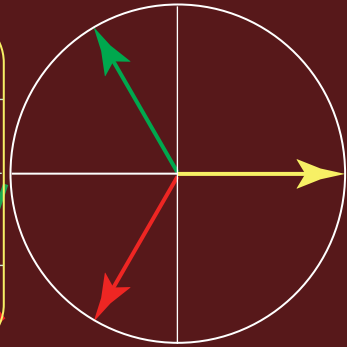
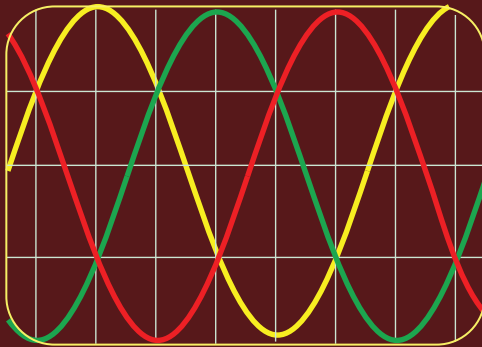
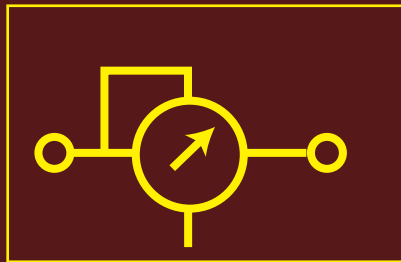


S.Masiokas

Elektro technika



8



Elektriniai
matavimai

VADOVĖLIS
AUKŠTOSIOMS
MOKYKLOMS

8.1. Svarbiausios elektrinių matavimų sąvokos, metodai ir priemonės 216

- 8.1.1. Ypatumai ir metodai / 216
 - 8.1.2. Matavimo priemonės / 217
-

8.2. Matavimo paklaidos ir prietaisų charakteristikos 218

- 8.2.1. Matavimo paklaidos / 218
 - 8.2.2. Paklaidų įvertinimas statistiniais metodais / 220
 - 8.2.3. Prietaiso tikslumo klasė / 221
 - 8.2.4. Prietaisų charakteristikos ir ženklai skalėse / 223
-

8.3. Tiesioginės atskaitos prietaisų momentai ir bendrieji mazgai 224

- 8.3.1. Mechaniniai momentai; skalės lygtis / 224
 - 8.3.2. Bendrieji mazgai ir elementai / 225
-

8.4. Tiesioginės atskaitos prietaisų matuokliai 226

- 8.4.1. Magnetoelektrinis matuoklis / 226
 - 8.4.2. Elektromagnetinis matuoklis / 227
 - 8.4.3. Elektrodinaminis ir ferodinaminis matuoklis / 228
 - 8.4.4. Elektrostatinis matuoklis / 230
 - 8.4.5. Indukcinis matuoklis / 231
 - 8.4.6. Logometras / 232
-

8.5. Elektroniniai matavimo prietaisai 233

- 8.5.1. Lygintuviniai prietaisai / 233
 - 8.5.2. Elektroninis voltmetras / 233
 - 8.5.3. Elektroninis oscilografas / 234
 - 8.5.4. Skaitmeninis voltmetras / 236
-

8.6. Registruojantieji prietaisai 237

- 8.6.1. Savirašiai prietaisai / 237
 - 8.6.2. Optinis oscilografas / 238
-

8.7. Srovės ir įtampos matavimas 239

- 8.7.1. Srovės matavimas / 239
 - 8.7.2. Įtampos matavimas / 240
 - 8.7.3. EVJ matavimas; kompensatorius / 241
-

8.8. Galios ir energijos matavimas 243

- 8.8.1. Vatmetras; vienfazės grandinės galios matavimas / 243
 - 8.8.2. Trifazės grandinės aktyviosios galios matavimas / 244
 - 8.8.3. Reaktyviosios galios matavimas / 245
 - 8.8.4. Energijos matavimas / 246
-

8.9. Elektrinių parametrų matavimas 247

- 8.9.1. Varžos matavimas ommetru / 247
 - 8.9.2. Varžos matavimas megometru / 248
 - 8.9.3. Varžos matavimas ampermetru ir voltmetru / 248
 - 8.9.4. Varžos matavimas tilteliu / 249
 - 8.9.5. Induktyvumo ir talpos matavimas / 250
-

8.10. Neelektrinių dydžių elektriniai matavimai 251

- 8.10.1. Matavimo principai; keitikliai / 252
 - 8.10.2. Matuokliai su generatoriniais keitikliais / 253
 - 8.10.3. Matuokliai su parametriniais keitikliais / 254
-

Matavimas yra eksperimentinis fizikinių dydžių vertės nustatymas specialiomis techninėmis priemonėmis.

Įvairių fizikinių dydžių matavimai yra svarbiausias gamtos reiškinių ir jos dėsnių pažinimo būdas. Matavimai atliekami moksliskai tiriant reiškinius, be matavimų neapsieinama ir gamyboje. Nuo atliktų matavimų tikslumo priklauso mokslo ir technikos pažanga bei tobulėjimo sparta. Atliekant elektrinius matavimus, kontroliuojami ir automatizuojami technologiniai procesai, įvertinama gamybos kultūra ir jos efektyvumas.

8.1

Svarbiausios elektrinių matavimų sąvokos, metodai ir priemonės

8.1.1. Ypatumai ir metodai. Elektriniais matavimais nustatomos įvairių elektrinių dydžių (pavyzdžiui, srovės, įtampos, galios) **bei parametrų** (pavyzdžiui, varžos, induktyvumo, talpos) **vertės.** Elektrinių matavimų metodai bei prietaisai taikomi ir įvairiems neelektriniams dydžiams (temperatūrai, slėgiui, šviesos srautui ir daugeliui kitų) matuoti. Tai galima paaiškinti tam tikrais **elektrinių matavimų privalumais**: 1) dideliu tikslumu; 2) matavimo prietaisų jautrumu; 3) matavimą galima atlikti ir jo rezultata perduoti tolimu atstumu; 4) galima matuoti ir registruoti sparčiai vykstančius procesus; 5) matavimo rezultata patogiu panaudoti automatizuotam gamybos proceso valdymui.

Elektrinių matavimų galimybes dar labiau praplečia elektronikos naujovės: modernūs oscilografai, elektroniniai rodykliniai ir skaitmeniniai prietaisai. Mikroprocesoriai įgalina iš karto apdoroti matavimo rezultatus, pavyzdžiui, kontroliuoti matuojamojo dydžio kitimo ribas, apskaičiuoti kontroliuojamo proceso statistines charakteristikas ir panašiai.

Priklausomai nuo to, koku būdu gaunamas matavimo rezultatas, matavimas gali būti tiesioginis, netiesioginis, kompleksinis ir jungtinis.

Tiesioginis matavimas yra toks, kai matuojamojo dydžio vertė nustatoma tiesiogiai iš eksperimento duomenų.

Netiesioginis matavimas yra toks, kai ieškomas dydis apskaičiuojamas pagal žinomą ryšį tarp jo ir išmatuoto dydžio (pavyzdžiui, varža apskaičiuojama išmatavus įtampą ir srovę).

Kompleksinis matavimas – kai išmatuojami keli dy-

džiai, o ieškomojo dydžio vertė apskaičiuojama sprendžiant lygčių sistemą.

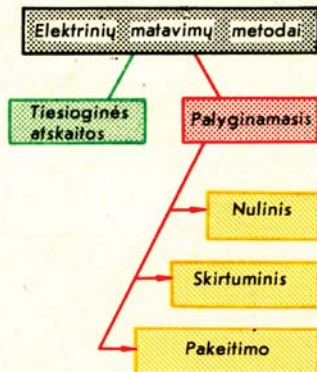
Jungtinis matavimas – kai matuojama vienu metu du ar daugiau įvairiarūšių dydžių, norint sužinoti jų tarpusavio priklausomybę (pavyzdžiui, šaltinio įtampos priklausomybę nuo jo apkrovos srovės).

Matavimo metodai yra du (8.1 pav.): tiesioginės atskaitos ir palyginamasis.

Tiesioginės atskaitos metodas yra toks, kai matuojamasis dydis sužinomas, tiesiogiai atskaitant matavimo prietaiso rodmenį (pavyzdžiui, ampermetru matuojama srovė).

Palyginamasis metodas – toks, kai matuojamasis dydis yra palyginamas su dydžiu, kurį atkuria to fizikinio dydžio matas.

Plačiausiai naudojami šie palyginamieji elektrinių matavimų metodai: a) **nulinis**, kai dėl matuojamojo ir žinomo dydžio poveikio matavimo prietaisas rodo nulį (pavyzdžiui, elektrinė varža matuojama pusiausviro tilteliu); b) **skirtuminis**, kai matuojamas skirtumas tarp matuojamojo ir žinomo dydžio; c) **pakeitimo**, kai matuojamasis dydis pakeičiamas tokio žinomu, kad nepakistų matavimo prietaiso rodmuo.



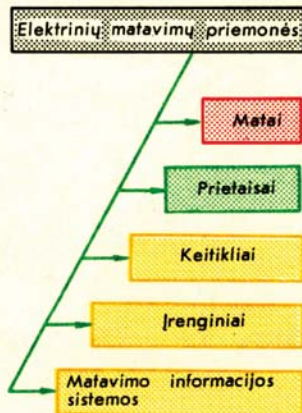
8.1 pav.

8.1.2. Matavimo priemonės. Tai techninės priemonės, kurios naudojamos elektriniams matavimams ir kurių paklaidos yra normuojamos. Prie jų priskiriama (8.2 pav.): 1) matai; 2) elektriniai matavimo prietaisai; 3) matavimo keitikliai; 4) matavimo įrenginiai; 5) matavimo informacijos sistemos.

Elektrinių dydžių matai – tai kūnai ar įtaisai, kuriais atkuriamos tam tikros elektrinių dydžių vertės. Tiesiogiai gali būti atkurta elektrinė varža (nuo 10^{-5} iki $10^9 \Omega$), induktyvumas (nuo 10^{-8} iki 10 H), talpa (nuo 10^{-3} iki 10^8 pF). EVJ matas yra specialus normalinis elementas, kurio EVJ yra 1,0186–1,094 V. Matų etalonai saugomi specialiuose metrologijos instituteuose ar laboratorijose. Pagal juos gaminami pavyzdiniai matai, su kuriais sulyginami ir patikrinami darbiniai matai. Pastarieji yra naudojami praktikoje.

Gali būti naudojami elektrinių matų rinkiniai, kurių atkuriamo dydžio vertė keičiama šuoliais (rezistorių, induktyvumo ričių, kondensatorių rinkiniai) arba tolygiai (reostatai, induktyvumo variometrai, keičiamos talpos kondensatoriai).

Elektriniai matavimo prietaisai matuojamojo elektrinio dydžio signalą paverčia informacija, kurią gali suvokti stebėtojas. Pagal įvairius požymius elektrinius matavi-



8.2 pav.

mo prietaisus galima suskirstyti į kelias grupes (8.3 pav.). Pagal matavimo metodą jie yra šitokie: 1) **tiesioginės atskaitos**, kurie rodo matuojamojo dydžio skaitinę vertę (pvz., rodykliniai, skaitmeniniai prietaisai); 2) **palyginamieji**, kuriuos matuojamasis dydis yra palyginamas su to dydžio matu (pvz., tilteliai, kompensatoriai).

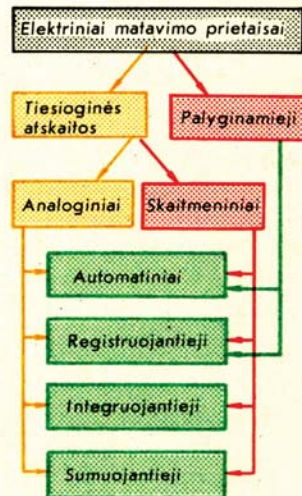
Pagal tai, kaip prietaisai parodo matuojamąjį dydį, jie gali būti: 1) **analoginiai**, kurių rodmuo tolydžiai seka matuojamojo dydžio kitimą (pvz., matuojamasis dydis tolydžiai rodomas skalėje); 2) **skaitmeniniai** (matuojamasis dydis rodomas skaitmenimis).

Be to, elektriniai matavimo prietaisai dar gali būti: 1) **automatiniai**, kai matavimai automatizuoti; 2) **registruojantieji**, kurie užrašo diagramos forma (savirašiai) ar atspausdina skaitmenimis (spausdinantieji) matuojamąjį dydį kaip laiko funkciją; 3) **integruojantieji**, kurie integruoja matuojamąjį dydį pagal laiką (pvz., elektros energijos skaitiklis) ar kitą nepriklausomą kintamąjį; 4) **sumuojantieji**, kurie susumuoja kelis matuojamuosius dydžius (pvz., trifazis vatmetras).

Elektriniais matavimo keitikliais laikomos priemonės, kurios pateikia informaciją apie matuojamąjį dydį tokia forma, kuri patogi perduoti, saugoti ar apdoroti informaciją, bet yra nesuvokiama stebėtojų. Gali būti keitikliai, elektriniu signalu pakeičiantys elektrinį dydį (pvz., įtampos dalytuvas, transformatorius) arba neelektrinį dydį (pvz., termopora, termorezistorius, fotoelementas).

Elektrinių matavimų įrenginį sudaro matavimo priemonių komplektas (matai, matavimo priemonės, keitikliai) ir pagalbinės priemonės. Juo matavimai atliekami tiksliau nei pavieniais prietaisais, ir jis dažniausiai naudojamas matavimo prietaisų patikrai.

Matavimo informacijos sistema sudaro matavimo ir pagalbinių priemonių visumą, susieta informaciniais kanalais. Ji surenka matavimo informaciją iš daugelio sudėtingų objektų ir ją apdoroja.



8.3 pav.

8.2

Matavimo paklaidos ir prietaisų charakteristikos

8.2.1. Matavimo paklaidos. Matuojant fizikinį dydį, gaunamas netikslus rezultatas, t. y. susidaro nuokrypis nuo jo tikrosios vertės.

Absoliutinė paklaida vadinamas nuokrypio absoliutinis didumas:

$$\Delta = X_n - X; \quad (8.1)$$

čia X_n ir X – matavimo rezultatas ir tikroji matuojamojo dydžio vertė.

Santykinė paklaida yra absoliutinės paklaidos santykis su tikrąja matuojamojo dydžio verte. Ji gali būti išreikšta santykiniais dydžiais arba procentais:

$$\delta = \Delta/X \text{ arba } \delta = (\Delta/X) \cdot 100. \quad (8.2)$$

Tikroji matuojamojo dydžio vertė nežinoma; ją galima išreikšti iš (8.1): $X = X_n - \Delta$. Kadangi $|\Delta| \ll |X_n|$, tai jos galima nepaisyti ir į (8.2) lygybę įrašyti išmatuotą vertę X_n , t. y. **skaičiuoti santykinę paklaidą išmatuotos vertės atžvilgiu.**

Paklaidos laikomos teigiamomis, kai matavimo rezultatas yra didesnis už tikrąją matuojamojo dydžio vertę. Kai matavimo paklaidos yra žinomos, tiksliai matuojamojo dydžio vertė gaunama pridėjus prie matavimo rezultato pataisą. **Pataisa yra absoliutinė paklaida, paimta su priešingu ženklu:**

$$\beta = X - X_n = -\Delta. \quad (8.3)$$

8.1 pavyzdys. Ampermetras rodo 10 A srovę. Žinome, kad jo absoliutinė paklaida yra +0,05 A. Apskaičiuokime santykinę matavimo paklaidą ir tikrąją matuojamosios srovės vertę.

Sprendimas. Santykinė paklaida: $\delta = (\Delta/I_n) \cdot 100 = (0,05/10) \times 100 = 0,5\%$. Pataisa $\beta = -0,05$ A, matuojamoji srovė $I = I_n + \beta = 10 - 0,05 = 9,95$ A.

Matavimo paklaidą sudaro dvi svarbiausios dedamosios: sisteminė ir atsitiktinė paklaida.

Sisteminės paklaidos dažniausiai gaunamos dėl metodo ar priemonių netobulumo. Jos yra pastovaus didumo ir ženklo arba dėsningai priklauso nuo matavimo sąlygų. Jas galima panaikinti, įvedant pataisas arba šalinant jų atsiradimo priežastis. Pavyzdžiui, sisteminės paklaidos susidaro, kai prietaiso skalės padalos sužymėtos nepakankamai tiksliai, tikroji matavimo vertė skiriasi nuo vardinės ir panašiai.

Prie sisteminių paklaidų priskiriamos ir **metodinės paklaidos**, gaunamos **dėl paties matavimo metodo netobulumo.** Pavyzdžiui, matuojant įtampą voltmetru, kurio varža nėra be galo didelė, juo teka srovė. Dėl pakinta srovė matuojamojoje grandinėje dalyje. Metodines paklaidas galima apskaičiuoti ir įvertinti arba galima jų nepaisyti, jei jos pakankamai mažos.

Atsitiktinių paklaidų didumas ir ženklas yra atsitiktiniai, kinta dėsningai, matuojant daug kartų tą patį dydį. Jos atsiranda dėl matavimo prietaiso rodmenų kitimo (pavyzdžiui, dėl trinties, oro pasipriešinimo, rodyklės masės), išorinių sąlygų (temperatūros, vibracijos), subjektyvių priežasčių (atskaitos paklaidos). Atsitiktinės paklaidos **įvertinamos matematinės statistikos metodais.**

8.2.2. Paklaidų įvertinimas statistiniais metodais. Tarkime, kad daug kartų išmatavus gautas aritmetinis matuojamojo dydžio vidurkis $\bar{X} = (X_1 + X_2 + \dots + X_n)/n$; čia X_1, X_2, \dots, X_n – atskirų matavimų rezultatai, n – matavimų skaičius. Dažniausiai laikoma, kad atsitiktinių paklaidų tikimybinis pasiskirstymas yra normalusis (Gauso) (8.4 pav.). (Kai matavimo paklaidas reikia įvertinti labai tiksliai, tenka eksperimentiškai nustatyti atsitiktinių paklaidų pasiskirstymą ir tik po to jų tyrimui taikyti matematinės statistikos metodus.)

Atsitiktinių paklaidų vidutinis kvadratinis nuokrypis įvertinamas šitokių parametru:

$$s_{\Delta} = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (8.4)$$

Kai skirtumas tarp aritmetinio matuojamojo dydžio vidurkio ir matavimo rezultato yra didesnis negu $\pm 3s_{\Delta}$, tą matavimo rezultatą galime atmesti. Tokių nuokrypių neįmanoma paaiškinti atsitiktinėmis paklaidomis. Tai jau stambios paklaidos – klaidos.

Laikant, kad aritmetinių vidurkių \bar{X} tikimybės pasiskirstymas taip pat normalusis, galima apskaičiuoti jų vidutinį kvadratinį nuokrypį:

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n(n-1)}} = \frac{s_{\Delta}}{\sqrt{n}}$$

Tikimybinių aritmetinių vidurkių galime apskaičiuoti šitaip:

$$\bar{X}_0 = \bar{X} \pm t s_{\bar{x}}; \quad (8.6)$$

čia t – parametras, kurio vertė priklauso nuo pasirinktos tikimybės.

Išskyrus ypatingus atvejus, standartas rekomenduoja pasirinkti tikimybę 0,95. Iš 8.1 lentelės randame $t=1,96$ ir apskaičiuojame: $\bar{X}_0 = \bar{X} \pm 1,96s_{\bar{x}}$. Tai reiškia, kad 95 atvejais iš šimto vidutinė vertė bus intervale nuo $\bar{X} - 1,96s_{\bar{x}}$ iki $\bar{X} + 1,96s_{\bar{x}}$. Formulę (8.6) rekomenduojama taikyti, kai bandymų skaičius yra didesnis kaip 30.

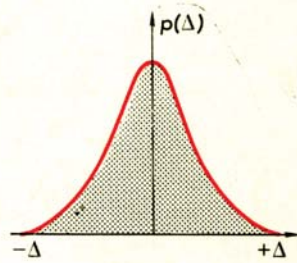
Kai bandymų skaičius ne didesnis kaip 30, tikimybinių matuojamojo dydžio vidurkių galime apskaičiuoti šitaip:

$$\bar{X}_0 = \bar{X} \pm t_n s_{\bar{x}}; \quad (8.7)$$

čia t_n – Stjudento koeficientas, kurio vertės yra surašytos 8.2 lentelėje.

8.2 pavyzdys. Tarkime, kad išmatavus imtuvo įtampą buvo gautas tokios jos vertės: $U_1=117$ V; $U_2=122$ V; $U_3=121$ V; $U_4=118$ V; $U_5=120$ V; $U_6=116$ V; $U_7=118$ V; $U_8=119$ V; $U_9=120$ V; $U_{10}=121$ V. Apskaičiuokime vidutinės vertės vidutinį kvadratinį nuokrypį ir kitimo ribas, esant tikimybei 0,95, laikydami, kad sisteminių paklaidų nėra.

Sprendimas. Vidutinė matuojamojo dydžio vertė: $\bar{U} = (117 + 122 + 121 + 118 + 120 + 116 + 118 + 119 + 120 + 121)/10 = 119,2$ V. Apskaičiuosime $s_{\Delta} = \sqrt{\frac{(117-119,2)^2 + (122-119,2)^2 + (121-119,2)^2 + (118-119,2)^2 + (120-119,2)^2 + (116-119,2)^2 + (118-119,2)^2 + (119-119,2)^2 + (120-119,2)^2 + (121-119,2)^2}{10-1}} =$



8.4 pav. Atsitiktinių absoliutiųjų paklaidų tikimybinis normalusis pasiskirstymas

8.1 lentelė. Koeficiento t priklausomybė nuo pasirinktosios tikimybės p

p	0,950	0,980	0,990	0,999
t	1,960	2,326	2,576	3,291

8.2 lentelė. Stjudento koeficiento t_n vertės priklausomai nuo atliktų bandymų skaičiaus n ir pasirinktosios tikimybės p

n	p			
	0,950	0,980	0,990	0,999
3	3,2	4,5	5,8	12,9
4	2,8	3,7	4,6	8,6
5	2,6	3,4	4,0	6,9
6	2,4	3,1	3,7	6,0
7	2,4	3,0	3,5	5,4
8	2,3	2,9	3,4	5,0
9	2,3	2,8	3,3	4,8
10	2,2	2,8	3,2	4,6
12	2,2	2,7	3,1	4,3
15	2,1	2,6	2,9	4,1
20	2,1	2,5	2,8	3,8
25	2,1	2,5	2,8	3,7
30	2,0	2,5	2,8	3,6

$= 1,93$ V. Patikriname, ar nėra matavimo rezultato, didesnio arba mažesnio už $\bar{U} \pm 3s_{\Delta}$. Mažiausia įtampa: $\bar{U} - 3s_{\Delta} = 119,2 - 3 \cdot 1,93 = 113,4$ V. Didžiausia: $\bar{U} + 3s_{\Delta} = 119,2 + 3 \cdot 1,93 = 125,0$ V. Matome, kad visi matavimo rezultatai yra tinkami ir stambiųjų paklaidų nėra. Vidutinės įtamos vertės vidutinis kvadratinis nuokrypis: $s_{\bar{U}} = s_{\Delta} / \sqrt{n} = 1,93 / \sqrt{10} = 0,610$ V. Iš (8.7) lygybės ir 8.2 lentelės gauname, kad tikimybė lygi 0,95, jog išmatuota įtamos vidutinė vertė yra: $\bar{U}_0 = 119,2 \pm 2,2 \times 0,610$, t. y. nuo 117,9 V iki 120,5 V.

8.2.3. Prietaiso tikslumo klasė. Prietaiso tikslumas yra viena svarbiausių jo charakteristikų. **Paklaidos, kurios matuojant gaunamos dėl prietaiso elementų netobulumo, yra vadinamos prietaiso paklaidomis.**

Matavimo prietaisui galima apskaičiuoti absoliutinę ir santykinę paklaidas (žr. (8.1) ir (8.2) lygybes), taip pat redukuotąją paklaidą:

$$\gamma = (X_n - X) 100 / X_N = \Delta \cdot 100 / X_N; \quad (8.8)$$

čia X_n ir X – prietaiso rodoma ir tikroji matuojamojo dydžio vertė;

X_N – didžiausia dydžio vertė, kurią galima išmatuoti prietaisu (matavimo riba).

Matavimo prietaiso absoliutinę paklaidą galima išskaidyti į dvi dalis. Ta jos dedamoji, kuri nuo matuojamojo dydžio nepriklauso, vadinama adityviąja. Kita dalis, kuri yra tiesiog proporcinga matuojamajam dydžiui, vadinama multiplikatyviąja. Tuo būdu didžiausią absoliutinę paklaidą galima užrašyti kaip šių dedamųjų sumą:

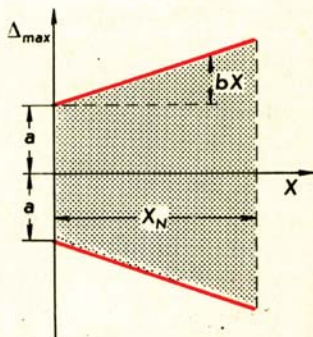
$$|\Delta_{\max}| = |a| + |bX|; \quad (8.9)$$

čia a – didžiausia adityvioji paklaida, b – pastovus koeficientas, bX – didžiausia multiplikatyvioji paklaida.

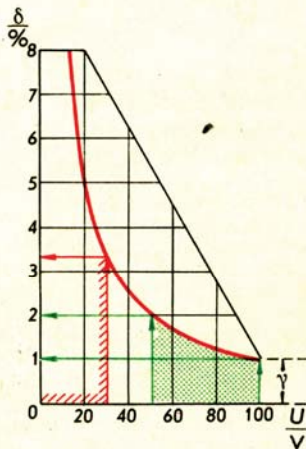
Visą atsitiktinių absoliutinių paklaidų lauką (8.5 pav.) gaubia dvi tiesės – didžiausios absoliutinės paklaidos $\pm \Delta_{\max}$ priklausomybė nuo matuojamojo dydžio X .

Prietaiso tikslumo klasė nurodo, kokios paklaidos tam prietaisui yra leistinos. Daugumos rodyklinių ir savirašių matavimo prietaisų multiplikatyviosios paklaidos yra daug mažesnės už adityviasias. Kai $bX \ll a$, multiplikatyviosios paklaidos galime nepaisyti. Tokių prietaisų $|\Delta_{\max}| = |a|$, todėl ir didžiausia absoliutinė paklaida, ir redukuotoji paklaida γ yra pastovaus didumo visoje skalėje. Šiuo atveju tikslumo klasė užrašoma vienu skaičiumi.

Rodyklinio prietaiso tikslumo klasė yra jo leistina redukuotoji paklaida, išreikšta procentais, kai prietaisas veikia normaliomis sąlygomis (jo padėtis normali, aplinkos temperatūra 20 ± 5 °C, nėra pašalinių elektrinių ir magnetinių laukų ir t.t.).



8.5 pav. Didžiausios absoliutinės paklaidos priklausomybė nuo matuojamojo dydžio vertės



8.6 pav. Voltmetro, kurio tikslumo klasė 1,0 ir matavimo riba 100 V, santykinės paklaidos priklausomybė nuo matuojamosios įtamos

Standartas numato tokias pagrindines rodyklių prietaisų tikslumo klases: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 5,0. Pavyzdžiui, 0,1 tikslumo klasės prietaiso redukuotoji paklaida yra: $\gamma \leq |\pm 0,1| \%$.

Tiksliausi prietaisai (0,05–0,2 klasė) naudojami kitiems prietaisams tikrinti ir mokslo tiriamiesiems darbams. Vidutinio tikslumo (0,5; 1,0 klasė) prietaisai skirti tiksliesiems gamybiniais matavimams, o visi mažiau tikslūs taikytini matuojamųjų dydžių pramoninei kontrolei.

Žinodami prietaiso tikslumo klasę ir matavimo ribas, galime apskaičiuoti jo didžiausią leistiną absoliutinę ir santykinę paklaidas. Svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad redukuotoji prietaiso ir santykinė matavimo paklaida yra nevienodos. Pažymėję $\Delta_{\max} = \Delta$ ir prisiminę, kad $\Delta_{\max} = \text{const}$, iš (8.1) ir (8.8) galime parašyti: $\delta = \gamma X_N / X_n$, t. y. $\delta \geq \gamma$. Tikslai tuo atveju, kai prietaiso rodyklė nukrypsta iki skalės galo $X_n = X_N$, $\delta = \gamma$ (8.6 pav.).

Norint, kad matavimo paklaida būtų mažesnė, reikia pasirinkti prietaisą taip, kad matuojant jo rodmuo būtų kuo artimesnis matavimo ribai. Praktiškai geriausia, kada rodyklė nukrypsta daugiau nei per pusę skalės.

8.3 pavyzdys. Ampermetru, kurio tikslumo klasė yra 1,0 ir matavimo riba 10 A, išmatuotos srovės yra 1 A ir 9 A. Apskaičiuokime ampermetro didžiausią absoliutinę ir santykinę paklaidas abiem atvejais.

Sprendimas. Didžiausią absoliutinę prietaiso paklaidą skaičiuojame iš (8.8) lygybės: $\Delta = \gamma I_N / 100 = 1,0 \cdot 10 / 100 = 0,1$ A. Pirmuoju atveju išmatuota srovė $I_1 = (1,0 \pm 0,1)$ A, santykinė paklaida $\delta_1 = (\Delta / I) 100 = (0,1 / 1,0) 100 = 10\%$. Antruoju atveju srovė $I_2 = (9,0 \pm 0,1)$ A, $\delta_2 = (0,1 / 9,0) 100 = 1,1\%$.

8.4 pavyzdys. Reikia išmatuoti 10 V įtampą. Turime du voltmetrus, kurių tikslumo klasės ir matavimo ribos yra tokios: 1) 0,5 ir 100 V; 2) 1,5 ir 20 V. Pasirinkime prietaisą, kuriuo matuojant gaunama mažesnė paklaida.

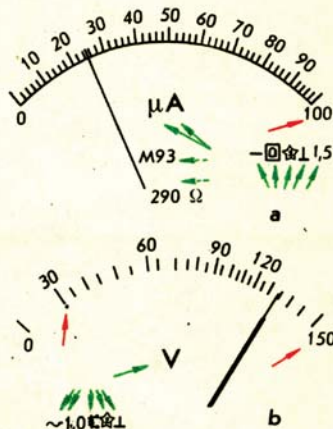
Sprendimas. Iš (8.8) lygybės apskaičiuojame didžiausią absoliutinę vieno ir kito voltmetro paklaidą: 1) $\Delta_1 = \gamma_1 U_{N1} / 100 = 0,5 \cdot 100 / 100 = 0,5$ V; 2) $\Delta_2 = \gamma_2 U_{N2} / 100 = 1,5 \cdot 20 / 100 = 0,3$ V. Matome, kad 10 V įtampą tiksliau išmatuosime antruoju voltmetru, nors jo tikslumo klasė ir mažesnė.

Kai matuojama dviem prietaisais (pvz., netiesiogiai matuojant varžą ampermetru ir voltmetru), matavimo tikslumas įvertinamas santykinę paklaidą δ_{Σ} , kurios didumas priklauso nuo abiejų prietaisų tikslumo klasių:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_U^2 + \delta_I^2} = \sqrt{(\gamma_U U_N / U_n)^2 + (\gamma_I I_N / I_n)^2}; \quad (8.10)$$

čia δ_U ir δ_I – santykinės paklaidos matuojant voltmetru ir ampermetru, γ_U ir γ_I – voltmetro ir ampermetro tikslumo klasė, U_N ir I_N – voltmetro ir ampermetro matavimo ribos, U_n ir I_n – voltmetro ir ampermetro rodmenys.

Skaitmeniniams ir palyginimo prietaisams adityviosios ir multiplikatyviosios paklaidos yra panašaus didumo. Tokių prietaisų tikslumo klasė užrašoma dviem skaičiais, pavyzdžiui, 0,1/0,05 (skaitiklis visada didesnis už vardiklį). Didžiausią tokio prietaiso santykinę paklaidą (procentais) galima apskaičiuoti šitaip:



8.7 pav. Mikroampermetro ir voltmetro skalių pavyzdžiai (žr. 8.3 ir 8.4 lenteles)

8.3 lentelė. Tiesioginės atskaitos prietaisų įvairių sistemų matuoklių ženklai

Ženklas	Matuoklis
	Magnetoelektrinis
	Magnetoelektrinis logometras
	Elektromagnetinis
	Elektrodinaminis
	Ferodinaminis
	Indukcinis
	Elektrostatinis

$$\delta = \pm [c + d (|X_N/X_n| - 1)], \quad (8.11)$$

čia c ir d – tikslumo klasės trupmenos skaitiklis ir vardiklis, X_N – matavimo riba, X_n – išmatuota dydžio vertė.

Apskaičiuavus santykinę paklaidą, pagal (8.2) ir (8.8) lygybes galima apskaičiuoti didžiausią absoliutinę bei redukuotąją paklaidas. Tarkime, kad skaitmeninis voltmetras rodo 200 V, jo matavimo riba yra 300 V, tikslumo klasė 0,1/0,05. Didžiausia santykinė paklaida $\delta = \pm [0,1 + 0,05 (300/200 - 1)] = \pm 0,125\%$. Didžiausia absoliutinė paklaida $\Delta = \pm (0,125 \cdot 200/100) = \pm 0,25$ V.

8.2.4. Prietaisų charakteristikos ir ženklai skalėse. Viena iš svarbiausių prietaiso charakteristikų yra jo **tikslumo klasė**. Kita svarbi prietaiso charakteristika yra jo **jautrumas**:

$$S = dl/dX; \quad (8.12)$$

čia l – prietaiso rodyklės poslinkis, X – matuojamasis dydis.

Kai poslinkis išreiškiamas posūkio kampu α , $S = d\alpha/dX$. Kai **jautrumas nepriklauso nuo matuojamojo dydžio**, $S = l/X$ arba $S = \alpha/X$, **prietaiso skalė yra tiesinė (tolygi)**.

Dydis, atvirkščias jautrumui, rodo, kokia matuojamojo dydžio vertė tenka vienai padalai, ir **vadinamas prietaiso padalos verte**:

$$C_P = 1/S. \quad (8.13)$$

8.5 pavyzdys. Voltmetro matavimo riba 300 V, skalėje yra $N_N = 75$ padalos, voltmetro rodyklė rodo $N = 65$ padalas. Apskaičiuokime, kiek voltų rodo voltmetras.

Sprendimas. Voltmetro vienos padalos vertė $C_P = U_N/N_N = 300/75 = 4$ V. Voltmetras rodo $U = C_P N = 4 \cdot 65 = 260$ V.

Ženklaais prietaisų skalėse nurodomos ir kitokios jų charakteristikos. Vienas svarbiausių ženklų yra raide ar žodžiu užrašomas prietaiso pavadinimas arba matuojamojo dydžio ar jo vieneto ženklas: ampermetras, voltmetras, fazometras, dažniamatis arba A, V, φ , Hz ir t. t. (8.7 pav.). Be to, pačioje skalėje arba greta gnybtų užrašoma prietaiso matavimo riba – didžiausia tuo prietaisu išmatuojamo dydžio vertė: 10 A, 1 A, 300 V ir t. t.

Prietaiso skalėje nurodoma ir jo matuoklio sistema (8.3 lentelė), nuo kurios priklauso daugelis prietaiso savybių ir matavimų galimybių.

Ant prietaiso paprastai dar užrašomi tokie ženklai: kokiai srovei matuoti skirtas prietaisas, jo tikslumo klasė, normali darbo padėtis, kokiai įtampai išbandyta prietaiso izoliacija, kokiam dažniui skirtas prietaisas, gali būti nurodyta prietaiso vidinė aktyvioji varža ir induktyvumas, prietaiso tipas, gamybos metai, gamyklinis numeris ir kiti (8.4 lentelė).

8.3 lentelės tęsinys



Magnetoelektrinis su lygintuviniu keitikliu



Magnetoelektrinis su elektroniniu keitikliu (su stiprintuvu)



Magnetoelektrinis su termoelektriniu (neizoliuotu) keitikliu

8.4 lentelė. Kai kurie prietaisų skalų sutartiniai ženklai

Ženklas	Jo reikšmė
—	Nuolatinė srovė
~	Kintamoji srovė
⎓	Nuolatinė ir kintamoji srovė
⏚	Trifazė srovė
0,5	Tikslumo klasė, pvz., 0,5
⊥	Darbo padėtis vertikali
⌋	Darbo padėtis horizontali
○	Magnetinis ekranas
☆ ₂	Izoliacija išbandyta 2 kV
⏏	Įžeminimo gnybtas
⊖	Korektorius

8.3

Tiesioginės atskaitos prietaisų momentai ir bendrieji mazgai

8.3.1. Mechaniniai momentai; skalės lygtis. Kiekvieną elektromechaninį matuoklį galima pavaizduoti struktūrine schema (8.8 pav.). Pirmoji grandis – keitiklis – pakeičia matuojamąjį dydį X_1 kitu elektriniu dydžiu X_2 , kuris priklauso nuo matuojamojo. **Matavimo mechanizmas (MM) pakeičia elektrinį dydį X_2** (dažniausiai srovę arba įtampą) **mechaniniu**. Daugumos mechanizmų judamoji dalis pašisuka apie ašį (rečiau – paslenka tiesiškai).

Mechaninės jėgos, veikiančios mechanizmą, sudaro prietaiso sukimo momentą:

$$M = f_1(X, \alpha); \quad (8.14)$$

čia X – matuojamasis dydis, α – posūkio kampas.

Sukimo momentas, kurio kryptis sutampa su laikrodžio rodyklės judėjimo kryptimi, yra laikomas teigiamu.

Elektromechaninio **matuoklio judamoji dalis**, veikiamą sukimo momento M , pasisuka kampu $d\alpha$ ir atlieka darbą $dA = M d\alpha$. **Pastarasis yra lygus matuoklio elektrinio arba magnetinio lauko energijos pokyčiui:** $dA = M d\alpha = dW$.

Daugumos elektromechaninių matuoklių sukimo momentas:

$$M = dW_e/d\alpha \text{ arba } M = dW_m/d\alpha; \quad (8.15)$$

čia W_e ir W_m – matavimo mechanizmo elektrinio arba magnetinio lauko energija.

Jeigu nebūtų pasipriešinimo, mažiausio sukimo momento veikiamą prietaiso judamoji dalis suktųsi tol, kol atsiremtų į judėjimo ribotuvus. Kad to nebūtų, **yra sudaromas atoveikio momentas, kuris paprastai priklauso nuo posūkio kampo:**

$$M_c = f_2(\alpha). \quad (8.16)$$

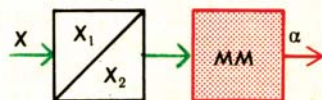
Judamoji dalis sukasi tol, kol šie momentai susilygina: $M = M_c$, t. y. $f_1(X, \alpha) = f_2(\alpha)$ (žr. (8.14) ir (8.16) lygtis).

Be čia nagrinėtų statinių mechaninių momentų, prietaiso judamąją dalį veikia ir dinaminiai (atsiradę dėl inercijos, sukūrinių srovių ir kt.). Jie neturi įtakos matavimo rezultatui, bet nuo jų priklauso rodančiojo mechanizmo nusistovėjimo laikas. Standartai reikalauja, kad tas laikas būtų ne ilgesnis kaip 4 s, išskyrus termoelektrinius ir elektrostatiškus prietaisus, kuriems jo leistina trukmė yra 6 s.

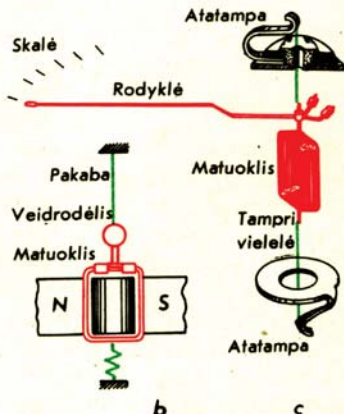
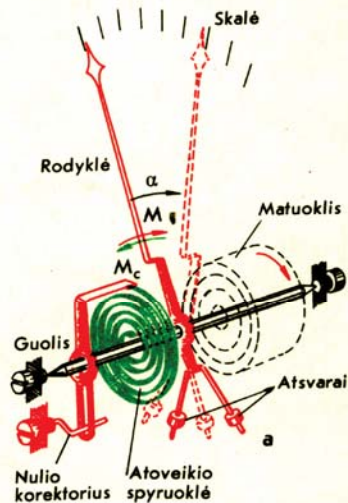
Prietaiso skalės lygtis

$$\alpha = F(X). \quad (8.17)$$

Judamosios dalies posūkio kampas α gali būti tiesinė, kvadratinė, logaritinė ar kokia kitokia matuojamo-



8.8 pav. Elektromechaninio matuoklio struktūrinė schema



8.9 pav. Prietaisų mazgai (a) ir įvairios atoveikio sistemos: a – spyruoklės; b – pakabos; c – atotampas

jo dydžio funkcija. Kai ji tiesinė, prietaiso skalė yra tolygi. Tokia skalė patogiausia ir jos atskaita tiksliausia, nes atstumai tarp padalų yra vienodi. Kartais prietaiso konstrukcija specialiai pakeičiama, išplečiant reikalingiausią skalės dalį.

8.3.2. Bendrieji mazgai ir elementai. Daugumos elektromechaninių prietaisų mazgai ir elementai yra panašios funkcinės paskirties. Sąlygiškai juos būtų galima suskirstyti į tris dalis: 1) keitiklį; 2) matuoklį; 3) likusias pagalbinės dalis, kurios daugelio tiesioginės atskaitos prietaisų yra panašios (8.9 pav.).

Keitikliai naudojami, kai matuojamojo dydžio signalas matuokliui tiesiogiai netinka. Tai papildomi nuosekleji rezistoriai, lygiagretieji rezistoriai (šuntai), lygintuvai, srovės ar įtampos transformatoriai, įtampos dalytuvai ir kiti panašūs įtaisai. Jie gali būti pačiame prietaise arba papildomai įjungti į prietaiso grandinę. Kai matuoklis reaguoja tiesiogiai į matuojamąjį dydį, jų gali ir nebūti.

Matuokliai, kurių yra įvairių matavimo sistemų (žr. 8.3 lentelę), pakeičia elektrinį signalą mechaniniu – sukuria sukimo momentą.

Viena iš likusių dalių yra **atoveikio sistema, sukurianti priešinį momentą mechaninėmis priemonėmis – spyruoklėmis, atotampomis (žr. 8.9 pav.) – arba elektromechaninių jėgų poveikiu.** Kai atoveikio momentą sukuria spyruoklės, jis yra proporcingas matuoklio judamosios dalies posūkio kampui:

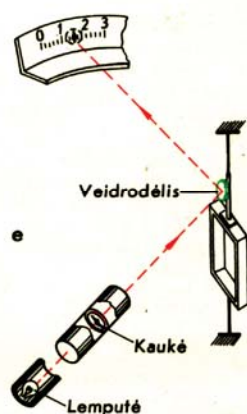
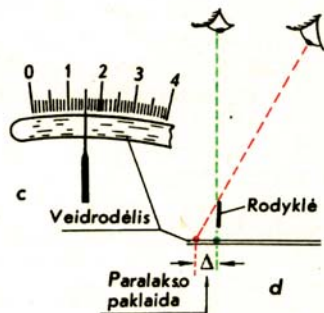
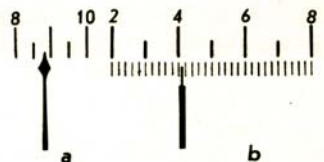
$$M_c = K\alpha; \quad (8.18)$$

čia $K = \text{const}$ – to paties prietaiso pastovus koeficientas.

Spyruoklės laiko prietaiso rodyklę ties nuline žyme, kai nėra jėgimo signalo. Naudojant atotampas, prietaisai jautresni, nes nėra guolių trinties.

Elektromechaninės jėgos sukuria atoveikio momentą tik tada, kai prietaiso matuoklis gauna elektrinį signalą. Jei signalo nėra, prietaiso rodyklė gali būti ties bet kuria skalės žyme ir, prietaisą pavertus, laisvai juda. Dažniausiai šitaip atoveikio momentas yra sukuriamas logometruose.

Atskaitos įtaisą (8.10 pav.) sudaro mechaninė arba šviesinė rodyklė ir skalė. Atstumas tarp dviejų gretimų skalės žymių yra vadinamas padala. Skalės diapazonas yra skalės vertės nuo jos pirmutinės iki paskutinės žymės. Matavimo diapazonas yra skalės dalis, kuriai prietaiso tikslumas atitinka jo tikslumo klasę. Kai skalė tolygi, šie diapazonai paprastai sutampa. Kai skalė netolygi, matavimo diapazonas paprastai suženklinamas taškais (žr. 8.7



8.10 pav. Prietaisų atskaitos įtaisai: a, b, c – su mechanine rodykle; d – veidrodėlio paskirtis; e – su šviesine rodykle

pav., b). Kai prietaiso rodyklė yra už matavimo diapazono ribų, prietaisu naudotis nėra prasmės.

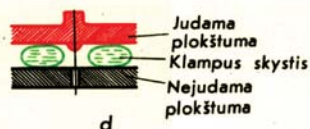
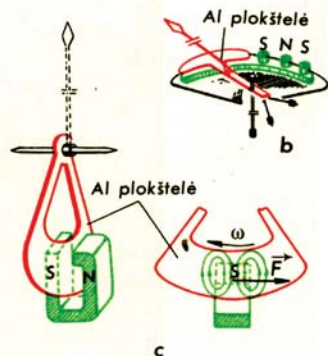
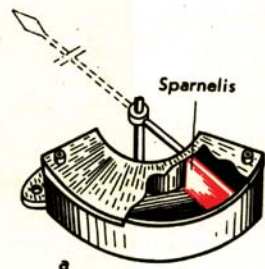
Kad būtų tikslesnė atskaita, mechaninių rodyklių galai daromi siauri, o po skale įtvirtinamas siauras veidrodelis. Norint išvengti paralakso, prietaiso rodmenį reikia atskaityti tada, kai sutampa rodyklės vaizdas ir jos atspindys veidrodėlyje (žr. 8.10 pav., d). Paprastai rodyklės svorio centras atsvarais nukeliamas, kad atsirastų judamosios sistemos ašyje (žr. 8.9 pav., a).

Nulio korektorius reikalingas nustatyti prietaiso rodyklei ties nuline žyme. Jis gali būti mechaninis, pakeičiantis spyruoklės ar atotamos įtempimą (žr. 8.9 pav., a), arba elektrinis, pakeičiantis elektrinio signalo didumą (pvz., ommetre).

Slopintuvai (8.11 pav.) slopina tik dinaminis momentus. Orinį slopintuvą sudaro kamera, kurioje juda sparnelis, mechaniškai sujungtas su judamąja prietaiso dalimi. Sparnelio plotas yra šiek tiek mažesnis už kameros skerspjuvio plotą, todėl suslėgtas oras judesio metu pereina iš vienos kameros dalies į kitą, slopindamas judamosios dalies svyravimus.

Magnetoindukcinio slopintuvo nemagnetinės medžiagos – dažniausiai aliuminio – lapeliui judant magnetiniame lauke, jame indukuojamos sūkurinės srovės. Dėl jų sąveikos su magnetiniu lauku atsiranda lapelio judėjimą stabdančios jėgos. Magnetoindukcinis slopintuvas patogus, bet jį galima naudoti tik tuose prietaisuose, kurių matuokliams neturi įtakos jo magnetinis laukas.

Skystinis slopintuvas yra sudarytas iš dviejų diskų, kurių vienas yra nejudamas, o kitas – sutvirtintas su judamąja prietaiso dalimi. Mažas tarpas (0,1–0,15 mm) tarp diskų užpildomas klampiu mažai garuojančiu skysčiu, kuris slopina judamosios dalies svyravimus. Skystį laiko tik jo paviršiaus įtempimo jėgos, todėl diskai turi būti labai rūpestingai nupoliruoti.



8.11 pav. Prietaisų slopintuvai: a – oriūs; b ir c – magnetoindukciniai; d – skystinis

8.4

Tiesioginės atskaitos prietaisų matuokliai

8.4.1. Magnetoelektrinis matuoklis. Jo veikimo principas pagrįstas tuo, kad nuolatiniame magnetiniame lauke esantį laidininką, kuriuo teka srovė, veikia elektromagnetinė jėga. Vienalyčiame nuolatiniame magnetiniame lauke yra lengvas, suvyniotas iš plono izoliuoto laido rėmelis (8.12 pav.).

Elektromagnetinės jėgos (jų kryptis pažymėta pagal kairiosios rankos taisyklę) sukuria sukimo momentą:

$$M = dW_m / d\alpha = d(\Psi I) / d\alpha = Id\Psi / d\alpha; \quad (8.19)$$

čia $d\Psi = BSNd\alpha$ – rėmelio pilnutinio srauto pokytis, pasisukus rė-

meliui kampu $d\alpha$, B – magnetinio lauko indukcija, $S=bl$ – rėmelio aktyvusis plotas, N – rėmelio vijų skaičius.

Irašę pilnutinio srauto pokyčio $d\Psi$ išraišką, gauname:

$$M = BSNI. \quad (8.20)$$

Atoveikio momentą dažniausiai sudaro spyruoklės ar atotampos, todėl sulyginę (8.18) ir (8.20) lygibių dešiniąsias puses, gauname: $\alpha = BSNI/K$.

Magnetoelektrinės sistemos prietaiso skalės lygtis yra šitokia:

$$\alpha = CI; \quad (8.21)$$

čia C – tam pačiam matuokliui pastovus dydis.

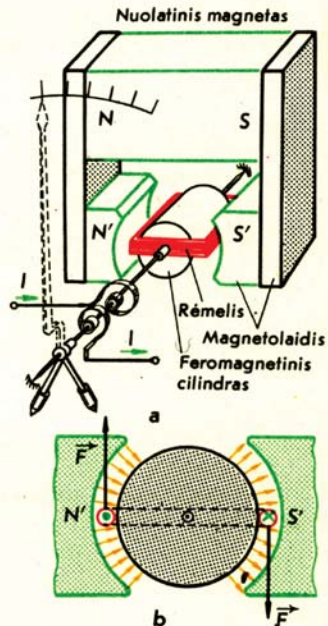
Skalės lygtis yra tiesinė, todėl prietaiso skalė yra tolygi. Sukimo momento kryptis priklauso nuo rėmelio srovės krypties. Kadangi rodyklinio prietaiso inercija didelė, tai įjungus jį į kintamosios srovės tinklą, jo matuoklis nespėja sekti srovės kitimo.

Magnetoelektrinio matuoklio konstrukcija gali būti ir šiek tiek kitokia (8.13 pav.). Svarbiausi jų **privalumai**: 1) tolygi skalė; 2) jautrumas (stiprus magnetinis laukas, judamoji dalis lengva); 3) tikslumas (nuolatinis magnetinis laukas, todėl nėra nuostolių magnetikuose); 4) nejautrumas pašaliniam magnetiniams laukams (stiprus savasis).

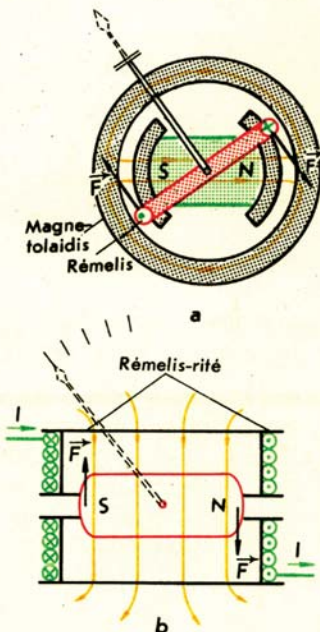
Trūkumai: 1) rodykliniai prietaisai tinka tik nuolatinėi srovei matuoti; 2) jautrūs perkrovai (srovė teka į rėmelį spyruoklėmis ar atotampomis); 3) gana brangūs ir jų konstrukcija sudėtinga.

Dėl savo gerųjų savybių magnetoelektrinis matuoklis naudojamas nuolatinės srovės ampermetruose, voltmetruose, ommetruose, o panaudojus keitiklį, ir kintamosios srovės matavimo prietaisuose. Dėl didelio jautrumo magnetoelektrinės sistemos matuokliai taikomi galvanometruose, kur yra labai sumažinamas atoveikio mechaninis momentas, o atskaitai naudojama šviesinė rodyklė.

8.4.2 Elektromagnetinis matuoklis. Dvi jo šiek tiek skirtingos konstrukcijos parodytos 8.14 pav. Tekant srovei nejudama stačiakampio skerspjūvio ritė, atsiranda elektromagnetinės jėgos. Jos įtraukia minkštamagnetės medžiagos lapelį į siaurą ritės plyšį. Gali būti cilindrinė ritė. Jos magnetinis laukas įmagnetina viduje esančias cilindro išpjovas: judamąją (I) ir nejudamąją (2). Tarp jų vienvardžių magnetinių polių at-



8.12 pav. Magnetoelektrinis matuoklis su nejudančiu magnetu



8.13 pav. Magnetoelektriniai matuokliai su judančiu magnetu

siranda stūmos jėgos, judamoji prietaiso dalis pasisuka. Permalojaus cilindras apsaugo ritės vidų nuo pašalinių magnetinių laukų įtakos.

Ritės magnetinio lauko energija $W_m = Li^2/2$. Įrašę jos reikšmę į (8.15) lygybę ir laikydami srovę sinusine, galime parašyti vidutinę sukimo momento vertę:

$$\bar{M} = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt = (C_1 I^2) dL/d\alpha; \quad (8.22)$$

čia I – tekanti matuoklio rite nuolatinė srovė arba kintamosios srovės efektinė vertė.

Kai atoveikio momentą sudaro spyruoklės ar atotampas (žr. (8.18)), prietaiso skalės lygtis:

$$\alpha = (C_1 I^2) dL/d\alpha. \quad (8.23)$$

Praktiškai $dL/d\alpha \approx \text{const}$, todėl galime laikyti, kad $\alpha \sim I^2$.

Elektromagnetinės sistemos prietaiso skalės lygtis yra kvadratinė:

$$\alpha = CI^2. \quad (8.24)$$

Skalės netolygumo laipsnis labai priklauso nuo judamųjų magnetikų formos. Ji esti gana įvairi ir tokia, kad bent skalės pabaiga būtų kuo tolygesnė.

Elektromagnetiniai matuokliai **geri tuo, kad jie yra:**

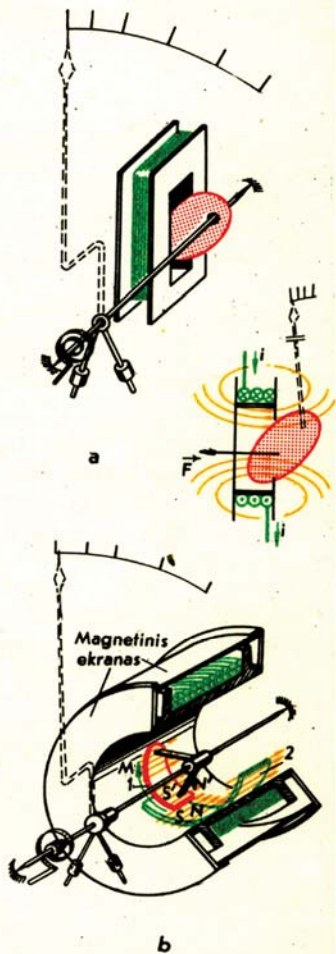
- 1) paprasti ir pigūs (nesudėtingi pagaminti);
- 2) nejautrūs perkrovoms (srovė į ritę teka tiesiogiai, o ne spyruoklėmis);
- 3) gali matuoti nuolatinę ir kintamąją srovę (efektinę vertę).

Svarbiausi jų **trūkumai:** 1) netiesinė skalė; 2) mažiau tikslūs (feromagnetinėje šerdelėje gaunama liktinė indukcija, nuostoliai dėl histerezės ir sūkurinių srovių); 3) nelabai jautrūs (srautas silpnas, nes magnetinio lauko linijos užsidaro oru).

Gaminami nuolatinės ir kintamosios srovės elektromagnetiniai ampermetrai ir voltmetrai.

8.4.3. Elektrodinaminis ir ferdinaminis matuoklis.

Elektrodinaminį matuoklį sudaro dvi ritės: nejudamoji ir jos viduje esanti judamoji (8.15 pav.). Veikimo principą galima paaiškinti abiejų ričių magnetinių laukų sąveika. Pirmąją rite teka srovė i_1 . Jos sukurtame magnetiniame lauke yra antroji ritė, kuria teka srovė i_2 , todėl antrosios ritės laidininkus veikia elektromagnetinės jėgos \vec{F} (jėgų kryptys pažymėtos pagal kairiosios rankos taisyklę).



8.14 pav. Elektromagnetinis matuoklis su plokščia stačiakampio skerspjūvio (a) ir cilindrine (b) rite (1 – judamoji ir 2 – nejudamoji feromagnetinė cilindro išpjova)

Abiejų ričių magnetinio lauko energija:

$$W_m = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} + L_{mn} i_1 i_2;$$

čia L_1, L_2 ir L_{mn} – ričių induktyvumai ir jų abipusis induktyvumas. Įrašę į (8.15) lygbę ir išdiferencijavę, gauname, kad vidutinis sukimo momentas:

$$\bar{M} = \frac{1}{T} \cdot \frac{dL_{mn}}{d\alpha} \int_0^T i_1 i_2 dt.$$

Laikysime, kad $dL_{mn}/d\alpha \approx \text{const}$ ir kad atveikio momentą sukuria spyruoklės (žr. (8.18) lygbę).

Elektrodinaminės sistemos prietaiso skalės lygtis yra šitokia:

kai srovė nuolatinė,

$$\alpha = C_1 I_1 I_2; \quad (8.25)$$

kai srovė kintamoji,

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1), \quad i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2),$$

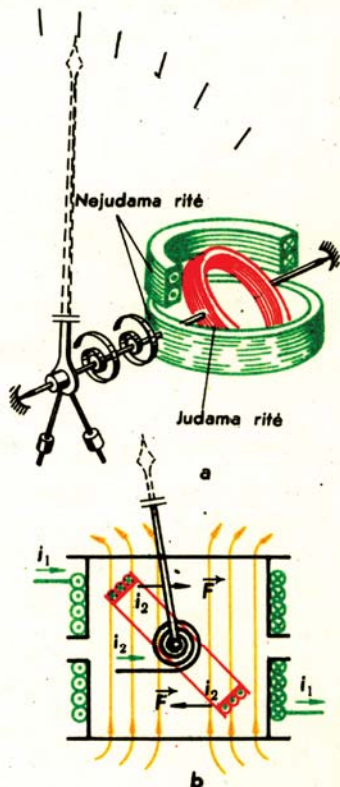
$$\alpha = C_2 I_1 I_2 \cos(\psi_1 - \psi_2). \quad (8.26)$$

Skalė netolygi, išskyrus tuos atvejus, kai matuojamasis dydis yra proporcingas srovių sandaugai.

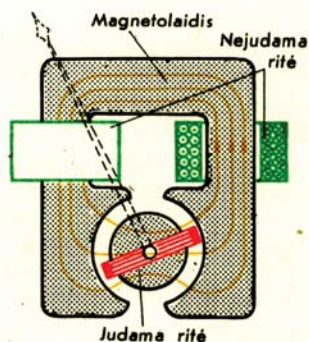
Elektrodinaminio matuoklio **gerosios savybės** yra šios: 1) tinka matuoti ir nuolatinę, ir kintamąją srovę (efektinei vertei); 2) tikslus (nėra feromagnetikų). **Trūkumai:** 1) ampermetrų ir voltmetrų skalė kvadratinė; 2) jautrus perkrovoms (srovė teka spyruoklėmis); 3) sudėtinga konstrukcija; 4) magnetinis laukas silpnas, todėl nelabai jautrus ir didelę įtaką turi pašaliniai magnetiniai laukai.

Gaminami elektrodinaminiai ampermetrai (ritės jungiamos lygiagrečiai), voltmetrai (ritės jungiamos nuosekliai) ir aktyviosios bei reaktyviosios galios matuokliai – vatmetras bei varmetras.

Ferodinaminis matuoklis (8.16 pav.) skiriasi nuo elektrodinaminio tuo, kad jo nejudamosios ritės magnetinis srautas užsidaro magnetolaidžiu. Magnetinis srautas yra stipresnis negu elektrodinaminio matuoklio, todėl ferodinaminis matuoklis jautresnis, jo sukimo momentas didesnis (dėl to feromagnetinės sistemos matuoklis dažnai naudojamas savirašiuose prietaisuose). Antra vertus, dėl feromagnetinio magnetolaidžio jo tikslumas mažesnis (netiesinė priklausomybė $B=f(i_1)$), yra magnetiniai nuostoliai, liktinė indukcija).



8.15 pav. Elektrodinaminis matuoklis: a – erdvinis vaizdas ir b – pjūvis



8.16 pav. Ferodinaminis matuoklis

8.4.4. Elektrostatinis matuoklis. Jo veikimas pagrįstas tuo, kad jo judamąją dalį stumia elektrinio lauko jėgos. Dėl tų jėgų poveikio gali kisti aktyvusis elektrodų plotas (8.17 pav.).

Prijungus prie jo elektrodų įtampą, elektrinio lauko jėgos stengiasi pasukti judamąjį elektrodą taip, kad elektrinio lauko energija $W_e = CU^2/2$ būtų didžiausia. Taip esti, kai matuoklio talpa C didžiausia, t. y. didžiausias aktyvusis jo elektrodų plotas (8.17 pav., a, – užbrūkšniuotas).

Kai prie matuoklio prijungiama nuolatinė įtampa, jo sukimo momentas (žr. (8.15) lygybę):

$$M = dW_e/d\alpha = (U^2/2) (dC/d\alpha). \quad (8.27)$$

Kai įtampa $u = U_m \sin \omega t$, vidutinis sukimo momentas:

$$\overline{M} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = \frac{1}{2} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt = (U^2/2) \frac{dC}{d\alpha};$$

čia U – efektinė kintamosios įtampos vertė.

Sulyginę sukimo momentą su atoveikio (žr. (8.18) lygybę), gauname skalės lygtį:

$$\alpha = \frac{1}{2K} \cdot \frac{dC}{d\alpha} U^2; \quad (8.28)$$

čia U – nuolatinė įtampa arba kintamosios įtampos efektinė vertė. Kai $dC/d\alpha \approx \text{const}$, $\alpha \sim U^2$.

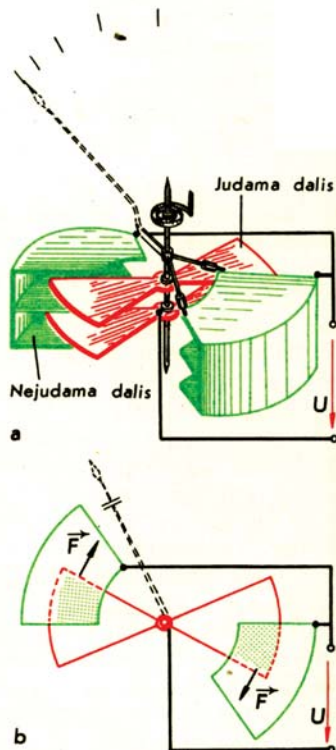
Elektrostatinės sistemos prietaiso skalės lygtis yra kvadratinė:

$$\alpha = K' U^2. \quad (8.29)$$

Parentant specialią elektrodų formą, matmenis ir tarpusavio padėtį, galima gauti tokią $dC/d\alpha$ priklausomybę, kad skalė būtų beveik tolygi (nuo 15 iki 100 % matavimo ribos).

Elektrostatiniai matuokliai ypatingi tuo, kad elektrinis dydis, į kurį jie tiesiogiai reaguoja, yra įtampa. Kai prie jų prijungta nuolatinė įtampa, jie visai nevartoja energijos, o kai kintamoji, – vartoja labai mažai.

Svarbiausi **privalumai**: 1) tinka matuoti nuolatinei ir kintamajai įtampai; 2) maži energijos nuostoliai; 3) matavimo rezultatui neturi įtakos aplinkos temperatūra, matuojamosios įtampos dažnis ir kreivės forma, pašaliniai magnetiniai laukai. **Trūkumai**: 1) mažas jautrumas ir nedidelis sukimo momentas, todėl paprastai elektrostatiniai voltmetrai daugiau naudojami aukštomis įtampoms ma-



8.17 pav. Elektrostatinio matuoklio erdvinis vaizdas (a) ir vaizdas iš viršaus (b)

tuoti; 2) jautrūs pašaliniam elektriniams laukams; 3) gana sudėtinga konstrukcija, nes reikia imtis specialių priemonių, kad matuoklio talpa būtų kuo didesnė (daroma daugiau judamųjų elektrodų ir nejudamųjų – kamerų) ir kuo geresnė izoliacija tarp elektrodų.

8.4.5. Indukcinis matuoklis. Jį sudaro du elektromagnetai (8.18 pav.) ir tarp jų esantis nemagnetinis (dažniausiai aliuminio) diskas – judamoji matuoklio dalis. Kai abiejų elektromagnetų ritėmis teka kintamosios srovės, sukuriama du magnetiniai srautai: $\Phi_1(t)$ ir $\Phi_2(t)$. Verdami diską, jie indukuoja diske sukurines EVJ, todėl jame teka sukurinės srovės $i_{1F}(t)$ ir $i_{2F}(t)$. Į diską galime žiūrėti kaip į laidininką, kuriuo: 1) teka srovė i_{1F} ir jis yra antrojo elektromagneto magnetiniame lauke ir 2) teka srovė i_{2F} ir jis yra pirmojo elektromagneto magnetiniame lauke. Dėl to diską veikia elektromagnetinės jėgos \vec{F}_1 ir \vec{F}_2 , sudarydamos sukimo momentą.

8.18 pav., *b* parodytas disko vaizdas iš viršaus, magnetinių srautų Φ_1 ir Φ_2 kryptys, taip pat indukuotų sukurinių srovių kryptys. Elektromagnetinių jėgų kryptys nustatytos pagal kairiosios rankos taisyklę.

Kad atsirastų sukimo momentas, reikia, kad abu magnetiniai srautai būtų ne tik kintamieji, bet ir nevienodos fazės. Disko sukimo momentas išreiškiamas šitaip:

$$M = C_1 f \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi; \quad (8.30)$$

čia C_1 – pastovus tam pačiam matuokliui koeficientas, f – elektromagnetais tekančių srovių dažnis, Φ_1 ir Φ_2 – magnetinių srautų efektinės vertės, ψ – fazių skirtumo kampas tarp magnetinių srautų.

Laikydami, kad dažnis $f = \text{const}$, o magnetinis srautas yra apytiksliai proporcingas jį kuriančiai srovei ir sutampa su ja faze (elektromagneto plienas neįsotintas ir nepaisoma histerezės nuostolių), (8.30) lygybę galime perrašyti šitaip:

$$M = C_2 I_1 I_2 \sin \psi; \quad (8.31)$$

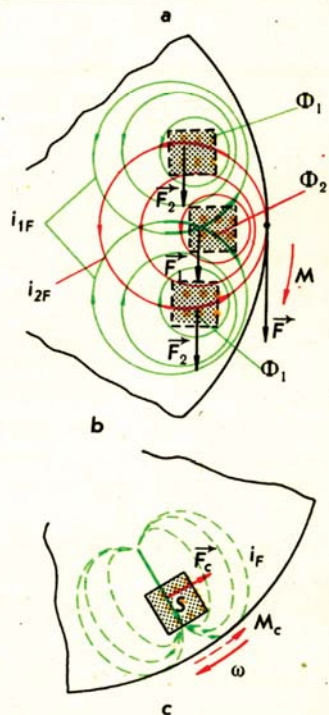
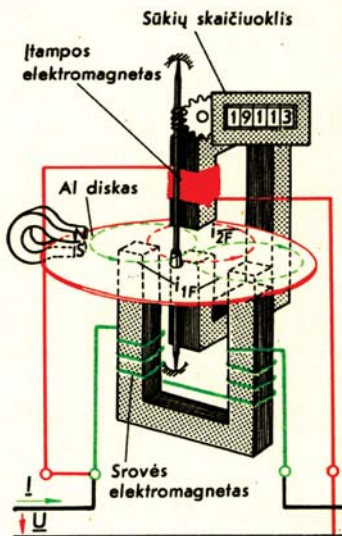
čia I_1 ir I_2 – kintamųjų srovių, tekančių elektromagnetais, efektinės vertės.

Šio matuoklio atoveikio momentui sudaryti panaudotas nuolatinis magnetas. Atoveikio jėgos gaunamos tik tada, kai diskas juda. Toje jo dalyje, kuri yra nuolatiniam magnetiniame lauke, indukuojamos sukurinės EVJ, teka sukurinės srovės. Dėl to diską veikia elektromagnetinės jėgos \vec{F}_c , kurios yra priešingos jo judėjimo krypciai ir jį stabdo (žr. 8.18 pav., *c*).

Atoveikio mechaninis momentas yra proporcingas kampiniam disko sukimosi greičiui ω :

$$M_c = C_3 \omega = C_3 d\alpha/dt; \quad (8.32)$$

čia α – disko posūkio kampas.



8.18 pav. Indukcinio matuoklio bendras vaizdas (*a*) ir disko vaizdas iš viršaus: *b* – ties pagrindiniais elektromagnetais; *c* – ties nuolatinio atoveikio magnetu

Diskas sukasi pastoviu kampiniu greičiu, kai $M = M_c$ (trinties ir kitų stabdymo momentų nepaisoma). Sulyginę (8.31) ir (8.32), gauname:

$$d\alpha = C_4 I_1 I_2 \sin \psi dt \text{ arba } \alpha = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\alpha = C_4 \int_{t_1}^{t_2} I_1 I_2 \sin \psi dt.$$

Kampas, kuriuo pasisuka diskas per laikotarpį $t_2 - t_1$, $\alpha = 2\pi N$; čia N – disko sūkių skaičius. Irašę α reikšmę į paskutinąją lygtį, gauname disko sūkių skaičiaus išraišką.

Indukcinės sistemos matuoklio disko sūkių skaičius

$$N = C_5 \int_{t_1}^{t_2} I_1 I_2 \sin \psi dt. \quad (8.33)$$

Tai integruojantysis prietaisas, todėl dažniausiai naudojamas suvartotos elektros energijos kiekiui matuoti.

Prie trūkumų priskirtina sudėtinga konstrukcija, reikalaujanti didelio gamybos tikslumo.

8.4.6. Logometras. Tai toks elektromechaninis matuoklis, kurio posūkio kampas yra proporcingas dviejų elektrinių dydžių (dažniausiai srovių) santykiui. Logometrams nereikalingos atveikio momentą sukuriančios spyruoklės ar atotamos, nes jų judamąją dalį veikia du priešingi sukimo momentai. Logometrai gali būti įvairių sistemų: magnetoelektrinės, elektromagnetinės, elektrodinaminės, ferdinaminės.

Plačiausiai naudojamas yra **magnetoelektrinis** (8.19 pav.), kurio judamoji dalis yra sudaryta iš dviejų mechaniškai sutvirtintų ričių.

Kai ritėmis teka srovės, jas veikia elektromagnetinės jėgos \vec{F}_1 ir \vec{F}_2 . Ritės sujungiamos taip, kad šios jėgos būtų priešingų krypčių. Elektromagnetinė jėga $F = IBl$. Magnetinė indukcija priklauso nuo ritės padėties (posūkio kampo α), todėl kiekvienai ritei ji kitokia: $B_1(\alpha)$ ir $B_2(\alpha)$. Kiekvienos ritės sukimo momentas:

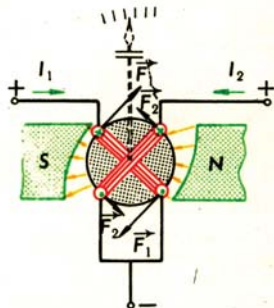
$$M_1 = C_1 B_1(\alpha) I_1 \text{ ir } M_2 = C_2 B_2(\alpha) I_2.$$

Judamoji dalis pasisuka didesniojo mechaninio momento kryptimi (laikrodžio rodyklės judėjimo kryptimi, kai $M_1 > M_2$) ir sukasi tol, kol tie momentai susilygina:

$$C_1 B_1(\alpha) I_1 = C_2 B_2(\alpha) I_2.$$

Iš čia:

$$\alpha = f(I_1/I_2). \quad (8.34)$$



8.19 pav. Magnetoelektrinis logometras

8.5

Elektroniniai matavimo prietaisai

Šiuose prietaisuose yra naudojami įvairūs matuojamojo elektrinio signalo keitikliai – elektroniniai mazgai: lygintuvai, stiprintuvai, multivibratoriai, taip pat impulsų generatoriai, modulatoriai, dešifраторiai ir kitokie specialūs blokai.

Išnagrinėkime kai kuriuos plačiausiai naudojamus elektroninius matavimo prietaisus.

8.5.1. Lygintuviniai prietaisai. Jie dar vadinami **detektoriniais**. Juose yra tikslus ir jautrus **magnetoelektrinis matuoklis su keitikliu – lygintuvu, kuris pakeičia matuojamąją kintamąją srovę nuolatine**. Dažniausiai naudojamas dvipusio lyginimo lygintuvas (8.20 pav.), kurio išlyginta vidutinė srovės vertė yra dvigubai didesnė negu vienpusio lyginimo (žr. 7.1.3).

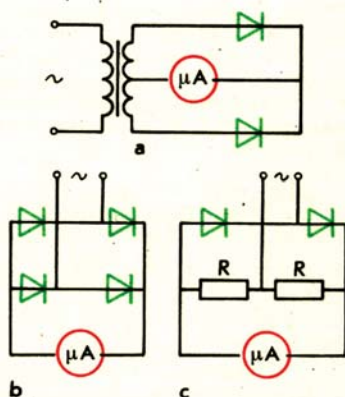
Lygintuvinio prietaiso rodyklės posūkio kampas yra proporcingas vidutinei kintamosios srovės vertei: $\alpha = CI$. Paprastai tokių prietaisų skalės **sugraduojamos efektingomis sinusinės srovės vertėmis, todėl tiesiogiai jais galima matuoti tik sinusinius elektrinius dydžius**. Kai srovė nesinusinė, matavimo rezultatą reikia perskaiciuoti, įvertinant kreivės formos koeficientą (žr. (2.88) lygybę), nes kitaip gaunamos didelės paklaidos.

Patogūs yra **universalūs ir daugiaribiai lygintuviniai prietaisai nuolatinei ir kintamajai 50 Hz – 10 kHz srovei bei įtampai, taip pat varžai ir talpai matuoti** (8. 21 pav.). Tai įvairūs ampervoltmetrai, kurių matavimo ribos keičiamos papildomais rezistoriais. Tokių universalųjų prietaisų tikslumas yra nedidelis (klasės 1,0 – 2,5).

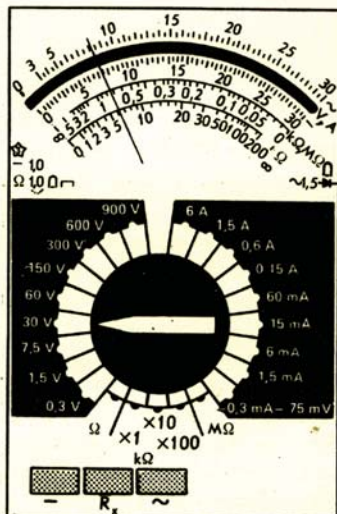
8.5.2. Elektroninis voltmetras. Elektroniniai voltmetrai gali būti nuolatinės srovės, kintamosios srovės, impulsiniai, universalūs. Svarbiausios jų dalys yra dvi: **magnetoelektrinis (rečiau elektrostatinis) matuoklis ir keitiklis – elektroninis stiprintuvas** (8.22 pav.).

Paprastąją nuolatinės srovės elektroninį voltmetrą sudaro **įtampos dalytuvas** (žr. 1.5.3) matavimo riboms praplėsti (jis sumažina matuojamąją įtampą n kartų), **nuolatinės srovės stiprintuvas** su maitinimo bloku MB ir jautrus bei tikslus **magnetoelektrinis matuoklis** (dažniausiai 50 – 100 μA mikroampermetras).

Kintamosios srovės voltmetruose yra keitikliai, pakeičiantys matuojamąją kintamąją įtampą nuolatine. Priklausomai nuo keitiklio tipo



8.20 pav. Magnetoelektrinio matuoklio ir lygintuvo su transformatoriaus vidurine atšaka (a) bei tiltelinio lygintuvo (b, c) jungimo schemos



8.21 pav. Universalaus daugiaribio lygintuvinio prietaiso skalė ir matavimo ribų perjungiklis

nuolatinis signalas gali būti proporcingas amplitudinei, vidutinei ar efektinei matuojamojo dydžio vertei. Voltmetru galima matuoti amplitudines vertes, kai keitiklis yra sudarytas iš diodų, rezistorių, kondensatorių ir jo veikimo principas pagrįstas kondensatoriaus įkrovimu. Kai keitiklis yra dvipusio lyginimo lygintuvas (dažniausiai tiltelinis), matuoklio kampas yra proporcingas išlygintos srovės vidutinei vertei. Matuoklis rodo efektingą matuojamojo dydžio vertę, kai voltmetrai yra panaudotas termoelektrinis keitiklis.

Kintamosios srovės voltmetruose yra naudojami kintamosios srovės stiprintuvai (signalas pradžioje sustiprinamas, po to pakeičiamas nuolatiniu) arba nuolatinės srovės stiprintuvai (stiprinamas pakeistas nuolatinis signalas).

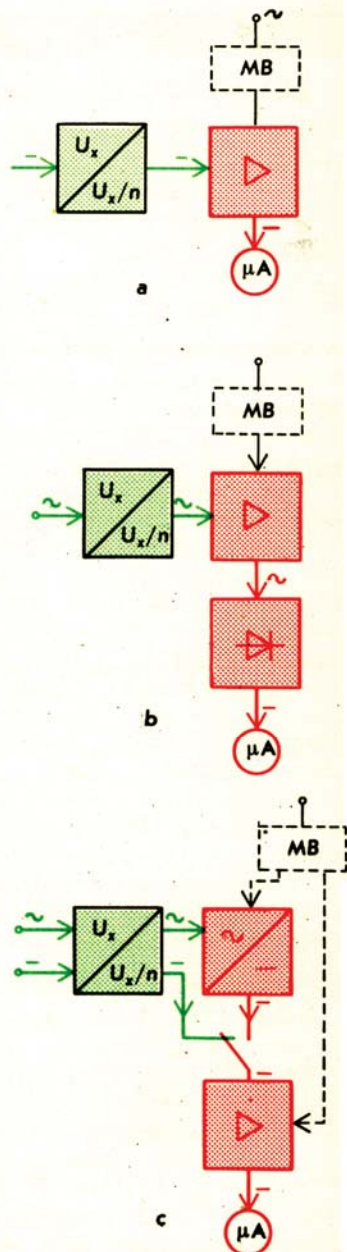
Paprastai visų elektroninių voltmetrų skalės graduojamos sinusinių įtampų efektingomis vertėmis (jei sugraduota amplitudinėmis ar vidutinėmis, tai nurodoma prietaiso skalėje). Kai tenka matuoti nesusinusines įtampas, reikia pasirinkti voltmetrą su termoelektriniu keitikliu arba išmatuotą rezultatą perskaičiuoti, įvertinant amplitudės ir formos koeficientus (žr. 2.9.3).

Svarbiausias elektroninių voltmetrų **privalumas yra didelė jų jėgimo varža**: $10^5 - 10^8 \Omega$. Jie jautrūs, todėl galima matuoti mažas įtampas. Praktiškai jie energijos iš matuojamosios grandinės nevartoja. Paprastai jais matuojamos kintamosios 20 Hz–200 MHz dažnio įtampos. Svarbiausi jų **trūkumai yra sudėtinga schema** ir kol kas dar palyginti **nedidelis matavimų tikslumas** (tikslumo klasė dažniausiai – nuo 0,5 iki 2,5). Sparti elektronikos mokslo ir technologijos pažanga leidžia tikėtis, kad greitai laiku elektroniniai prietaisai taps paprastesni ir tikslesni.

Elektroniniai voltmetrai **gali būti taikomi ir srovėms matuoti**. Tuo tikslu į grandinę įjungiamas mažos varžos etaloninis rezistorius, kuriuo teka matuojamoji srovė. Voltmetru matuojama rezistoriaus įtampa, o voltmetro skalę sugradavus srovės matavimo vienetais, jis tampa ampermetru. Dažnai etaloninis rezistorius yra pačiame prietaise, kuris tampa ampermetru – voltmetru.

8.5.3. Elektroninis oscilografas. Šio elektroninio prietaiso **ekrane gali būti stebimi ir matuojami įvairūs elektrinių signalų parametrai**.

Svarbiausia elektroninio oscilografo **dalis yra elektroninis vamzdis** (žr. 6.6.3). Paprastai **tiriamasis, pavyzdžiui, sinusinis, signalas $u_Y(t)$** (8.23 pav.) **prijungiamas prie vertikalios kreipimo plokštelių**. Jis suteikia spinduliui vertikalų judesį. **Prie horizontalios kreipimo plokštelių prijungiamas signalas $u_X(t)$ iš pjūklinės įtampos generatoriaus** (žr. 4.2.4). Jo įtampa tiesiškai didėja iki tam tikros vertės, po to staiga sumažėja iki nulio. Tokio jos periodiško kitimo dažnį galima reguliuoti, o kitimo pradžią galima sin-



8.22 pav. Elektroninių voltmetrų struktūrinės schemos: a – nuolatinės srovės; b – kintamosios srovės su lygintuviniu keitikliu ir c – universalus

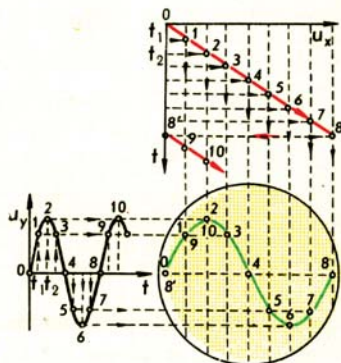
chronizuoti su norimu tiriamojo signalo kitimo momentu.

Jeigu būtų prijungtas tiksliai tiriamasis signalas, o pjūklinės įtampos nebūtų, spindulio pėdsakas ekrane judėtų vertikaliai. Dėl regos inercijos, taip pat dėl to, kad ekrano liuminoforui būdingas pošvytis, ekrane matytume vertikalią švytintį brūkšnį. Jei nebūtų tiriamojo signalo, dėl pjūklinės įtampos poveikio spindulys lėtai slinktų iš kairės į dešinę ir staiga grįžtų atgal. Esant pakankamam dažniui, šių judesių nematytume, ir būtų matomas tik horizontalus švytintis brūkšnys.

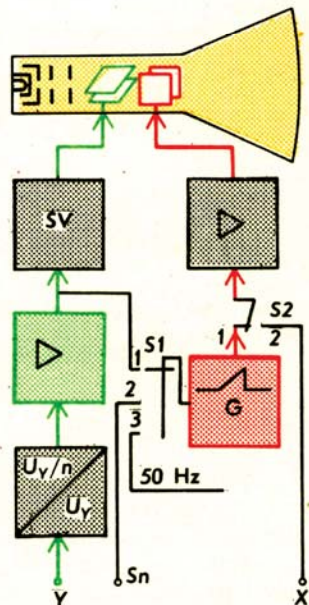
Kai tiriamasis ir pjūklinės įtampos signalas veikia kartu, spindulio pėdsako padėtis ekrane nusakoma dviem koordinatėmis. Ordinātė yra tiriamojo signalo stiprumas, o abscisė – pjūklinės įtampos didumas. Tarkime, kad abu signalai sinchronizuoti ir laiko momentu $t_0=0$ abu lygūs nuliui. Laiko momentu t_1 spindulys pakyla aukštyn, nes padidėja tiriamasis signalas, ir pasislenka dešinėn, nes padidėja pjūklinė įtampa. Pėdsakas patenka į ekrano tašką 1. Laiko momentu t_2 jis dar pakyla ir paslenka dešinėn, todėl patenka į tašką 2. Taip pėdsakas juda tol, kol spindulys staiga grįžta atgal į pradinį tašką ir procesas kartojasi. Ekrane matoma tiriamojo signalo švytinti kreivė, kuri nejuda tuo atveju, kai tiriamojo signalo periodo trukmė yra kartotinė pjūklinės įtampos kitimo periodui. Kai periodai yra lygūs, ekrane matome vieną tiriamojo signalo periodo vaizdą. Kai tiriamojo signalo periodas du kartus trumpesnis už pjūklinės įtampos, matome tiriamojo signalo dviejų periodų kreivę ir t. t. Pjūklinės įtampos generatoriaus (dar vadinamo skleidimo generatoriumi) signalo dažnį galima keisti. Paprastai spindulio judėjimo trukmė 1 mm ilgio horizontalia atkarpa yra nuo 10 ms iki 0,002 μ s, o specialiuose oscilografuose ji gali būti dar ilgesnė ar trumpesnė už nurodytas ribas.

Elektroniniame oscilografe yra ir kiti svarbūs blokai (8.24 pav.). Tiriamasis signalas patenka į vertikalaus kreipimo plokštes – vadinamoju Y kanalu (įėjimas Y) per įtampos dalytuvą, stiprintuvą ir signalo vėlinimo bloką SV. Kai jungiklis S2 yra pirmoje padėtyje, kanalu X į horizontalaus kreipimo plokštes per stiprintuvą paduodamas signalas iš pjūklinės įtampos generatoriaus. Tam, kad ekrane būtų matomas nejudantis tiriamojo signalo vaizdas, reikia Y ir X kanalų signalus sinchronizuoti. Vidinė sinchronizacija gaunama, įjungus jungiklį S1 į padėtį 1. Tuo atveju skleidimo generatorius pradeda veikti, valdomas paties tiriamojo signalo. Kad būtų galima stebėti tiriamojo signalo kitimo pradžią, jis pats į vertikalaus kreipimo plokštes patenka uždelstas – per signalo vėlinimo bloką SV. Kartais sinchronizacijai naudojamas pašalinis sinchronizuojantis signalas (Sn) arba tinklo įtampa (50 Hz) (2 arba 3 jungiklio S1 padėtis).

Kartais prie oscilografo X ir Y įėjimų prijungiami du tiriamieji signalai. Ekrane yra gaunamos kreivės, kurios vadinamos Lisažu figūromis. Iš jų pavidalo yra sprendžiama apie signalų amplitudžių, dažnių santykį ir fazių skirtumą.



8.23 pav. Tiriamojo signalo vaizdo sudarymas oscilografo ekrane



8.24 pav. Elektroninio oscilografo struktūrinė schema

Gaminami dviejų (rečiau – daugiau) spindulių oscilografai, kuriuose yra du vienodi atskiri Y kanalai ir vienas X kanalas. Jų ekrane galima stebėti du tiriamuosius signalus vienu metu.

Svarbiausios oscilografo **charakteristikos** yra šios: 1) Y kanalo jautrumas S_Y , kuris paprastai esti nuo 1 mm/mV iki $5 \cdot 10^{-4}$ mm/mV; 2) dažnių diapazonas, kuris paprastai esti nuo dešimtujų herco dalių iki dešimčių bei šimtų megahercų; 3) įėjimo varža – 0,5; 1; 10 MΩ; 4) įtampos matavimo ir laiko intervalų trukmės paklaidos (paprastai nuo 3 iki 10 %).

8.5.4. Skaitmeninis voltmetras. Tai plačiausiai naudojamas skaitmeninis prietaisas. **Juo matuojamoji įtampa palyginama su žinomu dėsniu kintančia įtampa ir palyginimo rezultatas paverčiamas skaitmeniniu kodu.**

Nuolatinės įtampos skaitmeninis voltmetras (8.25 pav.) įjungiamas mygtuku. Jo valdymo blokas gauna impulsą u_0 ir suformuoja signalą, kuriuo paleidžiamas tiesinės įtampos generatorius ir impulsų skaitiklis nustatomas į nulinę padėtį.

Tiesinės įtampos generatoriaus įtampa u_N pradeda didėti nuo tam tikros neigiamos vertės. Kai ji tampa lygi nuliui, pirmasis palyginimo blokas siunčia impulsą selektoriui, kuris praleidžia impulsų generatoriaus impulsus į impulsų skaitiklį. Kai tiesinė įtampa u_N toliau didinama susilygina su matuojamąja U_x , paveikia antrasis palyginimo blokas. Pagal jo signalą selektorius neleidžia patekti impulsams į skaitiklį.

Impulsų skaičius per laiką Δt :

$$N = \Delta t f_0; \quad (8.35)$$

čia f_0 – etaloninio impulsų generatoriaus dažnis.

Tiesinės įtampos kitimo greitis $v_N = du_N/dt = U_x/\Delta t$. Iš čia išreiškė Δt ir įrašė į (8.35), gausime:

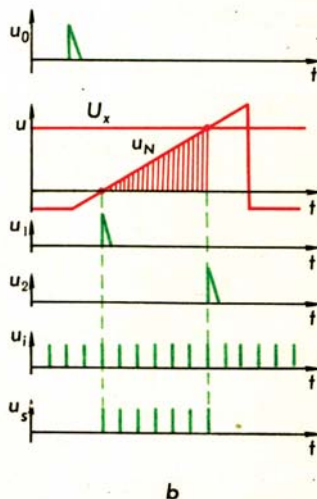
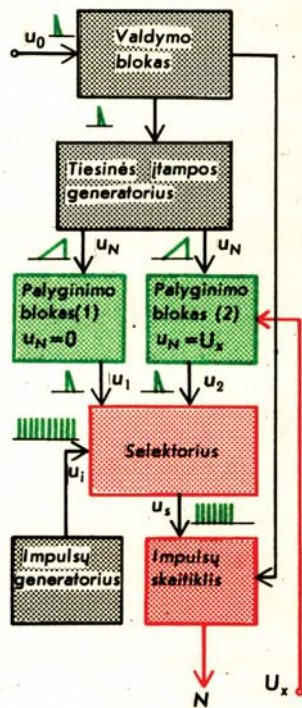
$$N = (f_0/v_N) U_x = C U_x. \quad (8.36)$$

Kuo didesnis dažnis f_0 ir mažesnis tiesinės įtampos kitimo greitis, tuo voltmetras yra jautresnis ir tikslesnis.

Kintamosios įtampos skaitmeniniai voltmetrai sudaryti iš keitiklio, pakeičiančio matuojamąją įtampą nuolatine, ir skaitmeninio nuolatinės įtampos voltmetro. Priklausomai nuo keitiklio tipo (lygintuvinis ar termoelektrinis), jie reaguoja į išlygintos įtampos vidutinę arba efektyvą vertę. Paprastai jie sugraduojami efektyvėmis įtampos vertėmis, todėl tie voltmetrai, kuriuose yra lygintuvai, pritaikyti sinusinėms kintamoms įtampoms matuoti.

Gaminami universalūs skaitmeniniai ampervoltmetrai, kuriuose yra etaloniniai mažos varžos rezistoriai ir skaitmeninis voltmetras.

Skaitmeniniai prietaisai yra **tikslius** (pavyzdžiui, gaminami tikslumo klasės 0,25/0,1; 0,02/0,005 ir tikslesni), **didelis matavimo ribų diapazonas** – nuo $1 \mu V$ iki 1000 V, **didelė įėjimo varža** – nuo 10 iki 1000 MΩ. Be to, **infor-**



8.25 pav. Skaitmeninio voltmetro struktūrinė schema (a) ir įtampų diagramos (b)

macija apie signalą gaunama objektyviai (nėra atskaitos paklaidų) ir gali būti tiesiog įvedama į ESM.

Trūkumai yra šitokie: skaitmeniniai prietaisai kol kas dar yra nepakankamai patikimi, daugelis iš jų didoki ir brangūs. Tobulėjant elektroniniams įtaisams bei mikro-schemoms, šių trūkumų bus išvengta.

8.6

Registruojantieji prietaisai

Mokslo tiriamajame darbe ar technologinių procesų kontrolei dažnai reikia žinoti, kaip kinta koks nors matuojamasis dydis priklausomai nuo laiko. Kai tas laikas gana ilgas, pavyzdžiui, kelios valandos, para ar pan., atskaitinėti rodyklinių prietaisų rodmenis ir po to braižyti grafikus yra nepatogu. Kai laikas yra trumpas – sekundės dalys, – netgi ir neįmanoma.

Kai reikia gauti objektyvią matuojamojo dydžio kitimo diagramą priklausomai nuo laiko, dažniausiai naudojami savirašiai prietaisai ir optiniai oscilografai.

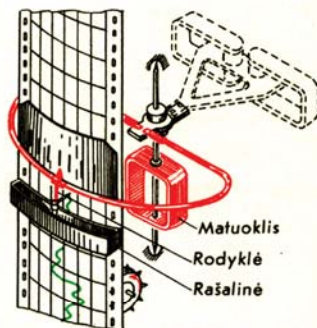
8.6.1. Savirašiai prietaisai. Tai matavimo prietaisai, kurie užrašo matuojamojo dydžio kitimą laiko diagramos pavidalu. Savirašiai prietaisai gali būti lėtaveikiai – skirti matuoti lėtai kintantiems (dažnis ne didesnis negu 1 Hz) ir greitaveikiai – greitai kintantiems (dažnis iki 150–200 Hz) dydžiams.

Lėtaveikį savirašį prietaisą (8.26 pav.) sudaro matuoklis, rašymo įtaisas ir popieriaus traukimo mechanizmas. Dažniausiai naudojami magnetoelektriniai ir ferodinaminiai matuokliai, kurių sukimo momentai yra didesni.

Kreivę galima užrašyti judančioje diagraminio popieriaus juostoje plunksna, naudojant specialų rašalą ar pastą. Popieriaus juosta juda pastoviu žinomu greičiu (naudojamas sinchroninis variklis), todėl visada yra žinomas laiko mastelis. Visi lėtaveikiai savirašiai prietaisai turi skalę, todėl matuojamąjį dydį galima atskaityti ir tiesiogiai.

Diagraminis popierius gali būti specialus – šiluminis arba juodas, padengtas vaško sluoksniu. Kai tokiu popieriumi juda įkaitusi plona adatėlė, pritvirtinta prie prietaiso rodyklės, šiluminis popierius tamsėja, o juodojo popieriaus paviršiuje vaškas ištirpsta. Dėl to ir viename, ir kitame lieka pėdsakas.

Kai kreivė sudaroma iš taškų, prietaiso rodyklė gali būti periodiškai prispaudžiama kartu su dažančia juoste (rašomosios mašinėlės principu) prie popieriaus, kuriame lieka jos pėdsakas – taškas.



8.26 pav. Lėtaveikis savirašis prietaisas

Lėtaveikiai savirašiai prietaisai dažniausiai yra vieno kanalo – jais galima registruoti tik vieną matuojamąjį dydį: srovę, įtampą, dažnį, aktyviają ar reaktyviają galią. Jų tikslumas nedidelis – tikslumo klasės 1,0; 1,5 ir 2,5. Popieriaus traukimo greitis nuo $5,5 \cdot 10^{-3}$ mm/s iki 1,5 mm/s. Vienkanalį matavimo prietaisą galima naudoti su daugiakanaliu įėjimo komutatoriumi, kuris reguliariai perjunginėja įėjimo kanalus tam pačiam taškinio rašymo prietaisui.

Greitaveikiuose savirašiuose prietaisuose yra specialios konstrukcijos mažai inertiški magnetoelektriniai ar elektromagnetiniai matuokliai ir stipraus grįžtamojo ryšio elektroniniai stiprintuvai. Šie prietaisai neturi skalių, nes tiesiogiai atskaityti matuojamąjį dydį yra neįmanoma.

Greitaveikiai savirašiai prietaisai yra dar mažiau tikslūs (klasė 4,0). Jie gali būti 1, 2, 4, 6 ir 8 kanalų, todėl jais vienos juostos lygiagrečiuose takuose vienu metu galima užrašyti kelis gana sparčiai kintančius dydžius.

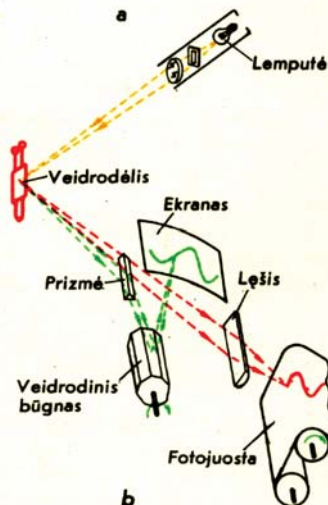
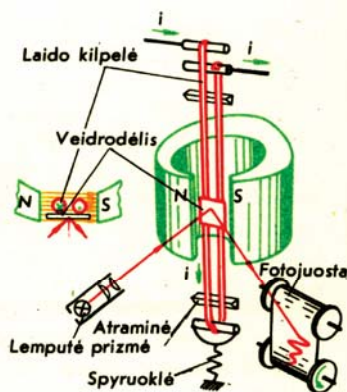
8.6.2. Optinis oscilografas. Tai optinis elektromechaninis įtaisas, kuriuo galima registruoti momentines vertes elektrinių dydžių, kurių kitimo dažnis yra nuo 0 iki 20 kHz (kai kurių iki 30 kHz). Optiniame oscilografе yra jautrus magnetoelektrinis matuoklis (8.27 pav., a), kurio kilpelė pasisuka, kai ja teka srovė. Kartu su kilpele juda ir veidrodėlis, todėl šviesos atspindys juda ir jį galima registruoti fotojuostoje.

Pastaruoju laiku optiniuose oscilografuose yra ne pavieniai magnetoelektriniai matuokliai, bet magnetinis blokas. Jį sudaro vienas nuolatinis magnetas, tarp kurio polių įrengiami lizdai – oro tarpai. Į tuos lizdus įstatomi keičiami cilindriškai su judamosiomis matuoklių dalimis. Patys cilindriškai yra pagaminti iš nemagnetinio metalo, o jų galai iš minkštamagnetės medžiagos (magnetiniam laukui sustiprinti). Cilindriukas užpildomas specialiu skysčiu, kuris veikia kaip slopintuvas. Veidrodėlio plotas mažesnis nei 1 mm^2 , o storis – ne didesnis nei 0,1 mm.

Šviesos spindulys (8.27 pav., b) iš lempos per optinę sistemą patenka į matuoklio veidrodėlį. Nuo jo atspindys per prizmę patenka į veidrodinį būgną. Jei šis būgnas nesisuka, veidrodėliui judant ekrane matysime vertikalų šviesos brūkšnį, kurio aukštis proporcingas dvigubai tiriamojo signalo amplitudei. Būgnui sukantis, atspindys juda ne tik vertikaliai, bet ir horizontaliai, todėl ekrane yra matoma matuojamojo dydžio priklausomybės nuo laiko kreivė (žr. 8.23 pav.).

Dalis atspindžio per lęšį patenka į fotojuostą (ar fotopopierių), kurį traukiant pastoviu ir žinomu greičiu (nuo 1 iki 5000 mm/s), užrašoma matuojamojo dydžio kreivė priklausomai nuo laiko.

Gaminami optiniai oscilografai, kuriais galima užrašyti nuo 4 iki 60 įvairių elektrinių dydžių kreivių. Dauguma jų neturi ekrano registruojamiems dydžiams stebėti, bet užtat yra kompaktiški ir portatyvūs. Galima registruoti srovę, įtampą, galią ir kitus elektrinius dydžius. Matavimo riboms praplėsti naudojami papildomi nuoseklieji ir lygiagretieji rezistoriai, stiprintuvai.



8.27 pav. Optinio oscilografo magnetoelektrinis matuoklis (a) ir optinė schema (b)

8.7

Srovės ir įtampos matavimas

8.7.1. Srovės matavimas. Vidutinio stiprumo srovės (nuo 10 mA iki 100 A) matuojamos **ampermetrais** (arba miliampermetrais), kurie įjungiami į matuojamąją grandinę nuosekliai. Realūs ampermetrai turi varžą, todėl pakinta matuojamoji srovė ir matuojant gaunama metodinė paklaida (8.28 pav.).

Tarkime, kad matuojama nuolatinė srovė I_x , tekanti imtuvu, kurio varža R ir kurio įtampa U . Tikroji grandinės srovė: $I_x = U/R$. Įjungus ampermetrą, kurio varža R_A , grandinės srovė tampa $I = U/(R + R_A)$. Santykinė metodinė paklaida, kai $R_A \ll R$:

$$\delta_A = \frac{I - I_x}{I_x} = - \frac{R_A/R}{1 + R_A/R} \approx - R_A/R. \quad (8.37)$$

Kuo $R_A \ll R$, tuo mažesnė gaunama santykinė metodinė paklaida.

Nuolatinėi srovei nuo 1 μ A iki 6 kA matuoti naudojami **magnetoelektrinės sistemos matuokliai**, kurie vartoja mažai energijos, gali būti labai tikslūs (gaminami tikslumo klasės 0,1; 0,2), jų skalė tolygi. Matuojant srovės iki 20–50 mA, paprastai visa matuojamoji srovė teka ampermetro ritele. **Didesnėms srovėms matuoti naudojami šuntai** (8.29 pav.), kuriais paprastai teka didesnioji matuojamosios srovės dalis.

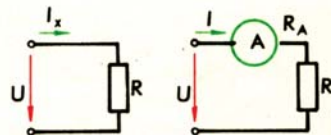
Ampermetru tekanti srovė (žr. (1.41) lygybę): $I_A = R_p I_x / (R_A + R_p)$; čia I_x – matuojamoji srovė; R_p ir R_A – šunto ir ampermetro varžos. Galime apskaičiuoti reikiamą šunto varžą:

$$R_p = R_A / (n_p - 1); \quad (8.38)$$

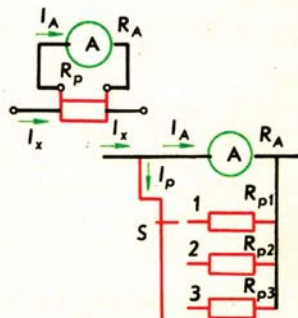
čia $n_p = I_x / I_A$ – šunto koeficientas, rodantis, kiek kartų matuojamoji srovė yra didesnė už tą, kuri teka ampermetru. Prietaiso viduje paprastai yra įtaisomi tik tokie šuntai, kuriais teka srovės iki 30 A. Didesnėms srovėms matuoti naudojami atskirai prijungiami šuntai.

Šunto tikslumo klasė yra skaičius, nusakantis, kiek procentų gali skirtis šunto varža nuo jos vardinės vertės. Šuntai gaminami 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 tikslumo klasių, nuo 10 iki 300 mV vardinių įtampų.

Nuolatinę srovę nuo 10 mA iki 100 A galima išmatuoti ir **elektromagnetinės bei elektrodinaminės sistemos ampermetrais**. Ir vienu, ir kitų skalė yra netolygi. Elektromagnetiniai ampermetrai yra gana pigūs, bet jų tikslumo klasė paprastai esti ne aukštesnė kaip 0,2; 0,5. Elektrodinaminiai ampermetrai gali būti tikslesni, bet jie yra brangesni. Ir vieni, ir kiti vartoja daugiau energijos nei magnetoelektri-



8.28 pav. Grandinė, kurios srovė matuojama: a – ampermetras neįjungtas; b – įjungus ampermetrą



8.29 pav. Ampermetras su vienriu šuntu (a) ir daugiariu šuntu (b)

niai, todėl labiau pakeičia matuojamosios grandinės rezimą.

Kai reikia labai tiksliai išmatuoti nuolatinę srovę, taikomi kompensatoriai arba skaitmeniniai ampermetrai. Kompensatoriumi (žr. 8.7.3) išmatuojamas įtampos kritimas, gautas etaloniniame rezistoriuje, kai juo teka matuojamoji srovė.

Labai silpną nuolatinę srovę ($10^{-6} - 10^{-8}$ A) galima išmatuoti magnetoelektriniu veidrodiniu galvanometru arba elektroniniu mikroampermetru.

Kintamoji srovė apibūdinama efektine, amplitudine arba vidutine verte. Elektromagnetinės, elektrodinaminės, ferodinaminės sistemos prietaisai (žr. 8.4) reaguoja į efektingą srovės vertę. Lygintuviniai ir elektroniniai ampermetrai paprastai sugraduojami efektingomis sinusinių srovių vertėmis. Kai srovė nesinusinė, gaunamos papildomos paklaidos.

Vidutinio stiprumo kintamosioms srovėms – nuo 1 mA – galima naudoti elektromagnetinius (iki 250 A), elektrodinaminčius, ferodinaminčius (iki 10 A), lygintuvinius prietaisus, taip pat elektroninius bei skaitmeninius miliampermetrus ir ampermetrus, atsižvelgiant į anksčiau minėtus kiekvienos sistemos prietaisų privalumus ir trūkumus.

Silpna kintamoji srovė iki 10 μ A matuojama elektroniniais mikroampermetrais, nuo 10 iki 100 μ A – skaitmeniniais mikroampermetrais, kurių tikslumas ne mažesnis kaip 0,5 %, kai matuojamosios srovės dažnis ne didesnis kaip 5 kHz.

Kai matuojamoji kintamoji srovė yra stipri (šimtai amperų), naudojami srovės matavimo transformatoriai (žr. 9.5.2).

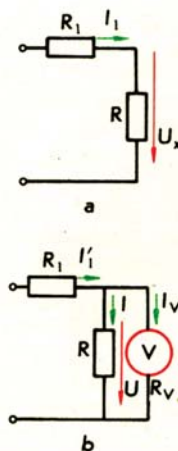
8.7.2. Įtampos matavimas. Voltmetras jungiamas lygiagrečiai tai grandinės daliai, kurioje yra matuojama įtampa. Kadangi realaus voltmetro varža nėra be galo didelė, grandinės srovė ir matuojamoji įtampa pakinta (8.30 pav.).

Tarkime, kad matuojamoji įtampa U , tampa lygi U . Santykinė metodinė paklaida: $\delta_V = (U - U_x)/U$. Apskaičiuavę iš Omo dėsnio matuojamąją įtampą, kai voltmetro nėra ir kai jis įjungtas, ir laikydami, kad $R_V \gg R$, gauname:

$$\delta_V \approx -\frac{R/R_V}{1 - R/R_V} \approx -R/R_V. \quad (8.39)$$

Metodinė paklaida tuo mažesnė, kuo $R_V \gg R$.

Nuolatinė įtampa nuo 1 mV iki 1,5 kV paprastai matuojama magnetoelektrinės sistemos voltmetrais, kurių matavimo tikslumas yra gana didelis (0,1; 0,2 klasės). Voltmetro matavimo riboms praplėsti yra naudojami papildomieji rezistoriai, jungiami nuosekliai su prietaisu (8.31 pav.).



8.30 pav. Grandinė, kurios imtuvo R įtampa matuojama: a – voltmetras neprijungtas; b – prijungus voltmetrą

Kai prie voltmetro prijungiamas nuoseklusis rezistorius, kurio varža lygi R_s , galima matuoti įtampą $U = (R_V + R_s)I_V = (R_V + R_s)(U_V/R_V)$. Gauname

$$R_s = R_V(n_s - 1); \quad (8.40)$$

čia $n_s = U/U_V$ – nuoseklojo rezistoriaus koeficientas, rodantis, kiek kartų matuojamoji įtampa yra didesnė už tenkančią voltmetriui.

Nuoseklieji rezistoriai gali būti įmontuoti daugiaribiose voltmetruose arba prijungiami atskirai. Nuoseklusis rezistorius parenkamas taip, kad jo vardinė srovė būtų tokia pat, kaip voltmetro. Nuosekliųjų rezistorių tikslumo klasės (nuokrypis procentais nuo vardinės vertės) yra 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0. Vardinės srovės – nuo 0,5 iki 30 mA.

Elektrodinaminiais voltmetrais matuojamos nuolatinės įtampos nuo 100 mV iki 600 V. Jų tikslumas didelis (0,1; 0,2 klasė), bet skalė netolygi. **Elektromagnetiniais** voltmetrais (0,2; 0,5 klasė) matuojamos įtampos nuo 1 iki 75 V.

Nuolatinėi įtampai nuo 10 V iki 300 kV matuoti naudojami **elektrostatiniai** voltmetrai. Jų tikslumo klasė 0,5; 1,0; 1,5 (esti net 0,05); labai didelė vidinė varža $10^{10} - 10^{12} \Omega$; vidinė talpa 4 – 65 pF. Gaminama jų nedaug, ir jie brangūs. Jų matavimo ribos nuolatinės srovės grandinėse praplečiamos rezistoriniais įtampos dalytuvais (8.32 pav., a).

Mažesnę kaip 600 V nuolatinę įtampą galima išmatuoti **elektromagnetiniais voltmetrais**, bet jų tikslumo klasės yra vidutinės (0,5; 1,0). Dideliu tikslumu nuolatinę įtampą matuojama: iki kelių kilovoltų – **skaitmeniniais voltmetrais**; iki 1000 V – **kompensatoriais** (žr. 8.7.3).

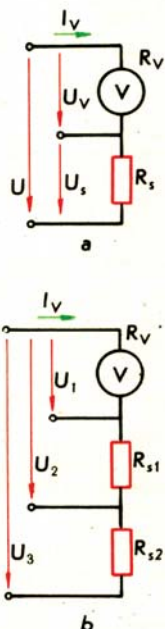
Labai maža nuolatinė įtampa matuojama **kompensatoriais** ($10^{-5} - 10^{-6}$ V), **skaitmeniniais mikrovoltmetrais** (10^{-5} V) ir **elektroniniais nanovoltmetrais** ($10^{-6} - 10^{-7}$ V).

Kintamajai pramoninio dažnio įtampai matuoti naudojami **elektromagnetiniai, elektrodinaminiai, ferodinaminiai, elektrostatiniai** voltmetrai, atsižvelgiant į kiekvieno savybes. Matuojamos efektinės įtampos vertės.

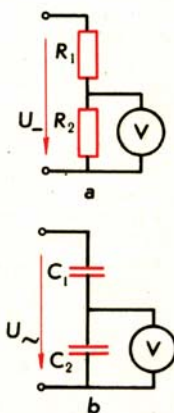
Labai maža kintamoji įtampa ($10^{-6} - 10^{-7}$ V) matuojama **elektroniniais mikrovoltmetrais**.

Aukšta kintamoji įtampa pažeminama įtampos matavimo transformatoriumi (žr. 9.5.2), kad būtų galima naudoti vidutinių įtampų (paprastai 100 V) voltmetrus. Kai aukštai kintamajai įtampai matuoti naudojami elektrostatiniai voltmetrai, jų matavimo ribas galima praplėsti kondensatoriniais įtampos dalytuvais (8.32 pav., b).

8.7.3. EVJ matavimas; kompensatorius. Šaltinio EVJ būtų galima išmatuoti tokiu tiesioginės atskaitos voltmetru, kurio vidinė varža be galo didelė ir kuriuo srovė nete-



8.31 pav. Voltmetras su vienribiu (a) ir daugiaribio nuosekloju rezistoriumi (b)



8.32 pav. Elektrostatinis voltmetras su įtampos dalytuvu: a – rezistoriniu ir b – kondensatoriniu

ka. Apytiksliai nuolatinę EVJ, didesnę kaip 10 V, galima išmatuoti elektrosstatiniu voltmetru, o mažesnę – skaitmeniniu.

Netiesiogiai EVJ galima matuoti kompleksiniu metodu. Tarkime, kad, prijungę imtuvą prie šaltinio, kurio EVJ yra E ir vidinė varža R_1 , išmatavome imtuvo įtampą ir srovę: U_1 ir I_1 . Prijungę prie to paties šaltinio kitą imtuvą, gauname srovę I_2 ir įtampą U_2 . Sudarę ir išsprendę lygčių sistemą

$$\begin{cases} E = U_1 + R_1 I_1; \\ E = U_2 + R_1 I_2, \end{cases}$$

gauname matuojamosios šaltinio EVJ ir vidinės varžos vertes.

Kompleksinis metodas nėra tikslus, nes gaunamos srovės ir įtampos matavimo metodinės paklaidos. Be to, matuojamąjį dydį reikia apskaičiuoti. Antra vertus, šis metodas yra paprastas ir nereikia jokių specialių EVJ matavimo prietaisų.

Kompensatoriai (kitais dar vadinami potenciometrais) naudojami labai tiksliai matuoti elektrovaros jėgai. Jais matuojamoji EVJ palyginama su etalonine.

Nuolatinės srovės kompensatoriaus veikimo principą paaiškinsime pagal supaprastintą jo schemą (8.33 pav.). Pradžioje jungiklis S įjungiamas į padėtį 1 ir reostato R_0 slankiklis stumiamas tol, kol galvanometras (mikroampermetras) parodo, kad etaloniniu šaltiniu E_e srovė neteka. Tai reiškia, kad įtampos kritimas etaloniniame rezistoriuje R_e kompensuoja EVJ E_e : $E_e = R_e I$.

Perjungus jungiklį į padėtį 2, potenciometro R slankiklis stumiamas tol, kol galvanometras parodo nulį. Įtampos kritimas potenciometro varžoje R_x kompensuoja EVJ E_x : $E_x = R_x I$; čia I yra ta pati srovė, kuri buvo nustatyta reostatu R_0 ir kuri nepriklauso nuo neapkrauto potenciometro R slankiklio padėties (žr. 1.5.2). Matome, kad $I = E_e/R_e = E_x/R_x$. Matuojamoji EVJ $E_x = (E_e/R_e)R_x$ arba

$$E_x = CR_x.$$

(3.41)

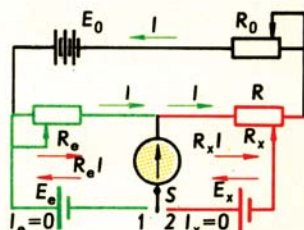
Kadangi E_e ir R_e dydžiai yra tiksliai žinomi (R_e tenka šiek tiek pareguliuoti, norint panaikinti varžos ir E_e pokyčius dėl aplinkos temperatūros pasikeitimo), todėl pagal potenciometro R rankenėlės padėtį voltų dalimis sugraduotoje skalėje galima iš karto atskaityti matuojamosios EVJ vertę.

Matuojant EVJ kompensatoriumi, metodinių paklaidų nėra (srovė šaltiniu neteka, neturi įtakos laidų varža). Nuolatinės srovės kompensatoriai yra labai didelio tikslumo palyginimo prietaisai. Jų tikslumo klasės: 0,001; 0,002; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Didžiausia EVJ, kurią galima išmatuoti kompensatoriumi, yra apie 2 V. Didesnes EVJ (iki 1000 V) galima išmatuoti, prijungus prie kompensatoriaus dalį matuojamosios įtampos per įtampos dalytuvą.

Kompensatoriai naudojami matuoti įtampai ir kitiems elektriniams dydžiams, kuriuos galima pakeisti nuolatine įtampa, taip pat rodyklinių prietaisų (ampermetrų, voltmetrų, vatmetrų) patikrai.

Kintamosios srovės kompensatoriai yra sudėtingesni ir mažiau tikslūs. Aukščiausios jų tikslumo klasės yra 0,1; 0,2. Jie taikomi EVJ, įtampoms, fazėms ir kitiems elektriniams dydžiams matuoti, pakeitus juos įtampa.

Automatiniai potenciometrai sudaro galimybę EVJ matavimus automatizuoti. Vietoj galvanometro (žr. 8.33 pav.) įjungiamas elektroninis stiprintuvas, iš kurio sustiprintas signalas patenka į reversinį



8.33 pav. Nuolatinės srovės kompensatorius

variklį. Pastarasis tol suka (ar stumia) potenciometro R slankiklį, kol signalas išnyksta, t. y. matuojamuoju EVJ šaltiniu srovė nebeteka. Įtaisius rašymo įrenginį, matuojamąją EVJ vertę galima užregistruoti.

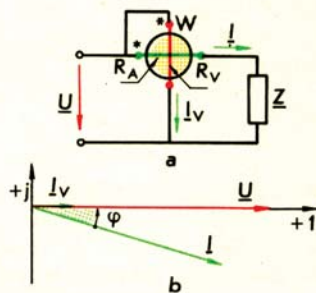
8.8

Galios ir energijos matavimas

8.8.1 Vatmetras; vienfazės grandinės galios matavimas.

Nuolatinės srovės grandinės galia $P = UI$. Ją galima apskaičiuoti išmatavus apkrovos įtampą ir srovę (pvz., magnetoelektrinės sistemos voltmetro ir ampermetru). Praktikoje toks netiesioginis galios matavimo būdas naudojamas labai retai, nes reikia matuoti dviem prietaisais ir rezultatai apskaičiuoti.

Paprastai nuolatinės srovės grandinių galia, taip pat kintamosios srovės vienfazių ir trifazių grandinių aktyvioji galia matuojama elektrodinaminiais (dažniau – laboratorijose) tikslumo klasės – 0,1; 0,2; 0,5 – ar ferodinaminiais (dažniau – pramonėje) tikslumo klasės – 1,0; 1,5; 2,5 – vatmetrais. Jais galima matuoti ir reaktyviąją galią, taikant specialias jų įjungimo į matuojamąją grandinę schemas.



8.34 pav. Elektrodinaminio vatmetro jungimo schema (a) ir srovių vektorinė diagrama (b)

Elektrodinaminio vatmetro matuoklį sudaro dvi ritės: srovės (nejudamoji) ir įtampos (judamoji). Srovės ritė (jos varža R_A) jungiama į matuojamąją grandinę nuosekliai (8.34 pav.), t. y. taip, kad ja tekėtų apkrovos srovė I . Įtampos ritė (jos varža R_V) jungiama lygiagrečiai apkrovai, kad jai tektų apkrovos įtampa U .

Matuojant gaunama **metodinė paklaida, kuri tuo mažesnė, kuo $R_A \ll Z$ ir $R_V \gg Z$** . Kai vatmetro ritėmis tekančių I ir I_V srovių dažnis $f \leq 3-4$ kHz, įtampos ritės induktyviosios varžos galima nepaisyti ($X_V \approx 0$).

Įjungus vatmetrą į nuolatinės srovės grandinę, jo rodyklės posūkio kampas (žr. (8.25) lygybę): $\alpha = C_1 I_1 I_2 = C_1 I I_V = C_1 I (U/R_V)$. Vatmetro skalės lygtis:

$$\alpha = CUI. \quad (8.42)$$

Tarkime, kad įjungėme vatmetrą į kintamosios įtampos grandinę (apkrovos $Z = Ze^{j\varphi}$, $\varphi > 0$) aktyviajai galiai išmatuoti. Tokio imtuvo srovė I atsilieka faze φ nuo įtampos \underline{U} (žr. 8.34 pav., b), vatmetro įtampos ritės srovė $I_V = U/R_V$ ir įtampa faze su įtampa \underline{U} ($X_V \approx 0$).

Pagal (8.26) lygybę vatmetro rodyklės posūkio kampas:

$$\alpha = C_2 I_1 I_2 \cos(\psi_1 - \psi_2) = C_2 I (U/R_V) \cos(\varphi - 0)$$

arba

$$\alpha = CUI \cos \varphi. \quad (8.43)$$

Elektrodinaminio vatmetro skalės lygtis užrašoma tiesės lygtimi šitaip:

$$\alpha = CP; \quad (8.44)$$

čia C – prietaiso konstanta, P – nuolatinės srovės grandinės galia arba kintamosios srovės grandinės aktyvioji galia.

Skalė yra tolygi. Paprastai ji turi 75, 100 ar 150 padalų. Nuosekliais rezistoriais ir šuntais galima keisti įtampos ir srovės matavimo ribas, todėl **vatmetru** paprastai **apskaičiuojama padalos vertė:**

$$C_P = U_N I_N / N_N; \quad (8.45)$$

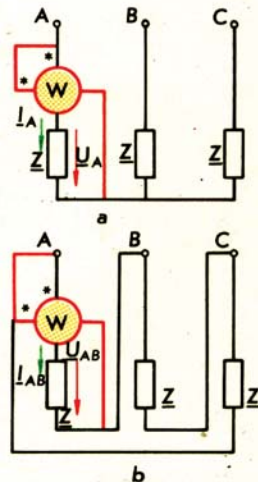
čia U_N ir I_N – įtampos ir srovės ritės matavimo ribos; N_N – vatmetro skalės padalų skaičius.

Reikia pažymėti, kad **apkrova tekanti srovė neturi būti didesnė už vatmetro srovės matavimo ribą, o įtampa – už įtampos matavimo ribą.** Vatmetro srovės ir įtampos matavimo ribas kintamosios srovės grandinėse galima praplėsti srovės ir įtampos matavimo transformatoriais (žr. 9.5.2).

8.6 pavyzdys. Elektrodinaminio vatmetro įtampos matavimo ribos yra 75–150–300–600 V, srovės – 1 ir 2 A. Jo padalų skaičius 150. Pasirinkime vatmetro srovės ir įtampos matavimo ribą, kai apkrovos įtampa yra apie 220 V, o srovė gali kisti nuo 1,1 A iki 1,9 A. Apskaičiuokime vatmetro padalos vertę pasirinktoms matavimo riboms.

Sprendimas. Reikia pasirinkti tokias abiejų dydžių matavimo ribas, kad jos būtų artimiausios didesnės už galimas apkrovos įtampas bei sroves. Šiuo atveju $U_N = 300$ V, $I_N = 2$ A. Vatmetro padalos vertė $C_P = U_N I_N / N_N = 300 \cdot 2 / 150 = 4$ W. Matuojamoji galia bus lygi padalų skaičiaus, kurį rodo prietaisas, ir padalos vertės sandaugai.

Žvaigždutėmis (arba taškais) pažymėti vatmetro gnybtai yra vadinami generatoriniais. Kai srovės ir įtampos generatoriniai gnybtai yra prijungiami iš šaltinio pusės (žr. 8.34 pav.), vatmetro rodyklė pasisuka teigiama (laikrodžio rodyklės judėjimo) kryptimi. Šia vatmetro savybe galima pasinaudoti, kai reikia spręsti, kokioje pusėje yra šaltinis, t. y. kokia kryptimi tiekama elektros energija.



8.35 pav. Fazinės aktyviosios galios matavimo schema, kai trifazis simetrinis imtuvas sujungtas žvaigžde (a) ir trikampiū (b)

8.8.2. Trifazės grandinės aktyviosios galios matavimas. Trifazio simetrinio imtuvo aktyvioji galia $P = 3P_f$, todėl pakanka vatmetru išmatuoti fazinę galią P_f (8.35 pav.). Imtuvo galia yra tris kartus didesnė už tą, kurią rodo vatmetras: $P = 3P_w$.

Trilaidėje trifazėje grandinėje aktyviąją galią galima išmatuoti dviem vatmetrais (8.36 pav.).

Trilaidės grandinės momentinė galia yra lygi atskirų fazių momentinių galių sumai:

$$p = p_A + p_B + p_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C. \quad (8.46)$$

Trilaidėje grandinėje $i_A + i_B + i_C = 0$ (žr. 3.2 ir 3.3). Iš čia $i_B = -i_A - i_C$. Įrašę i_B srovės reikšmę į (8.46), gauname:

$$p = u_A i_A - u_B i_A - u_B i_C + u_C i_C = (u_A - u_B) i_A + (u_C - u_B) i_C.$$

Pakeičę fazinių įtampų skirtumą linijinėmis įtampomis, gauname:

$$p = u_{AB} i_A + u_{CB} i_C.$$

Aktyvioji galia yra vidutinė momentinės galios vertė:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T (u_{AB} i_A + u_{CB} i_C) dt = U_{AB} I_A \cos \alpha + U_{CB} I_C \cos \beta; \quad (8.47)$$

čia α ir β – linijinių srovių I_A ir I_C fazių skirtumas linijinių įtampų U_{AB} ir U_{CB} atžvilgiu.

Iš (8.47) lygybės matome, kad aktyvioji galia yra lygi dviejų galių sumai: $P = P_1 + P_2$. Nesunku įsitikinti (žr. 8.36 pav.), kad galią P_1 rodyd pirmasis, o galią P_2 – antrasis vatmetras.

Bendruoju atveju du vatmetrai jungiami taip, kad bet kurios dvi linijinės srovės tekėtų jų srovės ritėmis. Kiekvieno vatmetro įtampos ritės generatorinis gnybtas yra jungiamas prie jo paties srovės generatorinio gnybto. Abiejų vatmetrų įtampos ričių laisvi galai prijungiami prie trečiojo linijinio laido.

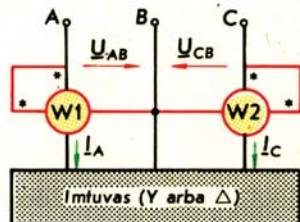
Keturlaidės trifazės grandinės aktyvioji galia matuojama trimis vatmetrais (8.37 pav.):

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C. \quad (8.48)$$

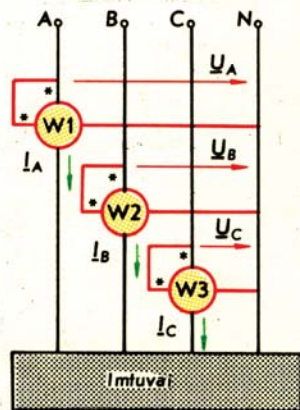
Pramoniniams aktyviosios galios matavimams išleidžiami dviejų ir trijų elementų trifaziai ferodinaminiai vatmetrai. Pavyzdžiui, dviejų elementų vatmetrą sudaro dvi nejudamos ritės ir dvi judamosios, kurios yra sustirtintos mechanškai. Įjungus tokį vatmetrą pagal dviejų vatmetrų jungimo schemą, jo rodyklės posūkio kampas yra proporcingas abiejų judamųjų dalių mechaninių momentų algebrinei sumai. Dėl to vatmetras iš karto rodo visos trilaidės trifazės grandinės aktyviąją galią. Trijų elementų vatmetras jungiamas pagal trijų vatmetrų jungimo schemą ir rodo keturlaidės trifazės grandinės galią.

8.8.3. Reaktyviosios galios matavimas. Reaktyvioji galia kintamosios srovės grandinėje $Q = UI \sin \varphi$. Jai išmatuoti reikia matavimo prietaiso, kurio rodyklės posūkio kampas būtų proporcingas ne $\cos \varphi$, bet $\sin \varphi$. Vienfazių grandinių reaktyviąją galią tenka matuoti tik laboratoriniuose eksperimentuose, todėl paprastai tam tikslui naudojami vatmetrai, jungiami pagal specialias schemas.

Trifazės grandinės reaktyvioji galia matuojama vienfaziais vatmet-



8.36 pav. Trilaidės trifazės grandinės galios matavimo dviem vatmetrais schema



8.37 pav. Keturlaidės trifazės grandinės galios matavimo trimis vatmetrais schema

rais (vienu, dviem arba trim), taip pat dviejų ar trijų elementų elektrodinaminiais ar ferodinaminiais varmetrais, kurių konstrukcija visai tokia pat kaip trifazių vatmetrų. Ir vatmetrai, ir varmetrai turi būti jungiami šitaip: 1) srovės ritės jungiamos taip kaip matuojant aktyviąją galią (žr. 8.34–8.37 pav.); 2) įtampos ritės turi būti įjungtos taip, kad joms tekėtų įtampa, atsiliekanti 90° faziniu kampu nuo tos, kurią turi gauti įtampos ritė matuojant aktyviąją galią.

Tarkime, kad vienu vatmetru norime išmatuoti simetrinio žvaigždės sujungto imtuvo (8.38 pav.) reaktyviąją galią. Vatmetro srovės ritė teka srovė I_A , o jo įtampos ritė turi tekėti įtampa U_{BC} , kuri 90° faziniu kampu atsilieka nuo fazinės įtampos U_A . Vatmetras rodo:

$$P_W = U_{BC} I_A \cos(\widehat{U_{BC}, I_A}) = U_{BC} I_A \cos(90^\circ - \varphi) = U_I I_I \sin \varphi. \quad (8.49)$$

Simetrinio imtuvo reaktyvioji galia $Q = \sqrt{3} U_I I_I \sin \varphi$, todėl

$$Q = \sqrt{3} P_W, \quad (8.50)$$

t. y. tą galią, kurią rodo vatmetras, turime padauginti iš $\sqrt{3}$.

8.8.4. Energijos matavimas. Aktyvioji ir reaktyvioji energija matuojama indukciniiais skaitikliais (žr. 8.4.5), kurie gali būti vienfaziai arba dviejų ar trijų elementų trifaziai.

Vienfazis aktyviosios energijos skaitiklis jungiamas į grandinę taip (8.39 pav.), kad jo srovės ritė (jos varža maža $R_A \approx 0$) tekėtų apkrovos srovė I , o įtampos ritė tekėtų apkrovos įtampa U .

Įtampos ritės induktyvioji varža $X_V \gg R_V$, todėl laikysime, kad $R_V \approx 0$, ir įtampos ritė teka srovė $I_V = U/X_V$, kuri faze $\pi/2$ atsilieka nuo įtampos U .

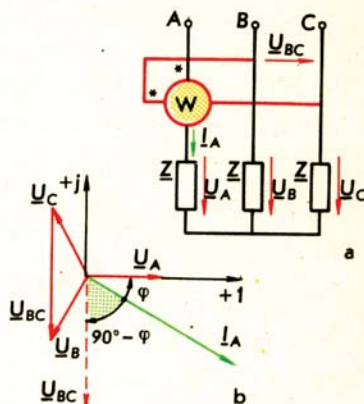
Iš vektorinės diagramos (8.40 pav.), kuri nubraižyta aktyvaus – induktyvaus pobūdžio imtuvui ($\varphi > 0$), matome, kad kampas tarp skaitiklio ritėmis tekančių srovių vektorių I ir I_V yra lygus $(90^\circ - \varphi)$. Įrašę srovės ir kampą į (8.33) lygybę, gauname:

$$N = C_s \int_{t_1}^{t_2} I (U/X_V) \sin(90^\circ - \varphi) dt = C_s \int_{t_1}^{t_2} UI \cos \varphi dt = C_s \int_{t_1}^{t_2} P dt.$$

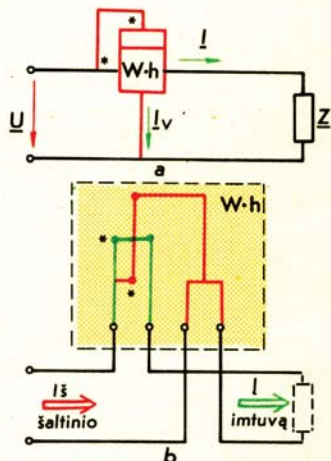
Suvartota aktyvioji energija

$$W_a = C_N N, \quad (8.51)$$

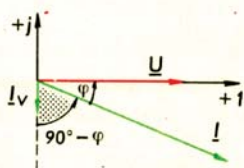
t. y. ji proporcinga skaitiklio sūkių skaičiui per tą patį laiką.



8.38 pav. Trifazio simetrinio imtuvo reaktyviosios galios matavimo schema (a) ir įtampų vektorinė diagrama (b)



8.39 pav. Vienfazio aktyviosios energijos skaitiklio jungimo schema: a – principinė ir b – montazinė



8.40 pav. Vienfazio aktyviosios energijos skaitiklio vektorinė diagrama

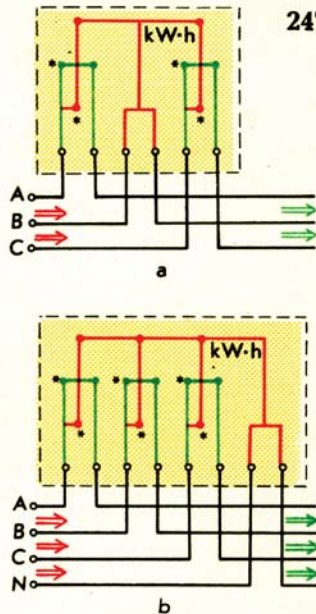
Skaitiklio sūkių skaičių fiksuoja skaičiavimo mechanizmas. Paprastai jo skaitmenys iš karto rodo suvartotą elektros energiją kilovatvalandėmis.

Kartais tenka matuoti elektros energiją tiksliau. Tam skaitiklio skalėje užrašomas sūkių skaičius vienai kilovatvalandei. Pavyzdžiui, nurodyta, kad 1 kW·h atitinka 1280 disko sūkių. Tai reiškia, kad varadinė skaitiklio konstanta $C_N = 1000 \cdot 3600 / 1280 = 2812,5$ W·s. Norėdami sužinoti, kiek suvartota aktyviosios energijos, turime padauginti šią konstantą iš disko sūkių skaičiaus per mus dominantį laiką.

Elektros energijos skaitiklių tikslumo klasės gali būti 0,5; 1,0; 2,0; 2,5. Šie skaičiai rodo leistiną santykinę (ne redukuotąją, kaip analoginių rodyklinių prietaisų) paklaidą, esant tam tikrai standarte nurodytai apkrovai.

Trifazėse grandinėse aktyvioji ir reaktyvioji elektros energija matuojama trifaziais skaitikliais, kurių judamosios dalies mechaninis momentas yra lygus dviejų ar trijų judamųjų dalių mechaninių momentų algebrinei sumai. Skaitiklių jungimo schemas yra tokios pat kaip vatmetrų (8.41 pav.).

Kintamosios srovės ir įtampos ričių matavimo ribas galima praplėsti matavimo transformatoriais (žr. 9.5.2).



8.41 pav. Aktyviosios energijos skaitiklių montажinės jungimo schemas: a – trilaidėje ir b – keturlaidėje trifazėje sistemoje

8.9

Elektrinių parametrų matavimas

Prie elektrinių parametrų priskirsime elektrinės grandinės elementų (imtuvų) varžą (aktyviają), induktyvumą ir talpą. Juos galima matuoti tiesiogiai – tiesioginės atskaitos ar palyginimo prietaisais – ir netiesiogiai – apskaičiuoti pagal žinomą ryšį tarp išmatuotų ir ieškomojo dydžio.

Praktikoje dažniausiai tenka matuoti varžas. Jų matavimo ypatumai priklauso nuo matuojamosios varžos didumo. Paprastai iki 10Ω varžos laikomos mažomis, nuo 10 iki $10^6 \Omega$ – vidutinėmis ir didesnės nei $10^6 \Omega$ – didelėmis. Matuojant mažas varžas, reikia ypač atkreipti dėmesį į tai, kad matavimo rezultatui neturėtų įtakos kontaktų varžos, o matuojant dideles varžas – nuotėkio srovės.

8.9.1. Varžos matavimas ommetru. Ommetras – tiesioginės atskaitos prietaisas (dažniausiai magnetoelektrinės sistemos miliampermetras), kuriame yra įmontuotas nuolatinės EVJ šaltinis ir nuoseklus rezistorius R_s (8.42 pav.). Kai elementas, kurio varža R_x matuojama, yra įjungtas nuosekliai su miliampermetru, grandinės srovė $I = E / (R_x + R_s + R_A + R_l)$. Prietaiso rodyklės posūkių kampas

$$\alpha = f(1/R_x), \quad (8.52)$$

todėl **jo skalė yra atvirkštinė ir netolygi.**

Kad matavimo rezultatui neturėtų įtakos EVJ šaltinio parametrai, prieš matuojant ommetro gnybtai sujungiami trumpai ($R_x=0$). Keičiant matuoklio nuosekliojo rezistoriaus varžą R_s , pasiekama, kad miliampermetru tekėtų didžiausia srovė ir jo rodyklė rodytų nulį. Tik po to galima laikyti, kad prietaisas yra parengtas varžoms matuoti. Taip pat varžos yra matuojamos lygintuvinės sistemos ampervoltmetru (testeriu).

Yra ommetrų, prie kurių matuojamosios varžos elementas prijungiamas lygiagrečiai miliampermetrui (žr. 8.42 pav., b). Tokių ommetrų skalė netolygi ir jos nulinė žymė yra iš kairės. Šiais ommetrais matuojamos mažos varžos.

Svarbiausias ommetro privalumas yra tas, kad jais varža matuojama tiesiogiai. Antra vertus, matavimo tikslumas nedidelis, todėl ommetrais paprastai tik apytiksliai operatyviai nustatomas varžos didumas.

8.9.2. Varžos matavimas megommetru. Tai prietaisas didelėms varžoms matuoti, kurį sudaro **magnetoelektrinis logometras, EVJ šaltinis ir žinomos varžos R rezistorius** (8.43 pav.). Nepaisydami prietaiso ričių varžos ir generatoriaus vidinės varžos, galime užrašyti srovės, tekančias matavimo metu: $I_1 = E/R$; $I_2 = E/R_x$.

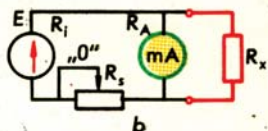
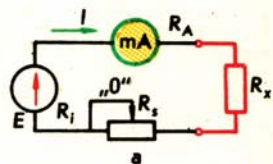
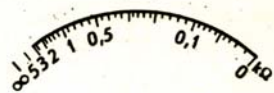
Kadangi magnetoelektrinio logometro posūkio kampas yra proporcingas jo ritėmis tekančių srovių santykiui (žr. (8.34) lygybę), gauname:

$$\alpha = f(R_x/R). \quad (8.53)$$

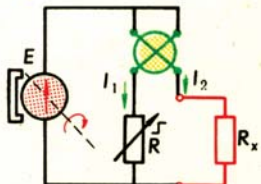
Keičiant vidinio rezistoriaus varžą R , keičiama varžų matavimo riba. Megommetre įmontuojamas ranka sukamas nuolatinės srovės generatorius, kurio įtampa gali būti 500, 1000 ar 2000 V.

Megommetras yra skirtas izoliacijos varžoms tiesiogiai matuoti. Matavimo tikslumas nėra didelis, bet pakankamas izoliacijos kokybei įvertinti.

8.9.3. Varžos matavimas ampermetru ir voltmetru. Tai netiesioginis varžos matavimo būdas, kai varža yra apskaičiuojama iš Omo dėsnio: $R = U_V/I_A$, čia U_V ir I_A – įtampa ir srovė, išmatuotos voltmetru ir ampermetru.



8.42 pav. Ommetrų schemas, kai matuoklis jungiamas nuosekliai (a) ir lygiagrečiai (b) su matuojamuoju elementu



8.43 pav. Megommetro schema

Ampermetrą ir voltmetrą galima įjungti dvejopai.

I. Sujungus pagal 8.44 pav., a, schemą, voltmetras, kurio varža yra R_V , rodo matuojamojo elemento, kurio varža yra R_x , įtampą U . Ampermetras rodo srovę $I_A = I + I_V$, todėl iš Omo dėsnio apskaičiuavę gaušime, kad matavimo rezultatas

$$R = \frac{U}{I + I_V} = \frac{U}{U/R_x + U/R_V} = \frac{R_x}{1 + R_x/R_V}.$$

Santykinė metodinė paklaida $\delta_V = (R - R_x)/R_x$. Irašę gautą varžos R reikšmę, turime:

$$\delta_V = -1/(1 + R_V/R_x). \quad (8.54)$$

Metodinė paklaida bus tuo mažesnė, kuo $R_x \ll R_V$, todėl ši schema paprastai taikoma mažoms varžoms matuoti.

Metodinės paklaidos galima visiškai išvengti, jeigu voltmetro varža R_V yra žinoma. Kadangi voltmetras ir elementas R_x yra sujungti lygia-greičiai, $1/R = 1/R_V + 1/R_x$. Iš čia matuojamoji varža:

$$R_x = RR_V/(R_V - R). \quad (8.55)$$

II. Sujungus prietaisus pagal 8.44 pav., b, schemą, ampermetras, kurio varža yra R_A , rodo srovę I , o voltmetras – įtampos U ir įtampos kritimo ampermetre U_A sumą. Matavimo rezultatas: $R = (U + U_A)/I = (U/I) + (U_A/I) = R_x + R_A$. Santykinė metodinė paklaida

$$\delta_A = (R - R_x)/R_x = R_A/R_x \quad (8.56)$$

yra tuo mažesnė, kuo $R_A \ll R_x$, todėl pastaroji schema taikoma didelėms varžoms matuoti.

Kai ampermetro varža R_A yra žinoma, metodinės paklaidos galima išvengti, pridėjus prie matavimo rezultato pataisą:

$$R_x = R - R_A. \quad (8.57)$$

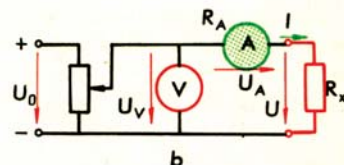
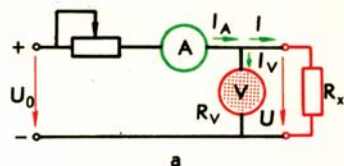
Svarbiausias varžų matavimo ampermetru ir voltmetru privalumas yra tas, kad matavimo tikslumas gali būti didesnis, negu matuojant varžą ommetru. Trūkumas: reikia atskaityti dviejų prietaisų rodmenis, o matavimo rezultatą apskaičiuoti.

8.9.4. Varžos matavimas tilteliu.

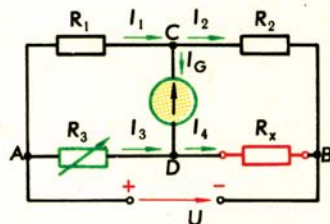
Nuolatinės srovės tiltelis yra toks palyginimo prietaisas, kuriuo galima labai tiksliai išmatuoti varžą. Tai grandinė (8.45 pav.), kurią sudaro keturi rezistoriai (varža R_x matuojama), nuolatinės įtampos U šaltinis ir galvanometras.

Keičiant vieno (pvz., R_3) rezistoriaus varžą, galima pasiekti, kad tiltelis būtų pusiausvyras. Tuomet galvanometro rodyklė rodo nulį (paprastai nulinė žymė esti skalės viduryje); galvanometru srovė neteka, nes mazgų C ir D potencialai tampa vienodi.

Kadangi $U_{CD} = 0$, galime parašyti: $R_1 I_1 = R_3 I_3$ ir $R_2 I_2 = R_x I_4$. Iš I Kirchhofo dėsnio mazgams C ir D , kai $I_G = 0$: $I_1 = I_2$; $I_3 = I_4$. Padaliję parašytas įtampos lygtis viena iš kitos ir įvertinę šias srovių lygtis, gauname tiltelio pusiausvyros sąlygą: $R_1/R_2 = R_3/R_x$ arba $R_1 R_x = R_2 R_3$. Iš čia: $R_x = (R_2/R_1) R_3$.



8.44 pav. Schema mažoms (a) ir didelėms (b) varžoms matuoti ampermetru ir voltmetru



8.45 pav. Nuolatinės srovės tiltelis

Matuojamoji varža

$$R_x = CR_3. \quad (8.58)$$

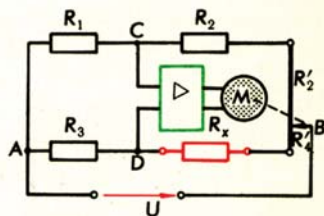
Paprastai reguliuojamos varžos rezistoriaus R_3 rankenėlė sugraduojama matuojamosios varžos vienetais, todėl nustatčius galvanometro rodyklę ties nuline žyme, matuojamąją R_x galima atskaityti iš karto.

Varžų matavimo tiltelių rezistoriai yra etaloniniai – jų varžos tiksliai žinomos, naudojamas jautrus magnetoelektrinis galvanometras, kurio rodyklę galima tiksliai nustatyti nulinėje padėtyje. Šaltinio įtampos svyravimai neturi įtakos matavimo rezultatui. Dėl visų šių priežasčių nuolatinės srovės pusiausvrais tilteliais varžas galima išmatuoti labai tiksliai: santykinės paklaidos – nuo 0,002 iki 0,5 %.

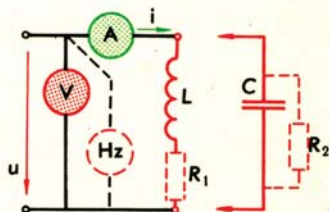
Varžą galima matuoti ir nepusiausviro tilteliu. Kai įtampa U ir trijų tiltelio pečių varžos – R_1 , R_2 ir R_3 – yra tam tikro didumo, galvanometro srovė I_G priklauso nuo matuojamosios varžos R_x vertės. Sugradavus jo skalę varžos vienetais, galima iš karto atskaityti matuojamosios R_x vertę. Tokių matavimų tikslumas nedidelis (0,5–2,0 %). Šiuo principu naudojamas neelektriniams dydžiams matuoti (žr. 8.10).

Gamybinėmis sąlygomis varžoms matuoti dažnai naudojami automatiniai tilteliai (8.46 pav.). Į du tiltelio pečius – BC ir BD – įjungtos dvi reguliuojamo reostato (reochordo) dalys R'_2 ir R'_1 . Kol tiltelis yra nepusiausviris, įtampa U_{CD} patenka į stiprintuvą, iš kurio sustiprintas signalas yra paduodamas į reversinį variklį M . Pastarasis tol stumia reochordo slankiklį, kol įtampa U_{CD} tampa lygi nuliui. Pakėitus matuojamąją R_x , tiltelis vėl automatiškai subalansuojamas.

Paprastai reochordas yra sugraduojamas varžos vienetais, o prie jo rankenėlės pritvirtinama rodyklė su plunksna. Matuojamąją varžą galima atskaityti ir užregistruoti judančioje diagraminio popieriaus juostoje. Matavimo paklaidos – 0,2–1,0%.



8.46 pav. Automatinis nuolatinės srovės tiltelis



8.47 pav. Schema apytiksliai matuoti induktyvumui arba talpai

8.9.5. Induktyvumo ir talpos matavimas. Apytiksliai L ir C matavimams galima panaudoti ampermetrą ir voltmetrą (8.47 pav.). Tarkime, kad norime išmatuoti aktyvaus induktyvaus pobūdžio imtuvo induktyvumą. Žinome, kad pilnutinė imtuvo varža $Z = \sqrt{R_1^2 + (2\pi fL)^2} = U/I$. Iš čia

$$L = \sqrt{(U/I)^2 - R_1^2} / (2\pi f). \quad (8.59)$$

Kai aktyviosios imtuvo varžos galime nepaisyti ($R_1 \ll 2\pi fL$),

$$L = U / (2\pi fI). \quad (8.60)$$

Kai aktyviosios imtuvo varžos nepaisyti negalime, ją galime išmatuoti ampermetru ir voltmetru, prijungdami matuojamąjį imtuvą prie nuolatinės įtampos.

Neatsižvelgdami į kondensatoriaus nuotėkio srovės,

t. y. laikydami, kad $R_2 = \infty$, jo talpinę varžą galėsime užrašyti šitaip: $X_C = U/I = 1/(2\pi fC)$. Iš čia:

$$C = I/(2\pi fU). \quad (8.61)$$

Praktiškai matuojamąjį elementą galima prijungti prie pramoninio dažnio tinklo, kurio dažnis $f = 50$ Hz ir beveik nekinta.

Tiksliau induktyvumas ir talpa matuojami specialiais elektroniniais prietaisais arba kintamosios srovės tilteliu. Jį sudaro keturi elementai, kurių varžos Z_1 , Z_2 , Z_3 ir Z_4 , kintamosios įtampos šaltinis bei matuoklis (8.48 pav.). Tiltelio pusiausvyros sąlyga:

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3. \quad (8.62)$$

Užrašę kompleksines varžas rodikline forma, gauname $Z_1 Z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = Z_2 Z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)}$. Kaip matome, tam, kad tiltelis būtų pusiausviras, reikia patenkinti dvi sąlygas:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad \text{ir} \quad \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3. \quad (8.63)$$

Tai reiškia, kad turime tinkamai parinkti ne tik tai tiltelio pečių elementų pilnutines varžas, bet ir elementų pobūdį.

Pavyzdžiui, idealaus elemento induktyvumą galime išmatuoti kintamosios srovės tilteliu, panaudodami etaloninės talpos kondensatorių (8.49 pav., a). Tiltelis subalansuojamas keičiant etaloninio rezistoriaus varžą R_3 : $X_e e^{-j90^\circ} X_x e^{j90^\circ} = R_3 R_2$. Irašę reaktyviųjų varžų X_e ir X_x vertes ($X_e = 1/(\omega C_e)$; $X_x = \omega L_x$) ir atlikę veiksmus, gauname:

$$L_x = (R_2 C_e) R_3 = K_1 R_3; \quad (8.64)$$

čia K_1 – pastovus koeficientas.

Pastebėsime, kad šį tiltelį galima subalansuoti tik tuo atveju, kai ritė ir kondensatorius įjungti priešinguose pečiuose.

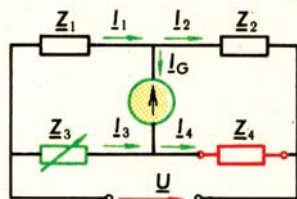
Kai matuojama kondensatoriaus talpa, jį reikia įjungti į kitą tiltelio pečių, nes kitaip tiltelis negali būti pusiausviras (8.49 pav., b). Subalansavus tiltelį, $R_3 X_e e^{-j90^\circ} = R_4 X_c e^{-j90^\circ}$. Iš čia

$$C_x = (C_e/R_4) R_3 = K_2 R_3; \quad (8.65)$$

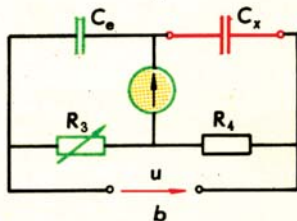
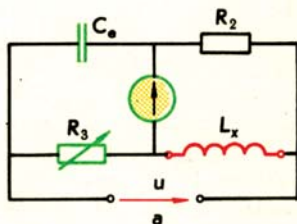
čia K_2 – pastovus koeficientas.

Induktyvumui ir talpai matuoti galima panaudoti ir induktyvumo etaloną. Tais atvejais, kai aktyviųjų varžų negalime nepaisyti, reaktyvieji elementai laikomi realiais. Jų parametrus – R_x ; L_x ir R_x ; C_x – galime matuoti analogiškai, bet turi būti žinomi ir etaloninių elementų R_e ; C_e arba R_e ; L_e .

Matuojant kintamosios srovės tilteliais, gaunamos 0,05–2,0% paklaidos.



8.48 pav. Kintamosios srovės tiltelis

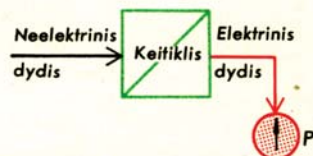


8.49 pav. Kintamosios srovės tiltelis, kuriuo matuojamas induktyvumas L_x (a); talpa C_x (b)

8.10

Neelektrinių dydžių elektriniai matavimai

Šiuolaikinėse pramonės įmonėse kontroliuojant ir valdant technologinį procesą, tenka matuoti daugelį neelektrinių dydžių. Dažniausiai tam tikslui yra naudojami elektri-



8.50 pav. Elektrinio prietaiso neelektriniams dydžiams matuoti struktūrinė schema

nių matavimų metodai ir priemonės. Tai paaiškinama jau anksčiau išvardytais elektrinių matavimų privalumais (žr. 8.1). Tenka pastebėti, kad elektrinių prietaisų, skirtų neelektriniams dydžiams matuoti, yra daug daugiau, negu elektriniams dydžiams matuoti. Tai visai suprantama, kadangi praktikoje tenka matuoti ar kontroliuoti daug daugiau ir įvairesnių neelektrinių dydžių.

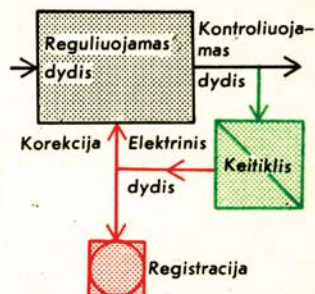
8.10.1. Matavimo principai; keitikliai. Kiekvieną elektrinį neelektrinio dydžio matavimo prietaisą (8.50 pav.) sudaro **dvi svarbiausios dalys: keitiklis, kuris paverčia neelektrinį dydį elektriniu, ir elektrinis matavimo prietaisas.**

Be šių svarbiausių grandžių dar gali būti ir kitokie papildomi elementai. Tai keitikliai, keičiantys elektrinį signalą į elektrinį: įtampos dalytuvai, šuntai, nuoseklieji rezistoriai, lygintuvai, elektriniai filtrai, stiprintuvai; matavimo rezultato registravimo įtaisai ir įvairūs kiti, taikomi elektriniams dydžiams matuoti. Neelektriniams dydžiams matuoti dažnai taikomos nepusiausvirų tiltelių ir kompensatorių schemas bei principai, matavimai automatizuojami, matavimo rezultatai registruojami ir naudojami technologiniam procesui valdyti (8.51 pav.).

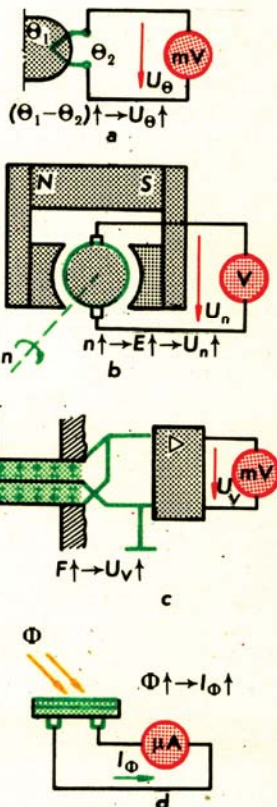
Svarbiausia kiekvieno keitiklio charakteristika yra jo išėjimo elektrinio dydžio priklausomybė nuo įėjimo neelektrinio dydžio. Ji vadinama pakeitimo funkcija. Dažnai ją tenka sudaryti eksperimentiškai, sugraduojant keitiklį pagal žinomą neelektrinį dydį. Pageidautina, kad pakeitimo funkcija būtų tiesė bent matuojamame neelektrinių dydžių diapazone. Be to, ji turi būti stabili ir nesikeisti laikui bėgant.

Kitos svarbios **keitiklio** charakteristikos yra jo **jautrumas ir tikslumas**. Be to, reikia, kad keitiklis neturėtų įtakos matuojamajam dydžiui. Pastarąjį reikalavimą patenkinti kartais būna gana sunku, todėl stengiamasi, kad ta įtaka būtų kuo mažesnė. Matuojant greitai kintančius dydžius, gali turėti reikšmės keitiklio dinaminės savybės, todėl tokiu atveju tenka parinkti mažai inertiškus keitiklius, kuriuose signalo pakeitimo trukmė yra maža.

Yra daug įvairių keitiklių, keičiančių neelektrinius dydžius elektriniais. Jų veikimo principas pagrįstas laidininkų, puslaidininkų bei magnetinių medžiagų savybėmis ar juose vykstančiais reiškiniais, kurių dauguma buvo nagrinėti pirmuosiuose šešiuose šios knygos skyriuose. Pagal veikimo principą **visus keitiklius galima suskirstyti į dvi grupes: 1) generatorinius, kuriuose neelektrinis dydis pakeičiamas EVJ; 2) parametrinius, kurių elektriniai parametrai – R, L, C – pakinta dėl neelektrinio dydžio poveikio.**



8.51 pav. Automatizuoto technologinio proceso valdymo schema



8.52 pav. Matuoklių su generatoriniais keitikliais pavyzdžiai: a – termoelektrinis pirometras; b – tachometras; c – pjezoelektrinis jėgos matuoklis; d – liuksmetras

Dažniausiai naudojami tokie **generatoriniai** keitikliai: **a)** termoelektriniai – juose termoelektrovaros jėga gaunama, kai termoporos galai yra nevienodos temperatūros aplinkoje; **b)** indukciniai – EVJ gaunama elektromagnetinės indukcijos principu; **c)** pjezoelektriniai – EVJ gaunama, deformuojant pjezokristalą; **d)** fotoelektriniai – EVJ gaunama, apšvietus generatorinį fotoelementą – fotodiodą.

Rezistoriniai keitikliai keičia varžą: **a)** reostatiniai – stumiant slankiklį; **b)** tenzometriniai – juos deformuojant; **c)** termorezistoriniai – kintant temperatūrai; **d)** fotorezistoriniai – kintant apšvietumui. **Induktyviniai** keitikliai keičia induktyvumą, dažniausiai keičiant jų magnetinės grandinės varžą. **Talpiniai** – keičia talpą, veikiant matuojamajam neelektriniam dydžiui.

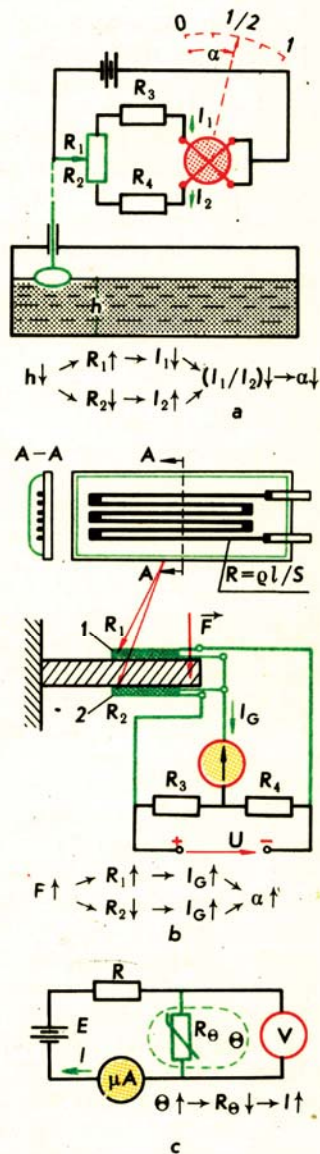
Tam pačiam neelektriniam dydžiui matuoti galima taikyti įvairius keitiklius (pvz., temperatūrai – termoelektrinį, termorezistorinį), o to paties tipo keitiklį galima naudoti įvairiems neelektriniams dydžiams matuoti (pvz., induktyvinį – lakšto storiui, mechaninei jėgai, poslinkiui ir pan.). Kadangi neelektrinių dydžių matavimo prietaisų yra labai daug ir įvairių, tai toliau pateiksime tik kai kuriuos jų pavyzdžius.

8.10.2. Matuokliai su generatoriniais keitikliais. Paprasčiausio ir dažniausiai naudojamo matuoklio pavyzdys yra **termoelektrinis pirometras, kurį sudaro termopora ir milivoltmetras** (8.52 pav., a). Kai termoporos dviejų skirtingų metalų sulitavimo taškas yra vienokios temperatūros (Θ_1) aplinkoje (pvz., krosnyje), o laisvi galai – kitokios (Θ_2), tarp jų gaunama EVJ, kuri matuojama temperatūros laipsniais sugraduotu milivoltmetru.

Indukciniai keitikliai dažniausiai naudojami tachometruose (žr. 8.52 pav., b) sukčių dažniui matuoti. Prie besisukančio veleno pritvirtinamas nuolatinės srovės generatoriuko inkaras. Jame indukuojama EVJ yra proporcinga sukčių dažniui n : $E = C_E \Phi n \approx U_n$ (nuolatinis magnetinis srautas $\Phi = \text{const}$). Voltmetro skalė sugraduojama sukiais per minutę.

Pjezoelektriniai keitikliai gali būti taikomi mechaniniams dydžiams matuoti (žr. 8.52 pav., c). Veikiant mechaninei jėgai \vec{F} , pjezokristalo plokštelėse elektros krūviai poliarizuojasi. Kadangi pjezoelektrinių keitiklių jautrumas yra nedidelis, gauta įtampa yra sustiprinama. Ji matuojama jėgos vienetais sugraduotu voltmetru.

Apšvietumui matuoti (žr. 8.52 pav., d) taikomas **fotodiodas – seleninis generatorinis fotoelementas**, kurį apšvietus gaunama EVJ. Jo trumpojo jungimo fotosrovė ma-



8.53 pav. Matuoklių su rezistoriniais keitikliais pavyzdžiai: a – skysčio lygio matuoklis; b – tenzometras; c – elektrinis termometras

tuojama jautriu mikroampermetru, sugraduotu apšvies-tumo vienetais – liuksais.

8.10.3. Matuokliai su parametriniais keitikliais. Rezi-storinis **reostatinis keitiklis** dažnai taikomas kokio nors rezervuaro **skysčio tūriui matuoti** (8.53 pav., a). Kartu su skysčiu aukštyn ar žemyn juda plūdė, kuri pastumia reostato slankiklį, pakeisdama reostato varžas R_1 ir R_2 . Dėl to pasikeičia srovės I_1 ir I_2 , nuo kurių santykio priklauso logometro rodyklės posūkio kampas. Prietaiso skalę galima sugraduoti skysčio lygio ar tūrio vienetais.

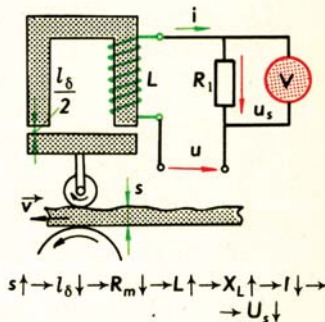
Deformacijos ar mechaninės jėgos dažnai matuojamos taikant tenzorezistorius (žr. 8.53 pav., b). Tenzorezistoriaus varža $R = \rho l/S$, čia ρ – specifinė laidininko varža, l – ilgis ir S – skerspjūvis. Tempiant tenzorezistorių, jo specifi-nė varža ir ilgis didėja, o skerspjūvis mažėja, todėl didėja keitiklio varža. Gniuždant šie pokyčiai priešingi, to-dėl varža mažėja.

Tenzorezistorius gali būti plona vielė, užklijuota ant plono popieriaus ar lako plėvelės. Jis pritvirtinamas prie deformuojamo paviršiaus. Tenzometro jautrumui padidinti ant abiejų paviršiaus pusių užklijuoti tenzorezisto-riai 1 ir 2, kurių varžos R_1 ir R_2 , yra įjungiami į nepusiau-svirą tiltelį. Kadangi tiltelio 1 ir 2 pečių varžos kinta prie-šingai (R_1 didėja, o R_2 mažėja), galvanometro srovė labiau priklauso nuo deformacijos, negu naudojant vieną ten-zorezistorių. Galvanometro skalę galima sugraduoti jė-gos ar kito jai proporcingo mechaninio dydžio vienetais.

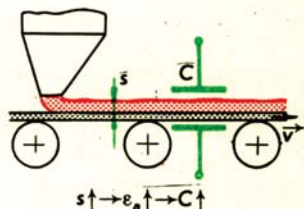
Termorezistoriai dažniausiai naudojami temperatūrai matuoti (žr. 8.53 pav., c). Termorezistoriaus varža R_θ pri-klauso nuo temperatūros. Pakitus matuojamajai tempe-ratūrai θ , pakinta grandinės srovė I . Srovės kitimo ribos parenkamos tokios, kad ji neturėtų įtakos termorezisto-riaus varžai. Mikroampermetras graduojamas laipsniais.

Induktyvinio poslinkio matuoklio (8.54 pav.) veikimas pagrįstas tuo, kad judantis kūnas pakeičia jo magnetinės grandinės varžą. Tarkime, kad oro tarpas (l_0) sumažėja. Dėl to sumažėja magnetinės grandinės varža R_m . Ritės induktyvumas $L = N^2/R_m$ (žr. (5.24) formulę), todėl jis pa-didėja. Dėl to padidėja ritės induktyvioji varža $X_L = 2\pi fL$. Kadangi ritė pagaminama taip, kad jos $R \ll X_L$, rite tekanti srovė ($I \approx U/X_L$) sumažėja. Įtampos kritimas elemen-te R_1 taip pat sumažėja. Voltmetrą galime susigraduoti poslinkio, mechaninės jėgos ar kokio kito matuojamojo dydžio vienetais.

Talpiniai keitikliai (8.55 pav.) gali būti naudojami ma-tuoti tokiems neelektriniams dydžiams, kurie keičia jų tai-pą: $C = \epsilon_a S/d$; čia ϵ_a – medžiagos, esančios tarp plokš-



8.54 pav. Induktyvinis poslinkio matuoklis



8.55 pav. Talpinis keitiklis dielek-trinės medžiagos storiui matuoti

telių, absoliutinė dielektrinė skvarba; S ir d – kondensatoriaus plokštelių plotas ir atstumas tarp jų. Kai matuojamas kokios nors dielektrinės medžiagos storis s , gaunamas ryšys $C=f(s)$. Talpiniai keitikliai yra jautrūs aplinkos sąlygų (pvz., drėgmės) pokyčiams. Matavimo prietaisų su talpiniais keitikliais grandinės gana sudėtingos.

Kontroliniai klausimai ir užduotys

8.1. Paašškinkite, kas tai yra:

- matavimas, matavimo priemonė;
- absoliutinė, santykinė, redukuota paklaida;
- sisteminė, metodinė, atsitiktinė paklaida;
- tikslumo klasė;
- skalės lygtis;
- matuoklis, atoveikio, atskaitos sistema.

8.2. Koku dėsniu pasiskirsto atsitiktinės paklaidos? Kaip jas įvertinti statistiniais metodais?

8.3. Kokie yra svarbiausi matavimo prietaiso skalės ženklai? Ką jie reiškia?

8.4. Kas yra rodyklinio prietaiso matavimo riba? Ar priklauso prietaiso absoliutinė ir santykinė paklaida nuo jo rodyklės padėties skalėje? Pateikite pavyzdžių.

8.5. Kokie yra tiesioginės atskaitos prietaisų bendrieji mazgai ir elementai? Kokia kiekvieno paskirtis?

8.6. Paašškinkite veikimo principą, užrašykite skalės lygtį ir nurodykite privalumus bei trūkumus prietaisų, kuriuose yra šie matuokliai: a – magnetoelektrinis; b – elektromagnetinis; c – elektrodinaminis; d – ferodinaminis; e – elektrostatinis; f – indukcinis.

8.7. Pasiremami struktūrine schema paašškinkite, kaip veikia: a – elektroninis voltmetras; b – elektroninis oscilografas; c – skaitmeninis voltmetras.

8.8. Kuo ypatingi lėtaveikiai ir greitaveikiai savirašiai prietaisai?

8.9. Pasiremami struktūrine schema paašškinkite, kaip veikia optinis oscilografas.

8.10. Kuo ir kaip matuojama srovė ir įtampa? Dėl ko gaunamos metodinės paklaidos ir kaip jų išvengti? Kaip galima praplėsti ampermetrų ir voltmetrų matavimo ribas?

8.11. Kaip galima matuoti EVJ? Kuo ypatingi kompensatoriai ir automatiniai potenciometrai?

8.12. Kuo ir kaip matuojama šių grandinių aktyvioji galia: a – vienfazės; b – trifazės trilaidės; c – trifazės keturlaidės?

8.13. Kaip matuojama varža: a – ommetru; b – megommetru; c – ampermetru ir voltmetru; d – tilteliu. Kuo ypatingas kiekvienas iš šių būdų? Kokios metodinės paklaidos gaunamos? Kaip tas paklaidas sumažinti ar jų išvengti?

8.14. Kaip matuojamas induktyvumas ir talpa?

8.15. Kaip matuojami neelektriniai dydžiai? Kokie gali būti keitikliai? Pateikite pavyzdžių.