigu buvo atliekami

daugkartiniai tiesioginiai matavimai, arba $\bar{y}_n$ – jeigu buvo atliekami daugkartiniai netiesioginiai matavimai. Jeigu buvo atliktas vienintelis matavimas, tai tuomet pateikiamas jo rezultatas X arba Y . Kartu su matavimo rezultatu privalo būti pateikta ir šio rezultato neapibrėžtis. Jos vertinimas susijęs su matavimų paklaidomis.

Kadangi vienos iš paklaidos komponentių – atsitiktinės paklaidos – standartinės vertės įverčio s_n paklaida paprastai yra apie $\pm 15\%$, tai paklaidos, jas pateikiant, apvalinamos taip, kad apvalinimo paklaida neviršytų $\pm 15\%$.

Jeigu paklaidos skaitinės vertės didžiausios skilties skaičius yra 1 ar 2, tai iš viso paliekami 2 reikšminiai skaičiai, o jeigu tai skaičius ≥ 3 , tai paliekamas vienas reikšminis skaičius. Matavimo rezultatas suapvalinamas iki tiek pat skilčių turinčio skaičiaus kaip ir paklaida.

Į paklaidą arba rezultatą įeinanti paskutinė skaičiaus skiltis apvalinama pagal bendrąsias apvalinimo taisykles, t. y. siekiama, kad šios skilties skaičiaus paklaida neviršytų 0,5. Jeigu apvalinant atmetamas pirmasis skaičius yra mažesnis už 5, tai paliekamas

* Tiksliau skaičiuojama pagal Welch-Satterthwaite formulę [2]

1. Metrologijos pagrindai

skaičius nekeičiamas. Jeigu atmetamas skaičius didesnis už 5 arba lygus 5, bet po jo einantis skaičius nelygus nuliui, tai paliekamas skaičius vienetu padidinamas. Jeigu atmetamas skaičius yra 5 ir po jo eina skaičius 0, tai paliekamas skaičius apvalinamas iki lyginio skaičiaus: lyginis nekeičiamas, o nelyginis – vienetu padidinamas.

Apvalinami tik galutiniai rezultatai, o tarpiniai rezultatai pateikiami su tokiu ženklu skaičiumi, kokį pavyksta gauti.

Pavyzdžiui, matuojant ritės induktyvumą, gautas rezultatas $L=(232,465\pm0,127)$ mH. Jis privalo būti pateiktas taip: $L=(232,46\pm0,13)$ mH. Matuojant kondensatoriaus talpą gautas rezultatas $C=(421,3345\pm0,651)$ pF. Jis turi būti pateiktas taip: $C=(421,3\pm0,7)$ pF. Šiais atvejais matavimo rezultatų paklaidos suprantamos kaip ribiniai dydžiai.

Jeigu matavimo rezultato paklaida yra įvertinta su tam tikra tikimybe P ir yra nesimetriška, tai nurodoma paklaidų pasikliovimo intervalo pradžia, pabaiga ir jo tikimybė : pvz., $\bar{x}_n; \Delta_{\bar{x}}$ nuo $\Delta_{\bar{x}1}$ iki $\Delta_{\bar{x}2}$; P .

Jeigu paklaidų pasikliovimo intervalas yra simetriškas, tai matavimo rezultatas pateikiamas, pavyzdžiui, tokiu pavidalu: $\bar{x}_n \pm \Delta_{\bar{x}}; P$. Tačiau jeigu atsitiktinių paklaidų pasiskirstymo dėsnis yra nežinomas, tai nurodomos atskiros paklaidų komponentės: $\bar{x}_n; s_{\bar{x}}; n; \Delta_c$.

Jeigu rezultato sistemingoji paklaida nustatyta kaip nepanaikintosios sistemingosios paklaidos tikimybiniu intervalo riba, tai tuomet reikia papildomai nurodyti ir jos tikimybę P : pvz., $\bar{x}_n; s_{\bar{x}}; n; \Delta_c; P$.

Paklaidų parametrai gali būti pateikiami ne tik absoliutinių paklaidų, bet ir santykinų paklaidų pavidalu.

Šiuo metu metrologijoje įteisinama vakarietiška matavimo rezultatų pateikimo tvarka, ypač svarbi pateikiant matavimo priemonių kalibravimo rezultatus .

Kadangi kalibravimo rezultatai būdavo pateikiami labai įvairiai, tai 1981 m. CIPM organizavo tyrimus, dalyvaujant suinteresuotoms organizacijoms: ISO (Tarptautinė standartizacijos organizacija), IEC (Tarptautinė elektrotechnikos komisija), BIPM, OIML (Tarptautinė teisinės metrologijos organizacija), IUPAP (Tarptautinė fizikų

1. Metrologijos pagrindai

sąjunga), IUPAC (Tarptautinė chemikų sąjunga) ir IFCC (Tarptautinė klinikistų federacija). Buvo nustatyta, kad visus kalibravimo rezultatus reikia nurodyti su jiems priskirta neapibrėžtimi ir pasiklivimo lygmeniu. Šiems dydžiams įvertinti Vakarų Europos kalibravimo bendrija (WECC) 1990 m. išleido DOC 19 "Nurodymus neapibrėžčiai įvertinti kalibruojant", o 1993 m. ISO išleido "Vadovą matavimų neapibrėžčiai išreikšti" [5].

Matavimo neapibrėžtis – su matavimo rezultatu susijęs parametras, objektyviai charakterizuojantis matuojamąjį dydį nusakančių verčių sritį.

Pasiklivimo lygmuo – matavimo rezultato su jo neapibrėžtimi bei tikrosios matuojamojo dydžio vertės atitikimo tikimybė – pasiklivimo tikimybė.

Neapibrėžtis išreiškiama:

a) **kvadratine neapibrėžtimi** u_i – matavimo rezultato vidutiniu kvadratinu nuokrypiu (t.y. standartinė matavimo rezultato paklaida):

A būdu – statistiniu įverčiu iš daugelio stebėjimų. Apskaičiuojamas daugkartinių nepriklausomų matavimų rezultatų aritmetinis vidurkis $\bar{x}_n$ ir jo standartinė paklaida $s_{\bar{x}}$ (žr. 42 psl.). Neapibrėžtis $u_i = s_{\bar{x}}$. Jeigu matavimų skaičius yra mažas, tai reikia patikslinti matavimų standartinės paklaidos įverčio s_n tikslumą.

Matavimo rezultatas ir jo neapibrėžtis nurodomi taip: $\bar{x}_n \pm u_i$;

B būdu – iš kitų informacijos šaltinių. Tokiais informacijos šaltiniais gali būti: anksčiau atliktų matavimų rezultatai; iš ankstesnės patirties žinomos medžiagų charakteristikos arba matavimo priemonių parametrai; duomenys iš gamintojo pateikiamų techninių aprašymų arba kitų dokumentų; duomenys iš kalibravimo liudijimo ir iš žinytų. Dažnai B tipo standartinę neapibrėžtį tenka skaičiuoti iš ribinės neapibrėžties. Tuomet reikia įvertinti ir vertinamojo parametro tikimybių skirstinį, ir jo tikimybines ribas koeficientą $K_{\max}$: $\sigma = \Delta_{\max} / K_{\max}$. Jeigu tikimybių skirstinys yra nežinomas, tai imamas blogiausias atvejis – tolygusis tikimybių skirstinys, kurio $K_{\max} = \sqrt{3}$ (mažiausias) ir σ vertinimas gaunamas didžiausias. Matavimo rezultatas nusakomas verte x , gaunama iš

1. Metrologijos pagrindai

atitinkamo informacijos šaltinio ir kvadratine neapibrėžtimi $u_i = \sigma$ ir $x \pm u_i$.

b) **sumine kvadratine neapibrėžtimi** $u_c(y)$ lygia matavimo rezultato suminei standartinei paklaidai s_{ny} (apskaičiuojama pagal formulę 1.41). Dalis neapibrėžties komponentų gali būti nustatyta A būdu, kita dalis – B būdu. Matavimo rezultatas ir jo neapibrėžtis: $\bar{y}_n \pm u_c(y)$;

c) **išplėstine neapibrėžtimi** U – tikrosios matuojamojo dydžio vertės aprėpties intervalu, nustatyta su pasirinktu pasiklivimo lygmeniu (tikimybe) P : $U = ku_c(y)$, čia k – pasiklivimo lygmenį atitinkantis aprėpties koeficientas. Rezultatas ir jo neapibrėžtis nurodomi taip: $\bar{y}_n \pm ku_c(y)$. Kadangi suminės neapibrėžties tikimybių skirstinys dažniausiai yra normalusis, o pasiklivimo lygmenį rekomenduojama imti 0,95 [3], tai $k = 2$.

Skaičiuojant neapibrėžtis b ir c atvejais, dar reikia įvertinti, ar neapibrėžties komponentės yra koreliuotos, ar ne.

1.3. Bendrosios žinios apie matavimo priemones.

1.3.1. Etalonai

1.3.1.1. Matavimo priemonių ir etalonų klasifikavimas

Matuojama su specialiai tam tikslui sukurtomis techninėmis priemonėmis, kurių paklaidos ir kitos su matavimo procesu susijusios savybės – **metrologinės savybės** yra normuotos. Tokios techninės priemonės vadinamos bendru **matavimo priemonių** vardu. Visos matavimo priemonės, neatsižvelgiant į jų techninį sudėtingumą, pagal joms priskirtas funkcijas skirstomos į tokias grupes: **matus, matavimo prietaisus (matuoklius), matavimo keitiklius ir pagalbines matavimo priemones**.

Matai atkuria ir (arba) išlaiko nustatytą fizikinio dydžio vertę. Dažniausiai ši vertė yra lygi arba artima to fizikinio dydžio

1. Metrologijos pagrindai

matavimo vienetui arba jo sveikosioms dalinėms, arba kartotinėms vertėms.

Matavimo prietaisai (matuokliai) reaguoja į matuojamąjį fizikinį dydį ir teikia vartotojui fizikinio dydžio vertę, išreikštą matavimo vienetais. Tam tikslui matavimo prietaisas turi rodmenų įtaisą, kuriame vartotojas perskaito skaitinę matuojamojo dydžio vertę ir matavimo vienetus.

Matavimo keitikliai matuojamąjį fizikinį dydį keičia kitos arba tos pačios rūšies, bet kitokio didumo fizikiniu dydžiu. Tačiau matavimo keitiklio teikiama matavimo informacija betarpiškai vartotojui nėra suprantama. Ją galima tik toliau keisti, perduoti informacijos perdavimo kanalais, kaupti informacijos įrašymo įrenginiuose ir kitaip apdoroti.

Pagalbinės matavimo priemonės leidžia kokybiškiau atlikti matavimus arba juos palengvina.

Sudėtingesniems matavimams iš matų, matavimo prietaisų ir pagalbinių matavimo priemonių yra sudaromi **matavimo įrenginiai** ir **matavimo sistemos**. Kompiuterius turinčios ir jais valdomos matavimo sistemos vadinamos **matavimo–informacinėmis sistemomis**.

Matai gali atkurti vieną fizikinio dydžio vertę – **vienaverčiai** matai arba kelias – **daugiaverčiai** matai. Daugiaverčiai matai gali atkurti diskrečiai keičiamas arba tolydžiai keičiamas fizikinio dydžio vertes. Daugiaverčiai diskrečių verčių matai gali būti sudaryti naudojant vienaverčių matų rinkinį.

Prie matų priskiriami ir normuotų savybių **gaminiai, medžiagos** ar **terpės**. Tai gali būti tam tikros formos kūnai, pvz., įmagnetinti feromagnetiniai elipsoidai, paviršių glotnumo pavyzdžių plytelės, normuoto sąstato cheminės medžiagos arba biologinės terpės.

Tikroji mato atkuriamą fizikinio dydžio vertę – **mato vertė** – negali būti nustatyta dėl paklaidų poveikio. Todėl matai charakterizuojami **mato pamatine** (sutartine tikrąja) **verte** – reikiamu tikslumu nustatyta jo verte. Mato pamatinės vertės nustatymo paklaida vadinama **mato atestavimo paklaida**. Matas taip pat charakterizuojamas **vardine mato verte** – dydžiu, nurodytu ant mato. Vardinė ir pamatinė mato vertės, taip pat mato atestacijos paklaida nurodoma mato norminiame dokumente, pvz., **mato atestate, mato sertifikate** ar kitame.

1. Metrologijos pagrindai

Svarbiausia mato metrologinė savybė yra jo paklaida. Pagal šį parametą matai skirstomi į **etalonus** ir **darbinius matus**.

Matuoti fizikinių dydžių vertes vien naudojant matus nėra galima dėl kelių priežasčių. Pirma, ne visuomet pakanka žmogaus jutimo savybių matui ir matuojamajam fizikiniam dydžiui palyginti. Pvz., matuojant detalės ilgį matavimo liniuote jokių papildomų matavimo priemonių nereikia. Tačiau matuojant elektros grandinės varžą, be elektrinės varžos mato, dar reikia ir elektrinių varžų palyginimo prietaiso – varžų matavimo tiltelio.

Kita vertus, ne visuomet galima ar tikslinga sukurti matą. Pvz., verdančio vandens garai yra temperatūros matas, tačiau tokio mato ir matuojamojo objekto temperatūros betarpiškas palyginimas yra praktiškai neįmanomas. Galima sukurti, pvz., 1 m² ploto matą, tačiau jo betarpiškas naudojimas bus nepatogus.

Todėl matavimų praktikoje plačiai naudojami ilgio, kampo, masės, tūrio, elektros įtampos, elektros varžos, talpos ir induktyvumo bei kt. matai. Dauguma kitų fizikinių dydžių, pvz., pagreitis, galia, slėgis, elektros srovė, elektros energija, dujų ir skysčio debitas — matuojami matavimo prietaisais.

***Etalonais** vadinamos matavimo priemonės, kurios atkuria ir (arba) išlaiko fizikinio dydžio vieneto vertę aukščiausiu tikslumu. Ši vertė iš didesnio tikslumo etalonų yra perduodama mažesnio tikslumo etalonams, o pastarieji ją perduoda darbinėms matavimo priemonėms. Taip išlaikoma matavimų sietis. Vertės perdavimo procedūra vadinama **etalonavimu**. Etalonai matavimo priemonių hierarchijoje užima aukščiausią padėtį. Todėl jie turi būti oficialiai pripažinti ir įteisinti.*

Geriausių metrologinių savybių etalonas, kurio vertė nustatoma nesiremiant kitais to paties fizikinio dydžio etalonais, vadinamas **pirminiu** etalonu. Tarptautine sutartimi pripažintas ir įteisintas pirminis etalonas vadinamas **tarptautiniu** etalonu. Valstybės turimas ir naudojamas bei oficialiai pripažintas pirminis etalonas vadinamas **valstybės** (nacionaliniu) etalonu. Pirminiai etalonai, siekiant, kad jų vertė nepasikeistų, matavimams retai naudojami. Pirminių etalonų vertės perduodamos **antriniam** etalonams. Šių etalonų paskirtis gali būti įvairi. Yra antriniai **etalonai** – **kopijos**, kurie prireikus gali pakeisti pirminį etaloną bei **palyginamieji** etalonai, naudojami kaip

1. Metrologijos pagrindai

tarpinės priemonės etalonams palyginti, jeigu pastarųjų betarpiškai palyginti negalima.

Etalonai, skirti kitų matavimo priemonių patikrai, ir ypač tiksliesiems matavimams, vadinami **darbiniais** etalonais. Geriausių metrologinių savybių darbinis etalonas, turimas tam tikroje vietovėje ar organizacijoje, vadinamas **pamatiniu** (kalibravimo, patikros) etalonu. Svarbu, kad etalonų vertės išliktų norminės. Tam tikslui būtinų techninių ir teisinių priemonių visuma vadinama **etalono išlaikymu**.

Pirminį etaloną dažniausiai sudaro matavimo priemonių kompleksas. Toks etalonas atkuria fizikinio dydžio vienetą atsižvelgiant į jo apibrėžimą.

Antriniu etalonu gali būti ne tik matavimo priemonių kompleksas, bet ir atskiras matas, matavimo prietaisas ar matavimo įrenginys, veikiantis autonomiškai.

Grupinį etaloną sudaro to paties tipo etalonų visuma. Jo vertė nustatoma kaip atskirų tos etalonų grupės verčių aritmetinis vidurkis. Taip padidinamas etalono tikslumas ir patikimumas.

Etalonų rinkinį sudaro matavimo priemonės, leidžiančios gauti įvairias etalono vertes, atitinkančias tam tikras verčių ribas.

1.3.1.2. SI pagrindinių vienetų etalonai

Tarptautiniai etalonai saugomi Tarptautiniame svorsčių ir matų biure, o valstybės etalonai – dažniausiai mokslo įstaigose ir metrologijos centruose valstybės nustatyta tvarka. Sistemingai lyginamos nacionalinių etalonų ir tarptautinių etalonų vertės. Gali būti tarpusavyje lyginamos ir atskirų valstybių etalonų vertės.

Trumpai aptarsime kaip sudaryti pagrindinių SI sistemos vienetų etalonai.

Ilgio vieneto – metro etalonas

Šiuo metu galioja XVII Generalinės konferencijos 1983 m. priimtas metro apibrėžimas (žr. 7 p.). Jis sudarė sąlygas sukurti vieningą ilgio, dažnio ir laiko etaloną. Šviesos greičiui vakuume priskirta tiksli reikšmė $c=299792458$ m/s.

Tokio etalono sukūrimas praktiškai tapo įmanomas, sukūrus stabilaus dažnio dujų lazerius. Helio, neono ir metano (He-Ne/CH_4) lazerio spinduliuojamos bangos ilgis $\lambda=3,39$ μm (infraraudonoji

1. Metrologijos pagrindai

spektro dalis), o helio, neono ir jodo (He-Ne/I_2) lazerio – $\lambda=0,63 \mu\text{m}$ (matomos šviesos spektro dalis).

Kadangi susitarta, kad cezio kvantinis laiko etalonas (žr. toliau) generuoja 9,192631770 GHz dažnį tiksliai, tai šio dažnio elektromagnetinės bangos ilgis vakuume būtų $\lambda = 299792458 / 9192631770 \text{ m} = 0,032612255 \text{ m} \approx 32,6 \text{ mm}$.

Naudojant dažnio dauginuvus, cezio etalono dažnis yra perkeliamas į optinį spektrą ir interferometru lyginamas su He-Ne/CH_4 lazerio bangos ilgiu, o pastarojo bangos ilgis – su He-Ne/I_2 lazerio bangos ilgiu. Šio lazerio bangos ilgis interferometru lyginamas su darbo etalono ilgiu. Tokio ilgio etalono santykinė paklaida yra apie $\pm 10^{-11}$.

Masės vieneto – kilogramo etalonas

Kuriant metrinę matų sistemą, **kilogramas** (kilo...+gr. *gramma* – smulkus svorio matas) buvo apibrėžtas kaip 1 dm^3 vandens masė 4°C temperatūroje. 1799 m. buvo pagamintas kilogramo prototipas iš platinos. 1889 m. I Generalinė konferencija patvirtino dabartinį kilogramo etaloną – svarstį Nr. 31 iš pagamintų 42 vienetų kilogramo prototipų.

Tarptautinio masės vieneto – kilogramo etalonas yra cilindro pavidalo svarstis, pagamintas iš 90 % platinos ir 10 % iridžio lydinio. Cilindro aukštis paimtas lygus jo diametrai, t. y. 39 mm. Etalono vertė perduodama kitiems etalonams jų masės lyginant etaloninėmis svirtinėmis svarstyklėmis. Masės etalono tikslumas nėra aukštas (vidutinė kvadratinė paklaida – apie $\pm 2 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$), be to, jis, kaip dirbtinis objektas, yra nepakartojamas ir gali būti prarastas. Siūloma masės etalono vertę susieti su nekintamomis gamtinėmis konstantomis. Šiuo metu svarstoma galimybė kilogramą susieti su Planko (vokiečių fizikas M. Planck 1858–1947) konstanta.

Dažnio ir laiko etalonas

Sekundė (lot. *secunda* – antroji (po minutės)) buvo apibrėžta 1795 m. kaip 1/86 400 Saulės vidutinės paros dalis.

Dabartinį dažnio ir laiko etaloną patvirtino XIII Generalinė konferencija 1967 m. Etalono pagrindą sudaro atominiai kvantiniai generatoriai, išnaudojantys atomuose vykstančius virpesius (kvantinius šuolius tarp energijų lygmenų). Šių virpesių dažnis pagal Boro (danų fizikas N. Borh 1885–1962) lygtį yra:

1. Metrologijos pagrindai

$f=(W_1-W_2)/h$; čia W_1, W_2 – atomo energijos lygmenys, $h \approx 6,62617655 \cdot 10^{-34}$ J·s – Planko konstanta. Kvantiniai šuoliai sukeliami veikiant atomus išoriniu elektromagnetiniu lauku, kurio dažnis rezonuoja su kvantinių šuolių dažniu. Atsižvelgiant į naudojamą darbinę medžiagą skiriami cezio, rubidžio ir vandenilio atominiai kvantiniai dažnio etalonai.

Cezio etalono santykinė paklaida yra apie $\pm 2 \cdot 10^{-12}$, o santykinis jo dažnio nestabilumas yra $\pm 10^{-11}$ eilės dydis.

Rubidžio dažnio etalonuose naudojamas rubidžio izotopas ^{87}Rb . Jo rezonansinis dažnis yra 6,834 682 608 GHz. Jis pasižymi dideliu trumpalaikiu dažnio stabilumu (apie $\pm 10^{-13}$ per 1 s). Tačiau šio etalono paklaida yra didesnė ir jos santykinė vertė siekia $\pm 10^{-10}$.

Vandenilio dažnio etalono paklaida yra tokia pati kaip cezio etalono, tačiau jo santykinis dažnio nestabilumas yra mažesnis ir yra $\pm 10^{-12}$ eilės dydis.

Siekiant padidinti patikimumą ir tikslumą, dažnio ir laiko etalonas paprastai turi kelis įvairius kvantinius etalonus. Jie skirstomi į pamatinio dažnio etalonus (dažnio reperius) ir atominius laikrodžius (laiko skaičiavimo įrenginius). Laikrodžiai veikia nuolat ir nustato laiko skalę (skaičiuoja laiką), o reperiai tik atkuria etaloninį dažnį ir gali būti įjungiami epizodiškai.

Vartotojams teikiamas vadinamasis **Koordinuotasis pasaulinis laikas (UTC)**, kurio skalė buvo patvirtinta 1972 m. sausio 1 dieną. UTC yra susietas su atominiu laiku. Kai skirtumas tarp atominio laiko ir UTC pasiekia 1 sekundę, atliekamas UTC koregavimas: pridedama arba atimama 1 s (vadinamoji šuolinė sekundė). Tikslaus laiko signalai yra perduodami per palydovus, transliuojami per įvairių dažnių ruožų radijo ir televizijos stotis, perduodami internetu, kompiuterių tinklais ir telefono linijomis.

Ilgų laiko tarpų – **kalendoriniam** (*lot. calendarium* – skolų knyga) laiko skaičiavimui be **metų** (Lietuvoje žymima m.) dar vartojami **amžius** (100 m.) ir **tūkstantmetis** (1000 m.). Šie laiko tarpai atskaitomi nuo tam tikro pradžios momento, vadinamo **era**. Dabartinė yra naujoji arba **mūsų era**.

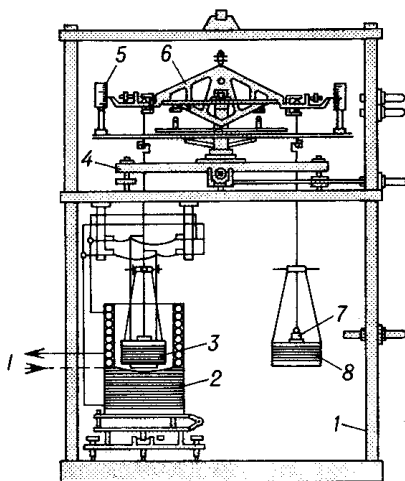
Srovės stiprio – ampero etalonas

Elektros grandinė tekančios nuolatinės srovės stipris, kaip fizikinis dydis, gali būti apibrėžtas įvairiai: kaip elektros krūvio,

1. Metrologijos pagrindai

perėjusio laidininko skerspjuviu per laiko vienetą, ir to laiko santykis; kaip srovė, išskirianti iš tam tikro elektrolito tam tikrą medžiagos kiekį; kaip srovė, sukurianti laidininke tam tikrą šilumos kiekį; kaip srovė, kurios magnetinis laukas veikia įmagnetintą kūną ar kitą laidininką tam tikra mechanine jėga; kaip srovės stipris, lygus įtampos tarp laidininko gnybtų ir laidininko varžos santykiui, ir t.t.

Kadangi laiko ir dažnio etalonas yra labai tikslus, tai iš pirmo žvilgsnio atrodo, kad, sudarant srovės stiprio etaloną, geriausia susieti srovės stiprį su elektros krūviu ir laiku. Tačiau elektros krūvio (elektros kiekio) nustatymo tikslumas yra nepakankamas. Todėl ir elektros kiekis nebuvo laikomas vienetų sistemos pagrindiniu elektriniu dydžiu.



1.6. pav. Srovės svarstyklių schema: 1 – matuojamoji srovė, 1 – korpusas, 2 – nejudamasis solenoidas, 3 – judamasis solenoidas, 4 – svarstyklių pagrindas, 5 – rodmenų skalė, 6 – svarstyklių svirtis, 7 – svarstis, 8 – atsvarinis solenoidas

pasislinkimo koordinatė.

Srovės stiprio vienetui – amperui atkurti ilgą laiką yra naudojamas įrenginys, vadinamas **srovės (ampero) svarstyklėmis**.

Šių svarstyklių konstrukcija yra panaši į tikslų analitinių svarstyklių, bet srovės svarstyklės (1.6 pav.) gaminamos iš nemagnetinių medžiagų. Judamasis vienasluoksnis solenoidas (ritė su srove) (3) yra koaksialus nejudančiam analogiškam solenoidui (2). Solenoidai sujungti nuosekliai ir per juos teka nuolatinė srovė I .

Mechaninė jėga, veikianti solenoidus, lygi:

$$F_I = \frac{dW_M}{dx};$$

čia W_M – solenoidų sistemos elektrodinaminė energija, x – solenoidų tarpusavio

Solenoidų sistemos elektrodinaminė energija yra lygi:

$$W_M = \frac{I^2}{2} (L_1 + L_2 + 2M);$$

čia L_1 ir L_2 – ričių induktyvumai, M – abipusis induktyvumas.

Solenoidui (3) judant, kinta tik abipusis induktyvumas M , todėl sąveikos jėga gaunama tokia:

$$F_I = I^2 \frac{dM}{dx}.$$

Dydis $dM/dx=k$ yra vadinamas elektrodinaminės sistemos konstanta ir yra nustatomas iš solenoidų ričių ir laidininkų geometrinių matmenų ir formos bei solenoidų aplinkos santykinės magnetinės skvarbos skaičiavimų.

Solenoidų sąveikos jėga F_I yra atsveriamas svarsčio sunkio jėga F_g :

$$F_g = mg;$$

čia m – svarsčio masė ir g – laisvojo kritimo pagreitis matavimo vietoje.

Kai svarstyklės subalansuotos, abi jėgos yra lygios ir iš šios lygybės nustatomas srovės stipris I :

$$I = \sqrt{\frac{mg}{\frac{dM}{dx}}} = \sqrt{\frac{mg}{k}}.$$

Tuo būdu srovės svarstyklėmis srovės stipris yra atkuriamas per ilgio, masės ir laiko (per g) vienetus.

Svarsčio (7) masė yra parenkama tokia, kad srovės stipris būtų lygus 1 A. Tokio srovės stiprio etalono santykinė paklaida yra apie $\pm 10^{-5}$.

Pastaruoju metu svarstoma galimybė srovės stiprį susieti su elektrono elektros kiekiu.

Termodinaminės temperatūros vieneto – kelvino etalonas

Temperatūra (lot. *tempero* – sumaišau) yra toks fizikinis dydis, kurį dažniausiai matuojame ir buityje, ir laboratorijose, ir kontroliuodami technologinius procesus. Ji apibūdina šilumos mainų tarp termodinaminės sistemos dalių pusiausvyrą.

1848 m. anglų fizikas V. Tomsonas (W. Thomson (1824–1907); nuo 1892 m. turėjo lordo **Kelvino** titulą) sukūrė temperatūros skalę, vadinamą **termodinamine temperatūros skale**. Ši temperatūros

1. Metrologijos pagrindai

skalė vadinama **absoliutine termodinamine Kelvino temperatūros skale**, o jos vienetas – **kelvinu** (K). Ji turi vieną reperiinį tašką – vandens trigubojo taško temperatūrą. X Generalinė konferencija 1954 m. nutarė, kad ši temperatūra tiksliai lygi 273,16 K ir atitinka +0,01 °C. Kelvino temperatūros skalės ryšys su Celsijaus skale yra toks:

$$\Theta \text{ K} = \vartheta \text{ }^{\circ}\text{C} + 273,15.$$

Temperatūrų skirtumas, išmatuotas Celsijaus laipsniais ir kelvinais, yra vienodas: $\Delta \vartheta \text{ }^{\circ}\text{C} = \Delta \Theta \text{ K}$, t. y. Celsijaus laipsnis yra lygus kelvinui. Dėl gero šių skalių suderinamumo, SI sistema leidžia naudoti Celsijaus temperatūros skalę greta Kelvino skalės.

Trigubojo vandens taško temperatūrai atkurti naudojamas etalonas yra raidės U pavidalo hermetinis indas, kurio viduje esantis vanduo yra pusiausvyroje tarp skystosios, kietosios ir dujinės fazių.

Trigubojo vandens taško temperatūra yra atkuriamą su maždaug $\pm 0,0001 \text{ }^{\circ}\text{C}$ paklaida.

Šviesos stiprio vieneto – kandelos etalonas

Žmogaus akis šviesos intensyvumą įvertina pagal jai tenkanti šviesos srautą. Jis suvokiamas pagal tai, kokia yra šviesos spektrinė sudėtis, nes akis nevienodai jautri įvairių bangos ilgių šviesai.

Todėl 1979 m. XVI Generalinė konferencija nustatė dabar galiojantį kandelos apibrėžimą (žr. 7 p.). Jame nustatytas ryšys tarp šaltinio šviesos srauto ir šaltinio šviesos galios lygus 683 lm/W. Monochromatinės šviesos dažnis – 540 THz atitinka regimos šviesos žalios spalvos spektro sritį (bangos ilgis – 555,016 nm), kuriai žmogaus akis yra jautriausia.

Naujajame kandelos etalone, atitinkančiame dabartinį jos apibrėžimą, šviesos šaltinio šviesos stipriui matuoti panaudota "elektroninė akis" – fotometras su žalios spalvos filtru.

Filtro spektrinė charakteristika turi maksimumą, kai bangos ilgis yra 555,016 nm. Ji atitinka akies spektrinę charakteristiką, kurią dar 1924 m. priėmė Tarptautinė apšvietimo komisija (*pranc.* CIE – *Commission Internationale de l'eclairage*) ir 1983 m. perėmė CIPM kandelos apibrėžimui papildyti.

JAV Nacionalinio standartų ir technologijų instituto (*angl.* NIST – *National Institute of Standards and Technology*) kandelos etalonas

1. Metrologijos pagrindai

yra palaikomas grupiniu etalonu, sudarytu iš 8 fotometrų. Tokio etalono teikiama kandelos neapibrėžtis (2σ) yra apie $\pm 0,4\%$.

Šviesos energinį srautą, matuojamą W , atitinka fotometrinis šviesos srautas, matuojamas lm . Per liumeną gali būti išreikšti visi kiti fotometriniai dydžiai taip, kaip per vatą – energiniai. Todėl liumenas geriau tiktų būti pagrindiniu SI vienetų sistemos fotometriniu vienetu.

1.3.1.3. Svarbiausių elektrinių ir magnetinių dydžių etalonai

Toliau trumpai aptarsime svarbiausių išvestinių elektrinių ir magnetinių dydžių etalonus.

Elektrinės įtampos etalonai

Labai tikslūs elektrinės įtampos matai yra sukurti naudojant kvantinį **Džozefsono** (anglų fizikas B. Josephson g. 1940 m.) efektą (teoriškai numatytas 1962 m.) – tunelinės srovės tekėjimą per ploną ($\approx 10^{-9}$ mm) dielektriko sluoksnį, skiriančią du superlaidininkus. Tokioje sistemoje sukuriamą nuolatinę arba aukštojo dažnio įtampą.

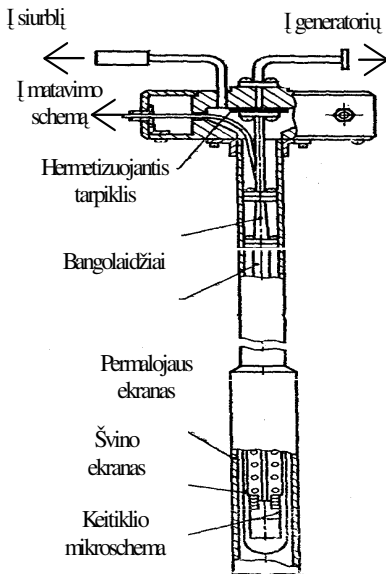
Elektromagnetinio spinduliavimo priežastis yra poromis sujungtų superlaidžios srovės elektronų – Kūperio porų tuneliavimas per dielektriką. Dielektriko elektriniame lauke Kūperio pora įgyja perteklinę energiją $2eU$ (čia e – elektrono krūvis), kurią, grįždama į pagrindinę būseną, išspinduliuoja elektromagnetinės energijos kvanto $hf_0 = 2eU$ pavidalu. Elektromagnetinio spinduliavimo dažnis – $f_0 = 2eU/h$, o santykis $f_0/U = 2e/h$ yra Džozefsono konstanta, lygi $483\,597,9\text{ GHz/V}$ su $\pm 0,4 \cdot 10^{-6}$ neapibrėžtimi (1σ).

Tuo būdu Džozefsono kontaktas gali būti naudojamas tiksliausiai matuojamam dydžiui – dažniui keisti į įtampą. Praktinis Džozefsono efekto naudojimas tapo įmanomas, kai pavyko pagaminti integrinę mikroschemą, kurioje nuosekliai sujungti tūkstančiai Džozefsono kontaktų. Tuomet įtampos pokytis siekia jau vienetus ar net dešimtis voltų. Toks keitiklis veikia skysto helio aplinkoje. Jo schema ir bendras vaizdas parodyti 1.7 paveiksle.

Etalono su Džozefsono kontaktais standartinė paklaida yra apie $\pm 5 \cdot 10^{-9}$, o nepanaikintoji sistemingoji paklaida – apie $\pm 5 \cdot 10^{-9}$.

Kaip mažesnio tikslumo įtampos etalonai yra naudojami **norminiai elementai** – specialaus cheminio sąstato galvaniniai elementai, kurių elektrovara yra gana tiksliai žinoma (apie $1,0186\text{ V}$)

1. Metrologijos pagrindai



a



b

1.7. pav. Džozefsono keitiklio “dažnis – įtampa” schema (a) ir etalono bendras vaizdas (b)

ir stabili. Pagal elektrolito koncentraciją yra skiriami prisotintieji ir neprisotintieji norminiai elementai. Prisotintieji norminiai elementai turi stabilesnę elektrovarą, o neprisotintieji – mažesnę vidinę varžą ir jų elektrovara mažiau priklauso nuo temperatūros.

Iš prisotintųjų norminių elementų stabiliausią elektrovarą turi Vestono norminis elementas. Prisotintieji norminiai elementai yra gaminami keturių tikslumo klasių: 0,0005; 0,001; 0,002 ir 0,005. Tikslumo klasė parodo, kiek procentų nuo vardinės vertės gali pasikeisti elemento elektrovara per metus.

Prisotintieji norminiai elementai yra jautrūs kratymui, jų negalima vartyti ir apkrauti didesne nei $1 \mu\text{A}$ srove.

Didelio tikslumo etalonai (pavyzdžiui, antriniai) sudaromi iš keleto termostatuotų prisotintųjų norminių elementų, t. y. sudaromas **grupinis įtampas etalonas**.

1. Metrologijos pagrindai

Neprisotintieji norminiai elementai yra ne aukštesnės kaip 0,002 tikslumo klasės ir naudojami kaip darbo etalonai nuolatinės įtampos kompensatoriuose ir potenciometruose.

Kaip elektrinės įtampos darbo etalonai plačiai naudojami ir **kompensaciniai nuolatinės įtampos stabilizatoriai**. Jų išėjimo įtampos nestabilumas gali neviršyti 0,001 %, esant temperatūrinei įtampos priklausomybei apie 0,001 %/°C ir didesnėms nei norminių elementų apkrovos srovėms.

Kintamos įtampos darbo etalonai yra stabilios ir pakankamu tikslumu žinomos kintamosios įtampos šaltiniai – voltmetrų kalibratoriai.

Elektrinės varžos etalonai

Tiksliems elektrinės varžos matams sudaryti pastaruoju metu naudojamas kvantinis **Holo** (JAV fizikas E. Hall 1855–1938) **efektas**. Yra žinoma, kad jeigu metalo, oksido ir puslaidininkio (MOP) struktūra atšaldoma iki skystojo helio temperatūros, tai tokios superlaidumo sąlygomis veikiančios struktūros (Holo kontakto) varža, kintant ją veikiančio stipraus magnetinio lauko indukcijai (6...12 T), kinta šuoliais pagal formulę:

$$R_h = nh/e^2;$$

čia h – Planko konstanta, e – elektrono krūvis.

Varžos šuolio dydis (K. Klitcingo konstanta) $h/e^2 \approx 25\,812,807\, \Omega$ žinomas su apie $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ paklaida. Todėl tokio varžos etalono nepanaikintoji sistemingoji paklaida yra $\pm 2 \cdot 10^{-7}$, o standartinė atsitiktinės paklaidos vertė neviršija $\pm 5 \cdot 10^{-8}$.

Kaip mažesnio tikslumo varžos etalonai naudojamos **varžos ritės**. Tai iš manganino vielos suvyniotos ritės, patalpintos į masyvų hermetinį korpusą (1.8a pav.). Manganinas (Cu – 80 %, Ni – 4 %, Mn – 12 %) turi mažą temperatūrinę varžos priklausomybę (apie $10^{-5}/^\circ\text{C}$), didelę savitąją varžą (apie $0,45\, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) ir mažą kontakto su variu termoelektrovarą.

Varžos ritės yra gaminamos tokių vardinių varžų:

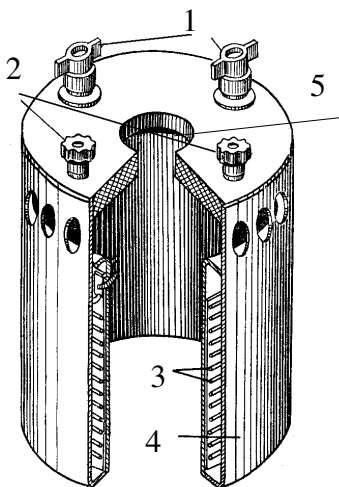
$R = 10^{\pm n}\, \Omega$, kur n – sveikasis skaičius ($-5 \leq n \leq 10$). Jų tikslumo klasės yra: 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1 ir 0,2. Varžos ričių tikslumo klasė rodo, kiek procentų jos tikroji varža gali skirtis nuo vardinės.

1. Metrologijos pagrindai

Tikslumo klasė nustato ritės pagrindinę paklaidą, kai jos darbo temperatūra yra $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir per ją teka ne didesnė už leistiną srovę. Jeigu ritės darbo temperatūra yra ne $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, tai turi būti įvertinta žinoma formule $R_{\theta} = R_{20} [1 + \alpha(\theta - 20) + \beta(\theta - 20)^2]$, kur α ir β – atestacijos metu kiekvienai ritei nustatyti temperatūriniai varžos koeficientai. Todėl tikslių matavimų metu ritės temperatūra privalo būti kontroliuojama termometru. Keturių gnybtų varžos ritėse (kai varža $\leq 1000\text{ }\Omega$) yra atskiri srovės grandinės gnybtai ir atskiri įtampos grandinės gnybtai.

Naudojant varžos rites kintamosios srovės grandinėse, tenka įvertinti jų parazitinius reaktyvumus (1.8b pav.). Todėl ritės kintamosios srovės pilnutinė varža yra tokia:

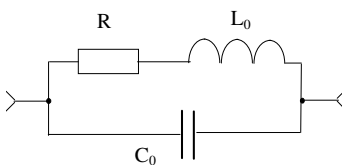
$$\dot{Z} = \frac{R + j\omega[L_0(1 - \omega^2 L_0 C_0) - R^2 C_0]}{(1 - \omega^2 L_0 C_0)^2 + \omega^2 R^2 C_0^2}.$$



a



b



c

1.8 pav. Elektrinės varžos darbo etalono konstrukcijos schema (a), bendras vaizdas (b) ir kintamosios srovės atstojamoji schema (c): 1 – srovės gnybtai, 2 – įtampos gnybtai, 3 – apvija, 4 – korpusas, 5 – skylė termometru, L_0 – parazitinis apvijos induktyvumas, C_0 – parazitinė apvijos talpa

Kadangi parazitiniai reaktyvumai yra nedideli, tai neaukštų dažnių $\omega^2 L_0 C_0 \ll 1$ ir $\omega^2 R^2 C_0^2 \ll 1$. Tada pilnutinės varžos formulė gaunama paprastesnė:

$$\dot{Z} \approx R + j\omega(L_0 - R^2 C_0) = R(1 + j\omega\tau);$$

čia $\tau = (L_0 - R^2 C_0)/R$ – varžos ritės laiko pastovioji.

Ritės pilnutinės varžos modulis ir fazės kampas tarp srovės ir įtampos gaunami tokie:

$$Z \approx R\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}, \quad \varphi \approx \arctan \omega\tau.$$

Iš pateiktų formulių išplaukia, kad varžos ričių dažninės savybės yra visiškai įvertinamos pagal jų laiko pastoviąją, kuri turėtų būti kiek galima mažesnė. Tačiau, nors ir imamasi priemonių jai sumažinti, laiko pastovioji gaunama šimtų nanosekundžių eilės dydžio. Todėl, pavyzdžiui, ritė su $\tau = 100$ ns gali būti vertinama kaip ritė be reaktyvumų, kai per ją tekančios srovės dažnis neviršija 100 kHz.

Didesnio dažnio grandinėms varžos darbo etalonai gaminami kaip nevieliniai rezistoriai. Jų trūkumas – mažesnis tikslumas ir didesnė temperatūrinė varžos priklausomybė.

Kintamosios elektrinės varžos darbo etalonai daromi kaip vientisos konstrukcijos elektrinės varžos ričių rinkiniai – **varžynai**. Jų varžos dydį galima diskretiškai keisti (dažniausiai dešimtainiu dėsniu), įjungiant vieną ar kelias į varžyną įmontuotas varžos rites. Varžynų trūkumas – mažesnis tikslumas: tikslumo klasės – nuo 0,01 iki 1,0.

Induktyvumo etalonai

Induktyvumo etalonai yra induktyvinė ir abipusio induktyvumo **ritės**. Tokių ričių induktyvumas privalo būti stabilus, o aktyvioji varža bei apvijos savoji talpa – minimalios.

Aukščiausio tikslumo induktyvumo etaloną sudaro grupė vienodų vienasluoksnių ričių, užvyniotų ant kvarcinio stiklo karkasų. Karkaso geometriniai matmenys, bei apvijos laidininko geometriniai matmenys ir padėtis ant karkaso turi būti tiksliai žinomi. Laidininko skerspjūvio geometrinė forma ir matmenys privalo būti visiškai vienodi per visą jo ilgį. Norint sumažinti apvijos talpą, ji vyniojama pastoviu žingsniu. Kad ritės geometrija mažiau priklausytų nuo

1. Metrologijos pagrindai

temperatūros, apvija guldoma į karkasę įrėžtą griovelį. Tokių ričių induktyvumas yra tik ritės laidininko geometrijos funkcija. Taip induktyvumo etalonas susiejamas su ilgio etalonu. Didesnio induktyvumo ričių matmenys gaunami dideli.

Nors ir labai preciziškai gaminamos, tokios ritės turi apie $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ santykinę induktyvumo paklaidą.

Induktyvumo darbo etalonai tai vienasluoksnės ir daugiasluoksnės ritės, užvyniotos ant plastmasinių arba porceliano ar marmuro karkasų. Varžai sumažinti ritės apvija daroma iš izoliuoto daugiagyslio varinio laidininko. Ričių induktyvumo vardinės vertės yra: 0,1 mH; 1,0 mH; 10 mH; 0,1 H; 1,0 H ir 10 H.

Abipusio induktyvumo ritės turi dvi apvijas, užvyniotas ant to paties karkaso. Jų abipusio induktyvumo vertės yra 1 mH ir 0,1 H.

Kintamojo induktyvumo ir abipusio induktyvumo matai yra **variometrai**. Jų tikslumas yra mažesnis nei pastovaus induktyvumo ričių. Todėl gaminami ir neišardomi induktyvumo ričių rinkiniai – **induktynai** (panašūs į varžynus), kurie leidžia diskretiškai keisti induktyvumo dydį.

Induktyvumo ritės turi tokią pačią atstojamąją schemą kaip ir varžos ritės. Jų rezonanso dažnis yra:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC_L} - \left(\frac{R_L}{L}\right)^2} \approx \frac{1}{\sqrt{LC_L}}.$$

Kai dažniai artimi rezonansiniam dažniui, patogiau naudoti induktyvumo matavimo ritės nuoseklią atstojamąją schemą. Sulyginę abiejų schemų pilnutines varžas, gautume ritės ekvivalentinio induktyvumo vertę:

$$L_e = \frac{L - \omega^2 L^2 C_L - R_L^2 C_L}{(1 - \omega^2 L C_L)^2 + \omega^2 R_L^2 C_L^2}.$$

Kadangi tokiems dažniams $\omega L \gg R_L$, tai ekvivalentinio induktyvumo formulė gaunama tokia:

$$L_e \approx \frac{L}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}.$$

Ritės vardinis induktyvumas yra garantuojamas su 1 % papildoma dažnine paklaida tik, kai $\omega/\omega_0 < 0,1$. Jei dažnis didesnis,

1. Metrologijos pagrindai

tai ekvivalentinis induktyvumas išauga, o esant dažniams, didesniems už rezonansinį, – tampa neigiamu (dominuoja ritės savosios talpos įtaka). Ritės rezonanso dažnis priklauso nuo jos vardinio induktyvumo ir kai ritės induktyvumas yra 10 mH, tai jos rezonanso dažnis – apie 300 kHz. Tačiau 1 H induktyvumo ritės rezonanso dažnis yra tik apie 20 kHz.

Induktyvumo darbo etalonai gaminami penkių tikslumo klasių: 0,005; 0,01; 0,02; 0,1 ir 1,0.

Taip pat gaminamos tikslios induktyvumo ritės, kurių darbo dažniai yra iki 1 MHz, o induktyvumas – nuo 0,1 μ H iki 100 mH, bet jų atestacijos ribinė paklaida yra daug didesnė – apie ± 5 %.

Elektrinės talpos etalonai

Elektrinės talpos matai yra tikslūs elektriniai **kondensatoriai**. Ilgą laiką aukščiausio tikslumo elektrinės talpos etalonų nebuvo, nes nebuvo žinoma nei vienos laidininkų konfigūracijos, kuriai būtų galima tiksliai apskaičiuoti elektrinę talpą. Tai susiję su elektrinio lauko iškraipymais ties laidininko kraštais. Todėl aukščiausio tikslumo impedanso etalonu ilgą laiką buvo naudojamas induktyvumas, nors jį pagaminti reikėjo labai tiksliai. 1957 m. buvo surasta tokia laidininkų konfigūracija, kai galima tiksliai apskaičiuoti talpą.

Naudojama laidininkų sistema yra sudaryta iš keturių lygiagrečių strypų, apgaubtų įžeminto cilindro. Tai vadinamasis **Tompsono ir Lampardo** kondensatorius. Jo talpai apibrėžti tereikia turėti vieną matmenį – strypų ilgį. Tokio kondensatoriaus 1 m ilgio talpa (apie 2 pF) gali būti nustatyta su apie $\pm 6 \cdot 10^{-7}$ santykine paklaida. Toks kondensatorius gali būti naudojamas kaip elektrinės talpos pirminis etalonas, jo talpa perduodama talpos darbo etalonams, o impedansas, esant pasirinktam srovės dažniui, – elektrinės varžos darbo etalonams. Taigi gali būti iš esmės kitaip sutvarkytas elektrinių dydžių etalonavimas: kaip išeities etalonus imant ne srovės ir induktyvumo pirminius etalonus, bet elektrinės įtampos ir elektrinės talpos pirminius etalonus. Taip būtų pasiektas didesnis etalonavimo tikslumas.

Elektrinės talpos darbo etalonai yra oriniai, žerutiniai ir stirofleksiniai kondensatoriai – vadinamieji **matavimo**

1. Metrologijos pagrindai

kondensatoriai. Matavimo kondensatoriai yra gaminami nuo 0,001 pF iki 100 μ F talpos.

Geriausias savybes turi oriniai matavimo kondensatoriai: jų talpa yra stabiliausia ir tiksliausiai žinoma (paklaida apie $\pm 0,1\%$). Tačiau jų talpa, esant priimtiniams geometriniais matmenims, tesiekia 0,01 μ F. Oriniai matavimo kondensatoriai gaminami pastovios ir kintamosios talpos (iki 1100 pF).

Žėrutinių ir stirofleksinių matavimo kondensatorių talpa yra nuo 0,01 μ F iki 1 μ F. Jų nuostoliai kiek didesni nei orinių kondensatorių, o talpos stabilumas mažesnis. Žėrutiniai kondensatoriai turi teigiamą temperatūrinį talpos koeficientą apie $(2-3) \cdot 10^{-3} \%/^{\circ}\text{C}$, o stirofleksiniai – neigiamą temperatūrinį talpos koeficientą apie $(1-2) \cdot 10^{-2} \%/^{\circ}\text{C}$. Gaminami taip pat žėrutinių ir stirofleksinių matavimo kondensatorių neišardomos konstrukcijos rinkiniai – **talpynai**. Juose kondensatoriai sujungiami lygiagrečiai. *Hewlett Packard* firmos talpynai HP 16380A ir HP 16380C leidžia atkurti 1 pF; 10 pF; 100 pF; 1000 pF (oriniai) ir 0,01 μ F; 0,1 μ F ir 1 μ F (kieto dielektriko) talpas su $\pm 0,1\%$ paklaida.

Kintamosios srovės grandinėse kondensatoriaus varža dėl nuostolių dielektrike ir kondensatoriaus išvadų bei korpuso izoliacijos varžoje neišlieka visiškai reaktyvioji. Nuostoliai įvertinami aktyviaja varža R_{cn} – nuoseklojoje nuostolių atstojamojoje schemoje ir R_{cl} – lygiagrečiojoje nuostolių atstojamojoje schemoje. Nuosekliosios schemos pilnutinė varža yra $Z_n = R_{cn} + 1/j\omega C$, o nuostolių kampo tangentas $\tan \delta = -\omega R_{cn} C$. Lygiagrečiosios nuostolių schemos pilnutinė varža yra $Z_l = R_{cl} / (1 + j\omega R_{cl} C)$, o $\tan \delta = -1/\omega R_{cl} C$.

Kai dažniai yra didesni nei 1 MHz, tenka įvertinti ir kondensatorių išvadų bei konstrukcijos induktyvumą L_c . Jeigu pagal nuosekliją nuostolių atstojamąją schemą pakeisto kondensatoriaus nuostolių varža yra maža, tai galima jo bendrąją reaktyvinę varžą išreikšti per ekvivalentinės talpos C_e varžą. Tada tariamoji talpa išreiškiama per tikrąją talpą taip:

$$C_e \approx \frac{C}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2};$$

čia ω_0 – kondensatoriaus savasis rezonansinis dažnis. Taigi matavimo kondensatorių darbo dažnis, kuriam esant jo talpą galima laikyti nepakitusia (su ± 1 % paklaida), yra $\leq 0,1 \omega_0$. Orinių matavimo kondensatorių šis dažnis yra apie 1 MHz, o žerutinių ir stirofleksinių kondensatorių – apie 10 kHz.

Magnetinių dydžių etalonai

Tikslūs magnetinio lauko **indukcijos matai** gaminami panašiai kaip ir induktyvumo matai. Tai – vienasluoksnės ritės (Helmholco ritės), užvyniotos ant kvarcinių karkasų. Jų kuriamos indukcijos dydis yra šių apvijų geometrijos ir tekančios jose srovės funkcija. Indukcijų diapazonas yra nuo 10^{-5} T iki 10^{-3} T, o indukcijos atkūrimo santykinė paklaida – apie $\pm 10^{-5}$. Aukščiausio tikslumo etalonus paprastai sudaro keletas ričių.

Daugiasluoksnės ritės, kurių konfigūracija yra labai įvairi, naudojamos stipresniems laukams atkurti (indukcija iki 0,2 T), tačiau jų santykinė paklaida yra didesnė ir siekia $\pm 10^{-4}$.

Stiprių magnetinių laukų (iki 4 T) matai paprastai būna elektromagnetai. Šiuo atveju indukcija gali būti apskaičiuota tik apytiksliai, todėl matuojama etaloniniu kvantiniu magnetinio branduolinio rezonanso teslametru.

Laukai iki 30 T kuriami galingais aušinamais solenoidais, kartais naudojant kriogeninę techniką ir superlaidumo reiškinių.

Laukai su didesne nei 30 T indukcija atkuriami tik impulsiniuose įrenginiuose. Visais atvejais, kai indukcija yra didesnė nei 0,2 T, mato atkuriamoji indukcijos vertė nustatoma etaloniniu teslametru.

Dabar naudojamų magnetinio lauko indukcijos matų (ypač aukščiausio tikslumo) trūkumas yra sąlyginai didelė jų paklaida.

Todėl bandoma sukurti magnetinės indukcijos matus naudojant kvantinius efektus.

Magnetinio srauto matą sudaro abipusio induktyvumo ritė su Helmholco rite. Atkuriamo magnetinio srauto santykinė paklaidos vertė yra apie $\pm 2 \cdot 10^{-5}$.

Srovės magnetinio momento matas yra etaloninė ritė. Toks matas atkuria magnetinį momentą ($10^{-2} - 1,5$) A·m² diapazonu, o jo atkuriamo magnetinio momento santykinė paklaidos vertė yra apie $\pm 5 \cdot 10^{-4}$. Kūnų magnetinio momento matai yra įmagnetinti

1. Metrologijos pagrindai

feromagnetiniai elipsoidai.

Magnetinio lauko stiprio matais ore gali būti tokie patys matai kaip ir magnetinio lauko indukcijos, nes šiuos du dydžius sieja gana tiksli priklausomybė: $H=B/\mu_0$.

Magnetinių medžiagų savybių matai yra įvairių etaloninių magnetinių medžiagų pavyzdžiai.

1.3.1.4. Etaloninės medžiagos ir terpės

Etalonavimo procedūrose kaip etalonai naudojamos ir etaloninės medžiagos bei terpės.

Etaloninės medžiagos arba terpės (toliau – etaloniniai pavyzdžiai) yra matas, charakterizuojantis medžiagos savybes arba terpės sudėtį. Tokie matai naudojami graduojant, tikrinant ir kalibruojant matavimo priemones, skirtas matuoti medžiagų ir terpių cheminę sudėtį, mechanines, magnetines, šilumines, optines ir kitas jų savybes. Etaloninių medžiagų pavyzdžiai taip pat naudojami kontroliuojant žaliavų ir produktų kokybę.

Etaloniniai pavyzdžiai skirstomi į grupes pagal:

- **charakteristiką**, nustatančią jų priklausomybę tam tikrai grupei, pavyzdžiui, yra etaloniniai **medžiagų savybių pavyzdžiai** ir etaloniniai **medžiagų sąstato pavyzdžiai**;
- medžiagų savybių **analizės būdą**, kurį galima atlikti su etaloniniu pavyzdžiu. Tai gali būti cheminės, spektrometrinės, rentgeno spektrometrinės, masės spektrometrinės ir kiti analizės būdai;
- **agregatinį būvį**. Tai gali būti kietosios, skystosios arba dujinės medžiagos;
- **metrologinę paskirtį**. Gali būti naudojami matavimo priemonėms graduoti, tikrinti arba produktų kokybei kontroliuoti.

Matavimams naudojami etaloniniai pavyzdžiai privalo būti sertifikuoti ir įrašyti į matavimo priemonių valstybinį registrą. Kadangi jų savybės kinta, tai jų sertifikatuose arba atestatuose turi būti nurodytas jų galiojimo laikas.

1.3.2. Matavimo keitikliai

1.3.2.1. Bendrosios savybės ir parametrai

Matavimo keitikliu vadinama matavimo priemonė, kuri determinuotu dėsniu keičia matuojamąjį dydį kitu tos pačios arba kitos rūšies fizikiniu dydžiu ir turi normuotas metrologines charakteristikas.

Keičiama tuo atveju, kai pakeistąjį dydį yra paprasčiau toliau keisti kitu matavimo keitikliu, pavaizduoti rodmenų įtaise, perduoti informacijos perdavimo kanalu arba kaupti atminties įtaisuose. Patys matavimo keitikliai neturi rodmenų įtaiso ir todėl negali veikti kaip matavimo prietaisai.

Pastaraisiais dešimtmečiais, kai pavyko labai tiksliai išmatuoti laiko intervalus, dauguma matavimo priemonių sudarytos taip, kad galutinis keitimo rezultatas būtų laiko intervalas arba dažnis. Taip yra beveik visose skaitmeninėse matavimo priemonėse.

Keičiamas fizikinis dydis x yra paduodamas į matavimo keitiklio įėjimą ir yra vadinamas keitiklio **įėjimo** dydžiu. Keitiklio išėjime gaunamas pakeistasis fizikinis dydis y vadinamas keitiklio **išėjimo** dydžiu. Šiuos dydžius siejanti determinuota funkcija

$$y = f(x)$$

yra vadinama keitiklio matavimo lygtimi arba matavimo keitiklio **keitimo charakteristika** (keitimo funkcija). Tai svarbiausia matavimo keitiklio metrologinė charakteristika.

Jeigu keitiklio išėjimo dydis yra vienas su jo įėjimo dydžiu, tai toks matavimo keitiklis vadinamas **mastelio keitikliu**. Tokie keitikliai yra, pavyzdžiui, matavimo stiprintuvai, matavimo transformatoriai, matavimo atenuatoriai ir kiti panašūs matavimo keitikliai.

Dažniausia vieno matuojamojo dydžio keitimo nepakanka, kad jis būtų pakeistas į patogiausiai atvaizduojamą rodmenų įtaise dydį. Tada tenka sudaryti matavimo keitiklių grandinę (**matavimo grandinę**), kurioje nuosekliai vyksta matuojamojo dydžio keitimas tol, kol bus gautas dydis tinkamas atvaizduoti rodmenų įtaise.

Matavimo grandinės pirmasis matavimo keitiklis, kurio įėjime veikia matuojamasis fizikinis dydis, yra vadinamas **pirminiu matavimo keitikliu**. Jeigu pirminis keitiklis yra padarytas kaip

1. Metrologijos pagrindai

savarankiška konstrukcija ir atskirtas nuo likusios matavimo priemonės dalies, tai jis vadinamas **jutikliu** (*angl. sensor*). Kiti matavimo grandinės keitikliai yra vadinami **tarpiniais keitikliais**.

Pagal keitimo operacijos pobūdį, matavimo keitiklius skirsto į **analoginius**, **analoginius-skaitmeninius** (ASK), **skaitmeninius-analoginius** (SAK) ir **skaitmeninius** (SSK). Pastarieji keitikliai keičia skaičių formatą (kodą). Kartais įėjimo analoginis dydis matavimo keitiklyje yra diskretizuojamas, bet nekoduojamas skaičiumi. Tokį matavimo keitiklį tektų vadinti **analoginiu-diskretiniu** matavimo keitikliu. Tokio keitiklio pavyzdžiu gali būti impulsų amplitudės modulatorius, kuriame pastovaus dažnio ir formos impulsų amplitudė yra keičiama pagal lėto analoginio įėjimo dydžio dėsnį. Vėliau toks virpesys gali būti efektyviai stiprinamas kintamosios įtampos stiprintuvu, t. y. efektyviai keičiamas jo mastelis. Panašūs keitikliai yra impulsų dažnio ir jų trukmės modulatoriai.

Kaip jau minėta, matavimo rezultatas visuomet turi skaitinę vertę. Todėl bet kiojoje matavimo procedūroje egzistuoja **kvantavimo** operacija – matuojamajam dydžiui suteikiama skaitinė apvalintoji artimiausia etaloninio dydžio vertė. Matuojant analogine matavimo priemone, šią operaciją atlieka žmogus kaip etaloną naudodamas padalomis sudalintą matavimo priemonės skalę ir įvertindamas jos rodmenų įtaiso rodyklės padėtį. Skaitmeninėse matavimo priemonėse ši operacija privalo būti atliekama automatiškai. Tam naudojami analoginiai-skaitmeniniai matavimo keitikliai.

Analoginiai matavimo keitikliai bei jų grandinė, kurios įėjimo ir išėjimo dydžiai yra analoginiai, gali būti **tiesiniai** ir **netiesiniai**. Dažniausiai stengiamasi sukurti tiesinius keitiklius, nes tada jo parametrai nepriklauso nuo keičiamo dydžio vertės.

Matavimo keitikliai, kurių išėjimo dydis yra reikiamu netiesiniu dėsnio pakeistas matuojamasis dydis, vadinami **funkciniais** matavimo keitikliais. Tokie yra logaritmuojantys, keliantys kvadratu, keičiantys įėjimo dydį jo harmonine funkcija ir kiti panašūs matavimo keitikliai. Funkciniais keitikliais gali būti ir SAK bei SSK.

Dėl matavimo keitiklių inercinių savybių, jų keitimo charakteristika priklauso nuo to, ar keičiamas fizikinis dydis yra pastovus ar kintantis. Jeigu keičiamas pastovus ar lėtai kintantis

1. Metrologijos pagrindai

fizikinis dydis, tai matavimo keitiklis veikia **statinio keitimo** režimu. Jo statinė keitimo charakteristika yra $y=F(x)$. Keitimo charakteristika gali būti nurodyta ne tik formule, bet ir lentele arba grafiku.

Jeigu keitimo charakteristika yra tiesinė: $y=kx$, tai dydis k vadinamas matavimo **keitiklio keitimo koeficientu**. Tokie keitikliai yra geriausi. Tačiau praktiškai keitimo charakteristika būna daugiau ar mažiau netiesinė.

Matavimo keitiklio **keitimo sritymi** vadinamas jo įėjimo dydžio x verčių ruožas nuo $x_{\min}$ iki $x_{\max}$, kuriame matavimo keitiklis keičia fizikinį dydį su leistinomis keitimo paklaidomis.

Keitiklio jautris S rodo, kaip pakinta keitiklio išėjimo dydis, siek tiek pakeitus jo įėjimo dydį:

$$S = \frac{dy}{dx} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

Kai keitimo charakteristika yra tiesi, tai keitiklio jautris S yra pastovus ir lygus keitimo koeficientui k . Jei keitiklis yra netiesinis, dydis S yra keičiamo fizikinio dydžio x vertės funkcija.

Dėl matavimo keitiklių schemų, konstrukcijų bei veikimo netobulumų, norint gauti pastebimą išėjimo dydžio pokytį, reikia įėjimo dydį pakeisti tam tikru dydžiu vadinamu matavimo keitiklio **jautriu** (išskirties) **slenksčiu**.

Dydis parodantis, kokios yra matavimo keitiklio įėjimo dydžio kitimo ribos, nesukeliant išėjimo dydžio kitimo vadinamas matavimo **keitiklio nejautrumo sritymi**.

Kai $x=0$, matavimo keitiklio išėjimo dydis gali būti nelygus nuliui ir šis dydis y_0 yra vadinamas matavimo **keitiklio nulio dreifu**.

Keitimo charakteristikos neapibrėžtumas sukelia matavimo paklaidas. Keitimo charakteristika $y=F(x)$ yra **vardinė keitimo charakteristika**.

Matavimo keitikliai projektuojami su tam tikromis norimomis keitimo charakteristikomis, kurios, kaip jau aptarta anksčiau, vadinamos vardinėmis. Konkretus keitiklis tokios charakteristikos neturi, nes jį sudarančių schemos ir konstrukcijos elementų parametrų ir charakteristikų vertės nėra vardinės. Žinomos tik jų verčių leistinosios ribos. Gauta konkreti keitimo charakteristika vadinama **faktine keitimo charakteristika**. Faktinės ir vardinės

1. Metrologijos pagrindai

keitimo charakteristikų skirtumas, kai keičiamas dydis x_v , rodo absoliutinę **keitiklio paklaidą**:

$$\Delta x = x - x_v \approx \frac{y - y_v}{F'(x)_{x=x_v}} = \frac{\Delta y}{F'(x)_{x=x_v}},$$

kur Δy – faktinės keitimo charakteristikos skirtumas nuo vardinės, kai $x=x_v$.

Faktinė keitimo charakteristika priklauso ne tik nuo faktinių keitiklio schemos ir konstrukcijos elementų charakteristikų bei parametrų, bet ir nuo tuo metu veikiančių nekontroliuojamų **paveikiųjų fizikinių dydžių** įtakos. Prie keitiklio išėjimo dydžio prisideda ir **keitiklio triukšmai**, o keitimo charakteristiką veikia įvairūs **trukdžiai**. Todėl faktinė keitimo charakteristika užima tam tikrą sritį ir keitiklio paklaida įgyja ir atsitiktinę komponentę.

Trukdžių įtaka keitimo charakteristikai mažinama naudojant keitiklių apsaugos nuo trukdžių priemones – ekranus, filtrus, stabilizatorius ir kitas. Keitimo paklaidos gaunamos ir dėl matavimo keitiklio įtakos prieš jį esančiam matavimo grandinės elementui. Tai gali būti kitas matavimo keitiklis arba (pirminio keitiklio atveju) matavimo objektas.

Matavimo keitiklių sistemingosios ir atsitiktinės paklaidos yra vertinamos ir sumuojamos taip pat kaip ir anksčiau aptartosios matavimų paklaidos.

1.3.2.2. Keitiklių dinaminių savybių aprašymas

Statinė keitimo charakteristika galioja tik tuo atveju, kai keičiamasis fizikinis dydis išlieka nekintamas arba kinta pakankamai lėtai. Priešingu atveju tenka įvertinti **keitiklio dinamines savybes**.

Matavimo keitiklių dinaminės savybės yra aprašomos ir vertinamos taip pat kaip grandinių teorijoje vertinamos dvipolių ir keturpolių dinaminės savybės.

Kai matavimo keitiklis keičia kintantį laike fizikinį dydį $x(t)$, jo išėjimo dydis $y(t)$ gaunamas taip pat kintantis laike. Taikant grandinių teorijos sąvokas, dydis $x(t)$ vadinamas **poveikiu**, o $y(t)$ – **reakcija** (atsaku).

Kadangi dažniausiai daromi tiesiniai matavimo keitikliai, tai reakcijos $y(t)$ dėsnis turėtų sutapti su poveikio $x(t)$ dėsniu. Šių dėsnių

neatitikimas ir turi būti traktuojamas kaip matavimo keitiklio **dinaminė paklaida**. Ji gali būti vertinama keitiklio laikinėmis funkcijomis.

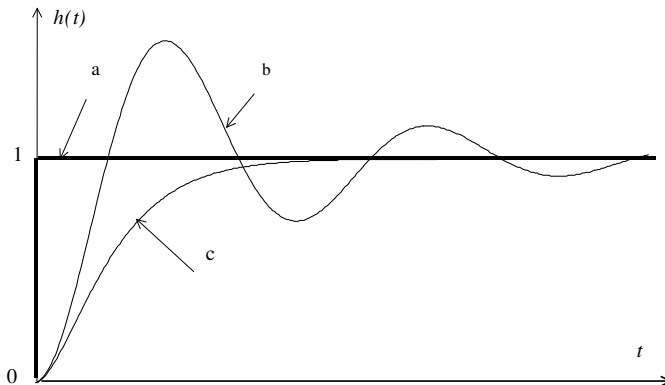
Kai matavimo keitiklio įėjimo dydis $x(t)$ staiga pasikeičia nuo 0 iki tam tikros pastoviosios vertės, kuri sąlyginai gali būti laikoma vienetine, tai keitiklio dinaminės savybės tokio pobūdžio poveikiui galima nusakyti pagal jo **reakciją į vienetinę funkciją** $x_1(t) = 1(t)$.

Dydis $h(t) = y(t)/1(t)$ yra matavimo keitiklio reakcija į vienetinę funkciją ir vadinamas matavimo keitiklio **pereinamąja charakteristika** (1.9 pav.).

Žinant matavimo keitiklio pereinamąją charakteristiką, jo reakcija $y(t)$ į poveikį $x(t)$ nustatoma sąsūkos (Diuamelio) integralu:

$$y(t) = x(0)h(t) + \int_0^t x(\tau)h(t-\tau) d\tau = x(0)h(t) + \int_0^t x(t-\tau)h(\tau) d\tau.$$

Kai reikia nustatyti matavimo keitiklio reakciją į impulso pavidalo poveikį, standartizuotu poveikiu laikomas **vienetinis impulsas** (Dirako funkcija) $\delta(t)$. Matavimo keitiklio reakcija į vienetinį impulsą vadinama matavimo **keitiklio impulsine charakteristika** $g(t)$.



1.9 pav. Matavimo keitklių pereinamosios charakteristikos: a – idealaus keitiklio, b – virpamojo pobūdžio dinaminės savybių keitiklio, c – aperiodinio pobūdžio dinaminės savybių keitiklio

1. Metrologijos pagrindai

Matavimo keitiklio pereinamoji charakteristika ir impulsinė charakteristika yra susijusios taip pat kaip ir $\delta(t)$ bei $1(t)$:

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt} \quad \text{ir} \quad h(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau.$$

Jeigu žinoma matavimo keitiklio impulsinė charakteristika, tai jo reakcija į keičiamąjį dydį $x(t)$ yra aprašoma tokiu sąsūkos integralu:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) g(t - \tau) d\tau = \int_0^t g(\tau) x(t - \tau) d\tau.$$

Kai matavimo keitiklio įėjimo dydis $x(t)$ yra periodinis, tai standartizuotu poveikiu patogu laikyti harmoninį virpesį ir matavimo keitiklio dinamines savybes nusakyti ne laikinėmis, o **dažninėmis charakteristikomis**.

Dydis $K(j\omega)$ yra matavimo keitiklio kompleksinė **dažninė perdavimo charakteristika**:

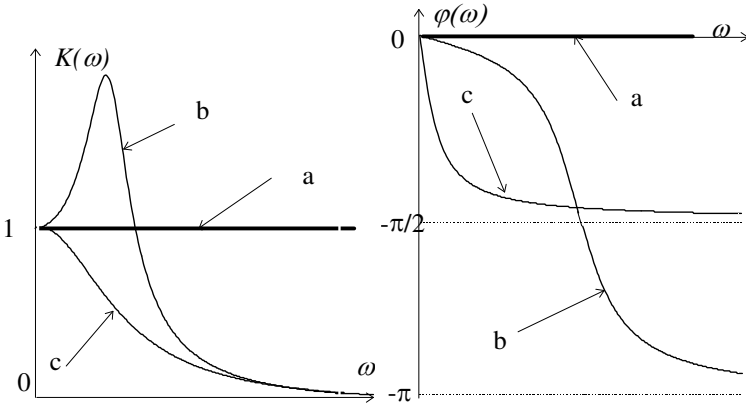
$$\begin{aligned} K(j\omega) &= A(\omega) + jB(\omega) = \\ &= \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)} e^{j \arctan \frac{B(\omega)}{A(\omega)}} = \\ &= K(\omega) e^{j\varphi(\omega)} = K(\omega) \cos \varphi(\omega) + j K(\omega) \sin \varphi(\omega). \end{aligned}$$

Kompleksinės dažninės perdavimo charakteristikos modulis $K(\omega) = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}$ vadinamas matavimo keitiklio **dažnine amplitudės charakteristika**, o jos argumentas

$\varphi(\omega) = \arctan[B(\omega)/A(\omega)]$ – matavimo keitiklio **dažnine fazės charakteristika**. Žinant keičiamojo dydžio spektrą ir matavimo keitiklio kompleksinę dažninę perdavimo charakteristiką, galima nustatyti matavimo keitiklio išėjimo dydžio spektrą $Y(j\omega)$, o iš pastarojo ir matavimo keitiklio išėjimo dydį $y(t)$:

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Y(j\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Matavimo keitiklio dažninė amplitudės charakteristika labai vaizdžiai parodo, kaip matavimo keitiklis perduoda keičiamojo dydžio amplitudžių spektrą, o dažninė fazės charakteristika – kaip pakeičiamas įėjimo dydžio fazių spektras (1.10 pav.).



1.10 pav. Matavimo keitiklių dažninė amplitudės (kairėje) ir dažninė fazės (dešinėje) charakteristikos: a – idealaus keitiklio, b – virpamojo pobūdžio dinaminių savybių keitiklio, c – aperiodinio pobūdžio dinaminių savybių keitiklio

Kartais matavimo keitiklio kompleksinė dažninė perdavimo charakteristika kompleksinėje plokštumoje yra vaizduojama kaip vektorius. Šio vektoriaus viršūnės geometrinį taškų visumą, kai dažnis ω kinta nuo 0 iki ∞ , sudaro liniją, vadinamą matavimo keitiklio kompleksinės dažinės perdavimo charakteristikos **hodografu**. Jis akivaizdžiai parodo, kaip matavimo keitiklis keičia harmoninio įėjimo dydžio modulį ir jo fazę, kintant šio dydžio dažniui (1.11 pav.).

Didžiausias matavimo keitiklio dinaminių savybių nusakymo jo dažninėmis charakteristikomis ir pereinamosiomis charakteristikomis privalumas yra tas, kad jas nesunku nustatyti eksperimentiškai.

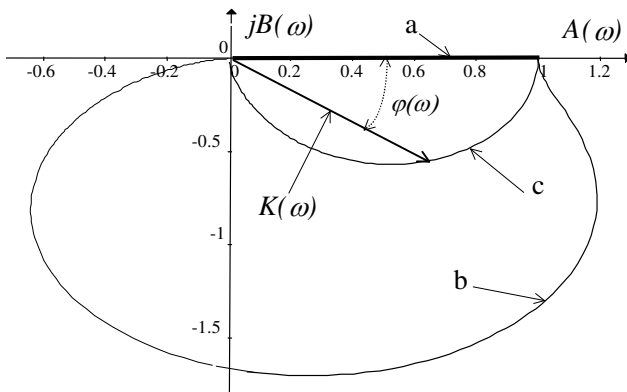
Egzistuoja žinomas ryšys tarp kompleksinės dažinės perdavimo charakteristikos ir impulsinės bei pereinamosios charakteristikų. Jos susietos žinomomis Furjė transformacijomis:

$$K(j\omega) = \int_0^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt = j\omega \int_0^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt,$$

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

1. Metrologijos pagrindai

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{K(j\omega)}{j\omega} e^{j\omega t} d\omega.$$



1.11 pav. Matavimo keitiklių kompleksinės dažninės perdavimo charakteristikos hodograai: a – idealaus keitiklio, b – virpamojo pobūdžio dinaminių savybių keitiklio, c – aperiodinio pobūdžio dinaminių savybių keitiklio

Matavimo keitiklių dinaminių savybių aprašymas pereinamąja charakteristika, impulsine charakteristika, dažnine perdavimo charakteristika yra vadinamas **pilnuoju dinaminių savybių aprašymu**. Toks dinaminių savybių aprašymo būdas yra naudojamas palyginti retai, nes realiems matavimo keitikliams keitimo lygtys gali būti užrašytos tik labai apytiksliai, taikant idealizuotų matavimo keitiklių keitimo lygtis.

Dažniau matavimo keitikliams nurodomos ne visos jų dinaminės savybės, o tik tam tikri jas nusakantys parametrai. Pavyzdžiui, jeigu matavimo keitiklis priskirtinas aperiodinių dinaminių savybių matavimo keitiklių kategorijai, tai per laiką, lygų τ_0 , jo pereinamoji charakteristika pasiekia lygį $k(1-e^{-1}) \approx 0,632k$. Šis laikas yra vadinamas **matavimo keitiklio reakcijos laiku**. Kartais nurodomas laikas, per kurį pereinamoji charakteristika pasiekia 90 % arba 95 % savo stacionarios vertės dalių. Šis laikas vadinamas matavimo keitiklio **pereinamosios charakteristikos užaugimo iki 90 % (arba 95 %) laiku**.

Matavimo keitikliams galima nurodyti ir **leistinąjį dažninės amplitudės charakteristikos** (arba (ir) dažninės fazės charakteristikos) **netolygumą** ir taip normuoti jo dinamines savybes.

Analogiškai matavimų paklaidoms, galima nagrinėti, pavyzdžiui,

1. Metrologijos pagrindai

matavimo keitiklio **standartinę dinaminę paklaidą**, ją apibrėžiant kaip dinaminės paklaidos vidutinę kvadratinę vertę, nustatomą per pakankamai ilgą laiką:

$$\sigma_d = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [y(t) - kx(t)]^2 dt}.$$

1.3.3. Matavimo prietaisai

Matavimo prietaisai (matuokliai) sąveikauja su matuojamuoju dydžiu ir teikia jo vertę, išreikštą matavimo vienetais. Ši vertė yra atskaitoma matavimo prietaiso **rodmenų įtaise**.

Dauguma matavimo prietaisų, kaip ir sudėtingesni matai, yra sudaryti iš matavimo keitiklių visumos – **matavimo grandinės**, keičiančios matuojamąjį dydį iki tokio fizikinio dydžio, kurį patogiausia tiksliai atvaizduoti prietaiso rodmenų įtaise. Visuose rodmenų įtaisuose vartotojas perskaito matuojamojo dydžio skaitinę vertę ir matavimo vienetus. Taigi matuojamasis dydis matavimo prietaise po aibės keitimų yra pakeičiamas į skaičių – matuojamojo dydžio skaitinę vertę.

Nemaža dalis matavimo prietaisų turi tokius rodmenų įtaisus, kuriuose tam tikro verčių intervalo rodmuo yra tolydžioji matuojamojo dydžio verčių funkcija. Tokiuose prietaisuose, vadinamuose **analoginiais**, konkretų skaičių perskaito, t. y. skaitinę vertę nustato pats vartotojas.

Jeigu matavimo prietaiso rodmenų įtaisas skaičių pavidalu rodo matuojamojo dydžio skaitinę vertę, tai toks prietaisas vadinamas **skaitmeniniu** prietaisu.

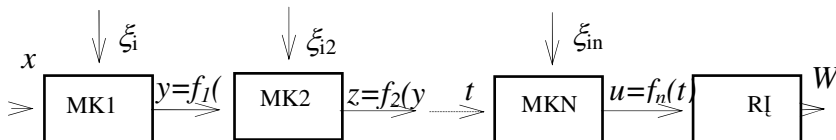
Nepriklausomai nuo rodmenų įtaiso rūšies, prietaiso matavimo grandinės matavimo keitikliai gali būti įvairūs: analoginiai ir diskretiniai.

Kai kurie matavimo prietaisai, be rodmenų įtaisų, turi ir matavimo rezultatų registravimo įtaisus: pateikiančius rodmenis grafikų (dažniausiai laiko funkcijų) pavidalu arba spausdinantys matavimų rezultatus skaitmenų masyvų pavidalu.

Pagal matavimo keitiklių išdėstymą prietaiso matavimo grandinėje prietaisai skirstomi į **tiesioginio veikimo** ir **palyginimo** prietaisus.

1. Metrologijos pagrindai

Tiesioginio veikimo prietaisuose (1.12 pav.) matuojamasis dydis x yra paeiliui keičiamas matavimo keitikliais MK iki dydžio u ir rodmenų įtaise RĮ gaunama jo vertė W , išreikšta skaitine verte N ir matavimo vienetu V : $W = NV$.



1.12 pav. Tiesioginio veikimo matavimo prietaiso struktūrinė schema: MK – matavimo keitiklis, RĮ – rodmenų įtaisas, x – matuojamasis dydis, W – matavimo rezultatas, ξ_i – paveikieji dydžiai

Tiesioginio veikimo matavimo prietaise nėra mato, vienaarūšio su matuojamuoju dydžiu x . Matas yra kitos rūšies fizikinis dydis. Jis rodmenų įtaise lyginamas su pakeistuoju iki tokios pačios rūšies matuojamuoju dydžiu. Pavyzdžiui, gyvsidabrio termometre yra lyginamas gyvsidabrio stulpelio ilgis su skalės ilgiu, analoginiuose prietaisuose su brūkšninėmis skalėmis rodmenų įtaiso rodyklės padėtis lyginama su skalės žymėmis. Skaitmeniniuose matavimo prietaisuose gali būti palyginami laiko intervalai.

Tokio matavimo prietaiso **keitimo charakteristiką** (matavimo lygtį) sudaro matavimo grandinės keitiklių keitimo charakteristikų visuma:

$$W = f_n(t) = f_n \left\langle \dots f_{n-1} \left\{ f_2 \left[f_1(x) \right] \right\} \right\rangle = f(x).$$

Jeigu matavimo keitikliai vienas kito neveikia ir juose nėra grįžtamojo ryšio, tai prietaiso jautris S yra lygus:

$$S = \frac{dW}{dx} = \frac{dW}{du} \dots \frac{du}{di} \dots \frac{di}{dz} \cdot \frac{dz}{dy} \cdot \frac{dy}{dx} = S_n \dots S_i \dots S_2 \cdot S_1.$$

Jeigu visi matuoklio keitikliai yra tiesiniai proporciniai keitikliai, tai jo keitimo koeficiento formulė gaunama analogiška jautrio formulei:

$$k = k_n \dots k_i \dots k_2 \cdot k_1.$$

Tokio matavimo prietaiso jautris ir keitimo koeficientas gali būti didelis. Tai svarbiausias šių prietaisų privalumas. Įvedus mastelio

1. Metrologijos pagrindai

keitiklius, gali būti gaunama didelė matuojamų dydžių verčių sritis – nuo sąlyginai mažų iki didelių verčių.

Tačiau tokio matavimo prietaiso pagrindinė ir papildomos paklaidos irgi gaunamos didelės, nes matavimo keitiklių paklaidos sumuojasi, o paveikieji dydžiai ξ_i veikia visų keitiklių keitimo charakteristikas ir destabilizuoja prietaiso keitimo charakteristiką.

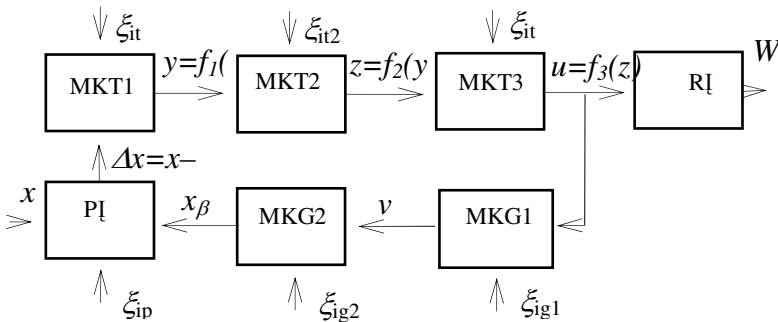
Dauguma matavimo prietaisų yra tiesioginio veikimo (voltmetrai, ampermetrai, vatmetrai, tachometrai, manometrai ir kt.) Tai ypač svarbu tais atvejais, kai sunku ar net neįmanoma realizuoti matuojamajam dydžiui vienerūšį matą.

Palyginimo prietaisuose matuojamasis dydis x yra keičiamas tiesiogiai iki dydžio u , o grįžtamojo keitimo keitikliai jį pakeičia iki dydžio x_β vienerūšio su x ir abu šie dydžiai yra lyginami palyginimo įtaise PĮ (1.13 pav.) Lyginama pagal įvairius kriterijus, atsižvelgiant į lyginimo būdą.

Pažymėję tiesioginio keitimo grandinės jautrį S_t , o grįžtamojo keitimo grandinės jautrį S_g , gautume:

$$S = \frac{du}{dx} = \frac{S_t(dx - dx_\beta)}{dx} = S_t(1 - SS_\beta), \quad \text{arba}$$

$$S = \frac{S_t}{1 + S_t S_\beta}.$$



1.13 pav. Palyginimo prietaiso struktūrinė schema: MKT – tiesioginio keitimo matavimo keitikliai, MKG – grįžtamojo keitimo matavimo keitikliai, PĮ – palyginimo įtaisas, RĮ – rodmenų įtaisas

1. Metrologijos pagrindai

Kaip matyti iš jautrio formulės, tokio matavimo prietaiso jautris yra mažesnis už jo tiesioginio keitimo prietaiso jautrį. Dažnai palyginimo prietaisuose naudojamas lyginimo būdo skirtuminis nulinis variantas, kai $\Delta x \rightarrow 0$, tada $S_t S_\beta \gg 1$ ir $S \approx 1 / S_\beta$.

Šiuo atveju matavimo prietaiso jautris nepriklauso nuo tiesioginio keitimo grandinės jautrio, taigi ir nuo jų keitimo charakteristikų ir jų nestabilumo bei keitimo paklaidų, o priklauso tik nuo grįžtamojo keitimo grandinės savybių. Todėl pastarojoje reikia vengti didelio keitiklių skaičiaus ir naudoti keitiklius su stabilium jautriu, t. y. tokius, kuriuos mažiau veikia įvairūs paveikieji dydžiai. Tada palyginimo prietaisai yra tikslesni.

Grįžtamojo keitimo grandinėje naudojant mastelio keitiklius, galima palyginti matuojamąjį ir grįžtamąjį dydžius plačiu jų verčių intervalu, t. y., gauti didelę prietaiso matavimo sritį. Tačiau tokie prietaisai yra sudėtingesni ir brangesni. Be to, kaip minėta, ne visuomet galima atlikti grįžtamąjį keitimą iki dydžio, vienarūšio su matuojamuoju, arba iki reikiamos jo vertės.

Iš palyginimo prietaisų pažymėtini: įvairūs tilteliai, heterodininiai dažniamačiai, komparatoriai, interferometrai ir kiti.

1.3.4. Matavimo priemonių tikslumo klasės

Tikslumo klase vadinama apibendrinta matavimo priemonės tikslumo kiekybinė charakteristika, teikianti informaciją apie tos matavimo priemonės pagrindinės paklaidos ribines vertes.

Tikslumo klasė nenustatoma toms matavimo priemonėms, kurių sistemingoji ir atsitiktinė paklaidos yra nurodomos atskirai. Taip pat tikslumo klasė nenustatoma tokioms matavimo priemonėms, kurių dinaminė paklaida yra dominuojanti.

Matavimo priemonėms, kuriomis matuojama keletas fizikinių dydžių, tikslumo klasės nustatomos kiekvienam matuojamajam dydžiui atskirai. Taip pat elgiamasi ir kai matavimo priemonė turi kelias matavimo ribas – kiekvienai jų nustatoma atskira tikslumo klasė.

Tikslumo klasė nurodoma matavimo priemonės atestate arba kitame jos dokumente ir (arba) žymima ant pačios matavimo priemonės.

1. Metrologijos pagrindai

Kaip matyti iš apibrėžimo, tikslumo klasei nustatyti reikia žinoti matavimo priemonės pagrindinės paklaidos ribas. Tikslumo klasės nustatymo būdas priklauso nuo pagrindinės paklaidos pobūdžio.

1. Jeigu matavimo priemonės pagrindinės paklaidos absoliutinė ribinė vertė yra pastovi: $\Delta X = a$, tai tikslumo klasė nustatoma pagal santykinės redukuotosios paklaidos dydį:

$$\chi = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100 = \frac{a}{X_N} \cdot 100 = p, \%;$$

čia X_N – normuojantis dydis, išreikštas tais pačiais vienetais kaip ir paklaida; p – sąlygiškas teigiamas skaičius, renkamas iš tokios prioritetinių skaičių sekos: $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $2,0 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$ ($n = 1; 0; -1; -2; -3$; ir t.t.). Apvalinant rezultatą imamas artimiausias didesnis skaičius.

Matavimo priemonėms su tolygia skale ir jos pradžioje esančia nulinio žyme, normuojantis dydis X_N imamas lygus skalės ribai išreikštai matavimo vienetais. Jeigu skalė yra abipusė, tai kaip normuojantis dydis imama abiejų ribų modulių suma. Matavimo priemonėms su sąlyginiu nuliu imamas viršutinės ir apatinės ribų aritmetinis vidurkis (pavyzdžiui, dažniamačiui, kai ribos – 45 Hz ir 55 Hz, $X_N = 50$ Hz; termometrui, kai ribos 50 °C ir 150 °C, $X_N = 100$ °C). Visais tokiais atvejais klasė žymima nurodant skaičių p (pavyzdžiui, 1,5; 4,0; ir t.t.).

Jeigu skalė yra labai netolygi, tai normuojantis dydis X_N imamas lygus skalės ilgiui. Tada tikslumo klasė žymima taip: p (pavyzdžiui, 1,0).

2. Jeigu absoliutinės pagrindinės paklaidos riba yra priklausoma nuo matuojamojo dydžio $\Delta X = bx$, tai tikslumo klasė nustatoma ją normuojant santykinge ribine pagrindinės paklaidos verte:

$$\delta = \frac{\Delta X}{x} \cdot 100 = \frac{bx}{x} \cdot 100 = b \cdot 100 = q, \%;$$

Sąlyginis skaičius q imamas iš anksčiau nurodytos prioritetinių skaičių sekos, apvalinant iki artimiausio didesnio skaičiaus. Šiuo atveju tikslumo klasė pažymima taip: (q) , pavyzdžiui, $(1,5)$

1. Metrologijos pagrindai

3. Jeigu pagrindinės paklaidos pobūdis yra mišrus:

$$\Delta X = a + bx,$$

tai tikslumo klasė yra normuojama dviem skaičiais, nustatomais iš santykinės paklaidos taip:

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{\Delta X}{x} \cdot 100 = \frac{a + bx}{x} \cdot 100 = \left(\frac{a}{x} + b + \frac{a}{X_N} - \frac{a}{X_N} \right) \cdot 100 = \\ &= \left(b + \frac{a}{X_N} \right) \cdot 100 + \frac{a}{X_N} \left(\left| \frac{X_N}{x} \right| - 1 \right) \cdot 100 = (q + p) + q \left(\left| \frac{X_N}{x} \right| - 1 \right) = \\ &= k + q \left(\left| \frac{X_N}{x} \right| - 1 \right).\end{aligned}$$

Skaičiai k ir q parenkami taip pat iš anksčiau minėtosios prioritetinių skaičių sekos ir apvalinami iki didesnio artimiausio skaičiaus. Nurodant tikslumo klasę, pateikiami abu skaičiai, užrašant juos per įstrižą dalybos brūkšnį – pirmiau didesnį skaičių k , o paskui mažesnį – q : k/q (pavyzdžiui, 1,0/0,5; 0,01/0,005).

1.4. Teisinės metrologijos pagrindai

1.4.1. Tarptautinės ir nacionalinės metrologijos įstaigos

Pagrindinis teisinės metrologijos uždavinys yra matavimų sisties (vienovės) užtikrinimas. Reikia, kad matavimų rezultatai būtų artimi, neatsižvelgiant į tai, kur ir kieno jie atlikti: išreikšti vienodais vienetais ir su artimomis neapibrėžtimis. Ta linkme yra nukreiptos įvairių krypčių specialistų pastangos: metrologų, matavimų priemonių gamintojų bei jų vartotojų. Matavimų sistį paprastai užtikrina tarptautiniai ir nacionaliniai teisės aktai ir prižiūri tarptautinės bei nacionalinės vyriausybės ir nevyriausybės įstaigos ir organizacijos.

Jau minėta, kad 1875 m. 17 valstybių pasirašė Metro konvenciją – vieną pirmųjų tarptautinės teisinės metrologijos aktų.

1. Metrologijos pagrindai

1955 m. buvo pasirašytas tarpvyriausybiniis susitarimas ir įsteigta Tarptautinė teisinės metrologijos organizacija **OIML** (*pranc. Organisation Internationale de Métrologie Légale, angl. International Organization of Legal Metrology*). Jos darbe (2007 m. duomenimis) dalyvauja 114 pasaulio valstybių (Lietuva yra šios organizacijos narė-stebėtoja). OIML kuria bendruosius teisinės metrologijos aktus, leidžiančius suderinti nacionalinius teisinės metrologijos dokumentus: rekomendacijas matavimo priemonių tikslumo klasėms nustatyti, apibrėžiant matavimo priemonių tipus, pavyzdžius ir sistemų nomenklatūrą; rekomendacijas matavimo priemonių tyrimo metodikoms sudaryti, siekiant jų metrologinių charakteristikų vienodumo, neatsižvelgiant į gamybos vietą; matavimų priemonių etalonavimo metodikas ir kitas.

OIML palaiko ryšius su tokiomis žinomomis Tarptautinėmis ir regioninėmis organizacijomis: Tarptautine standartizacijos organizacija – **ISO** (*angl. International Organization for Standardization*), Tarptautine elektrotechnikos komisija – **IEC** (*angl. International Electrotechnical Commission*), Tarptautine laboratorijų akreditavimo organizacija – **ILAC** (*angl. International Laboratory Accreditation Cooperation*), Tarptautiniu svarsčių ir matų biuru – BIPM ir kitomis.

Nuo 1991 m. OIML išduoda ir tvirtina nacionalinius matavimo priemonių sertifikatus, tuo patvirtindama, kaip jie atitinka tarptautines rekomendacijas.

Tarptautinių metrologijos organizacijų reikšmė yra labai didelė, nes visi matavimo priemonių bandymo, sertifikavimo ir akreditavimo darbai atliekami dažniausiai nacionalinėse teisinės metrologijos įstaigose ir jų tarpusavio bei tarptautinis pripažinimas yra labai svarbus.

Nacionaliniai teisinės metrologijos aktai, be tarptautinių rekomendacijų, yra grindžiami valstybių teisės aktais – atitinkamais Konstitucijų straipsniais ir įstatymais.

Metrologijos teisinio reguliavimo svarbą rodo ir tai, kad daugelyje valstybių, ypač išsivysčiusiose šalyse, matavimų teorijos ir taikymo klausimus sprendžia **valstybiniai metrologijos institutai ir laboratorijos**. Pavyzdžiui, JAV šią veiklą plėtoja ir koordinuoja jau minėtasis Nacionalinis standartų institutas NIST, Anglijoje metrologijos tyrimų darbams vadovauja Nacionalinė fizikos

1. Metrologijos pagrindai

laboratorija (NPL) ; Vokietijoje – Fizikos ir technikos institutas (PTB).

1.4.2.Lietuvos Respublikos metrologinės įstaigos

Atkūrus Lietuvos Respublikos nepriklausomybę, 1990 m. spalio 22 d. Vyriausybės nutarimu Nr.316 buvo įkurtas ***Standartizacijos ir kokybės departamentas*** prie Lietuvos Respublikos Vyriausybės ir patvirtinti jo nuostatai. Šiais nuostatais departamentui buvo pavesta įgyvendinti Lietuvos Respublikos Vyriausybės politiką standartizacijos, metrologijos ir kokybės valdymo srityse.

Taigi šiuo teisės aktu Lietuvos Respublika nustatė savo jurisdikciją metrologijos klausimais. Tačiau tai buvo tik laikinas šio teisinio klausimo sprendimas. 1995 m. buvo pradėtas rengti **Lietuvos Respublikos metrologijos įstatymas**. Galutinai jis buvo parengtas ir priimtas 1996 m. liepos 9 d. (2006 m. birželio 22 d. priimtas įstatymas pateikiantis naują metrologijos įstatymo redakciją).

Įstatymas nustatė, kad Lietuvos Respublikoje naudojami Tarptautinės vienetų sistemos (SI) vienetai ir jų išvestiniai, kartotiniai bei daliniai dydžiai, taip pat leidžiama naudoti nesisteminius, susijusius su Tarptautine vienetų sistema (SI) vienetus, kuriuos įteisina Lietuvos Respublikos Vyriausybė. Matavimo vienetai atkuriami naudojant etalonus ir perduodant kitoms matavimo priemonėms pagal patikros schemas. Valstybės etalonai kuriami arba išigyjami atsižvelgiant į Lietuvos Respublikos poreikius ir technines galimybes. Valstybės etalonai periodiškai lyginami su kitų valstybių etalonais. Valstybės etalonų sąrašą, jų tvirtinimo, saugojimo ir naudojimo tvarką nustato Lietuvos Respublikos Vyriausybė.

Įstatyme numatyta, kad matavimo priemonės, naudojamos dydžiams ir jų santykiams nustatyti, matavimų rezultatus turi rodyti įteisintais matavimo vienetais. Pagamintos, pataisytos, naudojamos matavimo priemonės turi atitikti jų tipams nustatytus reikalavimus.

Yra nustatyta tokia Lietuvos Respublikos metrologijos sistemos organizacinė struktūra:

1) **Lietuvos metrologijos** taryba – prie Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgalios institucijos veikianti patariamoji organizacija

1. Metrologijos pagrindai

metrologijos klausimais. Tarybos sudėtį ir nuostatus tvirtina Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgaliota institucija;

2) **Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgaliota institucija** – institucija, įgaliota įgyvendinti metrologijos politiką Lietuvoje, koordinuoti matavimų vienovę, organizuoti ir vykdyti mokslinę, teisinę ir administracinę veiklą metrologijos klausimais;

3) **valstybės laboratorijos** – pamatinės laboratorijos, Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgalios išlaikyti valstybės etalonus, atlikti sulyginimus ir kalibravimus;

4) **akredituotosios laboratorijos** – laboratorijos, nustatyta tvarka Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgalios institucijos, įteisintos atlikti darbinių matavimo priemonių patikrą ar kalibravimą;

5) **Lietuvos metrologijos inspekcija** – Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgalios institucijos padalinys, kuris atlieka valstybinę matavimo priemonių būklės ir naudojimo kontrolę.

Įstatymas aiškiai apibrėžė tas metrologinės veiklos sritis, kurioms taikoma valstybės kontrolė. Tai gali būti suinteresuotų žinybų siūlymu ypatingiems matavimų būdams ir ekspertizėms taikoma valstybinė metrologinė kontrolė. Šių matavimų būdus, matavimų atlikimo taisykles nustato Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgaliota institucija. Valstybė taip pat kontroliuoja fasuotų (įpakuotų) ir tam tikrais kiekiais parduodamų prekių kiekį. Nustatyta, kad kai parduodamas tam tikras sveriamų, skaičiuojamų, dozuojamų prekių kiekis arba kai parduoti pateikiamos prekės, kurių kiekis nurodytas etiketėse arba ant jų taros (pakuotės), šiems prekių kiekiams taikoma valstybinė metrologinė kontrolė.

Įstatymas numato, kad valstybinė metrologinė matavimo priemonių kontrolė taikoma tik toms matavimo priemonėms, kurios naudojamos:

- atliekant matavimo priemonių patikrą;
- sveikatos apsaugoje;
- veterinarijoje;
- įvertinant ekologinę būklę bei poveikį jai;
- darbų saugoje;
- nustatant produktų ir žaliavų kokybę;
- nustatant prekių, energijos ir paslaugų kiekį bei vertę;
- banko, mokesčių, muitinės ir pašto operacijose;

1. Metrologijos pagrindai

- teisėsaugos bei valstybės valdymo ir kontrolės institucijų pavedimu atliekant matavimus.

Išvardintose srityse naudojamų matavimo priemonių sąrašą sudaro ir tvirtina, jų valstybinę metrologinę kontrolę organizuoja Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgaliota institucija.

Kitais atvejais valstybė nekontroliuoja matavimo priemonių metrologinių savybių. Jomis turi pasirūpinti atitinkami suinteresuotieji juridiniai ir fiziniai asmenys, nes, kaip numato Įstatymas, naudojamos matavimo priemonės turi atitikti jų tipams nustatytus reikalavimus.

Nustatyta, kad Lietuvos Respublikoje pradedamų gaminti naujų matavimo priemonių ir pirmą kartą įvežtų iš užsienio ***matavimo priemonių tipus***, remdamasi valstybinių bandymų rezultatais, tvirtina Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgaliota institucija ir įrašo juos į ***Lietuvos matavimo priemonių registrą***.

Teisė atlikti ***matavimo priemonių patikrą*** suteikiama nustatyta tvarka Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgalios institucijos akredituotoms arba įgaliotoms įmonėms, laboratorijoms.

Juridiniai ir fiziniai asmenys, gaminantys, taisantys, importuojantys, nuomojantys, parduodantys ar naudojantys matavimo priemones (išskyrus naudojamas savo reikmėms), privalo pateikti jas patikrai Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgalios institucijos nustatyta tvarka. Matavimo priemonių patikros periodiškumą nustato Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgaliota institucija, remdamasi moksliniais–techniniais rezultatais. Jei patikros rezultatai teigiami, ant matavimo priemonės žymimas tam tikras žymuo arba išrašomas patikros liudijimas, suteikiantis teisę naudoti šias priemones pagal paskirtį. Patikros žymens ir liudijimo formą bei turinį nustato Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgaliota institucija.

Nustatyta, kad juridiniai ir fiziniai asmenys, pažeidę Metrologijos įstatymo reikalavimus, traukiami atsakomybėn Lietuvos Respublikos įstatymų nustatyta tvarka.

Vykdamat valdymo reformą ir Metrologijos įstatymą, 1997 m. gruodžio mėn. 30 d. buvo įkurta Įstatymu numatyta valstybės įgaliota metrologijos institucija – **Valstybinė metrologijos tarnyba**.

Valstybinė metrologijos tarnyba tvarko Lietuvos matavimo priemonių registrą, atlieka įmonių ir įstaigų metrologijos

1. Metrologijos pagrindai

normatyvinių dokumentų ekspertizę, teikia įvairias kitas paslaugas metrologijos srityje.

Valstybinės metrologijos tarnybos struktūroje, yra įvairios valstybės įmonės: **valstybės etalonų laboratorijos, metrologijos centrai**, akredituotos matavimo priemonių **kalibravimo laboratorijos** ir matavimo bei bandymo priemonių aptarnavimo ir taisymo **įmonės**. Pagal savo paskirtį metrologijos centrai yra valstybės pamatinės laboratorijos, įgaliotos išlaikyti valstybės etalonus ir galinčios atlikti visas etalonavimo procedūras.

Be metrologijos centrų, į valstybinės metrologijos tarnybos sudėtį įeina ir valstybės įmonės, vykdančios matavimo priemonių profilaktikos, taisymo ir derinimo darbus.

1.4.3. Matavimų sistis metrologijoje

Vartotojas visuomet tikisi ir reikalauja aukštos prekių ir paslaugų kokybės. Tai reiškia, kad firmos ir kompanijos – prekių ir paslaugų tiekėjai – turi rūpintis jų tiekiamų produktų ir paslaugų kokybe, ypač plečiantis rinkai ir augant konkurencijai.

Aukštas prekių ir paslaugų kokybės reikalavimas susijęs su būtinumu turėti adekvačią **kokybės valdymo sistemą**. Reikalavimai, keliama kokybės valdymo sistemai, yra numatyti **ISO 9000** serijos standartuose, taip pat analogiškuose Europos Sąjungos **EN 2900** serijos standartuose.

Viena iš esminių kokybės valdymo sistemos grandžių yra matavimų ir bandymų priemonių metrologinių savybių palaikymas ir kontrolė, siekiant, kad matavimai visose gamybos ir paslaugų grandyse būtų pakankamo tikslumo, t. y. susieti su valstybės etalonais. Matavimų ir bandymų priemonių metrologinės savybės palaikomos ir kontroliuojamos **etalonavimu** susiejant jų teikiamų dydžių vertes su valstybinių (o per juos – ir su tarptautinių) etalonų vertėmis. Etalonavimo procedūra numato visą suderinimo su etalonais seką. Joje svarbią vietą užima matavimų ir bandymų priemonių **patikra ir kalibravimas**.

Matavimo priemonės patikra – tai matavimo priemonės tinkamumo įvertinimas eksperimento būdu tiriant jos metrologines charakteristikas bei tikrinant, kaip nustatyti reikalavimai atitinka tipo reikalavimus, ir šio atitikimo dokumentinis patvirtinimas. Patikrą

1. Metrologijos pagrindai

atlieka Valstybės metrologijos tarnybos įgaliota valstybės įmonė ar laboratorija ar juridinio asmens atitinkamai įgaliotas padalinys.

Patikra priklauso valstybės vykdomai matavimo priemonių kontrolei. Ji dažniausiai apsiriboja negamybinės sferos matavimo priemonių, priskirtų valstybės metrologinei kontrolei (sveikatos apsauga, aplinkos apsauga, šalies gynyba, prekyba, metrologija, geodezija, ryšiai ir kt.), tikrinimu. Patikra atliekama pagal patvirtintą metodiką.

Kalibravimu vadinama visuma veiksmų, kuriais siekiama nustatyti, kiek matavimo priemonės rodmenys (ar etaloninės medžiagos parametrai) skiriasi nuo sutartinės tikrosios matuojamojo dydžio (parametro) vertės, kurias teikia etalonai. Taip irgi nustatomos matavimų ar bandymų priemonių metrologinės savybės ir jų tinkamumas matavimams. Kalibruojamos tos matavimo ir bandymų priemonės, kurioms nenumatyta metrologinių savybių valstybinė kontrolė. Tai dažniausiai matavimų ir bandymų priemonės, naudojamos gamyboje. Kalibravimas yra sąlygiškai savanoriška matavimo ir bandymų priemonių metrologinių savybių kontrolės procedūra, atliekama **akredituotų** (turinčių kalibravimo teisę) **kalibravimo laboratorijų**. Žinoma, savanoriškumas šioje situacijoje yra gana sąlygiškas: sertifikuojant produkciją, kurios parametrus tenka pagrįsti matavimų rezultatais, reikia patvirtinti ir kaip šiems matavimams naudojamos matavimo ir bandymų priemonės atitinka reikalavimus, t. y. pateikti jų **kalibravimo liudijimus**. Be to, kaip rodo pasaulio patirtis, solidžios firmos ir kompanijos, suinteresuotos produkcijos kokybe ir jos konkurencinėmis savybėmis, labai atsakingai vykdo jų naudojamų matavimų ir bandymų priemonių kalibravimą.

Akredituotosios kalibravimo laboratorijos išduoda kalibravimo liudijimus tų įstaigų vardu, kurios jas akreditavo. Kalibravimą gali vykdyti ir valstybinės metrologijos tarnybos įstaigos.

Bet kuri etalonavimo forma (patikra ar kalibravimas) numato, kaip minėta, matavimo priemonės teikiamo matavimo rezultato sietį su etalonų teikiamomis vertėmis. Naudojamas etalonas turi būti patikrintas arba kalibruotas pagal aukštesnio lygio (tikslesnį) etaloną, išlaikant etalonų sieties seką iki valstybės (ir tarptautinių) etalonų. Taip išlaikomas **etalonavimo hierarchijos** principas. Kadangi darbinių matavimo priemonių yra labai daug, tai joms etalonuoti

1. Metrologijos pagrindai

reikia labai daug darbo etalonų. Šių etalonų skaičius, augant hierarchijos lygmeniui, mažėja ir jie per aukščiausio lygio darbo etalonus – pamatinius ir antrinius etalonus – yra susiejami su valstybės etalonu. Gaunama piramidės pavidalo etalonų hierarchijos struktūra (1.14 pav.).



1.14 pav. Etalonų hierarchijos piramidė

Etalonavimo sietis šalyje prasideda nuo valstybės etalono. Paprastai jis saugomas ir išlaikomas jį sukūrusioje ir/arba išsaugančioje valstybės laboratorijoje, turinčioje **nacionalinės metrologijos įstaigos** (NMI) statusą. Pagal Lietuvos valstybinės metrologijos tarnybos struktūrą tokios įstaigos pavadintos **valstybės etalonų laboratorijomis**. NMI esantys valstybės etalonai nebūtinai turi būti pirminiai to dydžio vieneto etalonai. Tai gali būti antriniai etalonai, siejami su pirminiais tos pačios valstybės NMI, kitos šalies NMI ar tarptautinių metrologijos įstaigų (pavyzdžiui, BIPM) etalonais. Tai priklauso nuo valstybės ekonominių galimybių ir nuo konkretaus fizikinio dydžio matavimų poreikių šalyje. Pagal tarptautinę praktiką šalių – Europos Sąjungos narių NMI sertifikatai galioja visose ES šalyse. NMI betarpiškai yra atsakingi už jų saugojamų valstybės etalonų kokybę.

Valstybės etalono vertė yra perduodama **akredituotųjų**

1. Metrologijos pagrindai

etalonavimo laboratorijų pamatiniams etalonams.

Akredituotosios laboratorijos privalo atitikti nustatytus joms reikalavimus. Europos Sąjungoje jos privalo atitikti standarto EN 45001, o tarptautiniu mastu – "Vadovo ISO/IEC 25" reikalavimus. Laboratorijos paprastai akredituojamos tam tikrai matavimo priemonės rūšiai (tipui) ir privalo turėti etalonus, garantuojančius reikiamą teikiamo dydžio vertės neapibrėžtį. Etalonavimo rezultatai privalo būti pateikti atitinkamame dokumente – kalibravimo liudijime (sertifikate), patikros liudijime bei ant matavimo priemonės pažymėti tam tikru žymeniu.

Taigi etalonavimo procedūra apima teisinius, techninius ir organizacinius aspektus.

Vykdamas konkrečios rūšies matavimo priemonės patikrą ar kalibravimą, kaip minėta, vadovaujamasi patikros ar kalibravimo metodika ir joje pateikiama smulkia kalibravimo schema.

Etalonuojant matavimo priemones, taikomi įvairūs etalono teikiamų dydžių verčių perdavimo etalonuojamai matavimo priemonei būdai. Juos galima suskirstyti į tokias pagrindines grupes: betarpiško palyginimo būdas (tiesioginio matavimo būdas), palyginimas komparatoriumi ir netiesioginio matavimo būdas.

1. ***Betarpiško palyginimo būdas*** taikomas, kai etalonuojamos matavimo priemonės ir etalono teikiamas dydžio vertės galima palyginti nenaudojant komparatoriaus. Šis būdas tinka artimo didumo išreikštų taisyklių pačiais vienetais vienasrūšių fizikinių dydžių vertėms palyginti. Jis ypač plačiai taikomas etalonuojant elektrinių ir magnetinių dydžių matavimo priemones.

Kartais etalono rodmenų įtaisais būna tiesiog graduotas absoliutiniu ar santykinio skirtumo dydžiu. Pavyzdžiui, taip sudaryti voltmetrams etalonuoti naudojami vadinamieji voltmetrų kalibratoriai.

2. ***Palyginimas komparatoriumi.*** Šis būdas naudojamas, kai etalono ir etalonuojamos priemonės teikiamų dydžių verčių betarpiškai negalima palyginti. Pavyzdžiui, palyginti betarpiškai etaloniškos varžos ritės varžos ir rezistoriaus varžos negalima. Tokiu atveju tenka naudoti specialų palyginantį matavimo prietaisą – ***komparatorių.***

Svarbu, kad komparatorius vienodai reaguotų į etalono ir

1. Metrologijos pagrindai

etalonuojamos matavimo priemonės teikiamas dydžių vertės.

Šis būdas plačiai taikomas elektrinėms varžoms, talpoms ir induktyvumams palyginti. Kaip palyginimo prietaisas, naudojamas nuolatinės ar kintamosios srovės tiltelis. Lyginant įtampas ir elektrovaros jėgas, naudojami potenciometrai. Kai lyginamos etaloninė ir etalunuojama masė, kaip komparatorius naudojamos svirtinės svarstyklės. Etalunuojant ilgio matus, kaip komparatorius naudojamas interferometras.

Palyginimo komparatoriumi būdas, kai naudojami jautrūs komparatoriai, leidžia pasiekti didelį etalonavimo tikslumą.

3. *Netiesioginio matavimo būdas* taikomas, kai pirmųjų dviejų būdų panaudoti negalima arba kai jie duoda nepakankamą tikslumą. Kartais netiesioginis matavimas yra paprastesnis ir garantuoja tą patį tikslumą.

Netiesioginio matavimo pavyzdžiu gali būti vatmetro etalonavimas, palaikant etaloninę įtampą (matuojama etaloniniu voltmetru) etaloninės varžos grandinėje, arba elektros energijos skaitiklio etalonavimas, palaikant grandinėje etaloninę galią (matuojama etaloniniu vatmetru) per etaloninį laiko intervalą (matuojama etaloniniu chronometru).

Šis būdas reikalauja atlikti daugiau matavimų, todėl prireikia didesnių laiko sąnaudų. Dažnai tokie matavimai automatizuojami. Kebčiau vertinamos tokių matavimų etalonavimo neapibrėžtys, nes reikia nustatyti kelių tiesioginių matavimų neapibrėžčių bei didesnio skaičiaus paveikiųjų dydžių įtaką.

Nustatyta, kad matavimo priemonių patikra vykdoma pagal *bendrą patvirtintą patikros metodiką*, pažymėtą originaliu patikros metodikų fondo spaudu.

Patikros metodika nustato vieningą tvarką, priemonės ir metrologinių veiksmų seką, kurių laikantis išsiaiškinama, ar matavimo priemonė atitinka tipo reikalavimus ir ar ji gali būti naudojama teisinės metrologijos srityse.

Visų vieno tipo matavimo priemonių patikra turi būti atliekama pagal bendrą metodiką.

Žymenys ir patikros liudijimai yra griežtos apskaitos dokumentai, kuriems galioja specialios jų išigijimo, saugojimo ir nurašymo tvarka.

1. Metrologijos pagrindai

Taip pat pridedamas patikros protokolai, kuriame turi būti užrašyti patikros rezultatai ir jų neapibrėžtis. Rekomenduojama nurodyti kontroliuojamų parametrų nustatytos paklaidos ir normos santykį.

Rengiant patikros metodiką, reikalingus etalonus ir matavimo priemonės privalo turėti bent viena Lietuvoje matavimo priemonių patikrą atlikti įgaliota laboratorija.

Patikros metodikoje rekomenduojama nurodyti patikros žymens vietą.

Tikrinimo *periodiškumą* nustato laiko tarpas, po kurio matavimo priemonė privalo būti pakartotinai tikrinama, neatsižvelgiant į jos techninę būklę.

Periodiškumas gali būti nustatytas vienodas visoms tam tikros rūšies (tipo) matavimo priemonėms. Pasyviosios matavimo priemonės gali būti tikrinamos rečiau, o aktyviosios – dažniau.

Matavimo priemonių sąrašą, nurodant jų tikrinimo periodiškumą, skelbia Valstybinė metrologijos tarnyba. Jis fiksuojamas ir patikros metodikoje. Paprastai vadovaujamasi matavimo priemonės gamintojo rekomendacijomis, išdėstytomis jos techniniame apraše arba sertifikate. Dažnai patikros periodiškumas yra siejamas su matavimo priemonės patikimumo charakteristikomis, pavyzdžiui, su vidutiniu nepertraukiamo darbo laiku ir su jos naudojimo laiko koeficientu.

Ypač tikslioms arba naudojamoms svarbiems matavimams matavimo priemonėms gali būti nustatytas individualus patikros periodiškumas. Taip, pavyzdžiui, yra nustatomas etalonų tikrinimo periodiškumas.

Jeigu matavimo priemonė nepriskirta valstybės teisinio reguliavimo sričiai, tai jos patikros periodiškumą nustato ją naudojantis juridinis (arba fizinis) asmuo.

1.5. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui

1. Kas yra matavimas?
2. Kokius klausimus nagrinėja metrologija?
3. Kas yra matavimo vienetas?

1. Metrologijos pagrindai

4. Kas yra matavimo vienetų sistema?
5. Kas yra tikroji ir sutartinė tikroji matuojamojo dydžio vertė?
6. Kokie sistemos vienetai vadinami pagrindiniais ir kokie išvestiniais?
7. Išvardinkite pagrindinius SI sistemos vienetus ir užrašykite jų simbolius.
8. Kas yra išvestinio vieneto dimensija?
9. Kokie yra elektriniai ir magnetiniai SI išvestiniai vienetai ir jų simboliai?
10. Kaip sudaromi SI daliniai ir kartotiniai vienetai?
11. Kokie daliniai ir kartotiniai SI vienetai naudojami elektriniuose ir elektroniniuose matavimuose?
12. Kokie nesisteminiai vienetai yra lygiateisiai su SI vienetais?
13. Kokios yra matavimo rezultatų rašymo taisyklės?
14. Kas yra belas ir decibelas ir kam jie naudojami?
15. Ką vadiname matavimo metodu?
16. Kokie matavimai vadinami tiesioginiais?
17. Kaip įvykdomi netiesioginiai matavimai? Pateikite pavyzdį.
18. Koks esminis statinių ir dinaminių matavimų skirtumas?
19. Kas yra matavimo metodika?
20. Kaip išreiškiamos matavimo paklaidos?
21. Kokios yra svarbiausios paklaidų priežastys?
22. Kokias paklaidas vadina sistemingosiomis, o kokias – atsitiktinėmis?
23. Kaip aprašomos sistemingosios paklaidos?
24. Kas yra pataisa? Kokie matavimo rezultatai vadinami ištaisytaisiais?
25. Kokiomis funkcijomis aprašomas atsitiktinių paklaidų tikimybių skirstinys? Koks yra šių funkcijų ryšys?
26. Kaip aprašomas atsitiktinių paklaidų sutilpimo intervalas ir jo tikimybė?
27. Kaip aprašoma atsitiktinės paklaidos dispersija?
28. Kas yra standartinė paklaida?
29. Kokie parametrai vertina paklaidų tikimybių skirstinio asimetriją ir ekscesą ir kam jie naudojami?
30. Kokią paklaidos vertę vadina ribine? Kaip ji susijusi su standartinė paklaida?

1. Metrologijos pagrindai

31. Kaip surandamas tolygiojo tikimybių skirstinio paklaidų intervalas?
32. Koks ryšys tarp tolygiojo tikimybių skirstinio paklaidų ribinės ir standartinės verčių?
33. Kaip nustatomi normaliojo tikimybių skirstinio paklaidų intervalas ir tikimybė? Pateikite šių dydžių būdingųjų pavyzdžių.
34. Kokia yra „trijų sigma“ taisyklė?
35. Kaip surandama atsitiktinių paklaidų sumos dispersija?
36. Kaip pakinta atsitiktinių paklaidų sumos tikimybių skirstinys, sumuojant paklaidas su skirtingais tikimybių skirstiniais?
37. Kaip surandama netiesiogiai matuojamo dydžio paklaida? Išnagrinėkite konkretų pavyzdį.
38. Kaip nustatoma netiesioginio matavimo standartinė paklaida?
39. Kaip aprašoma sistemingųjų paklaidų suma?
40. Koks yra paneigtinų paklaidų kriterijus?
41. Koku parametru aprašoma sistemingųjų ir atsitiktinių paklaidų suma?
42. Kokius matavimų rezultatus vadina vienodo tikslumo?
43. Kokią rezultatų visumą vadina imtimi arba statistine aibe?
44. Koku įverčiu vertinama matuojamojo dydžio vertė?
45. Koku įverčiu vertinama rezultatų dispersija?
46. Koks įvertis naudojamas standartinės paklaidos vertinimui?
47. Kaip sudaroma skirstinio dažnių histograma?
48. Kaip vertinama aritmetinio vidurkio standartinė paklaida?
49. Kaip nustatomas tikrosios matuojamojo dydžio vertės pasiklivimo intervalas?
50. Kaip aprašomi rezultatų dispersijos ir standartinės paklaidos pasiklivimo intervalai?
51. Kaip aptinkami nenormalūs rezultatai?
52. Kaip vertinama matuojamųjų dydžių koreliacija?
53. Kaip vertinama netiesioginio matavimo standartinė paklaida?
54. Kaip nustatomas netiesiogiai matuojamo dydžio tikrosios vertės pasiklivimo intervalas?
55. Kaip apvalinami matavimo rezultatai ir paklaidų įverčiai?

1. Metrologijos pagrindai

56. Kas yra matavimo neapibrėžtis ir kaip ji išreiškiama?
57. Kaip klasifikuojamos matavimo priemonės?
58. Kas yra etalonas ir kokie jie būna?
59. Kaip realizuotas metro etalonas?
60. Koks yra kilogramo etalonas?
61. Kokie yra laiko ir dažnio etalonai?
62. Kaip sudarytas ampero etalonas?
63. Kokiu etalonu atkuriamas kelvinas?
64. Kaip sudarytas kandelos etalonas?
65. Kokie yra elektrinės įtampos etalonai?
66. Kaip sudaryti elektrinės varžos etalonai?
67. Kaip realizuojami induktyvumo etalonai?
68. Kokiais etalonais atkuriamą elektrinę talpą?
69. Kaip sudaryti magnetinių dydžių etalonai?
70. Kam naudojamos etaloningos medžiagos ir terpės?
71. Kas yra matavimo keitiklis ir kokios jo svarbiausios charakteristikos ir parametrai?
72. Kokios yra matavimo keitiklių rūšys?
73. Kaip aprašoma matavimo keitiklio paklaida?
74. Kaip aprašomos matavimo keitiklio dinaminės savybės?
75. Kokia yra tiesioginio keitimo matavimo prietaiso struktūra ir svarbiausios savybės?
76. Kokia yra palyginimo prietaiso struktūra ir svarbiausios savybės?
77. Kas yra matavimo priemonės tikslumo klasė ir kaip ji normuojama?
78. Kokios yra tarptautinės metrologijos įstaigos?
79. Kokios yra Lietuvos Respublikos metrologijos įstaigos?
80. Kaip užtikrinama matavimų sietis?
81. Kokia procedūra vadinama matavimo priemonės patikra?
82. Kas yra matavimo priemonės kalibravimas ir kas jį įgaliotas atlikti?
83. Kaip etalonuojama betarpiško palyginimo būdu?
84. Kada ir kaip etalonuojama naudojant komparatorių?
85. Kada etalonuojant naudojamas netiesioginio matavimo būdas?

Matavimo signalų šaltiniai

Šiame skyriuje nagrinėjamos matavimo priemonės nėra tiesiogiai matuojančios elektrinius signalų ar grandinių parametrus, tačiau nemažiau svarbios. Jos kuria žinomų parametrų elektrinius virpesius – testavimo signalus, kurie naudojami tiriamose grandinėse. Tada kitos matavimo priemonės gali matuoti šiose grandinėse vykstančių procesų elektrinius parametrus.

Kuriami gali būti nuolatinės ar kintamosios srovės virpesiai. Pastarieji gali būti labai įvairių formų ir parametrų, priklausomai nuo konkretaus matavimo reikmių. Paprasčiausiu atveju tai sinusinės formos virpesiai. Sudėtingesniais atvejais tai gali būti periodiniai trikampio ar stačiakampio formos impulsų pavidalo virpesiai, kintančio dažnio arba moduluotieji sinusiniai ir kitokios formos virpesiai.

2.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas

2.1.1. Klasifikavimas

Matavimo virpesių šaltiniai teikia reikiamos formos, amplitudės ir dažnio elektrinius virpesius. Nuo paprastų virpesių šaltinių jie skiriasi tuo, kad turi normuotas metrologines charakteristikas, kurios

2. Matavimo signalų šaltiniai

nustato šių virpesių šaltinių teikiamų virpesių parametrus.

Signalų šaltinių svarbiausios metrologinės charakteristikos yra tokios: **virpesių dažnių diapazonas, dažnio nustatymo tikslumas ir jo stabilumas, išėjimo įtampos keitimo ribos, jos nustatymo tikslumas ir stabilumas, išėjimo varža ir signalo formos charakteristikos** (pvz., harmoninio signalo netiesinių iškraipymų koeficientas, periodinio impulsinio signalo retis, impulsų trukmė, pjūklo pavidalo virpesio tiesiškumas ir kiti).

Signalų šaltinius literatūroje dažnai vadina *signalų generatoriais* arba **matavimo generatoriais**. Šiame skyriuje ir knygoje naudosime pirmąjį terminą.

Pagal generuojamų virpesių formą signalų generatoriai skirstomi į **harmoninių virpesių, impulsinių virpesių ir funkcinius generatorius**. Pastarieji teikia ir harmoninės ir kitokios formos virpesius: stačiakampių impulsų, trikampės simetrinės, trikampės asimetrinės (pjūklo dantų formos) ir kitokios. Dar naudojami plataus spektro virpesių – **triukšmų** – generatoriai.

Pagal virpesių dažnių diapazoną generatoriai skirstomi į **žemojo dažnio, aukštojo dažnio, superaukštojo dažnio, video dažnio, garsinio dažnio, ultragarsinio dažnio** ir kitus.

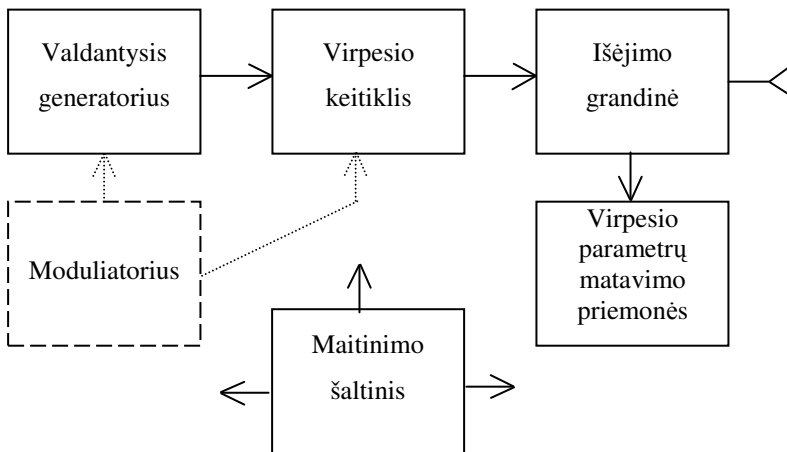
Nors signalų šaltiniai teikia analoginius signalus, kartais juos sąlyginai skirsto į analoginius ir skaitmeninius. Pastarąjį pavadinimą dažnai naudoja tuo atveju kai virpesys kuriamas ir dauguma virpesio keitimų vyksta skaitmeniniu būdu.

2.1.2. Apibendrintoji struktūrinė schema

Apibendrintoji signalų generatoriaus struktūrinė schema pateikta 2.1. paveiksle. Jos svarbiausi elementai yra valdantysis generatorius, virpesio keitiklis, išėjimo grandinė, moduliuojanti grandinė, išėjimo virpesio parametrų kontrolės grandinė ir maitinimo šaltinis. **Valdantysis generatorius** kuria pradinį virpesį ir nustato generuojamų virpesių dažnių diapazoną, dažnio stabilumą bei jo nustatymo tikslumą. Žemųjų dažnių generatoriams tai būna **RC generatorius, interferencinis LC generatorius** arba **virpesio tiesioginis skaitmeninis sintezatorius**, aukštojo dažnio generatoriams tai būna **LC generatorius, interferencinis LC generatorius** arba **dažnio sintezatorius**. Superaukštojo dažnio

2. Matavimo signalų šaltiniai

generatoriuose valdantysis generatorius sudaromas naudojant schemas su **mikrobangų įtaisais**: gano diodais, galio arsenido tranzistoriais arba su klistronais ir magnetronais. Impulsų generatorių valdančiaisiais generatoriais būna RC generatoriai ir **multivibratoriai**, rečiau – **bloking-generatoriai**.



2.1 pav. Signalų šaltinio apibendrinotoji struktūrinė schema

Žemojo dažnio generatoriai dažniausiai veikia *nemoduliuotų virpesių* režimu, o auštojo dažnio generatoriai gali teikti nemoduliuotus, moduluotosios *amplitudės*, moduliuotojo *dažnio* bei *impulsais* manipuluotus virpesius. Superaukštojo dažnio generatoriai veikia nemoduliuotų ir moduliuotojo dažnio bei impulsais manipuluotų virpesių režimais.

Virpesio keitiklis keičia valdančiojo generatoriaus virpesio spektro parametrus. Dažnai jame yra keičiama virpesio amplitudė, o kartais ir forma. Jame įvykdoma ir amplitudės moduliacija ar manipuliacija.. Harmoninių virpesių generatorių virpesio keitiklis nekeičia virpesio formos ir juo būna tiesiniu stiprinimo režimu veikiantis **amplitudės** ir **galios stiprintuvas**. Stačiakampių impulsų generatoriuose šis elementas nustato generuojamo impulso trukmę ir amplitudę ir juo dažniausiai būna **laukiantis multivibratorius**. Funkciniuose generatoriuose virpesio formos keitimui gali būti naudojami **amplitudės ribotuvas**, **diferencialoriai** ir **integratoriai**.

2. Matavimo signalų šaltiniai

Aukšto dažnio generatoriuose be virpesio stiprinimo dar, kaip minėta, gali būti vykdoma ir jo amplitudės ar dažnio moduliacija ar manipuliacija.

Moduliuojanti grandinė turi savyje moduliuojančio virpesio šaltinį ir reikiamas kitas grandinės moduliacijos parametrų keitimui: moduliacijos gylį ar dažnio deviacijos valdymui. Moduliuojančio virpesio šaltiniu dažniausiai būna fiksuotojo dažnio harmoninių virpesių generatorius arba stačiakampių impulsų generatorius. Dažnio moduliacija ar manipuliacija, kaip žinoma, gali būti įvykdyta tik veikiant valdančiojo generatoriaus dažnį.

Išėjimo grandinė nustato generatoriaus išėjimo varžą ir įveda reikiamą amplitudės slopinimą, leidžiantį sumažinti išėjimo įtampą reikiamu žingsniu arba tolygiai.

Virpesių parametrų matavimo priemonės leidžia kontroliuoti virpesio *išėjimo įtampą*, kartais ir dažnį, o moduliuotųjų virpesių atveju – ir moduliacijos parametrus: *moduliacijos gylį* ar *dažnio deviaciją*.

Maitinimo šaltinis garantuoja generatoriaus schemos elementų maitinimą reikiamomis įtampomis ir srovėmis.

2.2. Harmoninių signalų generatoriai

2.2.1. Klasifikavimas ir parametrai

Priklausomai nuo generuojamų dažnių ribų harmoninių signalų generatoriai yra skirstomi į tokias grupes:

- Infražemųjų dažnių generatoriai, kurių dažnių diapazonas yra nuo 0,01 Hz iki 100 Hz;
- Žemųjų dažnių generatoriai, kurių dažnių diapazonas yra nuo 20 Hz iki 200 kHz;
- Aukštųjų dažnių generatoriai, kurių dažnių diapazonas yra nuo 100 kHz iki 3 GHz;
- Superaukštųjų dažnių generatoriai, kurių dažnių diapazonas yra nuo 1 GHz iki 100 GHz.

Nurodyti dažnių ruožai yra sąlygiški ir jų konkrečios vertės gali būti labai skirtingos konkrečiuose generatoriuose.

2. Matavimo signalų šaltiniai

Pagrindiniai harmoninių virpesių generatorių parametrai yra: virpesių dažnių diapazonas, dažnio nustatymo tikslumas, dažnio stabilumas, išėjimo įtampos keitimo ribos, išėjimo įtampos nustatymo tikslumas, išėjimo įtampos stabilumas, išėjimo varža ir signalo pašalinių produktų koeficientas.

Dažnių diapazonas gali būti ištisinis nuo $f_{\min}$ iki $f_{\max}$ arba suskaidytas į kelias dalis. Diapazono dalių kraštiniai dažniai turi su nežymia atsarga persidengti.

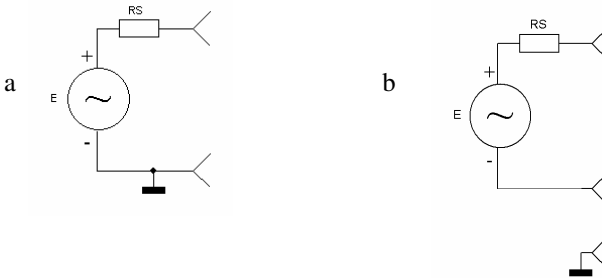
Dažnio nustatymo tikslumas rodo kiek tikrasis virpesio dažnis skiriasi nuo generatoriaus dažnio nustatymo įtaisais nustatyto ir rodomo *vardinio* dažnio. Paprastai šis parametras nurodomas santykinės dažnio nustatymo paklaidos dydžiu ir matuojamas procentais.

Dažnio stabilumas parodo kiek gali pasikeisti virpesio dažnis jį lyginant su nustatytuoju dažniu. Dažnio kitimas gali būti lėtas (dažnio dreifas) ir greitas (dažnio variacija). Kaip ir dažnio nustatymo tikslumas šis parametras norminamas santykinės dažnio ribinės nuokrypos nuo nustatyto *vardinio* dažnio dydžiu ir matuojamas procentais.

Išėjimo įtampos keitimo ribos parodo kokiose ribose nuo $U_{\min}$ iki $U_{\max}$ gali būti nustatyta išėjimo įtampos vertė. Išėjimo įtampos mažiausią galimą vertę riboja triukšmų įtampos lygis generatoriaus išėjime, o jos didžiausią vertę – generatoriaus *vardinė* galia. Išėjimo įtampa valdoma išėjimo grandinės varžiniais įtampos dalikliais – *ateniuatoriais* – padalinant įtampą. Paprastai naudojami dviejų pakopų įtampos dalikliai: viena pakopa leidžia įtampą keisti dekadiniu žingsniu (arba decibelais), o antra pakopa – tolygiai.

Išėjimo įtampos nustatymo tikslumas rodo kiek tikroji išėjimo įtampos vertė skiriasi nuo generatoriaus išėjimo įtampos nustatymo įtaisais nustatytos ir jo voltmetro rodomos *vardinės* įtampos. Paprastai šis parametras nurodomas santykinės įtampos nustatymo paklaidos dydžiu ir matuojamas procentais.

Išėjimo įtampos stabilumas parodo kiek gali pasikeisti virpesio įtampa ją lyginant su nustatytuoju dydžiu. Įtampos kitimas gali būti lėtas (įtampos dreifas) ir greitas (įtampos variacija). Kaip ir įtampos nustatymo tikslumas šis parametras norminamas santykinės įtampos ribinės nuokrypos nuo *vardinės* vertės dydžiu ir matuojamas procentais.



2.2 pav. Signalų generatoriaus ekvivalentinė schema: a – asimetrinio išėjimo ir b – simetrinio išėjimo

Išėjimo varža yra signalų generatoriaus vidinė ekvivalentinė varža R_S apkrovos srovei, pagal *Tevenino* (prancūzų inžinierius Léon Charles Thévenin (1857-1926)). įtampos šaltinių ekvivalentinę schemą (2.2. pav.). Jos vertės būna $5\ \Omega$, $50\ \Omega$, $75\ \Omega$ ir $600\ \Omega$. Dažnai išėjimo varža būna fiksuota ir gali būti keičiama tik šuoliais.

Generatoriaus išėjimo grandinė gali būti asimetriška su generatoriaus korpusu sujungtų grandinių ir prie jų prijungto įžeminimui skirtos gnybto atžvilgiu (2.2a pav.) arba simetriška (2.2b pav.). Žemųjų dažnių generatoriams dažnai galima pasirinkti reikiamą simetrišką ar asimetrišką grandinės variantą, o aukštų ir superaukštų dažnių generatoriuose paprastai yra tik asimetriškas išėjimas.

Signalų **pašalinių produktų koeficientas** k_f įvertina signalo spektro grynumą. Jis nustato kokią dalį signalo įtampos sudaro pašalinių nenaudingų virpesių įtampa U_p , lyginant ją su signalo įtampa U . Palyginimui naudojamos vidutinės kvadratinės (efektinės) įtampų vertės, o koeficiento vertė dažniausiai išreiškiama procentais:

$$k_f = \frac{U_p}{U} 100, \% .$$

Pašalinės įtampos komponentės atsiranda dėl maitinimo šaltinio srovės pulsacijų ir yra kartotinio dažnio maitinančio elektros tinklo dažniui. Dėl valdančiojo generatoriaus ir stiprintuvų aktyviųjų elementų voltamperinių charakteristikų netiesiškumo atsiranda įtampos komponentės kartotinės signalo dažniui (harmonikos), o dėl

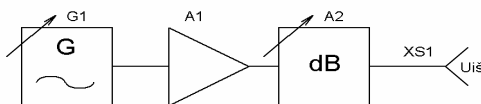
2. Matavimo signalų šaltiniai

dažnio ir amplitudės variacijų – parazitinių signalo amplitudės ir dažnio moduliacijų – šalutinių dažnių juostos (kombinaciniai dažniai). Kartais vertinama tik harmonikų įtampos U_h įtaka, ją išreiškiant harmonikų koeficientu:

$$k_h = \frac{U_h}{U_1} 100, \% .$$

2.2.2. Žemųjų ir infražemųjų dažnių generatoriai

Tokių generatorių bendroji struktūrinė schema yra pavaizduota 2.3 paveiksle. Pagrindiniai generatoriaus elementai yra keičiamo dažnio harmoninių virpesių valdantysis generatorius G1, plačiajuostis įtampos ir galios stiprintuvas A1 ir valdomas atenuatorius A2. Priklausomai nuo dažnių diapazono skiriasi schemos elementų parametrai. Skiriasi ir valdančiųjų generatorių sudarymo principai.



2.3 pav. Žemųjų ir infražemųjų dažnių signalų generatorių bendroji struktūrinė schema

Infražemųjų dažnių generatoriai dažniausiai naudojami automatinio valdymo, matavimo ir kitų grandinių su lėtais procesais tyrimui ir derinimui.

Jų valdantysis generatorius negali būti sudarytas panaudojant klasikines RC, o tuo labiau LC generatorių schemas, nes tokiuose žemuose dažniuose negalima sudaryti reikiamos kokybės ir stabilumo grandinių.

Todėl šiame dažnių ruože valdantieji generatoriai sudaromi iš analoginės elektronikos funkcinių elementų, modeliuojančių harmoninio proceso diferencialinę lygtį:

$$\frac{d^2 u_{iš}}{dt^2} + \omega_0^2 u_{iš} = 0, \quad (2.1)$$

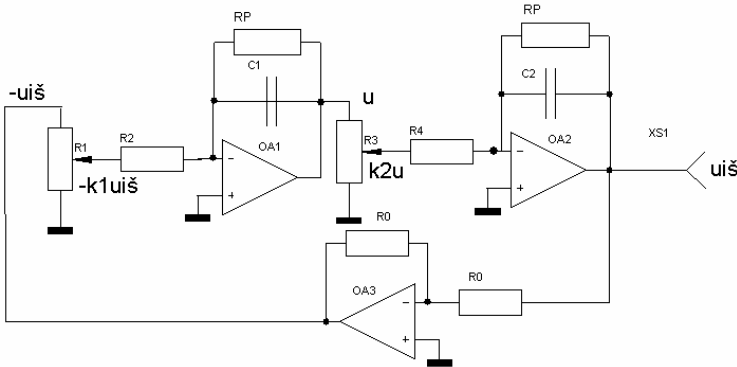
kurios sprendinys, kaip žinoma, yra harmoninis virpesys

2. Matavimo signalų šaltiniai

$$u_{i\check{s}} = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

Virpesio amplitudė, dažnis ir pradinė fazė yra nustatomi modeliuojančių procesą elektronikos grandinių parametrais.

Modeliuojanti schema yra parodyta 2.4 paveiksle. Ji sudaryta iš dviejų invertuojančių integratorių su operaciniais stiprintuvais OA1 ir OA2 ir invertuojančio kartotuvo su operaciniu stiprintuvu OA3. Dydis k_1 yra grandinės su potenciometu R1 įtampos perdavimo koeficientas, o k_2 – grandinės su potenciometu R2 įtampos perdavimo koeficientas. Pagalbiniai rezistoriai R0 ir RP nustato operacinių stiprintuvų nuolatinės įtampos stiprinimus.



2.4 pav. Harmoninį virpesį modeliuojančios grandinės funkcinė schema

Integratoriui su operaciniu stiprintuvu OA1 galime užrašyti tokią įėjimo ir išėjimo įtampų ryšio formulę, gaunamą sulyginus rezistoriaus R2 ir kondensatoriaus C1 sroves:

$$-C_1 \frac{du}{dt} = -\frac{k_1 u_{i\check{s}}}{R_2}.$$

Analogiškai, antram integratoriui užrašome tokią formulę:

$$-C_2 \frac{du_{i\check{s}}}{dt} = \frac{k_2 u}{R_4}.$$

Išdiferencijavę antrąją lygybę pagal t ir įstatę į pirmąją, galime eliminuoti u . Sutvarkę reiškinių, gauname tokią formulę:

2. Matavimo signalų šaltiniai

$$\frac{d^2 u_{i\dot{x}}}{dt^2} + \frac{k_1 k_2}{R_2 R_4 C_1 C_2} u_{i\dot{x}} = 0. \quad (2.2)$$

Palyginę formules (2.1) ir (2.2) matome, kad harmoninių virpesių kampinis dažnis yra lygus:

$$\omega_0^2 = \frac{k_1 k_2}{R_2 R_4 C_1 C_2}.$$

Kai integratoriai vienodi, o potenciometrai irgi vienodi ir valdomi tuo pačiu valdymo įtaisu, tai $C_1 = C_2 = C$, $R_2 = R_4 = R$, $k_1 = k_2 = k$ ir dažnio formulė gaunama paprastesnė:

$$\omega_0 = \frac{k}{RC}.$$

Tokių valdančiųjų generatorių dažnis tolygiai valdomas keičiant k , o padidapazoniai keičiami, pakeičiant elementus RC . Dažnio nustatymo tikslumas ir stabilumas yra toks pat kaip ir RC generatorių ir yra procentų eilės dydis.

Geresnius stabilumo parametrus turi valdantieji generatoriai su tiesiogine skaitmenine signalo sinteze, kurių sudarymo principą nagrinėsime vėliau.

Žemojo dažnio generatorių valdantieji generatoriai dažniausiai sudaromi kaip grįžtamojo ryšio generatoriai su fazuojančiomis RC grandinėmis arba fazuojančiu RC keturpoliu. Pirmuoju atveju yra naudojamas invertuojantis stiprintuvas ir trijų arba keturių grandžių integruojanti arba diferencijuojanti grandinė, garantuojanti fazės poslinkį $\pm 180^\circ$. Taip garantuojamas generatoriaus fazių balansas, o amplitudžių balansą garantuoja pakankamas stiprintuvo stiprinimas.

Stiprintuvai gali būti arba tranzistoriniai arba operaciniai stiprintuvai. Viena iš galimų tokio generatoriaus schemų su tranzistoriniu stiprintuvu yra parodyta 2.5 paveiksle. Šioje schemoje yra panaudotos trys diferencijuojančios RC grandinės, kurių parametrai parinkti taip, kad generuojamo dažnio virpesiui jos sukuria $+180^\circ$ fazės poslinkį. Dažniausiai jų elementai imami vienodi: $C_1 = C_2 = C_3 = C$; $R_4 = R_5 = R_{in} = R \gg R_3$. $R_{in} = (R_1 || R_2 || h_{11e})$ yra stiprintuvo įėjimo varža, o h_{11e} – tranzistoriaus

2. Matavimo signalų šaltiniai

įėjimo varža bendro emiterio jungimo schemai. Tokios grįžtamojo ryšio grandinės kompleksinė įtampos perdavimo funkcija yra lygi:

$$\beta(j\omega) = \frac{1}{1 - \frac{5}{(\omega RC)^2} + j \left[\frac{1}{(\omega RC)^3} - \frac{6}{\omega RC} \right]}.$$

Kadangi, kaip minėta, ši grandinė turi sukurti $+180^\circ$ fazės poslinkį, tai jos įtampos perdavimo funkcija turi būti reali ir neigiamą. Prilyginę menamą dalį nuliui, gauname susižadinančio virpesio dažnį:

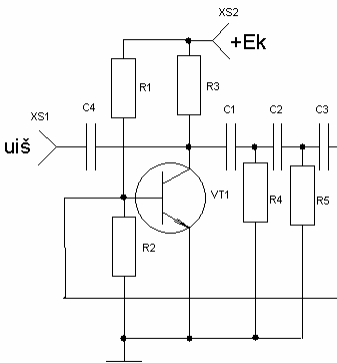
$$\omega_g = \frac{1}{RC\sqrt{6}}.$$

Amplitudžių balansas bus tenkinamas kai stiprintuvo stiprinimas bus

$$K_u(\omega_g) = \frac{1}{\beta(\omega_g)} = -29.$$

Kaip rodo dažnio formulė, norint keisti virpesio dažnį, tektų vienu metu keisti visus C arba visus R. Varžų keitimas yra praktiškai

2.5 pav. RC generatorius su fazuojančia trijų grandžių diferencijuojančia grandine

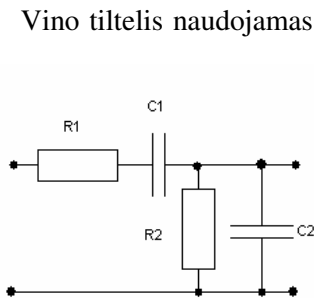


negalimas, nes tektų keisti ir R1, R2, o tai keistų stiprintuvo darbo režimą pagal nuolatinę srovę ir tuo pačiu stiprinimo koeficientą. Todėl galima tik perjungti kitus C, t.y. toks generatorius gali veikti tik fiksuotų dažnių režimu. Todėl ir naudojamas kaip fiksuotųjų dažnių generatorius, pavyzdžiui, moduliuojančių virpesių kūrimui aukšto dažnio generatoriuose.

Kaip fazuojantis keturpolis RC generatoriuose naudojamas vadinamasis *Vino tiltelis* (vokiečių fizikas Max Wien 1866-1938) (2.6 pav.). Kai $R1 = R2 = R$ ir $C1 = C2 = C$ jo kompleksinė įtampos perdavimo funkcija užrašoma taip:

2. Matavimo signalų šaltiniai

$$\beta(j\omega) = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}. \quad (2.3)$$

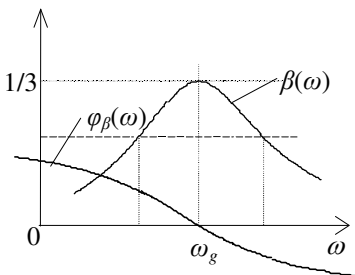


2.6 pav. Vono tiltelio schema

Vino tiltelis naudojamas teigiamam grįžtamajam ryšiui sudaryti neinvertuojančiame stiprintuve, todėl generuojamam dažniui jis neturi keisti virpesio fazės. Šiam dažniui Vono tiltelio įtampos perdavimo funkcija turi būti reali ir teigiama. Prilyginę nuliui perdavimo funkcijos menamą dalį, nustatome generuojamą dažnį, o jį panaudoję ir reikiamo amplitudžių balansui sudaryti stiprinimo dydį:

$$\omega_g = \frac{1}{RC} \text{ ir } K_u \geq \frac{1}{\beta(\omega_g)} = 3.$$

Pertvarkę (2.3) formulę, galime ją užrašyti pavidalu, analogišku lygiagrečiojo rezonansinių virpesių kontūro kompleksinei įtampos perdavimo funkcijai:



2.7 pav. Vono tiltelio amplitudės ir fazės

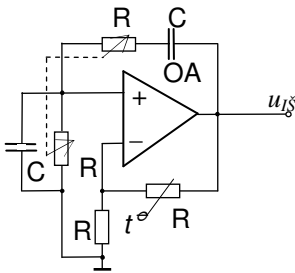
$$\beta(j\omega) = \frac{1/3}{1 + j\frac{1}{3}\left(\frac{\omega}{\omega_g} - \frac{\omega_g}{\omega}\right)}.$$

Perdavimo funkcijos modulio ir fazės kitimas pavaizduotas 2.7 paveiksle, o tokios kvazirezonansinės grandinės kokybė yra labai maža: $Q = 1/3$.

Kadangi RC generatoriuose, ypač diapazoniniuose, yra naudojami stiprintuvai su plačia praleidžiamų dažnių juosta, tai amplitudžių balansas gali būti garantuojamas plačiame dažnių ruože. Todėl reikia automatiškai reguliuoti vidutinį stiprinimo dydį, kad jis išliktų artimas reikiamam pagal amplitudžių balanso sąlygą. Kitaip virpesių amplitudė gali išaugti ir virpesio forma gaunama iškraipyta, o amplitudė – nestabili.

2. Matavimo signalų šaltiniai

Automatiniam stiprinimo ir amplitudės reguliavimui dažniausiai naudojamas neigiamas inercinis grįžtamasis ryšys per inercinės varžos elementą – termistorių, kurio varža priklauso nuo per jį tekančios srovės sukeltos šilumos ir, padidėjus



2.8 pav. RC generatoriaus su
Vino tilteliu schema

stiprinimui ir virpesių amplitudei, jo varža sumažėja ir neigiamo grįžtamojo ryšio stipris išauga ir stiprinimą bei virpesio amplitudę sumažina. RC generatoriaus su Vino tilteliu ir operaciniu stiprintuvu schema pavaizduota 2.8 paveiksle. Tokie valdantieji generatoriai yra naudojami diapazoniniuose generatoriuose.

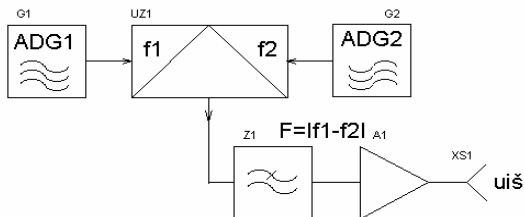
Juose virpesių dažnis diapazono ribose keičiamas, keičiant vienu metu abiejų Vino tiltelio rezistorių varžas, o padidapazoniai keičiami perjungiant kondensatorius.

RC generatoriai negali veikti aukštuose dažniuose, nes dėl parazitinių schemos reaktyvumų įtakos yra pakeičiamos grandinių savybės ir netenkinamos susižadinimo sąlygos. Tokių generatorių praktinė didžiausio dažnio riba yra dešimtys megahercų. Be to, kaip minėta, šių generatorių dažnio nustatymo tikslumas ir stabilumas yra kelių procentų eilės dydis, nes RC grandinių savybės yra ypač priklausomos nuo aplinkos temperatūros. Dar vienas tokių generatorių trūkumas yra tai, kad jų generuojama įtampa gerokai skiriasi nuo harmoninės, todėl jie netinka grandinių netiesinių iškraipymų tyrimui.

Pagal virpesių stabilumo ir virpesio formos švarumo kriterijus geresni yra **LC generatoriai**, tačiau tiesiogiai jų panaudoti žemo dažnio virpesių kūrimui negalima, nes reikėtų labai didelių induktyvumų ir talpų, todėl tokių kontūrų kokybė būtų maža ir generatoriaus kokybiniai rodikliai taptų negeresni už RC generatorių, o schemos sudėtingumas ir kaina būtų didesnė. Apie LC generatorių schemas kalbėsime vėliau, o dabar aptarkime kaip jie panaudojami žemo dažnio virpesių kūrimui. Tam naudojamos schemos su dviejų aukšto dažnio generatorių virpesių interferencija. Tokio generatoriaus struktūrinė schema yra pavaizduota 2.9 paveiksle. Aukšto dažnio generatorių ADG1 ir ADG2 virpesiai yra sumaišomi

2. Matavimo signalų šaltiniai

dažnių maišiklyje ir po to dažnių skirtumas yra išskiriamas žemojo dažnio filtru. Jeigu generatorių dažniai skiriasi nedaug, tai gaunamo skirtumo dažnis yra žemas. Tačiau skirtuminio dažnio stabilumas išlieka aukštas, nes aukštojo dažnio generatorių virpesių kontūrai yra didelės kokybės ir jų virpesių dažnis gana stabilus. Taip pat gaunama gana „švari“ harmoninė įtampa, nes tokiuose generatoriuose amplitudžių ir fazių balansas yra garantuojamas praktiškai tik kontūro rezonansiniam dažniui. Diapazoniniame generatoriuje



2.9 pav. Interferencinio valdančiojo generatoriaus struktūrinė schema

ADG1 dažnis yra perderinamas ir jo didžiausia vertė turi skirtis nuo fiksuotojo dažnio generatoriaus ADG2 dažnio tokiu dydžiu, koks yra diapazono dažnių ruožas $F_{\max}$:

$$f_{1\max} = f_2 + F_{\max}.$$

Nesunku įsitikinti, kad nežymiai pakeitus ADG1 dažnį, galima žymiai pakeisti žemąjį dažnį. Pavyzdžiui, kai f_1 keičiamas nuo 100 kHz iki 120 kHz, o f_2 yra 100 kHz, tai F kinta nuo 0 Hz iki 20 kHz, t.y. visam garsinio dažnio ruožui. Tuo tarpu ADG1 dažnio perderinimo koeficientas yra tik 1,2.

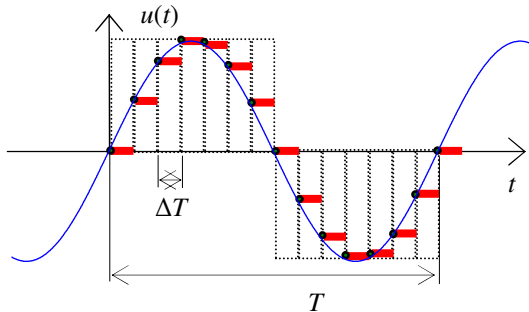
Interferenciniai valdantieji generatoriai naudojami kai reikia tolydžiai plėčiame dažnių ruožui keisti generatoriaus dažnį, pavyzdžiui, svyruojančio dažnio generatoriuose. Taip pat tada, kai svarbus dažnio stabilumas ir maži sinusoidės iškraipymai. Tačiau tokių generatorių schema ir konstrukcija yra sudėtingesnė (reikia gerai ekranuoti aukštojo dažnio generatorius vieną nuo kito, kad nevystų jų dažnių interferencija be dažnių maišiklio) ir jie yra brangesni.

2. Matavimo signalų šaltiniai

Infražemųjų ir žemųjų dažnių diapazonuose naudojami ir valdantieji generatoriai su *tiesiogine skaitmenine signalo sinteze* (angl. *Direct Digital Synthesis* – DDS). Jie formuoja sinusinį signalą kaip diskrečiųjų signalų sumą.

Veikimas yra grindžiamas skaitmeninio kodo formavimu ir jo keitimu su funkciniu skaitmeniniu–analoginiu keitikliu (FSAK) į analoginę įtampą. Keitimo funkcija turi būti sinusinė.

Vienas iš tokios sintezės variantų yra sinusinio signalo aproksimavimas laiptuota funkcija, kurios laiptų skaičius periode yra p , o laipto plotis, t.y. periodo diskretizacijos žingsnis yra ΔT (2,10 paveikslas). Toks diskretizavimas vadinamas diskretizavimu su pastoviu žingsniu. Tačiau šiuo atveju diskrečių signalo lygių skirtumai labai žymūs.



2.10 pav. Sinusinis virpesys diskretizuotas pastoviu žingsniu

Tokio diskrečiojo virpesio i vertę galima užrašyti taip:

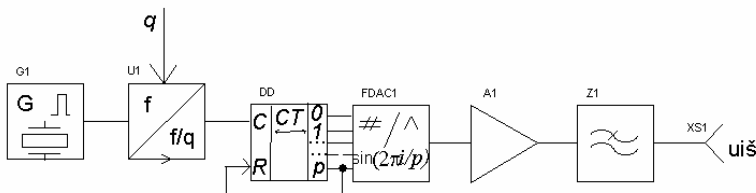
$$u(i, \Delta T) = U_m \sin\left(2\pi i \frac{\Delta T}{T}\right) = U_m \sin\left(2\pi \frac{i}{p}\right),$$

čia $p = T/\Delta T$ yra diskretų skaičius telpantis virpesio periode.

Įvertinus tai kas pasakyta, viena iš galimų virpesio tiesioginės skaitmeninės sintezės schemų variantų pavaizduota 2.11 paveiksle. Taktavimo impulsų generatoriaus G1 su kvarcine dažnio stabilizacija dažnis f_0 yra dalinamas valdomo dalinimo koeficiento q dažnio dalikliu U1 ir patenka į impulsų skaitiklį, kuris skaičiuoja šiuos impulsus. Skaičiaus i kodas iš impulsų skaitiklio yra perduodamas į funkcinį SAK, kurio analoginė išėjimo įtampa yra sinuso funkcija nuo dydžio proporcingo šiam skaičiui. Toliau ši įtampa yra

2. Matavimo signalų šaltiniai

stiprinama tiesiniu stiprintuvu A1 ir filtruojama žemojo dažnio filtru Z1.



2.11 pav. Tiesioginės skaitmeninės sinusinio virpesio sintezės schema

Kadangi skaitiklio talpa yra parinkta lygi p , tai, suskaičiavus iki šio skaičiaus, skaitiklis užpildomas ir aukštas lygis jo išėjime numeta impulsų skaitiklį į pradinę padėtį. Toliau visas periodiškai kartojasi.

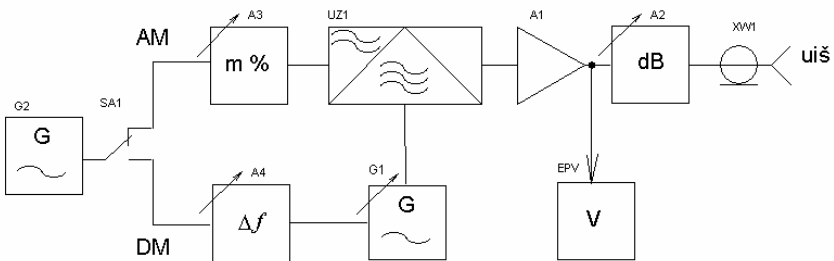
Tokioje schemoje diskretizavimo žingsnis yra: $\Delta T = f_0/q = qT_0$, o virpesio periodas – $T = qpT_0$. Keičiant dažnio daliklio U1 dalinimo koeficientą q yra keičiamas virpesio periodas T ir dažnis f . Nors suformuota SAK analoginė įtampa yra laiptuota, tačiau jeigu p yra didelis, tai jos skirtumas nuo sinusinės formos bus nežymus. Artimiausios dažniui f virpesio harmonikos yra $(p-1)f$ ir $(p+1)f$. Kai $p = 100$, tai sudaro $99f$ ir $101f$. Todėl harmonikų dažniai labai žymiai skiriasi nuo virpesio dažnio ir lengvai nufiltruojami žemojo dažnio filtru. Po filtro virpesys gaunamas su labai mažais iškraipymais. Be to, virpesio dažnis yra stabilus, nes jo vertė proporcinga stabiliam kvarcinio generatoriaus dažniui.

Skaitmeninės sintezės valdantieji generatoriai leidžia gauti tikslaus ir stabilaus dažnio bei mažai iškraipytus harmoninius virpesius, dauguma jų schemos elementų yra skaitmeniniai ir lengvai suderinami su skaitmeninio valdymo sistemomis (mikroprocesoriais), interfeisų ir indikacijos elementais ir todėl, nežiūrint to, kad yra sudėtingesni, šiuo metu plačiai naudojami.

Esminis tokių generatorių trūkumas yra tas, kad jų dažnis yra keičiamas diskretiškai. Be to, kol kas negalima suformuoti didesnio už kelias dešimtis MHz dažnio virpesių, nes dažnio daliklių ir impulsų skaitiklių veikimo sparta yra ribota, o jie veikia bent p kartų didesne sparta nei formuojamo virpesio dažnis.

2.2.3. Aukštųjų dažnių generatoriai

Tokie generatoriai, kaip minėta, veikia radijo dažnių diapazone, todėl kartais dar vadinami radijo dažnių generatoriais. Jų dažnių diapazonas būna platus. Generuojami nemoduliuoti virpesiai, o taip pat naudojama virpesių amplitudės (AM) bei dažnio (DM) moduliacija bei manipuliacija. Todėl jų bendrojoje struktūrinėje schemoje (2.12 paveikslas) yra ir atitinkami tam tikslui skirti elementai: fiksuotojo dažnio generatorius G2, kuriantis harmoninį arba impulsinį virpesį, amplitudės moduliatorių UZ1 ir kalibruoti įtampų dalikliai A3 ir A4, leidžiantys reguliuoti AM gylį ir dažnio deviaciją. Moduliacijos virpesys gali būti ir išorinis.



2.12 pav. Aukštojo dažnio signalų generatoriaus bendroji struktūrinė schema

Šio tipo generatorių atenuatoriai paprastai turi platesnes reguliavimo ribas ir garantuoja tikslesnį virpesio išėjimo lygio nustatymą. Išėjimo varža fiksuota ir lygi 50 Ω (televiziniams taikymams 75 Ω). Išėjimo signalo lygio tikslesniam nustatymui naudojamas elektroninis voltmetras.

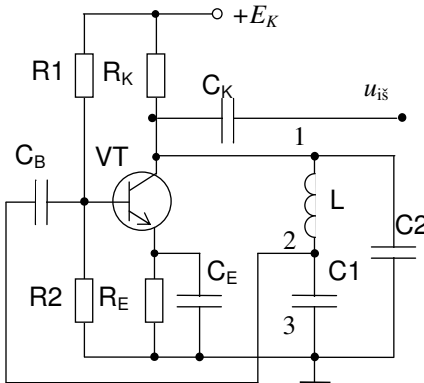
Aukštojo dažnio generatorių valdantieji generatoriai paprastai būna tokie: LC generatoriai, LC interferenciniai generatoriai ir dažnio sintezatoriai.

LC generatoriai leidžia gauti mažai iškraipytus harmoninius virpesius. Naudojami grįžtamojo ryšio generatoriai su LC rezonansinių virpesių kontūru grįžtamojo ryšio grandinėje. Virpesių dažnis keičiamas, keičiant kontūro rezonansinį dažnį: padidapazoniai pakeičiami keičiant kontūro induktyvumą, o padidapazonio ribose

2. Matavimo signalų šaltiniai

dažnis keičiamas tolygiai kontūro kintamosios talpos kondensatoriumi. Praktiškai padiaazonio dažnio ribų santykis yra apie 3 – 4, nes žymiai kintant kontūro talpai, kinta ir jo kokybė bei rezonansinė varža, todėl labai kinta virpesių dažnio stabilumas ir amplitudė. Amplitudės stabilizavimui naudojami stiprintuvai su automatinio stiprinimo reguliavimu (ASR).

Kaip žinoma, LC generatoriai gali būti realizuojami įvykdant induktyvinį grįžtamąjį ryšį, panaudojant induktyvinio arba talpinio tritaškių schemas ir su elektroniniu ryšiu. Plačiausiai naudojama talpinio tritaškio schema (2.13 pav.), nes ją realizuojant tereikia vienos



2.13 pav. Talpinio tritaškio LC generatoriaus schema

induktyvinės ritės, todėl garantuojamas didesnis virpesių dažnio stabilumas ir generatorius gaunamas paprastesnis ir pigesnis.

Generuojamų virpesių dažnis yra artimas virpesių kontūro rezonanso dažniui:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 L}}.$$

Virpesių parametrai gaunami stabilesni, kai sudaromas silpnas ryšys

su bazės grandine, todėl imama

$$C_1 + C_2 \gg C_2 \text{ ir } C_1 \gg C_2.$$

Tada rezonansinio dažnio keitimui pakanka mažos talpos kintamosios talpos kondensatoriaus C₂. Dažnio moduliacija įvykdoma analogiškais metodais kaip įtampa valdomuose generatoriuose valdomas dažnis (žr. 2.15 pav.).

Valdantieji **LC interferenciniai generatoriai** aukštojo dažnio generatoriuose naudojami siekiant išplėsti darbo dažnių diapazoną ir garantuoti vienodus padiaazonių dažnio perderinimo koeficientus. Jų struktūrinė schema nesiskiria nuo pavaizduotos 2.9 paveiksle, o dažnio moduliacija ar manipuliacija vykdoma veikiant fiksuoto dažnio generatoriaus dažnį.

2. Matavimo signalų šaltiniai

LC valdančiųjų generatorių dažnio stabilumas yra dvejomis eilėmis didesnis už RC generatorių ir yra apie $\pm 0,01\%$. Tai pasiekama panaudojant kontūro elementus su priešingo ženklo parametrų priklausomybe nuo temperatūros. Šiuolaikinėje radijo ryšių, radiolokacijos, radionavigacijos ir kitoje elektroninėje aparatūroje naudojamų dažnių stabilumas privalo būti ženkliai didesnis, todėl ir signalų generatoriai naudojami tokiais aparatūrai tirti privalo garantuoti didesnę dažnio stabilumą. Tai galima būtų pasiekti panaudojus generatorius su kvarcine dažnio stabilizacija, tačiau tokių generatorių dažnis yra fiksuotas. Didesniam dažnių skaičiui reikėtų labai daug tokių generatorių su skirtingais dažniais. Tokia įranga būtų labai brangi ir nepatikima. Todėl dabar naudojamos schemos, kuriose yra vienas atraminio dažnio kvarcinis generatorius, o kita aibė dažnių yra sukuriama dažnių formavimo schemomis. Tokie įtaisai įgijo *dažnių sintezatorių* pavadinimą.

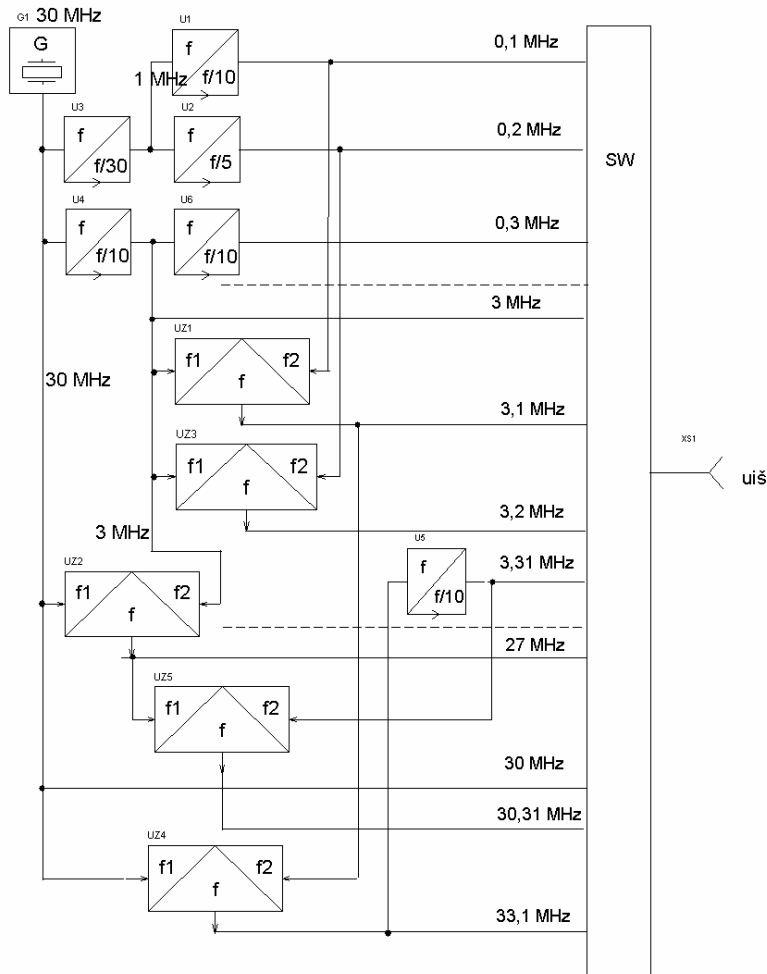
Valdantieji ***generatoriai su dažnio sintezatoriais***. Žinomi du dažnių sintezės metodai: *tiesioginė ir netiesioginė dažnio sintezė*.

Tiesioginė dažnio sintezė yra gaunama, kai atraminio kvarcinio generatoriaus dažnis yra dalinamas skaitmeniniais dažnio dalikliais, o gautoji dažnių visuma toliau keičiama dažnių keitimo schemomis tuos dažnius sumuojant ir atimant ir tuo būdu kuriant didelį skaičių papildomų kombinacinių dažnių. Panaudojus didelį dažnio daliklių ir dažnio keitiklių skaičių, gaunama signalų su įvairiais dažniais visuma plačiame dažnių diapazone, vadinamasis *dažnių tinklelis*. Reikiamas signalas pasirenkamas komutatoriumi. Taigi dažnio keitimas yra diskretus, tačiau galima pasiekti pakankamai nedidelį dažnio keitimo žingsnį, žinoma schemos sudėtingumo sąskaita. Tokio tiesioginio dažnių sintezatoriaus iliustracinė schema yra pavaizduota 2.14 paveiksle.

Schemoje nepavaizduoti juostiniai filtrai, kurie jungiami po dažnių daliklių ir dažnio keitiklių. Tai dar labiau komplikuoja schemą ir ją ypač pabrangina.

Šiuo metu dažnių sintezei plačiau naudojamas *netiesioginės dažnių sintezės* metodas. Jo schema yra žymiai paprastesnė, o dažnių diapazonas gali būti labai platus, esant mažam dažnių diskretizavimo žingsniui.

2. Matavimo signalų šaltiniai

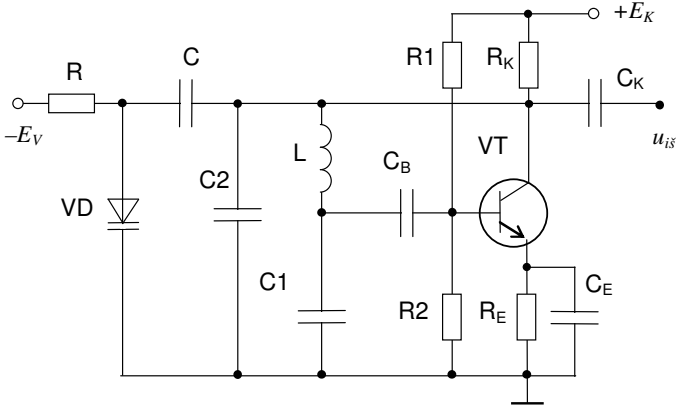


2.14 pav. Tiesioginės dažnių sintezės principo iliustracija

Netiesioginės sintezės dažnio sintetatoriaus pagrindiniai elementai yra atraminio dažnio kvarcinis generatorius ir įtampa valdomas generatorius (*angl. Voltage-Controlled Oscillator – VCO*), kurio dažnis valdomas išorine įtampa. Dažnį valdo puslaidininkių diodai – varikapai, kurių barjerinė pn sandūros talpa kinta priklausomai nuo prijungtos atbulinės sandūros įtampos dydžio.

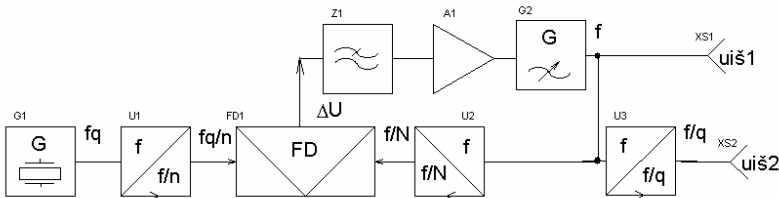
2. Matavimo signalų šaltiniai

Varikapas VD jungiamas per ryšio kondensatorių C lygiagrečiai LC generatoriaus virpesių kontūro kondensatoriui C2 (2.15 pav.).



2. 15 pav. Valdomo dažnio talpinio tritaškio LC generatoriaus schema

Sintezatoriaus struktūrinė schema yra parodyta 2.16 paveiksle. Įtampa valdomo generatoriaus G2 dažnis yra padalinamas valdomu dažnio dalikliu, kurio dažnio dalinimo koeficientas yra N ir gauto virpesio fazė yra palyginama faziniame detektoriuje FD su iki tokio paties dažnio padalinto atraminio kvarcinio generatoriaus virpesio faze. Fazinio detektoriaus paklaidos įtampa $\pm\Delta U$ po filtravimo ŽDF ir stiprinimo valdo įtampa valdomo generatoriaus dažnį. Taip gaunama dažnio fazinio paderinimo kilpa (*angl. Phase-Lock Loop – PLL*), palaikanti stabilų įtampa valdomo generatoriaus dažnį f .



2.16 pav. Netiesioginės sintezės dažnio sintezatoriaus struktūrinė schema

2. Matavimo signalų šaltiniai

Kaip minėta dažniai fazinio detektoriaus įėjimuose yra palaikomi lygūs:

$$\frac{f_q}{n} = \frac{f}{N}.$$

Todėl įtampa valdomo generatoriaus dažnis gaunamas kartotinis atraminio kvarcinio generatoriaus dažniui:

$$f = \frac{Nf_q}{n}.$$

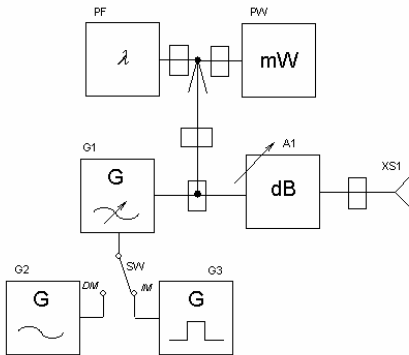
Keičiant dažnio daliklio dažnio dalinimo koeficientą N , galima diskretiškai plačiose ribose keisti įtampa valdomo generatoriaus dažnį jo dažnių diapazono ribose. Panaudojus papildomą dažnių daliklį galima gauti padalintą pastoviu dydžiu q generatoriaus dažnį. Todėl tokiu metodu galima generuoti ir aukštus ir žemus dažnius. Dažnai dalinimo koeficientai valdomi mikroprocesoriais skaitmeniniu būdu.

2.2.4. Superaukštųjų dažnių (SAD) generatoriai

Gaminami dažnių diapazonui nuo 1 GHz iki 100 GHz. Išleidžiami atskiri generatoriai tam tikram vienam šio diapazono padiapazoniui, kurių dažnių perderinimo koeficientas yra apie 1,5–2. Žemesnių šio diapazono dažnių valdantieji generatoriai sudaromi analogiškai kaip LC generatoriai su koaksialinių linijų atkarpų pavidalo virpamosiomis sistemomis ir didelio ribinio veikimo dažnio galio arsenido tranzistoriais. Tokio generatoriaus signalų perdavimo traktai ir išėjimo grandinė yra koaksialiniai. Generatoriai neturi papildomų stiprintuvų, todėl išėjimo galia yra sąlygojama valdančiojo generatoriaus galios.

Aukštesnių dažnių diapazonuose valdantieji generatoriai sudaromi su tūrinų rezonatorių pavidalo virpamosiomis sistemomis ir mikrobangų generavimui skirtais įtaisais: atbulinės bangos lempomis, refleksiniais klisonais ir magnetronais. Virpamosios sistemos sudaro šių aktyvių elektronikos įtaisų sandaros dalį. Tokių generatorių signalo perdavimo ir išėjimo grandinės yra bangolaidinės (2.17 pav.). Generatoriaus kuriama galia yra matuojama milivatmetru PW, o generuojamo virpesio dažnis – rezonansiniu bangomačiu PF. Reikiamas išėjimo virpesio galios lygis yra pasirenkamas

2. Matavimo signalų šaltiniai



2.17 pav. SAD signalų generatoriaus bendroji struktūrinė schema

reguliuojamu atenuatoriumi A1. SAD signalų generatoriuose yra naudojama virpesio dažninė moduliacija ir manipuliacija DM bei impulsinė amplitudės manipuliacija IM. Numatoma galimybė naudoti ir išorinius moduliuojančių virpesių šaltinius.

SAD signalų generatoriai plačiai naudojami matuojant šio diapazono radijo imtuvų jautrį, tiriant SAD diapazono antenų kryptines charakteristikas, SAD signalo perdavimo

traktų savybes, derinant SAD signalų atenuatorius ir kitais atvejais.

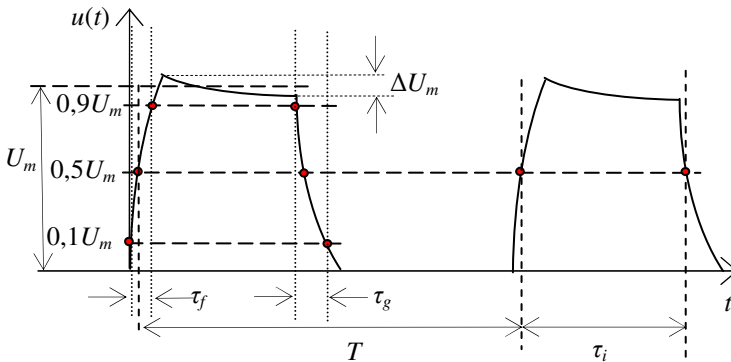
2.2. Impulsų generatoriai

Impulsų generatoriai generuoja periodinius artimus stačiakampiui formos impulsus. Naudojami impulsinės moduliacijos, impulsinių ir skaitmeninių schemų tyrimo, oscilografinių matavimų ir kitais atvejais.

Pagrindiniai impulsinių generatorių parametrai yra: impulsų pasikartojimo dažnio F arba periodo T diapazonas, impulsų trukmės τ_i keitimo ribos, impulsų vėlinimo atžvilgiu sinchronizacijos impulsų laiko τ_v keitimo diapazonas, impulsų amplitudės U_m keitimo ribos ir išėjimo varža. Taip pat aptariami impulsų iškraipymus nusakantys parametrai: priekinio fronto trukmė τ_f , galinio fronto trukmė τ_g bei impulso plokščiosios dalies kitimo dydis ΔU_m (2.18 pav.). Realūs impulsai yra dar sudėtingesnės formos ir jiems aprašyti pasitelkiama dar daugiau parametrų.

Dažnių (arba **periodo** trukmės) **diapazonas** gali būti ištisinis arba suskaidytas į kelias dalis. Diapazono dalių kraštiniai dažniai turi su nežymia atsarga persidengti. Impulsų pasikartojimo dažniai būna nuo 0,01 Hz iki 1 GHz.

2. Matavimo signalų šaltiniai



2,18 pav. Impulsų parametrų normavimas

Impulsų amplitudės keitimo ribos parodo kokiose ribose gali būti nustatyta impulsų amplitudės vertė U_m . Amplitudės mažiausią galimą vertę riboja trukdžių lygis generatoriaus išėjime, o jos didžiausią vertę – generatoriaus impulsinė galia. Amplitudė yra valdoma išėjimo grandinės kompensuotais varžiniais įtampos dalikliais – *ateniuatoriais* – padalinant įtampą. Paprastai naudojami dviejų pakopų įtampos dalikliai: viena pakopa leidžia įtampą keisti šuoliais), o antra pakopa – tolygiai. Impulsų amplitudė būna nuo 1 mV iki 100 V.

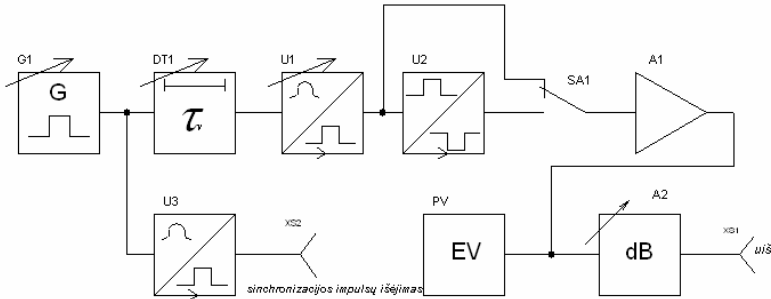
Impulsų trukmės keitimo ribos nurodo kokios trukmės impulsus galima generuoti. Pasirinkus pasikartojimo periodą T ir impulsų trukmę τ_i yra gaunamas tam tikras impulsų sekos parametras – *impulsų retis* Q , kuris matuojamas impulsų pasikartojimo periodo ir jų trukmės santykiu: $Q = T/\tau_i$. Realiai šis parametras turi būti didesnis už vienetą, nes priešingu atveju, impulsų seka virsta nuolatine įtampa. Generatorių impulsų trukmės būna nuo kelių pikosekundžių iki kelių sekundžių.

Generatoriaus išėjimo **impulsus galima vėlinti** laiku τ_v atžvilgiu jo kuriamą sinchronizacijos impulsų. Tai leidžia geriau atlikti oscilografinius matavimus arba tirti grandinių vėlinimo laikus. Jeigu sinchronizacijos impulsai nenaudojami, tai šio parametro keitimas nedaro įtakos suformuotų impulsų sekai.

Impulsų generatoriaus bendroji struktūrinė schema yra parodyta 2.19 paveiksle. Impulsų pasikartojimo periodą ir jo stabilumą nustato

2. Matavimo signalų šaltiniai

taktinis generatorius G1, kuriuo, priklausomai nuo konkrečių sąlygų, gali būti RC arba LC generatorius su trumpų impulsų formavimo schema arba multivibratorius.



2.19 pav. Impulsų generatoriaus bendroji struktūrinė schema

Sinchronizacijos impulsų formavimo schema iš taktinių impulsų suformuoja nustatytos amplitudės ir pasirinkamo poliarumo impulsus, kurie perduodami į sinchronizacijos impulsų išėjimą.

Valdoma vėlinimo grandinė DT1 suvėlina taktinius impulsus paduodamus į impulsų formavimo schemą U1, todėl generatoriaus išėjimo impulsai vėluoja atžvilgiu sinchronizacijos impulsų. Kaip vėlinimo grandinė dažnai naudojamos schemos su laukiančiais multivibratoriais.

Impulsų formavimo schema U1 suformuoja nustatytos trukmės ir tam tikros amplitudės savo forma artimus stačiakampiui impulsus. Ši schema dažniausiai irgi yra laukiantis multivibratorius.

Impulsų poliarumo keitiklis U2 invertuoja impulsus ir perjungikliu SA1 galima pasirinkti teigiamo arba neigiamo poliarumo impulsus.

Išėjimo grandinė atlieka impulsų galios stiprinimą ir nustato generatoriaus išėjimo varžą. Dažniausiai šis grandinės funkcijas atlieka emiterinis kartotuvas A1. Impulsų generatorių išėjimo varža, kaip taisyklė, yra 50 Ω .

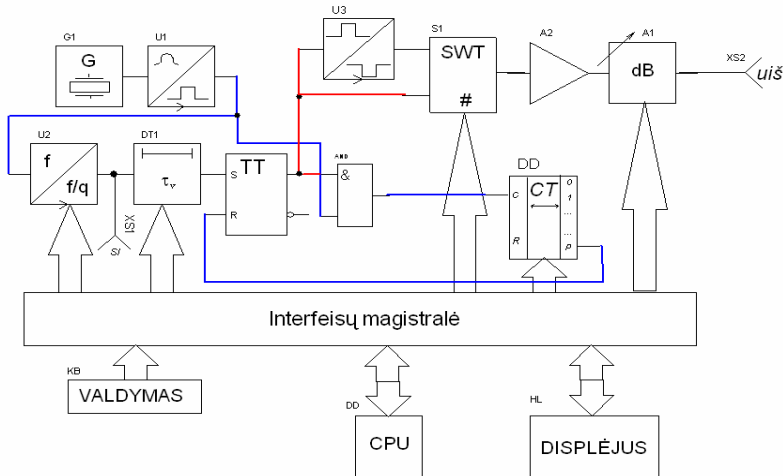
Suformuotų impulsų amplitudė matuojama impulsiniu elektroniniu voltmetru PV. Amplitudės dydis generatoriaus išėjime nustatomas atenuatoriais A2. Kadangi impulsų spektras, ypač trumpų, yra labai platus, tai naudojami plačiajuosčiai varžiniai

2. Matavimo signalų šaltiniai

įtampų dalikliai, kuriuose panaudotos parazitinių talpų kompensavimo schemas.

Aptarta impulsinio generatoriaus schema nepasižymi aukštu parametrų nustatymo tikslumu ir stabilumu, nes joje naudojami analoginės elektronikos ir impulsinės technikos elementai. Geresni rezultatai gaunami panaudojant skaitmenines impulsų formavimo schemas.

Skaitmeninio impulsų generatoriaus struktūrinė schema yra parodyta 2.20 paveiksle.



2.20 pav. Skaitmeninio impulsų generatoriaus su mikroprocesoriniu valdymu bendroji struktūrinė schema

Schema taktuojama taktinių impulsų šaltiniu, kurį sudaro kvarcinis generatorius $G1$ ir trumpų impulsų formuotuvas $U1$. Šių impulsų dažnis yra f_0 , o periodas – T_0 . Toliau šie impulsai panaudojami dvejopai: patekę į laiko selektoriaus (sutapimo schemas AND) skaitinį įėjimą, jam esant atviram, yra perduodami į impulsų skaitiklį $CT1$, o patekę į valdomą skaitmeninį dažnio daliklį $U2$, kurio dažnio dalinimo koeficientas yra q , suformuoja impulsus, kurių pasikartojimo periodas ir nustato generatoriaus impulsų pasikartojimo periodą $T = qT_0$. Šie impulsai patenka į generatoriaus sinchronizacijos impulsų išėjimą $XS1$ ir valdomą skaitmeninę

vėlinimo schemą DT1. Vėlinimo schema dažniausiai realizuojama kaip valdomas postūmio registras ir suvėlina impulsus vėlinimo laiku τ_v . Suvėlinti impulsai patenka į RS trigerio TT aukšto lygio nustatymo įėjimą ir sukuria aukštą lygį jo išėjime. Impulsų skaitiklio talpa yra C , tačiau į jį iš anksto įrašomas tam tikras skaičius A , taigi jo faktinė talpa yra m . Kai impulsų skaitiklis suskaičiuoja m impulsų, skaitiklio užpildymo signalas, numeta RS trigerį TT į žemo lygio padėtį. Taip trigerio išėjime yra suformuojamas impulsas, kurio trukmė yra $\tau_i = mT_0$. Šis impulsas yra paduodamas į generatoriaus išėjimo grandinę, kuri yra analogiška 2.19 paveikslo schemos išėjimo grandinei.

Tokie impulsų generatoriai sudaryti praktiškai vien iš skaitmeninių elementų, todėl lengvai suderinami su mikroprocesorinio valdymo sistemomis ir turi žymiai stabilesnius ir tiksliau nustatomus impulsų sekos parametrus (grindžiamus kvarcinio generatoriaus dažnio stabilumu). Jų esminis trūkumas yra tas, kad dėl skaitmeninių schemų ribotos veikimo spartos negalima kol kas sukurti didelio pasikartojimo dažnio ir trumpų impulsų virpesių.

2.3. Funkcijų ir pasirenkamos kreivės formos generatoriai

Funkcijų generatoriai yra plačiai naudojami bendrosios paskirties signalų šaltiniai. Kadangi šiuolaikinės elektronikos įtaisų paskirtis ir funkcijos yra labai įvairios, tai jų tyrimui reikia labai įvairios formos virpesių. Funkcijų generatoriai dažniausiai teikia *sinusinės*, *stačiakampės*, *trikampės* ir *pjūklo dantų* pavidalo įtampos virpesius. Gali būti kuriami ir kitokios formos (pavyzdžiui, sudvejintų impulsų) bei moduluotieji ir svyruojančio dažnio virpesiai.

Tradiciškai tokių įtampų formavimo seka gali būti tokia: anksčiau aptartais būdais generuojamas sinusinis virpesys, iš jo amplitudės ribotuvais yra suformuojamas periodinis artimas stačiakampiui virpesys, o iš pastarojo, integruojant gaunamas trikampis virpesys ir pjūklo dantų virpesys.

2. Matavimo signalų šaltiniai

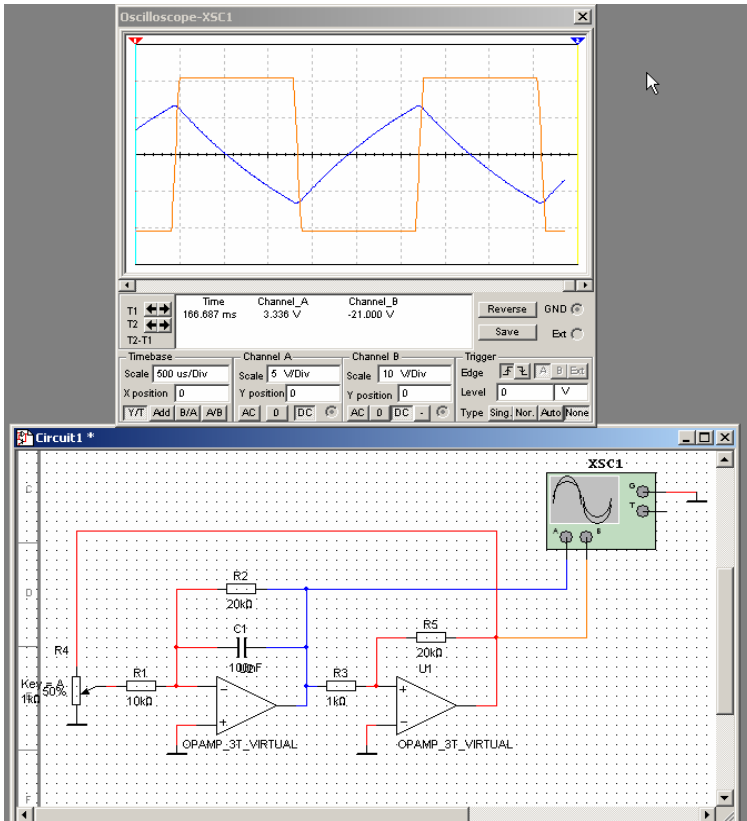
Šiuo metu naudojama kita tokių virpesių formavimo schema. Naudojamas autogeneratorius, kurio grįžtamojo ryšio kilpa sudaryta iš integratoriaus ir neinvertuojančio Šmito trigerio: trigerio išėjimo įtampa paduodama į integratoriaus įėjimą, o pastarojo išėjimas prijungiamas prie Šmito trigerio įėjimo (2.21 pav.). Kai įtampa trigerio išėjime yra aukšto lygio (artima teigiamai maitinimo įtampos vertei $+E$), tai integratoriaus įėjimo įtampa yra teigiama ir jo išėjimo įtampa tiesiškai mažėja, artėdama prie Šmito trigerio neigiamos perjungimo slenksčio įtampos. Slenksčio įtampą nustato įtampos daliklis R5R3 Šmito trigerio teigiamojo grįžtamojo ryšio grandinėje. Pasiekus neigiamo slenksčio įtampos lygį, Šmito trigeris persijungia ir jo išėjimo įtampa tampa neigiama. Tada pasikeičia ir integratoriaus įėjimo įtampos ženklas ir jo išėjimo įtampa pradeda tiesiškai augti tol, kol pasiekusi trigerio viršutinio perjungimo slenksčio įtampą vėl jį perjungia į aukštą lygį. Taip procesas periodiškai kartojasi, o trigerio išėjime gaunama meandro formos stačiakampė periodinė įtampa, o integratoriaus išėjime – simetrinė trikampė įtampa. Virpesio periodas priklauso nuo integratoriaus įtampos augimo spartos, t.y. nuo jo integravimo konstantos $R1C1$. Jeigu integratoriaus įėjime sudarysime papildomą įtampos daliklį, tai jo dalinimo koeficientas taip pat įtakos virpesių periodą, nes nuo jo priklausys integruojamos įtampos lygis ir integratoriaus išėjimo įtampos augimo sparta. Panaudojus reguliuojamą įtampos daliklį (schemoje R4), galima tolygiai keisti virpesių dažnį padiapazonio ribose, o padiapazonius perjungti, perjungiant integratoriaus kondensatoriaus C1 talpą.

Sinusinė įtampa funkciname generatoriuje yra formuojama iš trikampės panaudojant netiesines grandines su atitinkama įtampos perdavimo funkcija. Tokios sinusoidės formavimo grandinės įgijo *sinuso formuotuvo* pavadinimą (*angl. sine-shaper*). Reikiama perdavimo funkcija yra dažniausiai aproksimuojama tiesių atkarpomis, panaudojant diodines–rezistyvines grandinėles (2.22 pav.).

Schemos veikimas yra labai paprastas: kai didėjanti trikampė įėjimo įtampa pasiekia vertę $+E1$, tai tampa atviras diodas D1 ir lygiagrečiai įtampos daliklio R1R2 rezistoriui R2 prijungiamas rezistorius R3, todėl bendra jų varža sumažėja, paduodama įtampa dalinama daugiau ir išėjimo įtampa auga lėčiau. Trikampei įtampai

2. Matavimo signalų šaltiniai

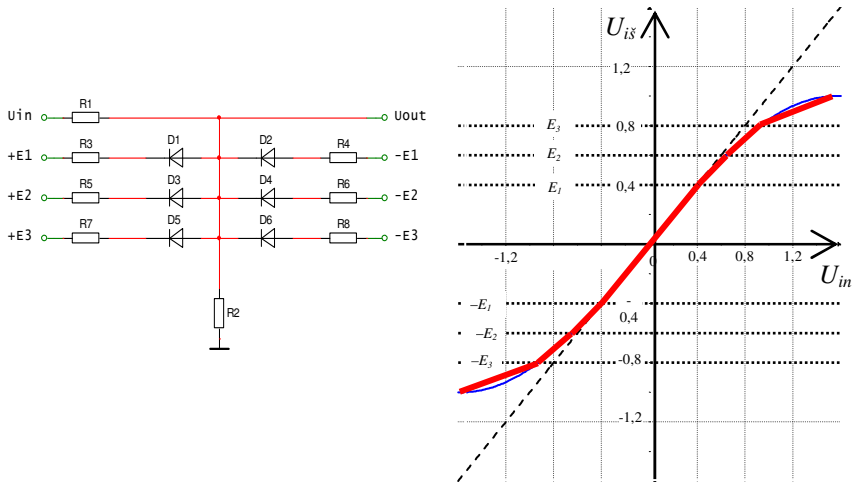
pasiekus vertę E2, atsidaro diodas D3 ir įtampos dalinimas padidėja, o išėjimo įtampos augimo sparta dar daugiau sulėtėja. Procesas atvirkščia tvarka vyksta ir įtampai mažėjant iki neigiamos amplitudinės vertės, o po to kartojasi.



2.21 pav. Funkcinio generatoriaus stačiakampės ir trikampės įtampos formavimo schema ir virpesių oscilogramos

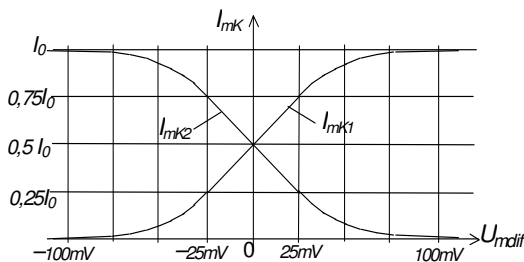
Kaip matosi iš 2.22 paveikslo grafiko pakankamai gera aproksimacija gaunama su šešių diodų grandinėle. Panaudojus daugiau diodų, aproksimacijos tikslumą galima padidinti.

2. Matavimo signalų šaltiniai



2.22 pav. Sinusinį virpesį formuojančios grandinės schema ir įtamos perdavimo funkcija (stora linija)

Kitas galimas metodas yra diferencinės stiprinimo pakopos perdavimo funkcijos netiesiškumo, kai įėjimo įtampa yra didelė, išnaudojimas. Tokios pakopos amplitudinė charakteristika yra parodyta 2.23 paveiksle. Jos palyginimas su 2.22 paveiksle pavaizduotu sinusinės funkcijos kitimu rodo, kad tokia charakteristika leidžia gauti taip pat neblogą aproksimaciją.



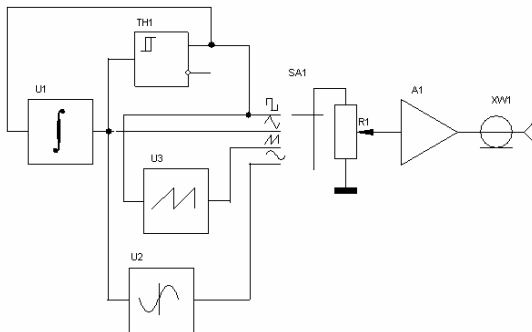
2.23 pav. Diferencinės stiprinimo pakopos amplitudinės charakteristikos (I_0 – pakopos srovės šaltinio srovė)

Aptarę virpesių formavimo principus, pateiksime bendrąją funkcijų generatoriaus struktūrinę schemą ir suformuluosime kokie

2. Matavimo signalų šaltiniai

jų parametrai norminami ir kokie jie būna. Schemoje (2.24 pav.) integratorius U1 ir Šmito trigeris TH1 sudaro jau išnagrinėtą anksčiau autovirpesių schemą, generuojančią stačiakampius ir trikampus simetrinius virpesius. Trikampiai virpesiai sinuso formuotuvu U2 keičiami į sinusinius virpesius, o stačiakampiai virpesiai formuotuvu U3 – į pjūklo dantų pavidalo virpesius. Reikiamą virpesio formą galime pasirinkti perjungikliu SA1, o jo lygį keisti lygio reguliatoriumi R1. Suformuoti virpesiai stiprinami plačiajuosčiu stiprintuvu A1. Tokiuose generatoriuose dar numatyta galimybė prie virpesio pridėti reguliuojamą nuolatinę dedamąją ir vykdyti virpesių dažnio moduliaciją iš išorės. Taip pat yra suformuojami sinchroimpulsai.

Funkcijų generatorių yra bendrosios paskirties matavimo priemonė, todėl jų parametrai nėra griežtai norminami. Virpesių dažnių diapazonas būna nuo 0,001 Hz iki 20 MHz su kelių procentų dažnio nustatymo paklaida. Išėjimo įtampos amplitudė siekia iki 20 V, o tipinės išėjimo varžos būna 50 Ω ir 600 Ω . Sinusinio signalo harmonikų koeficientas siekia iki 5 %, trikampių ir pjūklo dantų formos virpesių netiesiškumas neviršija 5 %, o stačiakampių virpesių priekinio ir galinio frontų trukmės bei pjūklo dantų formos virpesių kritimo laikas neviršija 0,2 μ s. Stačiakampių virpesių retis yra 2 ± 1 % (meandro pavidalo virpesiai).



2.24 pav. Analoginio funkcijų generatoriaus bendroji struktūrinė schema

Kadangi tokie generatoriai dažniausiai eksploatuojami kartu su oscilografais, tai juose nenumatyta galimybė matuoti išėjimo įtampą.

2. Matavimo signalų šaltiniai

Paprastiausio analoginio funkcijų generatoriaus valdymo panelio vaizdas parodytas 2.25 paveiksle.



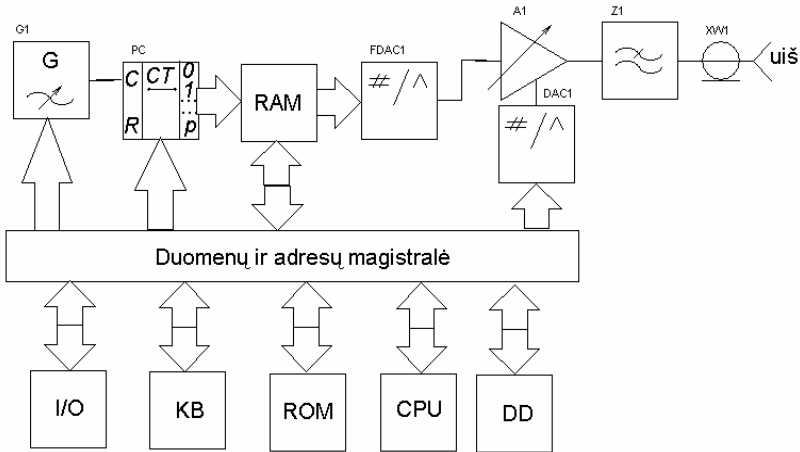
2.25 Analoginio funkcijų generatoriaus Г6–27 bendras vaizdas

Pastaruosiu metu plinta skaitmeniniai funkcijų generatoriai su žymiai išplėstu pasirenkamų funkcijų skaičiumi. Be jau aptartų funkcijų dar numatomi virpesiai su gėstančia tiesiniu ir eksponentiniu dėsniais amplitudė, tiesiniu ir logaritminiu dėsniais svyruojančio dažnio virpesiai, virpesių paketų formavimas su galimybe tarp paketų įterpti tam tikro lygio plačiajuostį triukšmą. Taip pat numatyta virpesių amplitudės manipuliacija (*angl.* amplitude-shift keying – ASK), dažnio manipuliacija (*angl.* frequency-shift keying – FSK) ir fazės manipuliacija (*angl.* phase-shift keying – PSK). Yra taip pat galima įvairių virpesių pasirenkama kombinacija, o kartais net vartotojo paties pasirinkta iš atskirų taškų virpesio forma. Tokie generatoriai įgijo **pasirenkamos kreivės formos** (*angl.* arbitrary waveform) virpesių generatorių pavadinimą. Jie sudaromi pagal struktūrinę schemą (2.26 pav.) analogišką harmoninių virpesių skaitmeniniams generatoriams (žr. 2.11 pav.) ir virpesius formuoja tiesioginės skaitmeninės sintezės metodu.

Virpesio kreivės formų bibliotekos yra saugomos generatoriaus **pastovioje atmintyje** (*angl.* Read-only memory – ROM) ir pasirinkus perrašomos į **operatyvinę atmintį** (*angl.* Random access memory – RAM). Vartotojo formuojama kreivės forma įvedama iš klaviatūros (KB) tiesiai į RAM. Generatoriaus darbą valdo bei parametrus

2. Matavimo signalų šaltiniai

kontroliuoja *mikrovaldiklis* (angl. Central Processing Unit – CPU), o parametrų vertes rodo duomenų displėjus (DD).



2.26 pav. Pasirenkamos kreivės formos virpesių generatoriaus bendroji struktūrinė schema

Informacija apie kreivės formą iš RAM patenka į funkcinį skaitmeninį–analoginį keitiklį FDAC, kurio kuriamas virpesys po filtravimo nuo diskterizavimo triukšmo ir stiprinimo teikiamas į generatoriaus išėjimą. Generatorius taktuojamas iš netiesioginės dažnių sintezės dažnių sintezatoriaus G1. Tokius generatorius dabar gamina daugelio šalių matavimo prietaisų gamybos įmonės. Jų parametrai ir galimybės yra labai įvairios. 2.27 paveiksle yra parodytas firmos Agilent Technologies funkcijų ir pasirenkamos kreivės formos virpesių generatoriaus 33220A bendras vaizdas. Generatoriaus harmoninių ir stačiakampių simetrinių virpesių dažnių diapazonas yra iki 20 MHz, o pasirenkama kreivės forma gali būti sudaryta iš 64 000 14 bitų skiltiškumo taškų su iki 50 milijonų imčių per sekundę ėmimo sparta. Generatorius turi USB, GPIB ir LAN interfeisus.

2. Matavimo signalų šaltiniai



2.27 pav. Firmos Agilent Technologies funkcijų ir pasirenkamos kreivės formos virpesių generatoriaus 33220A valdymo panelio ir galinio panelio bendras vaizdas

2.4. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui

1. Kokia matavimo generatorių bendroji struktūrinė schema?
2. Kokie dažnių diapazonai sąlyginai vadinami infražemojo dažnio, žemojo dažnio, aukštojo dažnio ir superaukštojo dažnio diapazonais?
3. Kokie būna žemojo dažnio generatorių valdantieji generatoriai?
4. Kaip sudaryti žemo dažnio interferenciniai valdantieji generatoriai?
5. Kokios yra RC generatorių schemas?

2. Matavimo signalų šaltiniai

6. RC generatoriuje su Vino tilteliu $C_1 = C_2 = C = 250 \text{ nF}$, $R_1 = R_2 = R$ kinta nuo $200 \text{ } \Omega$ iki $3 \text{ k}\Omega$. Apskaičiuokite generatoriaus dažnių diapazoną.

7. Kaip RC generatoriuje su Vino tilteliu yra stabilizuojama virpesių amplitudė?

8. Nuo ko priklauso ir kaip reguliuojamas žemojo dažnio generatoriaus išėjimo įtampos lygis?

9. Kokie svarbiausi žemo dažnio generatorių metrologiniai parametrai?

10. Kaip normuojamas žemo dažnio generatorių dažnio nestabilumas ir kaip jis matuojamas?

11. Kaip normuojamas žemo dažnio generatorių dažnio nustatymo tikslumas ir kaip jis matuojamas?

12. Ką vadiname generatoriaus išėjimo virpesio DACH ir kaip ji surandama?

13. Ką vadiname harmoninių virpesių generatoriaus virpesio netiesiniais iškraipymais ir kaip jie įvertinami?

14. Nubraižykite tiesioginės skaitmeninės harmoninio signalo sintezės schemą ir paaiškinkite jos veikimą.

15. Nubraižykite aukšto dažnio signalų generatoriaus struktūrinę schemą ir paaiškinkite veikimą.

16. Kokie būna aukšto dažnio generatorių valdantieji generatoriai?

17. Kokios moduliacijos rūšys naudojamos aukšto dažnio matavimo signalų generatoriuose?

18. Kaip įvykdoma amplitudės moduliacija aukšto dažnio generatoriuje?

19. Kaip įvykdoma dažnio moduliacija aukšto dažnio generatoriuje?

20. LC generatorius sudarytas pagal talpinio tritaškio schemą. Apskaičiuokite jo generuojamą dažnį, jeigu $C_1 = 100 \text{ pF}$, $C_2 = 10 \text{ pF}$, o ritės induktyvumas yra $L = 100 \text{ } \mu\text{H}$.

21. Kaip sudaromi tiesioginės sintezės dažnio sintezatoriai?

2. Matavimo signalų šaltiniai

22. Kaip sudaryti ir veikia netiesioginės sintezės dažnio sintezatoriai? Nuo ko priklauso ir kaip keičiamas jų virpesių dažnis?

23. Kokie aukštojo dažnio matavimo generatorių svarbiausieji metrologiniai parametrai?

24. Nubraižykite struktūrinę schemą ir aptarkite veikimą analoginio impulsų generatoriaus.

25. Nubraižykite struktūrinę schemą ir aptarkite veikimą skaitmeninio impulsų generatoriaus.

26. Kokie svarbiausi impulsų generatorių metrologiniai parametrai?

27. Kaip kuriami stačiakampiai ir trikampiai simetriniai virpesiai analoginiuose funkcijų generatoriuose?

28. Nubraižykite schemą ir aptarkite veikimą rezistyvinio–diodinio trikampės simetrinės įtampos keitiklio į sinusinę įtampą.

29. Kokia yra bendroji analoginių funkcijų generatorių struktūrinė schema?

30. Kokie svarbiausi funkcijų generatorių metrologiniai parametrai?

31. Nubraižykite skaitmeninio pasirenkamos virpesių kreivės formos generatoriaus struktūrinę schemą ir aptarkite jos veikimą.

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.

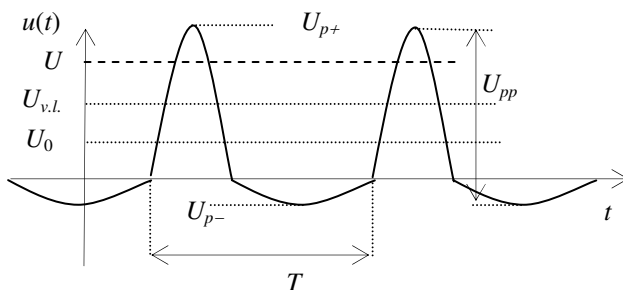
Kaip nustatėme pirmajame skyriuje, tiksliau matuoja palyginimo būdu veikiančios matavimo priemonės. Todėl ir įtampas tiksliau matuoja voltmetrai, kurie veikia palyginimo būdu: **kompensaciniai voltmetrai**. Palyginimo metodai naudojami ir skaitmeniniuose voltmetruose, todėl jų tikslumas irgi yra didesnis.

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:

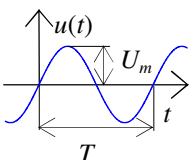
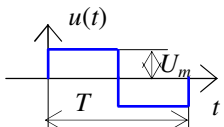
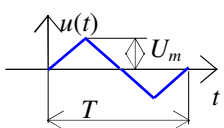
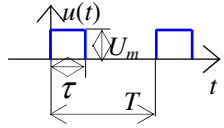
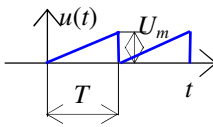
$$U_{v.l.} = \frac{U_v}{1,11}.$$

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 tamptriais elementais: spiralinėmis spyruoklėmis arba plonais susukamais vielos siūleliais. Tada:

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

čia W priklauso tik nuo tamptriojo 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

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

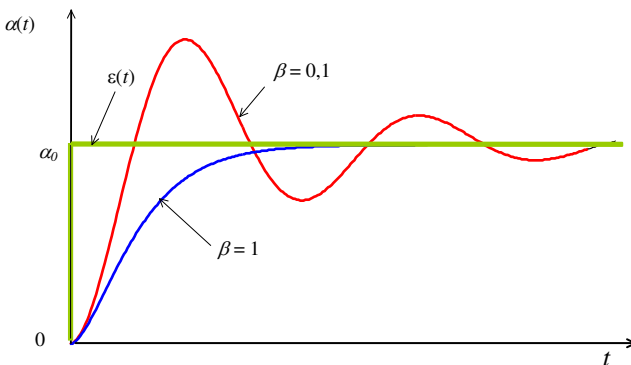
kur $\omega_0^2 = \frac{W}{J}$, ω_0 – sistemos rezonansinių virpesių dažnis;

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

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.



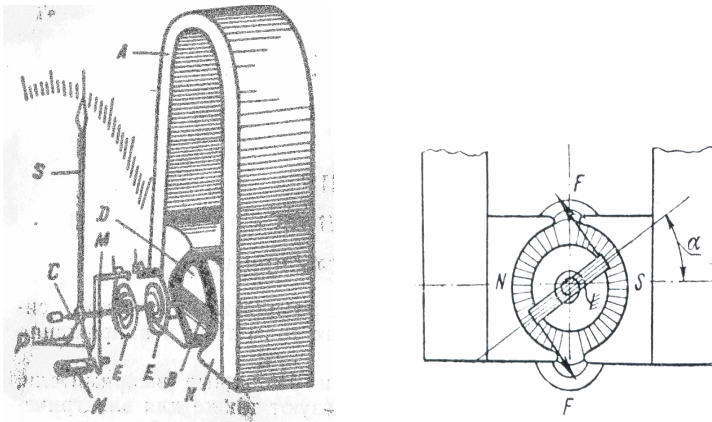
3.2 pav. Elektromechaninio matavimo mechanizmo pereinamosios charakteristikos

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) magnetiniam laukui.

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



3.3 pav. Magnetoelektrinis prietaisas su judrių 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 apviją, polių antgalių radialiniame magnetiniame lauke atsiranda jėga F , veikianti rėmelį taip, kad jo plokštuma būtų statmena magnetinių jėgos linijų kryptims. 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

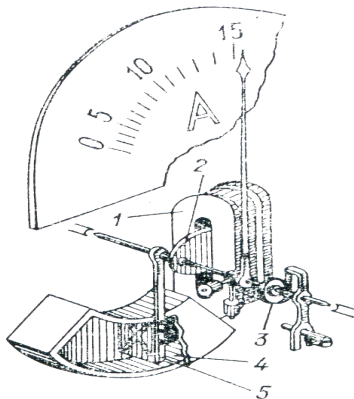
Elektromagnetiniuose matavimo prietaisuose sukimo momentas sukuriamas sąveikaujant rite tekančios matuojamos srovės sukurtam magnetiniam laukui, su viena ar keliomis feromagnetinėmis šerdimis. Paprastai ritės daromos nejudančiomis, o šerdys yra judančios.

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.

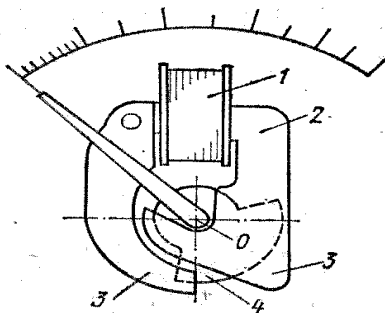
Paveikus išoriniam nuolatiniam magnetiniam laukui, vienas iš momentų, kurio kryptis sutampa su išorinio lauko kryptimi, padidėja, o kitas atitinkamai sumažėja. Suminis momentas nesikeičia.

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).

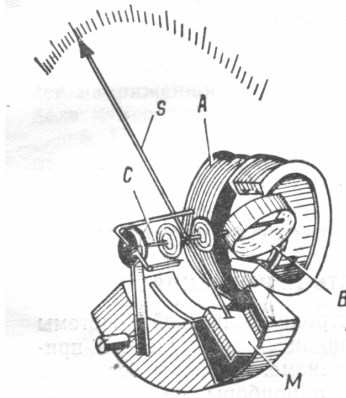
3.3.4. Elektrodinaminiai rodykliniai matavimo prietaisai

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 dempferio 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 kampų 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 elektrodinaminame 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.

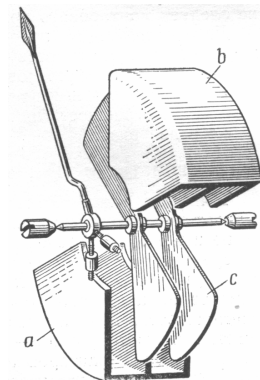
3.3.5. Elektrostatiniai rodykliniai matavimo prietaisai

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

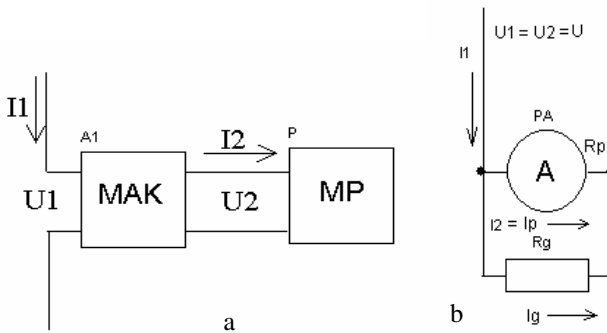
Srovės matavimo priemonės paprastai turi tam tikrą didžiausią leistiną srovę. Pavyzdžiui, elektromechaniniams srovės matavimo prietaisams yra charakteringa vadinamoji pilnojo rodyklės atlenkimo srovė. Didesnė nei ši srovė tokia matavimo priemonė be papildomų matavimo keitiklių negali būti išmatuota. 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,

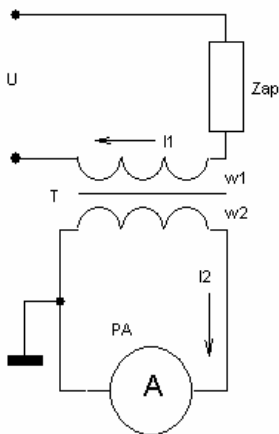
3. Srovės ir įtampos matavimas

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.

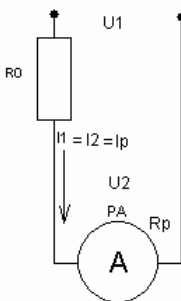
Kadangi antrinio srovės transformatoriaus apvija jungiama prie mažos varžos ampermetro, tai transformatorius dirba artimu trumpajam jungimui režimu. Tačiau tai yra įtampą aukštinantis įtaisas, todėl jo negalima naudoti atjungus matavimo grandinę, nes tuščios eigos režimo antrinė įtampa gali būti didelė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

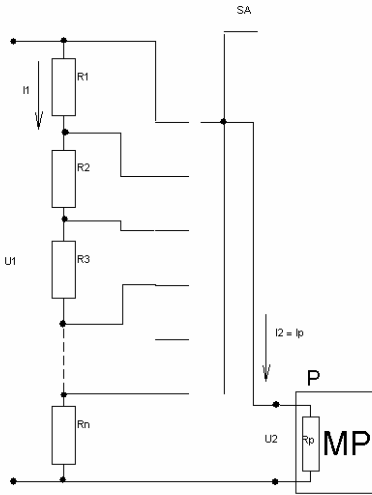
Keičiant įtampos mastelio keitimo koeficientą reikia perjungti kitą priešvaržę. Perjungimo metu yra nutraukiama matavimo grandinė bei kinta įtampos matuoklio įėjimo varža.

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 :

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

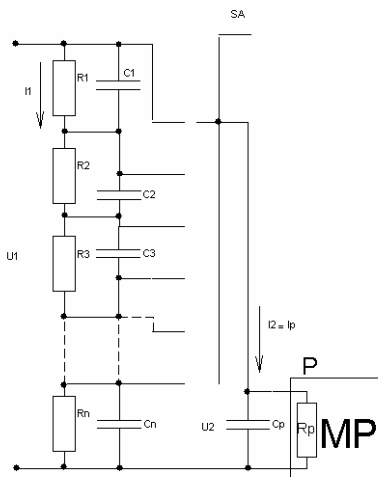
Dalikliai projektuojami taip, kad daliklio srovė I_1 būtų žymiai didesnė už matavimo priemonės srovę I_p . Todėl daliklio rezistorių varžos yra mažesnės už matavimo priemonės varžą ir pastaroji praktiškai daliklio neapkrauna. Tada daliklis gali būti skaičiuojamas kaip neapkrautas daliklis:

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

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

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



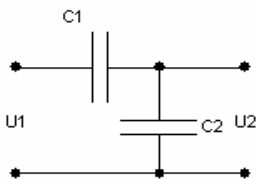
3.12 pav. Kompensuotojo rezistyvinio įtampos daliklio schema

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

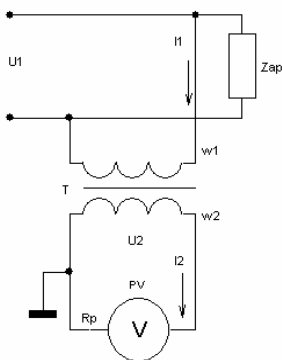
mui naudojami ir ***talpiniai*** įtampos dalikliai. Jie irgi yra diapazoniniai. Paprastai daromi kaip išoriniai fiksuoto dalinimo koeficiento dalikliai iš dviejų kondensatorių (3.13 pav.).

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.)

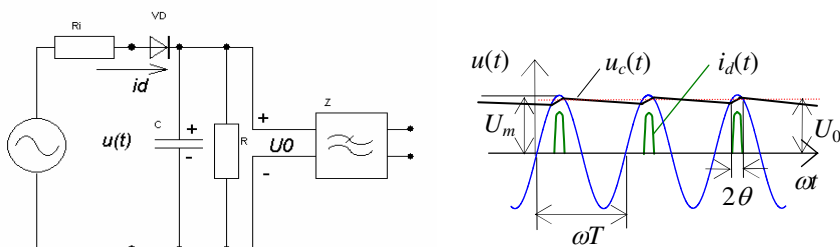
Jeigu keitiklis reaguoja ir į keičiamos įtampos nuolatinę dedamąją, tai jį vadina *atviro įėjimo* keitikliu, o jeigu ne – *uždaro įėjimo*.

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 $(10-20) \text{ M}\Omega$, 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.

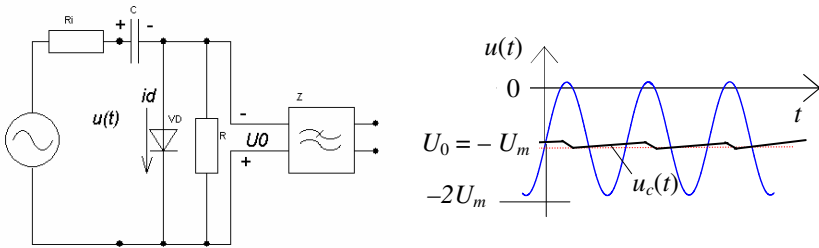
Nuoseklus pikinis detektorius yra jautrus įėjimo įtampos nuolatinei dedamajai, t.y. jis yra atviro įėjimo keitiklis. Teigiama nuolatinė įtampa perduodama per atvirą diodą į detektoriaus išėjimą, o neigiama – papildomai uždaro diodą. Todėl tokie detektoriai nenaudojami kintamosios įtampos voltmetruose.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

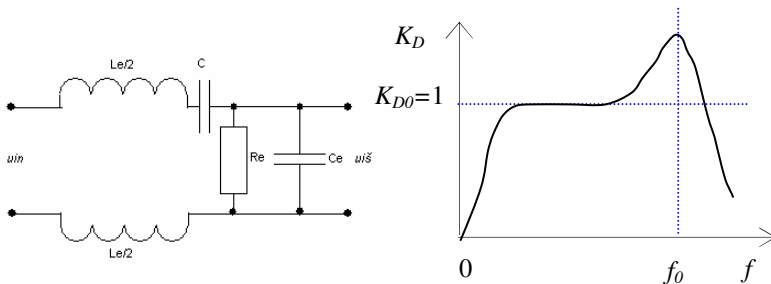
Toks detektorius yra nejautrus įėjimo įtampos nuolatinei dedamajai, nes jos nepraleidžia nuosekliai įjungtas kondensatorius. Tai reikia įvertinti kai keičiama įtampa yra nesimetrinė: detektorius keičia tik kintamąją įtampos dalį (žr. 3.2).

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

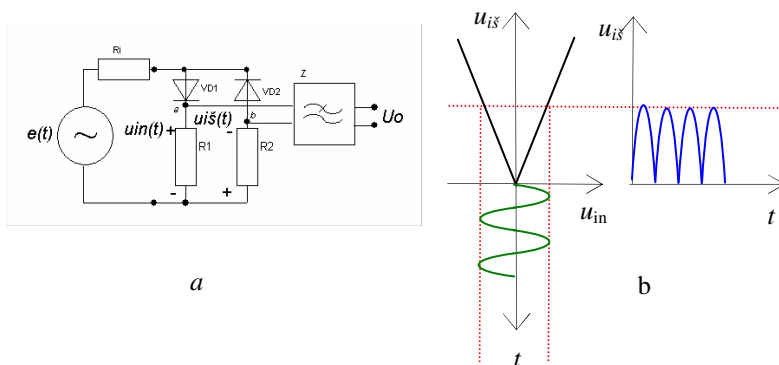
talpos kondensatoriaus išvadu. Matuojama įtampa tada paduodama išoriniais laidais į žemojo dažnio kintamos įtampos prijungimo gnybtus.

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:

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

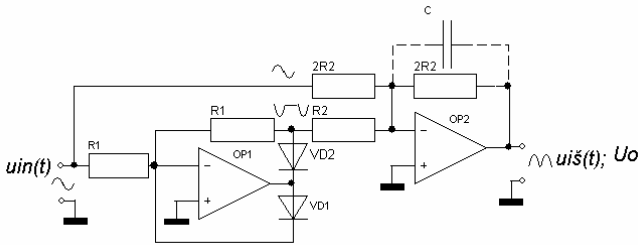
Kaip minėta lygintuviniai tiltelio schemos vidutinių išlygintų verčių keitikliai yra tiesiniai tik kai veikiančios jų įėjime įtampos amplitudės yra didelės. Kai amplitudės mažos, pasireiškia diodų voltamperinių charakteristikų netiesiškumas ir keitikliai veikia netiesiniu režimu. Keitiklių veikimui turi 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.

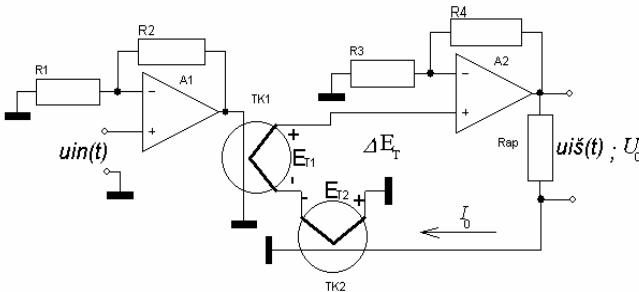
Schemose su termokeitikliais, naudojami termokeitikliai su tiesioginio ir netiesioginio kaitinimo **termoporomis**. Termokeitiklių parametų sklaida nėra žymi ir garantuoja priimtinas keitimo paklaidas. Termoporos termoelektrovara yra proporcinga jos

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:

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

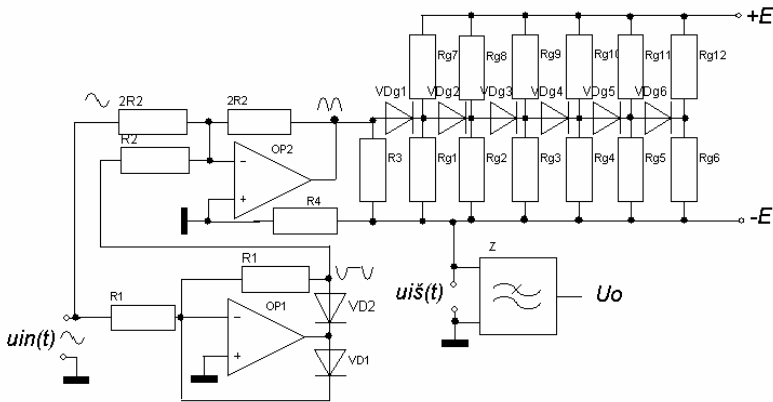
Tokie keitikliai turi tiesinę keitimo charakteristiką, tačiau yra inertiški, bijo perkrovų ir jų keitimo paklaida, dėl termokeitiklių parametrų sklaidos ir jų dreifo senstant keitikliams, gali siekti (2 – 6) %. Darbo dažnių diapazonas gali siekti nuo nuolatinės srovės iki šimto megahercų.

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.

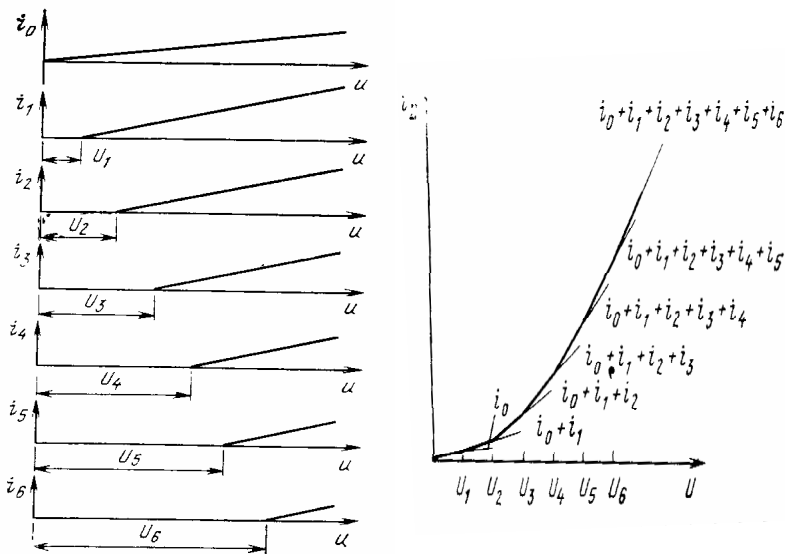
Dar vienas analogiškas keitiklis, kuriame taip pat panaudotas srovės šiluminio veikimo principas yra keitiklis su termorezistoriais. Vienas termorezistorius šildomas įėjimo virpesio srove ir šildo diferencinio stiprintuvo vieną tranzistorių, keisdamas jo išėjimo srovę [8, 164 psl.]. Schemoje yra panaudotas 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 viršiją 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.

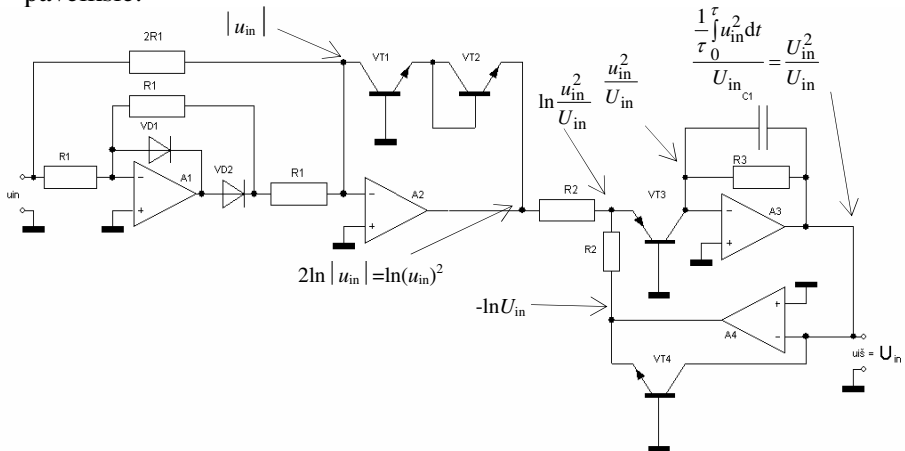
Pagrindinis tokių keitiklių trūkumas yra tas, kad keitiklio charakteristika yra kvadratinė, t.y. nuolatinė įtampa U_0 po integruojančio ŽDF yra kvadratinė keitiklio įėjimo įtampos efektinės vertės funkcija: $U_0 = K_{ND} U_{in}^2$.

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

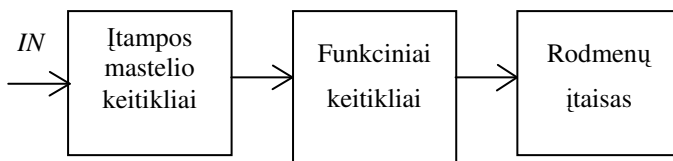
Išnagrinėtoji keitiklio schema pasižymi maža keitimo paklaida (iki 1 %) ir turi žymiai didesnę dinaminį diapazoną nei schema su termokeitikliais, todėl gali keisti virpesių su dideliu amplitudės koeficientu įtampas. Keitiklio dažnių diapazonas siekia dešimtis megahercų.

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

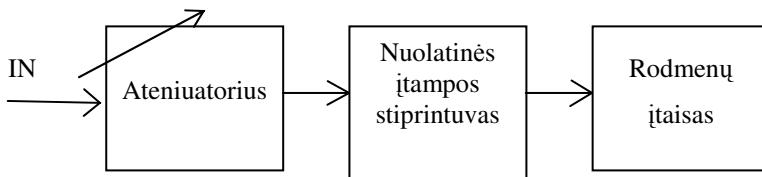
įtampą, bet ir matavimo vienetą, paprasčiau susieti jį į sistemą su kompiuteriu tolimesnei teikiamų matavimo rezultatų analizei bei matavimo proceso valdymui, paklaidų koregavimui bei rezultatų teikimui įvairiais pavidalais: grafikais, diagramomis ir kt.

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 rezistyvusis 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 didelės matavimo paklaidas. 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.

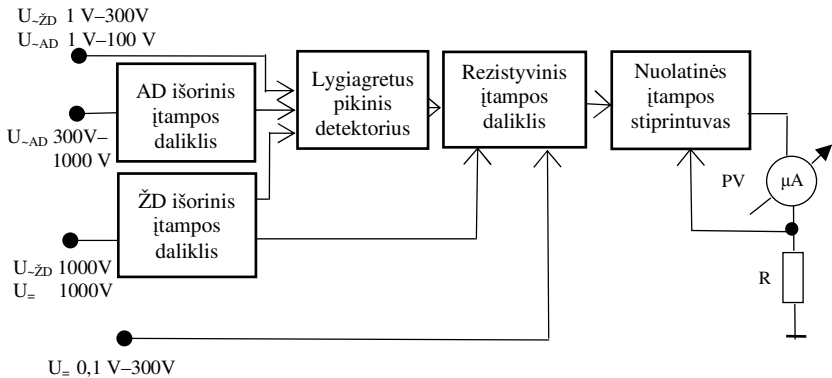
Galimos dvi pagrindinės kintamosios įtampos voltmetrų schemos. Pirmoje kintamoji įtampa funkciniu keitikliu keičiama į nuolatinę ir po to stiprinama nuolatinės įtampos stiprintuvu. Literatūroje tokio tipo schemas vadina „schema detektorius–stiprintuvas“. Antroje scheme kintamoji įtampą iš pradžių stiprinamą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



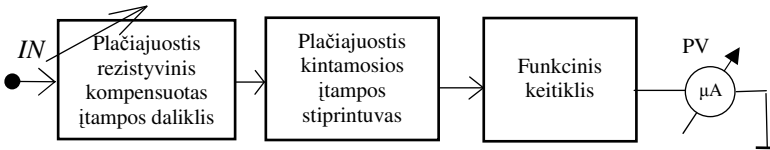
3.26 pav. „Detektorius – stiprintuvas“ universaliojo elektroninio voltmetro struktūrinė schema

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 rezistyvus 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.

Antro tipo schemas



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

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 galima 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

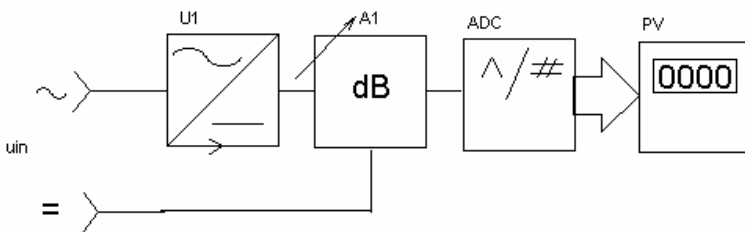
objektyvūs: pateikiami dešimtaine skaitmenine forma prietaiso rodmenų įtaise. Rodmenis lengvai galima registruoti ir perduoti informacijos perdavimo kanalais nemažinant tikslumo, nes jie pateikiami skaitmeninio signalo forma išėjimo jungtyje dvejetainiu arba kitokiu kodu. Skaitmeniniai voltmetrai yra 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

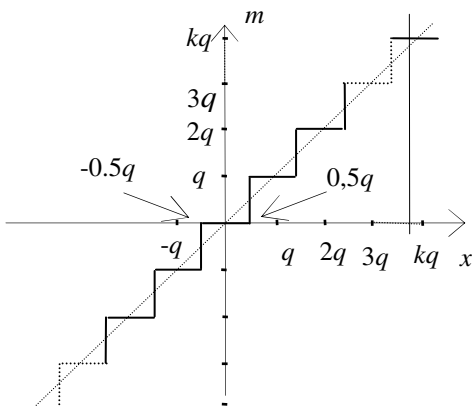
3. Srovės ir įtampos matavimas

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

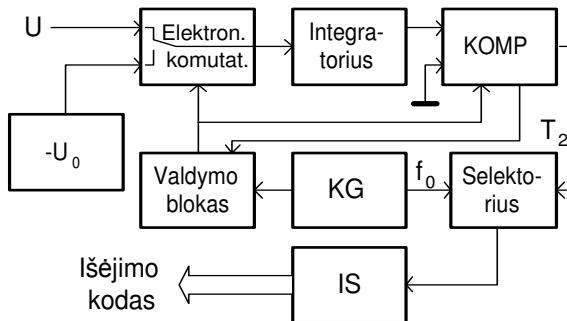
0,1...10 μ s) ir *labai didelės keitimo spartos* (keitimo laikas $\leq 0,01...0,1 \mu$ s).

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

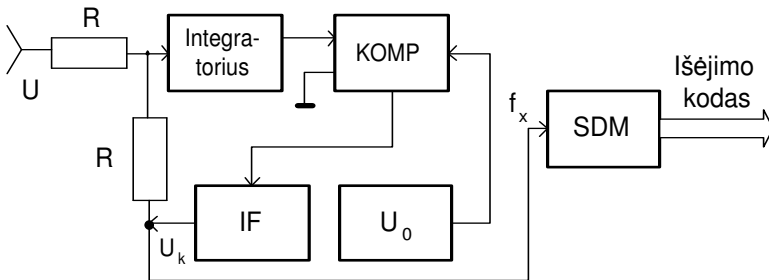
tikslūs (keitimo paklaida apie 0,01 %) ir atsparūs trukdžiams, tačiau jų veikimo greitis nėra didelis (keitimo laikas $\geq 100 \mu s$).

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

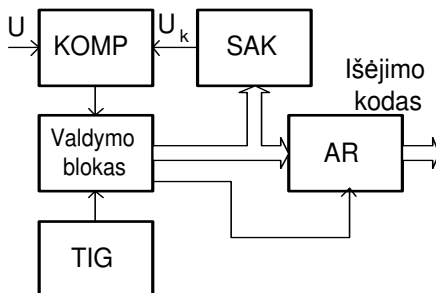
3. Srovės ir įtampos matavimas

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.

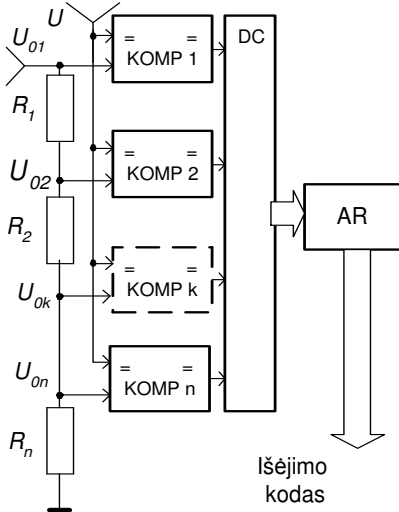


3.33 pav. Paskiltnio palyginimo ASK schema

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 rezistyviniu 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.

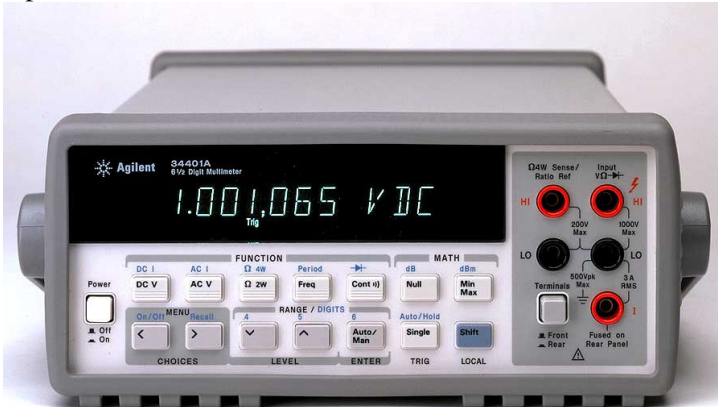
Jeigu įėjimo įtampa yra periodinė su periodu T ir jos dažnių spektras apribotas N eilės harmonika, tai Naikvisto diskretizavimo teorema tenkinama, kai $(2N+1)T_k = T$. Jeigu $u(kT_k)$ yra k -oji diskrečioji įtampos vertė, tai įtampos efektinė vertė yra nustatoma kaip atskirų diskrečiųjų verčių kvadratų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

Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Šiame skyriuje nagrinėjamos labai plačiai naudojamos matavimo priemonės skirtos virpesių formos stebėjimui ir jų amplitudžių ir laiko parametrų matavimui – elektroniniai oscilografai (*lotyn.* oscillum + *graik.* grafo), užsieninėje literatūroje dar vadinami osciloskopais (*graik.* scopeo).

Šie matavimo prietaisai pasižymi dideliu jautriu, didele įėjimo varža, maža inercija ir taikymo universalumu. Juos naudoja tiriant virpesius nuo labai lėtų iki labai greitai kintančių. Kol kas dominuojančią padėtį užima oscilografai su elektroniniais vamzdžiais, tačiau nemaža jų dalis jau yra su skaitmeniniais signalų apdorojimo ir atminties elementais bei su netradiciniais virpesių formos atvaizdavimo įtaisais.

Oscilografus skirsto pagal vienu metu stebimų virpesių skaičių, praleidžiamų dažnių juostos plotį, virpesio formos atvaizdavimo tikslumą, amplitudžių ir laiko parametrų matavimo tikslumą. Taip pat skiria bendrosios paskirties – universaliuosius ir specialios paskirties, pavyzdžiui, televizinių signalų, oscilografus.

4.1. Bendroji struktūra ir veikimo principas

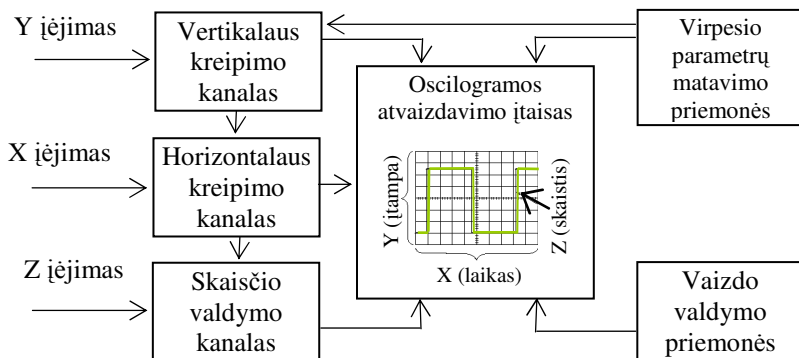
Oscilografai priskirtini prie potencialinio veikimo matavimo

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

priemonių, t.y. stebimas virpesys yra paduodamas į jų įėjimą įtampos pavidalu. Jeigu prisireikia stebėti srovės virpesio formą, tai tenka sukurti šiai srovei proporcingą įtampą ir ją paduoti į oscilografo įėjimą.

Stebimas virpesys yra atvaizduojamas oscilografo atvaizdavimo įtaise XY plokštumoje kaip įtampos laikinė funkcija. Todėl X ašis atitinka laiko ašį, o Y ašis yra virpesio momentinių įtampos verčių ašis. Gautas virpesio vaizdas vadinamas virpesio *oscilograma*.

Elektroninių oscilografų struktūra gali būti labai sudėtinga, tačiau apibendrinus, ją galima pavaizduoti 4.1 paveikslo schema. **Vertikalaus (Y) kreipimo kanalas** įvykdo vaizdo elemento kreipimą vertikalia kryptimi proporcingai momentinei stebimos įtampos vertei $u_y(t)$.



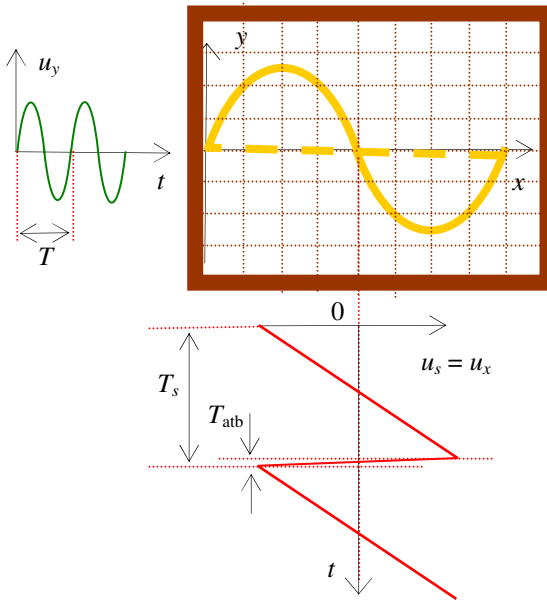
4.1 pav. Apibendrinta oscilografo struktūrinė schema

Horizontalaus (X) kreipimo kanale yra formuojama proporcinga laikui – tiesiškai auganti įtampa $u_x(t)$. Dažnai ji yra suderinama laike – *synchronizuojama* su stebimo proceso įtampa taip, kad šios įtampos ir stebimos įtampos pradžia ir kitimo sparta sutaptų. Kartais horizontaliam kreipimui naudojama išorinė įtampa $u_x(t)$. Toks oscilografo darbo režimas vadinamas XY matavimo režimu.

Vaizdo elementų atvaizdavimas yra vadinamas *vaizdo skleidimu*, o atvaizduojama linija, stebima atvaizdavimo įtaise kai neveikia vertikalus kreipimas – *skleistinė*. Stebint periodinius virpesius ir

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

horizontalus kreipimas yra periodinis. Tuomet skleidimo įtampa $u_s(t)$ yra pjūklo dantų pavidalo. Skleidimo sparta (periodas T_s) yra suderinama su stebimo proceso sparta taip, kad matytųsi vienas ar keli virpesio periodai. Tuomet galima tiksliau išmatuoti jo parametrus. Vaizdo skleidimas vykdomas iš kairės į dešinę ir susideda iš dviejų etapų: tiesioginės skleidimo eigos T_i ir grįžimo į pradžia – atbulinės skleidimo eigos T_{atb} . Atbulinė eiga įvykdoma per galimai trumpesnę laiką, kad būtų pasiruošta vėlesnių periodų skleidimui ir tam laikui grįžimo vaizdas yra blokuojamas, kad nesugadintų oscilogramos vaizdo. Blokavimą vykdo **skaisčio valdymo (Z) kanalas**, tiesioginio skleidimo metu paryškindamas vaizdą. Kartais skaistis valdomas išoriniu signalu $u_z(t)$. Oscilogramos gavimo principas pavaizduotas 4.2 paveiksle.



4.2 pav. Oscilogramos formavimo principas

Skleidimo periodas $T_s \approx T_i$. Vaizdo parametrus: sufokusavimą, skaisčių, padėtų pagal X ir Y ašis galima valdyti. Numatytos ir priemonės leidžiančios tiksliau ir patogiau atlikti matavimus:

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

žymėjimo linijos ir jų valdymas, parametrų verčių teikimas skaitmenine forma ir kitos.

Kaip buvo minėta įžangoje, stebimas virpesys yra teikiamas analoginio dydžio – įtampos pavidalu. Tačiau pagrindiniai šio dydžio keitimai gali būti įvykdyti analoginiais arba skaitmeniniais metodais. Skirtingi tada yra ir oscilografų atvaizdavimo įtaisai. Priklausomai nuo to oscilografus skirsto į *analoginius* ir *skaitmeninius*. Analoginių oscilografų atvaizdavimo įtaisas yra elektroninių spindulių vamzdis (*angl.* CRT – cathode ray tube). Tokius atvaizdavimo įtaisus vadina tradiciniais. Skaitmeninių oscilografų atvaizdavimo įtaisai yra skystųjų kristalų arba plazminiai displėjai. Dažnai naudojami ir hibridiniai – analoginiai–skaitmeniniai oscilografai. Ypač plačiai jie naudojami stebimų procesų vaizdui įsiminti. Taip sudaryti vadinamieji *skaitmeninės atminties oscilografai* (*angl.* DSO – Digital storage oscilloscopes). Oscilografus taip pat skirsto į realaus laiko, kai stebimas virpesys atvaizduojamas realiuoju laiku ir *stroboskopinius* (*angl.* sampling oscilloscopes), kai atvaizduojamos tik periodiškai arba atsitiktinai parinktos atskiros diskrečios virpesio momentinės vertės, išdėstant jas pakeistu (ištęstu) laiko masteliu. Panaudojant stroboskopinius oscilografus tapo įmanoma stebėti labai sparčius periodinius procesus, kurių dažnis yra iki dešimčių GHz.

Šioje knygoje plačiau aptarsime bendrosios paskirties (universaliosius) analoginio veikimo oscilografus ir skaitmeninės atminties hibridinius oscilografus kaip plačiausiai naudojamus.

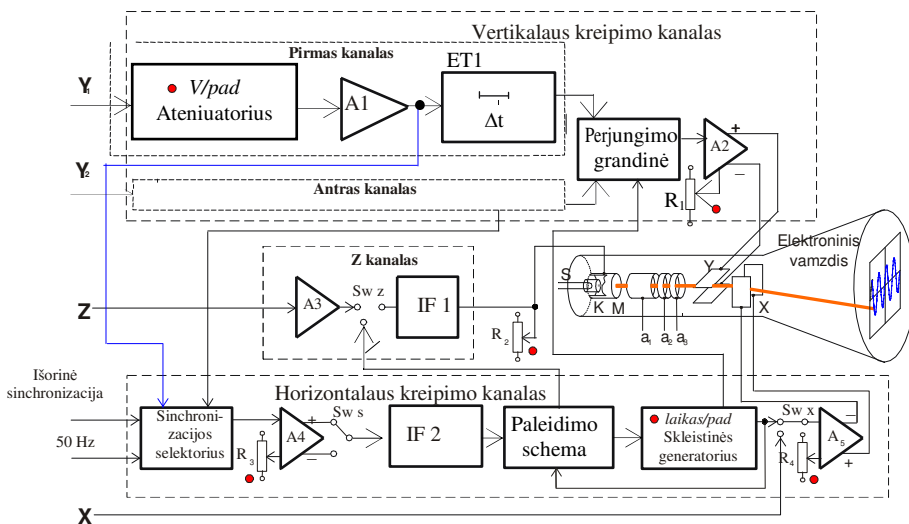
4.2. Bendros paskirties (universaliojo) analoginio oscilografo struktūrinė schema ir savybės

4.2.1. Schemos sudėtis ir bendrasis veikimo principas

Šiuose oscilografuose stebimo virpesio įtampa paduodama į *vertikalaus kreipimo* (*angl.* vertical deflection) kanalą, kuris susideda iš plačiajuosčio kompensuoto rezystyvinio įtampos daliklio

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

(kaip ir voltmetruose), plačiajuosčio nuolatinės įtampos stiprintuvo A1, signalo vėlinimo įtaiso ET1 ir galinio įtampos stiprintuvo A2 iš kurio įtampa yra teikiama į elektroninio vamzdžio (EV) vertikalaus kreipimo plokšteles Y. Jeigu stebimo virpesio amplitudė yra per didelė, tai galima naudoti išorinius rezistyvinius ar talpinius įtampos daliklius. Oscilografo Y įėjimas gali būti padaromas arba atviras arba uždaras nuolatininei tiriamos įtampos dedamajai. Didelės amplitudės virpesius galima paduoti ir tiesiog į EV kreipimo plokšteles, taip apeinant vertikalaus kreipimo kanalo elementus ir išvengiant jų įnešamų virpesio netiesinių ir dažninių iškraipymų.



4.3 pav. Universaliojo analoginio elektroninio oscilografo supaprastinta struktūrinė schema

Vertikalaus kreipimo kanalo įtampos perdavimo koeficientas keičiamas, keičiant atenuatoriaus slopinimą. Rezistoriumi R1 valdomas į vertikalaus kreipimo plokšteles paduodamos nuolatinės įtampos lygis ir skleistinės padėtis pagal Y ašį. Antrojo Y kanalo struktūra yra analogiška.

Skleistinės pjūklo dantų formos įtampą generuoja skleistinės generatorius, esantis horizontalaus kreipimo kanale. Jo darbas yra sinchronizuojamas sinchronizacijos impulsais, gaunamais iš

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

pasirinkto sinchronizacijos selektoriumi sinchronizacijos virpesių šaltinio. Galima pasirinkti *vidinę sinchronizaciją* tiriamu virpesiu, *išorinę sinchronizaciją* iš išorinio šaltinio ir *sinchronizaciją* 50 Hz dažniu. Pasirinkti sinchronizacijos virpesiai yra stiprinami stiprintuvu A4 ir jų amplitudė gali būti valdoma rezistoriumi R3. Sinchronizacijos impulsai yra formuojami impulsų formotuviu IF2 ir paleidimo schema, o formuojančios įtampos ženklas gali būti pasirenkamas perjungikliu SWs. Skleistinės įtampa yra stiprinama galiniu įtampos stiprintuvu A5 ir paduodama į elektroninio vamzdžio X kreipimo plokšteles. Jeigu skleidimui naudojama išorinė įtampa, tai ji paduodama iš gnybto X tiesiog į horizontalaus kreipimo kanalo galinio stiprintuvo A5 įėjimą. Skleistinės padėtį pagal X ašį galima valdyti rezistoriumi R4. Skleistinės generatoriaus dažnis gali būti keičiamas.

Skleistinė yra paleidžiama anksčiau nei į plokšteles paduodama vertikalus kreipimo įtampa, nes pastaroji yra užlaikoma analoginio vėlinimo schemoje ET1. Todėl oscilogramoje gerai gali būti stebima ir tiriamo virpesio pradinė dalis.

Oscilogramos skaistis padidinamas skleistinės tiesioginės eigos metu impulsais, formuojamais impulsų formotuvo IF2 iš skleistinės įtampos ir paduodamais į elektroninio vamzdžio moduliatorių M, valdantį elektronų pluošto intensyvumą. Rankiniu būdu skaistis valdomas rezistoriumi R2, keičiančiu nuolatinę moduliatoriaus įtampą. Oscilogramos skaistis gali būti valdomas ir išorine įtampa teikiama iš Z įėjimo per stiprintuvą A2.

4.2.2. Skleistinių rūšys ir parametrai

Kaip minėta, oscilogramos stabilumui būtinas skleistinės ir tiriamo virpesio sinchronizmas. Skleistinės įtampos periodas T_s turi būti lygus arba sveiką skaičių kartų didesnis nei tiriamo virpesio periodas T :

$$T_s = nT, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Kadangi skleistinės įtampa auga proporcingai laikui, tai ir skleistinės taško nueitas kelias X ašyje yra taip pat proporcingas laikui ir gali būti naudojamas kaip tiriamo proceso laiko matas. Skleistinės ilgis L_s priklauso nuo skleistinės įtampos amplitudės ir

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

elektroninio vamzdžio jautrio X kreipimo plokštelių įtampai. Paprastai stengiamasi, kad skleistinės ilgis būtų kiek galima didesnis, nes tada atstumus galima išmatuoti tiksliau ir tiksliau bus nustatomi tiriamų virpesių laiko parametrai. Paprastai skleistinės ilgis sudaro ne mažiau 90 % elektroninio vamzdžio ekrano horizontalaus matmens.

Elektroninio vamzdžio ekrano darbinė dalis yra vertikalioji ir horizontalioji kryptimis tinkleliu sudalinta į padalus, pagal kurias yra atskaitomi vaizdo matmenys. Kai tiriami įvairios spartos procesai, tai tenka keisti ir skleistinės periodą ir kinta skleistinės greitis: kuo spartesnis stebimas procesas tuo spartesnė naudojama skleistinė. Taigi stebimų procesų laiko parametrai yra nustatomi juos palyginant su skleistinės periodo trukme. Praktiniam naudojimui patogiau yra norminti ir naudoti ne skleistinės greitį arba skleistinės periodą, o dydį, kuris parodo koks laikas tenka vienai skleistinės padalai. Šis dydis yra atvirkščias skleistinės greičiui ir vadinamas *skleistinės koeficientu*:

$$k_s = \frac{1}{v_s} = \frac{T_s}{L_s} \text{ (laikas/padala).}$$

Skleistinės koeficientai yra keičiami, keičiant skleistinės generatoriaus periodą ir yra kalibruoti dydžiai. Jie nustato vadinamą *oscilografo laiko bazę* (angl. time base). Kartais ir visas oscilografo X kanalas yra vadinamas laiko bazės formavimo kanalu. Nuo laiko bazės kalibravimo tikslumo priklauso laiko parametrų matavimo paklaidos (žr. toliau apie matavimus oscilografu).

Labai svarbu, kad skleistinės įtampa kistų *tiesiniu dėsniu*. Jeigu dėsnis skiriasi nuo tiesinio, tai gaunami laiko mastelio iškraipymai: tam tikros stebimo proceso dalys gali būti vaizduojamos sulėtintos, arba paspartintos. Skleistinės įtampos dėsnio nuokrypa nuo tiesinio yra norminamas oscilografo parametras. Paprastai priklausomai nuo oscilografo tikslumo klasės nuokrypis nuo tiesinio dėsnio leidžiamas ne didesnis už (3–20) %. Skleistinės generatoriuje tiesiškai auganti įtampa yra gaunama integruojant paleidimo schemos kuriamus stačiakampės formos įtampos impulsus.

Be periodinės skleistinės yra naudojama ir *laukianti skleistinė*. Ji naudojama retų impulsų stebėjimui. Ši skleistinė sinchronizuojama su impulso pradžia ir jos tiesioginės eigos trukmė yra artima ne impulsų periodui, o impulso trukmei. Tuomet impulso vaizdas yra

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

išdėstomas per visą skleistinės ilgį ir jo atskirų stadijų laiko ir amplitudžių parametrų vertės gali būti detaliau ištirtos ir išmatuotos.

Naudojama ir ***pagreitinė skleistinė*** (pavyzdžiui, 10 kartų), kai reikia stebėti ypač sparčius procesus. Jos tikslumas yra mažesnis, nes esant didesniam skleistinės generatoriaus dažniui didesnės įtakos turi jo schemos parazitiniai parametrai. Esant pagreitintai skleistinei gaunamas ir mažesnis oscilogramos skaistis.

Kiek norima greitų skleistinių realizuoti negalima, nes elektroninio vamzdžio ekrano elektronams jautraus sluoksnio – ***liuminaforo*** švytėjimui sužadinti reikia tam tikros energijos dozės ir jeigu ji per trumpa, liuminaforas nešvytės ir ekrane elektronų spindulio palikto vaizdo nematysime. Pavyzdžiui, kai stebimo proceso trukmė būtų 1 ns, tai tokios pageidautume ir skleistinės tiesioginės eigos trukmės. Jeigu skleistinės ilgis yra 100 mm, tai skleistinės greitis turėtų būti 100 000 km/s, t.y. artimas šviesos greičiui!

Be tiesinės vidinės skleistinės naudojama ir ***išorinė skleistinė***, kurios įtampa paduodama į oscilografo X įėjimą (XY režimas). Dažniausiai tai būna harmoninė įtampa ir toks darbo režimas kartais vadinamas ***harmoninės skleistinės*** režimu.

Skleistinės ilgiui padidinti kartais specializuotuose oscilografiniuose laiko intervalų matavimo prietaisuose naudojama ***apskritiminė*** arba ***spiralinė*** skleistinės.

Pagrindinis oscilografo sinchronizavimo režimas yra ***vidinė sinchronizacija*** tiriamu signalu, kurios sinchroimpulsai formuojami iš signalo įtampos, imamos iš vertikalaus kreipimo kanalo prieš vėlinimo įtaisą.

Jeigu oscilografiniai matavimai vykdomi naudojant matavimo generatorių, tai kaip sinchronizavimo virpesius galima naudoti tokio generatoriaus teikiamus sinchronizavimo virpesius. Tokių virpesių prijungimui oscilografuose yra numatytas išorinės sinchronizacijos gnybtas ir ***išorinės sinchronizacijos*** režimas.

Tiriant kintamosios srovės lygintuvų, impulsinių maitinimo šaltinių, dažnio keitiklių ir kitų įtaisų, kurių pirminis maitinimo šaltinis yra 50 Hz dažnio pramoninis elektros tinklas yra naudojama ***sinchronizacija 50 Hz dažniu***.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

4.2.3. Vertikalaus kreipimo kanalas ir jo savybės

Oscilografų elektroninių vamzdžių elektronų spindulio nuokrypis priklauso nuo jų kreipimo sistemų jautrio įtampai ir paduodamos į kreipimo sistemą įtampos didumo.

Universaliųjų oscilografų elektroninių vamzdžių elektronų spindulio (pluošto) kreipimo sistemos yra **kondensatorinio** tipo. Tai plokštėlės, prie kurių prijungus įtampą, yra sukuriamas tam tikro stiprio elektros laukas, veikiantis tarp jų skriejančius elektronus elektros lauko jėga ir keičiančius jų judesio trajektoriją.

Kai kreipimo plokštelių įtampa yra pastovi, elektronus veikianti jėga irgi nekinta ir jie veikiami visą laiką kol yra tarp plokštelių. Šis laikas priklauso nuo kreipimo plokštelių ilgio l ir išskriejusių į kreipimo sistemą elektronų greičio v_e . Elektronų greitį nustato antrojo (greitinančio) anodo įtampa U_{a2} :

$$v_e = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_{a2}}.$$

Elektronų pralėkimo per kreipimo sistemą laikas yra lygus:

$$\tau_k = \frac{l}{v_e}.$$

Elektrinio lauko stipris priklauso nuo įtampos U tarp plokštelių ir atstumo tarp jų d : $E = \frac{U}{d}$. Kai elektronai išlekia iš kreipimo sistemos, tolesnį atstumą iki ekrano l_{ek} jie skrieja neveikiami lauko jėgų, pagal liestinę išskriejimo iš sistemos taškui. Įvertinus šias prielaidas, gaunamas toks ryšys tarp stebimo ekrane vaizdo taško nuokrypio h ir prijungtos prie plokštelių nuolatinės įtampos bei vamzdžio parametru:

$$h = \frac{l(l_{ek} + l/2)}{2dU_{a2}} U = S_u U,$$

čia S_u yra vamzdžio kreipimo sistemos **statinis jautris įtampai** vertinamas mm/V arba padalomis/V.

Statinis jautris gali būti didinamas, keičiant vamzdžio parametrus nuo kurių jis priklauso:

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

1. Didinant kreipimo plokštelių ilgį. Tačiau taip didinamas pralėkimo laikas ir kaip pamatysime vėliau yra bloginamos kreipimo sistemos dinaminės savybės.
2. Mažinant greitinančio anodo įtampą. Tačiau gali nepakakti elektronų kinetinės energijos liuminaforo sužadininui ir kad matytųsi oscilograma reikės labai padidinti trečiojo anodo įtampą, kuri ir taip siekia kelias dešimtis kilovoltų.
3. Mažinti atstumą tarp kreipimo plokštelių. Tačiau šiuo atveju didėja plokštelių tarpelektrocinė talpa ir mažėja vertikalaus stiprinimo kanalo praleidžiamų dažnių juostos plotis. Be to, kai plokštelės ilgos ir mažas atstumas tarp jų, elektronai po kreipimo gali užkliūti už plokštelių ir neišlėkti iš sistemos. Tam, kad išvengti užkliuvimo efekto plokštelės yra išdėstomos ne lygiagrečiai, o prasiskiriančios. Tačiau šiuo atveju elektrinis laukas gaunamas labai nepastovus: kinta elektrinio lauko stipris išilgai kreipimo sistemos.
4. Didinti atstumą nuo kreipimo sistemos iki ekrano. Tuo tikslu Y kreipimo sistema yra išdėstoma toliau nuo ekrano. Labai didinti šį atstumą negalima, nes ir taip oscilografai nėra labai patogūs prietaisai dėl jų elektroninių vamzdžių didelio ilgio.

Elektroninių vamzdžių statinis jautris yra apie (1–5) mm/V arba apie (0,1–0,5) padalos/V. Visas vertikalaus kreipimo kanalo statinis jautris gaunamas didesnis, vertikalaus kanalo įtampos perdavimo koeficiento (įvertinant stiprintuvų stiprinimo koeficientus ir atenuatoriaus bei išorinių įtampos daliklių dalinimo koeficientus) K_y sąskaita:

$$S_y = S_{hy} K_y.$$

Matuojant oscilografu įtampas ir žinant jo jautrį, galima apskaičiuoti matuojamos įtampos vertes. Tačiau patogiau yra naudoti ne oscilografo jautrį, o jam atvirkščią dydį, vadinamą **kreipimo koeficientu** (angl. deflection factor):

$$k_y = \frac{1}{S_y}, \text{ V/padalai}$$

Kai oscilografuojama kintamoji įtampa, elektronus, skriejančius per kreipimo sistemą veikia kintanti kreipimo jėga ir jų įgytas sistemoje nuokrypis nustatomas kaip vidutinis dydis per praskriejimo pro kreipimo sistemą laiką. Jis vadinamas dinaminio nuokrypiu ir priklauso nuo signalo laikinės funkcijos $u(t)$:

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

$$h_d(t) = \frac{1}{\tau_k} \int_t^{t+\tau_k} S_y u(t) dt.$$

Nustatykime dinaminio kreipimo ryšį su signalo dažninėmis savybėmis. Apskaičiuokime dinaminį nuokrypį, kai stebimas harmoninis virpesys:

$$h_d(t) = \frac{1}{\tau_k} \int_t^{t+\tau_k} S_y U_m \sin(\omega t + \varphi) dt = S_y \frac{\sin \pi f \tau_k}{\pi f \tau_k} U_m \sin(2\pi f t + \varphi + \pi f \tau_k).$$

Gautoji formulė rodo, kad pakinta nuokrypio dydis ir atsiranda papildomas fazės poslinkis, tačiau jis iškraipymų nesukelia, nes yra proporcingas dažniui.

Nuokrypio dydžio pasikeitimą vertina **dinaminio kreipimo jautriu**, kuris priklauso nuo dažnio ir kartu su kitų kanalo elementų dažninėmis savybėmis nustato kanalo amplitudės dažninę charakteristiką ir praleidžiamų dažnių juostos plotį:

$$S_{yd} = S_y \frac{\sin \pi f \tau_k}{\pi f \tau_k} = S_{hy} K_y(f) \frac{\sin \pi f \tau_k}{\pi f \tau_k}.$$

Kai $f = \frac{n}{\tau_k}$, $n = 1, 2, 3, \dots$, dinaminis jautris tampa lygus nuliui,

nes per praskiejimo laiką įvyksta sveikas skaičius virpesio periodų ir vidutinis nuokrypis yra lygus nuliui. Atitinkami kartotiniai dažniai yra vadinami **kritiniais** kondensatorinės sistemos dažniais. Pirmasis kritinis dažnis f_1 apriboja maksimalų tokios kreipimo sistemos veikimo dažnį. Pavyzdžiui, kai $\tau_k = 1$ ns, tai $f_1 = 1$ GHz. Kadangi

ribinis dažnis nustatomas kai jautris sumažėja $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707$ nuo jo statinio dydžio, tai vien dėl kreipimo sistemos įtakos gauname tokį ribinį dažnį: $f_r \approx 0,44 f_1 = \frac{0,44 v_e}{\tau_k l}$, kuris praktiškai ir riboja

oscilografo su kondensatorine kreipimo sistema kanalo praleidžiamų dažnių juostos plotį iki maždaug 500 MHz.

Greitaveikiuose analoginiuose oscilografuose naudoja vadinamas **bėgančios bangos** kreipimo sistemas. Jose elektronas yra veikiamas iki jo greičio sulėtintos bėgančios elektromagnetinės bangos elektrinio lauko

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

išilginės komponentės. Kreipimo sistema apkrauta apkrovos varža suderinta su jos bangine varža. Tuomet judantį kreipimo sistema elektroną per visą kreipimo laiką veikia nekintančio stiprumo elektrinis laukas ir jo nuokrypis gaunamas didesnis. Tačiau dėl tokių sistemų konstrukcinių ypatybių ir dėl jų banginės varžos priklausomybės nuo dažnio irgi gaunama ribota pralaidumo juosta apie (1 – 1,5) GHz.

Oscilografuojant impulsinius signalus svarbi yra oscilografo *pereinamoji charakteristika*, kurios savybės dažniausiai norminamos jos *užaugimo laiku*, susijusiu su kanalo pralaidumo juostos ribiniu

dažniu: $\tau_{osc} \approx \frac{0,35}{f_r}$. Stebima oscilografo ekrane impulso

oscilogramos priekinio fronto trukmė τ_{fs} yra paties impulso priekinio fronto trukmės τ_{fi} ir oscilografo pereinamosios charakteristikos

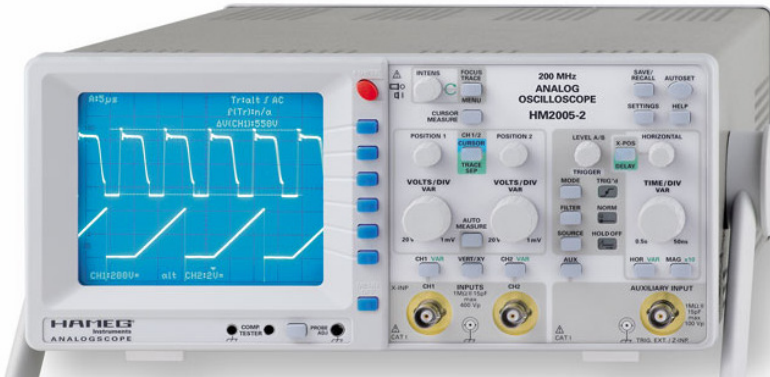
užaugimo laiko τ_{osc} suma: $\tau_{fs} = \sqrt{\tau_{fi}^2 + \tau_{osc}^2}$. Todėl, jeigu

oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikas τ_{osc} ilgas, gausime dideles impulso fronto trukmės matavimo paklaidas. Pagal paneigtinų paklaidų taisyklę (žr. 1 skyrių), kad paklaida neviršytų $\pm 5\%$, reikia, kad $\tau_{osc} \leq \tau_{fi}/3$. Tam, kad paklaida neviršytų $\pm 2\%$, reikia, kad $\tau_{osc} \leq \tau_{fi}/5$.

Šiuolaikiškuose universaliuosiuose oscilografuose įtaisomi *skaitmeniniai amplitudės ir laiko parametrų matuokliai*. Įtampų vertės yra nustatomos įtaisytais skaitmeniniais voltmetrais, kuriuose nuolatinės įtampos, susietos su stumdomomis oscilogramoje žymėjimo linijomis, yra palyginamos su skleistinės tiesiškai kintančia įtampa ir palyginimo rezultate yra formuojamas laiko intervalas, proporcingas žymėjimo linijomis išskirtam įtampų intervalui. Laiko intervalais vertinami ir skaitmeniniu pavidalu teikiami ir laiko žymėjimo linijomis atskirti laiko intervalai. Informacija apie pasirinktas įtampos ir laiko vertes yra generuojama skaitmeniniu pavidalu panaudojant teleteksto arba skaitmenų grafinio generavimo principus ir vaizduojama oscilografo ekrane.

Universaliojo analoginio oscilografo bendras vaizdas yra parodytas 4.4. paveiksle.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.4 pav. Universaliojo analoginio oscilografo ir jo pagrindinių valdymo elementų vaizdas

4.2.4. Svarbiausios oscilografų savybės

Priklausomai nuo paskirties elektroniniai oscilografai gali būti įvairiai charakterizuojami. Tačiau galima nurodyti pagrindines norminamas savybes, kurios dažniausiai nurodomos visiems universaliesiems elektroniniams oscilografams.

Vertikalaus kreipimo kanalų charakteristikos:

1. Vertikalaus kreipimo kanalų skaičius ir kanalų naudojimo būdai.
2. Vertikalaus kreipimo kanalo praleidžiamų dažnių juostos plotis (paprastai -3 dB lygyje, arba nurodomas kitas netolygumo kriterijus, pavyzdžiui $-0,5$ dB lygyje).
3. Vertikalaus kreipimo kanalo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikas.
4. Kalibruotų kreipimo koeficientų padėčių skaičius. Pavyzdžiui, 14 kalibruotų padėčių nuo 1 mV/pad iki 20 V/pad
5. Kalibruotų kreipimo koeficientų paklaidos. Pavyzdžiui, 1 mV/pad – 2 mV/pad: $\pm 5\%$ (nuo 0 iki 10 MHz (-3 dB lygyje)), 5 mV/pad – 20 V/pad: $\pm 3\%$.
6. Įėjimo varža ir talpa. Pavyzdžiui, 1 M Ω ir 15 pF.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

7. Įėjimo grandinės savybės. Pavyzdžiui, įėjimas atviras nuolatinei įtampai (DC), tik kintamoji įtampa (AC), sujungtas su korpusu (GD).
8. Maksimali įėjimo įtampa. Pavyzdžiui, 400 V (nuolatinė + kintamosios įtamos pikinė vertė).
9. Vertikalaus kreipimo trakto signalo vėlinimo laikas. Pavyzdžiui, apie 70 ns.

Sinchronizacijos charakteristikos

1. Sinchronizavimo dažnių sritis. Pavyzdžiui, nuo 20 Hz iki 250 MHz.
2. Sinchronizavimo frontai: teigiamas arba neigiamas.
3. Sinchronizavimo šaltiniai. Pavyzdžiui, I arba II kanalai pasirenkant, 50 Hz tinklas ir išorinis.
4. Sinchronizavimo tiriamuoju signalu pasirinktys. Pavyzdžiui,
AC (10 Hz – 250 MHz)
DC (0 – 250 MHz)
HF (50 kHz – 250 MHz)
LF (0 – 1,5 kHz)
5. Išorinio sinchronizavimo signalo parametrai. Pavyzdžiui, lygis $\geq 0,3$ V nuo piko iki piko (0–250 MHz)

Horizontaliojo kreipimo kanalo charakteristikos

1. Skleidimo koeficientų verčių diapazonas Pavyzdžiui, nuo 0,5 s/pad iki 50 ns/pad.
2. Skleidimo koeficientų verčių paklaida. Pavyzdžiui, ± 3 %.
3. X ištempimas. Pavyzdžiui, $\times 10$ (tikslumas ± 5 %): iki 5 ns/pad.
4. X stiprintuvo praleidžiamų dažnių juostos plotis. Pavyzdžiui, nuo 0 iki 3 MHz (-3 dB lygyje).
5. X ir Y kanalų fazių poslinkis. Pavyzdžiui, $< 3^\circ$; iki 220 kHz.
6. Įėjimo varža ir talpa.

Kita informacija

1. Kalibratoriaus signalų parametrai. Pavyzdžiui, stačiakampis simetrinis, amplitudė $0,2 \text{ V} \pm 1$ %, 1 kHz.
2. Maitinimo įtampa. Pavyzdžiui, 100 V–240 V $\sim \pm 10$ %, 50/60 Hz.
3. Naudojama galia. Pavyzdžiui, apie 42 W, kai dažnis 50 Hz.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

4. Darbo aplinkos temperatūra. Pavyzdžiui, nuo 0 °C iki +40 °C.
5. Masė.
6. Matmenys (mm): plotis, aukštis, gylis.

4.3. Stroboskopiniai oscilografai

Stroboskopiniai oscilografai naudojami trumpų periodinių arba dirbtinai periodizuotų virpesių oscilografavimui. Juose virpesys yra stebimas ne realiuoju laiku (*angl.* real time sampling), o ištempto mastelio laiku: *stebimas periodinis procesas peržiūrimas per daugelį jo realių periodų* (*angl.* equivalent time sampling). Įvykdoma stebimo proceso laiko mastelio transformacija. Kiek kartų yra pailginamas stebėjimo laikas, tiek kartų ekvivalentiškai procesas tampa lėtesnis ir tokio sulėtinto proceso stebėjimui pakanka oscilografo su siauresne praleidžiamų dažnių juosta. Pagrindiniu stroboskopinio oscilografo elementu yra stroboskopinis keitiklis, prie kurio gali būti prijungtas paprastas oscilografas. Tokie priedai universaliesiems oscilografams būdavo gaminami. Pastaruoju metu stroboskopiniai oscilografai gaminami kaip atskiri prietaisai.

Stroboskopiniame oscilografe tiriamo proceso diskrečiosios vertės yra gaunamos signalą perduodant per greitaveikį komutatorių (stroboskopinį keitiklį) valdomą trumpais strobavimo impulsais. Strobavimo impulsų formai jokių griežtų reikalavimų nėra, svarbu, kad jų trukmė būtų žymiai trumpesnė už tiriamo proceso trukmę. Tam, kad būtų pakankamai tiksliai rekonstruota stebimo virpesio forma, reikia jį diskretizuoti dažniu didesniu už Naikvisto dažnį: $f_d > 2f_{\max}$, o diskretizavimo žingsnis neturi viršyti atitinkančio šį

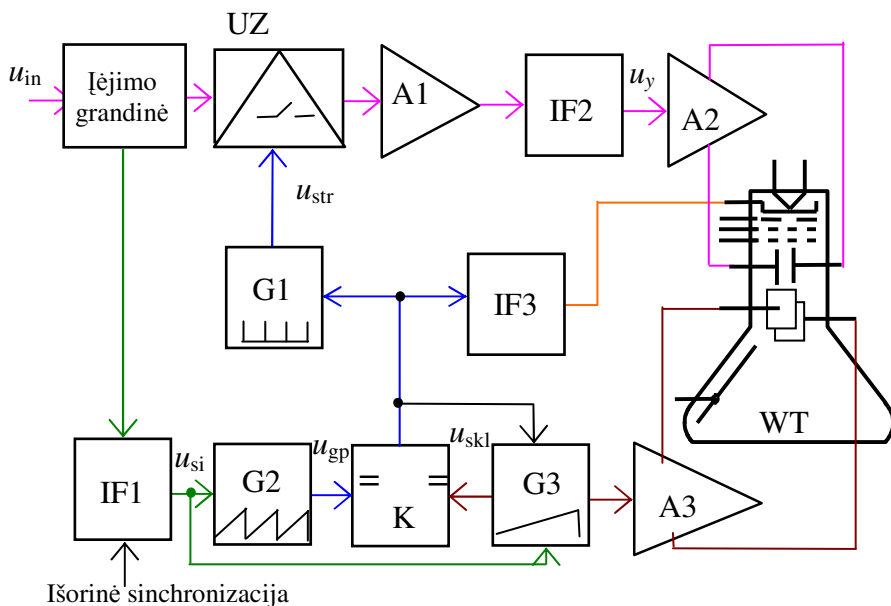
dažnį periodo: $\Delta t \leq \frac{1}{f_d} = \frac{1}{2f_{\max}}$, kur $f_{\max}$ yra didžiausias stebimo

proceso spektro dažnis. Tokių impulsų generavimas nėra techninė problema (sudėtingesnė yra trumpų virpesių stiprinimo neiškraipant jų formos problema). Greitaveikiu komutatoriumi gali būti, pavyzdžiui, diodinis dažnio keitiklis, kurio diodas valdomas strobavimo impulsais. Diskrečios signalo vertės yra imamos ne per vieną periodą: kiekviena sekanti vertė imama sekančio periodo metu arba net praleidus tam tikrą skaičių periodų. Todėl rekonstruotas

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

virpesys gaunamas kaip visuma diskrečių verčių, atskirtų laiko intervalais nelygiais diskretizavimo žingsniui, o ilgesniais. Taip išplečiamas (transformuojamas) stebimo signalo laiko mastelis. Virpesio oscilograma gaunama kaip švytinčių ekrane taškų visuma. Kadangi strobimpulsai yra trumpi, tai ekspozicijos laikas būtų trumpas ir taško švytėjimas būtų labai neintensyvus. Be to, kai diskretų nedaug, gautume labai sukarpytą oscilogramos vaizdą. Todėl, prieš paduodant į vertikalaus kreipimo kanalą, impulsai, atitinkantys signalo diskrečias vertes, yra išplečiami. Tai tik palengvina jų stiprinimą ir perdavimą.

Stroboskopinio oscilografo struktūrinė schema yra pavaizduota 4.5 paveiksle.



4.5 pav. Stroboskopinio oscilografo supaprastinta struktūrinė schema

Sinchronizacijos impulsai formuojami impulsų formuotuvu IF1 iš signalo arba išorinės sinchronizacijos virpesių šaltinio ir maždaug atitinka tiriamo virpesio pradžią. Jais yra sinchronizuojamas greitų pjūklo dantų pavidalo tiesiškai augančios periodinės įtampos

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

generatorius G2 ir skleistinės (lėtai kintančios tiesiškai didėjančios įtampos) generatorius G3. Šių generatorių įtampos yra palyginamos komparatoriuje K ir kai jos susilygina, komparatoriaus įtampos šuolis paleidžia trumpų strobavimo impulsų generatorių G1. Šio generatoriaus įtampos u_{st} impulsai valdo greitaveikį komutatorių UZ. Veikiant strobavimo impulsui, komutatorius yra atviras ir jo išėjime gaunamas momentinės įėjimo įtampos vertei atitinkančios amplitudės impulsas. Šis impulsas yra stiprinamas įtampos stiprintuvu A1 ir išplečiamas impulsų formuotuvu IF2. Sustiprintas galiniu stiprintuvu A2 impulsas patenka į elektroninio vamzdžio vertikalios kreipimo sistemą ir sukelia jo amplitudei proporcingą elektronų spindulio nuokrypį.

Komparatoriaus įtampos šuolis taip pat šuoliu padidina skleistinės generatoriaus G3 įtampą. Ji toliau išlieka stabili iki sekancio strobuojancio impulso veikimo. Todėl per šį laiką horizontalus skleidimas nevyksta ir elektronų spindulys per visą išplėsto vertikalios kreipimo kanalo impulso trukmės laiką veikia ekrano liuminaforą, sukeldamas intensyvių jo švytėjimą. Vertikalios kreipimo kanalo impulso trukmės išplėtimas ir šuoliukais tiesiškai auganti skleistinės įtampa garantuoja signalo diskrečių verčių atvaizdavimą pakankamo skaisčio segmentais.

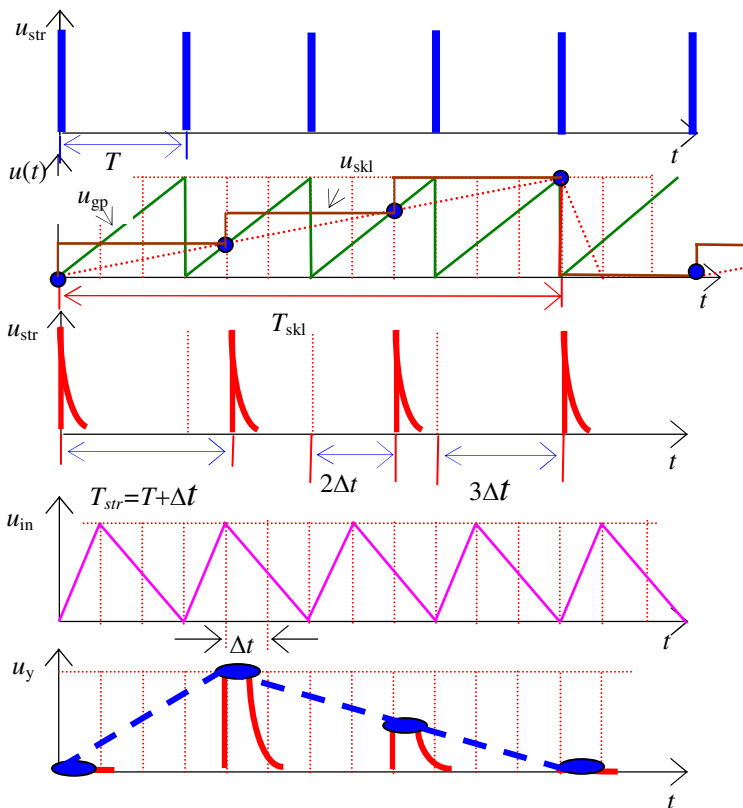
Skleistinės periodas T_{skl} yra kartotinis signalo periodui T :

$$T_{skl} = (n + 1)T ,$$

čia n yra signalo imčių (atskaitų) skaičius per jo periodą. Jis, kaip minėta, yra parenkamas pagal Naikvisto diskretizavimo teoremos reikalavimus. Kadangi abiejų lyginamų komparatoriumi įtampų lygiai auga tiesiškai, o jų periodai kartotiniai, tai kiekvienas sekantis strobavimo impulsas gaunamas paslinktas sinchronizavimo impulso atžvilgiu per laiko intervalą kartotinį strobavimo žingsniui Δt (4.6 pav):

$$\Delta t = \frac{T}{n} .$$

Strobavimo impulsų periodas gaunamas didesnis už signalo periodą strobavimo žingsnio dydžiu : $T_{str} = T + \Delta t$, o skleistinės periodas $T_{skl} = nT_{str} = (n + 1)T$.



4.6 pav. Stroboskopinio oscilografo pagrindinių įtampų laiko diagramos ($n = 3$)

Signalų diskretizavimas gali būti vykdomas ne kiekvieną jo periodą, o praleidžiant m periodų. Tam reikia tiek kartų sumažinti sinchronizavimo impulsų dažnį. Tada strobavimo periodas yra lygus: $T_{str} = mT + \Delta t$, o skleistinės periodas $T_{skl} = nT_{str} = (mn + 1)T$.

Kadangi signalo oscilograma yra gaunama per skleistinės periodą, tai jo santykis su signalo periodu parodo kiek pasikeičia laiko mastelis ir vadinamas stroboskopinio oscilografo **laiko mastelio transformacijos koeficientu**:

$$K_T = \frac{T_{skl}}{T} = mn + 1.$$

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Laiko mastelio transformacijos koeficientai šiuolaikiškuose stroboskopiniuose oscilografuose gali būti labai dideli. Pavyzdžiui, jeigu $m = 100$ ir $n = 100$, tai $K_T = 10\,000$. Esant oscilografo vertikalaus kreipimo kanalo praleidžiamų dažnių juostos ribiniam dažniui lygiam $f_r = 1$ MHz, stroboskopinio oscilografo ekvivalentinis praleidžiamų dažnių juostos ribinis dažnis gaunamas $f_{rekv} = K_T f_r = 10$ GHz. Tai rodo, kad tokie oscilografai gali būti naudojami greitų periodinių procesų tyrimui. Pavyzdžiui, oscilografas HP 54124T turi ekvivalentinį praleidžiamų dažnių juostos plotį 50 GHz, o pereinamosios charakteristikos užaugimo laiko ekvivalentinę trukmę 7 ps.

Stroboskopiniai oscilografai kaip ir universalieji yra gaminami ir su keliais vertikalaus kreipimo kanalais.

4.4. Analoginiai oscilografai su skaitmenine atmintimi

Naudojant oscilografus, dažnai reikia fiksuoti oscilogramų vaizdus. Ypač tai svarbu oscilografuojant vienkartinius procesus. Jie reikalingi kaip iliustracijos tiriamų elektronikos ir kitų įtaisų veikimo aprašymams bei kitokiems techniniams dokumentams. Ilgą laiką oscilogramos buvo išsaugomos jas fotografuojant nuo oscilografo ekrano. Tam net buvo sukurtos ir ilgą laiką naudojamos vienkartinio paleidimo skleistinės. Vėliau, vaizdo fiksavimui trumpesniam laikui, pradėti naudoti oscilografai su *atmintimi*. Tokie oscilografai leidžia stebimą oscilogramos vaizdą fiksuoti specialios konstrukcijos elektroninio vamzdžio papildomame mozaikiniame ekrane, esančiame prieš liuminaforą. Vaizdas fiksuojamas potencialinio reljefo pavidalu. Įrašymas vykdomas oscilogramos stebėjimo metu. Vaizdo atkūrimas galimas po daugelio valandų ar net savaičių, priklausomai nuo vamzdžio konstrukcijos ir naudojamos vaizdo fiksavimo technologijos. Tokie oscilografai charakterizuojami papildomais parametrais: *oscilogramos įrašymo greitis* (km/s), *atminties trukmė* kai signalas atkuriamas iškart po įrašymo (min) ir atminties trukmė kai signalas neatkuriamas iškart po įrašymo (h). Tokie oscilografai gaminami ir su stroboskopiniais keitikliais ir leidžia tirti greitus procesus. Tai jų pagrindinis privalumas.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Šiuolaikiškų skaitmeninių signalo apdorojimo ir atminties technologijų panaudojimas leido sukurti hibridinius analoginius – skaitmeninius oscilografus, kuriuose pagrindiniai signalo keitimai ir atvaizdavimo principai yra tokie kaip ir analoginiuose oscilografuose, o oscilogramos duomenys gali būti išsaugoti skaitmeninėje formoje (*angl.* Digital storage oscilloscope – DSO).

Skaitmeninių signalo apdorojimo ir fiksavimo technologijų taikymas leidžia tokiuose oscilografuose įgyvendinti tokias papildomas funkcijas;

- įsiminti signalą ir papildomą informaciją;
- atkurti ir atvaizduoti oscilografo ekrane keletą anksčiau įrašytų į atmintį signalų jų palyginimui ir tyrimui. Informacija gali būti saugoma praktiškai neribotą laiką. Galimas sulėtintas arba paspartintas proceso atkūrimas;
- pateikti ekrane skaitmeniniu pavidalu informaciją apie signalo amplitudės ir laiko parametrus;
- apskaičiuoti ir pateikti signalo realizacijų vidurkį tuo sumažinant triukšmų ir trukdžių įtaką;
- apskaičiuoti ir pateikti signalo realizacijų papildomą informaciją apie signalo laikines (iškraipymai), dažnines (spektros) ir statistines (histogramos) savybes;
- skaitmeninė informacija gali būti lengvai perduodama, susiejant tokį oscilografą į informacines matavimo sistemas su kompiuteriais;
- žymiai supaprastintas oscilografo valdymas. Galima automatinė matavimo paklaidų korekcija

Skaitmeninės atminties oscilografų (SAO) veikimas pagristas signalo diskretizavimu ir kvantavimu naudojant analoginius skaitmeninius keitiklius (ASK).

Tam tikrais laiko momentais, kaip ir stroboskopiniuose oscilografuose, yra imamos signalo momentinės vertės (*angl.* sample) ir ASK keičiamos į tam tikro skiltiškumo dvejetainį kodą (*angl.* binary word). Dvejetainio kodo skilčių skaičius sąlygoja tokio oscilografo vertikalios skyros gebą. Dvejetainiai skaičiai yra saugomi oscilografo skaitmeninės atminties įtaise. Informacija, sukaupta atmintyje, toliau yra naudojama vaizduojant signalo oscilogramą.

SAO veikimo sparta žymia dalimi priklauso nuo naudojamo

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

ASK veikimo spartos ir vadinasi *strobavimo (diskretizavimo) sparta*. Didžiausia strobavimo sparta pigesniuose oscilografuose būna nuo 20 iki 200 milijonų imčių per sekundę (*angl. Mega samples per second – MSa/s*). Brangesniuose oscilografų modeliuose strobavimo sparta gali siekti 10 ir daugiau milijardų imčių per sekundę (*angl. Giga samples per second – GSa/s*).

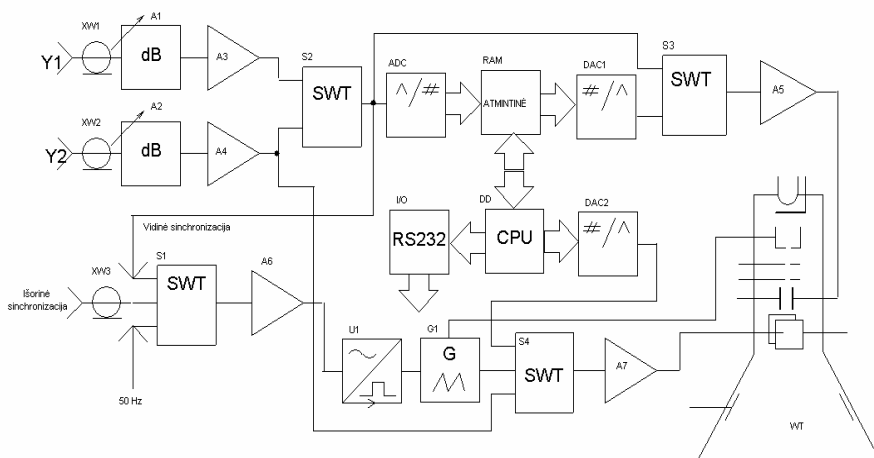
Tokiu būdu, prieš atvaizduojant signalo formą tokio oscilografo ekrane, ji yra išsaugoma oscilografo skaitmeninėje atmintyje. Todėl SAO kaip ir stroboskopiniai oscilografai atvaizduoja signalą ne realiaje laike ir ekrane atvaizduojamas ne realus signalas, o jo rekonstrukcija.

Tačiau skaitmeninė elektronika dar riboja oscilografo veikimo spartą realiaje laike. Todėl dažnai SAO realizuojamas kaip hibridinis oscilografas galintis veikti grynai analoginiu ir SAO režimais (4.7 pav.). Juose signalo formos atvaizdavimui naudojamas tradicinis elektroninių spindulių vamzdis. Kartais tokius oscilografus vadina *kombinuotais oscilografais* (*angl. CombiScope*). Dar galima sutikti pavadinimą *realaus laiko oscilografai su atmintimi* (*angl. real-time and storage oscilloscope - RSO*).

Visi tokio oscilografo struktūros elementai ir darbo režimai yra valdomi mikroprocesoriumi. Jis taip pat naudojamas signalo amplitudžių ir laiko parametrų matavimui bei šios ir pagalbinės informacijos išvedimui į oscilografo ekraną (4.8 pav.). Matavimų palengvinimui naudojamos valdomos žymėjimo linijos (žymekliai). Be to, mikroprocesorius valdo ir apsikeitimą duomenimis su informacine matavimo sistema arba kompiuteriu. Paprastai įmanomas tokių interfeisų naudojimas kaip RS232, GPIB, USB ir t.t. Mikroprocesorius atlieka reikalingus skaičiavimus ir suformuoja valdymo signalus SAK keitikliams, kurių išėjimo signalai paduodami į vertikalios kreipimo ir horizontalios kreipimo kanalų galinius stiprintuvus.

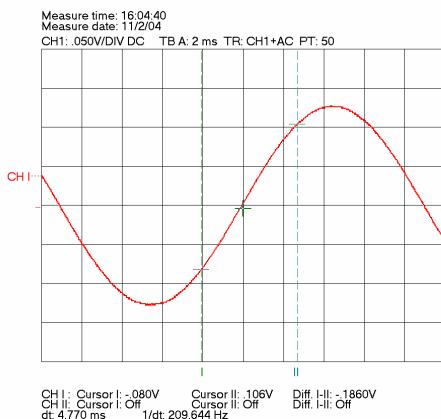
Skaitmeninės atminties oscilografų savybės ir parametrai bei naudojimo ypatumai jiems veikiant skaitmeninės atminties režimu yra *analogiškai skaitmeninių oscilografų atitinkamoms savybėms, todėl šiuos klausimus aptarsime nagrinėdami skaitmeninius oscilografus*.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.7 pav. Skaitmeninės atminties oscilografu supaprastinta struktūrinė schema

Savo išvaizda universalios paskirties skaitmeninės atminties oscilografai mažai skiriasi nuo tokios pat paskirties analoginių oscilografų ir turi daug vienodos paskirties valdymo įtaisų (4.9 pav.).



4.8 pav. Skaitmeninės atminties oscilografu ekrano vaizdas

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.9 pav. Skaitmeninės atminties oscilografo bendras vaizdas

Tokie oscilografai, kaip minėta, turi interfeisus kompiuteriams, todėl galimas jų valdymas kompiuteriu ir kompiuterizuotas matavimas (4.10 pav.). Programinis valdymas leidžia ne tik keisti oscilografo darbo režimus, bet ir vykdyti signalų parametrų matavimą kompiuterio monitoriuje, o taip pat registruoti kompiuterio atmintinėse bei perduoti į išorinius įrenginius oscilogramų vaizdus.

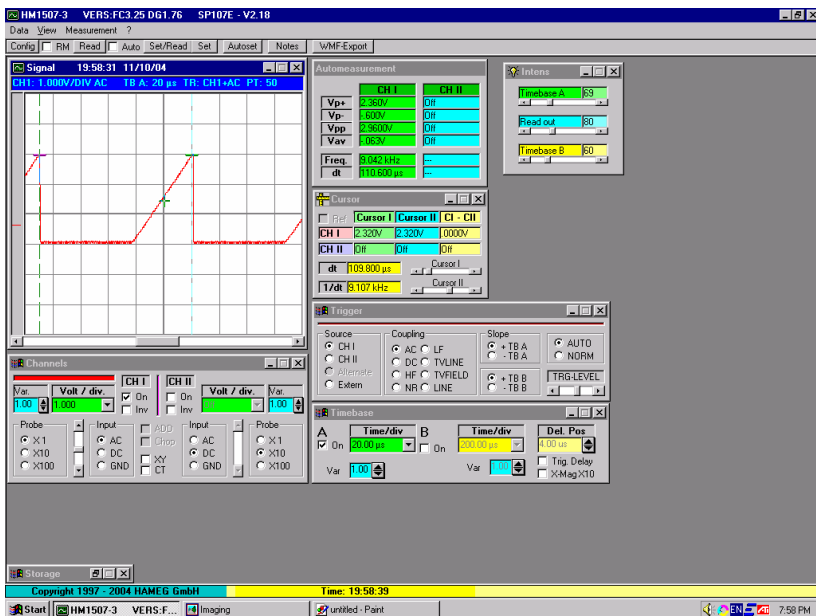
4.5. Skaitmeniniai oscilografai

Šiuolaikiniai skaitmeniniai oscilografai savo architektūra (sandara, naudojamais elementais ir programine įranga) yra labai artimi asmeniniams kompiuteriams. Juose yra signalų įvesties, skaitmeninio apdorojimo, programinio valdymo, grafinio atvaizdavimo ir išvesties elementai. Todėl šiuolaikiniai skaitmeniniai oscilografai iš esmės yra specializuoti kompiuteriai su geresnių parametrų analoginių signalų įvesties įtaisais.

Skaitmeniniuose oscilografuose, kaip ir kompiuteriams dažniausiai naudojami spalvotieji skystųjų kristalų vaizduokliai (angl. Liquid Crystal Display - *LCD*). Jie turi asmeninių kompiuterių tipo sisteminės plokštės, maitinimo šaltinius, PCI tipo duomenų ir adresų magistralės, PCI Express tipo grafines posistemes su išorinio VGA ar DVI interfeiso monitorių prijungimo galimybe, HDD tipo

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

operacinių sistemų, programų ir duomenų laikmenas, CD ROM įrenginius, visus pagrindinius standartinius prievadus: RS 232, LPT, USB bei populiarių automatizuoto matavimo sistemų interfeisą GPIB. Prie skaitmeninio oscilografo galima prijungti standartinę kompiuterio klaviatūrą ir pelytę.



4.10. Skaitmeninės atminties oscilografo HM 1507 valdymo programos lango vaizdas

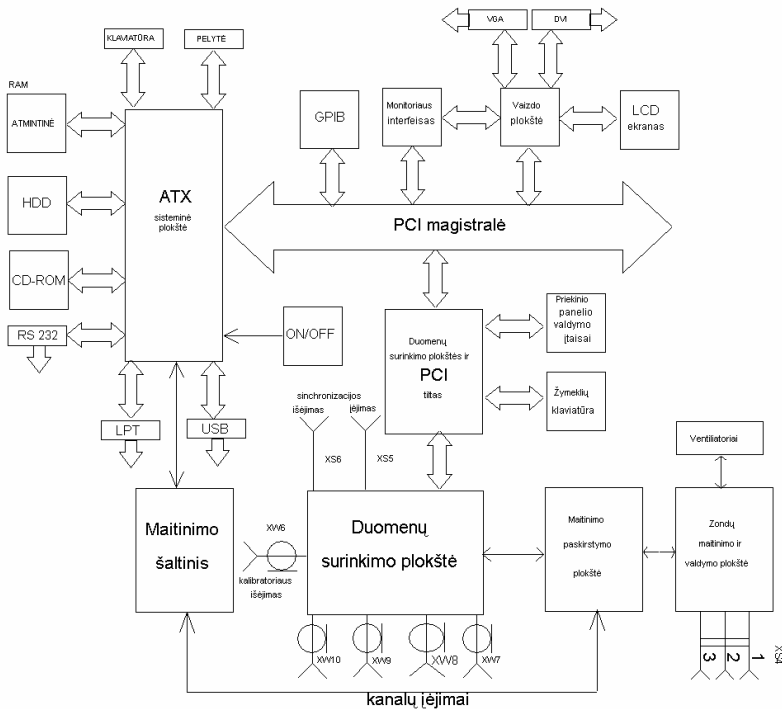
Trys didelės pasaulyje žinomos kompanijos: Agilent, LeCroy ir Tektronix varžosi tarpusavyje, kuri pagamins patį geriausią skaitmeninį oscilografą. Nors jų gaminių parametrai kažkiek skiriasi, tačiau yra artimi, o naudojami schemotechniniai ir technologiniai sprendimai yra panašūs.

Analoginių įtampų įvedimui, išorinių sinchronizavimo signalų įvedimui ir išvedimui bei kalibratoriaus įtampos išvedimui skaitmeniniame oscilografe yra **duomenų surinkimo plokštė** (*angl.* acquisition board) sujungta su kompiuterio PCI magistrale duomenų surinkimo plokštės ir PCI tiltu (*angl.* acquisition PCI bridge). Per šį

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

tiltą taip pat su PCI magistrale susietos oscilografo valdymo klaviatūra ir ekrano žymeklių valdymo klaviatūra esančios oscilografo priekiniame pelyje. Ilustracinė supaprastinta skaitmeninio oscilografo struktūrinė schema yra pavaizduota 4.11 paveiksle.

Duomenų surinkimo plokštė, kaip minėta kuria vertikalaus kreipimo kanalo signalus bei atlieka horizontalaus kreipimo ir sinchronizavimo, strobavimo bei kitų reikiamų signalų kūrimo funkcijas.



4.11 pav. Apibendrinta skaitmeninio oscilografo struktūrinė schema

Duomenų surinkimo plokštės vertikalaus kreipimo kiekvienas kanalas (VKK) susideda iš įėjimo grandinės, nustatančios įėjimo varžą, slopinimo ir stiprinimo elementų, valdančių kreipimo koeficientą, strobavimo grandinės su analoginės atminties elementu (*angl.* sample-and-hold circuit), labai spartaus ASK keitiklio,

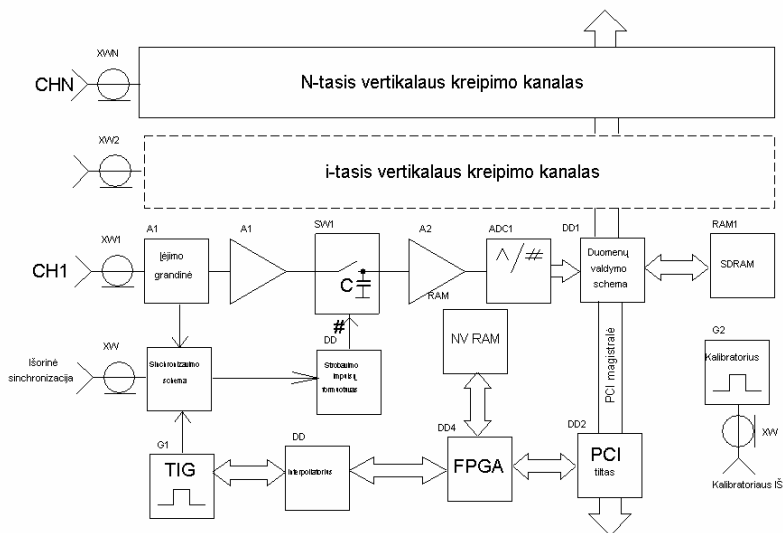
4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

duomenų valdymo schemos susietos su PCI magistrale ir VKK sparčiąja atmintine (SDRAM) (4.12 paveikslas).

Įėjimo grandinė plačiajuosčiuose skaitmeniniuose oscilografuose paprastai turi 50 Ω įėjimo varžą ir garantuoja iki 20 GHz praleidžiamų dažnių juostą. Signalų perdavimui iš tiriamų grandinių gali būti naudojami aktyvūs zondai (*angl.* active probes) su reaktyvumų ir nuostolių kompensavimu. Todėl numatomi papildomi gnybtai tokių zondu maitinimui ir valdymui.

Įvesties stiprintuvai yra pagaminti SiGe technologijos dvipolių tranzistorių lustų pagrindu. Tokių tranzistorių veikimo ribinis srovės stiprinimo dažnis siekia 210 GHz. Todėl tokios technologijos stiprintuvų ribiniai dažniai siekia iki 15 GHz. Jų stiprinimą galima valdyti šuoliais arba tolygiai – ši operacija yra visiškai kalibruota.

Strobavimo grandinė (dar vadinama strobavimo vartais – *angl.* sampling gate) turi greitaveikį tranzistorinį raktą ir analoginį atminties įtaisą – momentinį įėjimo įtampos lygį išsimenantių kondensatorių C. Veikiant strobavimo impulsui, raktas užsidaro ir kondensatorius įkraunamas iki momentinio įėjimo įtampos lygio.



4.12 pav. Skaitmeninio oscilografo duomenų surinkimo plokštės supaprastinta struktūrinė schema

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Priekinis stiprintuvas veikia įtampos šaltinio režimu, t.y. turi labai mažą išėjimo varžą. Kai strobavimo impulsas neveikia, raktas yra atviras ir kondensatoriaus įtampa nesikeičia. Tada ASK keičia nekintančią įtampą į atitinkamą dvejetainį kodą. Taip gaunamas skaičius proporcingas strobavimo momento įtampos momentinei vertei ir išvengiama keitimo paklaidos, susijusios su keičiamos įtampos kitimu per ASK keitimo laiką. Jeigu sekančio strobavimo momentu signalo įtampa yra didesnė, tai atminties kondensatorius papildomai įkraunamas iki veikiančios momentinės įtampos lygio, o jeigu mažesnė – tai atminties kondensatorius iškraunamas iki veikiančios įtampos lygio per priekinio stiprintuvo mažą išėjimo varžą.

Skaitmeninių oscilografų **ASK keitikliai** priklauso greičiausiai veikiančių tiesioginio lygiagretaus keitimo keitiklių (*angl.* flash) kategorijai. Jie irgi gaminami SiGe technologijos pagrindu ir gali veikti iki 40 GSa/s keitimo sparta.

Po ASK keitiklių duomenys patenka į labai sparčią **duomenų surinkimo atmintinę**, pagamintą pagal CMOS–SDRAM technologiją. Tokios atmintinės sukurtos specialiai oscilografams. Atmintinė surenka ASK keitiklių teikiamus duomenis keitimo sparta. Kiekvienoje iš ASK keitiklių ateinančioje duomenų imtyje yra vienas informacijos baitas, todėl atmintinė privalo apdoroti šiuos duomenis per realų laiką. Atminties moduluose yra po kelis lustus kiekvienam ASK keitikliui.

Tačiau tokios sparčios magistralės, į kurią sutilptų toks spartus srautas nėra. Skiriasi ir magistralės skiltiškumas. Todėl SDRAM atminties duomenys specializuotose (*angl.* application-specific integrated circuit (ASIC)) duomenų valdymo mikroschemose yra perkoduojami ir paketais siunčiami į specialią FPGA (*angl.* field-programmable gate arrays) tipo atsargos atmintinę (*angl.* cache) NV RAM, o iš jos per PCI magistralę yra perduodami centriniam procesoriui ir jame apdorojami, pavyzdžiui, atliekami skaičiavimai reikalingi interpoliavimui ir signalo atvaizdavimui bei kitos matematinės operacijos.

NV RAM atmintis nustato kanalo signalo įrašo ilgį. Imant duomenis iš SDRAM atmintinės gali būti įterpta išrinkimo (*angl.* decimation) operacija. Pakeitus laiko bazę, pavyzdžiui, sumažinus

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

skleidimo spartą, kad būtų perdengtas didesnis laiko tarpas, tik ASK keitikliai veikia pilna sparta, o NV RAM pasirenka tiksliai tuos duomenis, kurie jai tuo metu reikalingi tvarkymui ir atvaizdavimui.

Laiko bazės pradinis taktavimas visuomet vykdomas didžiausiu dažniu, atitinkančiu ASK spartą, o sinchrosignalų tirtis (drebinėjimas *angl. jitter*) būna mažesnis negu šimtai femtosekundžių. Didžiausio dažnio sinchrosignalas nustato galimą trumpiausią laiko bazę. Labai svarbu, kad sinchronizacijos blokas būtų labai spartus ir kad trumpą signalą būtų galima stebėti paleidžiant oscilografą tiesiog nuo jo.

Toliau trumpai aptarsime specifines skaitmeninių (taip pat ir skaitmeninės atminties) oscilografų savybes.

Vienas iš svarbiausių skaitmeninio oscilografo parametrų yra jo vertikalios kreipimo kanalo ASK skilčių (*angl. bit*) skaičius. Jis nustato skaitmeninio oscilografo *vertikalios kreipimo skiriamąją gebą* (*angl. vertical resolution*). Kuo didesnis ASK skilčių skaičius, tuo didesnė vertikali skiriamoji geba ir tuo daugiau įtampos lygių galima atskirti signalo formoje. Žinant ASK skilčių skaičių n , galima apskaičiuoti maksimalų įtampos lygių skaičių N :

$$N = 2^n - 1.$$

Paprastai ieškoma kompromiso tarp ASK veikimo spartos ir jo skiltiškumo. Todėl spartūs ASK paprastai būna 8 bitų skiltiškumo. Jie atskiria $2^8 - 1 = 255$ skirtingus įtampos lygius. Daugelyje atvejų tai leidžia pakankamai detaliai išanalizuoti signalus ir atlikti matavimus su priimtinu tikslumu. 8 skilčių ASK kvantavimo ribinė paklaida neviršija $\pm 0,4\%$.

Vertikalios kreipimo kanalo signalo įrašo *atmintinės talpa* yra dažnai nepakankamai priekabiaai vertinamas skaitmeninių oscilografų parametras, bet jis yra vienas iš pačių svarbiausių. Skaitmeniniuose oscilografuose signalo imtys yra saugomos buferinėse MV RAM atmintinėse. Imčių skaičius, kuris gali būti išsaugotas atmintyje, vadinasi *įrašo ilgis* (*angl. record length*) ir yra išreiškiamas baitais (B) arba kilo baitais (kB). 1 kB atitinka $2^{10} = 1024$ baitų. Kartais vietoje termino įrašo ilgis vartojamas terminas rinkinio ilgis (*angl. acquisition length*).

Kiekvienam strobavimo dažniui būtent atmintinės talpa pasako, kiek ilgai, iki persipildant atminčiai, oscilografas sugebės registruoti signalą.

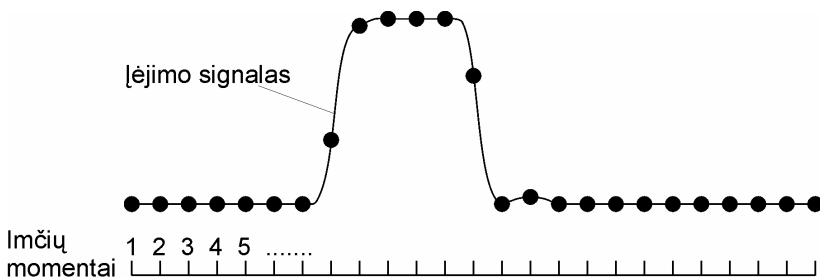
4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Strobavimo dažnio ir atmintinės talpos santykis yra labai svarbus: didelio strobavimo dažnio, bet mažos atmintinės oscilografas gali išnaudoti savo dažnines savybes tiktai pačioje greičiausioje iš turimų laiko bazių. Jeigu tiriamas lėtas procesas ir naudojama lėta skleistinė, tai, esant dideliame strobavimo dažniui, atmintinėje gali tilpti tik labai maža tiriamo proceso dalis.

Priklausomai nuo to, kaip vykdomas strobavimas, skiriami du pagrindiniai strobavimo būdai: strobavimas realiame laike ir strobavimas ekvivalentiniame laike (stroboskopinis keitimas). Pastarasis irgi būna dviejų tipų: nuoseklus strobavimas ekvivalentiniame laike ir atsitiktinis strobavimas ekvivalentiniame laike.

Strobavimas realiame laike (*angl.* real time sampling) yra toks, kai visos imtys, reikalingos signalui atvaizduoti, yra imamos vieno signalo periodo (arba vienkartinio signalo realizacijos) metu nuoseklia tvarka.

Toks strobavimo būdas tinka pasikartojantiems signalams tirti, kurių spektro viršutinis dažnis yra bent 2,5 karto mažesnis už strobavimo dažnį (tenkina Naikvisto diskretizavimo teoremos reikalavimus). Tokia strobavimo sparta yra vadinama *Naikvisto strobavimo sparta* (*angl.* the Nyquist sample rate). Strobavimas realiame laike yra vienintelis būdas, leidžiantis tirti vienkartinius arba pereinamųjų procesų signalus (4.13 paveikslas). Būtent todėl jis dar dažnai vadinamas *vienkartinio bandymo strobavimu* (*angl.* single – shot sampling). Strobavimo realiame laike atveju oscilografo **praleidžiamų dažnių juosta** riboja ne tik jo analoginės dalies praleidžiamų dažnių juosta, bet ir strobavimo sparta.



4.13 pav. Strobavimo realiame laike iliustracija

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Kartais oscilografų gamintojai deklaruoja skaitmeninio oscilografo praleidžiamų dažnių juostos aukščiausią ribinį dažnį (*angl.* cutoff frequency) pagal Naikvisto strobavimo spartą. Tačiau aišku, kad tokios spartos realaus signalo atvaizdavimui nepakanka.

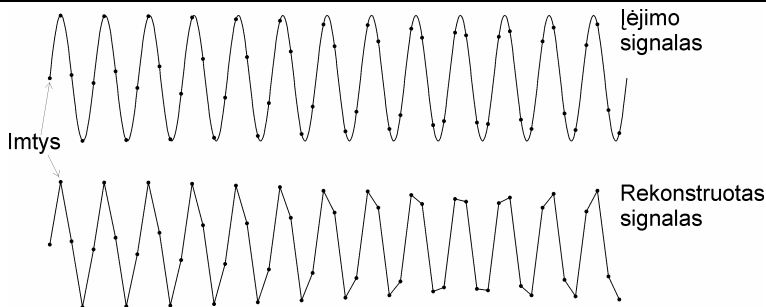
Sukauptų atmintyje imčių reikšmės gali būti atvaizduojamos kaip *taškai* (*angl.* dots) oscilografo ekrane. Tačiau tokį atvaizdavimo būdą galima naudoti tada, kai strobavimo sparta viršiją signalo spektro viršutinį dažnį mažiausiai 25 kartus.

Reprezentatyvesniam signalo vaizdavimui ekrane atvaizduojami ne tik jo imčių taškai, bet ir jie sujungiami tam tikromis linijomis, kurios užpildo tarpus tarp taškų. Ši procedūra vadinama *interpoliavimu*. Netgi, pavyzdžiui, kai strobavimo sparta viršija sinusinio signalo dažnį maždaug 5 kartus, t.y. tiriamo signalo vieno periodo metu imamos 5 imtys ir naudojamas interpoliavimas tiesėmis, jau sunku nuspręsti kokia iš tikrųjų yra signalo forma (4. 14 paveikslas). Norint gauti pakankamai kokybišką signalo vaizdą, reikia sukaupti mažiausiai 25, o kartais ir 100 imčių per signalo periodą. Todėl skaitmeninis oscilografas su 20 GHz realaus laiko strobavimo dažniu garantuoja praktiškai tik (200 – 800) MHz praleidžiamų dažnių juostos plotį.

Naudojamas interpoliavimo būdas nusako kaip vaizdo taškus tarpusavyje sujungti, kad atstatytas vaizdas geriau atitiktų matuojamą. Tam yra apskaičiuojamos kai kurios signalo funkcijos (*vidurkis, standartinis nuokrypis, tikimybės tankio funkcija, galios spektro funkcija ir autokoreliacinė funkcija*), kurios suteikia informaciją, apie tai kaip taškus reikia jungti. Oscilografuose paprastai naudojami du pagrindiniai interpoliavimo būdai: interpoliavimas tiesėmis ir sinuso funkcijos segmentais.

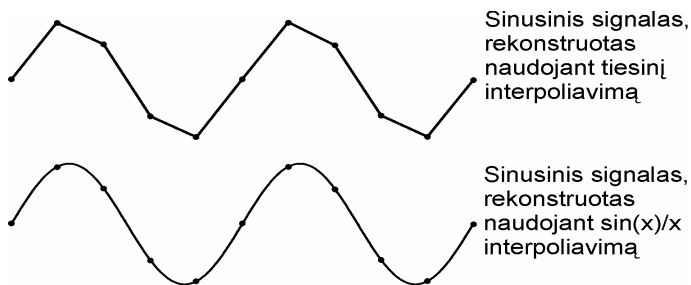
Interpoliavimo *tiesių atkarpomis* (*angl.* linear interpolation) atveju taškai sujungiami tiesėmis. Toks interpoliavimo būdas labiau tinka tiriant staigiai besikeičiančius signalus, pvz. stačiakampio formos impulsus. Jį galima naudoti tada, kai strobavimo sparta viršiją signalo spektro viršutinį dažnį mažiausiai 10 kartų. Toks interpoliavimas oscilografuose dažnai naudojamas pagal nutylėjimą.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.14 pav. Signalų ir jo rekonstrukcijos vaizdas strobuojant 5 kartus per periodą

Interpoliavimas (*$\sin x/x$ funkcijos segmentais* (angl. sine-wave interpolation)) yra geresnis. Šiuo atveju gretimi taškai yra sujungiami kreivėmis. Toks interpoliavimo būdas yra sudėtingesnis, nes reikalauja daugiau matematinių skaičiavimų. Bet jis geriau atkuria signalo aukštadažnes dedamąsias (4.15 paveikslas). Todėl ($\sin x/x$) interpoliavimo atveju strobavimo sparta gali viršyti signalo spektro viršutinį dažnį tik 2,5 karto.



4.15 pav. Sinusinio signalo atvaizdavimas naudojant įvairius interpoliavimo būdus

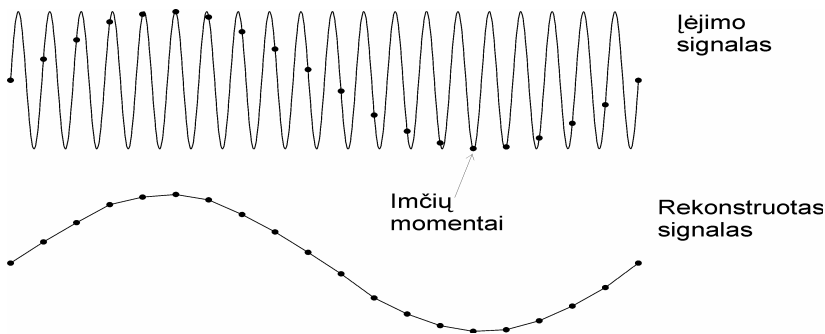
Kuo didesnis strobavimo dažnio ir signalo dažnio santykis, tuo mažesnė tikimybė vadinamo *susitapatinimo* (pakaitos) reiškinio (angl. aliasing). Jis galimas kai strobavimo dažnis yra artimas ir kiek mažesnis už signalo dažnį. Tada kiekviena sekanti imtis imama iš sekančio periodo ir po truputį atsilieka. Todėl gaunamas efektas kaip stroboskopiniame oscilografe: užfiksuotas signalas gaunamas žymiai

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

ilgesnio periodo nei yra iš tikro, nors jo amplitudė yra artima tiriamo signalo amplitudei (4.16 paveikslas). Rekonstruoto signalo dažnis yra lygus signalo ir strobavimo dažnių skirtumui. Tokį signalo vaizdą kartais vadina **signalu šmėkla** (*angl.* signal ghost).

Siekiant išvengti susitapatinimo reiškinių, kartais ribojamas analoginės dalies praleidžiamų dažnių juostos ribinis dažnis iki dydžio net keturis kartus mažesnio už strobavimo dažnį. Tačiau tai apriboja oscilografo praleidžiamų dažnių juostos plotį ir pailgina pereinamosios charakteristikos užaugimo laiko trukmę.

Skaitmeniniuose oscilografuose yra įdiegtas automatinis darbo režimo nustatymas (*angl.* autose). Oscilografas automatiškai nusistato tinkamus matuojamam signalui horizontalaus ir vertikalų kreipimo koeficientus. Šis režimas taip pat padeda išvengti susitapatinimo reiškinių.

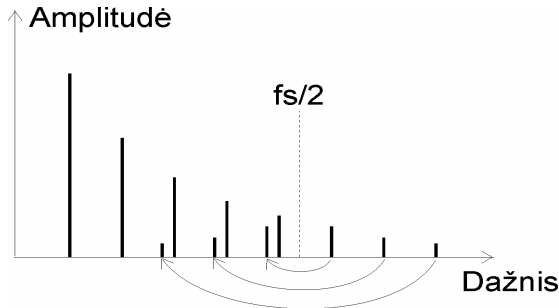


4.16 pav. Susitapatinimo reiškinių iliustracija

Esant įtarimui, kad pasireiškia susitapatinimas, patartina patikrinimui panaudoti analoginį oscilografą. Analoginiuose oscilografuose susitapatinimo reiškinys yra negalimas.

Kai strobavimo dažnis yra per mažas, lyginant su Naikvisto dažniu, gaunamas iškraipytas ir tiriamo signalo spektras (4.17 pav.). Signalų dažnio dedamosios virš $f_{str}/2$ yra išverčiamos, perkeltiant jas į žemesnių dažnių sritį (*angl.* fold back). Šis efektas gali įnešti spektro matavimo paklaidas, kai iš imčių apskaičiuojamas ir atvaizduojamas signalo spektras.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.17 pav. Susitapatinimo reiškinio veikimas dažnių srityje: aukštadažnių signalo komponentų išvertimas ir perkėlimas į žemesnių dažnių sritį

Strobavimas realiame laike leidžia gauti informaciją apie signalo formą *prieš sinchronizacijos įvykį* (angl. pre-triggering). Strobavimas ir imčių įrašymas vyksta visą laiką tarp dviejų sinchronizacijos įvykių ir todėl signalo vaizdas gali būti rekonstruotas pradedant bet kuria pasirinkta jo imtimi. Galima signalo vaizdo rekonstrukciją pradėti pasirenkant vėlesnes už sinchronizavimo įvykį imtis. Atvaizdavimo vėlavimą galima valdyti. Tai vadinamas vėluojantis atvaizdavimas *po sinchronizacijos įvykio* (angl. post-triggering by a variable hold-off time).

Realiame laike strobuojant impulsinį signalą, dėl nepakankamos strobavimo spartos gali atsirasti papildomos jo laiko parametrų matavimo paklaidos.

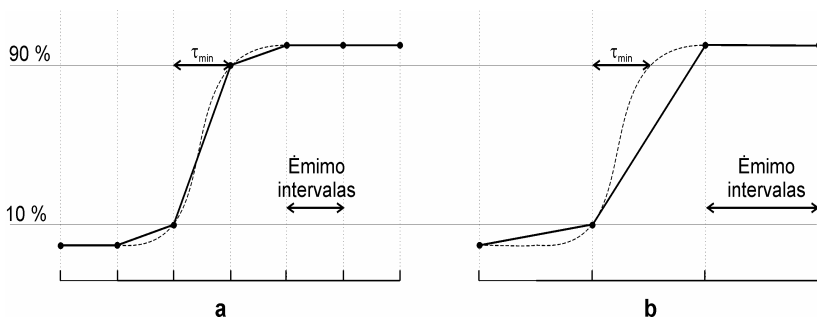
Impulsinių signalų tyrimo metu dažnai matuojamos impulsų užaugimo ir kritimo *laikų trukmės* (angl. rise time, fall time). Kaip jau buvo aptarta anksčiau, analoginio oscilografo atveju, minimali fronto trukmė, kuria galima išmatuoti, priklauso nuo VKK praleidžiamų dažnių juostos pločio. Skaitmeniniuose oscilografuose ta trukmė priklauso ir nuo analoginės dalies praleidžiamų dažnių juostos pločio ir nuo naudojamo strobavimo būdo bei strobavimo intervalo trukmės. Tam, kad būtų galima tiksliau ištirti impulso užaugimo ir kritimo laikų trukmes, jose turėtų tilpti tam tikras imčių skaičius.

Idealiausiu atveju tam, kad būtų galima tiksliau nustatyti 10 % ir 90 % impulso amplitudės lygius, pagal kuriuos matuojami impulsų

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

užaugimo ir kritimo laikai, į laiko intervalą tarp šių lygių turėtų tilpti bent 10 signalo imčių. Tačiau dažnai pagrindinis tikslas yra tik išmatuoti trukmę. Todėl minimali impulso fronto augimo (kritimo) trukmė τ_{fmin} , kuri gali būti išmatuota, neturi būti mažesnė nei strobavimo intervalas T_{str} (4.18a paveikslas). Žinant realaus laiko strobavimo spartą, pvz., $f_{str} = 200$ MHz, tą trukmę galima lengvai apskaičiuoti: $\tau_{fmin} = 1/200 \text{ MHz} = 5 \text{ ns}$.

Impulsai, kurių frontų trukmės yra mažesnės nei strobavimo intervalas, bus atvaizduojami iškraipytai, nes kaip kinta įtampa tarp imčių lieka nežinoma (4.17b paveikslas). Iš kitos pusės, 4.17a paveiksle pavaizduotas idealus atvejis kai dviejų gretimų imčių laiko momentai sutampa su impulso fronto vietomis, kurių vertės sudaro 10 % ir 90 % impulso amplitudės. Realiai tokios situacijos tikimybė labai maža. Todėl frontų trukmės matavimo rezultatas priklauso ne tik nuo realaus laiko strobavimo intervalo trukmės, bet ir nuo imčių momentų padėties laiko skalėje signalo frontų atžvilgiu. Todėl kartais rekomenduojama, kad fronto augimo trukmė viršytų strobavimo intervalą bent 2 kartus. Literatūroje galima sutikti ir kitų rekomendacijų (kad viršytų 1,6 karto arba 5 kartus).



4.18 pav. Minimalios matuojamos fronto trukmės priklausomybė nuo strobavimo intervalo

Oscilografo analoginės dalies praleidžiamų dažnių juostos įtaka frontų trukmės matavimo rezultatui, be abejo, išlieka.

Tiriant sparčius pasikartojančius signalus, kurių spektro viršutinis dažnis viršija 40 % realaus laiko strobavimo dažnio, naudojami *strobavimo ekvivalentiniame laike* (angl. equivalent

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

time sampling) būdai. Šių būdų esmė yra panaši į analoginiuose stroboskopiniuose oscilografuose naudojamą signalo keitimą. Visos imtys, reikalingos signalo formai (*angl.* waveform) atvaizduoti, imamos ne iš vieno signalo periodo, o iš kelių. Kiekviena nauja imtis arba imčių grupė yra imama po kiekvieno naujo sinchronizacijos įvykio.

Esant tokiam strobavimo režimui, po kiekvieno sinchronizacijos įvykio oscilografas įrašo į atmintį informaciją apie mažą signalo dalį: vieną arba kelias imtis. Po kito sinchronizacijos įvykio įrašoma informacija apie kitą to signalo dalį (imtys įrašomos į kitas atminties vietas) ir taip toliau. Kai atmintyje surenkamos visos imtys, reikalingos signalo formai atkurti, oscilografas atvaizduoja signalą savo ekrane. Visas procesas periodiškai kartojasi.

Toks strobavimo būdas leidžia kelis kartus praplėsti oscilografo praleidžiamų dažnių juostą, nes signalo dažnis gali būti net didesnis už strobavimo spartą. Nors fizikinė strobavimo sparta ir išlieka ta pati, strobavimo ekvivalentiniame laike sparta gaunasi didesnė nei strobavimo realiame laike atveju, nes signalo periodui gali tekti daugiau imčių. Tačiau reikia neužmiršti, kad tokiu būdu galima tirti tik idealiai pasikartojančius signalus ir signalo analizė vyksta per daugelį periodų ir strobavimą valdančių sinchrosignalų tirtis turi būti labai maža.

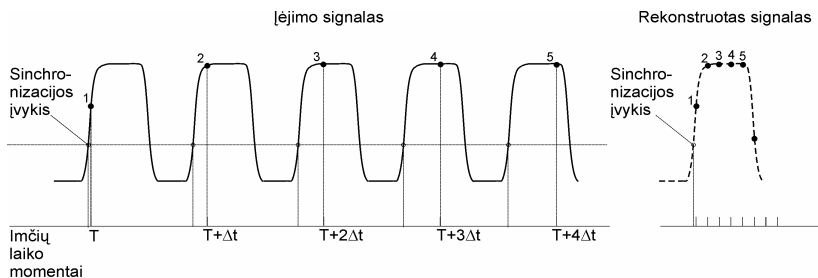
Naudojami du strobavimo ekvivalentiniame laike metodai: nuoseklus strobavimas ekvivalentiniame laike ir atsitiktinis strobavimas ekvivalentiniame laike.

Nuoseklus strobavimas ekvivalentiniame laike (*angl.* sequential equivalent time sampling arba sequential repetitive sampling) yra visai toks pats kaip analoginiame stroboskopiniame oscilografe.

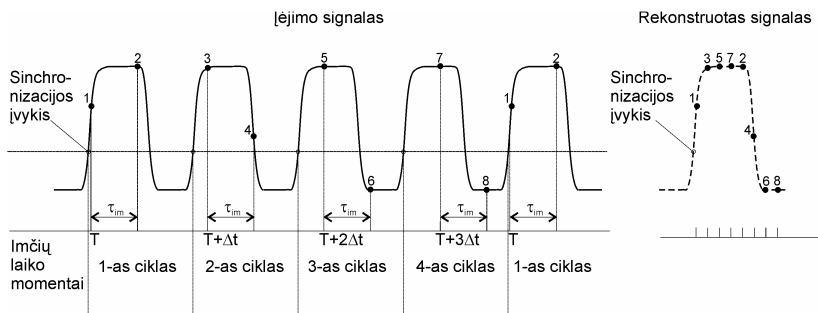
Imtys arba jų grupės yra imamos paeiliui iš kiekvieno signalo periodo (arba kartotinio periodo) nustatyta tvarka (4.19 paveikslas). Pirmą imtis paimama iš karto po pirmo sinchronizacijos įvykio ir įrašoma į atitinkamą atminties vietą. Antra imtis imama po antrojo sinchronizacijos įvykio, bet su tam tikru nustatytu vėlinimu Δt . Po trečiojo sinchronizacijos įvykio strobavimas vėlinamas $2\Delta t$ ir taip toliau. Taigi, n – toji imtis imama suvėlinta laike $(n - 1)\Delta t$ sinchronizacijos įvykio momento atžvilgiu. Kaip minėta, vieno periodo metu gali būti imama ne viena imtis, bet imčių grupė (4. 20

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

paveikslas). Toks būdas leidžia žymiai greičiau užpildyti atmintį signalo įrašu.



4.19 pav. Nuoseklaus strobavimo ekvivalentiniame laike iliustracija



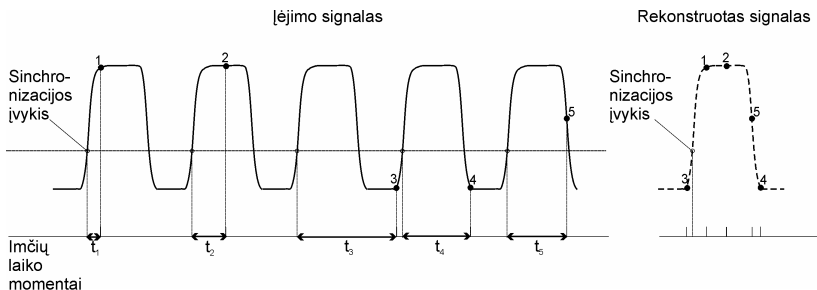
4.20 pav. Nuoseklaus strobavimo imčių grupėmis ekvivalentiniame laike iliustracija

Nuoseklaus strobavimo ekvivalentiniame laike ekvivalentinė strobavimo sparta lygi $1/\Delta t$. Dydis Δt gali būti dešimčių – šimtų ps eilės, todėl oscilografo ekvivalentinė praleidžiamų dažnių juosta gaunasi žymiai platesnė nei kai strobuojama realiaame laike. Tačiau, imtys yra įrašomos į atmintį tik po sinchronizacijos įvykio. Todėl prarandama informacija apie signalo formą prieš sinchronizacijos įvykį.

Atsitiktinis strobavimas ekvivalentiniame laike (angl. random equivalent time sampling arba random repetitive sampling) vykdomas, kai imtys imamos atsitiktiniais laiko momentais. Kol imtis yra imama ir įrašoma į atmintį, sistema laukia sekančio

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

sinchronizacijos signalo.



4.21 pav. Atsitiktinio strobavimo ekvivalentiniame laike iliustracija

Kai gaunamas sinchronizacijos signalas, laiko apskaičiavimo sistema suformuoja atsitiktinį laiko intervalą t_1 , t_2 , t_3 .. (4.21 pav.) iki sekančio strobavimo momento. Priklausomai nuo apskaičiuotos strobavimo laiko intervalo trukmės, imtis įrašoma į atitinkamą atminties vietą ir laukiama sekančio sinchronizacijos momento. Vieno signalo periodo metu gali būti imama ne viena imtis, bet imčių grupė. Imčių skaičius grupėje irgi gali būti atsitiktinis.

Esant pačiam sparčiausiam skleistinės koeficientui (mažiausias laikas/padalai), visų imčių įrašymas į atmintį atsitiktiniu būdu gali užimti labai daug laiko. Oscilografo ekvivalentinė praleidžiamų dažnių juosta gaunasi irgi žymiai platesnė negu naudojant strobavimą realiaame laike. Be to, šiuo atveju yra gaunama informacija apie signalo formą prieš sinchronizacijos įvykį. Bet ekvivalentinė praleidžiamų dažnių juosta gaunasi siauresnė negu nuoseklaus strobavimo atveju. Be to, dėl sinchrosignalų tirties yra apsunkintas tikslus laiko tarpo tarp sinchronizacijos momento ir strobavimo momento nustatymas.

Čia pateikti tik strobavimo ekvivalentiniame laike pagrindiniai būdai. Kiekvienas skaitmeninių oscilografų gamintojas steigiasi tobulinti strobavimo algoritmus. Todėl skirtinguose oscilografuose jie gali šiek tiek skirtis.

Jau buvo minėta, kad naudojama strobavimo sparta turi būti siejama su signalo imčių atmintinės talpa ir naudojamu skleistinės koeficientu, padaugintu iš horizontalios skalės padalų skaičiaus. Dažniausiai naudojamos skalės su 10 padalų, todėl strobavimo

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

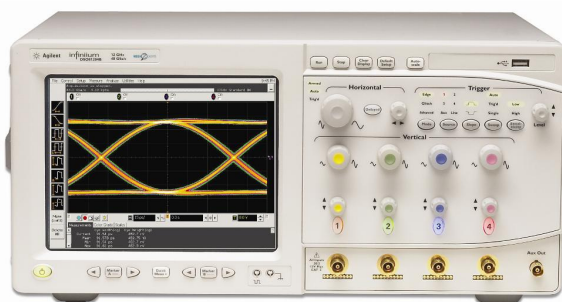
dažnis gali būti apskaičiuotas taip:

$$f_{\text{str}} = \text{atmintinės talpa} / 10 \cdot k_s.$$

Žinant oscilografo maksimalią realaus laiko strobavimo spartą ir kiek signalo imčių sutalpinama į atmintį, galima apskaičiuoti mažiausią skleistinės koeficiento vertę.

Svarbu žinoti šį laiko parametą, kadangi jis nustato geriausią įmanomą oscilografo laiko skiriamąją gebą matuojant vienkartinis (nepasikartojančius) signalus.

Skaitmeniniuose oscilografuose oscilogramos skaisčio intensyvumas nepriklauso nuo signalo kitimo spartos kaip kad yra analoginiuose oscilografuose. Todėl prarandamas „trečias matmuo“ – skaisčio intensyvumas. Todėl yra sukurti vadinamieji **skaitmeninio liuminaforo** oscilografai (*angl.* digital phosphor oscilloscopes), kurių oscilograma panaši kaip analoginių oscilografų, t.y. priklausomai nuo signalo savybių kinta ir jo atvaizdo skaisčio intensyvumas. Tai leidžia gauti daugiau informacijos apie signalą. Juose specialus vaizdo procesorius (*angl.* waveform imaging processor), priklausomai nuo ateinančios iš ASK imties kitimo spartos, pritaiko atvaizdavimo algoritmą, atlikdamas skaitmeninę cheminių liuminaforo švytėjimo procesų emuliaciją. Tam šis procesorius naudoja informaciją sukauptą jo duomenų bazėje. Taip gaunama trimatė informacija apie signalą: amplitudė, laikas ir švytėjimo intensyvumas (skaistis) priklausomai nuo signalo kitimo dinamikos.



4.22 pav. Agilent technologies firmos skaitmeninio oscilografo DSO81304B vaizdas

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Sparčiai tobulėjant skaitmeninės elektronikos technologijoms, nuolat tobulinami ir skaitmeninių oscilografų parametrai. Pavyzdžiui, firmos Agilent technologies skaitmeninis oscilografas DSO81304B (4.22 paveikslas) turi 4 vertikalaus kreipimo kanalus, 13 GHz praleidžiamų dažnių juostos plotį ir gali veikti su 40 GSa/s strobavimo dažniu, kai naudojami du kanalai. Jų skleistinės koeficientas keičiamas nuo 5 ps/padalai iki 20 s/padalai, o kreipimo koeficientai – nuo 1 mV/padalai iki 1 V/padalai.

4.6. Matavimai oscilografais

4.6.1. Įtampos matavimas

Kaip esame aptarę 3 skyriuje, pagrindinis kintamosios įtampos parametras yra jos efektinė vertė U . Tačiau, matuojant oscilografu, paprastai yra matuojama įtampos sklaidos intervalas U_{pp} , kuris atitinka matuojamos įtampos maksimalios ir minimalios momentinių verčių skirtumą. Dažniausiai efektinė vertė lengvai apskaičiuojama, taikant atitinkamus įtampos amplitudės koeficientus. Pavyzdžiui, sinusinės įtampos atveju efektinė vertė gaunama dalinant U_{pp} iš $2,83$ ($2\sqrt{2}$).

Sinusinės įtampos įvairių verčių santykiai parodyti 4.23 paveiksle. U_m – amplitudės vertė, U_{pp} – įtampos sklaidos intervalas (įtampos didumas nuo piko iki piko), u – momentinė vertė tam tikru laiko momentu. Įtampos vertės oscilogramoje užima tam tikrą vertikalios ašies padalų skaičių.

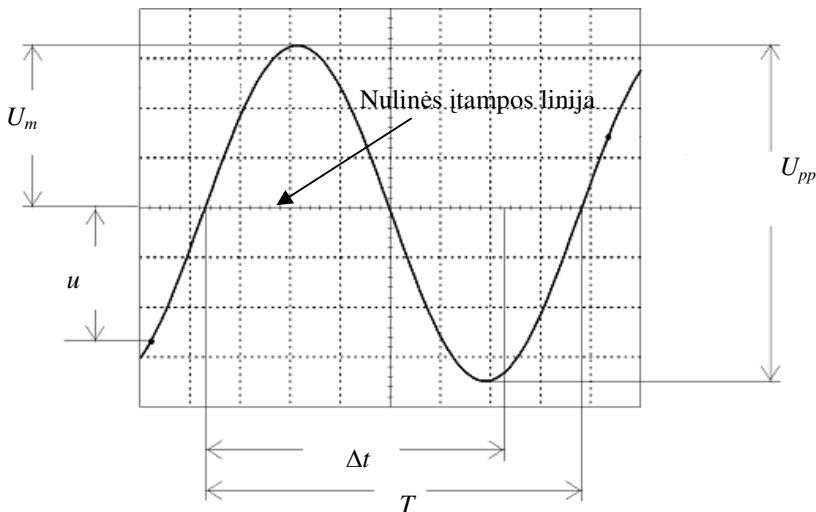
Visos įtampos vertės yra matuojamos atskaičiuojant kiek padalų H jos užima (vertinant ir padalos dalis) ir dauginant šį dydį iš nustatyto šiam oscilografo vertikalaus kreipimo kanalui kreipimo koeficiento k_y :

$$u = k_y H . \quad (4.1)$$

Matuojant įtampų vertes oscilografu, reikia laikytis tam tikrų taisyklių. Reikia, kad H būtų artimas oscilografo ekrano vertikaliam matmeniui. Tam tikslui yra pasirenkamas reikiamas kreipimo koeficientas. Vertikalaus kreipimo koeficiento vertės turi būti

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

kalibruotos. Todėl šis įtampos matavimo būdas vadinamas **kalibruoto kreipimo būdu**. Visada reikia atsižvelgti į tai, ar naudojamas išorinis įtampos daliklis ar ne. Jeigu, pavyzdžiui, naudojamas daliklis 1:10, tai formulės (4.1) rezultatas turi būti padaugintas iš 10.

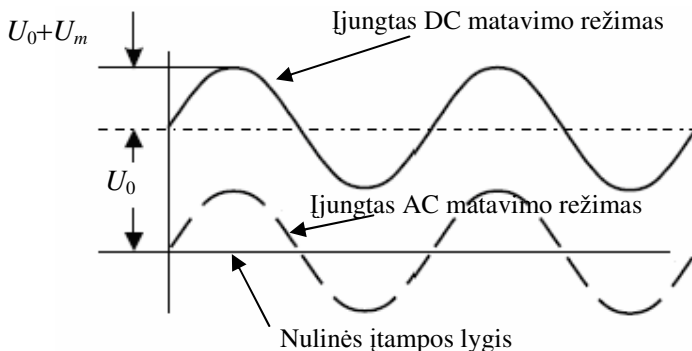


4.23 pav. Sinusinės įtampos įvairios vertės oscilografo ekrane

Dažnai periodinis signalas gali turėti ir nuolatinę dedamąją U_0 . Todėl reikia patikrinti, kuriame lygyje yra **įtampos nulio linija**. Tam atitinkamo Y kanalo įėjimas sujungiamas su korpusu. Tada matoma skleistinė linija ir atitinka nulinę įtampą. Jeigu reikia, tai šį lygį galime pastumti aukštyn arba žemyn su atitinkamais reguliatoriais. Toliau, prijungus tiriamą signalą, stebime ar jo kitimas vyksta apie nulinę liniją ar ne. Jeigu kitimas yra paslinktas, tai rodo, kad yra nuolatinė įtampos dedamoji, kuri irgi gali būti išmatuota (4.24. paveikslas). 4.24 paveikslas brūkšninė linija vaizduoja kaip atrodytų oscilograma, jeigu Y įėjimas būtų uždarytas signalo nuolatinei dedamajai (kintamosios įtampos matavimo režimas AC, *angl.* alternating current). Kai Y įėjimas atviras signalo nuolatinei dedamajai (suminės įtampos matavimo režimas DC, *angl.* direct current). oscilograma pasislenka nuolatinės įtampos ženklo kryptimi

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

ir galime išmatuoti nuolatinę įtampos dedamąją U_0 ir suminės įtampos didžiausią vertę U_0+U_m .



4.24 pav. Nuolatinės ir kintamos įtampos sumos matavimas

4.6.2. Laiko intervalų matavimas

Dažniausiai oscilografu tiriami periodiniai signalai. Jų pagrindinis laiko parametras, kaip žinoma, yra *periodas*.

Signalų periodo trukmė T (4.23. pav.) arba bet kuris kitas signalo laiko intervalas Δt (gali būti ir mažesnis ir didesnis už periodą) yra apskaičiuojami dauginant oscilografo horizontalios skleistinės koeficientą k_s , išreikštą *laiko vienetai/padalai*, iš matuojamą laiko intervalą atitinkančių oscilografo horizontalios skalės padalų skaičiaus L arba l :

$$T = k_s L, \quad \Delta t = k_s l. \quad (4.2)$$

Jeigu reikia, signalo dažnis f yra apskaičiuojamas:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{k_s L}.$$

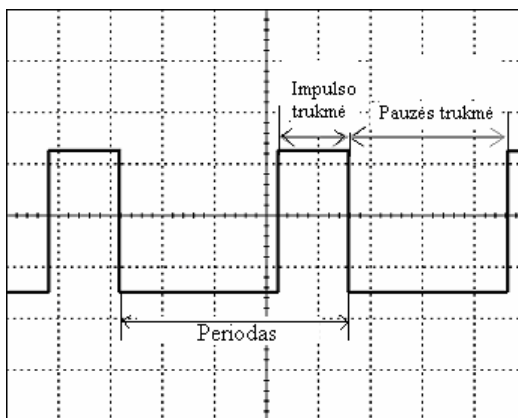
Matuojant signalų laiko parametrus oscilografu reikia, kad matuojamo laiko intervalo užimamas matmuo būtų artimas skleistinės ilgiui. Tam reikia pasirinkti atitinkamą skleistinės koeficientą. Turi būti nustatytos kalibruotos skleistinės koeficiento vertės. Todėl toks laiko intervalų matavimo būdas yra vadinamas

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

kalibruotos skleistinės būdu. Reikia patikrinti ar neaktyvuotas *skleistinės greičio padidinimo režimas* X-MAG (*angl.* X magnification). Jeigu taip, tai X ašies mastelis yra pakeistas (dažniausiai dešimt kartų pagreitinamas (x10)) ir (4.2) formulės teikiamas rezultatas turi būti padalintas iš 10.

Periodiniai impulsinės formos signalai irgi charakterizuojami periodu ir dažniu. Tačiau jie yra charakterizuojami ir kitais specifiniais laiko parametrais: *impulso trukmė* (pločiu), atstumu tarp impulsų (*pauzės trukmė* arba pločiu) (4.25 pav.) ir impulsų *frontų trukmėmis* (4.26 pav.).

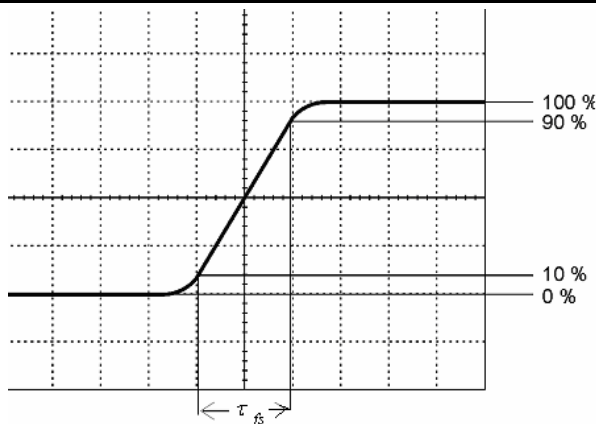
Kaip išsiaiškinome 3 skyriuje, impulso fronto užaugimo laikas ir fronto kritimo laikas yra vieni svarbiausių impulsų parametrų. Kaip žinome, šis laikas matuojamas kaip atstumas laike tarp dviejų taškų, atitinkančių 10 % ir 90 % nuo impulso amplitudės (4.26 pav.).



4.25 pav. Pagrindiniai impulsinių signalų laiko parametrai

Tai daroma siekiant išvengti pereinamųjų procesų ir kitų faktorių sukeltų impulsų iškraipymų įtakos matavimo tikslumui. Iš oscilogramos impulso fronto užaugimo (kritimo) laikas apskaičiuojamas dauginant horizontalų atstumą tarp dviejų taškų, atitinkančių 10 % ir 90 % nuo impulso amplitudės, išreikštą horizontalios skalės padalomis iš skleistinės koeficiento kalibruotos vertės.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.26. pav. Impulso fronto užaugimo laiko matavimas.

Kaip buvo aptarta 4.2.3 punkte, matuojant trupas impulsų frontų trukmes, matavimo rezultatą gali įtakoti oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikas, nes išmatuotas oscilografo ekrane fronto trukmės laikas yra paties impulso fronto trukmės ir oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikų suma:

$$\tau_{fs} = \sqrt{\tau_{fi}^2 + \tau_{osc}^2} \quad (4.3)$$

Jeigu oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikas yra artimas impulso fronto trukmei, tai jis gali labai padidinti matavimo rezultatą. Todėl reikia, kaip minėta 4.2.3 punkte, pasirinkti oscilografą su tinkamu pereinamosios charakteristikos užaugimo laiku, arba jį įvertinti, apskaičiuojant rezultatą:

$$\tau_{fi} = \sqrt{\tau_{fs}^2 - \tau_{osc}^2}.$$

Oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikas paprastai nurodomas oscilografo aprašyme. Jeigu tokio parametro nėra, tai jis apskaičiuojamas iš oscilografo praleidžiamų dažnių juostos pločio. Reikia neužmiršti, kad juostos plotis priklauso ir nuo to kokie jungiamieji kabeliai ir zondai naudojami.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Skaičiuojant oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laiko trukmę iš jo praleidžiamų dažnių juostos pločio patogiu naudoti tokį modifikuotą formulės variantą:

$$t_{osc,ns} = \frac{350}{\Delta f_{MHz}}.$$

4.6.3. Dažnio matavimas oscilografu XY režime

XY darbo režimo atveju vienas iš signalų yra paduodamas į Y kanalą, o antras į X kanalą.

Šiuo atveju oscilografo laiko bazė nenaudojama. Horizontalų kreipimą vykdo prie X kanalo prijungta išorinė įtampa.

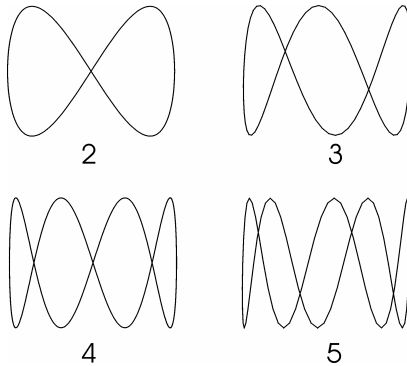
Naudojant šį režimą, galima palyginti prie Y ir X kanalų prijungtų harmoninių virpesių dažnį. Abejomis kryptimis kreipimas vyksta harmoniniais dėsniais. Kai dažniai yra kartotiniai, įvykdoma sinchronizacijos sąlyga ir ekrane gaunamas tam tikros Lissažu figūros vaizdas (4.27 pav.). Pagal figūros pobūdį galime apskaičiuoti dažnių kartotinumą. Kai vienas iš dažnių yra tiksliau žinomas, antrojo virpesio dažnį galima apskaičiuoti. Kurį virpesį jungti prie kurio kanalo principinio skirtumo nėra. Tačiau oscilografo X kanalo praleidžiamų dažnių juosta yra siauresnė, todėl prie jo geriau jungti žemesnio dažnio virpesį. Tikslaus dažnio virpesio dažnis turi būti keičiamas, kad galima būtų įvykdyti sinchronizacijos sąlygą ir gauti stabilios Lissažu figūros vaizdą. Detaliau šis dažnio matavimo būdas yra nagrinėjamas 5 skyriuje.

4.6.4. Fazių skirtumo matavimas oscilografu

To paties dažnio harmoninių virpesių fazių skirtumą galima išmatuoti oscilografu, turinčiu du ar daugiau vertikalų kreipimo kanalų. Naudojamas sudvejintas oscilografo vertikalų kreipimo kanalų darbo režimas (*angl.* dual mode). Oscilografo laiko bazė sinchronizuojama vienu iš signalų. Signalų fazių skirtumas, išreikštas laipsniais, yra apskaičiuojamas išmatavus oscilogramoje (4.28 pav.) atstumą l atitinkantį signalų laiko skirtumą ir atstumą L , atitinkantį signalo periodą, pagal formulę:

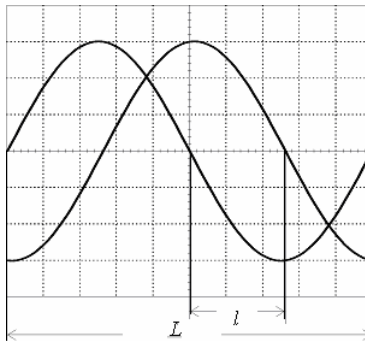
4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

$$\Delta\varphi = \frac{t}{T} \cdot 360^\circ = \frac{l}{L} 360^\circ.$$



4.27 pav. Lissazu figūrų formos kai vertikalaus kreipimo kanalo signalo dažnis 2, 3, 4 arba 5 kartus didesnis už horizontalaus kreipimo kanalo signalo dažnį

Tam, kad matavimų tikslumas būtų didesnis reikia, kad signalo periodas užimtų beveik visą oscilografo ekrano ilgį. Pageidautina, kad abiejų signalų aukščiai būtų vienodi. Abi oscilogramos turi būti išdėstytos simetriškai ekrano nulinio lygio linijos atžvilgiu. Kai signalai turi nuolatinę dedamąją reikia naudoti nuolatinei dedamajai uždara oscilografo įėjimą (AC darbo režimas).



4.28 pav. Fazių skirtumo matavimas oscilografu dviejų kanalų sudvejintu darbo režimu

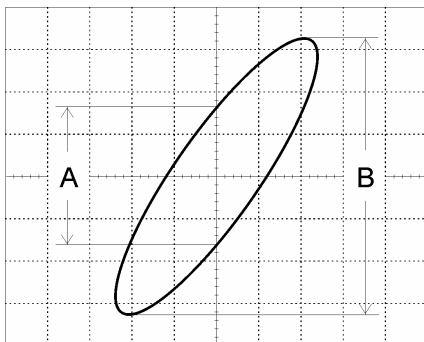
4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Kai fazių skirtumai maži, geriau naudoti Lissažu figūrų metodą. Naudojamas oscilografo XY darbo režimas. Signalai, kurių fazių skirtumas matuojamas yra paduodami į X ir Y įėjimus. Kadangi signalų dažnis yra vienodas, gaunama paprasčiausia Lissažu figūra – elipsė. 4.29 pav. parodytas stebimos Lissažu figūros vaizdas ir oscilogramos matmenys, kurie naudojami fazių skirtumo apskaičiavimui.

Išmatavus atstumus A ir B oscilografo ekrane, įtampų fazių skirtumas apskaičiuojamas taip:

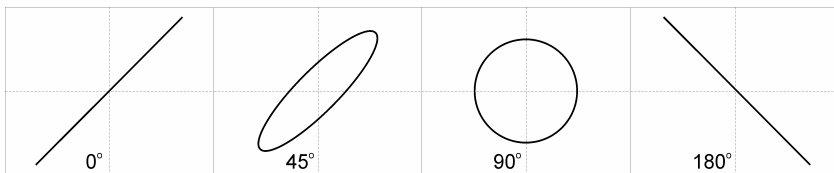
$$\Delta\varphi = \arcsin \frac{A}{B}.$$

Fazių skirtumo ženklas lieka nežinomas. Šio matavimo metodo ypatumai bus nagrinėjami 5 skyriuje.



4.29 pav. Fazių skirtumo matavimas elipsės būdu

Charakteringos Lissažu figūros, gaunamos kai fazių skirtumas yra 0° , 45° , 90° ir 180° laipsniai, yra parodytos 4.30 paveiksle.

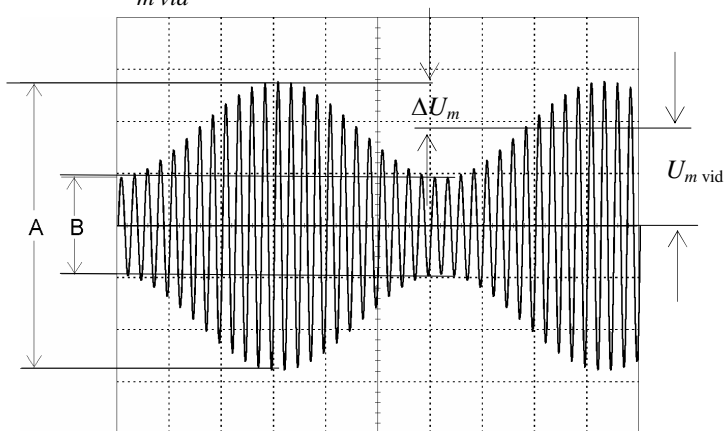


4.30 pav. Lissažu figūros, stebimos kai yra įvairūs signalų fazių skirtumai

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

4.6.5. Amplitudinės moduliacijos gylio matavimas oscilografu

Kai aukšto dažnio harmoninio virpesio amplitudė yra valdoma žemesnio dažnio virpesiu, turime moduluotosios amplitudės virpesį. Kai moduluojantis virpesys taip pat yra harmoninis, tai per moduluojančio virpesio periodą aukštojo dažnio virpesio amplitudė įgyja didžiausią ir mažiausią vertes (4.31 pav.). Jeigu moduliacija yra simetrinė, tai amplitudės nuokrypis ΔU_m nuo vidutinės amplitudės vertės $U_{m \text{ vid}}$ gaunamas vienodas. Nuokrypio santykinė vertė rodo amplitudinės moduliacijos gylį. Dažniausiai jis yra reiškiamas procentais: $m = \frac{\Delta U_m}{U_{m \text{ vid}}} 100, \%$.



4.31 pav. Amplitudinės moduliacijos gylio matavimas

Paprasčiausias metodas matuoti harmoninės amplitudinės moduliacijos gylį oscilografu yra paduoti moduluotą virpesį į oscilografo Y įėjimą ir susinchronizuoti jo laiko bazę taip, kad ekrane stabiliai matytųsi moduluoto virpesio gaubtinės periodas. Tada galima iš oscilogramos nustatyti vidutinį amplitudės dydį ir nuokrypį nuo amplitudės. Kadangi abu dydžiai būtų skaičiuojami naudojant tą patį kreipimo koeficientą, tai galima imti tik juos vertinančių oscilogramos atkarpų santykį, neperskaiciuojant jų į įtampas. Kai moduliacija simetriška, tai moduliacijos gylį yra

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

patogiau skaičiuoti pagal amplitudžių sklaidos dydžius: didžiausią A ir mažiausią B :

$$m = \frac{A - B}{A + B} \cdot 100, \%$$

Matuojant moduliacijos gylį šiuo metodu vertikalaus kreipimo koeficientas parenkamas toks, kad matmuo A užimtų beveik visą ekrano aukštį. Tada gaunamos mažesnės atstumų matavimų paklaidos ir tikslesnis matavimo rezultatas.

Patekti įvairių virpesių parametrų matavimo pavyzdžiai neapima visų oscilografais vykdomų virpesių parametrų matavimų atvejų ir yra tik dažniau naudojamų matavimų pavyzdžiai. Visais atvejais oscilogramose matuojami atstumai, todėl reikia, kad matuojant jie būtų kiek galima didesni, tuomet jų ilgio, išmatuoto oscilografo tinklelio padalos žingsniu, matavimo paklaidos bus mažesnės.

4.7. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui

1. Kokia oscilografų paskirtis ir kaip jie klasifikuojami?
2. Iš kokių svarbiausių struktūrinių dalių susideda analoginis ir analoginis-skaitmeninis elektroniniai oscilografai? Paaiškinkite kaip veikia jo elementai ir kokie reikalavimai jiems keliami.
3. Suformuluokite sąlygas, kurias įvykdžius oscilografo ekrane bus matomas neiškraipytas signalo vaizdas?
4. Kokia analoginių oscilografų vertikalaus kreipimo kanalo signalo vėlinimo linijos paskirtis?
5. Koks dydis vadinamas oscilografo kanalo vertikalaus kreipimo koeficientu? Koks jo ryšys su kanalo jautriu įtampa? Nuo kokių oscilografo schemos elementų savybių priklauso?
6. Kokie oscilografo kanalo įėjimo grandinės parametrai daro įtaką matuojamiems signalo parametrams? Kaip ta įtaka mažinama?
7. Kas yra sinchronizacija? Kokios sinchronizacijų rūšys naudojamos ir kada?
8. Į oscilografo Y įėjimą yra paduota signalo įtampa, o ekrane matomas šviesaus stačiakampio vaizdas. Ką tai reiškia? Ką reikia daryti, kad matytųsi normali signalo oscilograma?

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

9. Kas yra skleistinė ir kokios jų rūšys naudojamos? Kada naudojama periodinė skleistinė?

10. Kada naudojama laukianti skleistinė?

11. Kokį dydį vadina oscilografo skleistinės koeficientu? Koks jo ryšys su skleistinės greičiu? Nuo ko priklauso?

12. Kaip veikia oscilografo skaitmeniniai signalų parametrų matuokliai?

13. Kokios matavimo paklaidų priežastys, matuojant virpesių parametrus oscilografu?

14. Oscilografo skleistinės koeficientai atitinkamai yra, pavyzdžiui, 50 ms/pad. ir 0,2μs/pad (1 pad. = 6 mm). Koks skleistinės greitis?

15. Paaiškinkite koks yra stroboskopinio oscilografo sudarymo principas ir kokie jo parametrai nustato laiko mastelio transformacijos koeficiento dydį?

16. Nubraižykite supaprastintą stroboskopinio keitiklio struktūrinę schemą ir paaiškinkite veikimą. Nuo ko priklauso signalo įtampos momentinių verčių imčių skaičius tenkantis signalo periodui?

17. Kokie svarbiausi skaitmeninės atminties ir skaitmeninių oscilografų struktūrinės schemos elementai?

18. Nuo ko priklauso skaitmeninės atminties ir skaitmeninių oscilografų vertikalios kreipimo kanalo skiriamoji geba?

19. Kaip sudaryta strobavimo schema? Kam reikalingas analoginis įtampos momentinės vertės elementas?

20. Kaip vaizduojama oscilograma skaitmeninės atminties ir skaitmeniniuose oscilografuose? Kas yra interpoliavimas ir koks jis naudojamas skaitmeninės atminties ir skaitmeniniuose oscilografuose?

21. Kaip vykdomas signalo strobavimas realiame laike skaitmeniniuose oscilografuose?

22. Kaip vykdomas signalo strobavimas ekvivalentiniame laike skaitmeniniuose oscilografuose? Kuo skiriasi nuoseklusis ir atsitiktinis strobavimas ekvivalentiniame laike?

23. Kaip susijęs signalo dažnis ir strobavimo dažnis įvairių strobavimo būdų atvejais?

24. Kas yra signalo įrašo ilgis ir nuo ko jis priklauso?

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

25. Kokius virpesių parametrus galima išmatuoti elektroniniu oscilografu/

26. Kokie pagrindiniai oscilografų metrologiniai parametrai?

27. Kaip oscilografu matuojama įtampa?

28. Kaip oscilografu matuojami signalų laiko parametrai?

29. Kokia oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laiko trukmė, jeigu jo praleidžiamų dažnių juostos ribinis dažnis yra 700 MHz? Kokias impulsų frontų trukmes juo galima matuoti neviršijant $\pm 5\%$ paklaidos?

30. Kaip oscilografu matuojamas fazių skirtumas?

31. Kokios oscilogramos gaunamos kai matuojamas fazių skirtumas yra $0^\circ, 90^\circ$ ir 180° ?

32. Oscilografu matuojamas fazių skirtumas. Oscilogramos (4.29 pav.) atkarpos gautos tokios: $B = 40$ mm, $A = 20$ mm. Atstumų matavimo standartinės paklaidos yra ± 1 mm. Koks signalų fazių skirtumas ir kokia jo matavimo standartinė paklaida? Nurodymas: reikia naudoti netiesioginių matavimų paklaidų vertinimo metodus.

33. Kaip oscilografu gali būti matuojamas periodinių virpesių dažnis?

34. Kas yra virpesio amplitudės moduliacija?

35. Koks parametras vertina amplitudinės moduliacijos gylį?

36. Kaip oscilografu galima išmatuoti nesimetrinės ir simetrinės amplitudinės moduliacijos gylius/

37. Kaip sinchronizuojamas oscilografas matuojant amplitudinės moduliacijos gylį?

38. Matuojant oscilografu amplitudinės moduliacijos gylį gauti, pavyzdžiui, tokie rezultatai (4.31. pav.): $A = 70$ mm, $B = 10$ mm. Koks moduliacijos gylis ir kokia jo ribinė matavimo paklaida, jeigu A ir B atkarpų matavimo ribinė paklaida yra $\pm 10\%$?

Dažnio ir laiko intervalų matavimas

Šiame skyriuje nagrinėjamos matavimo priemonės ir metodai skirti periodinių virpesių dažniui ir periodui matuoti. Aptariami ir skaitmeniniai impulsų trukmės bei laiko intervalų tarp impulsų matavimo metodai.

Elektronikos įtaisuose ir sistemose naudojamų periodinių virpesių dažnių ir periodų diapazonas yra labai platus ir nėra universalus metodo arba matavimo priemonės, kuri tiktų visam tokiam plačiam dažnių ir periodų intervalui. Todėl yra sukurta ir naudojama daug įvairių matavimo metodų ir priemonių.

Metodai ir priemonės yra nagrinėjami juos suskirsčius į analoginius ir skaitmeninius.

Daugiau dėmesio yra skiriama šiuo metu plačiau naudojamų skaitmeninių matavimo metodų ir priemonių pristatymui, tačiau nagrinėjami ir kiti dar gana plačiai naudojami būdai: rezonansiniai ir heterodininio dažnių palyginimo.

5.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas

Periodinio virpesio *periodu* T vadinamas mažiausias laiko tarpas per kurį pasikartoja laisvai pasirinkta virpesio momentinė vertė ir jos

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

kitimo laike dėsningumas: $s(t) = s(t+kT)$, $k = 1, 2, 3, \dots$. Periodo, kaip ir kitų laiko intervalų SI sistemos matavimo vienetas yra *sekundė* (s). Periodinio virpesio *dažnis* apibrėžiamas kaip dydis atvirkščias periodui: $f = 1/T$. Dažnio matavimo vienetas SI sistemoje yra *hercas* ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$). Realūs virpesiai nėra griežtai periodiniai, jų periodui būdingas ir lėtas tolydusis kitimas (*dreifas*) ir greitai svyravimai (*fluktuacijos*). Kintantis laike tokių artimų periodiniams (*kvaziperiodinių*) virpesių dažnis vadinamas *momentiniu dažniu*.

Realaus, artimo harmoniniam (*kvaziharmoninio*), virpesio $s(t) = A(t) \cos \Psi(t) = A(t) \cos \{[(\omega_0 + \Delta\omega(t))t + \varphi(t)]\}$ *momentinis kampinis dažnis* apibrėžiamas kaip jo momentinės fazės Ψ kitimo greitis: $\omega(t) = \frac{d\Psi}{dt}$. Jis matuojamas *radianais per sekundę* (rad/s). Tokio virpesio kampinį dažnį, dažnį ir periodą sieja žinoma priklausomybė: $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$. Idealaus harmoninio virpesio visi minėti parametrai yra pastovūs dydžiai.

Sklindant harmoniniam virpesiui plokščios elektromagnetinės bangos pavidalu vienalytėje terpėje su pastoviais elektromagnetiniais parametrais, jos nueitas kelias per periodą – *bangos ilgis* yra

atvirkščiai proporcingas virpesio dažniui: $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon\mu}}$; čia v yra

bangos greitis terpėje, ε ir μ – atitinkamai terpės elektrinė ir magnetinė konstantos, o c – šviesos greitis vakuume, lygus 299 792 458 m/s tiksliai.

Laiko intervalai matuojami tarp pasirinktų to paties virpesio momentinių verčių (pavyzdžiui, artimo stačiakampiui impulsinio virpesio priekinio fronto trukmė arba paties impulso trukmė) arba tarp dviejų skirtingų virpesių pasirinktų momentinių verčių.

Kaip minėta, dažnis nėra idealiai pastovus, todėl paprastai išmatuojamas *vidutinis dažnis* per tam tikrą laiką. Dažnai ir virpesio periodas nustatomas kaip daugelio periodų vidutinė vertė.

Dažnis ir laiko intervalai yra šiuo metu tiksliausiai išmatuojamai fizikiniai dydžiai. Naudojant grupinį laiko ir dažnio etaloną sudarytą iš cezio, rubidžio ir vandenilio kvantinių generatorių gaunama sekundės bei herco santykinė suminė kvadratinė neapibrėžtis apie $\pm 10^{-12}$.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

Elektronikos įtaisuose ir sistemose naudojamų periodinių virpesių dažnių diapazonas yra labai platus. Virpesių dažnius tenka matuoti nuo mažesnių už 0,001 Hz iki aukštesnių už 1000 GHz. Kaip minėta, nėra universalaus metodo arba matavimo priemonės, kuri tiktų visam nurodytam dažnių intervalui. Sprendžiant konkretų matavimo uždavinį, pasirenkamas toks būdas arba priemonė, kuris garantuoja reikiamą rezultato tikslumą. Kuris parametras bus matuojamas – periodas, dažnis ar bangos ilgis – irgi priklauso nuo matavimo uždavinio. Matuojant žemus dažnius, dažnai matuojamas periodas, nes jis gaunamas ilgas ir šiuo atveju jį galime išmatuoti tiksliau nei dažnį. Vidutiniuose dažniuose dažniausiai matuojamas virpesio dažnis, o labai aukštuose dažniuose dažnai matuojamas virpesio bangos ilgis.

Dažnio matavimui sukurta daugybė įvairių metodų. Pagal naudojamus matavimo principus ir priemones jie gali būti suskirstyti į tokias grupes:

1. **Palyginimo būdai** – kai matuojamasis dažnis surandamas jį palyginant su pakankamu tikslumu žinomu kito virpesio dažniu. Šie metodai gali būti sugrupuoti į tokias grupes:

- 1.1. Oscilografiniai metodai;
- 1.2. Heterodinavimo metodai;
- 1.3. Rezonansiniai metodai.

2. **Tiesioginio matavimo būdai** – kai dažnis išmatuojamas tiesiogiai dažnio matuokliais (*dažniamačiais*) arba periodo matuokliais ir po to apskaičiuojamas dažnis. Dažniamačius skirsto į tokias rūšis:

- 2.1. Elektromechaniniai dažniamačiai;
- 2.2. Kondensatoriniai dažniamačiai;
- 2.3. Skaitmeniniai periodo ir dažnio matuokliai.

Pastaruoju metu dažnio matavimo praktikoje labai paplito skaitmeniniai matuokliai, kadangi jie gali matuoti dažnius, dažnių santykį, periodus ir laiko intervalus labai plačiame dažnių ruože (pavyzdžiui, nuo 10 Hz iki 10 GHz). Jų matavimo tikslumas irgi yra aukštas. Tokie matuokliai teikia matavimo rezultatus skaitmeniniu pavidalu, todėl gali būti paprastai integruojami į matavimo–informacines sistemas arba valdomi mikroprocesoriais. Tačiau, kai dažniai yra didesni už apie 600 MHz, tiesioginis skaitmeninis dažnio

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

matavimas yra neįmanomas dėl nepakankamos elektronikos grandinių loginių elementų veikimo spartos. Todėl didesni dažniai yra sumažinami juos perkeltiant žemyn t.y. panaudojamas virpesių heterodinavimo metodas. Centimetrinių ir milimetrinių bangų diapazonuose jau tenka naudoti rezonansinius dažniamačius sugraduotus bangos ilgio vienetais – *bangomačius*.

Žemų ir vidutinių dažnių (iki kelių šimtų MHz) virpesių atveju, kai nereikia didelio tikslumo, dažnį dažniausiai netiesiogiai matuoja oscilografu. Oscilografas, kaip universali virpesių stebėjimo ir parametrų matavimo priemonė, dažnai būna laboratorijose ir toks jo panaudojimas pasiteisina.

Įvertinus tai kas aukščiau išdėstyta, apsiribosime detalesniu oscilografinių metodų, rezonansinių metodų ir ypač skaitmeninių metodų aptarimu.

5.2. Oscilografiniai dažnio ir laiko intervalų matavimo būdai

Matavimams yra naudojamas elektroninis oscilografas. Dažniui matuoti dažniausiai naudojamas *kalibruotos skleistinės būdas*. Taip pat kartais oscilografas naudojamas kaip palyginimo priemonė (*komparatorius*) palyginant etaloninį kito generatoriaus dažnį su matuojamuoju dažniu – vykdomas palyginimas pagal *Lisažu figūras* arba naudojant *apskritiminės skleistinės metodą*. Kai kurie būdai jau yra aptarti 4 skyriuje nagrinėjant kai kuriuos oscilografinius virpesių parametrų matavimo būdus. Tačiau siekiant juos plačiau aptarti kitų oscilografinių dažnio matavimų kontekste, jis bus pakartotinai smulkiau aptarti.

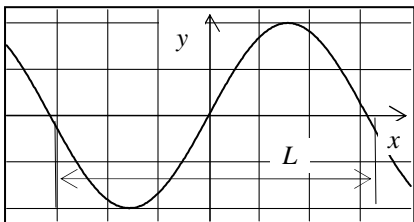
5.2.1. Tiesinės kalibruotos skleistinės būdas

Šis būdas yra labai paprastas: užtenka panaudoti tik oscilografo Y įėjimą. Tačiau matuoti galima tik tada, jei yra žinomos diskretinės kalibruotos skleistinės koeficiento k_y vertės.

Į oscilografo Y įėjimą paduodamas nežinomo dažnio f virpesys. Oscilografo ekrane gauname virpesio vaizdą (oscilogramą) (5.1. pav.).

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

Skleistinės koeficientą k_s parenkame tokį, kad ekrane matytųsi pilnas virpesio periodas. Tada išmatuojame virpesio periodą atitinkantį atstumą L oscilografo skalės padalomis. Žinodami padalos vertę (skleistinės koeficientą), apskaičiuojame signalo periodą pagal formulę:



5.1 pav. Virpesio periodą atitinkantis atstumas oscilografo ekrane

$$T = k_s \cdot L ;$$

čia k_s – panaudotas matuojant skleistinės koeficientas.

Kuomet skleistinės greičio nepakanka, matuojamas kelių periodų ilgis ir gautas rezultatas atitinkamą skaičių kartų

sumažinamas.

Kaip matosi iš aptartos formulės, matuojamas periodas yra palyginamas su oscilografo skleistinės generatoriaus periodu T_s (per skleistinės koeficientą), o matavimo tikslumas priklauso nuo ilgio matavimo tikslumo ir skleistinės koeficiento kalibravimo tikslumo. Ilgio matavimo tikslumas priklauso nuo ekrano darbinės dalies ilgio ir virpesio vaizdo linijos storio. Šiuolaikinių oscilografų ilgio matavimo paklaida paprastai neviršija $\pm 1\%$. Skleistinės koeficiento paklaida analoginiams oscilografams yra apie $\pm(3 \div 5)\%$. Taigi skleistinės koeficiento paklaida riboja šio metodo tikslumą.

5.2.2. Harmoninės skleistinės arba Lisažu figūrų metodas

Matavimo schema pateikta 5.2a paveiksle. Čia G2 yra keičiamo dažnio generatorius, kuris teikia etaloninio dažnio virpesį. Šis virpesys paprastai paduodamas į oscilografo X įėjimą, nes šio kanalo jautris yra mažesnis, o generatoriaus įtampa gali būti pasirinkta reikiamo didumo. Keisdami etaloninio generatoriaus G2 dažnį, esant tam tikrai jo vertei f_0 , oscilografo ekrane gauname tam tikro sudėtingumo Lisažu figūrą (5.2b pav.).

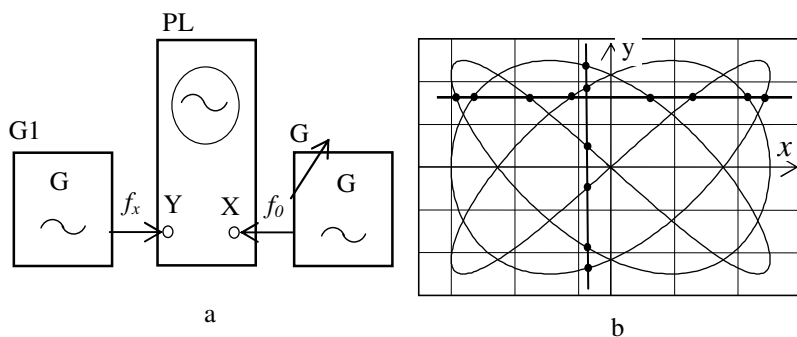
Ant Lisažu figūros brėžiame vertikalią ir horizontalią tieses, kaip parodyta 5.2b paveiksle ir skaičiuojame šių tiesių susikirtimo su

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

figūra didžiausią taškų skaičių n_y ir n_x . Dėl virpesių dažnių fluktuacijų Lisažu figūros vaizdas nėra stabilus. Todėl matavimas paprastai dar įmanomas kai santykis n_y/n_x nemažesnis už 0,1 arba neviršija 10. Nežinomas dažnis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f = f_0 \cdot \frac{n_x}{n_y};$$

čia n_x – maksimalus Lisažu figūros susikirtimų su horizontalia linija skaičius, n_y – maksimalus Lisažu figūros susikirtimų su vertikalia linija skaičius, f_0 – etaloninio generatoriaus virpesio dažnis.



5.2 pav. Matavimo schema, naudojanti Lisažu figūrų metodą (a) ir Lisažu figūros susikirtimo su tiesėmis maksimalaus taškų skaičiaus nustatymas (b)

Kartotinumas patogus tuo, kad galima išmatuoti dažnį žymiai platesniame dažnių ruože nei gali generuoti etaloninis generatorius.

Matavimo paklaida priklauso tik nuo etaloninio generatoriaus dažnio paklaidos, jei n_x ir n_y yra suskaičiuoti tiksliai.

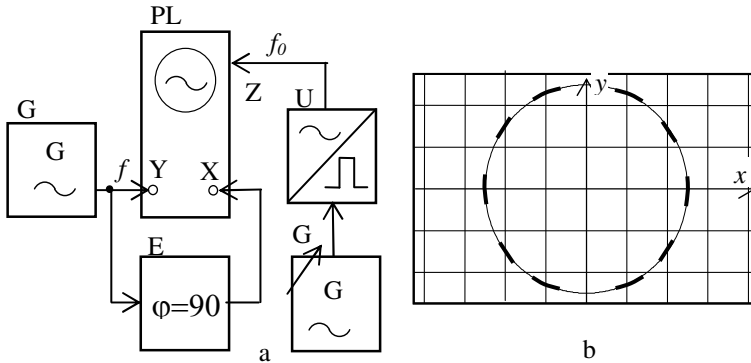
5.2.3. Apskritiminės skleistinės metodas

Šiam metodui panaudojami visi trys oscilografo įėjimai – X, Y, Z. Per Z įėjimą yra valdomas oscilogramos skaistis. Matavimo schema pateikta 5.3a paveiksle.

Matuojamo dažnio virpesys atlieka oscilografo spindulio skleidimą vertikalia kryptimi tiesiogiai, o horizontalia kryptimi per fazės sukiklį, pasukantį virpesio fazę 90 laipsnių kampą. Taigi

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

vyksta spindulio harmoninė skleistinė ortogonalioji kryptimis ortogonaliais harmoniniais virpesiais. Tokiu atveju oscilografo ekrane gaunamas ovalo vaizdas. Parinkus oscilografo X ir Y kanalų kreipimo koeficientus, galime gauti apskritimo vaizdą. Tai ir yra *apskritiminė skleistinė*. Etaloninio dažnio generatorius G_2 teikia dažnį f_0 , o iš jo virpesio impulsų formuotuvu IF formuoja trapius impulsus, paduodamus į Z įėjimą. Oscilografo ekrane gauname apskritimu išsidėsčiusias skaisčio žymes (6.3b pav.), kurių ilgis priklauso nuo suformuotų impulsų trukmės.



5.3 pav. Matavimo schema, naudojanti apskritiminės skleistinės metodą (a) ir oscilografo ekrane apskritimu išsidėsčiusias skaisčio žymes (b)

Jeigu $f_0 = mf$, kur m – sveikas skaičius, ekrane gauname m skaisčio žymių. Matuojamas dažnis yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f = \frac{f_0}{m}.$$

Kadangi virpesių dažniai nėra idealiai stabilūs, tai skaisčio žymės sukasi bei svyruoja. Vaizdas trumpam sustabdomas, parinkus tam tikrą etaloninio generatoriaus dažnį. Kad neapsiriktume skaičiuodami, taškų skaičius turėtų neviršyti 20. Toks yra ir didžiausias galimas dažnių kartotinumai.

Šio metodo matavimo tikslumas irgi priklauso tik nuo etaloninio generatoriaus dažnio paklaidos.

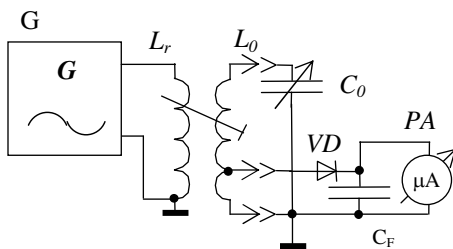
5.3. Rezonansiniai dažnio matavimo būdai

Naudojami radijo virpesių dažniams matuoti. Matuojamų dažnių diapazonas nuo 50 kHz iki 50 GHz. Šis būdas netinka žemiems dažniams matuoti, nes reikia geros kokybės kontūrų.

Matuojamasis dažnis yra palyginamas su kalibruoto virpesių kontūro rezonansiniu dažniu. Šį metodą realizuojantys matuokliai – **rezonansiniai dažniamačiai** – sudaryti iš etaloninių elementų rezonansinių virpesių kontūro, kurio rezonanso dažnį galima keisti tam tikrose ribose ir rezonanso indikatorius. Juo dažniausiai būna paprasčiausias detektorinis voltmetras.

Kai dažniai yra iki kelių šimtų megahercų, virpesių kontūrą sudaro iš diskrečių elementų: keičiamos etaloninės induktyvumo ritės L_0 ir etaloninio orinio kintamosios talpos kondensatoriaus C_0 (5.4 pav.).

Dažnis randamas suderinant virpesių kontūrą rezonansui matuojamajam dažniui ir atskaitant kontūro rezonanso dažnį iš jo kintamosios talpos kondensatoriaus sugraduotos skalės. Siekiant gauti platesnį matuojamųjų dažnių diapazoną, dažniamačio ritės, kaip minėta, daromos keičiamomis, o kondensatoriaus skalė graduojama sąlyginiais vienetais pagal etaloninį dažniamatį. Kiekvienai ritei sudaromos atskiros dažniamačio gradavimo lentelės, leidžiančios pagal skalės atskaitas apskaičiuoti dažnį.



5.4 pav. Rezonansinis dažniamatis su ryšio rite

Kadangi įneštinės reaktyviosios varžos išderina kontūrą, o įneštinės aktyviosios varžos mažina jo kokybę, tai dažniamačio kontūro ryšys su matuojamojo dažnio virpesių šaltiniu ir rezonanso

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

indikatoriumi privalo būti silpnas. Ryšiui su virpesių šaltiniu sudaryti naudojama ryšio ritė L_r . (5.4 pav.).

Ryšys su indikatoriumi dažniausiai įvykdomas dalinai prijungiant jį prie virpesių kontūro ir jo ineštinių varžų įtaka kontūro parametrams ir tuo pačiu jo rezonansiniam dažniui ir kokybei sumažėja.

Rezonansinių dažniamačių matavimo paklaidos gaunamos dėl jo kontūro rezonansinio dažnio gradavimo netikslumo ir jo nestabilumo, atsirandančio dėl kontūro elementų parametrų kitimo laike ir dėl klimatinų sąlygų įtakos, ypač veikiant temperatūrai ir kintant kontūro geometriniais matmenimis. Metodo paklaida gaunama dėl kontūro netikslaus suderinimo rezonansui su matuojamuoju dažniu. Ji priklauso nuo indikatoriaus skyros gebos ir kontūro kokybės ir, kai naudojamas detektorinis voltmetras su tiesiniu režimu veikiančiu detektoriumi, kaip žinoma yra lygi:

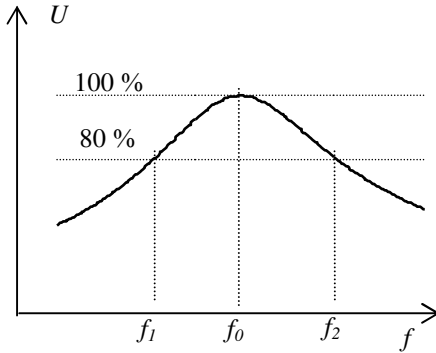
$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx \frac{\sqrt{\frac{\Delta U}{U_0}}}{2Q_e};$$

čia U_0 – indikatoriaus rodmuo esant rezonansui, ΔU – mažiausias stebimas indikatoriaus rodmens pokytis, esant kontūro išderinimui nuo rezonanso per Δf , o Q_e – kontūro ekvivalentinė kokybė.

Formulė gauta kai rezonanso kreivė atitinka silpną ryšį. Kai ryšys artėja prie kritinio, rezonanso kreivės viršūnė tampa plokštesnė ir ši paklaida dar padidėja. Kaip matome esminė galimybė mažinti paklaidą yra didinti kontūro kokybę. Sumažinti šios paklaidos įtaką galima taikant vadinamąjį „šakutės“ būdą (5.5 pav.). Kontūras išderinamas simetriškai į abi puses nuo rezonanso iki tam tikro vienodo indikatoriaus rodmens ir skaičiuojamas gautų dažnių aritmetinis vidurkis: $f = f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2}$.

Pastaruoju metu rezonansiniai dažniamačiai praktiškai naudojami tik superaukštųjų dažnių diapazonuose. Juose kaip virpesių kontūrai naudojamos arba koaksialinių linijų rezonansinės atkarpos arba tūriniai rezonatoriai.

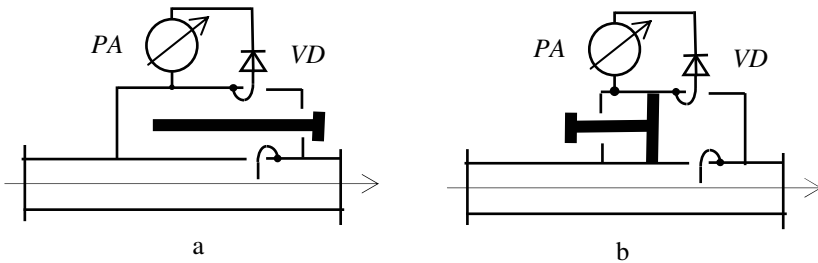
5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas



5.5 pav. Virpesių kontūro rezonanso kreivė ir šakutės metodas

Rezonansinis dažniamatis (bangomatis) su koaksialinės linijos rezonansine keičiamo ilgio atkarpa ir bangolaidis, kuriuo sklindančios bangos ilgį jis matuoja, surišamas ryšio kilpa (5.6a pav.). Atviros gale linijos ilgis keičiamas mikrometriniu sraigtu ir pagal indikatoriaus rodmens maksimumą fiksuojamas rezonanso momentas.

Bangos ilgis atskaitomas mikrometrinio sraigto skalėje. Tokie bangomačiai naudojami dažniams nuo 600 MHz iki 10 GHz. Didesniems dažniams naudojami bangomačiai su tūriniais rezonatoriais (5.6b pav.).



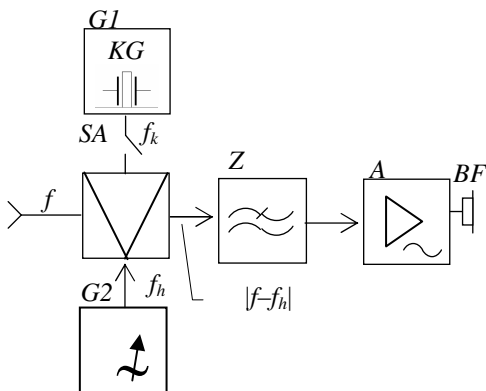
5.6. pav. Rezonansinių bangomačių sandaros schemas: su koaksialine linija (a) ir su tūriniu rezonatoriumi (b)

Rezonansinių dažniamačių ribinė paklaida siekia nuo $\pm 0,01\%$ preciziniams dažniamačiams su tūriniais rezonatoriais iki $\pm 5\%$ dažniamačiams su diskretiniais LC elementais. Jiems reikia pakankami galingo virpesių šaltinio ir jautraus indikatoriaus. Pastaruoju metu rezonansiniai dažniamačiai naudojami išimtinai centimetrinių, milimetrinių ir trumpesnių bangų diapazonuose.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

5.4. Heterodininiai dažnio matavimo būdai

Tiriamo virpesių šaltinio dažnis yra lyginamas su etaloninio generatoriaus – heterodino dažniu. Matuojamų dažnių ruožas yra nuo 50 kHz iki 50 GHz. Jį sąlygoja heterodino savybės. Palyginimas vykdomas pagal diferencialinį nulinį būdą, t.y. stengiamasi surasti tokį heterodino dažnį, kuris būtų lygus matuojamajam dažniui, o šių dažnių skirtumas taptų lygus nuliui. Kadangi virpesiai sumaišomi maišiklyje UZ, tai dažnių skirtumą gali sukurti bet kuri heterodino ir matuojamo dažnio virpesio harmonika. Todėl iš tikrųjų palyginimas vyksta pagal tokią sąlygą: $pf_h - qf = 0$; čia p ir q yra heterodino ir matuojamojo dažnio virpesių šaltinio harmonikų numeriai.



5.7 pav. Heterodininio dažniamačio struktūrinė schema.

Heterodininis metodas yra daugiareikšmis ir siekiant nepadaryti grubių klaidų, reikia apytiksliai žinoti matuojamąjį dažnį ir jo ieškoti iš anksto pasirinktame sugraduotos heterodino skalės taške. Apie tai, kad dažnių skirtumas tapo lygus nuliui dažniausiai sprendžiama klausantis dažnių skirtumo signalo telefono ausine BF, t.y. naudojamas akustinės indikacijos principas.

Dažnių skirtumui nustatyti dažnai naudojama telefono ausinė.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

Akustinės indikacijos metodo paklaida yra ± 20 Hz – dėl ausies girdimo dažnio ribos. Dažnių palyginimui vietoje ausinės gali būti naudojamas žemo dažnio dažniamatis.

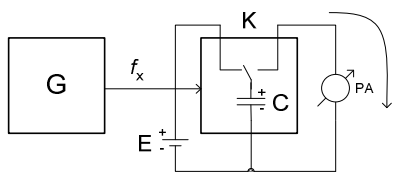
Instrumentinę paklaidą lemia heterodino dažnio paklaida – jo dažnio skalės sugradavimo paklaida, jo dažnio temperatūrinis dreifas ir kitimas laike. Šiai paklaidos daliai sumažinti, prieš matuojant heterodinas pasirinkto matavimui skalės taško aplinkoje patikrinamas pagal vidinio kvarcinio generatoriaus G1 tam tikrą harmoniką ir, esant reikalui, paderinamas t.y. sukalibruojamas.

Tai vieni tiksliausių aukštų dažnių diapazono dažnio matuokliai.

5.5. Kondensatoriniai dažnių matavimo būdai

Matavimo ribos yra nuo dešimčių Hz iki dešimčių MHz.

Dažniamačiai veikia kondensatoriaus įkrovimo/iškrovimo principu. Nežinomo dažnio virpesys paduodamas į komutatorių K (5.8. pav.). Teigiamas pusperiodis komutatorių nustato į vieną padėtį, neigiamas – į kitą. Komutatorius valdo kondensatoriaus įkrovimą ir iškrovimą. Kondensatorius yra iškraunamas per magnetoelektrinį prietaisą PA, kuriuo teka impulsinė srovė i . Prietaisas matuoja vidutinę šios srovės vertę.



5.8 pav. Kondensatorinio dažniamačio veikimo principo schema.

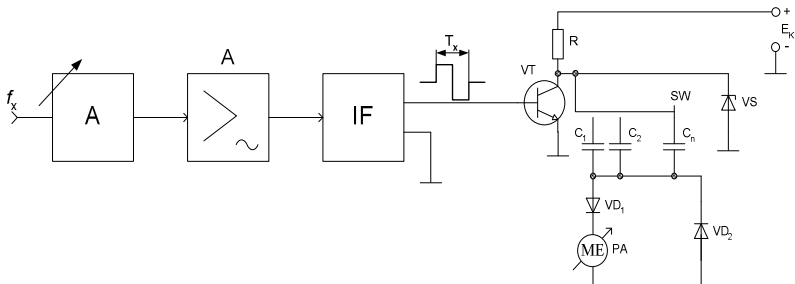
Matavimo lygtis gaunama tokia:

$$f = I_0 \frac{1}{CE}.$$

Tai tiesinė lygtis, todėl gauname dažniamatį su tolydine skale.

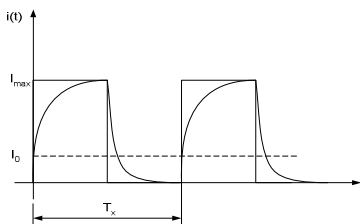
Dažniamačio funkcinė schema pavaizduota 5.9 paveiksle. VS stabilizuoja įtampą, iki kurios bus įkrautas kondensatorius.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas



5.9 pav. Kondensatorinio dažniamačio funkcinė schema.

Keičiant C , keičiamos skalių ribos – diapazonai. Mažinant talpą, didinamas matuojamas dažnis. Kad išmatuotumėme mažą dažnį, reikia didelės talpos kondensatoriaus, o didelės talpos kondensatorių talpa išsibarsčiusi. Didinant dažnį taip pat atsiranda apribojimai, nes reikia mažų talpų kondensatorių, o kondensatorių talpų mažinimą riboja parazitinės talpos – C talpa turi būti bent dešimtis kartų didesnė nei parazitinė. Esant dideliems dažniams, dėl integruojančių grandžių veikimo, prasideda impulsų integravimas (5.10 pav.). Ribinė kondensatorinių dažniamačių paklaida $\pm(1 \div 2) \%$.



5.10 pav. Impulsų integravimas.

5.6. Skaitmeniniai dažnio ir laiko intervalų matavimo metodai

Šiuo metu plačiai taikomi, nes skaitmeninės technologijos gerai išvystytos. Naudojami dažniams matuoti nuo μHz iki GHz eilės ir užtikrina didžiausią matavimų tikslumą ir darbo našumą.

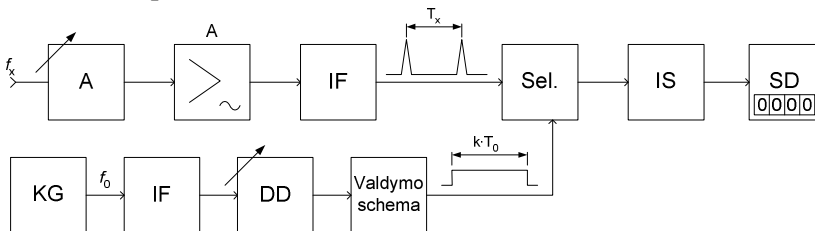
5.6.1. Skaitmeninis dažnio matavimas

Matuojamo virpesio dažnis f nustatomas skaičiuojant virpesio periodų skaičių N per tam tikrą kalibruotą laiką t_0 :

$$f = \frac{N}{t_0}.$$

Tai netiesioginio matavimo būdas, nes rezultatas priklauso nuo t_0 . Jei t_0 bus kartotinis sekundei dekadomis, tai bus tiesioginis matavimas. Pavyzdžiui, jei skaičiuosime periodus per $t_0 = 1$ s, tai rezultatas bus išreikštas Hz, jei per 1 ms, tai rezultatą gausime išreikštą kHz, ir t.t.

Paprasčiausia struktūrinė skaitmeninio dažniamačio schema pateikta 5.11 paveiksle.



5.11 pav. Skaitmeninio dažniamačio struktūrinė schema.

Iėjimo signalas pradžioje padaromas priimtinu impulsų skaitikliui, t.y. suderinamas su toliau esančia skaitmenine dalimi. Tai padaro įėjimo grandinė, kurią sudaro atenuatorius A , plačiajuostis stiprintuvas, impulsų formuotuvus IF . Selektorius impulsų formuotuvo suformuotus skaitinius impulsus praleidžia į impulsų skaitiklį IS tik tada kai veikia valdantis laiko žymių impulsas, kurio trukmė yra kalibruota. Laiko žymes formuoja speciali schemas dalis, kuri sudaryta iš kvarcinio generatoriaus KG , impulsų formuotuvo IF , dažnio daliklio DD ir valdymo schemos. Laiko žymės trukmė yra kvarcinio generatoriaus dažnį dalinančio dažnio daliklio dalinimo koeficientu k ilgesnė už kvarcinio generatoriaus periodą T_0 : $t_0 = k T_0$. Tada skaitmeninio dažnio matavimo lygtis užrašoma taip:

$$f = \frac{N}{kT_0}.$$

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

Nuo laiko žymių formavimo tikslumo labai priklauso dažnio matavimo tikslumas. Kvarciniai generatoriai dažniausiai būna 1 MHz, 5 MHz arba 10 MHz dažnio. Impulsų skaitiklis skaičiavimo rezultatą perduoda į skaitmenų displejų. Kaip minėta, reikia, kad kalibruoto laiko intervalo trukmė būtų dešimtainiu koeficientu kartotina sekunde, tada rezultatas bus gaunamas kaip tiesioginio matavimo ir jo nereikės perskaiciuoti.

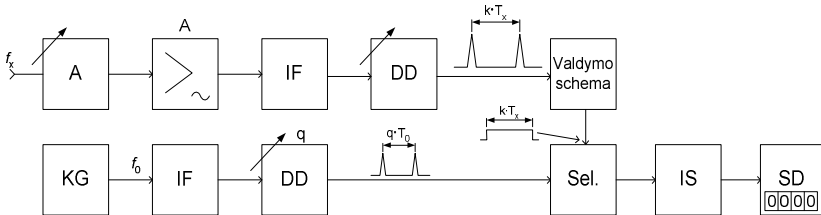
5.6.2. Skaitmeninis periodo matavimas

Periodas matuojamas suskaičiuojant kiek iš kvarcinio generatoriaus periodo T_0 suformuotų laiko žymių telpa į virpesio periodą T

$$T = \frac{q}{k} NT_0,$$

čia: q – kvarcinio generatoriaus dažnio dalinimo koeficientas, k – matuojamų periodų skaičius, N – laiko žymių, tilpusių į k periodų skaičius, T_0 – kvarcinio generatoriaus periodas.

Paprasčiausia struktūrinė periodo matuoklio schema pateikta 5.12 paveiksle.



5.12 pav. Periodo matuoklio struktūrinė schema.

Ši struktūrinė schema labai panaši į skaitmeninio dažniamačio schemą. Panaudotos tos pačios struktūrinės dalys, tik rezultatas gaunamas kitu būdu – selektorių valdo iš įėjimo signalo suformuotos valdančios laiko žymės, o skaičiuojamos iš kvarcinio generatoriaus virpesio laiko žymės.

Dydžiai k ir q , o taip pat ir kvarcinio generatoriaus periodas turėtų būti dekadiniai. Tada rezultato papildomai skaičiuoti nereiktų:

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

rodomas skaičius ir būtų periodas išmatuotas tiesiogiai.

Matavimo tikslumas taip pat priklauso nuo kvarcinio generatoriaus formuojamų laiko žymių tikslumo ir skaičiavimo tikslumo.

5.6.3. Skaitmeninio dažnio ir periodo matavimo paklaidų priežastys

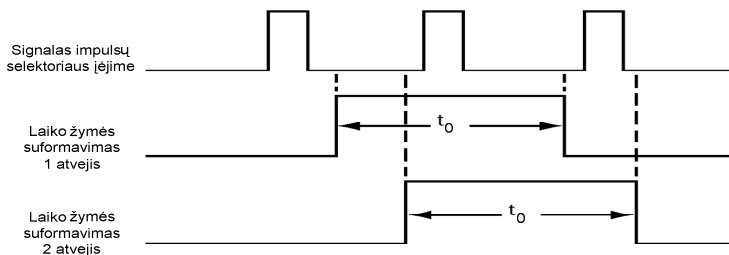
Pagrindinės skaitmeninio dažnio ir periodo matavimo paklaidų dedamosios yra tokios:

- a) metodo paklaida gaunama dėl skaičiavimo diskretiškumo;
- b) kalibruoto laiko intervalo (laiko žymės formavimo) paklaida;
- c) įėjimo grandinės (impulsų formuotuvo) sukeliama paklaida.

Matuojant dažnį, pasireiškia pirmosios dvi, matuojant periodą – visos trys paklaidų rūšys.

Trumpai apžvelgsime minėtas paklaidų rūšis.

Impulsų skaitikliui sumuojant skaitinius impulsus, mažiausiame jo rezultato reikšminiame skaičiuje atsiranda absoliuti ± 1 dydžio skaičiavimo neapibrėžtis (paklaida). Tai apibūdinama kaip diskretizavimo paklaida. Atsiradimo priežastį paaiškina 5.13 paveikslas.



5.13 pav. Diskretizavimo paklaida.

Abiem atvejais kalibruotos laiko trukmės t_0 yra vienodos, o suskaičiuotų impulsų skaičius skiriasi priklausomai nuo laiko žymės veikimo momento.

Antra paklaidos dalis atsiranda dėl kvarcinio generatoriaus virpesio tikrojo dažnio ir jo vardinio dažnio skirtumo bei jo dažnio

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

stabilumo. Dėl šių dydžių neapibrėžčių atsiranda laiko žymių suformavimo paklaidos.

Trečia priežastis tai atsitiktinė paklaida, kuri atsiranda dėl triukšmų įėjime ir iėjimo grandinėje. Kadangi, matuojant periodą, selektorių valdo impulsas suformuotas iš matuojamo virpesio, tai triukšmai įėjime ir formavimo grandinėse sukelia šio impulso trukmės fluktuacijas. Dėl to klaidingai valdomas selektorius.

5.6.4. Dažnio matavimo paklaida

Iš matavimo lygties $f = \frac{N}{kT_0}$, suradę dalines išvestines,

gauname tokią absoliutinės matavimo paklaidos formulę:

$$\Delta f = \frac{\Delta N}{t_0} + \frac{N}{t_0^2} \Delta t_0 .$$

Iš šios formulės gaunama santykinė dažnio matavimo paklaida yra suma dviejų santykinų paklaidų – etaloninio kvarcinio generatoriaus dažnio nestabilumo sukeliama paklaida (adityvi paklaidos dalis) ir diskretinio skaičiavimo sukeliama paklaida (multiplikatyvi paklaidos dalis):

$$\delta_f = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta t_0}{t_0} = \frac{\pm 1}{N} \pm \frac{k \Delta T_0}{k T_0} = \pm \left(\delta_0 + \frac{1}{f \cdot t_0} \right),$$

čia: δ_0 – santykinis etaloninio kvarcinio generatoriaus dažnio nestabilumas – instrumentinė paklaida.

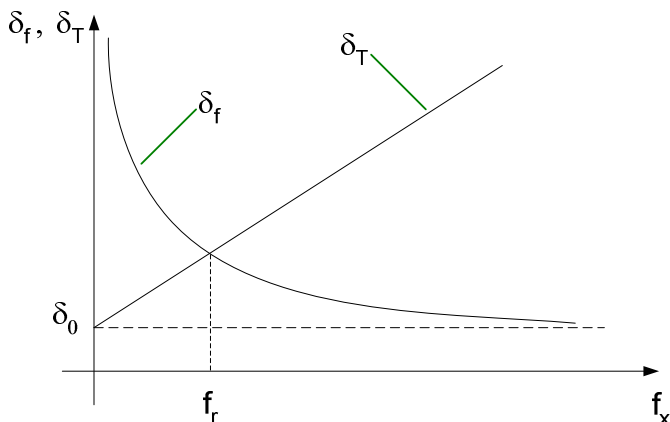
Matuojant žemus dažnius dominuojanti yra diskretinio skaičiavimo (metodo) paklaida, aukštuose – dažnio nestabilumo (instrumentinė) paklaida. Tai paaiškina toks pavyzdys. Tarkime, kad kvarcinio generatoriaus dažnio nestabilumas yra 10^{-7} , tada tokia yra ir instrumentinė paklaida, o metodo paklaida, matuojant 100 MHz dažnį per 1 s bus tik 10^{-8} . Metodo paklaida tampa dominuojanti, kai matuojamas dažnis yra mažas. To paties kvarcinio generatoriaus dažnio nestabilumo ir matavimo laiko atveju, kai matuojamas 100 Hz dažnis, metodo paklaida gaunama jau lygi 10^{-2} .

5.6.5. Periodo matavimo paklaida

Periodo matavimo paklaidą sudaro diskretinio skaičiavimo, etaloninio dažnio nestabilumo ir impulsų formuotuvo sukeltos paklaidos. Paskutinė išvardintų paklaidų dalis paprastai yra nežymi, todėl periodo matavimo santykinė paklaida, gaunama iš matavimo lygties, išreiškiama tokia formule:

$$\delta_T = \frac{\Delta T}{T} = \frac{\pm 1}{N} \pm \delta_0 = \pm \left(\delta_0 + \frac{qT_0 f}{k} \right).$$

5.14 paveiksle pavaizduotos dažnio ir periodo matavimo santykinių paklaidų priklausomybės nuo matuojamo virpesio dažnio.



5.14 pav. Dažnio δ_f ir periodo δ_T matavimo santykinės paklaidos

Iš grafiko matome, kad iki tam tikro ribinio dažnio f_r reikia matuoti periodą, o virš jo – dažnį. Tada matavimų santykinės paklaidos bus mažiausios. Ties ribiniu dažniu periodo ir dažnio matavimo paklaidos yra vienodos. Ribinis dažnis surandamas sulyginus dažnio ir periodo matavimo santykinės paklaidas. Kai $k = q = 1$, tai $f_r = f_0$. Taigi, ribinio dažnio dydį lemia naudojamo etaloninio dažnio generatoriaus dažnis.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

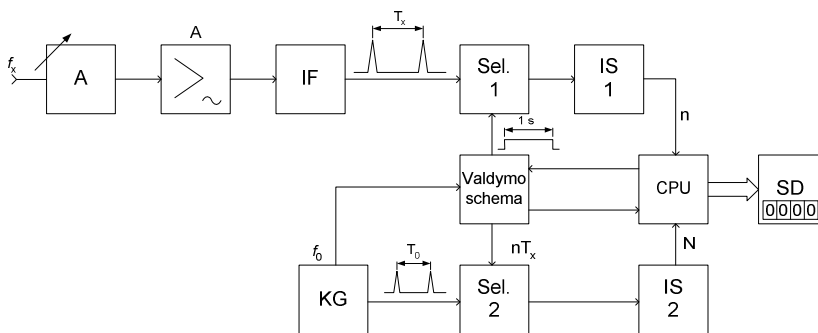
5.6.6. Dažnio ir periodo skaitmeninio matavimo paklaidų mažinimo būdai

Kaip jau minėta anksčiau, skaitmeniniais metodais matuojant, mažuose dažniuose reikia matuoti periodą, aukštuose – dažnį.

Taip pat reikia didinti dažnio ir periodo matavimų laiką, dėl to sumažės metodo paklaida. Matuojant periodą dar galima matuoti kelių periodų trukmę, t.y. didinti k bei mažinti T_0 ir q . Todėl pageidaujamas kiek įmanoma didesnis atraminis dažnis. Dažnai matuojant periodą kvarcinio generatoriaus dažnis yra dauginamas ir q gaunamas mažesnis už vienetą.

Dažnio nestabilumo sukeliama paklaida mažinama stabilizuojant kvarcinio generatoriaus schemos aplinkos temperatūrą, nes temperatūros kitimas yra didžiausias jo dažnį destabilizuojantis veiksnys. Termostabilizacija vykdoma naudojant termostatą. Tokio termostatuoto kvarcinio generatoriaus dažnio nestabilumas yra tik 10^{-9} eilės dydis.

Yra sukurtos specialios skaitmeninių dažniamačių schemos, kurių dažnio matavimo paklaidos plačiame matuojamų dažnių ruože yra pastovios. Tokia schema parodyta 5.15 pav.



5.15 pav. Dažniamatis su vienoda paklaida dažnių ruože.

Valdymo schema ir visas prietaiso darbas kontroliuojamas mikroprocesoriumi CPU. Matavimas susideda iš dviejų ciklų. Valdymo schema suformuoja 1 s trukmės valdymo impulsą pirmam selektoriui ir pirmas impulsą skaitiklis suskaičiuoja per šį laiką

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

atėjusių iš matuojamo dažnio virpesio suformuotų impulsų skaičių n . Mikroprocesorius apskaičiuoja matuojamo virpesio periodą T ir kartu su valdymo schema suformuoja nT trukmės valdymo impulsą antram selektoriui. Per šį laiką antras impulsų skaitiklis suskaičiuoja atėjusių kvarcinio generatoriaus impulsų skaičių N . Sulyginę abu rezultatus, kaip gautus per tą patį 1 s matavimo laiką, gauname dažniamačio matavimo lygtį:

$$f = \frac{n}{N} f_0 .$$

Tokio prietaiso dažnio matavimo metodo paklaida yra tik dydžio N diskretinio skaičiavimo paklaida, nes dydis n suskaičiuojamas ir jau konkretus naudojamas. Ši paklaida gaunama nepriklausoma nuo matuojamo dažnio, t.y. pastovi:

$$\delta_f = \delta_{diskr} = \frac{\pm 1}{N} = \pm \frac{T_0}{1 \text{ s}} = const .$$

5.6.7. Matuojamo dažnio sumažinimo būdai

Dėl ribotos skaitmeninių schemų veikimo spartos didžiausias tiesiogiai išmatuojamas dažnis šiuolaikiniais skaitmeniniais dažniamačiais yra apie 500 MHz. Be to, greitaveikių skaitmeninių dažniamačių savikaina yra didelė, todėl yra naudojami matuojamų dažnių didumo kalibruoto sumažinimo būdai, kurie išplečia matuojamų dažnių ruožą bei sumažina dažniamačių savikainą.

Yra keli dažnių sumažinimo būdai:

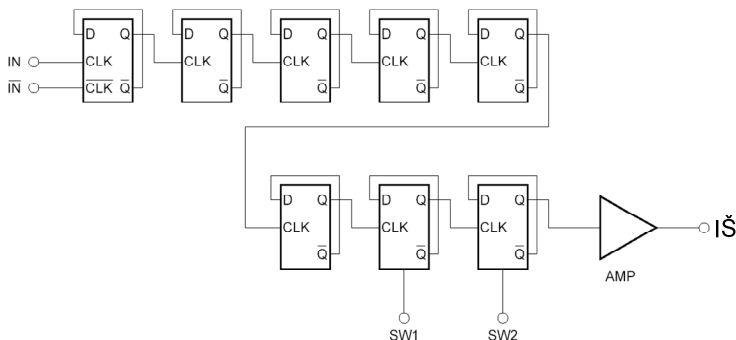
- Dažnio dalijimas, naudojamas dažniams iki 3,5 GHz;
- Heterodinavimas, naudojant etaloninio dažnio kvarcinio generatoriaus harmonikas; matavimai galimi iki 20 GHz;
- Heterodinavimas, naudojant atraminį dažnį kuriamą dažnio sintezatoriumi; matavimai galimi iki 80 GHz;

Dažnio dalijimo būdas

Tai paprastas įėjimo virpesio dažnio dalijimas iš nustatyto koeficiento q . Pakankamai sumažintą dažnį jau galima išmatuoti skaitmeniniu dažniamačiu tiesiogiai. Matavimo rezultatas gaunamas arba išmatuotą dažnį padauginant iš q , arba dažnį matuojant q kartų

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

ilgiau. Paprastai naudojami dvejetainio koeficiento dažnio dalikliai, todėl q parenkamas kartotinis 2. Tačiau kiek kartų padaliname dažnį, tiek kartų didesnė bus diskretizavimo paklaida. Dažnio daliklio **PB1506GV**, dalijančio dažnius iki 3 GHz, gebančio dalinti iš 64, 128 ir 256 struktūrinė schema pateikta 5.16 pav. Įėjimais SW1 ir SW2 galima nustatyti dalijimo koeficientą.



5.16 pav. Dažnio daliklio PB1506GV struktūrinė schema.

Heterodinavimas, naudojant etaloninio dažnio kvarcinio generatoriaus harmonikas

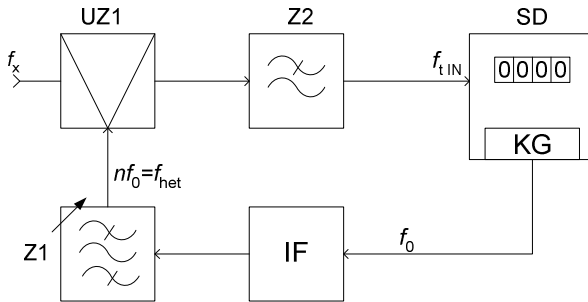
Matavimo struktūrinė schema yra pateikta 5.17 paveiksle. Pagrindinė dalis yra dažnių maišiklis UZ1, kuriame suplakamas įėjimo virpesys su etaloninio dažnio generatoriaus dažniu. Kaip heterodino virpesys yra naudojamos kvarcinio generatoriaus harmonikos. Iš dažnių keitimo proceso metu gaunamo virpesio žemųjų dažnių filtru Z2 yra išskiriamas dažnių skirtumas f_t ir išmatuojamas skaitmeniniu dažniamačiu $f_t = f_{IN}$. Tokio keitimo lygtis yra:

$$f_{IN} = f_t = |f - f_{het}| = |f - nf_0|.$$

Kaip atraminis dažnis naudojamos paties skaitmeninio dažniamačio kvarcinio generatoriaus harmonikos. Jos sukuriamos, formuojant iš kvarcinio generatoriaus trumpus impulsus impulsų formuotuvu IF. Reikiama harmonika išskiriama juostiniu filtru Z1. Iš

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

esmės tokiame dažniamatyje yra apjungti du dažniamačiai: heterodininis ir skaitmeninis.



5.17 pav. Heterodininio – skaitmeninio dažniamačio struktūrinė schema.

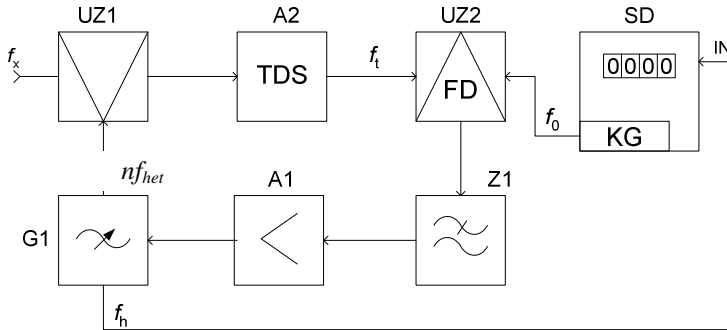
Heterodinavimas, naudojant atraminį dažnį kuriamą dažnio sintezatorium

Naudojant šį metodą, žemo dažnio generatoriaus fazė susiejama su aukšto dažnio įėjimo signalo faze. Kaip heterodino virpesys naudojamas netiesioginės sintezės dažnio sintezatorium. Struktūrinė schema yra pavaizduota 5.18 paveiksle. Atraminis generatorius yra žemadažnio skaitmeninio dažniamačio kvarcinis generatorius. Jo virpesio fazė fazės detektoriuje UZ2 yra lyginama su dažnio maišiklio UZ teikiamo tarpinio dažnio f_t virpesio faze. Fazių skirtumo sukelta įtampa yra valdomas įtampa valdomo generatoriaus G1 dažnis. Jis matuojamas skaitmeniniu dažniamačiu, o jo harmonikos dalyvauja dažnio keitimo procese kaip heterodino virpesys. Matuojamas dažnis apytiksliai yra žinomas, todėl telieka nustatyti kuri generatoriaus G1 harmonika n dalyvauja dažnių keitimo procese. Fazinio generatoriaus G1 dažnio paderinimo sistema palaiko tarpinį dažnį f_t lygų kvarcinio generatoriaus dažniui f_0 . Matuojamas dažnis gaunamas iš tokių formulių:

$$f_t = |f - n f_{het}| = f_0, \quad f = n f_{het} + f_0,$$

čia: n – generatoriaus G1 virpesio harmonikos numeris.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas



5.18 pav. Skaitmeninis dažniamatis su dažnio sintezatoriumi

Realiai naudojamos sudėtingesnės schemos, kuriose yra ir dažnio fazinio ir dažninio paderinimo kilpos ir dažnio keitimo procesas valdomas mikroprocesoriumi. Taip pavyksta garantuoti keitimą platesniame dažnių ruože. Harmonikos numeris apskaičiuojamas ir pataisa į skaitmenų displejų įvedama automatiškai, todėl vartotojui nereikia atlikinėti jokių skaičiavimų.

5.6.8. Skaitmeninis laiko intervalų matavimas

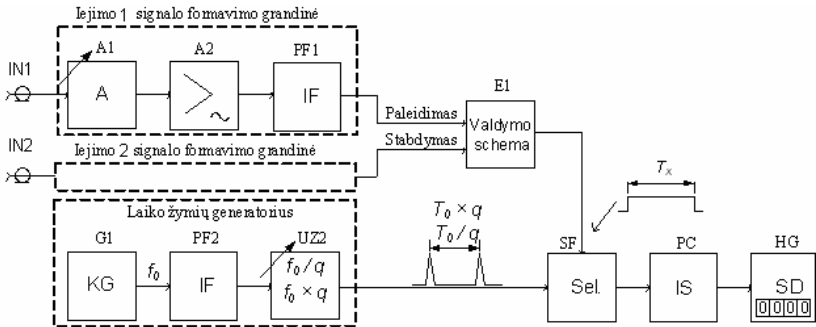
Laiko intervalo trukmės tarp dviejų impulsų, veikiančių skirtingose grandinėse arba veikiančio vienoje grandinėje impulso trukmės skaitmeninio matavimo struktūrinė schema pavaizduota 5.19 paveiksle.

Struktūrinės schemos pagrindiniai elementai yra tokie patys kaip ir periodo matavimo struktūrinėje schemoje (5.12 pav.).

Impulsai, tarp kurių laiko intervalo trukmę reikia išmatuoti, paduodami į schemos įėjimus “IN1” ir “IN2”. Juose signalų lygiai gali būti keičiami atenuatoriais A1 ir įtampos stiprintuvais A2. Impulsų formuotuvais PF1 yra suformuojami trumpi impulsai, atitinkantys į kanalo įėjimą paduodamų impulsų priekinius arba galinius frontus (galima pasirinkti). Suformuotas vieno kanalo impulsas paleidžia valdymo schemą E1, o kito kanalo impulsas – ją stabdo. Valdymo schemoje suformuojamas stačiakampio formos impulsas, kurio trukmė T_x yra lygi laiko intervalui tarp į kanalų įėjimus paduodamų impulsų atitinkamų frontų. Šis valdymo impulsas

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

valdo laiko selektorių SF, per kurį į impulsų skaitiklį PC yra perduodami skaitiniai impulsai, suformuoti laiko žymių generavimo schemeje. Laiko žymių (pavyzdinių laiko intervalų) generatorių sudaro kvarcinis generatorius G, impulsų formuotuvas PF2 ir dažnio dalijimo arba dauginimo schema UZ2. Laiko žymių periodas yra kartotinis kvarcinio generatoriaus periodui T_0 .



5.19 pav. Struktūrinė schema matuojant laiko intervalų trukmę arba impulso trukmę skaitmeniniu būdu

Impulsų skaitiklio PC suskaičiuotas laiko žymių skaičius N parodo matuojamo laiko intervalo trukmę išreikštą laiko žymių periodu:

$$T_x = \frac{NT_0}{q} \text{ arba } T_x = NqT_0.$$

Prenkant kvarcinio generatoriaus dažnį ir dažnio daliklio dalijimo arba dažnio daugiklio dauginimo koeficientus q , suformuojamos laiko žymės, kurių periodas yra dešimtiniu pagrindu kartotinis arba dalinis sekunde. Tuomet impulsų skaitiklio suskaičiuotas ir skaitmenų displėjaus HG rodomas skaičius N yra matuojamo laiko intervalo trukmė sekundėmis arba sekundės dalimis. Taip tiesiogiai gaunamas rezultatas, nors pats matavimo metodas yra netiesioginis.

Matuojant veikiančio vienoje grandinėje impulso trukmę, jis paduodamas į įėjimus "IN1" ir "IN2" lygiagrečiai. Tuomet impulso priekinis frontas paleidžia valdymo schemą, o galinis frontas – ją stabdo. Matavimo rezultatas gaunamas analogiškai, kaip ir matuojant

5.7. Kontroliniai klausimai ir užduotys savarankiškam darbui

1. Kokius žinote dažnio matavimo būdus? Kokie būdai naudojami techniniuose ir kokie – laboratoriniuose matavimuose?

2. Koks kondensatorinio dažniamačio veikimo principas, panaudojimo sritys ir paklaidų šaltiniai?

3. Kokius žinote oscilografinius dažnio matavimo būdus?

4. Kaip nustatomas signalo dažnis oscilografu, naudojant kalibruotos skleistinės trukmės būdą? Kokie šiuo atveju paklaidų šaltiniai?

5. Raskite sinusinio signalo periodą ir dažnį, jeigu oscilografo ekrane jo vaizdo ilgis, atitinkantis periodą užima 5 padalas, o oscilografo skleistinės koeficientas yra $20 \mu\text{s}/\text{pad.}$

6. Kaip dažnis matuojamas oscilografu pagal Lisažu figūras? Kokie šio metodo paklaidų šaltiniai?

7. Kaip dažnis matuojamas oscilografu apskritiminės skleistinės būdu? Kuo šis būdas pranašesnis už Lisažu figūrų būdą?

8. Kaip sudarytas ir kaip veikia skaitmeninis periodo matuoklis?

9. Kokios skaitmeninio periodo matavimo paklaidų priežastys?

10. Nubraižykite laiko diagramas signalų, charakterizuojančių skaitmeninio periodo matuoklio veikimą.

11. Kokia skaitmeninio dažniamačio struktūrinė schema ir koks jo veikimo principas?

12. Kokie skaitmeninio dažniamačio matavimo paklaidų šaltiniai?

13. Nubraižykite laiko diagramas signalų, charakterizuojančių skaitmeninio dažniamačio veikimą.

14. Kada skaitmeniniu būdu matuojamas signalo dažnis ir kada – periodas? Kodėl?

15. Kaip sudarytas ir veikia skaitmeninis dažniamatis su pastovia diskretiškumo paklaida?

16. Kaip sudarytas ir veikia heterodininis dažniamatis? Kas lemia jo matavimo paklaidas?

17. Kaip sudarytas ir veikia rezonansinis dažniamatis? Nuo ko priklauso jo matavimo paklaidos?

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

18. Kaip sudaryti ir veikia skaitmeninių dažniamačių dažnio sumažinimo blokai? Nuo ko priklauso jų dažnio keitimo paklaidos?

19. Kaip skaitmeniniu būdu matuojama laiko intervalo trukmė tarp dviejų impulsų, veikiančių skirtingose grandinėse?

20. Kaip skaitmeniniu būdu matuojama veikiančio vienoje grandinėje impulso trukmė?

Elektronikos grandinių parametrų matavimas

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

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

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

6.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas

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

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

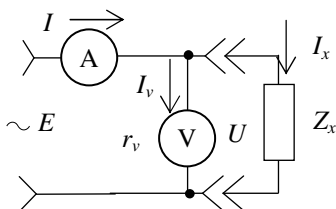
Parametrus matuoti dažniausiai naudojami *netiesioginio matavimo* ir *palyginimo metodai*.

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

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

6.2. Ampermetro–voltmetro metodas ir ommetrai

Ampermetro–voltmetro metodas gali būti naudojamas nuolatinės



6.1 pav. Mažų varžų matavimo schema

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

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

kintamosios srovės grandinėje.

Galimos dvi prietaisų jungimo schemos.

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

Elemento ar grandinės pilnutinė varža apskaičiuojama pagal Omo dėsnį:

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

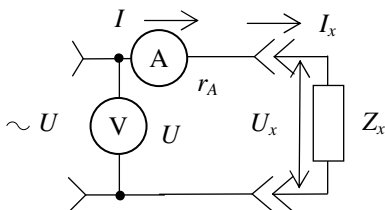
Jeigu *matuojamos varžos yra mažos*, tai voltmetro varža gaunama žymiai didesnė ir per ją tekančios srovės galime nepaisyti. Tada matuojamojo elemento varža apskaičiuojama tik iš voltmetro ir ampermetro rodmenų:

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

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

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

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



6.2 pav. Didelių varžų matavimo schema

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

Elemento ar grandinės pilnutinė varža apskaičiuojama pagal Omo dėsnį:

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

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

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

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

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

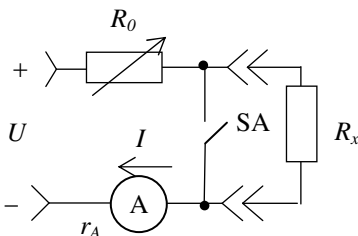
$$\text{Kai } \frac{r_A}{Z_x} < \frac{1}{100}, \text{ tai } \delta < 1 \%.$$

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

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

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

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



6.3 pav. Nuosekliojo ommetro schema

ampermetru yra matuojama srovė tekanti per matuojamą varžos elementą:

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

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

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

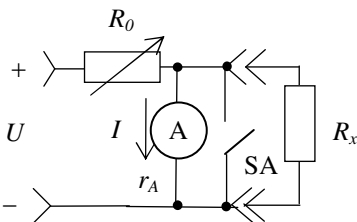
matuojamą varžą:

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

Ampermetro skalėje ties šia rodyklės padėtimi pažymima varžos nulinė vertė.

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

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



6.4 pav. Lygiagrečiojo ommetro schema

Kita galima ommetro schema yra pavaizduota 6.4 paveiksle.

Joje ampermetro srovė yra lygi:

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

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

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

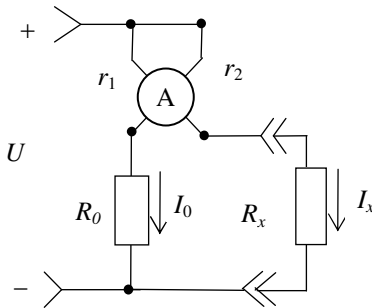
Tarpinės varžų vertės sugrąduojamos naudojant etalonines varžas. Skalė irgi gaunama netolygi, bet tiesioginė.

Matavimo paklaidos priklauso nuo ampermetro tikslumo klasės ir gradavimo paklaidų.

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

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

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas



6.5 pav. Logometrinio ommetro schema

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

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

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

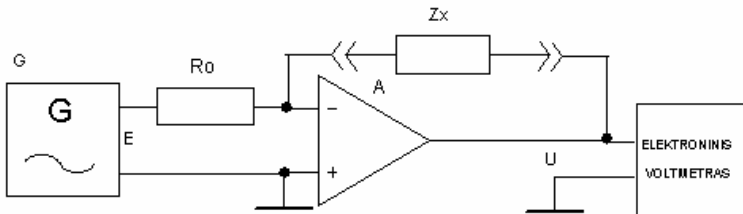
Rodyklės pasisukimo kampas:

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

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

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

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



6.6 pav. Elektroninio ommetro funkcinė schema

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

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

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

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

6.3. Parametų matavimas pagal pereinamojo proceso trukmę

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

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

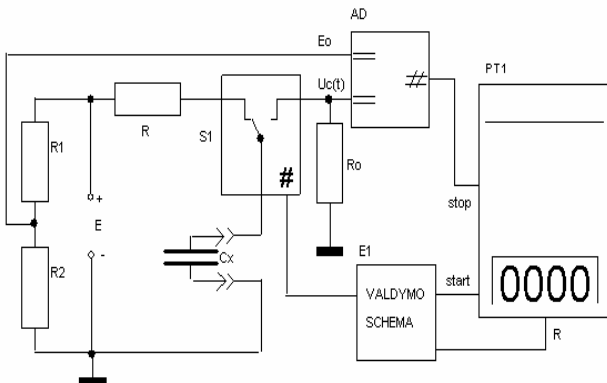
Skaitmeninio talpos matuoklio funkcinė schema yra pavaizduota 6.7 paveiksle. Schema sudaryta iš dviejų pagrindinių dalių: keitiklio, keičiančio talpos C_x dydį į jai proporcingą laiko intervalą lygų RC grandinės su etaloniniu rezistoriumi R_0 laiko konstantai ir skaitmeninio laiko intervalų matuoklio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

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

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

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

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



6.7 pav. Skaitmeninio talpos matuoklio funkcinė schema

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

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

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

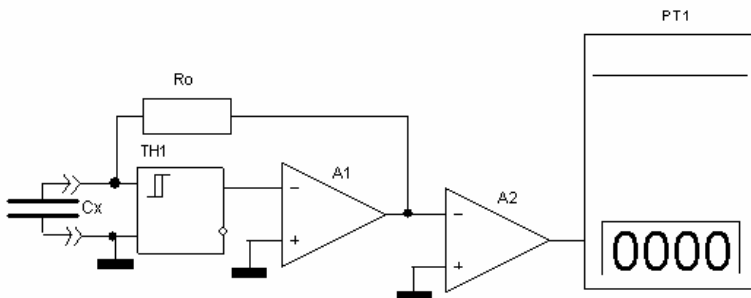
proporcingas matuojamos talpos vertei: $C_x = \frac{t_2 - t_1}{R_0}$.

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

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

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

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



6.8 pav. Skaitmeninis matuoklis su autovirpesių schema

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

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

6.4. Elementų parametų matavimas tilteliais

6.4.1. Bendrosios žinios apie tiltelius

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

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

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

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

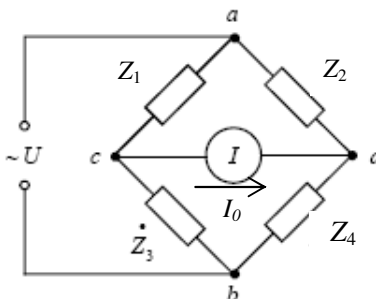
Tilteliai gali būti balansuojami rankiniu arba automatinio būdais. Pastarieji yra patogesni. Juose balansavimo elementai komutuojami tranzistoriniais raktais, valdomais skaitmeninėmis schemomis, o matavimo rezultatai atvaizduojami skaitmeniniuose rodmenų įtaisuose. Tokius tiltelius dažniausia vadina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

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

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

Tiltelių schemos pasižymi dideliu tikslumu ir jautrumu.

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



6.9 pav. Keturių pečių kintamosios srovės tiltelio schema

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

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

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

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

o įtampa tarp taškų C ir D yra lygi:

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

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

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

arba

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

Formulė (6.2) yra vadinama tiltelio balanso sąlyga.

Užrašius pečių kompleksines varžas algebriniu pavidalu

$$Z_1 = R_1 + jX_1,$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2,$$

$$Z_3 = R_3 + jX_3,$$

$$Z_4 = R_4 + jX_4.$$

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

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

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

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

Tiltelio balanso sąlygos gali būti užrašytos ir rodikline forma:

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

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

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

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

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

Balanso sąlyga:

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

Iš čia gauname taip pat dvi tiltelio balanso sąlygas:

6. Elektronikos grandinių parametrų matavimas

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3,$$

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

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

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

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

6.4.2. Varžų matavimo tilteliai

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

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

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

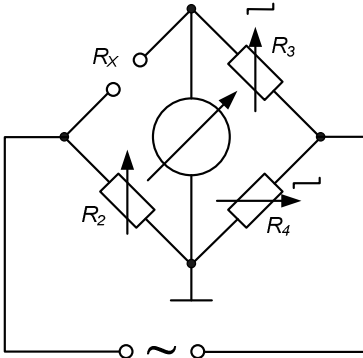
$$R_1 R_4 = R_2 R_3.$$

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

6. Elektronikos grandinių parametrų matavimas

varžų.

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



6.10 pav. Varžų matavimo tiltelio schema

Ieškomosios varžos vertė išreiškiama per etaloninių elementų varžų vertes:

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

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

keičiant elemento R_2 vertę užbaigiamas tiltelio balansavimas.

Kintamosios srovės tiltelio santykinis jautris, balansuojant pagal įtampą yra

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

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

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

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

gauname:

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

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

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

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

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

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

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

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

Kai tiltelis subalansuotas gauname tokias įtampų kritimų lygtis:

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

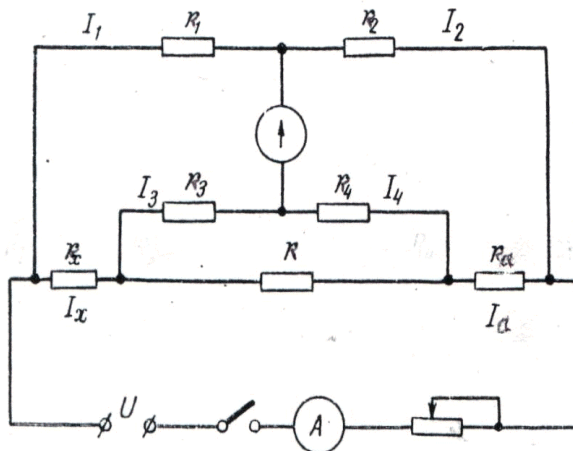
$$I_x R_a + I_3 R_4 = I_1 R_2,$$

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

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

Išsprendus R_x atžvilgiu, gauname:

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



6.11 pav. Dvigubo tiltelio schema

Iš čia išplaukia, kad jeigu:

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

tai matuojamoji varža yra lygi

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

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

Rezistoriņ R_1 , R_2 , R_3 ir R_4 varžos neturi būtī mažesnēs už 10 Ω , kad jungiamųjų laidų ir kontaktų varžu ītaka būtu nedidelē.

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

6.4.3. Talpų matavimo tilteliai

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

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

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

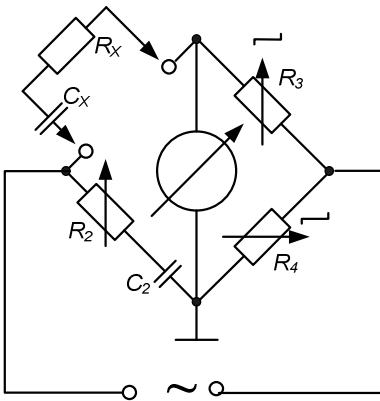
Nuosekliai schemai nuostolių kampo tangensas:

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

o lygiagrečiai schemai:

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

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



6.12 pav. Mažų nuostolių kondensatorių talpos matavimo tiltelis

Kompleksinės pėčių varžos:

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

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

$$Z_3 = R_3,$$

$$Z_4 = R_4.$$

Tiltelio balanso sąlygos:

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

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

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

Nuostolių kampas δ surandamas taip:

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

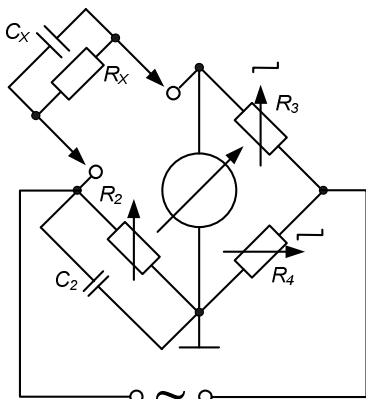
Tiltelis balansuojamas tokiu nuoseklumu: pradžioje R_2 ir C_2 nustatomos lygios nuliui ir keičiamas pėčių santykis R_3/R_4 tol, kol nulinio indikatorius rodys mažiausią įtampos vertę. Toliau keičiamos

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

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

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

(6.13 pav.).



6.13 pav. Didelių nuostolių kondensatorių talpos matavimo tiltelis

Tiltelio pečių kompleksinės varžos:

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

$$Z_3 = R_3,$$

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

$$Z_4 = R_4.$$

Kai tiltelis subalansuotas:

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

Remiantis šia lygtimi nustatomi elementų parametų dydžiai:

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

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

Nuostolių kampas:

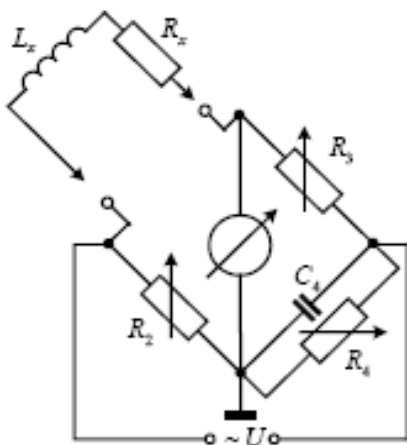
$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_x R_x} = \frac{1}{\omega C_2 R_2}.$$

6.4.4. Induktyvumų matavimo tilteliai

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

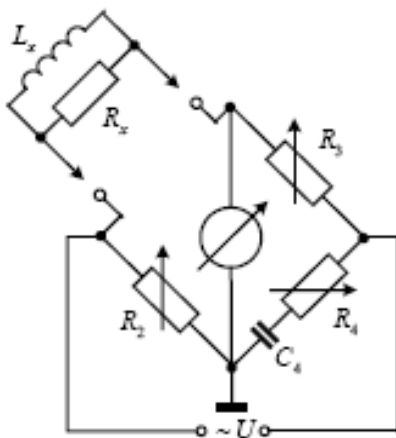
Etaloniniai elementai yra įjungti į priešingą induktyvumui

6. Elektronikos grandinių parametrų matavimas



6.14 pav. Nuosekliojo induktyvumo ekvivalento matavimo tiltelis su etaloniniu kondensatoriumi

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



6.15 pav. Lygiagrečiojo induktyvumo ekvivalento matavimo tiltelis

tiltelio pečių.

Į kitus pečius įjungti varžynai R_3 ir R_2 .

Kompleksinės tiltelio pečių varžos:

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

$$Z_2 = R_2,$$

$$Z_3 = R_3,$$

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

Esant pusiausvyrai:

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

arba

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

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

Ritės kokybė nustatoma taip:

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

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

Tilteliu, kurio schema parodyta 6.15 paveiksle yra matuojamas induktyvumas

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

lygiagrečioje nuostolių schemeje:

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

Ritės kokybė:

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

Šio tiltelio parametrai tokie pat kaip ir aukščiau aprašytojo.

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

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

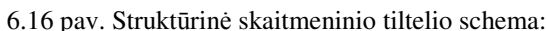
Transformatoriniai diferencialiniai (su diferencialiniais transformatoriais) tilteliai yra didelio jautrumo ir matavimo tikslumo (matavimo paklaida gali būti iki $\pm 0,1\%$) ir plačiai naudojami kompleksinėms varžoms ir neelektriniams dydžiams matuoti.

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

6.4.5. Skaitmeniniai tilteliai

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

reversinių skaitiklių PC1 ir PC2 skaičiavimo sparta.



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

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

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

6. Elektronikos grandinių parametrų matavimas

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

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



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

6.5. Rezonansiniai metodai

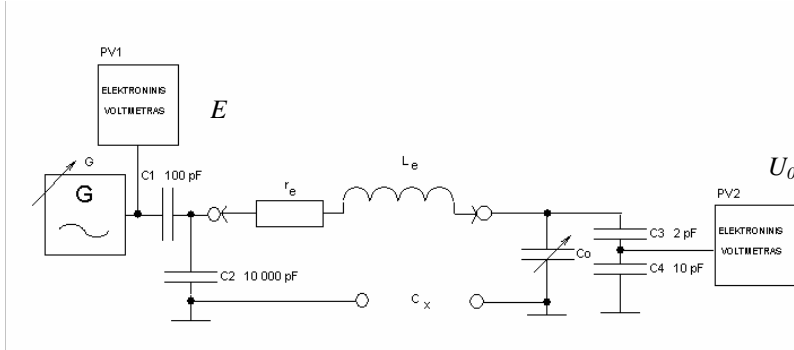
6.5.1. Rezonansinis kontūrinis metodas

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

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

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

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



6.18 pav. Kumetro funkcinė schema

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

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

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

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

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

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

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

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

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

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

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

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

Kontūro kokybė yra atvirkščias dydis jo nuostolių kampo tangentui:

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

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

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

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

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

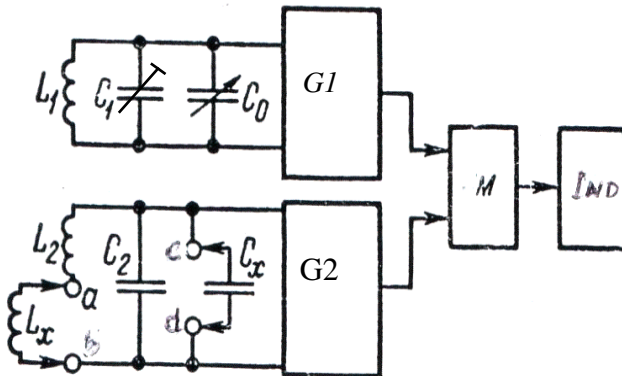
$$C_L = \frac{f_1^2 C_1 - f_2^2 C_2}{f_2^2 - f_1^2}.$$

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

naudoti antrą dažnį ir dvigubai mažesnę. Formulę talpos skaičiavimui šiam atvejui siūlome išsivesti patiems skaitytojams.

6.5.2. Rezonansinis generatorinis metodas

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



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

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

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

Dažnių lygybė rodo kontūrų LC sandaugų lygybę:

$$L_1 C_1 = L_2 C_2 .$$

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

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

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

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

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

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

iš kur nustatomas ryšys tarp matuojamojo induktyvumo ir etaloninės talpos:

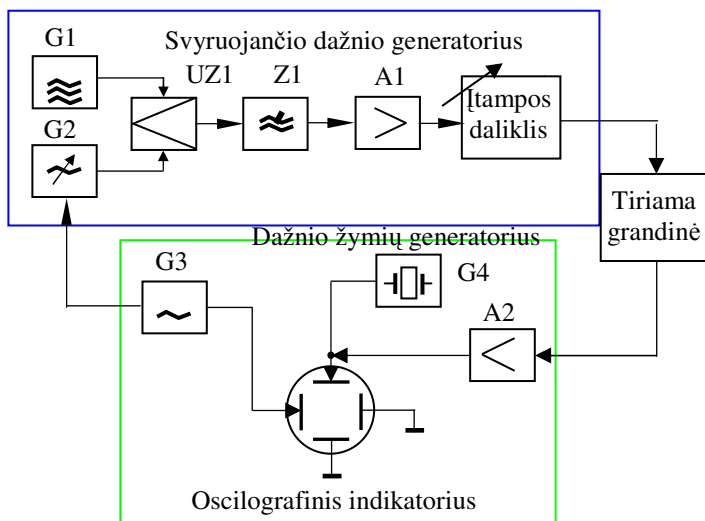
$$L_x = \frac{L_1 C_0}{C_2} = k C_0.$$

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

6.6. Amplitudės dažninių charakteristikų matuokliai

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

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



6.20 pav. ADCH charakterografo su oscilografiniu indikatoriumi struktūrinė schema

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

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

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

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

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

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

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

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

6.7. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui

1. Kokie sutelktų parametru grandinių elementų parametrai yra matuojami?

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

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

4. Kokia nuosekliojo ommetro schema ir skalės savybės?

5. Kokia lygiagrečiojo ommetro schema ir skalės savybės?

6. Kaip sudarytas Logometrinis ommetras?

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

6. Elektronikos grandinių parametų matavimas

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

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

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

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

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

13. Kodėl tiltelyje stengiamasi turėti kuo mažiau reaktyvinių varžų?

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

15. Kokie matavimo prietaisai naudojami tiltelių pusiausvyrai stebėti?

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

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

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

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

20. Kaip matuojama talpa kumetru?

21. Kaip matuojamas induktyvumas kumetru?

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

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

24. Kaip galima išmatuoti dvejų ričių tarpusavio induktyvumą?

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

26. Nuo kuo priklauso tiltelių matavimo paklaidos?

27. Kokias žinote tiltelių rūšis?

6. Elektronikos grandinių parametru matavimas

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

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

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

31. Kaip sudarytas skaitmeninis tiltelis?

32. Kaip sudaryti ir veikia ADCH charakterografai?

Signalų parametrų matuokliai

Šiame skyriuje nagrinėjamos matavimo priemonės yra skiriamos elektronikos grandinėse naudojamų signalų parametrams matuoti.

Tokios matavimų priemonės nėra labai plačiai paplitusios, tačiau pilnesniam matavimo priemonių pristatymui jas būtina paminėti.

Dažnai tenka nustatyti, kaip pakinta harmoninio signalo spektro sąstatas jam perėjus per netiesinę grandinę. Tam tikslui naudojami signalų netiesinių iškraipymų matuokliai. Telekomunikacijų inžinerijoje, matavimų technikoje susiduriame su moduluotaisiais signalais. Todėl tenka matuoti signalų moduliacijos parametrus. Dar platesnė problema yra signalų spektrų tyrimas. Galima juos būtų apskaičiuoti iš signalų laikinių funkcijų, gautų oscilografais, pritaikius Furjė transformaciją. Tačiau, dėl realių signalų laikinio aprašymo netikslumų, taip nustatyti spektrai būtų labai netikslūs. Todėl praktikoje signalų spektrų tyrimui naudojamos aparatinės priemonės – spektro analizatoriai. Skaitmeninių signalų tyrimui pasitelkiamos specialios matavimo priemonės – loginiai analizatoriai.

Aptartosios matavimų priemonės ir pristatomos šiame skyriuje.

7. Signalų parametų matuokliai

7.1. Spektro analizatoriai

7.1.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas

Signalas $x(t)$ savybės dažnių srityje yra pilnai aprašomos jo spektrais. Signalas aprašomas jo spektru gaunamas atlikus signalo tiesioginę Furjė transformaciją:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Gautoji kompleksinė funkcija yra vadinama **spektrinio tankio funkcija** ir turi savyje informaciją apie tai, kaip kinta signalo intensyvumas (amplitudė) ir fazė, kintant dažniui. Signalas amplitudžių spektrą vaizduoja spektrinio tankio funkcijos modulio dažninė priklausomybė, o fazių spektrą – spektrinio tankio funkcijos fazės dažninė priklausomybė. Kadangi realiai spektras analizuojamas baigtiname laiko intervale t_A , tai gaunamas baigtinės signalo trukmės spektras, vadinamasis **einamasis spektras**:

$$S_e(j\omega) = \int_0^{t_A} x(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Didėjant matavimo laikui t_A , baigtinės signalo trukmės spektras, artėja prie tikrojo spektro. Periodinio signalo analizės laikas turi būti bent didesnis už signalo periodą, kad būtų vertinamas signalo periodiškumas.

Elektrinių signalų spektro analizė naudojama periodinių ir impulsinių signalų savybių vertinimui dažnių srityje. Ji naudojama įvairių objektų netiesinių savybių kiekybiniam vertinimui, vaizdų atpažinimo procesuose, telekomunikacijų inžinerijoje ir kitur. Tam panaudojami prietaisai vadinami **spektro analizatoriais**. Kartais juos dar vadina harmonikų analizatoriais. Spektro analizatoriais yra matuojamas spektrinio tankio funkcijos modulis, t.y. jais matuojamas signalų amplitudžių spektras.

Spektro analizė **analoginiais** analizatoriais vykdoma signalą filtruojant juostiniais filtrais, o **skaitmeniniais** analizatoriais – vykdant diskretizuoto signalo sparčiąją Furjė transformaciją (SFT).

Analoginiuose filtriniuose spektro analizatoriuose naudojami du signalo filtravimo būdai: nuoseklūs ir lygiagretūs. **Nuosekliu**

7. Signalų parametru matuokliai

filtravimo būdu paeiliui surandamos spektro komponentės, o lygiagrečiuoju – vienu metu. Paprastesnis ir labiau paplitęs yra nuoseklusis filtravimo būdas. Lygiagretusis būdas kartais naudojamas aukštų dažnių ir nepasikartojančių signalų spektro analizei.

Naudojami ir analoginiai *dispersiniai* spektro analizatoriai, kuriuose signalo spektras yra gaunamas išnaudojant tam tikrų grandinių (pavyzdžiui, akustinių paviršinių bangų vėlinimo linijų) grupinio vėlinimo laiko priklausomybę nuo dažnio [10].

Skaitmeniniuose spektro analizatoriuose signalas su analoginiu–skaitmeniniu keitikliu keičiamas diskrečiuoju ir po to, panaudojant SFT algoritmus, skaičiuojamas ir atvaizduojamas jo spektras.

Pagrindiniai spektro analizatorių parametrai yra:

- analizuojamų dažnių ruožas
- dažnio skiriamoji geba
- analizės laikas arba analizės sparta
- amplitudės matavimo paklaida
- amplitudės matavimo dinaminis diapazonas.

Šie parametrai yra tarpusavyje susiję, pavyzdžiui, sutrumpinus analizės laiką, sumažėja skiriamoji geba.

Analizuojant plačiajuosčius signalus su didele analizės sparta dėl pereinamųjų procesų išauga dinaminės spektro matavimo paklaidos: spektras praplatėja bei sumažėja jo amplitudės ir pasislenka jų maksimumai. Todėl analizės sparta turi būti suderinta su tiriamojo signalo savybėmis.

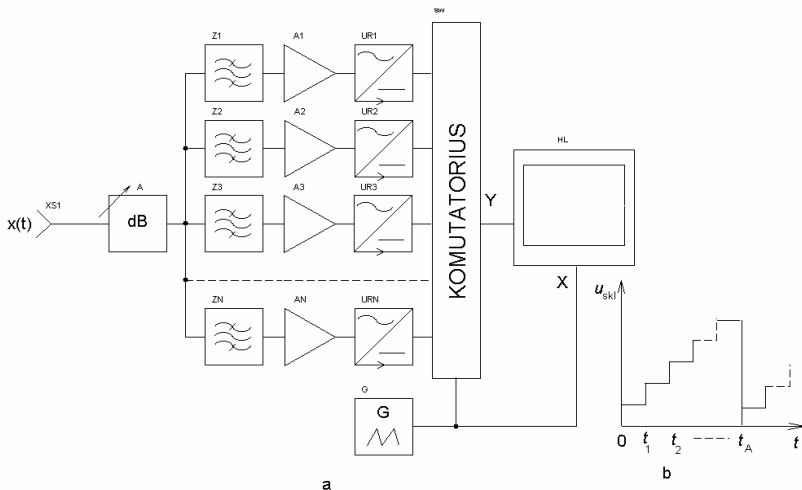
7.1.2. Analoginiai filtriniai lygiagrečios analizės spektro analizatoriai

Filtrinio lygiagrečios analizės spektro analizatoriaus struktūrinė schema yra pavaizduota 7.1a paveiksle. Jį sudaro įėjimo signalą normuojantis atenuatorius A ir N juostinių filtrų ($Z_1...Z_N$) su stiprintuvais ($A_1...A_N$) ir amplitudės detektoriais ($UR_1...UR_N$). Detektorių teikiamos įtampos komutuojamos komutatoriumi SW suderintai su atvaizdavimo įtaiso horizontalia skleistine. Skleistinės įtampa tiesiškai auganti laiptuota (7.1b pav.), todėl spektro atvaizdavimo įtaisas HL paeiliui rodo kiekvieno detektoriaus išėjimo

7. Signalų parametų matuokliai

signalų amplitudes, esant atitinkamiems dažniams, t.y. amplitudžių spektrą.

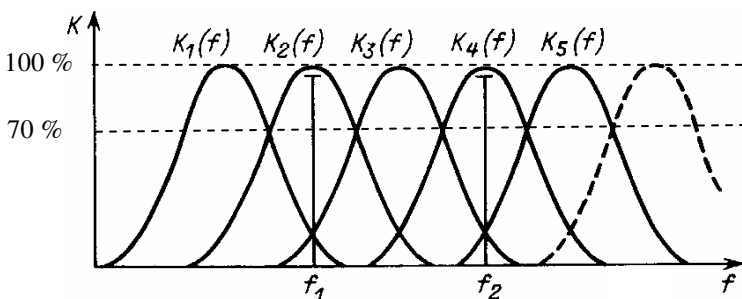
Tokio spektro analizatoriaus savybės lemia filtrų skaičius ir jų dažninės charakteristikos. Skiriamąją gebą nustato filtro praleidžiamų dažnių juostos plotis. Analizės laikas yra atvirkščiai proporcingas filtro juostos pločiui, o analizės sparta sąlygojama filtrų skaičiumi. Filtrų pralaidumo juostos tiriamam dažnių diapazone dažniausiai išdėstomos taip, kad eitų paeiliui (7.2 pav.). Tačiau, dėl naudojamų filtrų savybių, dažnai, didėjant filtro centriniam dažniui, didėja ir jo juostos plotis. Be to, kadangi juostinių filtrų amplitudės–dažninės charakteristikos nėra stačiakampės, tai ir gretimi filtrai praleidžia tam tikrą lygį jiems „nepriklausančių“ spektro komponentių ir vaizduojamas spektras turi daugiau komponentių nei jų yra realiame spektre. Pavyzdžiui, filtrai Z1 ir Z3 praleis tam tikro lygio dažnio f_2 įtampas, todėl abipus šio dažnio spektrinės komponentės matysime ir mažo lygio dažnių f_1 ir f_3 spektrines komponentes, kurių nėra analizuojamame spektre. Todėl tokių analizatorių teikiamas amplitudžių spektras dažniausiai vertinamas pradedant nuo tam tikro lygio amplitudžių.



7.1 pav. Filtrinio lygiagrečios analizės spektro analizatoriaus struktūrinė schema (a) ir skleistinės įtampos laiko diagrama (b)

7. Signalų parametrų matuokliai

Tokių spektro analizatorių pagrindinis privalumas yra jų didelė veikimo sparta (galima stebėti spektro kitimą realiaame laike) ir galimybė analizuoti nepasikartojančių signalų spektrus, trūkumas – norint pasiekti gerą skyros gebą plačiame dažnių diapazone, reikia daug siaurajuosčių filtrų. Todėl tokie spektro analizatoriai yra sudėtingi, brangūs ir retai naudojami.



7.2 pav. Filtrų pralaidumo juostų išdėstymas tiriamam dažnių diapazone

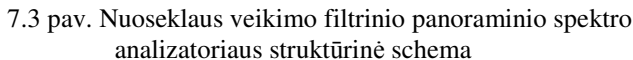
7.1.3. Analoginiai filtriniai nuoseklos analizės spektro analizatoriai

Paprastesni ir plačiau naudojami nuoseklos analizės filtriniai spektro analizatoriai, kuriuose signalo spektras peržiūrimas nuosekliai filtruojant jo komponentes nuo žemiausių iki aukščiausių dažnių. Dažniausiai naudojami vadinamieji **panoraminiai spektro analizatoriai**, kurių atvaizdavimo įtaise yra parodomas tiriamo signalo amplitudžių spektro vaizdas. Kaip atvaizdavimo įtaisas naudojamas oscilografinis indikatorius arba matricų ekranas.

Tokių spektro analizatorių su oscilografiniais indikatoriais struktūrinė schema (7.3 pav.) yra panaši į 6 skyriuje aprašyto panoraminio ADCH matuoklio struktūrinę schemą.

Jo pagrindiniai elementai yra: atenuatorius A, žemųjų dažnių filtras Z1, pirmasis dažnių maišiklis UZ1, keičiamo dažnio heterodinas (valdomas generatorius arba dažnio sintezatorius) G1, juostinis pirmo tarpinio dažnio stiprintuvas (1TDS) A1, antras dažnių maišiklis UZ2, antras pastovaus dažnio heterodinas G3, antras

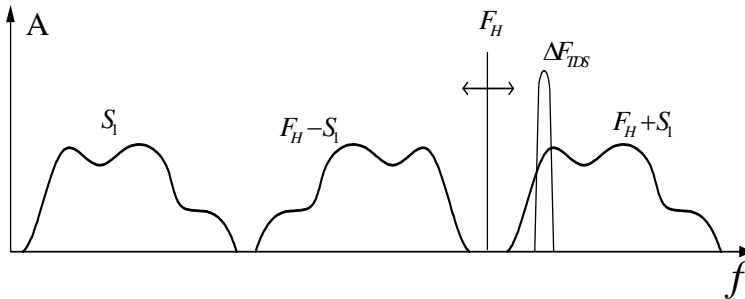
juostinis tarpinio dažnio stiprintuvas (2TDS) A2, amplitudės detektorius UR ir žemų dažnių stiprintuvas A3.



Čia, vietoj to, kad signalą vienu metu perduoti per daugelį filtrų, kaip tai daroma lygiagrečiuose spektro analizatoriuose, pasinaudojama superheterodininio imtuvo veikimo principu. Tiriamas signalas $x(t)$ maišiklyje UZ1 yra sumaišomas su keičiamo dažnio pirmojo heterodino G1 signalu (dažnis F_H 7.4 paveiksle). Tokiu būdu, tiriamojo signalo spektras S_1 perkeliamas į kitą dažnių sritį (spektrai $F_H - S_1$ ir $F_H + S_1$). Iš pirmo maišiklio išėjusio signalo spektras filtruojamas pirmame tarpinio dažnio stiprintuve (1TDS) A1. Keičiant heterodino dažnį į 1TDS patenka vis kita tiriamo signalo spektro S_1 dalis (7.4 pav.). Spektro analizatoriaus skiriamosios gebos padidinimui naudojamas antrasis dažnio keitimas. 1TDS išėjimo įtampa yra paduodama į antrą dažnio keitiklį UZ2 ir po to išskiriama antru juostiniu tarpinio dažnio stiprintuvu (2TDS) A2. Šio stiprintuvo juostos plotis ir sąlygoja spektro

7. Signalų parametrų matuokliai

analizatoriaus dažnių juostos plotį ir spektro analizatoriaus skyros gebą.



7.4 pav. Nuoseklaus veikimo filtrinio spektro analizatoriaus spektro keitimo principas

Dažnio atskaitymo tikslumui padidinti naudojamas kvarcinis generatorius G2, kurio harmonikos sumaišomos su pirmojo heterodino dažniu ir sudaro dažnių žymes.

Nuoseklaus veikimo spektro analizatoriai gaminami įvairiems dažnių ruožams (iki dešimčių GHz), yra gana tikslūs, tačiau sudėtingi ir brangūs. Jų analizės laikas yra didesnis, nei lygiagretais tipo spektro analizatorių.

Dauguma radijo dažnių spektrų tyrimui naudojamų ir gaminamų spektro analizatoriai yra būtent šio tipo (7.5 pav.).



7.5 pav. Agilent firmos spektro analizatoriaus vaizdas

7. Signalų parametrų matuokliai

Analoginių filtrinių nuoseklaus veikimo spektro analizatorių svarbiausi trūkumai yra tokie:

- maža skyros geba ir mažas dažnio nustatymo tikslumas;
- nepakankamas dažnio kitimo tiesiškumas dėl valdančios pirmo heterodino dažnį skleistinės įtampos netiesiškumo ir heterodino moduliacinės charakteristikos netiesiškumo;
- nesutampa heterodino dažnio svyravimo ir tuo pačiu spektro analizės ciklai;

- mažas amplitudžių matavimo dinaminis diapazonas.

Kai kurių iš paminėtų trūkumų galima išvengti analizuojant spektrus skaitmeniniais metodais.

7.1.4. Skaitmeniniai spektro analizatoriai

Skaitmeniniai spektro analizatoriai, tai prietaisai apskaičiuojantys spektrą iš diskretizuoto analizuojamo signalo, naudojant *diskretinę Furjė transformaciją* (DFT).

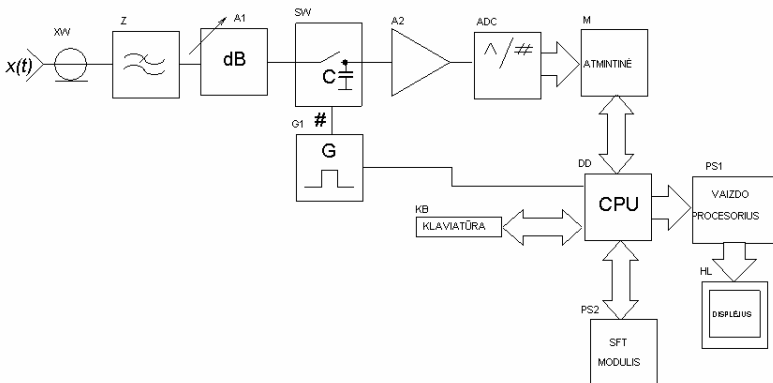
Jeigu diskretizacijos žingsnis yra Δt , tai per analizės laiką t_A yra gaunama N diskrečių signalo verčių. Padarius prielaidą, kad tokios vertės buvo ir laiko intervalais t_A prieš analizę ir egzistuos tais pačiais laiko intervalais po analizės, signalo realizacijos diskretinę funkciją $x(k)$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots, (N-1)$ galime laikyti periodine funkcija su periodu $t_A = N\Delta t$. Tokio diskretinio signalo spektrinio tankio funkcija yra taip pat diskretinė ir periodinė ir surandama pritaikius diskretinę Furjė transformaciją. Vieno jos periodo spektrinis tankis aprašomas taip:

$$S(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} x(k) e^{-\frac{j2\pi k}{N}n}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, (N-1).$$

Tai kompleksinio kintamojo funkcija. Gaunama N šios funkcijos verčių, nutolusių dažnių ašyje atstumais $1/N\Delta t$. Tik $N/2$ verčių nesikartoja. Paprastai nagrinėjami tik vadinami „fizikiniai“ spektrai, kurių dažniai yra teigiami ir tokių dažnių skaičius yra $N/2$. DFT skaičiavimai yra ilgi, nes visų N verčių radimui reikia atlikti $2N^2$ matematinių operacijų ir tai užima daug laiko. Skaičiavimų trukmei sumažinti naudojami pagreitininti DFT algoritmai vadinami *sparčiąja Furjė transformacija* (SFT). Algoritmų savybės priklauso nuo to

7. Signalų parametru matuokliai

kaip pasirenkamas diskretų skaičius N . Paprasčiausias ir daugiausiai paplitęs yra SFT algoritmas, kai pasirenkama $N = 2^p$, kai p – lyginis skaičius. Tuomet tereikia atlikti $(3N/2)\log_2 N$ skaičiavimo operacijų. Taigi skaičiavimo operacijų skaičius sumažėja $(4N)/3\log_2 N$ kartų. Kai $N = 2^{10} = 1024$, operacijų skaičius sumažėja daugiau kaip 100 kartų. Naudojant SFT, šiuolaikinėmis mikroprocesorinėmis sistemomis apskaičiuoti netgi didelio masyvo N spektrą dažnai nesudaro problemų, todėl sparčiosios Furjė transformacijos algoritmai įdiegiami daugelyje skaitmenizuotų matavimo prietaisų, pavyzdžiui, kaip oscilografo su skaitmenine atmintimi papildoma funkcija. Skaitmeninių spektro analizatorių struktūrinė schema yra artima oscilografo su skaitmenine atmintimi struktūrinei schemai (7.6 pav.). Jame analizuojamo signalo $x(t)$ lygis yra suderinamas su diskretizatoriaus SW veikimui reikiamu lygiu plačiajuosčiu atenuatoriumi A1. Diskretizacijos dažnis kaip ir kiti parametrai pasirenkamas klaviatūra KB, o impulsai formuojami generatoriumi G. Diskretinės signalo vertės yra perduodamos buferiniu stiprintuvu A2 į skaitmeninį–analoginį keitiklį ADC, o iš jo – į atmintinę. Kai atmintinėje M sukaupiama N diskrečių signalo verčių, jos perduodamos į SFT modulį ir apskaičiuojamas signalo spektras, kurio spektrograma yra atvaizduojama grafiniame displėjuje HL.



7.6 pav. Skaitmeninio spektro analizatoriaus apibendrinta struktūrinė schema

7. Signalų parametrų matuokliai

Skaitmeniniai spektro analizatoriai pasižymi tam tikromis tik jiems būdingomis savybėmis:

- jie gali analizuoti ir analoginius ir skaitmeninius signalus ir yra palyginti pigūs;
- turi ypač didelę skyros gebą. Jeigu naudojama SFT veikianti pagal $N = 2^p$ algoritmą, tai tas tolygu q ekvivalentinių lygiagrečios analizės filtrų naudojimui su praleidžiamų dažnių juostos pločiu -3 dB lygyje $0,88f_{\max}/q$. Pavyzdžiui, kai $N = 2^{10} = 1024$, tai atitinka 400 ekvivalentinių lygiagrečios analizės filtrų su praleidžiamų dažnių juostos pločiu -3 dB lygyje $0,88f_{\max}/400$;
- spektrų analizės rezultatus galima saugoti atskiroje atmintinėje ir vėliau naudoti spektrų palyginimui;
- analizės režimus galima valdyti rankiniu arba programiniu būdu, valdyti distanciniu būdu, analizatorių susieti su kitomis matavimo priemonėmis į informacinę–matavimo sistemą;
- signalo diskretinių verčių duomenis galima panaudoti statistinei ir kitokiai analizei.

Tačiau skaitmeniniai spektro analizatoriai pasižymi ir tam tikrais jiems būdingais trūkumais:

- analizuojamų signalų dažnių ruožas ribojamas diskretizacijos dažniu, kuris turi būti lygus Naikvisto dažniui. Esant dideliame signalo dažniui, kai signalas yra periodinis gali būti naudojamas stroboskopinio keitimo principas. Tada viršutinė analizuojamų dažnių ruožo riba gali siekti dešimtis GHz;
- diskretizacijos dažnį riboja analoginio–skaitmeninio keitiklio ir duomenų rašymo į atmintinę sparta;
- kitas duomenų kaupimo į atmintį ciklas galimas, tik kai iš jos bus nuskaityti duomenys ir atlikta SFT. Todėl analizės spartai padidinti kartais naudojama sparčioji buferinė atmintinė sudaryta iš dviejų atskirų blokų. Kai į vieną bloką vyksta duomenų įrašymas, tai tuo metu iš kito atmintinės bloko skaitomi duomenys siunčiami į SFT modulį. Po to blokų funkcijos sukeičiamos vietomis;

7. Signalų parametru matuokliai

- kadangi spektras gaunamas periodiškai pasikartojantis, tai esant plataus spektro signalui, dėl nepakankamos diskretizavimo spartos (netenkinama Naikvisto dažnio sąlyga) galimas *spektrų persiklojimas* (angl. aliasing). Todėl signalo spektras dirbtinai ribojamas žemųjų dažnių filtru, įjungtu analizatoriaus įėjime;

- ribotas amplitudės matavimo dinaminis diapazonas dėl kvantavimo triukšmo, skaičiavimo paklaidų, diskretizavimo žingsnio nestabilumo ir analoginių schemos elementų vidinių triukšmų. Kvantavimo triukšmas priklauso nuo analoginio-skaitmeninio keitiklio skilčių skaičiaus n ir diskretų skaičiaus N ir riboja dinaminį diapazoną iki $D = 10\lg(3N^2/4)$ dB;

- analizuojant ilgą tolygiai kintantį analoginį signalą, dėl baigtinio analizės laiko yra vertinama tik jo dalis ir signalas lygtai stebimas pro baigtinės trukmės „lango“. Todėl gaunamas spektro iškraipymas sąlygojamas vadinamuoju *Gibbso* reiškiniu. „Lango“ įtaka yra vertinama signalą padauginant iš tam tikros svorio funkcijos. Jeigu ji per analizės laiką nekinta, tai toks „langas“ vadinamas *stačiakampiu*. Spektro iškraipymų sumažinimui naudojamos „lango“ funkcijos, mažėjančios į abi puses nuo centro ir mažinančios „lango“ pakraščių įtaką. Naudojamos *Hanningo*, *Hammingo*, *Blackmano*, *Gauso* ir kitos „lango“ funkcijos.

7.2. Netiesinių iškraipymų matuokliai

Perduodant signalus per netiesines grandines, pakinta jų spektrai: atsiranda spektro komponentių harmonikos. Netiesinių grandinių sukeltų spektro iškraipymų vertinimui naudojamas *harmonikų koeficientas*, kuris parodo harmonikų ir pirmosios harmonikos įtampų efektinių verčių santykį:

$$k_h = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1} = \frac{U_h}{U_1}, \quad (7.1)$$

čia U_h – harmonikų įtamos efektinė vertė ir U_1 – pirmosios harmonikos efektinė įtampa.

7. Signalų parametrų matuokliai

Kaip išplaukia iš (7.1) formulės, harmonikų koeficiento matavimui reikia įvykdyti tokius veiksmus: nuslopinti režekciniu (užtvariniu) filtru signalo pirmąją harmoniką ir išmatuoti aukštesnių harmonikų efektinę įtampą po to išskirti juostiniu filtru signalo pirmąją harmoniką ir, išmatavus jos efektinę įtampą, surasti harmonikų įtampos ir pirmosios harmonikos įtampos santykį. Toks matavimas būtų pernelyg sudėtingas, nes harmonikų koeficientas dažnai matuojamas įvairių dažnių signalams ir pirmosios harmonikos išskyrimui tektų panaudoti perderinamą juostinį filtrą, kurio aparatinė realizacija yra sudėtinga.

Kadangi realiose grandinėse signalų netiesiniai iškraipymai paprastai neviršija 10 %, tai harmonikų įtampa ir sudaro tik tokią dalį signalo pirmosios harmonikos įtampos. Todėl Visa signalo įtampa mažai skiriasi nuo pirmosios harmonikos įtampos ir (7.1) formulėje pirmosios harmonikos įtampa gali būti pakeista visa signalo įtampa. Gautas taip parametras irgi naudojamas signalo netiesinių iškraipymų vertinimui ir vadinamas **netiesinių iškraipymų koeficientu**:

$$k_{\gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U} = \frac{U_h}{U}. \quad ((7.2))$$

Ir harmonikų koeficientas ir netiesinių iškraipymų koeficientas dažnai išreiškiami procentais. Tuo atveju ryšį tarp jų nustato tokia formulė:

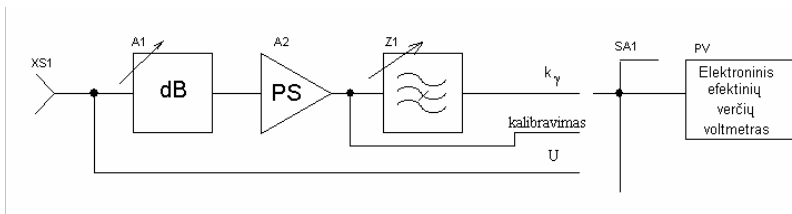
$$k_h = \frac{k_{\gamma}}{\sqrt{1 - \left(\frac{k_{\gamma}}{100}\right)^2}} \%,$$

kuri rodo, kad kai netiesinių iškraipymų koeficientas yra mažesnis už 10 %, tai šių koeficientų vertės yra praktiškai vienodos.

Netiesinių iškraipymų koeficiento matavimas yra paprastesnis, nes, kaip rodo (7.2) formulė, šiuo atveju pakanka tik nuslopinti režekciniu (užtvariniu) filtru signalo pirmąją harmoniką ir išmatuoti aukštesnių harmonikų efektinę įtampą bei ją palyginti su visa signalo efektine įtampa.

Analoginio netiesinių iškraipymų koeficiento matuoklio, veikiančio aptartuoju algoritmu, struktūrinė schema yra parodyta 7.7

paveiksle.



7.7 pav. Netiesinių iškreipimų matuoklio struktūrinė schema

Kadangi tiriama įtampa ir harmonikų sumos įtampa yra neharmoninės, tai jų efektinė vertė turi būti matuojama su tikrosios vidutinės kvadratinės vertės voltmetru (žr. 3 skyrių). Prietaisas perjungiklio SA1 padėtyje U gali būti naudojamas kaip tikrųjų vidutinių kvadratinių verčių voltmetras. Kalibravimo režime yra pasirenkama skalės vertė, o netiesinių iškreipimų koeficientas išmatuojamas, nuslopinus režekcinio filtro atitinkamo dažnio pirmosios harmonikos virpesį.

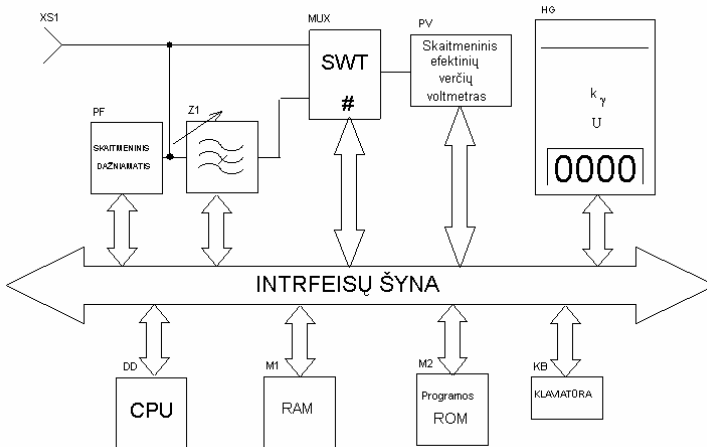
Tokių matuoklių plačiajuosčiai stiprintuvai A2 privalo turėti aukščiausią praleidžiamų dažnių juostos dažnį bent 5–10 kartų didesnį už matuoklio aukščiausią darbo dažnį, kad praleistų atitinkamą skaičių signalo harmonikų. Perderinami režekciniai filtrai paprastai sudaromi naudojant RC grandines – dvigubus T tiltelius (Vino tiltelius). Kenwood firmos analoginio netiesinių iškreipimų koeficiento matuoklio HM-250 vaizdas parodytas 7.8 paveiksle.



7.8 pav. Kenwood firmos netiesinių iškreipimų koeficiento matuoklio HM-250 bendras vaizdas

7. Signalų parametrų matuokliai

Pastaruoju metu dažniau naudojami skaitmeniniai netiesinių iškraipymų koeficiento matuokliai su mikroprocesoriniu valdymu, leidžiantys matuoti netiesinius iškraipymus automatinio režimu (7.9 pav.). Jų veikimo algoritmas nesiskiria nuo anksčiau aprašyto analoginio matuoklio veikimo, tik kalibravimo, režekcinio filtro derinimo ir rezultatų apdorojimo funkcijos yra automatizuotos.



7.9 pav. Skaitmeninio automatinio netiesinių iškraipymų matuoklio struktūrinė schema

Juose signalo dažnis matuojamas skaitmeniniu dažniamačiu PF ir jo matavimo rezultatu yra perderinamas režekcinis filtras Z1. Visa signalo įtampa ir įtampa su nuslopinta pirmąja harmonika per multiplekserį MUX yra perduodama į skaitmeninį tikrųjų efektyviųjų verčių voltmetrą PV. Iš įtampų matavimo rezultatų yra apskaičiuojamas netiesinių iškraipymų koeficientas, o dažnio, įtampos ir netiesinių iškraipymo koeficiento matavimų rezultatai atvaizduojami skaitmenų ir simbolių displėjuje HG. Valdymo programa yra saugoma programos atmintinėje M2, tarpiniai rezultatai – operatyvinėje atmintinėje M1, o nustatymai įvedami ir keičiami klaviatūra KB. Tokio matuoklio bendras vaizdas parodytas 7.10 paveiksle.



7.10 pav. Hameg firmos netiesinių iškraipymų matuoklio HM 8027 bendras vaizdas

Netiesinių iškraipymų matuoklių matavimo ribos yra nuo 0,01 % iki 100 %, o darbo dažnių diapazonas nuo 20 Hz iki 200 kHz.

Pastaruoju metu naudojami ir vadinami *statistiniai netiesinių iškraipymo koeficiento matuokliai*, kurie naudojami kartu su triukšmų pavidalo testinių virpesių šaltiniu. Jais galima geriau įvertinti netiesinių elektronikos grandinių sukeltus netiesinius signalų iškraipymus. Mat realiai grandinėse atsiranda ne tik signalo harmonikos, bet ir kombinaciniai dažniai. Tokie matuokliai įvertina visas papildomų dažnių signalo komponentes, kurias sukuria elektronikos grandinė.

7.3. Moduliacijos parametų matuokliai

Elektronikos grandinėse susiduriame su moduluotosios amplitudės, dažnio ir fazės virpesiais. Moduliacija gali būti tolydžioji arba diskrečioji. Pastaroji dažnai įvardijama kaip manipuliacija. Sutinkami ir įvairūs impulsinės moduliacijos atvejai, kai videoimpulsų amplitudė, dažnis, trukmė ar jų padėtis laiko ašyje priklauso nuo moduluojančio signalo. Dažnai naudojamos ir moduliacijų ar manipuliacijų kombinacijos.

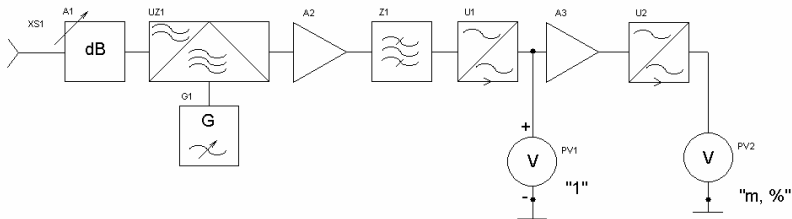
Plačiausiai paplitusios yra amplitudės ir dažnio moduliacijos rūšys, todėl jų parametų matavimo būdus ir nagrinėsime.

Kaip esame aptarę 4 skyriuje, amplitudinės moduliacijos gylį galima išmatuoti oscilografu. Tačiau šis metodas gerai tinka tik harmoniniu dėsniu moduluotų harmoninių virpesių moduliacijos

7. Signalų parametų matuokliai

gylį matavimui. Realių virpesių, moduluotų plačiajuosčiu signalu, moduliacijos gylį taip išmatuoti negalima, nes ekrane matysime tik kintančios amplitudės nestacionarų virpesio vaizdą, kurio parametų išmatuoti nepavyks.

Realių virpesių moduliacijos gylį matuojamas lygintuviniais (detektoriniais) *modulometrais*. Kadangi moduluotieji virpesiai dažniausiai yra radijo dažnio virpesiai, tai tokių matuoklių struktūrinė schema dalinai sutampa su moduluotosios amplitudės radijo signalų superheterodininių imtuvų struktūrine schema (7.11 pav.). Radijo virpesys po atenuatoriaus A1 patenka į dažnių maišiklį UZ, kur sumaišomas su perderinamo dažnio heterodino G dažniu. Tarpinis dažnis išskiriamas tarpinio dažnio stiprintuve A2 su juostiniu filtru Z1 ir detekuojamas pikiniu detektoriumi U1.



7.11 pav. Lygintuvinio modulometro struktūrinė schema

Po detektoriaus gaunamas žemo dažnio virpesys, atitinkantis moduliacijos dėsni. Jo įtampos vidutinė vertė matuojama magnetoelektriniu voltmetru PV1 ir atitinka amplitudės vidutinę vertę. Toliau žemo dažnio virpesys yra stiprinamas ir detekuojamas antru pikiniu detektoriumi su uždaru įėjimu. Jo išėjime gaunama nuolatinė įtampa, proporcinga amplitudės maksimaliam nuokrypiui nuo vidutinės vertės, kuri išmatuojama antru voltmetru PV2. Kai vidutinė amplitudės vertė yra normuoto lygio (keičiama atenuatoriumi A1), tai antrojo voltmetro skalė gali būti sugraduota tiesiog moduliacijos gylį procentais. Kai reikia atskirai pamatuoti moduliuotojo amplitudę radijo virpesio teigiamo ir neigiamo pusperiodžių moduliacijos gylį, keičiamas pirmojo detektoriaus U1 diodo ir voltmetro PV1 įjungimo poliškumas.

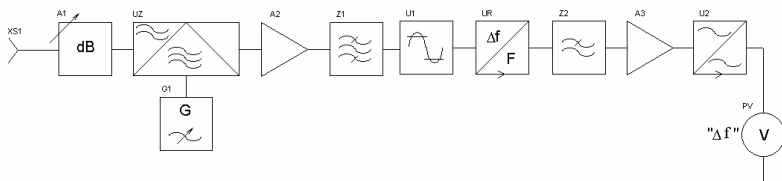
Tokių modulometrų matavimo paklaidos siekia apie $\pm 5\%$.

7. Signalų parametru matuokliai

Pastaruoju metu gaminami modulometrai, kuriuose efektyvios automatinio stiprinimo sistemos dėka, po pirmojo detektoriaus yra palaikoma normuota pastovi amplitudės vertė. Tuomet nereikia pirmojo voltmetro ir amplitudės normavimo procedūros.

Matuojant moduliutojo dažnio virpesių dažnio deviaciją dažniausiai yra naudojamas dažnio detekcijos metodas. Matavimo prietaisai, skirti moduliutojo dažnio radijo virpesių dažnio deviacijai matuoti vadinamo *deviometrais*. Jų struktūrinė schema yra panaši į moduliutojo dažnio radijo signalų superheterodiniųjų imtuvų struktūrinę schemą (7.12 pav.).

Radio virpesys po atenuatoriaus A1 patenka į dažnių maišiklį UZ, kur sumaišomas su perderinamo dažnio heterodino G dažniu. Tarpinis dažnis išskiriamas tarpinio dažnio stiprintuve A2 su juostiniu filtru Z1 ir jo amplitudė apribojama amplitudės ribotuviu U1, sumažinančiu parazitinės amplitudinės moduliacijos įtaką.



7.12 pav. Deviometro struktūrinė schema

Po amplitudės ribotuvo tarpinio dažnio virpesys yra detektuojamas dažnio detektoriumi UR. Detektoriaus detekcijos charakteristika turi būti tiesinė ir jo išėjimo įtampa yra proporcinga paduodamo į jo įėjimą virpesio dažnio deviacijai. Po žemo dažnio filtro ir stiprintuvo, žemojo dažnio virpesys yra detektuojamas pikiniu detektoriumi U2 ir įtamos amplitudė matuojama voltmetru PV. Kadangi įtamos amplitudė yra proporcinga dažnio deviacijai, tai voltmetro PV skalė yra graduojama dažnio deviacijos vienetais. Dažnio detekcijai analoginiuose deviometruose naudojamos schemas, kurių veikimas analogiškas 5 skyriuje aprašyto kondensatorinio dažniamačio veikimui. Deviometrų dažnio deviacijos matavimo paklaida siekia iki $\pm 5\%$.

Kaip matome iš pateiktų modulometro ir deviometro schemų ir jų veikimo aprašymų, dauguma šių matuoklių schemų elementų yra

7. Signalų parametrų matuokliai

vienodi. Todėl dažnai yra gaminami prietaisai, kurie matuoja ir amplitudinės ir dažnio moduliacijos parametrus ir vadinami tiesiog **moduliacijos parametrų matuokliais**. Kaip minėta, juose tarpinio dažnio virpesio amplitudė yra stabilizuojama, todėl jos lygis nėra matuojamas. Šiuolaikiškuose moduliacijos matuokliuose išėjimo įtampos amplitudė yra matuojama ne analoginiais, o skaitmeniniais voltmetrais, kurie, priklausomai nuo pasirinkto matavimo režimo, rodo arba amplitudinės moduliacijos gylį %, arba dažnio deviaciją kHz (7.13 pav.).



7.13 pav. Boonton firmos moduliacijos matuoklio 8210 vaizdas

Laboratorinėmis sąlygomis tiriant dažniu moduluotų generatorių moduliacijos parametrus kartais naudojamas spektrinis **nešančiojo virpesio nuslopinimo** metodas, o kai moduliacijos indeksai yra dideli ($M > 10$) – **dažniamačio** metodas, leidžiantys gauti mažesnes (apie $\pm 0,5$ %) matavimo paklaidas [10].

7.4. Loginiai analizatoriai

Platus skaitmeninių metodų ir mikroprocesorių panaudojimas šiuolaikinėje elektronikoje priverė sukurti specialius tokių grandinių signalų testavimo metodus ir priemones.

Skaitmeninių schemų ir mikroprocesorių naudojimas neleidžia jų testavimui naudoti oscilografų: oscilografų kanalų skaičius yra nedidelis (paprastai ne daugiau 4), o skaitmeninių įtaisų, priklausomai nuo jų skiltiškumo, stebimų procesų skaičius gali siekti 32 ir daugiau. Be to, reikia analizuoti ir vienkartinius bei

neperiodinius skaitmeninius signalus.

Analizuojant skaitmeninių įtaisų veikimą paprastai nereikia matuoti amplitudžių ir tikslų laiko intervalų, kaip kad to reikia tiriant analoginius įtaisy. Skaitmeninių įtaisų atveju pakanka tik atskirti loginius lygius 0 ir 1.

Loginiai analizatoriai – tai labai specializuoti oscilografai, turintys daug įėjimo kanalų ir leidžiantys analizuoti signalų lygius po tam tikro taktinių impulsų skaičiaus. Jų įėjimo signalai yra dvejetainio kodo skaičiai, o išėjimo informacija atvaizduojama analogiškuose kaip kompiuterių displėjuose ir gali būti labai įvairi. Be to, loginiai analizatoriai naudojami ne tik aparatinės įrangos, bet ir programų testavimui.

Jų veikimo principas yra artimas skaitmeninių oscilografų veikimui: įėjimo skaitmeniniai signalai yra įrašomi į analizatoriaus vidinę atmintį, o po to analizuojami ir reikiama informacija tam tikru pavidalu teikiama vartotojui analizatoriaus atvaizdavimo įtaise. Skaitmeninės informacijos apdorojimas ir atvaizdavimas vykdomas panašiai kaip kompiuteriuose.

Loginių analizatorių darbo režimai gali būti įvairūs. Vienas darbo režimas yra **loginių lygių analizės** režimas (*angl.* state analyser). Šiame režime veikiančio analizatoriaus skaitmeninis įėjimo signalas įrašomas jį taktuojant paties proceso sinchrosignalais, o po analizės atvaizduojamas **loginių lygių lentele**, kuri parodo testuojamo įtaiso loginius lygius po kiekvieno taktinio impulso. Tokį darbo režimą vadina analizatoriaus **sinchroniniu** darbo režimu.

Pavyzdžiui, keturių skilčių dvejetainio impulsų skaitiklio pagrindinių išėjimų loginių lygių lentelė yra tokia (1 lentelė):

Skaitmeninių sistemų su mikroprocesoriais atvejais tai gali būti duomenų, adresų ar valdymo šynomis perduodamų duomenų skaitmenų kodai – **skaitmeniniai žodžiai**. Skaitmenys gali būti vaizduojami ne tik dvejetainės skaičiavimo sistemos, bet ir aštuntinės, šešioliktinės, dešimtainės ir kitokios. Testuojant programą, gali būti vaizduojami **programų tekstai** (*angl.* listing).

Pavyzdžiui, analizuojant loginiu analizatoriumi 4 skilčių dvejetainio impulsų skaitiklio pagrindinių išėjimų loginius lygius, gautume loginio analizatoriaus atvaizdavimo įtaise loginių lygių lentelę, panašią kaip parodyta 7.14 paveiksle.

7. Signalų parametrų matuokliai

7.1 lentelė. Keturių skilčių dvejetainio skaitiklio pagrindinių išėjimų loginiai lygiai

Būsena	Q1	Q2	Q3	Q4
pradinė	0	0	0	0
po 1 takto	0	0	0	1
po 2 takto	0	0	1	0
-----	-----	-----	-----	-----
po 7 takto	0	1	1	1
po 8 takto	1	0	0	0
-----	-----	-----	-----	-----
po 15 takto	1	1	1	1

Analizuojant loginių lygių lenteles, galime matyti ar testuojamas įtaisas arba programa veikia teisingai ir jeigu ne, tai po kurio jo (jos) darbo takto įvyko klaida.

Kitas loginių analizatorių darbo režimas yra *loginių laiko diagramų* atvaizdavimo režimas (*angl.* timing analyser). Šiame režime yra atvaizduojamos testuojamo įtaiso išėjimuose veikiančių įtampų laiko diagramos.

Pavyzdžiui, jeigu 4 skilčių dvejetainis impulsų skaitiklis veikia gerai, tai jo pagrindinių išėjimų įtampų laiko diagramos yra tokios kaip pavaizduota 7.15 paveiksle.

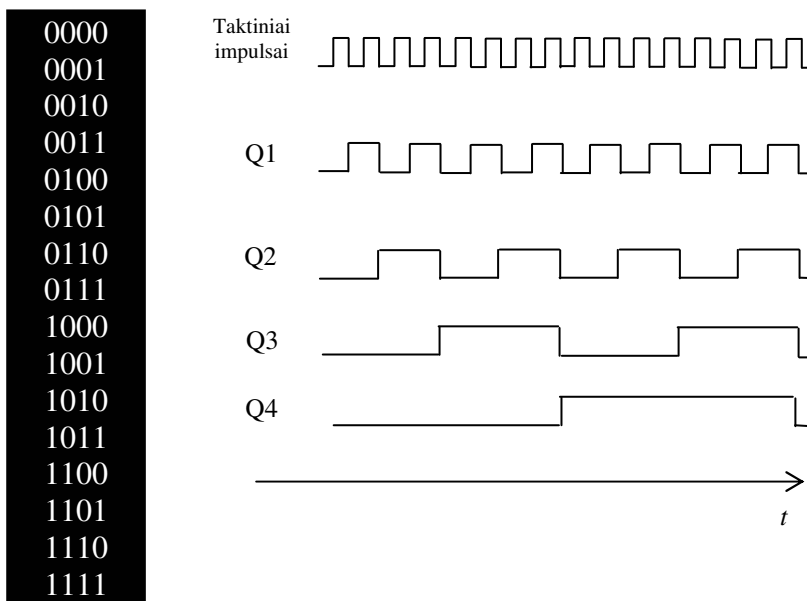
Analizuojant skaitmeninių sistemų įtampų laiko diagramas, galima gauti daugiau informacijos apie juose vykstančius procesus ir greičiau lokalizuoti jų darbo klaidas: pastebėti impulsų frontų iškraipymus, poslinkius laike, parazitinius impulsus ir kitas.

Kad nebūtų prarasta informacija apie proceso savybes, reikia įrašymą į atmintį vykdyti su žymiai (5 – 10) didesne sparta nei testuojamo įtaiso ar sistemos taktavimo sparta. Todėl signalų diskretizavimui ir įrašymui į vidinę atmintį naudojamas loginio analizatoriaus vidinis taktinių impulsų generatorius. Toks loginio analizatoriaus darbo režimas vadinamas *asinchroniniu*.

Loginių laiko diagramų atvaizdavimo režime turi būti ir žymiai didesnė vidinės atminties talpa. Pavyzdžiui, analizuojant 4 skilčių dvejetainio skaitiklio loginius lygius, pakanka 4 bitų vieno kanalo

7. Signalų parametru matuokliai

atminties talpos, o visa reikiama talpa yra: $4 \times 16 = 64$ bitai. Tuo tarpu analizuojant to paties skaitiklio logines laiko diagramas reikia įrašyti 5 kanalų po $10 \times 16 = 160$ bitų arba iš viso 800 bitų informacijos. Didėjant testuojamo įtaiso skilčių skaičiui, šie skaičiai labai išauga. Todėl šiuolaikinių loginių analizatorių bendra kanalų atminties talpa siekia iki 128 megabaitų.



7.14 pav. Loginių lygių lentelė

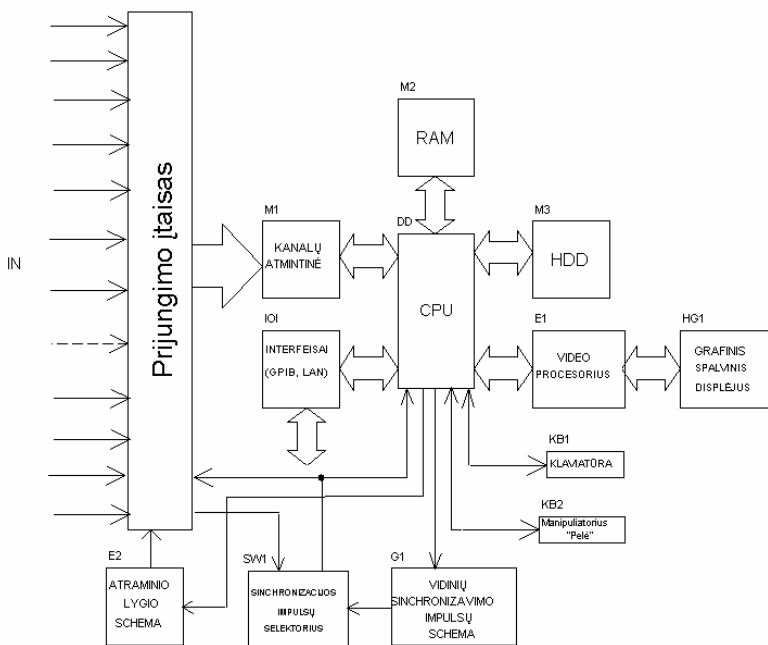
7.15 pav. Įtampų laiko diagramos 4 skilčių dvejetainio skaitiklio išėjimuose

Loginių analizatorių kanalų skaičius, kaip minėta, turi būti didelis. Pavyzdžiui, testuojant 8 bitų mikroprocesorinę sistemą, reikia analizuoti 8 bitų duomenų, 16 bitų adresų ir 8 bitų valdymo šynas. Todėl tokios sistemos testavimui reikia ne mažiau 32 kanalų loginio analizatoriaus. Šiuolaikinių loginių analizatorių kanalų skaičius siekia iki 240. Asinchroninio darbo režimo duomenų kaupimo sparta (diskretizavimo dažnis) siekia iki 4 GHz, o kanalo sparčiosios atmintinės talpa – iki 64 kilobaitų.

Apibendrinta loginio analizatoriaus struktūrinė schema yra

7. Signalų parametų matuokliai

pavaizduota 7.16 paveiksle.



7.16 pav. Apibendrinta loginio analizatoriaus struktūrinė schema

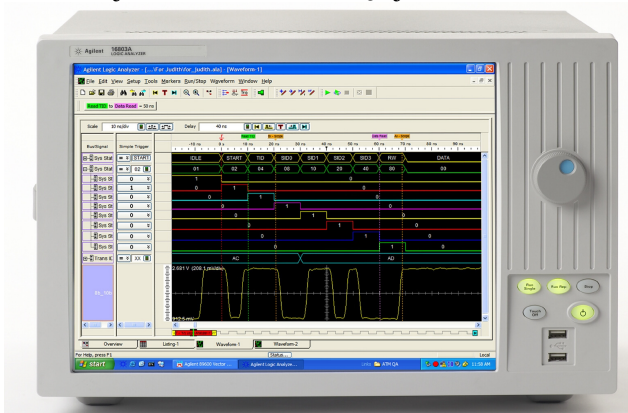
Analizatoriaus kanalų *prijungimo įtaisai* sudaro galimybę paduoti tiriamus skaitmeninius signalus į analizatoriaus įėjimus. Prijungimo elementai yra kabeliais prijungti prie analizatoriaus ir todėl juos patogiai galima prijungti prie tiriamos sistemos elementų išvadų. Kartais jie grupuojami į grupes ir baigiasi kontaktinėmis kaladėlėmis, skirtomis prijungti prie standartinių jungčių naudojamų skaitmeninėse sistemose ir gamintojų numatytų specialiai sistemos testavimui.

Kanalo prijungimo elemento schemoje paprastai naudojami analoginiai komparatoriai, palyginantys signalo loginius lygius su atraminiu lygiu, nustatomu vartotojo. Atraminio lygio keitimo galimybė įgalina analizuoti įvairios logikos – TTL, KMOP, emiterinių ryšių ir kitos – elementų sistemas. Svarbiausias reikalavimas kanalo prijungimo elementui yra tas, kad jis nepakeistų

7. Signalų parametų matuokliai

grandinės elektrinio režimo. Todėl elemento įėjimo varža turi būti didelė (siekia iki 1 MΩ), o įėjimo talpa maža (paprastai mažesnė už 5 pF).

Šiuolaikiškų loginių analizatorių centrinių procesorių darbo dažnis siekia 3 GHz, operatyvinė atmintis iki 1 gigabaito, o standžiųjų diskų talpa 80 gigabaitų ir daugiau. Jų atvaizdavimo įtaisai yra spalviniai grafiniai lietimui jautrūs skystųjų kristalų ekranai (7.17 pav.), o informacijos įvedimui ir analizatoriaus valdymui naudojamos kompiuterių klaviatūros ir manipulatoriai („pelės“). Ryšiui su kitais matavimo–informacinių sistemų elementais naudojama GPIB ir LAN sąsajos.



7.17 pav. Agilent firmos 34 kanalų 16800 serijos loginio analizatoriaus vaizdas

Kaip matome 7.16 paveiksle, loginio analizatoriaus struktūra, atmetus duomenų surinkimo elementus, nesiskiria nuo kompiuterio. Todėl jis paprastai naudoja paplitusias operacines sistemas ir valdomas su jomis suderinamomis programomis. Yra atvejų, kai loginiai analizatoriai sudaromi personalinių kompiuterių pagrindu panaudojant duomenų įvedimui lygiagretųjį kompiuterio prievadą arba su kompiuterio duomenų ir adresų magistrale susijamą aparatinę dalį.

Pagrindiniai loginių analizatorių parametrai yra kanalų skaičius, kanalo atmintinės talpa, įrašymo sparta, sinchronizavimo ir paleidimo būdai bei informacijos apdorojimo ir atvaizdavimo

7. Signalų parametrų matuokliai

galimybės.

Loginių analizatorių naudojimas reikalauja aukštos aptarnaujančio personalo kvalifikacijos. Todėl gamybos ar eksploatacijos sąlygomis jie naudojami retai. Šiomis sąlygomis dažniau naudojamas *signatūrų analizės* metodas.

Analizuojami duomenys yra paverčiami skaitmeniu – signatūra, dažniausiai šešiolyktainio kodo keturių ženklų skaičiumi. Speciali testavimo programa, numatyta projektavimo metu ir instaliuota testuojamoje sistemoje, generuoja kontroliniuose sistemos taškuose duomenų sekas ir *signatūrų analizatoriuje* jie paverčiami signatūromis. Šios signatūros yra lyginamos su etaloninėmis signatūromis. Toks sistemų testavimas tampa panašus į analoginių grandinių tikrinimą oscilografais ir voltmetrais, kai jų įtampos ir oscilogramos grandinių kontroliniuose taškuose yra lyginamos su gamintojo nurodytomis norminėmis vertėmis principinėse elektrinėse tokių grandinių schemose.

7.5. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui

1. Ką vadina virpesio spektru?
2. Kokį ryšį nustato tiesioginė Furjė transformacija?
3. Kodėl skiriasi tikrasis (teorinis) ir realiai išmatuotas signalų spektrai?
4. Kokios yra spektro analizatorių rūšys?
5. Kaip sudaromi filtriniai lygiagretaus veikimo spektro analizatoriai?
6. Kaip sudaromi filtriniai nuoseklaus veikimo spektro analizatoriai?
7. Koks dispersinių spektro analizatorių sudarymo principas?
8. Iš kokių pagrindinių elementų sudaryti skaitmeniniai spektro analizatoriai?
9. Koks esminis diskretinės Furjė transformacijos skirtumas nuo tolydžiosios?
10. Koks sparčiosios Furjė transformacijos esminis pranašumas?

7. Signalų parametru matuokliai

11. Kokie svarbiausi spektro analizatorių metrologiniai parametrai?

12. Kokį signalo parametru vadina harmoniku koeficientu?

13. Kas yra netiesiniu iškraipymu koeficientas ir kuo jis skiriasi nuo harmoniku koeficiento?

14. Nubraižykite paprasčiausio netiesiniu iškraipymu koeficiento matuoklio strukturine schema ir paaiskinkite jo veikima.

15. Kaip sudarytas ir veikia automatinis netiesiniu iškraipymu matuoklis?

16. Koks parametras vadinamas amplitudines moduliacijos gyliu?

17. Kaip matuojamas amplitudines moduliacijos gylis oscilografu?

18. kaip sudarytas ir veikia lygintuvinis (detektorinis) amplitudines moduliacijos gylis matuoklis – modulometras?

19. Kokius parametrus vadina dažnines moduliacijos indeksu ir dažnio deviacija?

20. Kaip sudarytas ir veikia dažnio deviacijos matuoklis – deviometas?

21. Kokiu skaitmeniniu itaisu ir sistemų analizės režimu vadina loginiu lygiu analizės režimu?

22. Kokiu skaitmeniniu itaisu ir sistemų analizės režimu vadina loginiu laiko diagramu analizės režimu?

23. Kokius matavimo prietaisus vadina loginiais analizatoriais?

24. Iš kokių pagrindiniu elementu sudarytas loginis analizatorius?

25. Koks yra loginio analizatoriaus kanalo prijungimo itaiso pagrindinis elementas?

26. Kokie svarbiausi elektriniai reikalavimai keliami prijungimo itaisams?

27. Kokiu skaitmeniniu itaisu ir sistemų analizės būdu vadina signaturu analize ir kada jis dažniausiai naudojamas?

Antra dalis

PRAKTINIAI DARBAI

Ivadas

Praktiniai darbai padeda studentams geriau suvokti studijuojamo dalyko teoriją, detaliau išanalizuoti tiriamus fizikinius reiškinius ir įgyti patirties, eksperimentuojant su elektronine aparatūra.

Kiekvienas praktinis darbas susideda iš tokių etapų: pasirengimas darbui, darbo atlikimas, ataskaitos parengimas, rezultatų analizė ir darbo gynimas.

Pasirengimas praktiniam darbui. Rengiantis atlikti praktinį darbą, pirmiausia reikia gerai susipažinti su jo aprašymu. Iš darbo aprašymo išsiaiškinti jo tikslą, užduotis, atlikimo eigą, aiškintis, ką rekomenduoja metodiniai nurodymai ir bandyti atsakyti į darbo aprašyme pateiktus kontrolinius klausimus. Jeigu atsakyti į klausimus arba išspręsti kontrolines užduotis nepakanka žinių, studijuojamos atitinkamos temos iš teorinės dalies.

Prieš leisdamas studentui atlikti praktinį darbą, dėstytojas patikrina jo žinias. Jeigu paaiškėja, kad studentas nesuvokia darbo tikslo, užduoties, negali atsakyti į kontrolinius klausimus ir paaiškinti, kokie laukiami darbo rezultatai bei nėra paruošęs formulių reikalingų darbo rezultatų skaičiavimams, tuomet jam darbo neleidžiama atlikti. Studentas turi geriau pasirengti ir darbą galės atlikti kitu laiku.

Praktinis darbas. Atliekant praktinį darbą, reikia vadovautis darbo aprašymu, metodiniais nurodymais ir dėstytojo nurodymais, griežtai laikytis laboratorijos vidaus tvarkos taisyklių ir saugaus darbo reikalavimų. Su šiomis taisyklėmis dėstytojas studentus supažindina įvadinio užsiėmimo metu ir studentai pasirašo praktinių darbų apskaitos žurnale, jog su jomis susipažino.

Ivadas

Visi praktinio darbo užduoties punktai atliekami paeiliui. Kruopščiai išmatuojami ir apskaičiuojami reikiami dydžiai ir rezultatai surašomi į rezultatams surašyti skirtą lapą. Juose nurodoma, koks užduoties punktas yra vykdomas, kokios buvo eksperimento sąlygos ir kokiomis matavimo priemonėmis buvo naudotasi. Visi studentai privalo atsinešti elektroninius skaičiuoklius. Kad darbas vyktų sparčiau, kartu dirbantys studentai turėtų pasiskirstyti pareigomis: vienas reguliuoti prietaisus, antras užrašinėti prietaisų rodmenis, trečias braižyti schemas. Atliekant kitą praktinio darbo užduoties dalį, pareigomis patartina pasikeisti.

Tiriamų priklausomybių grafikams nubrėžti reikia pasirinkti pakankamą eksperimentinių taškų skaičių. Prieš pradėdant matuoti tiriamą priklausomybę, reikia užduotyje nurodytose ribose pakeisti argumentą ir patikrinti, kokios yra funkcijos kitimo ribos. Pagal tai pasirenkamas argumento keitimo žingsnis. Pavyzdžiui, jeigu tam tikrame argumento keitimo intervale funkcija sparčiai kinta, tai tame intervale reikia imti mažesnę argumento keitimo žingsnį.

Atlikus visus praktinio darbo matavimus ir reikiamus skaičiavimus, rezultatai išanalizuojami, lyginami su laukiamais ir pateikiami dėstytojui. Jeigu dėstytojas pritaria darbo rezultatams ir pasirašo užpildytą rezultatams surašyti skirtą lapą, tai praktinio darbo dalis laboratorijoje yra baigta. Tada reikia išjungti matavimo prietaisus, sutvarkyti darbo vietą ir galima išeiti iš laboratorijos.

Praktinio darbo ataskaitą rengia kiekvienas studentas. Ji turi būti pateikta dėstytojui ne vėliau kaip iki kito praktinio darbo pradžios. Nepateikusiems ataskaitų studentams neleidžiama dirbti kito praktinio darbo.

Ataskaita kompiuteriu kruopščiai ir įskaitomai taisyklinga lietuvių kalba surašoma vienoje A4 formato popieriaus lapo pusėje. Rekomenduojamas šrifto aukštis – 11 pt ir viengubas tarpas tarp gretimų eilučių.

Grafikai ir virpesių oscilogramos nubraižomi kompiuteriu ir įterpiami į ataskaitos tekstą. Skirtingos grafiko kreivės gali būti nuspalvintos įvairiomis spalvomis arba turi būti naudojamos skirtingo pavidalo linijos. Gali būti pateikiama atitinkamai apiforminta grafinė medžiaga sukurta naudojamomis darbe kompiuterinėmis programomis.

Ataskaitos lapo kairėje pusėje paliekama 20 mm paraštė, dešinėje–20 mm, o viršuje ir apačioje–po 25 mm. Rėmelio braižyti nereikia. Visi praktinio darbo ataskaitos lapai, išskyrus pirmąjį – antraštinį, yra numeruojami arabiškais skaitmenimis eilės tvarka. Skaitmenys rašomi ataskaitos lapo apatiniame dešiniajame kampe.

Ataskaitoje pateikiami paveikslai, lentelės ir skaičiavimų formulės yra numeruojamos to darbo ataskaitos eilės tvarka.

Kiekvieno praktinio darbo ataskaitos antraštiniame puslapyje (1 pav.) viršuje užrašomas laboratorijos pavadinimas. Žemiau – praktinio darbo numeris ir jo pavadinimas. Surašomos darbą atlikusių studentų pavardės, grupės šifras, darbo atlikimo data. Nurodoma ataskaitą pateikusio studento pavardė ir dėstytojo, kuris tikrins tą darbą, pareigos ir pavardė.

Be užduotyje specialiai aptartų rezultatų, kiekvieno praktinio darbo ataskaitoje privaloma aptarti darbo tikslą, parašyti kokie prietaisai buvo naudojami tam tikram eksperimentui atlikti.

..... laboratorija
1 darbas

**SUSIPAŽINIMAS SU LABORATORIJOS
MATAVIMO PRIETAISAIŠ IR DARBŲ
ATLIKIMO TVARKA**

Darbą atliko MEFS 0/1 gr. stud.:
J. Jonaitis
P. Petraitis
A. Aleksaitė
200... m. rugsėjo 22 d.
Ataskaita J. Jonaičio

Tikrino doc. A. Antanaitis

1 pav. Praktinio darbo ataskaitos antraštinio puslapio pavyzdys

Ivadas

Ataskaitose matavimų ir skaičiavimų rezultatai surašomi į lenteles. Reikia nurodyti lentelės numerį, jos pavadinimą bei joje pateikiamų dydžių matavimo vienetus. Lentelės pavyzdys pateikiamas žemiau.

1 lentelė. Generatoriaus FG-100 virpesių amplitudės dažninė charakteristika

f, kHz	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
U, V	1,4	1,5	1,6	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,5	1,3	1,2

Braižant priklausomybių grafikus, reikia pasirinkti tinkamą brėžinio formatą, kad būtų užpildytas lapo plotas ir, esant reikalui, būtų galima tais grafikais pasinaudoti, atliekant kitus apskaičiavimus. Mastelis imamas toks, kad pasirinktam argumento ir funkcijos matavimo vienetui (pvz., V, mA, kHz, dB, % ir t.t.) tektų tokie sveikieji milimetrų skaičiai: 1, 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100. Nerekomenduojami tokie skaičiai: 3, 7, 9, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 19, 21, 23, 24. Ties koordinatinių ašimis atidedamos ne matavimų metu gautų rezultatų skaitinės vertės, o matavimų vienetus rodantys skaičiai. Jie išdėstomi ne tankiau kaip kas 10 mm ir ne rečiau kaip kas 50 mm. Gauti eksperimentų rezultatai grafike pažymimi taškais, bet jie nejungiami tiesiomis linijomis, o per juos išvedama tolydi vidurkio linija, vaizduojanti tiriamą priklausomybę. Dažnai šios linijos pobūdis parenkamas atsižvelgiant į tai, kokia yra teorinė tiriamoji priklausomybė. Esant didelei eksperimentinių taškų sklaidai, eksperimentus reikia pakartoti. Jeigu tiriamos kelios vieno pobūdžio priklausomybės, tai jos braižomos viename grafike, ir nurodoma, koks yra kiekvienos iš jų parametras. Ties koordinatinių ašimis pažymimi argumento ir funkcijos simboliai ir nurodomi jų matavimo vienetai. Brėžiniai vadinami paveikslais ir jie iš eilės numeruojami kiekvieno praktinio darbo ataskaitoje. Kiekvienas paveikslas privalo turėti pavadinimą. Grafiko pavyzdys parodytas 2 paveiksle.

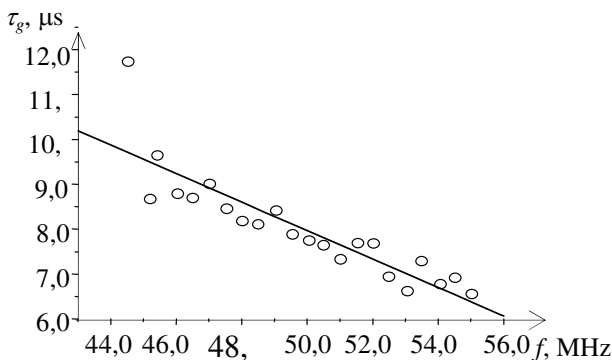
Apskaičiavimams naudotas formules reikia paaiškinti, pavyzdžiui:

$$Q = \frac{T}{\tau_i}, \quad (1)$$

čia Q – periodinės impulsų sekos retis;

T – impulsų pasikartojimo periodas, s;

τ_i – impulsų trukmė, s.



2 pav. Filtro grupinio vėlinimo laiko dažninė charakteristika

Po to į formulę surašomos visų dydžių skaitinės vertės SI sistemos pagrindiniais vienetais (patys vienetai nerašomi) ir užrašomas skaičiavimo rezultatas bei jo matavimo vienetas. (Tarp skaičiavimo rezultato skaitinės vertės ir matavimo vieneto paliekamas tarpelis). Skaičiavimų rezultatai pateikiami tokio paties tikslumo, koks yra naudotų dydžių tikslumas, pavyzdžiui:

$$Q = \frac{10^{-3}}{500 \cdot 10^{-6}} = 2,00$$

Jeigu ta pati formulė skaičiavimams naudojama daugelį kartų, tai pateikiamas tik vieno skaičiavimo pavyzdys ir paaiškinama, kad kiti skaičiavimai atlikti analogiškai, o jų rezultatai surašyti į lentelę (nurodomas lentelės numeris ir pavadinimas).

Praktiniai darbai ginami žodžiu arba raštu dėstytojo nurodytu laiku. Gindamas praktinį darbą, studentas privalo turėti darbo ataskaitą, žinoti darbo tikslą, tyrimų eigą, tiriamų reiškinių teorinius pagrindus ir fizikinę prasmę, mokėti atsakyti į kontrolinius praktinio darbo klausimus ir paaiškinti gautus rezultatus. Kiekvienas praktinis darbas, jo ataskaita ir gynimas įvertinami vienu bendru pažymiu.

Ivadas

Visų darbų pažymių vidurkis yra galutinis disciplinos praktinių darbų įvertinimas.

Semestro pabaigoje studentas visas atskirų darbų ataskaitas susega į aplanką, pasirašo ir pateikia dėstytojui. Aplanko viršelio pavyzdys pateiktas 3 paveiksle.

Ataskaitų aplanko viršelio pavyzdyje studijų dalyko pavadinimas yra „Matavimai ir metrologijos pagrindai“, tačiau tai gali būti ir kitas studijų dalykas, kurių praktinių darbų ataskaitos yra pateikiamos.

VILNIAUS KOLEGIJA _____ katedra MATAVIMŲ IR NETROLOGIJOS PAGRINDŲ PRAKTINIŲ DARBŲ ATASKAITOS Atliko MEF 0/1 gr. stud. J. JONAITIS Dėstytojas doc. A. ANTANAITIS VILNIUS 200...
--

3 pav. Aplanko viršelio pavyzdys

Pirmas darbas

Susipažinimas su laboratorijos matavimo prietaisais ir darbų atlikimo tvarka

Darbo tikslas

Susipažinti su laboratorijos darbų atlikimo tvarka, darbų atlikimo kalendoriniu grafiku ir naudojamais matavimo prietaisais.

Darbo užduotys

1. Išanalizuoti įvade aprašytą praktinių darbų atlikimo tvarką ir bendruosius reikalavimus jų ataskaitoms. Išsiaiškinti koku kalendoriniu grafiku bus atliekami praktiniai darbai.

2. Išsiaiškinti naudojamų matavimo generatorių pagrindinius parametrus ir jų valdymo elementų paskirtį.

3. Išsiaiškinti naudojamų analoginių kintamosios įtampos elektroninių voltmetrų pagrindinius parametrus ir jų valdymo elementų paskirtį.

4. Išsiaiškinti naudojamų skaitmeninių elektroninių voltmetrų pagrindinius parametrus ir jų valdymo elementų paskirtį.

5. Išsiaiškinti naudojamo elektroninio oscilografo pagrindinius parametrus ir jo valdymo elementų paskirtį.

Metodiniai nurodymai

Su laboratorijos vidaus tvarkos taisyklėmis, darbų atlikimo tvarka ir kalendoriniu grafiku bei matavimo priemonių pagrindiniais parametrais supažindina dėstytojas. Dėstytojas taip pat paaiškina ir matavimo prietaisų valdymo elementų paskirtį.

Ataskaitos turinys

1. Darbo tikslas.
2. Darbe analizuotų matavimo prietaisų sąrašas su jų svarbiausių savybių aprašymu.

Antras darbas

Matavimo generatoriaus tyrimas

Darbo tikslas

Susipažinti su matavimo generatoriaus struktūrine schema, pagrindinėmis metrologinėmis savybėmis ir patikrinti jo svarbiausius metrologinius parametrus.

Darbo uždutis

1. Išnagrinėti pateikto matavimo generatoriaus struktūrinę elektrinę schemą ir nustatyti kokiais elementais ir kaip keičiami svarbiausi jo virpesių parametrai.

2. Išstudijuoti ir užrašyti svarbiausius generatoriaus metrologinius parametrus.

3 Patikrinti:

3.1 Generatoriaus virpesio dažnio nustatymo tikslumą.

3.2 Generatoriaus virpesio dažnio stabilumo parametrus.

3.3 Generatoriaus virpesio formos parametrus (harmoninių virpesių netiesinius iškreipymus arba moduluotųjų virpesių moduliacijos parametrus).

Metodiniai nurodymai

Tikrinant generatoriaus parametrus, naudojami būdai aprašyti tiriamo generatoriaus aprašyme ir dėstytojo duotos matavimo priemonės su jų aprašymais.

Tikrinant generatoriaus *dažnio nustatymo tikslumą* naudojamas skaitmeninis dažniamatis. Juo ne mažiau kaip tris kartus išmatuojamas generatoriaus dažnis per 10 sekundžių matavimo laiką ir rezultatų aritmetinis vidurkis lyginamas su nustatytu generatoriaus skalėje dažniu. Pagal generatoriaus aprašymą tikrinama ar gautasis skirtumas neviršija leistinojo.

Tikrinant *generatoriaus dažnio stabilumą*, duotasis generatoriaus dažnis dažniamačiu matuojamas ne mažiau kaip 120 kartų. Kiekvienas matavimas atliekamas per 10–ties sekundžių

matavimo laiką. Iš gautosios rezultatų aibės (imties) nustatomi: *dažnių sklaidos intervalas* (imties plotis), *rezultatų aritmetinis vidurkis*, *vidutinis kvadratinis (standartinis) nuokrypis* nuo vidurkio ir empiriniai *asimetrijos bei eksceso koeficientai*. Braižoma dažnių skirstinio grafikas – *histograma*. Ieškomi statistiniai dydžiai randami pagal teorinės dalies 1 skyriuje pateiktas formules. *Normalumo hipotezė* tikrinama pagal asimetrijos ir eksceso koeficientus.

Apskaičiuojamos asimetrijos ir eksceso koeficientų standartinės paklaidos pagal tokias formules:

$$s_{AS} = \sqrt{6(n-1)/[(n+1)(n+3)]},$$

$$s_{EK} = \sqrt{24n(n-2)(n-3)/[(n-1)^2(n+3)(n+5)]}.$$

Jeigu asimetrijos arba eksceso koeficientas 2–3 kartus viršija apskaičiuotą jo standartinės paklaidos vertę, tai laikoma, kad jis yra reikšmingai nelygus nuliui ir atsitiktinių paklaidų skirstinys gali būti nenormalus ir reikėtų detalesnio tyrimo [1]. Priešingu atveju tokiai abejonei nėra pagrindo ir galima tikėtis, kad skirstinys yra normalusis.

Patvirtinus normalumo hipotezę, surandamas maksimalus dažnio nuokrypis ir lyginamas su leistiniu pagal generatoriaus aprašymą.

Matavimo rezultatų tvarkymui galima naudoti statistinių skaičiavimų programas.

Ataskaitos turinys

1. Darbo tikslas.
2. Generatoriaus struktūrinė schema pagal užduoties 1p.
3. Generatoriaus svarbiausių metrologinių savybių aprašymas pagal užduoties 2p.
4. Tikrinimo rezultatai, lentelės ir grafikai pagal užduoties 3p.
5. Rezultatų aptarimas ir išvados.

Kontroliniai klausimai ir užduotys

1. Kaip randamas imties plotis?
2. Kaip randamas rezultatų aritmetinis vidurkis ir standartinis nuokrypis nuo jo?
3. Kaip randami asimetrijos ir eksceso koeficientai?
4. Kaip braižoma skirstinio histograma?
5. Kaip tikrinamas tikimybių skirstinio normalumas?

Praktiniai darbai

6. Kaip randamas maksimalus nuokrypis nuo vidurkio?
7. Kokia matavimo generatorių bendroji struktūrinė schema?
8. Kokie dažnių diapazonai sąlygiškai vadinami infražemojo dažnio, žemojo dažnio, aukštojo dažnio ir superaukštojo dažnio diapazonais?
9. Kokios būna žemojo dažnio generatorių valdančiųjų generatorių schemos?
10. Kaip sudaryta žemo dažnio interferencinių valdančiųjų generatorių schema?
 - 1 1. Kokios yra valdančiųjų RC generatorių schemos?
 - 1 2. Kaip reguliuojamas generatoriaus išėjimo įtampos lygis?
 - 1 3. Kokie svarbiausi žemo dažnio generatorių metrologiniai parametrai?
14. Kaip normuojamas žemo dažnio generatorių dažnio nestabilumas ir kaip jis matuojamas ?
15. Kaip matuojamas generatoriaus dažnio nustatymo tikslumas?
16. Ką vadiname generatoriaus harmoninio virpesio netiesiniais iškraipymais ir kaip jie matuojami?
17. Kokie būna aukšto dažnio matavimo generatorių valdantieji generatoriai?
18. Kokios moduliacijos rūšys naudojamos aukšto dažnio matavimo generatoriuose?
19. Kaip įvykdoma amplitudės moduliacija tiriamojo generatoriaus schemoje?
20. Kaip įvykdoma dažnio moduliacija tiriamojo generatoriaus schemoje?
21. Kokie aukštojo dažnio matavimo generatorių svarbiausieji metrologiniai parametrai?

Trečias darbas

Elektromechaninių rodyklinių matavimo prietaisų tyrimas ir tikrinimas

Darbo tikslas

Išsiaiškinti pagrindinių sistemų elektromechaninių rodyklinių matavimo prietaisų sandarą, veikimo principą ir svarbiausias metrologines bei eksploatacines savybes.

Susipažinti su matavimo prietaisų pagrindinių ir papildomų paklaidų vertinimo būdais.

Darbo užduotys

1. Susipažinti su magnetoelektrinės elektromagnetinės, elektrodinaminės ir elektrostatinės sistemų elektromechaninių rodyklinių matavimo prietaisų sandara ir veikimo principu. Aprašyti prietaisų veikimo principus, iliustruojant matavimo lygtimis. Nurodyti kiekvienos sistemos svarbiausias metrologines ir eksploatacines savybes bei naudojimo sritis.

2. Išstudijuoti ir detalai aprašyti pateiktus prietaisus, naudojantis jų skalių užrašais ir žinynais.

3. Išstudijuoti ir detalai aprašyti pateiktą tikrinimui elektrodinaminės sistemos voltmetrą, naudojantis jo skalių užrašais ir žinynais.

4. Išstudijuoti pateiktą etaloninį voltmetrą arba etaloninį matą (voltmetrų kalibratorių) ir nustatyti ar jų paklaidos atitinka etalonams keliamus reikalavimus.

5. Nustatyti tikrinamo prietaiso pagrindinę paklaidą dėstytojo nurodytame skalės taške.

6. Nustatyti papildomą dažninę voltmetro paklaidą dėstytojo nurodytame skalės taške ir nurodytame dažnių ruože

Praktiniai darbai

Metodiniai nurodymai

Pagrindinės paklaidos vertinimas

Pirmiausia voltmetras apžiūrimas, ar jis neturi akivaizdžių gedimų. Po to prietaisas pastatomas į normalią padėtį ir apie 5 minutes šildomas maksimalia srove. Po to jo rodmenys duotame skalės taške ne mažiau kaip 30 kartų palyginami su etalono teikiamais rezultatais. Bandymų ir skaičiavimų rezultatai surašomi į 2 lentelę. Šios lentelės kai kurie duomenys bei ieškomi statistiniai dydžiai randami pagal teorinės dalies 1 skyriuje pateiktas formules.

2 lentelė. Voltmetro tikrinimo skalės taške X_0 rezultatai

Etaloninė įtampa, V	Paklaidos, V	Atsitiktinės paklaidos, V
A_1	Δ_1	ξ_1
A_2	Δ_2	ξ_2
.....		
A_n	Δ_n	ξ_n

Atsitiktinių paklaidų suma:

Iš 2 lentelės duomenų yra surandami tokie dydžiai: *sisteminioji paklaida, standartinė paklaida*.

Toliau reikia surasti *suminę ribinę paklaidą*. Tam pirmiausia palyginame sisteminę ir standartinę paklaidas ir, jeigu galima, pritaikome *paneigtinų paklaidų kriterijų*. Jeigu abi paklaidos komponentės yra nepaneigtinos, tai reikia patikrinti ar atsitiktinių paklaidų tikimybių skirstinys yra normalusis.

Tam apskaičiuojami asimetrijos ir eksceso koeficientai. Po to skaičiuojamos jų standartinės paklaidos pagal tokias formules:

$$s_{AS} = \sqrt{6(n-1)/[(n+1)(n+3)]},$$

$$s_{EK} = \sqrt{24n(n-2)(n-3)/[(n-1)^2(n+3)(n+5)]},$$

čia n yra bandymų skaičius.

Jeigu asimetrijos arba eksceso koeficientas 2–3 kartus viršija apskaičiuotą jo standartinės paklaidos vertę, tai laikoma, kad jis yra reikšmingai nelygus nuliui ir atsitiktinių paklaidų skirstinys gali būti *anormalus* ir reikėtų detalesnio tyrimo [1]. Priešingu atveju tokiai

abėjonei nėra pagrindo ir galima tikėtis, kad skirstinys yra *normalusis*.

Patvirtinus normalumo hipotezę, pritaikoma „trijų sigma“ taisyklė ir surandama atsitiktinės paklaidos ribinė vertė. Suminė ribinė paklaida surandama panaudojant tokią koreguotą paklaidų sumos formulę [1, 76 p]:

$$\Delta = 0,85(\Delta_c + 3s_n),$$

čia Δ_c yra sistemingoji paklaida, o s_n – standartinė paklaida.

Pagal suminę ribinę paklaidą ir skalės ribą voltmetrui yra priskiriama tikslumo klasė ir ji palyginama su gamintojo nustatyta voltmetro tikslumo klase

Papildomos dažninės voltmetro paklaidos tikrinimas

Tikrinama pagal nurodytam dažnių ruožui tinkamą etaloną (etaloninį voltmetrą ar voltmetrų kalibratorių). Dažnių ruožą nurodo dėstytojas. Tiriamo voltmetro vardinis darbo dažnis yra surandamas jo aprašyme. Etalono teikiama įtampa privalo būti pastovi ir lygi A . Voltmetro rodmuo, esant vardiniam dažniui yra X_0 . Matavimų rezultatai surašomi į 3 lentelę.

3 lentelė. Papildomos dažninės paklaidos matavimų
ir skaičiavimų rezultatai

Dažnis, Hz	Tiriamo voltmetro rodmenys, V	Dažninė paklaida, V	Santykinė dažninė paklaida, %
f_1	X_1	$\Delta_{f1} = X_1 - X_0$	$\delta_{f1} = \frac{\Delta_{f1}}{X_0} 100, \%$
f_2	X_2	$\Delta_{f2} = X_2 - X_0$	$\delta_{f2} = \frac{\Delta_{f2}}{X_0} 100, \%$
.....			
f_v	X_0	0	0
.....			
f_N	X_N	$\Delta_{fN} = X_N - X_0$	$\delta_{fN} = \frac{\Delta_{fN}}{X_0} 100, \%$

Praktiniai darbai

Pagal 2 lentelės rezultatus braižoma papildomos santykinės paklaidos dažninė priklausomybė. Iš jos daroma išvada ar tiriamas prietaisas atitinka normas.

Jeigu dažnis skiriasi nuo vardinio ne daugiau kaip $\pm 10\%$ tai prietaiso papildoma paklaida neturi viršyti paklaidos, atitinkančios jo tikslumo klasę. Jeigu prietaisui normuojama *vardinė dažnių sritis*, tai ką tik nurodyta sąlyga turi būti išpildyta šioje dažnių srityje. Jeigu prietaisai nustatyta *išplėsta dažnių sritis*, tai joje papildoma paklaida neturi viršyti pagrindinės prietaiso paklaidos.

Ataskaitos turinys

1. Darbo tikslas.
2. Prietaisų sistemų aprašymai pagal užduoties 1p.
3. Pateiktų tyrimams prietaisų metrologinių savybių aprašymai pagal užduoties 2p.
4. Tiriamo elektrodinaminio voltmetro metrologinių savybių aprašymas pagal užduoties 3p.
5. Etalono metrologinių savybių aprašymas pagal užduoties 4p.
6. Pagrindinės paklaidos ir tikslumo klasės tyrimo rezultatai pagal užduoties 5p.
7. Papildomos paklaidos tyrimo rezultatai ir jos dažninės priklausomybės grafikas pagal užduoties 6p.
8. Darbo rezultatų aptarimas ir išvados.

Kontroliniai klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname elektromechaniniu rodykliniu matavimo prietaisu?
2. Kokias žinote elektromechaninių rodyklinių matavimo prietaisų sistemas?
3. Kaip sudarytas ir kaip veikia magnetoelektrinės sistemos prietaisas?
4. Kaip sudarytas ir kaip veikia elektrodinaminės sistemos prietaisas?
5. Kaip sudarytas ir kaip veikia elektromagnetinės sistemos prietaisas?
6. Kaip sudarytas ir kaip veikia elektrostatinės sistemos prietaisas?
7. Išvardinkite įvairių sistemų prietaisų panaudojimo sritis.
8. Ką reiškia žymėjimai prietaisų skalėse?

9. Ką rodys magnetoelektrinės sistemos ampermetras įjungtas į grandinę, kurios varža $R = 10 \, \Omega$, kai veikia įtampa $u(t) = 25 + 50 \sin \omega t$?

10. Ką rodys elektrodinaminės sistemos voltmetras, prijungtas prie įtampos $u(t) = 25 + 50 \sin \omega t$ šaltinio?

11. Kaip parenkamas pavyzdinis prietaisas?

12. Kokios prietaiso naudojimo sąlygos vadinamos normaliomis?

13. Ką vadiname pagrindine prietaiso paklaida?

14. Kokios paklaidos vadinamos papildomomis?

15. Kokios paklaidos vadinamos sistemingosiomis ir kokios atsitiktinėmis?

16. Kokios paklaidos vadinamos absoliutinėmis ir kokios – santykinėmis?

17. Kaip vertinama matavimų standartinė paklaida?

18. Kaip vertinama matavimų ribinė paklaida?

19. Kaip apvalinamos paklaidos ir matavimo rezultatai?

20. Kaip sumuojamos sistemingosios ir atsitiktinės paklaidos?

21. Ką vadiname prietaiso tikslumo klase? Kaip ji nustatoma ir žymima?

22. Kaip galima praplėsti voltmetrų ir ampermetrų matavimo ribas? Kokie mastelio keitikliai naudojami?

23. Kokia turi būti miliampermetro su viršutine skalės riba 0,5 mA tikslumo klasė, kad, matuojant 0,1 A srovę santykinė paklaida neviršytų $\pm 1 \, \%$?

24. Turime du ampermetrus: vieną 1,0 tikslumo klasės su 10 A skalės riba, kitą – 2,5 klasės su 5 A skalės riba. Kuriuo prietaisu matuodami 4 A srovę gausime tikslesnį rezultatą?

25. Kokia yra voltmetro su 5 V viršutine skalės riba tikslumo klasė, jeigu jo ribinė matavimo paklaida pastovi ir lygi $\pm 0,0015 \, \text{V}$?

26. Matavimų paklaidos priklauso normaliajam tikimybių skirstiniui. Standartinė matavimų paklaida yra 3 mA. Sistemingosios paklaidos nėra. Kokia tikimybė, kad paklaidos modulis viršys 9 mA?

27. Įtampos matavimų paklaidos pasiskirstė pagal lygios tikimybės dėsnį nuo $-1 \, \text{V}$ iki $+5 \, \text{V}$. Kokia matavimų sistemingoji paklaida, standartinė paklaida, tikimybė, kad atsitiktinės paklaidos modulis neviršys 1 mV?

Ketvirtas darbas

Įtampų matavimas elektroniniais voltmetrais

Darbo tikslas

Išanalizuoti įvairių elektroninių voltmetrų struktūrines schemas, naudojamų juose svarbiausių funkcinių ir mastelio keitiklių sudarymo ypatumus ir jų savybes, nustatyti kaip nuo jų priklauso pagrindiniai voltmetrų metrologiniai ir eksploataciniai parametrai bei išsiaiškinti kaip voltmetrų su įvairiais funkciniais keitikliais rodmenys priklauso nuo matuojamosios įtamos formos.

Darbo užduotys

Namuose išsiaiškinti kokios yra įtampų matuojamosios vertės ir **išvesti formules**, susiejančias voltmetrų su uždaraus nuolatiniai įtampai įėjimais ir pikinių verčių (amplitudės detektorius), vidutinių išlygintųjų verčių (tiesinis abiejų pusperiodžių detektorius) ir efektinių verčių (kvadratinis detektorius) funkciniais matavimo keitikliais rodmenis su įvairios formos kintamųjų įtampų parametrais.

1. Naudojantis pateiktų elektroninių voltmetrų aprašymais ir rekomenduojama literatūra išanalizuoti jų struktūrines elektrines schemas ir išsiaiškinti šių schemų elementų paskirtį bei ypatumus.

2. Aprašyti kiekvieno elektroninio voltmetro detektorių tipus ir jų schemų ypatumus.

3. Susipažinti su kitais darbe naudojamais matavimo prietaisais: funkcinio ir impulsinio generatoriais bei oscilografu.

4. Užrašyti ir išstudijuoti kiekvieno pateikto elektroninio voltmetro svarbiausias metrologines savybes.

5. Įjungti visas darbe naudojamas matavimo priemones ir kompiuterius.

6. Parodyti dėstytojui išvestąsias formules voltmetrų rodmenų skaičiavimui

7. **Išmatuoti dėstytojo nurodytų įvairios formos virpesių įtampą** visais esamais darbo vietoje elektroniniais voltmetrais bei oscilografu užfiksuoti jų oscilogramų parametrus ir rezultatus surašyti į rezultatams surašyti skirtą lapą. Oscilografo valdymui ir oscilogramų dokumentavimui galima naudoti kompiuterio valdymo programą ir atitinkamą interfeisą.

8. Pagal oscilogramos teikiamus įtampos parametrus ir išvestas formules apskaičiuoti kokie turėjo būti voltmetrų rodmenys.

7. Pagal rodmenų priklausomybę nuo įtampos formos, nustatyti koks yra funkcinis keitiklis (detektorius) skaitmeninio voltmetro (multimetro).

8. Palyginti ir aptarti matavimų bei skaičiavimų rezultatus ir padaryti išvadas.

Metodiniai nurodymai

Matuojant virpesių įtampą, naudojamas toks virpesių dažnis, kai elektroninių voltmetrų jautrumas yra didžiausias (dažniausiai – 1 kHz).

Virpesių parametrai (amplitudė, periodas, impulsų trukmė) nustatomi iš oscilogramos. Pagal ją taip pat tikrinama ar virpesys simetriškas ar ne. Nesimetriško virpesio atveju tiksliau ištiriami tie virpesio parametrai, nuo kurių priklauso virpesio nuolatinės dedamosios dydis (pavyzdžiui, periodo ir impulso trukmės santykis). Žinant virpesio parametrus ir įvertinus voltmetro įėjimo grandinės schemą (ar ji atvira ar uždara nuolatinei įtampos dedamajai) ir voltmetro detektoriaus tipą (tiesinis, amplitudės ar kvadratinis) galima apskaičiuoti kokie turi būti voltmetro rodmenys.

Trečiame skyriuje yra aptarta, kad kai voltmetras skirtas tik kintamosios įtampos matavimui, jo įėjimo grandinė yra uždara nuolatinei įtampai, todėl iš virpesio turi būti atimta nuolatinė įtampos dalis U_0 ir tik po to apskaičiuota ta kintamosios įtampos vertė į kurią reaguoja detektorius. Apskaičiavus šią įtampos vertę, dar reikia įvertinti tai, kad visi voltmetrai (išskyrus impulsinius) graduojami ***sinusinės formos įtampos efektinėmis vertėmis***. Įvertinus gradavimo sąlygą ir tai į ką reaguoja voltmetro detektorius, bei jo įėjimo grandinės savybes (uždara ar atvira) galima nustatyti koks turi būti voltmetro rodmuo U_v esant tiriamai įtampos formai.

Paanalizuokime tipinius atvejus.

Praktiniai darbai

1. Voltmetras, skirtas matuoti kintamajai įtampai, turi *tiesinį detektorių* ir kaip matosi iš jo schemos, išlygina abu kintamosios įtampos pusperiodžius. Kaip žinoma, tokio detektoriaus teikiama išėjimo nuolatinė įtampa yra proporcinga jo įėjimo kintamosios įtampos vidutinei išlygintajai vertei:

$$U_{v.l.} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t) - U_0| dt. \quad (1)$$

Voltmetras, kaip minėta, yra graduotas sinusoidės formos įtampos efektinėmis vertėmis ir gradavimo metu ryšys tarp sinusoidės efektinės vertės ir jos vidutinės išlygintosios vertės, nustatomas sinusoidės formos koeficientu dvipusiam išlyginimui, buvo:

$$\frac{U_v}{U_{v.l.}} = \frac{U}{U_{v.l.}} = k_{F\sim} = \frac{U_m \pi}{2U_m \sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11, \quad (2)$$

čia U_v yra voltmetro rodmuo.

Tada tokio voltmetro rodmuo yra:

$$U_v = 1,11 \frac{1}{T} \int_0^T [u(t) - U_0] dt \quad (3)$$

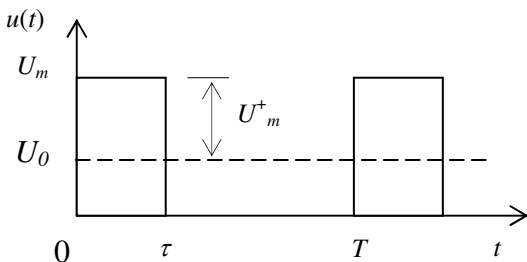
2. Voltmetras, skirtas matuoti kintamajai įtampai, turi *pikinį detektorių* ir kaip matosi iš jo schemos, reaguoja tik į kintamosios įtampos teigiamus pusperiodžius. Kaip žinoma, tokio detektoriaus teikiama išėjimo nuolatinė įtampa yra proporcinga jo įėjimo kintamosios įtampos atitinkamos amplitudės vertei. Voltmetro rodmuo bus mažesnis už ją tiek, kiek gradavimo metu naudotos sinusoidės efektinė vertė mažesnė už jos amplitudės vertę t.y. $\sqrt{2}$ (nevertinant detektoriaus įtampos perdavimo sistemos paklaidos):

$$U_v = \frac{U_m - U_0}{\sqrt{2}} \approx 0,707(U_m - U_0) \quad (4)$$

3. Voltmetras, skirtas matuoti kintamajai įtampai, turi *kvadratinį keitiklį* ir keitiklio teikiama išėjimo nuolatinė įtampa yra proporcinga jo įėjimo kintamosios įtampos vidutinei kvadratinei (efektinei) vertei. Voltmetro rodmuo sutaps su šia verte, nes jis yra graduotas efektinėmis vertėmis:

$$U_v = U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [u(t) - U_0]^2 dt} . \quad (5)$$

Jeigu matuojamos įtampos yra simetrinės funkcijos t.y. neturi nuolatinės dedamosios U_0 tai minėtos formulės gaunasi paprastesnės.



4 pav. Stačiakampių impulsų periodinės sekos pavidalo matuojamoji įtampa

Atlikime skaičiavimus konkrečiai įtampai. Tarkime, kad voltmetru su tiesiniu detektoriumi aptartu pirmuoju atveju yra matuojama vieno ženklo stačiakampių impulsų periodinės sekos įtampa (4 pav.).

Tokios įtampos vidutinė išlygintoji

vertė, kai išlyginami abu kintamosios įtampos pusperiodžiai, yra:

$$\begin{aligned} U_{v.l.} &= \frac{1}{T} \left(\int_0^{\tau} U_m^+ dt + \int_{\tau}^T U_0 dt \right) = \frac{1}{T} [(U_m - U_0)\tau + \\ &U_0(T - \tau)] = \frac{1}{Q} \left(U_m - \frac{U_m}{Q} \right) + \frac{U_m}{Q} \left(1 - \frac{1}{Q} \right) = \\ &2U_m \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q^2} \right) = 2U_m \frac{Q-1}{Q^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

čia $Q = T/\tau$ yra impulsų sekos retis.

Tada, įvertinę gradavimo sąlygą (2), gautume formulę analizuojamo voltmetro rodmeniui apskaičiuoti, kai matuojama 1 paveiksle pavaizduotos nesinusinės formos įtampa:

$$U_v = U_{v.l.} k_{F\sim} = \frac{2U_m(Q-1)\pi}{Q^2 2\sqrt{2}} \approx 2,22U_m \frac{Q-1}{Q^2}. \quad (7)$$

Analogiškai reikia išvesti ir kitų voltmetrų rodmenų formules kitų formų virpesių įtampos matavimo atvejams.

Praktiniai darbai

Ataskaitos turinys

1. Darbo tikslas.
2. Naudotų darbe elektroninių voltmetrų struktūrinės schemos.
3. Voltmetrų detektorių schemų ir jų savybių aprašymas.
4. Kiekvieno naudoto darbe voltmetro svarbiausių metrologinių savybių aprašymas.
5. Sinusinės ir visų nesinusinės formos įtampų oscilogramos, matavimų rezultatai ir rodmenų skaičiavimo formulės bei skaičiavimo rezultatai.
6. Kiti rezultatai pagal užduotį ir darbo rezultatų aptarimas ir išvados.

Kontroliniai klausimai ir užduotys

1. Kokie esminiai reikalavimai keliami voltmetrams?
2. Kaip klasifikuojami elektroniniai voltmetrai?
3. Kokios pagrindinės elektroninių voltmetrų struktūrinės schemos ir jų savybės?
4. Ką vadiname pikine, amplitudine, efektine, vidutine kvadratine, vidutine ir vidutine išlyginta įtampos verte?
5. Ką vadiname įtampos amplitudės ir formos koeficientais?
6. Kokie detektoriai naudojami elektroniniuose voltmetruose?
7. Ką vadiname pikiniu (amplitudės) detektoriumi? Kokios yra šių detektorių schemos ir savybės?
8. Ką vadiname tiesiniais (vidutinių išlygintųjų verčių) detektoriais? Kokios yra šių detektorių schemos ir savybės?
9. Ką vadiname efektyvių verčių (kvadratiniais detektoriais arba keitikliais)? Kokios yra jų schemos ir savybės?
10. Kokie detektoriai naudojami voltmetruose, skirtuose sinusinei įtampai matuoti?
 11. Kokie detektoriai naudojami impulsiniuose voltmetruose?
 12. Kada naudojami kvadratiniai detektoriai (keitikliai)?
 13. Kodėl voltmetrų rodmenys priklauso nuo matuojamosios įtampos kreivės formos ?
14. Kokie pagrindiniai ASK tipai naudojami skaitmeniniuose elektroniniuose voltmetruose ?
15. Analoginis neimpulsinis voltmetras su amplitudiniu detektoriumi ir uždaru įėjimu matuoja įtampą schemeje, sudarytoje iš nuosekliai sujungtų diodo ir rezistoriaus. Schemos įėjime veikia

įtampa $u(t)=252\sin\omega t$. Ką rodys voltmetras schemos įėjime ir po diodo?

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

17. Impulsinis voltmetras su uždaru įėjimu rodo $U_1=20$ V, o voltmetras su kvadratinio detektoriumi $U_2=14,18$ V. Kokia matuojamosios įtampos forma? Kodėl?

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

19. Nubraižyti skaitmeninio elektroninio voltmetro, su ASK, keičiančiu nuolatinę įtampą į jai proporcingą laiko intervalą dvigubo integravimo būdu, struktūrinę schemą ir pagrindines laiko diagramas, iliustruojančias schemos veikimą.

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

Penktas darbas

Matavimai elektroniniu oscilografu

Darbo tikslas

Išanalizuoti šiuolaikiško elektroninio oscilografo struktūrinę schemą, veikimo principą, pagrindines metrologines savybes ir praktiškai išmokti juo matuoti svarbiausius elektrinių signalų parametrus bei patikrinti jo esminius metrologinius parametrus.

Darbo užduotys

1. Nusibraižyti tipinę analoginio–skaitmeninio oscilografo struktūrinę schemą ir pagal ją bei rekomenduojamą literatūrą išstudijuoti jos elementų paskirtį bei tarpusavio sąveiką.

2. Užsirašyti ir išstudijuoti oscilografo svarbiausius metrologinius parametrus.

3. Išsiaiškinti svarbiausių oscilografo valdymo elementų paskirtį pagal jo aprašymą.

3. Susipažinti su kitais darbe naudojamais matavimo prietaisais: funkcinio generatoriumi ir voltmetrų kalibravimo prietaisu. Perskaityti šių prietaisų aprašymus. Užsirašyti šių prietaisų tuos metrologinius parametrus ir charakteristikas, kurie, jūsų nuomone, yra svarbūs ir reikalingi atliekant šį darbą.

4. Įjungti visas darbe naudojamas matavimo priemones ir kompiuterius.

5. Parodyti dėstytojui užsirašytus tiriamo oscilografo ir kitų darbe naudojamų prietaisų pagrindinius metrologinius parametrus.

6. ***Išmatuoti nurodytų periodinių elektrinių signalų parametrus ir nusibraižyti matavimų struktūrines schemas.***

Metodiniai nurodymai

Sujungti oscilografą su tiriamų signalų šaltiniu. Visi naudojami prietaisai iki matavimų pradžios privalo išbūti įjungti ne trumpiau kaip 15 min.

Naudojant oscilografo valdymo kompiuteriu programą ir oscilografo priekinio panelio valdymo elementus, išmatuoti dėstytojo nurodytų signalų pagrindinius parametrus. Įtampa matuojama, prijungiant ją prie oscilografo vertikalios kreipimo kanalo įėjimo. Naudojamas kalibruoto (žinomo) kanalo kreipimo koeficiento būdas. Signalo laiko parametrai (trukmė, periodas) matuojami kalibruoto (žinomo) skleistinės koeficiento būdu.

Išsaugoti visų signalų oscilogramas standžiajame diske.

4. Patikrinti amplitudžių matavimų oscilografu pagrindinę paklaidą ir ištirti oscilografo dažnines savybes.

Metodiniai nurodymai

Sujungti oscilografą su etalonine matavimo priemone (voltmetrų kalibravimo prietaisu).

Amplitudžių matavimo paklaida nustatoma kaip paduodamos į jo įėjimą etaloninės įtampos amplitudės A ir oscilogramoje išmatuotos įtampos amplitudės X santykinis skirtumas:

$$\delta = \frac{X - A}{A} 100, \% \quad (1)$$

Dažninės savybės tiriamos keičiant etaloninės įtampos dažnį ir nustatant amplitudžių matavimo paklaidos dažninę priklausomybę.

Ataskaitos turinys

1. Darbo tikslas.
2. Naudoto oscilografo tipinė struktūrinė schema, jos trumpas aprašymas ir svarbiausi metrologiniai oscilografo parametrai.
3. Matavimų struktūrinės schemos.
4. Išmatuotų signalų oscilogramos su pažymėtais parametru simboliiais ir tų parametru vertėmis.
5. Amplitudžių matavimo oscilografu pagrindinės paklaidos tikrinimo struktūrinė schema ir tikrinimo rezultatai.
6. Amplitudžių matavimo oscilografu paklaidos dažninės priklausomybės tikrinimo rezultatai ir grafikai.
7. Atlikto darbo apibendrinimas. Išvados apie ištirtų oscilografo metrologinių parametru atitikimą gamintojo nurodytoms leistinoms vertėms (jos yra teikiamos oscilografo aprašyme).

Praktiniai darbai

Kontroliniai klausimai ir užduotys

1. Kokia oscilografų paskirtis ir kaip jie klasifikuojami?
2. Iš kokių svarbiausių struktūrinių dalių susideda analoginis ir analoginis–skaitmeninis elektroniniai oscilografai?
3. Kas yra sinchronizacija? Kokios sinchronizacijų rūšys naudojamos ir kada?
4. Kas yra skleistinė ir kokios jų rūšys naudojamos? Kada naudojama periodinė skleistinė?
5. Kada naudojama laukianti skleistinė?
6. Kaip veikia oscilografo skaitmeniniai signalų parametrų matuokliai?
7. Kokie pagrindiniai oscilografų metrologiniai parametrai?
8. Kaip oscilografu matuojama įtampa?
9. Kaip oscilografu matuojami signalų laiko parametrai?
10. Kaip oscilografu matuojamas fazių skirtumas?
11. Kokios matavimo paklaidų priežastys matuojant oscilografu?
12. Oscilografo skleistinės trukmė, pavyzdžiui, atitinkamai yra 50 ms/pad. ir 0,2 μ s/pad (1 pad. = 6 mm). Koks yra skleistinės greitis?

Šeštas darbas

Dažnio matavimas

Darbo tikslas

Susipažinti su įvairiais dažnio matavimo būdais bei prietaisais ir išmokyti jais naudotis.

Darbo užduotys

1. Susipažinti su pateiktų dažniamačių aprašymais ir veikimo principais. Nusibraižyti ir išsiaiškinti jo struktūrines schemas.

2. Aptarti kiekvieno dažniamačio svarbiausias metrologines savybes.

3. Įvairiais dažniamačiais išmatuoti keletą dėstytojo nurodytų elektrinio signalo dažnių ir įvertinti galimas ribines matavimo paklaidas.

4. Skaitmeniniu dažniamačiu išmatuoti signalo ir dažnį ir periodą. Įvertinti matavimo paklaidas. Nustatyti, kokių dažnių atveju skaitmeniniais dažniamačiais geriau matuoti periodą, o kokių – dažnį.

Ataskaitos turinys

1. Darbo tikslas.

2. Naudojamų darbe dažniamačių struktūrinės schemas ir pagrindinių metrologinių savybių santrauka.

3. Išmatuotų dažnių ir laiko intervalų matavimo rezultatai ir jų absoliutinės bei santykinės ribinės paklaidos. Jos nustatomos pagal prietaiso aprašymuose pateiktas leistinas pagrindines ribines paklaidas.

4. Prietaiso su mažiausia paklaida rodomą rezultatą priėmę už teisingą, surandame kitų prietaisų paklaidas eksperimento metu ir palyginame jas su leistinomis. Darome išvadą apie tų prietaisų tikslumą.

5. Rezultatų, gautų vykdant 3 ir 4 punktus aptarimas ir išvados.

Praktiniai darbai

Kontroliniai klausimai ir užduotys

1. Kokius žinote dažnio matavimo būdus? Kokie būdai naudojami techniniuose ir kokie – laboratoriniuose matavimuose?
2. Koks kondensatorinio dažniamačio veikimo principas, panaudojimo sritys ir paklaidų šaltiniai?
3. Kokius žinote oscilografinius dažnio matavimo būdus?
4. Kaip nustatomas signalo dažnis oscilografu, naudojant žinomos skleistinės trukmės būdą? Kokie šiuo atveju paklaidų šaltiniai?
5. Kaip dažnis matuojamas oscilografu pagal Lisažu figūras? Kokie paklaidų šaltiniai?
6. Kaip dažnis matuojamas oscilografu apskritiminės skleistinės būdu? Kuo šis būdas pranašesnis už Lisažu figūrų būdą?
7. Raskite sinusinio signalo periodą ir dažnį, jeigu oscilografo ekrane jo ilgis, atitinkantis periodą užima 5 padalas, o oscilografo skleistinės koeficientas yra $20 \mu\text{s}/\text{pad}$?
8. Kaip sudarytas ir kaip veikia skaitmeninis periodo matuoklis? Kokios jo matavimo paklaidos?
9. Kokia skaitmeninio dažniamačio struktūrinė schema ir koks jo veikimo principas? Kokie matavimo paklaidų šaltiniai?
10. Kada skaitmeniniu būdu matuojamas signalo dažnis ir kada – periodas? Kodėl?
11. Kaip sudarytas ir veikia heterodininis dažniamatis?

Septintas darbas

Elektronikos grandinių elementų parametrų matavimas

Darbo tikslas

Susipažinti su R , L , C , matuoklių veikimu ir išmokti jais matuoti elektronikos grandinių elementų R , L , C parametrus.

Darbo užduotis

1. Išstudijuoti pateiktų R , L , C matuoklių aprašymus, veikimo principus ir pagrindines metrologines savybes. Išsiaiškinti, kaip jais matuojami įvairūs elektronikos grandinių elementų parametrai.

2. Nusibraižyti matuoklių struktūrinės schemas ir užrašyti R , L , C , $\tan \delta$ matavimo ribas ir paklaidas.

3. Išmatuoti dėstytojo nurodytų elektronikos grandinių elementų parametrus įvairiomis dėstytojo nurodytomis matavimo priemonėmis. Rezultatus užrašyti, nurodant ir matavimo paklaidas. Palyginti rezultatus ir paklaidas.

Ataskaitos turinys

1. Darbo tikslas.
2. Matuoklių struktūrinės schemas ir jų metrologinių savybių aprašymai.
3. Matavimų rezultatai, jų aptarimas ir išvados.

Kontroliniai klausimai ir užduotys

1. Kaip atrodo bendriausia simetrinio keturių pečių tiltelio schema ir jo pusiausvyros sąlyga?

2. Kodėl tiltelyje stengiamasi turėti kuo mažiau reaktyvinių varžų?

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

4. Kokie matavimo prietaisai naudojami tiltelių pusiausvyrai stebėti?

Praktiniai darbai

5. Nubraižykite tiltelio schemą talpos matavimui ir užrašykite matavimo lygtį.

6. Rezonansiniai R , L , C matavimo metodai ir jų panaudojimo sritys.

7. Generatoriniai L ir C matavimo būdai.

8. Atlikite 5 užduotį induktyvumo matavimui.

9. Kaip galima išmatuoti dviejų ričių tarpusavio induktyvumą?

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

11. Nuo kuo priklauso tiltelių matavimo paklaidos?

12. Kokias žinote tiltelių rūšis?

13. Koks tiltelio varžos R_1 dydis, jeigu likusių pečių varžos tokios: $R_2=100\ \Omega$, $R_3=2000\ \Omega$, $R_4=524\ \Omega$?

14. Koks ritės induktyvumas, nuostolių varža ir kokybė (nuosekli atstojamoji nuostolių schema), jei subalansuoto tiltelio su lygiagrečiai sujungtais R_3C_3 pavyzdiniais elementais parametrai tokie: $R_2=100\ \Omega$, $R_3=1000\ \Omega$, $C_3=1\ \mu\text{F}$, $R_4=100\ \Omega$, $f=1000\ \text{Hz}$?

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

16. Kokie skaitmeninių R , L , C , matuoklių sudarymo principai?

Literatūra

1. SEILIUS A. *Elektroninių matavimų metrologijos pagrindai*. Mokomoji knyga, Pirmasis leidimas 2001, Antrasis leidimas 2003. Vilnius: Technika, 272 p. ISBN 9986-05-434-6
2. SEILIUS A. *Introduction to electrical and electronic measurements*. Educational book, V.: Technika, 2007. 224 p. ISBN 978-9955-28-218-1
3. TALISKAUSKAS R. J. *Elektriniai matavimai ir prietaisai*, Mokomoji knyga, Kaunas, Technologija, 2002, 244 p. ISBN 9955-09-283-1
4. *Tarptautinis pagrindinių ir bendrųjų metrologijos terminų žodynas*. Parengė V. Valiukėnas ir P. J. Žilinskas. Vilnius. 1996. - 107 p.
5. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, first edition, 1993, corrected and reprinted 1995. International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland), ISBN 92-67-10188-9.
6. BELL D. *Electronic Instrumentation and Measurements*, 2/e. Prentice Hall, 1997. p. 452. ISBN 0-13-249954-1
7. WITTE R. A. *Electronic test Instruments: Analog and digital Measurements*, 2/e, Prentice Hall, 2002, 388 p. ISBN 0-13-066830-3
8. МИРСКИЙ Г. Я. *Электронные измерения*, М.: Радио и связь, 1986, 440 с.
9. ДВОРЯШИН Б.В. *Основы метрологии и радиоизмерения*, М.: Радио и связь, 1993, 320 с. ISBN 5-256-01020-4
10. КУКУШ В.Д. *Электрорадиоизмерения*, М.: Радио и связь, 1985, 368 с. UDK 621.317.08(075.8)
11. КУЗНЕЦОВ В.А., ЯЛУНИНА Г.В. *Основы метрологии*, М.: Издательство стандартов, 1995, 280 с. ISBN 5-7050-0438-9

1 priedas
Integralinės Laplaso funkcijos

$$\Phi(y) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

reikšmės

y	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	0,0080	0,0160	0,0239	0,0319	0,0399	0,0478	0,0558	0,0638	0,0717
0,1	0797	0876	0955	1034	1113	1192	1271	1350	1428	1507
0,2	1585	1663	1741	1819	1897	1974	2051	2128	2205	2282
0,3	2358	2434	2510	2586	2661	2737	2812	2886	2961	3035
0,4	3108	3182	3255	3328	3401	3473	3545	3616	3688	3759
0,5	3829	3899	3969	4039	4108	4177	4245	4313	4381	4448
0,6	4515	4581	4647	4713	4778	4843	4907	4971	5035	5098
0,7	5161	5223	5285	5346	5407	5467	5527	5587	5646	5705
0,8	5763	5821	5878	5935	5991	6047	6102	6157	6211	6265
0,9	6319	6372	6424	6476	6528	6579	6629	6680	6729	6778
1,0	0,6827	0,6875	0,6923	0,6970	0,7017	0,7063	0,7109	0,7154	0,7199	0,7243
1,1	7287	7330	7373	7415	7457	7499	7540	7580	7620	7660
1,2	7699	7737	7775	7813	7850	7887	7923	7959	7995	8029
1,3	8064	8098	8132	8165	8198	8230	8262	8293	8324	8355
1,4	8385	8415	8444	8473	8501	8529	8557	8584	8611	8638
1,5	8664	8690	8715	8740	8764	8789	8812	8836	8859	8882
1,6	8904	8926	8948	8969	8990	9011	9031	9051	9070	9090
1,7	9109	9127	9146	9164	9181	9199	9216	9233	9249	9265
1,8	9281	9297	9312	9327	9342	9357	9371	9385	9399	9412
1,9	9426	9439	9451	9464	9476	9488	9500	9512	9523	9534
2,0	0,9545	0,9556	0,9566	0,9576	0,9586	0,9596	0,9606	0,9615	0,9625	0,9634
2,1	9643	9651	9660	9668	9676	9684	9692	9700	9707	9715
2,2	9722	9729	9736	9743	9749	9756	9762	9768	9774	9780
2,3	9786	9791	9797	9802	9807	9812	9817	9822	9827	9832

Priedai**1 priedo tęsinys**

y	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,4	9836	9840	9845	9849	9853	9857	9861	9865	9869	9872
2,5	9876	9879	9883	9886	9889	9892	9895	9898	99012	99040
2,6	99068	99095	99121	99146	99171	99195	99219	99241	99264	99285
2,7	99307	99327	99347	99367	99386	99404	99422	99439	99456	99473
2,8	99489	99505	99520	99535	99549	99563	99576	99590	99602	99615
2,9	99627	99639	99650	99661	99672	99682	99692	99702	99712	99721
3,0	99730	99739	99747	99755	99763	99771	99779	99768	99793	99800
3,1	99806	99813	99819	99825	99831	99837	99842	99848	99853	99858
3,2	99863	99867	99872	99876	99880	99885	99889	99892	99896	99900
3,3	999033	999067	999100	999132	999162	999192	999221	999248	999275	999301
3,4	999326	999350	999374	999396	999418	999439	999460	999480	999499	999517
3,5	999535	999552	999568	999584	999600	999615	999629	999643	999656	999669
3,6	999682	999694	999705	999717	999727	999738	999748	999757	999767	999776
3,7	999784	999793	999801	999809	999816	999823	999830	999837	999843	999849
3,8	999855	999861	999867	999872	999877	999882	999887	999891	999896	999900
3,9	999904									
4,0	999937									999994

2 priedas

Stjudento koeficiento t_q reikšmės, atitinkančios sąlygą:

$$q = P(|T| \leq t_q) = \frac{2 \cdot \Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi k} \cdot \Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} \cdot \int_0^{t_q} \left(1 + \frac{t^2}{k}\right)^{-\frac{k+1}{2}} dt$$

Laisvės laipsniai $k = n - 1$	tikimybė q					
	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
1	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	636,6
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,60
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,94
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,859
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,405
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,487
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,967
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,885
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,853
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,825
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,799
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,775

Laisvės laipsniai $k = n - 1$	tikimybė q					
	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,709
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,692
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,675
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
35	1,306	1,689	2,030	2,437	2,724	3,591
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
45	1,301	1,679	2,014	2,412	2,689	3,522
50	1,299	1,676	2,008	2,403	2,677	3,497
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
70	1,294	1,667	1,995	2,381	2,648	3,436
80	1,293	1,664	1,990	2,374	2,639	3,416
90	1,292	1,662	1,987	2,368	2,632	3,401
100	1,290	1,660	1,984	2,364	2,626	3,391
120	1,289	1,657	1,980	2,358	2,618	3,374
140	1,288	1,656	1,977	2,354	2,613	3,362
160	1,287	1,654	1,975	2,351	2,609	3,353
180	1,286	1,653	1,973	2,349	2,606	3,346
200	1,286	1,652	1,972	2,347	2,603	3,340
220	1,285	1,652	1,971	2,345	2,601	3,339
∞	1,28155	1,64485	1,95996	2,32634	2,57582	3,29106

Kai $k > 100$, tai Stjudento koeficientai yra gauti panaudojus tokią apytikslę formulę:

$$t_q(q, k) = t_q(q, \infty) + \frac{100}{k} [t_q(q, 100) - t_q(q, \infty)].$$

3 priedas

χ^2 (Pirsono) pasiskirstymo kritiniai taškai χ^2_q , atitinkantys sąlygą:

$$q = P\left(\chi^2 > \chi^2_q\right) = \frac{1}{2^{\frac{k}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} \cdot \int_{\chi^2_q}^{\infty} z^{\frac{k}{2}-1} \cdot e^{-\frac{z}{2}} dz$$

ir pasiskirstymo laisvės laipsnių skaičių k . Galima tiesinė interpoliacija tik pagal k . Kai $k > 30$, kritinių taškų reikšmės apskaičiuojamos pagal apytikslę formulę: $\chi^2_q \approx k \left(1 - \frac{2}{9k} + t_q \sqrt{\frac{2}{9k}}\right)^3$, kur t_q – normaliojo tikimybių skirstinio kritinis taškas, esant tai pačiai tikimybei q .

Laisvės laipsnių skaičius k	Tikimybė q												
	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,00016	0,0006	0,0039	0,016	0,064	0,148	0,455	1,074	1,642	2,71	3,84	5,41	6,64
2	0,020	0,040	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,41	3,22	4,60	5,99	7,82	9,21
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82	9,84	11,34
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,49	11,67	13,28
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07	13,39	15,09
6	0,872	1,134	1,635	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59	15,03	16,81
7	1,239	1,564	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07	16,62	18,48
8	1,646	2,03	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	18,17	20,09

Laisvės laipsnių skaičius k	Tikimybė q												
	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
9	2,09	2,53	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92	19,68	21,67
10	2,56	3,06	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	21,16	23,21
11	3,05	3,61	4,58	5,58	6,99	8,15	10,34	12,90	14,63	17,28	19,68	22,62	24,73
12	3,57	4,18	5,23	6,30	7,81	9,03	11,34	14,01	15,81	18,55	21,03	24,05	26,22
13	4,11	4,76	5,89	7,04	8,63	9,93	12,34	15,12	16,98	19,81	22,38	25,47	27,69
14	4,66	5,34	6,57	7,79	9,47	10,82	13,34	16,22	18,15	21,06	23,68	26,87	29,14
15	5,23	5,98	7,26	8,55	10,31	11,72	14,34	17,32	19,31	22,31	25,00	28,26	30,58
16	5,81	6,61	7,96	9,31	11,15	12,62	15,34	18,42	20,47	23,54	26,30	29,63	32,00
17	6,41	7,26	8,67	10,08	12,00	13,53	16,34	19,51	21,62	24,77	27,60	31,00	33,41
18	7,02	7,91	9,39	10,86	12,86	14,44	17,34	20,60	22,76	26,99	28,87	32,35	34,81
19	7,63	8,57	10,11	11,65	13,72	15,35	18,34	21,69	23,90	27,20	30,14	33,69	36,19
20	8,26	9,24	10,85	12,44	14,58	16,27	19,34	22,78	25,04	28,41	31,41	35,02	37,57
21	8,90	9,92	11,59	13,24	15,44	17,18	20,34	23,86	26,17	29,62	32,67	36,34	38,93
22	9,54	10,60	12,34	14,04	16,31	18,10	21,34	24,94	27,30	30,81	33,92	37,66	40,29
23	10,20	11,29	13,09	14,85	17,19	19,02	22,34	26,02	28,43	32,01	35,17	38,97	41,64
24	10,86	11,99	13,85	15,66	18,06	19,94	23,34	27,10	29,55	33,20	36,42	40,27	42,98
25	11,52	12,70	14,61	16,47	18,94	20,87	24,34	28,17	30,68	34,38	37,65	41,57	44,31
26	12,20	13,41	15,38	17,29	19,82	21,79	25,34	29,25	31,79	35,56	38,88	42,86	45,64
27	12,88	14,22	16,15	18,11	20,70	22,71	26,34	30,32	32,91	36,74	40,11	44,14	46,96

Priedai

3 priedo tęsinys

Laisvės laipsnių skaičius k	Tikimybė q												
	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
28	13,56	14,85	16,93	18,94	21,59	23,65	27,34	31,39	34,03	37,92	41,34	45,42	48,28
29	14,26	15,54	17,71	19,77	22,48	24,58	28,34	32,46	35,14	39,09	42,56	46,70	49,59
30	14,95	16,31	18,49	20,60	23,36	25,51	29,34	33,53	36,25	40,26	43,77	47,96	50,89
40	22,16	23,85	26,51	29,05	32,35	34,88	39,34	44,16	47,27	51,81	55,76	60,43	63,69
50	29,70	31,68	34,76	37,69	41,46	44,32	49,34	54,72	58,17	63,17	67,50	72,60	76,16
60	37,48	39,72	43,19	46,46	50,65	53,81	59,34	65,22	68,97	74,40	79,08	84,56	88,38
70	45,44	47,92	51,74	55,33	59,90	63,35	69,34	75,68	79,72	85,53	90,53	96,37	100,43
80	53,54	56,24	60,39	64,28	69,21	72,92	79,34	86,12	90,41	96,58	101,88	108,05	112,33
90	61,75	64,67	69,13	73,29	78,56	82,52	89,34	96,52	101,06	107,57	113,14	119,62	124,12
100	70,07	73,18	77,93	82,36	87,95	92,13	99,34	106,90	111,67	118,50	124,34	131,11	135,81
120	86,92	90,41	95,70	100,62	106,81	111,42	119,34	127,61	132,81	140,23	146,57	153,88	158,95
140	104,04	107,86	113,66	119,03	125,76	130,77	139,33	148,27	153,86	161,83	168,61	176,43	181,84
160	121,35	125,49	131,76	137,54	144,79	150,16	159,33	168,87	174,83	183,31	190,52	198,80	204,53
180	138,82	143,27	149,97	156,16	163,87	169,59	179,33	189,44	195,75	204,71	212,30	221,03	227,05
200	156,44	161,16	168,28	174,84	183,01	189,05	199,33	209,98	216,61	226,03	233,99	243,13	249,44
220	174,16	179,16	186,67	193,58	202,18	208,54	219,33	230,50	237,44	247,28	255,60	265,14	271,71
t_q	-2,3267	-2,0500	-1,6449	-1,2816	-0,8416	-0,5244	0,0000	0,5244	0,8416	1,2816	1,6449	2,0500	2,3267

Trečia dalis

TERMINŲ ŽODYNĖLIS

A

Absoliučioji paklaida – paklaida išreikšta matavimo vienetais.

Akreditavimas – procedūra, kuria valdžios įgaliota įstaiga oficialiai pripažįsta, kad fizinis ar juridinis asmuo kompetentingi atlikti tam tikrus darbus.

Analoginis matuoklis – matuoklis, kurio rodmuo yra tolydžioji matuojamojo dydžio funkcija.

Antrinis etalonas – etalonas, kurio vertė lyginimo būdu nustatoma iš to paties dydžio pirminio etalono.

Atsakas – tam tikros sistemos (pavyzdžiui, matavimo keitiklio) išėjimo dydis.

Atsako charakteristika – ryšys tarp poveikio ir atsako į jį, esant tam tikroms sąlygoms.

Atsitiktinė paklaida – paklaida, kuri kartojant matavimus, kinta atsitiktiniu dėsnium.

B

Bedimensinis dydis – dydis, kurio dimensijos formulėje pagrindinių dydžių dimensijų laipsnio rodikliai lygūs nuliui.

D

Dalinis matavimo vienetas – mažesnis matavimo vienetas, pagal perskaičiavimo taisykles sudarytas iš tam tikro vieneto.

Darbinis etalonas – etalonas, kuriuo etalонуojamos darbinės matavimo priemonės.

Dydžio dimensija – formulė, tam tikroje dydžių sistemoje pateikianti dydį kaip sandaugą laipsninių daugiklių, reiškiančių šios sistemos pagrindinius dydžius.

Dydžio vertė – skaitine verte ir matavimo vienetu išreikštas kiekybinis dydžio įvertis.

E

Empirinis standartinis nuokrypis – iš daugkartinių matavimų rezultatų aibės surastas rezultatų sklaidos matas, išreiškiamas 1 skyriaus (1.39) formule (žr. 38 p.).

Empirinis standartinis vidurkio nuokrypis – dydis $\sqrt{n}$ kartų mažesnis už empirinį standartinį nuokrypį, įvertinantis aritmetinio vidurkio sklaidą (žr. 41 p.).

Etalonas – matavimų priemonė, atkurianti ir išlaikanti fizikinio dydžio vertę aukščiausiu tam tikram matavimui tikslumu.

Etalonavimas – veiksmų visuma, kuri susieja matavimo priemonės teikiamas dydžių vertes su atitinkamomis etalonų teikiamomis dydžių vertėmis.

Etalonavimo liudijimas – dokumentas, kuriame užfiksuotas tam tikro etalonavimo rezultatas.

Etalonavimo seka – nepertraukiamoji palyginimų su etalonais seka.

Etalono išsaugojimas – visuma techninių ir teisinių priemonių, būtinų išlaikyti etalonų vertes norminėmis.

Etalonų rinkinys – keletas vienaarūšių etalonų, parinktų, kad sudarytų fizikinių dydžių verčių seriją.

I

Ištaisytasis rezultatas – pataisa pakoreguotas matavimo rezultatas.

Išvestinis matavimo vienetas – matavimo vienetų sistemos matavimo vienetas, išreikštas per kitus tos matavimo vienetų sistemos vienetus.

J

Jautris – matavimo priemonės atsako ir atitinkamo poveikio pokyčių santykis.

Jutiklis – pirminis matavimo keitiklis, tiesiogiai veikiamas matuojamojo dydžio.

K

Kartotinis matavimo vienetas –

Kalibravimo liudijimas – dokumentas, patvirtinantis matavimo sietį.

M

Matas – matavimo priemonė, atkurianti ir išlaikanti vieną ar kelias tam tikro fizikinio dydžio vertes žinomu tikslumu.

Matavimas – veiksmų visuma, kuriais siekiama nustatyti nežinomą fizikinio dydžio vertę (platesnę apibrėžtį žr. 1 skyriaus 4 p.).

Matavimo grandinė – matavimo keitiklių grandinė, perduodanti matavimo informaciją.

Matavimo įrenginys – vienoje vietoje esančių ir funkciškai susietų matavimo priemonių visuma, skirta vieno ar kelių fizikinių dydžių matavimui.

Matavimo keitiklis – matavimo priemonė, žinomu tikslumu keičianti fizikinį dydį kitu tos pačios rūšies, bet kito didumo arba kitos rūšies fizikiniu dydžiu.

Matavimo metodas – matavimo metu naudojamų matavimo principų ir matavimo priemonių visuma.

Matavimo neapibrėžtis – su matavimo rezultatu susijęs parametras, objektyviai charakterizuojantis matuojamąjį dydį nusakančių verčių sritį.

Matavimo paklaida – matavimo rezultato ir tikrosios matuojamojo dydžio vertės skirtumas.

Matavimo priemonė – techninė priemonė, skirta matuoti ir turinti žinomas metrologines savybes.

Matavimo priemonės kalibravimas – visuma veiksmų, kuriais nurodytomis sąlygomis nustatomas kalibruojamos matavimo priemonės ar matavimo sistemos teikiamų dydžių verčių sutapimas arba skirtumas, lyginant su etaloninės matavimo priemonės rodомomis vertėmis.

Matavimo priemonės tipas – tos pačios paskirties ir vienodos konstrukcijos matavimo priemonės, kurių veikimas pagrįstas tuo pačiu principu.

Matavimo priemonės patikra – kitokia negu matavimo priemonės tipo patvirtinimas procedūra, kuri apima tyrimą bei ženklimą ir (arba) patikros sertifikato išdavimą ir kuria

Terminų žodynėlis

konstatuojama bei patvirtinama, kad matavimo priemonė atitinka teisės aktų reikalavimus. Patikros rūšys yra šios:

atrakinė patikra – vienerūšių matavimo priemonių partijos patikra, pagrįsta tam tikro statistiškai tinkamo ir atsitiktinai iš identifikuotos partijos paimtų pavyzdžių skaičiaus tyrimo rezultatais;

neeilinė patikra – naudojamų matavimo priemonių patikra anksčiau nustatyto termino;

periodinė patikra – naudojamos matavimo priemonės patikra laikantis nustatytų terminų;

pirminė patikra – pagamintos ar sutaisytos matavimo priemonės pirmoji patikra.

Matavimo priemonės tikslumas – matavimo priemonės savybė teikti matavimo rezultatus artimus tikrajai matuojamojo dydžio vertei.

Matavimo priemonės tipo įvertinimas – sistemiškas vieno ar kelių matavimo priemonių identifikuoto tipo arba modelio pavyzdžių parametrų tyrimas ir bandymas bei lyginimas su dokumentų reikalavimais siekiant nustatyti, ar tas tipas gali būti patvirtintas.

Matavimo priemonės tipo patvirtinimas – procedūra, kurios metu valstybės įgaliota institucija nustato ir patvirtina, kad matavimo priemonės tipas atitinka nustatytus reikalavimus.

Matavimo sietis – matavimo rezultatų verčių ryšys su matavimo vieneto etalono vertėmis, nustatytas nenutrūkstamuoju lyginamuoju metodu.

Matavimo principas – visuma fizikinių reiškinių, kuriais grindžiamas matavimas.

Matavimo rezultatas – matuojamojo dydžio vertė, nustatyta matuojant.

Matavimo ribos – mažiausia ir didžiausia fizikinio dydžio vertės, atitinkančios matavimo priemonės matavimo srities ribas.

Matavimo (informacijos) signalas – signalas funkciškai susijęs su matuojamojo dydžio verte.

Matavimo sistema – kartu sujungtų matavimo priemonių ir kitokių įrenginių grupė tam tikriems matavimams atlikti.

Matavimo sieties schema – etaloninių vienetų verčių perdavimo matavimo priemonėms grandinė, kurioje nurodyta vieneto verčių perdavimo ir neapibrėžčių palyginimo seka.

Matavimo sritis – matuojamojo dydžio verčių sritis, kurios ribose matavimo priemonės paklaidos yra norminės.

Matavimo vienetas – susitarimu apibrėžtas ir priimtas fizikinis dydis (su kuriuo lyginami kiti viena rūšiai dydžiai, norint juos kiekybiškai išreikšti šio dydžio atžvilgiu).

Matavimo vieneto etalonas – matavimo priemonė, matavimo sistema ar sertifikuotoji pamatinė medžiaga, skirti matavimo vieneto vienai ar kelioms vertėms atkurti, išsaugoti ir perduoti kitiems etalonams arba matavimo priemonėms.

Matavimo vienetų sistema – matavimo vienetų visuma sudaryta tam tikru įteisintu principu.

Matavimo tikslumas – matavimo savybė teikti matavimo rezultatus artimus tikrosioms matuojamųjų dydžių vertėms.

Matuoklis – matavimo priemonė, reaguojanti į matuojamąjį dydį ir teikianti savo rodmenų įtaisė informaciją apie matuojamojo dydžio vertę.

Metrologija – matavimo mokslas. Metrologija apima visus teorinius ir praktinius matavimo aspektus, nesvarbu, kokia yra matavimų neapibrėžtis ir kurioje mokslo ar technikos srityje atliekami matavimai.

Terminų žodynėlis

Metrologinės savybės – matavimo priemonės savybės, įtakojančios matavimo rezultatą.

N

Neištaisytais rezultatas – matavimo rezultatas nesukoreguotas pataisa.

Nesisteminis matavimo vienetas – matavimo vienetas nepriklausantis tam tikrai matavimo vienetų sistemai.

Norminės matavimo sąlygos – matavimo priemonės naudojimo sąlygos, kurioms esant matavimo priemonės metrologinės savybės yra norminės.

P

Pamatinis matavimo vieneto etalonas –geriausių metrologinių savybių etalonas toje vietovėje, vietoje ar toje organizacijoje, kurioje matuojama.

Pagrindinė matavimo priemonės paklaida – norminėmis matavimo sąlygomis naudojamos matavimo priemonės paklaida.

Pagrindinis matavimo vienetas – susitarimu įteisintas sudarant vienetų sistemą matavimo vienetas, sąlygiškai nepriklausomas nuo kitų tos pačios vienetų sistemos matavimo vienetų.

Pataisa – prie neištaisytojo matavimo rezultato algebriskai pridedama fizikinio dydžio vertė, naikinanti sistemingąją paklaidą.

Patikros sertifikatas – dokumentas, patvirtinantis, kad matavimo priemonės patikros rezultatas patenkinamas.

Paveikusias dydis –nematuojamas, tačiau matavimo atlikimo metu turintis įtakos matavimo rezultatui fizikinis dydis.

Pirminis etalonas – geriausių metrologinių savybių etalonas, kurio vertė nustatyta nesiremiant kitais to paties fizikinio dydžio etalonais.

Poveikis – tam tikros sistemos (pavyzdžiui, matavimo keitiklio) įėjimo dydis.

R

Rodmenų įtaisas – matavimo priemonės dalis teikianti matavimo rezultatą.

S

Santykinė paklaida – absoliučiosios matavimo paklaidos ir tikrosios matuojamo dydžio vertės santykis.

Pastaba: kadangi tikroji matuojamo dydžio vertė išlieka nežinoma, tai vietoje jos naudojama sutartinė tikroji matuojamo dydžio vertė arba matavimo rezultatas.

Sertifikuotoji pamatinė medžiaga – turinti sertifikatą pamatinė medžiaga, kurios vienos ar daugiau savybių vertės yra patvirtintos naudojant etalonavimo procedūrą.

Sietis – matavimo rezultato arba matavimo priemonės savybė, siejanti juos su etalonų vertėmis, taikant pasirinktos neapibrėžties etalonavimo būdą imtinai nuo pamatinių iki valstybinių ir tarptautinių etalonų.

Sieties seka – etalonavimo seka.

Skaitmeninis matuoklis – matuoklis, teikiantis rodmenų įtaise matavimo rezultatą skaitmenų pavidalu.

Terminų žodynėlis

Sistemoji paklaida – tomis pačiomis sąlygomis atliktų begalės kartojamų matavimų rezultatų vidurkio ir tikrosios matuojamojo dydžio vertės skirtumas.

Sutartinė tikroji dydžio vertė – vertė, pakankamai artima tikrajai, kurią konkrečiam matavimui galima naudoti vietoje tikrosios.

T

Tarptautinė vienetų sistema – SI – matavimo vienetų sistema, kurią patvirtino 1960 m. XI Generalinė matų ir svorsčių konferencija.

Tarptautinis etalonas – tarptautine sutartimi pripažintas pirminis etalonas.

Tikslumo klasė – apibendrinta matavimo priemonės tikslumo kiekybinė charakteristika, teikianti informaciją apie tos matavimo priemonės pagrindinės paklaidos ribines vertes.

Teisinė metrologija – su matavimais susijusi metrologijos sritis, kurios veiklą reglamentuoja įstatymų ir kitų teisės aktų nustatyti reikalavimai ir vykdo kompetentingos tarptautinės ir valstybinės institucijos.

V

Valstybinis matavimo vieneto etalonas – valstybės sprendimu pripažintas etalonas, kuris naudojamas valstybėje kaip pagrindinis, priskiriant tam tikro dydžio vertes kitiems etalonams.