



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: XXXXXXX, 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 infradžemųjų 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
Įvadas	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 ryšiu 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. aprobavo 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. System 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 $1\,\text{m}$ 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 ($^{\circ}\text{C}$):

$\vartheta = \Theta - 273,16$, kur ϑ – temperatūra $^{\circ}\text{C}$, 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 $0,012\,\text{kg}$ 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 – **voltai** (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), apšvietumo – **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 dinaminų matavimų, nors įtampos amplitudė arba efektinė vertė ir nekinta. Tą patį būtų galima pasakyti ir apie oscilografinius matavimus. Dinaminų matavimų atveju matavimo paklaidos gali išaugti dėl nepakankamų matavimo priemonių dinaminų 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:

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

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 **pataisas**, 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 tikslas jos skaitines charakteristikas. Dažniausiai nežinomos ne tik skaitinės charakteristikos, bet ir dėsnių 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.

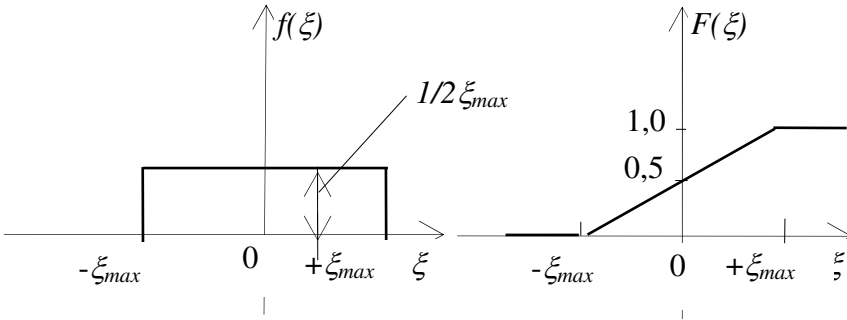
1.1.6. Paklaidų tolygusis tikimybių skirstinys

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 .

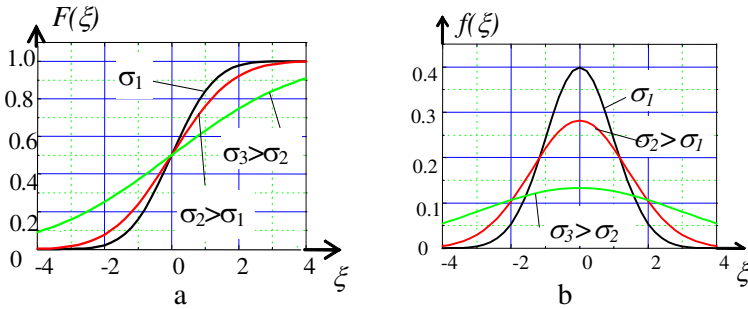
Šias savybes aptiko vokiečių matematikas, astronomas, geodezininkas ir fizikas Gausas (K.F. Gauss 1777–1855). Paklaidos, turinčios tokias savybes, dažniausiai priklauso **normaliajam** arba **Laplaso–Gauso** tikimybių skirstiniui.

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:

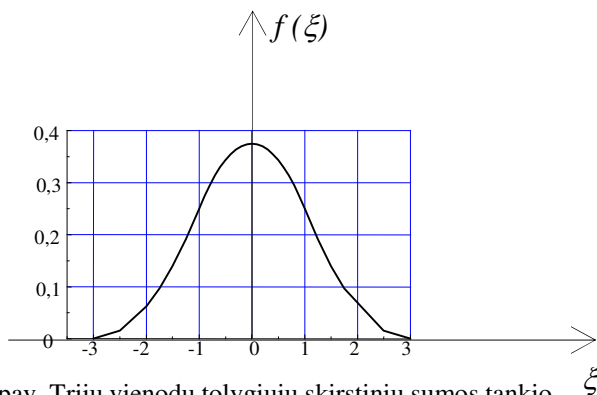
$$\sigma = \sqrt{\frac{\xi_{1\max}^2}{3} + \frac{\xi_{1\max}^2}{3} + \frac{\xi_{1\max}^2}{3}} = \xi_{1\max}.$$

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.



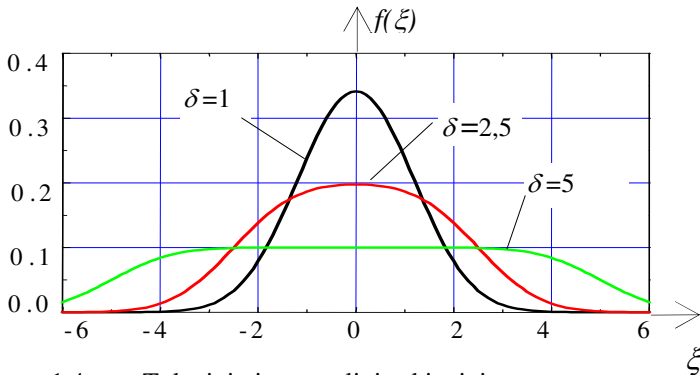
1.3 pav. Trijų vienodų tolygiųjų skirstinių sumos tankio funkcijos grafikas

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:

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

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:

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

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**:

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

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

$$g_J = \frac{\partial f}{\partial J} \bigg|_{J=A_j}, \quad \text{gauname}$$

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

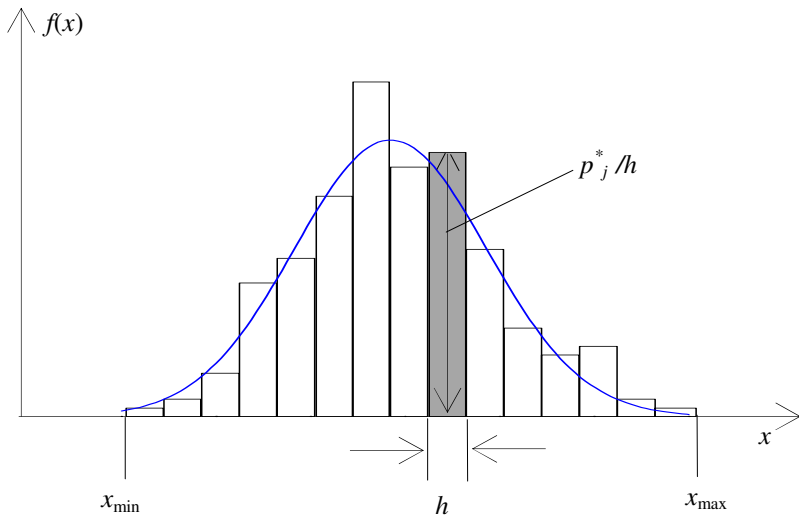
Klasės numeris j	1	2	3	j	L
Klasės ribos	$x_{\min};$ $x_{\min} + h$	$x_{\min} + h;$ $x_{\min} + 2h$	$x_{\min} + 2h;$ $x_{\min} + 3h$	$x_{\min} +$ $(j-1)h;$ $x_{\min} + jh$	$x_{\min} +$ $(L-1)h;$ $x_{\max}$
Klasės vidurkis	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$\bar{x}_3$	$\bar{x}_j$	$\bar{x}_L$
Pataikymų skaičius	m_1	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) įverčio 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 jauta 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 jauta. 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 daugartiniai 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 daugartinių 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 $X, Z, T, \dots, J$ 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-Satterhwaite 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 pasiskliovimo 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 pasiskliovimo 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 žinybų. 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**.

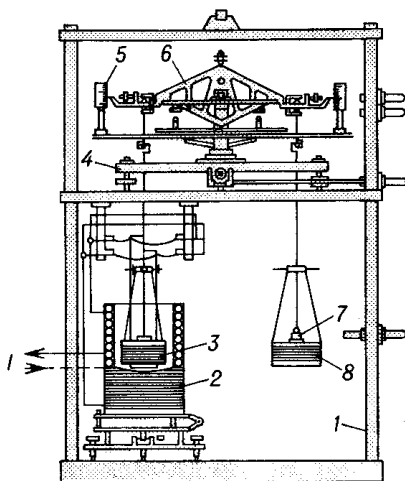
Srovės stiprio – ampero etalonas

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

1. Metrologijos pagrindai

perėjusio laidininko skerspjūviu 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 laikas 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 vienetai – amperui atkurti ilgą laiką yra naudojamas įrenginys, vadinamas **srovės** (ampero) **svarstyklėmis**.

Šių svarstyklių konstrukcija yra panaši į tikslių 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 atsveriamą svorsčio sunkio jėga F_g :

$$F_g = mg;$$

čia m – svorsčio 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.

Svorsčio (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 sukuriamu nuolatinė arba aukštojo dažnio įtampa.

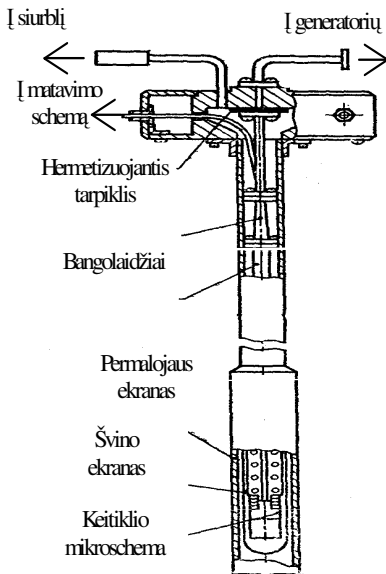
Elektromagnetinio spinduliavimo priežastis yra poromis sujungtų superlaidžios srovės elektronų – Kūperio porų tuneliavimas per dielektriką. Dielektriko elektriniame lauke Kūperio pora įgyja perteklinę energiją $2eU$ (čia e – elektrono krūvis), kurią, grįždama į pagrindinę būseną, išspinduliuoja elektromagnetinės 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 įtampos 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:

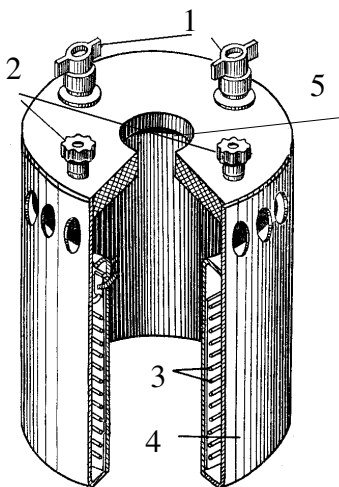
$R = 10^{\pm n}\, \Omega$, kur n – sveikasis skaičius ($-5 \leq n \leq 10$). Jų tikslumo klasės yra: 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1 ir 0,2. Varžos ričių tikslumo klasė rodo, kiek procentų jos tikroji varža gali skirtis nuo vardinės.

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 tikslų 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:

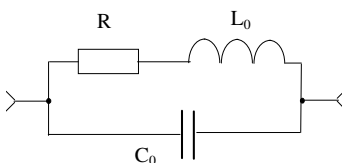
$$\dot{Z} = \frac{R + j\omega[L_0(1 - \omega^2 L_0 C_0) - R^2 C_0]}{(1 - \omega^2 L_0 C_0)^2 + \omega^2 R^2 C_0^2}.$$



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:

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

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;
- **agregatinę 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 vienarūšis 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 patogiausią 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 dėsniu 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 **jautrio** (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.

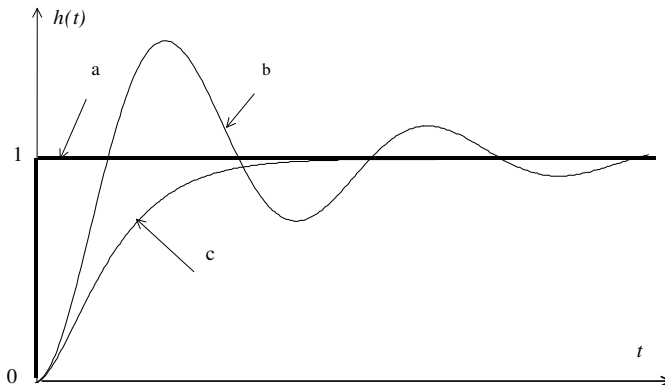
Kai matavimo keitiklio įėjimo dydis $x(t)$ staiga pasikeičia nuo 0 iki tam tikros pastoviosios vertės, kuri sąlyginai gali būti laikoma vienetine, tai keitiklio dinaminės savybės tokio pobūdžio poveikiui galima nusakyti pagal jo **reakciją į vienetinę funkciją** $x_1(t) = 1(t)$.

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**:

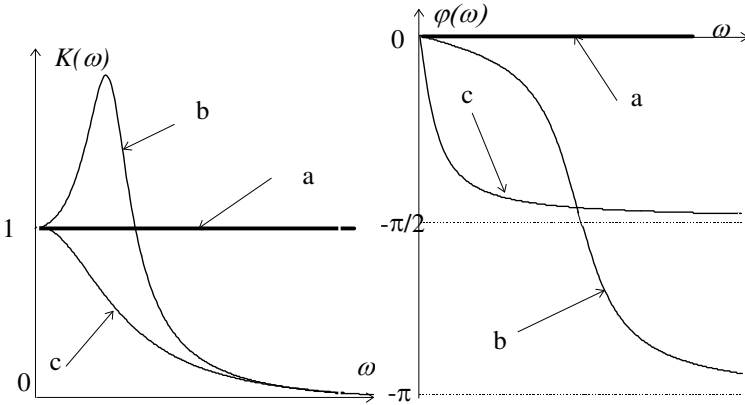
$$\begin{aligned} K(j\omega) &= A(\omega) + jB(\omega) = \\ &= \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)} e^{j \arctan \frac{B(\omega)}{A(\omega)}} = \\ &= K(\omega) e^{j\varphi(\omega)} = K(\omega) \cos \varphi(\omega) + j K(\omega) \sin \varphi(\omega). \end{aligned}$$

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.

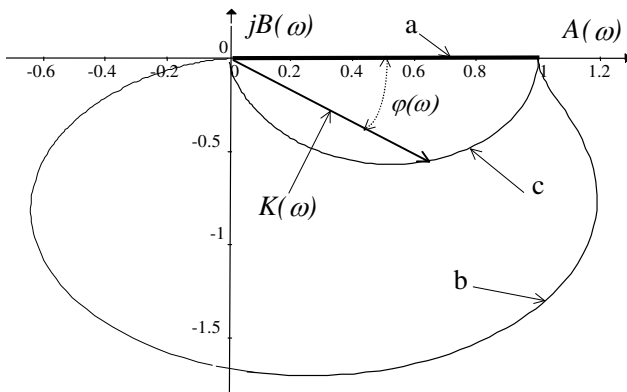
Egzistuoja žinomas ryšys tarp kompleksinės dažinės perdavimo charakteristikos ir impulsinės bei pereinamosios charakteristikų. Jos susietos žinomomis Furjė transformacijomis:

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

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

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 patogiau 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.

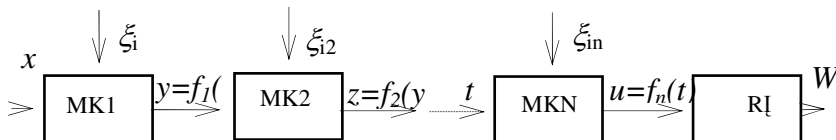
Nepriklausomai nuo rodmenų įtaiso rūšies, prietaiso matavimo grandinės matavimo keitikliai gali būti įvairūs: analoginiai ir diskretiniai.

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.

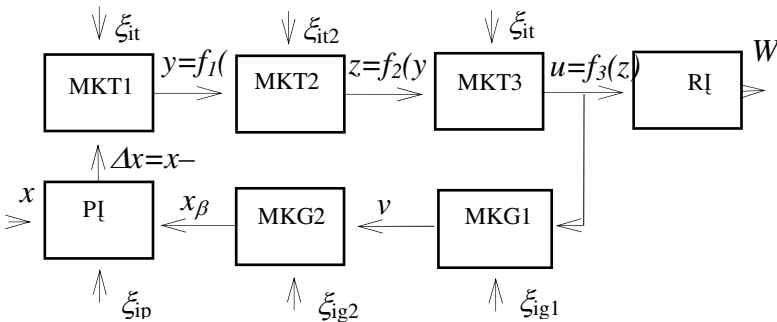
Dauguma matavimo prietaisų yra tiesioginio veikimo (voltmetrai, ampermetrai, vatmetrai, tachometrai, manometrai ir kt.) Tai ypač svarbu tais atvejais, kai sunku ar net neįmanoma realizuoti matuojamajam dydžiui vienerūšį matą.

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 santykinine 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 sieti 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 etalonuojama masė, kaip komparatorius naudojamos svirtinės svarstyklės. Etalonuojant 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 išsigijimo, 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 sutalpimo 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?